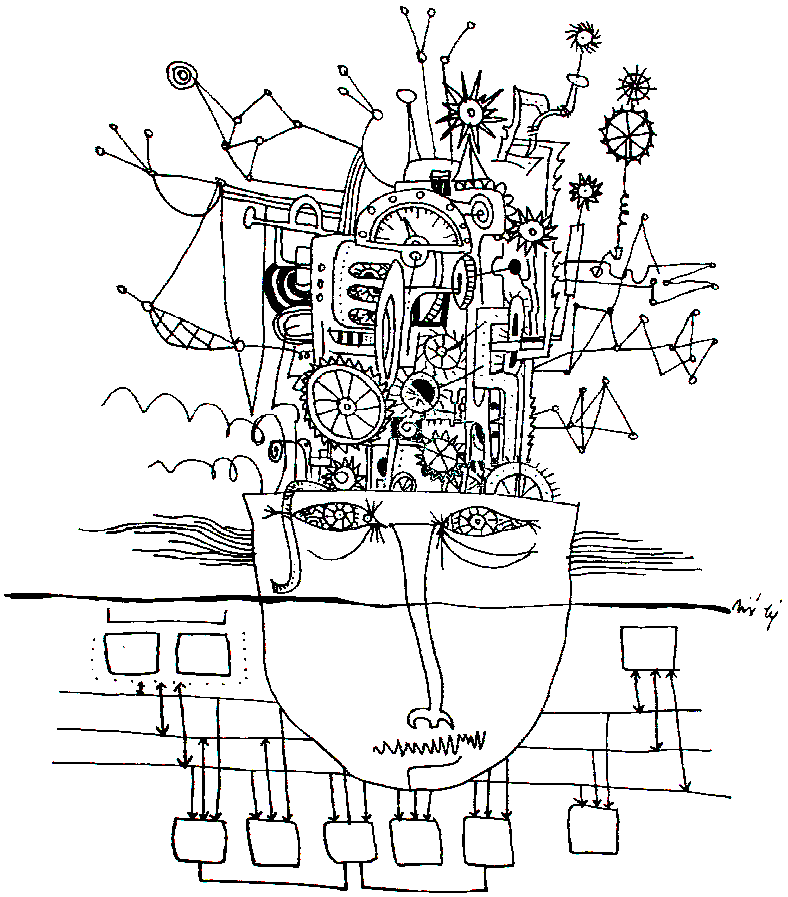
Györök György

Programozható analóg áramkörök mikrovezérlő környezetben



Lektor: Dr. Turmezei Péter Ph.D

ISBN 978-615-5018-97-8

Felelős kiadó: Az Óbudai Egyetem Alba Regia Egyetemi Központ főigazgatója
Székesfehérvár, 2013
Példányszám: 50

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés **6**
1.1. Előszó 6

2. Programozható analóg áramkörök **10**
2.1. A programozható áramkörök 10
2.2. Programozható analóg áramkörök működése 17
2.2.1. Valósidejű programozható analóg áramkörök 17
2.2.2. A diszkrét működésű FPAA-k 22
2.2.3. Kapcsolt kapacitások módszere 24
2.2.4. Konfigurálható analóg blokkok 32
2.2.5. A kapcsolómátrix 34
2.2.6. Programozható áramkörök konfigurálása 37
2.3. A programozható analóg áramkörök fejlődése 38
2.3.1. Az EPAC áramkör 40
2.3.2. A Motorola programozható áramköre 41
2.3.3. A TRAC nagysebességű programozható áramkör 42
2.3.4. A Lattice programozható áramkör családja 43
2.3.5. Az Anadigm FPAA áramkörei 46
2.3.6. Kevert-jelű programozható áramkör 51
2.4. Megállapítások 56

3. A programozható analóg rendszerek **57**
3.1. Programozható analóg áramkörök 58

3.2. Konfigurálható-rekonfigurálható áramkörök 60
3.3. Megállapítások 62

4. A robusztus elektronikus rendszerek 63
4.1. Robusztus analóg áramköri rendszerek 64
4.2. Robusztus analóg áramköri rendszerek kialakítása 66
4.3. Megállapítások 71

I Javasolt alkalmazási metodika 74

5. Programozható analóg áramkör mint transzfer tényező 75
5.1. Állapotfüggő transzfer karakterisztika 75
5.2. Analóg érték függő visszacsatolás digitális hálózatokban 77
5.3. Analóg érték függő visszacsatolás mikrovezérlő környezetben . . 80

6. Mikrovezérlővel támogatott rekonfigurálható áramköri megoldások 82
6.1. Áramköri funkció látens megváltoztatása 83
6.2. Programozható áramkörök illesztése paraméter transzformációval 85
6.3. FPAA mint jelfeldolgozó koprocesszor 89
6.4. Programozható analóg áramkör megszakításos kapcsolata mikrovezérlővel 90

7. Robusztus áramköri alkalmazások programozható analóg áramkörök felhasználásával 94
7.1. Robusztus áramkörök karakterisztikus predikcióval 95
7.2. Prediktív rekonfigurálás 97
7.3. Hibamaszkolás robusztus rendszerekben 99
7.4. Önszabályozó robusztus eljárás 102
7.5. Soros-párhuzamos analóg robusztus rendszer kialakítása 105

8. Önszabályozó adaptív rendszerek kialakítása programozható analóg áramkörökkel 109

8.1. Programozható analóg áramkör rekonfigurálása mikrovezérlő támogatásával 110
8.2. Programozható analóg áramkörök önkonfiguráló eljárása 114

9. Rekonfigurálható eljárások alkalmazása **119**
9.1. Akusztikus zajelnyomás programozható analóg áramkör dinamikus rekonfigurálásával 119
9.2. Átviteli karakterisztikát mérő készülék FPAA dinamikus rekonfigurálásával 122
9.3. EEG bementi egység programozható analóg áramkör dinamikus rekonfigurálával 128

10. Robusztus alkalamazás programozható analóg áramkörrel **136**
10.1. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozással 136

Ábrajegyzék **143**

Az alkalmazott szimbólumok **148**

Irodalomjegyzék **151**

1. fejezet

Bevezetés

1.1. Előszó

Eddigi mérnöki oktatói munkám során mindig is fotos volt számomra az analóg és digitális áramkörök, illetve a beágyazott vezérlők együttműködésének határterülete, ipari felhasználásának, műszaki alkalmazhatóságának kérdése.

Az analóg áramkörökből történő rendszertervezésnek két egymástól nem független lépése; a kapcsolás kialakítása és az alkatrészek paramétereinek meghatározása. Az áramköri topológia kialakítása tapasztalati módszerekkel, nagy szaktudást feltételezve történik.

Rekonfigurálható rendszerekben is az analóg áramkör, az analóg áramköri rendszer működőképességét, annak minőségét tudjuk az áramköri kapcsolás, vagy az egyes alkatrész értékek megváltoztatásával fenntartani illetve módosítani.

Bizonyos alkalmazásokhoz kizárólag robusztus, többszörösen ismétlődő, egymástól csak paramétereiben eltérő azonos topológiájú részáramkörökből álló rendszert kell felépíteni még abban az esetben is, ha ilyen analóg rendszereknek csak bizonyos részei aktívak egy adott pillantban.

Programozható analóg áramkörök alkalmazása esetén kisebb hely és teljesítményigényű, megbízhatóbb, a megváltozott feltételekhez jobban alkalmazkodó rendszereket hozhatunk létre, különösen ha az áramkör működésének megzava-

rása nélkül módosíthatjuk annak funkcióját, akár új topológia, akár csak új alkatrész paraméterek megadása révén.

A mérnöki tevékenységek legtöbbjénél a cél nagymértékben meghatározza a megvalósítási módszereket, vagyis folyamatos, „mit-hogyan" kompromisszumsorozat eredményeként jön létre az áramköri megoldás is. Ettől a megkötöttségeket jelentő kényszertől is elvonatkoztathatunk a programozható áramkörök alkalmazása esetén.

E könyv megírásánál a programozható analóg áramkörök megismerését, alkalmazási lehetőségeinek vizsgálatát, az áramkörök újszerű felhasználási területeinek kialakítását tűztük ki célul.

A felhasználási lehetőségek közül elsősorban a konfigurálható, rekonfigurálható áramkörök különféle alkalmazásával, a robusztus analóg áramkörök, áramköri rendszerek megvalósíthatósági kérdéseivel foglalkozunk. Vizsgálódásaink középpontjában a beágyazott mikrovezérlők és a programozható analóg áramkörök együttműködésének kialakítása, kiterjesztése és újszerű alkalmazási lehetőségei állnak.

A könyv első részében a programozható analóg áramkörök fejlődésének és működésének leírása, értelmezése után olyan alkalmazási területek bemutatása következik amelyekben azok sikeresen alkalmazhatók. Ezt követően olyan lehetséges felhasználási területek bemutatására kerül sor, amelyekben a programozható analóg áramköri megoldások további előnyöket, újszerű megoldásokat adnak.

A második részében megismert programozható analóg áramköri működések és lehetőségek után a következőkben olyan új alkalmazási területeket ismerhetünk meg, amelyek a hagyományos analóg áramkörökkel csak körülményesen, bonyolultan, drágán valósíthatók meg. Újraértelmezünk olyan klasszikus áramköri megoldásokat, illetve olyan újszerű megoldásokat mutatunk be, amelyekben az eddigi alkatrész készlettel csak nehézkesen vagy egyáltalán nem lehetett megvalósítani bizonyos eljárásokat.

Megvizsgáljuk annak lehetőségét, hogy a programozható analóg áramköröket miként tudjuk felhasználni hibrid alkalmazásokban az átviteli karakterisztika módosítására.

Elemezzük a programozható analóg áramkörök alkalmazhatóságát, a 3. feje-

zetben leírt programozható analóg rendszerekben. Olyan alkalmazási területeket keresünk, ahol fontosak a konfigurálhatóság és rekunfigurálhatóság által nyújtott előnyök.

Megoldásokat ismerhetünk meg, amelyekben a beágyazott mikrovezérlő és a programozható analóg áramkör kooperatív együttműködése az áramköri rugalmasság kihasználásának lehetőségeire ad újabb, használható megoldásokat.

Megismerhetünk olyan eljárásokat, amelyekben a programozható analóg áramkörök konfigurációs és rekonfigurációs lehetőségeinek kihasználásával a 4. fejezetben leírt robusztus elektronikai rendszerek egyszerűbben és gazdaságosabban valósíthatók meg a beágyazott mikrovezérlő és a programozható analóg áramkörök együttműködésének újszerű lehetőségeivel.

Ezek alapján olyan gyakorlati alkalmazásokat keresünk, amelyekben az elvi analóg áramköri robusztusság, a fenti módon történt megvalósítása, pragmatikus előnyöket jelent.

A programozható analóg áramköröket tartalmazó rendszer és a konfigurációs eljárás kölcsönhatásaiból származó előnyöket, lehetőségeket ismerhetjük meg, ajánlásokkal ezek optimális kialakítására csakúgy, mint a nagyobb rendszerek kialakításának lehetőségeivel, az ebből származó előnyökkel.

Terjedelmi korlátok miatt, a fenti ajánlások folyományaként néhány gyakorlati alkalmazással is szemléltetni kívánjuk egyik-másik javasolt megoldás működőképességét, a leírtak használhatóságát, hasznosságát.

A terület alaposabb megismerésért köszönöm Dr. Arató Péter akadémikus segítségét, bíztatását, támogatást. Hálás vagyok Dr. Turmezei Péter lektori tanácsaiért.

Székesfehérvár, 2009-20013

Dr. Györök György

Előzmények áramköri és technológiai háttér

2. fejezet

Programozható analóg áramkörök

2.1. A programozható áramkörök

Az elektronikai iparban az egy alkatrészre vonatkoztatott előállítási költség akkor a legkisebb, ha az eszköz nagy sorozatban gyártható. Az alkalmazási igények azonban nem uniformizálhatók egy határon túl. Így, részint gazdasági megfontolásból olyan eszközöket kell gyártani, amelyek az elkészülésük pillanatában bizonyos mértékig azonosak és később egy programozási, konfigurálási eljárással tudjuk olyanná alakítani, amilyenre az adott áramkörben felhasználva szükségünk van. Ide sorolhatók már az első megjelent mikroprocesszorok beágyazott vezérlőként történő felhasználása, majd a mikrokontrollerek sokfélesége.

A konfigurálható rekonfigurálható hardver megoldások mindíg is nagy érdeklődésre tartottak számot az elektronikus áramkörtervezők körében. A programozható logikai áramkörök[1] nagy sorozatban készülnek, amelyben a tényleges áramköri struktúrát a felhasználó alakítja ki. Az 1960-as 1970-es években megjelent legelső PLD-k fejlődése mind a mai napig tart, felhasználásuk széleskörű [9] [124] [12].

[1] Programmable Logical Device, (PLD)

Digitális áramkörökben már az első felhasználó által programozható csak olvasható memóriák (PROM) is, egyfajta megközelítés szerint, tartalomfüggő kombinációs hálózatként jellemezhetők a címvezetékek és az adatvezetékek kapcsolatát illetően [6].

Ma már általánosan használatosak a digitális áramkör realizációban a programozható logikai elemek[2]. Programozható digitális áramköreit számos gyártó ajánlja különböző kiépítettségben, egészen a negyvenezer kapu-ekvivalencia bonyolultságú típusokig[3].

A digitális jelprocesszorok[4] az 1980-as évek elején jelentek meg[5]. Ezek az eszközök kvantált analóg jelek diszkrét-időtartományban történő manipulálást teszik lehetővé, programozható algoritmussal. A DSP eszközök architektúrája a javasolt felhasználás függvényében eltérő, fejlesztői környezete, fejlesztői támogatottsága általában igen jó. E processzorok fejlődése is több dimenzióban mérhető. Az egyre nagyobb teljesítőképesség igénye miatt hatékonyabb architektúrák, nagyobb adatszélesség és működési frekvencia vált szükségessé. Ezzel együtt igény van olyan jelprocesszor típusokra, ahol a nem túl nagy processzálási teljesítmény, igen kis villamos teljesítmény-igénnyel párosul. Ide sorolhatók azok a különleges, de alapvetően DSP technológiát felhasználó, előre „programozott" nagy sorozatban gyártott speciális alkalmazásokat kiszolgáló integrált áramkörök, amelyek leginkább a szórakoztató elektronika, telekommunikáció,. . . ,stb. területén terjedtek el [22].

A nagysorozatú gyártásnak természetes kiszolgáló alkatrész technológiája a berendezés orientált integrált áramkör[6], melyek előállítása is csak nagy sorozatú gyártás mellett gazdaságos.

Természetes egyedfejlődés eredményeként e három alapvetően különböző technológia bizonyos közeledése, keveredése figyelhető meg [127]. Megjelentek azok a „szoftprocesszorok" amelyek valamilyen elterjedt mikroprocesszor architektú-

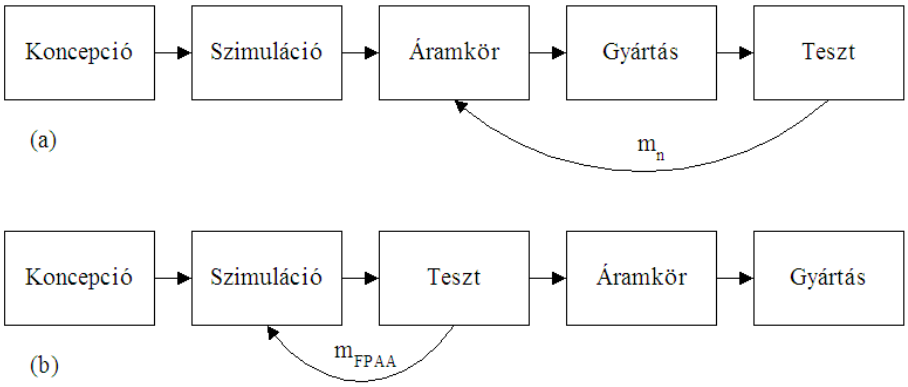
[2]Programmable Array Logic, (PAL)

[3]Generic (Gate) Array Logic (GAL), Field-Programmable Gate Array (FPGA), Field-Programmable Object Array (FPOA), Programmable Logic Array (PLA), Programmable Logic Device (PLD), Output Logic Macrocells (OLMC),. . . ,stb.

[4]digital signal processor (DSP)

[5]Texas Instruments TMS32010, 1983

[6]Application-Specific Integrated Circuit (ASIC), berendezés orientált áramkör (BOÁK)



2.1. ábra. Analóg áramkör fejlesztése (a) hagyományos módszerrel, és (b) FPAA-val megvalósítva.

rát írnak le, programozható digitális áramkörbe[7] tölthető módon[8]. Így, a programozható digitális áramkör tartalmazhatja a kívánt mikroprocesszort, esetleg annak periféria-áramköreit, vagy egyéb logikai hálózatot is. Ezzel együtt terjednek a mikroprocesszor és a digitális jelprocesszor architektúráját bizonyos mértékig egyesítő mikroprocesszor-DSP[9] eszközök, amelyek, túl a hagyományos digitális képességeik mellett, DSP funkciót is elláthatnak[10] [65, 123].

A fentieken túl 1982-ben megjelent egy újabb alkatrész, újabb technológia, a programozható analóg áramkör[11]. A folyamatos fejlődés eredményeként (2.3 szakasz), ezek az eszközök digitális felületen programozhatóan, analóg áramköri topológiát alakítanak ki az ugyancsak programozhatóan megadott alkatrész paraméterekkel [72] [10] [78] [28] [16] [112] [115].

[7] field-programmable gate array (FPGA)

[8] OSU8, PDP-10 Clone, MIPS R3000, C-31 (MIPS)

[9] Digital Signal Controller (DSC)

[10] pl. dsPIC30F6010A/6015

[11] Field-Programmable Analog Array (FPAA). Különböző gyártók ide vonatkozó elnevezése sem egységes, már csak marketing megfontolásból sem. A továbbiakban ezt a rövidítést fogom általánosan használni.

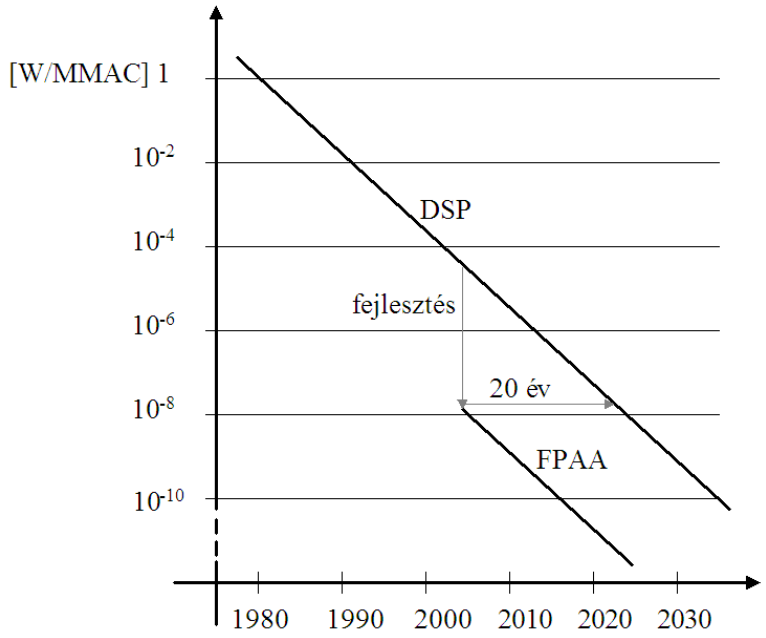
Az FPAA-k előnyösen használhatók különböző funkcionális egységek, áramkörök, áramköri részletek, kialakítására. Ezek az áramkörök olyan alkalmazásokban használhatók fel célszerűen, ahol fontos a felvett villamos teljesítmény alacsony volta, a kisebb fejlesztési-, illetve alkatrészköltség, a hatékony elektronikus CAD lehetősége. Jellemzően a hordozható készülékekben, analóg jelkondicionálásnál, analóg interfészekben, szűrőkben, jelforrásokban, szabályozó berendezésekben, szórakoztató elektronikai eszközökben fordulnak elő egyre gyakrabban. A felsoroltak miatt egyre növekvő igény tapasztalható az analóg áramkörök programozható áramkörökben történő megvalósítására, az FPAA-k felhasználására [1, 122].

A programozható analóg áramkörök alkalmazásával jelentősen csökkenthető egy termék fejlesztéséhez szükséges idő, gyorsabban elkészülhet a mintadarab. A 2.1 (a) ábra az elektronikai fejlesztés hagyományos lépéseit mutatja, ahol az elkészült prototípus tesztelése után módosítjuk az áramkört, az m_n-nel jelölt visszacsatolás mentén. Ha programozható analóg áramkört használunk a fejlesztéshez (2.1 (b) ábra), akkor a visszacsatolás (m_{FPAA}) a gyártás megkezdése előtt megvalósítható. Utóbbi esetben, a számítógéppel támogatott tervezésnek köszönhetően, hatékony fejlesztési környezet áll rendelkezésre. Az FPAA felhasználásával az analóg áramkör kialakítása gyorsabbá válik, a kialakított áramkör szimulációk-iterációk eredményeként a specifikációnak megfelelő lesz.

Az FPAA-k jelentősége a gyorsabb gazdaságosabb áramkörtervezés terén igen nagy. Előnyösen használható önfejlesztő áramköri alkalmazásokban [5] [116] [71], neurális hálókban [83], jelkondicionálásnál [72], szűrőkben [21] [103], fuzzy vezérlésekben [97] és nagyfrekvenciás alkalmazásokban [26]. Más megközelítés szerint az FPAA-k felhasználása az analóg rendszer lineáris és nem lineáris implementációját, a megvalósítandó alkalmazás skálázhatóságát is szolgálja [10] [104]. Mindezekkel együtt a felsorolt előnyök nem átütők, mivel nagyon nehéz, „felhasználóbarát" FPAA-t és környezetet kialakítani. Kereskedelmi termékként kapható FPAA-k között a piaci részesedés a kisebb, egyszerűbb architektúrájú típusok esetén nagyobb [109, 110].

Olyan javaslatok is születtek, ahol a kevert jelű architektúrát duplikálva kell kialakítani, így ez az áramkör alkalmas lesz rekonfigurálható, öntanuló [12] eljá-

[12] Evolutionary Computation, Genetic Algorithms



2.2. ábra. A Gene-törvény DSP és FPAA eszközökre.

rások algoritmusok megvalósítására a háttérben történő újraprogramozás révén [105].

Csupán néhány gyártó forgalmaz programozható analóg áramköröket, egyre változatosabb áramköri kiépítésben és egyre nagyobb fejlesztői támogatottsággal. Ezzel együtt a piaci részesedés elég alacsony maradt, bár nem egy eszköz és technológia nagyon sikeresnek bizonyul.

A programozható analóg áramkörök DSP eszközökkel összehasonlított előnye a ralativ kisebb táp-energia igény (2.2 ábra [113]). A DSP-kre meghatározott Gene-törvény szerint másfél évente megfeleződik az egységnyi utasítás elvégzéhez (MMAC[13]) szükséges villamos teljesítmény [24]. Az analóg jelfeldolgozó eszközöknek, az ábrán láthatóan, a teljesítmény igény területén mintegy

[13]Millions of Multiply Accumulates per second

húsz év előnyük van a DSP eszközökkel szemben. A villamos teljesítmény igény nem csökkenhet akármilyen kis értékig, már csak azért sem mert az alkalmazott analóg-digitál átalakítók felbontása öt évente átlagosan 1,5 bittel nő, ami többlet villamos teljesítmény szükségletet jelent [19].

A ma alkalmazható típusoknál a zaj paraméterek jelentős javulása mellett, kisebb a teljesítmény igény, lehetővé válik a szükséges áramköri megoldások allokálása, a tervezői környezet erőforrásai felhasználhatók [27] [97] [60] [59].

Természetes FPAA előnyt jelent az olyan alkalmazás ahol, az *analóg-digitál átalakítás — mikrovezérlő — digitál-analóg átalakítás* láncolatát szükséges működtetni. Tipikusan ilyen az érzékelők és beavatkozók között elhelyezkedő mikrovezérlő konstelláció legtöbbje.

Az FPAA alkalmazások túlnyomó többsége lehetővé teszi a felhasználónak, hogy digitális algoritmus (nagy számításigény) nélkül az újra konfigurálás lehetőségével élve, az analóg áramkört a kívánt funkciónak a legmegfelelőbben használhassa.

Az FPAA-k további előnye az egyszerű beilleszthetőség nagyobb hibrid és digitális rendszerekbe.

A nagy analóg processzálási igények kielégítésére fejlesztések folynak a nagy integráltságú FPAA eszközök területén, amelyekben a hagyományos FPAA funkciókon túl komplex programozható alkalmazások vannak: magasabb-rendű szűrők (Fourier-processzor), adaptív szűrő hálózatok, vektor-szorzó, mátrix-szorzó. A használatos eszközök és a lehetséges funkciók kapcsolatát mutatja a 2.1 táblázat [61].

A programozható analóg áramkörök előnyei közé sorolható a kisebb geometriai méret, a kevesebb kivezetés, az olcsóbb tokozás, a térfogategységre jutó fajlagosan kisebb disszipáció.

Az FPAA áramkörök reményteljes felhasználási területének mutatkozik a különféle érzékelőkben történő felhasználás. Itt az analóg jelet egy preprocesszálás (erősítés, szűrés,... stb.) után továbbítjuk, vagy digitalizáljuk. Ide tartoznak a mobil (terepi) műszerek is, ahol az egyik fontos szempont a kis villamos teljesítményigény.

Az FPAA-k kiváló lehetőséget adnak az oktatásban történő felhasználásra. Kínálja magát az a megoldás, amikor egy mérendő áramkört kialakítva, annak viselkedését általános célú műszerekkel vizsgálhatjuk. Ilyenkor könnyen tudunk

Funkció, lehetőség	DSP-MCU	Analóg áramkör	FPAA	Fourier-FPAA
Programozhatóság	++	–	++	++
Szűrő	+	++	++	++
Lineáris	++	+	++	++
Nem lieáris	+	++	++	++
Vektor-mátrix	+	+	+	++
Lineáris fázisú szűrő	++	–	+	+
Adaptivitás	+	–	+	+
Késleltető művonal	++	+	+	+

2.1. táblázat. A DSP, a hagyományos analóg áramkörök és az FPAA alkalmazhatóságainak összehasonlítása (++: ajánlott, +: lehetséges, –: nem lehetséges).

valamilyen paraméterértéket megváltoztatva más áramköri viselkedést kialakítani.

A programozható analóg áramkörök, „deszkamodellként” is lehetőséget adnak, az áramkör-, áramköri részlet vizsgálatára, akár csak egy nagyobb rendszer elemként is.

Többértékű logikákban [97], neurális hálókban, kevert jelű processzorok digitális és analóg [86] áramkörökben, amelyekben a hagyományos mikroprocesszort egy szilícium lapkára integrálják a kis teljesítményű analóg áramköri elemekkel, kínálnak újabb alkalmazási területeket.

A programozható analóg áramkörök terén megoldandó fejlesztések: sebesség, pontosság, digitális zaj, analóg zaj, teljesítményfelvétel, erőforrás allokálhatóság (az FPAA-k teljesítőképessége, alkatrész-szintű konfigurálhatóság), erőforrás felhasználhatóság, hatékony architektúrák, fejlesztői környezet szolgáltatásai, makrók, szimuláció, dinamikus átprogramozás [125, 18, 93, 8].

Ugyancsak a megoldandó fejlesztések közé tartozik a programozható analóg áramkörök alkalmazásainak kutatása, felhasználási lehetőségeinek kiterjesztése.

2.2. Programozható analóg áramkörök működése

Az programozható analóg áramkörökben[14] különböző, típustól függő nagyságú és funkciójú áramkört, áramköri részletet tudunk kialakítani, széles tartományban programozható elemkészlettel. Az FPAA-k két funkcionális elemmel építkeznek: konfigurálható analóg blokk[15], és a kapcsoló mátrix[16]. A kapcsoló mátrix feladata a hálózat kialakítása, amelyben elemként az egyes CAB-ek ki- és bemenetei[17], illetve az FPAA megfelelő ki- és bemenetei[18] szerepelnek.

A CAB-ek a konfigurálásukat követően, különböző analóg áramköri funkciót valósítanak meg, szűrőket, összeadókat, jelforrásokat, integrátorokat, differenciatorokat, erősítőket,..., stb. A CAB-ek mindegyike aktív elemként legalább egy műveleti erősítőt tartalmaz. A konfigurálható analóg blokkok, működése kétféle, időben folytonos (valós idejű), vagy időben diszkrét (diszkrét idejű) lehet.

Az 2.3 ábra egy programozható analóg áramkör blokkvázlatát mutatja. Az egyes konfigurálható blokkok ($CAB_A - CAB_n$) paramétereinek kialakítását, illetve a kapcsolómátrix vezérlését a konfigurációs memória végzi. A kapcsolómátrix végzi az áramkör kialakítását, az FPAA megfelelő bemeneteinek és kimeneteinek, valamint a CAB-ek szükséges felületeinek összekapcsolásával.

2.2.1. Valósidejű programozható analóg áramkörök

Ezek az áramkörök időinvariáns, állandó releváns értékű alkatrészeket használnak, legyenek azok passzívak (kondenzátor, ellenállás) vagy aktívak (műveleti erősítő, tranzisztor). Ezeket egy kapcsolómátrix segítségével köthetjük össze. A passzív érétkek pontos beállításához leggyakrabban alkalmazzák a bináris súlyozású ($\rho, 2\rho, 4\rho, \ldots, 2^{n-1}\rho$) alkatrészértékeket. Így a kialakítható alkatrész-paraméter (ρ_s) értéke (2.1) szerint írható fel:

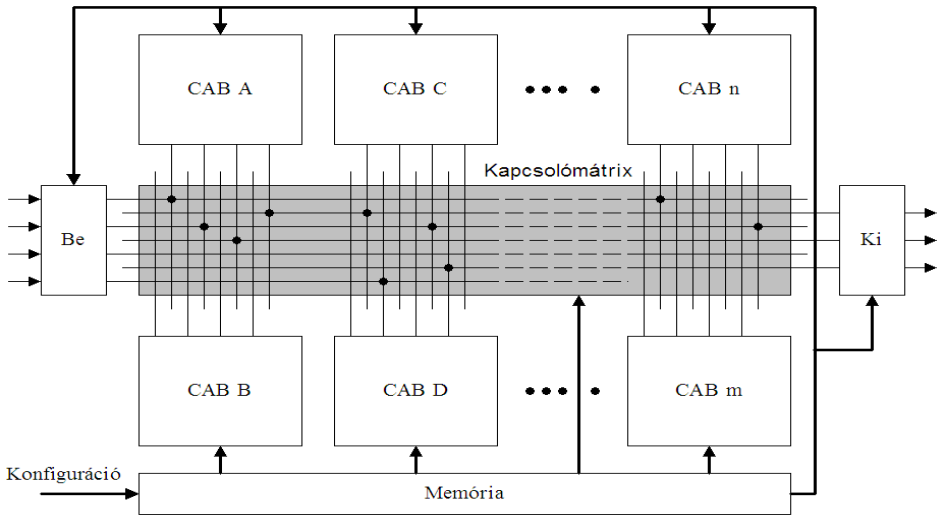
[14] Számos elnevezés használatos, amely sokszor terminológiai különbséget is jelent: Field-Programmable Mixed-Signal Array (FPMA), Field Programmable Analog Device (FPAD), Totally Reconfigurable Analog Circuit (TRACs), Programmable System-on-Chip (PSoC)

[15] Configurable Analog Blokk (CAB)

[16] Interconnection Network (IN)

[17] local I/O

[18] global I/O



2.3. ábra. Egy programozható analóg áramkör belső felépítése.

$$\rho_s = \rho \sum_n (2^0 B_0 + 2^1 B_1 + 2^2 B_2 +, \ldots, +2^{n-1} B_{n-1}), \tag{2.1}$$

ahol: B_n egy n helyiértékű bináris szám.

Az időtartományban folytonos működésű FPAA-k határfrekvenciáját az alkalmazott aktív és passzív elemek határfrekvenciája határozza meg, így ezek felhasználásának korlátai előre meghatározhatók [85]. Az időtartományban folytonos programozható analóg áramkör minőségparamétereként említik az alkalamzott kapcsolók lehető legkevesebb számát, mivel ez architekturális és zaj problémákat vethet fel [97] [26].

A programozható áramkörök granualitásaként határozzák meg a legkisebb programozhatósági egységet, a legkisebb áramköri részletet. Legkisebb programozható egységként a tranzisztor nevesíthető amely lehet, bipoláris vagy MOS. Az időtartományban folytonos FPAA-kban nem igazán különíthető el a CAB-ekben levő kapcsolómátrix, a CAB-ek összekapcsolását végző kapcsolóktól.

Alapvetően az alkalmazott áteresztő tranzisztorok nemlineáris viselkedése korlátozza az FPAA-ban kialakított analóg áramkör tulajdonságait. Olyan megoldásokban ahol valamilyen integrált ellenállást használunk, az ellenállás zaja és annak hőmérsékletfüggő változása lesz az, ami jelentősen rontja az áramkör bizonyos jellemzőit [95] [128] [82]. A programozható áramköri elemként, a csak tranzisztort tartalmazó megoldások a lehető legnagyobb rugalmasságot engedik meg egy teljes, rendszerszintű áramkör kialakításánál. Hátránya ennek a megoldásnak a nagy mennyiségű diszkrét elem és a sok vezérelt kapcsoló szükségessége, aminek következtében a kialakított áramkör zaja megnő, a kapcsolók impedanciájából adódóan a sávszélesség csökken [20] [98] [72].

Az alkatrészszintű topológia kialakítása igen előnyös, ha valamilyen, „önfejlesztő, önhangoló" eljárást szeretnénk megvalósítani. Ilyenkor a hagyományostól eltérő struktúrák is keletkezhetnek, természetesen olyanok is, amelyek csak elvi megoldást jelentenek, mivel a kapcsolók nagy száma, az alkalmazott ellenállások mennyisége a fentebb említett minőségromlást eredményezik [3] [5].

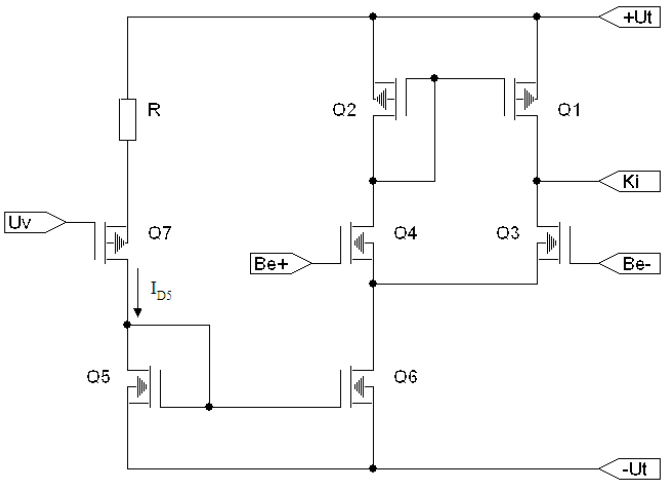
Ha a programozható analóg áramkör nagy egységekből építkezik (2.3.1 fejezet), akkor az áramkör univerzális felhasználhatóságának elve sérülhet. Az egyik korai programozható analóg áramkörben levő műveleti erősítők alapvetően jelkondicionálásra szolgáltak, így a lehetséges topológia kialakíthatósága is meglehetősen behatárolt volt [72].

A valós idejű FPAA-k legtöbbje, az áramkör granualitását illetően, a két említett marginális típus között található. Alapelemként legtöbbször transzkonduktancia erösítő[19] alapáramkört használnak. Az OTA mint a CAB-ek aktív eleme, széles tartományban felhasználható lineáris és nemlineáris alkalmazásokban is. Az OTA használata előnyös, mivel az áramtükör bemenő áramának változtatásával az erősítési tényező is egyszerűen változtatható [2].

Az 2.4 ábrán a transzkonduktancia erősítő leggyakoribb áramköri megvalósítása látható. Az $U_t - U_v$ függvényében $Q_7 - R$ áramgenerátor I_{D5} áramát $Q_5 - Q_6$ áramtükör $Q_3 - Q_4$ differenciálerősítő munkaponti áramát határozza meg, ami itt erősítés paraméter.

Mivel az FPAA-s szintézis a lineáris áramkörök területén a leggyakoribb (szűrők integrátorok, erősítők,...,stb.), ezért a CAB-ek is lineáris holtidős vagy holt-

[19] Operational Transconductance Amplifier (OTA)



2.4. ábra. A transzkonduktancia erősítő egy áramköri megvalósítása.

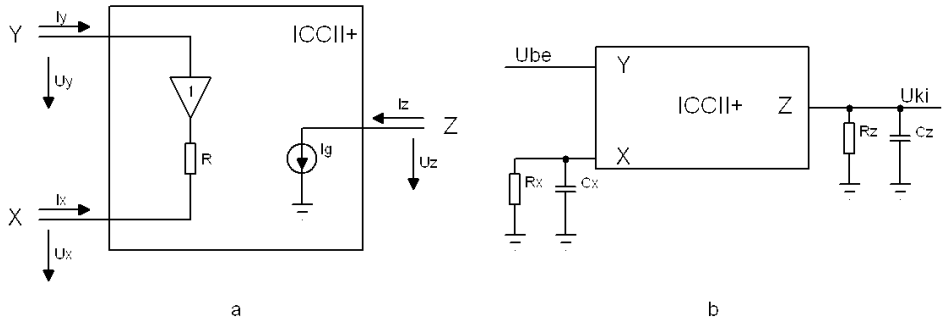
idő nélküli integrátort használnak alaptagként [115]. Nemlineáris funkciók is megvalósíthatók lineáris OTA alaptag szorzó, osztó, hatványozó, exponenciális, vagy egyedi műveleti erősítőként történő alkalmazásával [114].

A valós idejű FPAA-k CAB realizációjánál a másik elterjedt megoldás az áramkonvejor alkalamzása [92] [7] [66]. Ez a kialakítás hasonlít az OTA-nál alkalmazotthoz, azonban itt a sávszélesség az erősítéstől független, így a stabilitást biztosító kompenzáló elemek nélkül is nagyobb eredendő határfrekvenciát tudunk megvalósítani.

Megjelent a második generációs konvejor, két-két programozható kapacitással és ellenállással [26]. Ezzel a CAB nagyon jól használható programozható erősítők és szűrők kialakítására, illetve egy beapcsolható dióda beiktatásával exponenciális és logaritmikus erősítés megvalósítására [102].

A 2.5 ábra egy ICCII+ [20] áramkonvejort ábrázol, a ki-, és bemeneti áramok és feszültségek értelmezésével. Az 2.5 (a) ábra jelöléseit felhasználva a transzkonduktancia paraméterek felírhatók a (2.2) szerint:

[20]Second Generation Current Conveyor 'Positive'



2.5. ábra. Az áramkonvejor és egy alkalmazása szűrő áramkörben.

$$\begin{bmatrix} I_y \\ U_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_y \\ I_x \\ U_z \end{bmatrix}. \tag{2.2}$$

A 2.5 (b) ábra jelöléseivel az U_{ki} értékét a (2.3) adja meg:

$$U_{ki} = U_{be} \frac{R_z(1+sR_xC_x)}{R_x(1+sR_zC_z)}. \tag{2.3}$$

Egyes megközelítés szerint CAB alaptagként erősítő-integrátort alapáramkört célszerű használni [98], illetve úgynevezett kaszkád árammódú integrátort kell alkalmazni. Az erősítési, csillapítási, integrálási funkcióknál így minimalizálható a beiktatott kapcsolók száma [103].

A valós idejű megoldásoknál az aritmetikai blokk analóg alkatrészekkel, az említett zaj és linearitási problémák miatt, csak körülményesen valósítható meg. Külső alkatrészek felhasználásának hátránya a nem skálázható paraméter, emiatt az FPAA technológia elveszíti a legtöbb előnyét. Az impulzus-szélesség moduláció, többnyire a korai FPAA-kban használt elv, amelynek előnye, hogy egyszerű digitális interfészt kialakítani (2.3.4 szakasz).

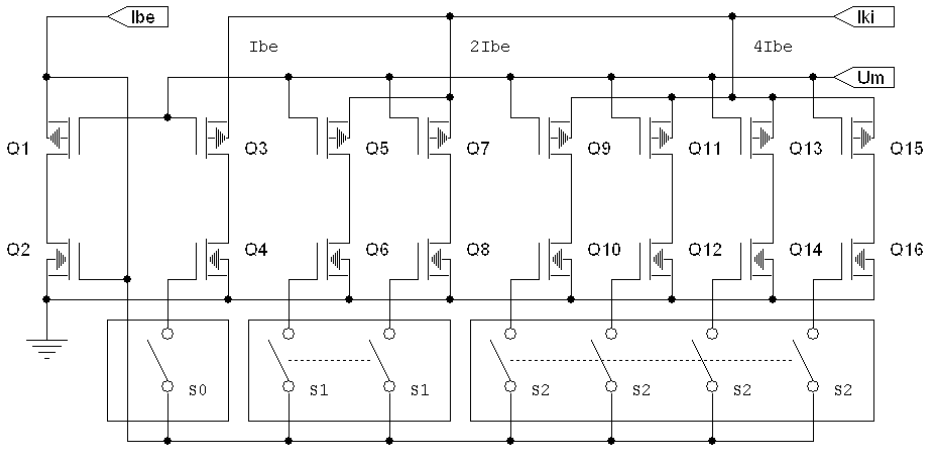
A különböző technológia megoldásokat hasonlítja össze az 2.2 táblázat [61].

A programozható elem	Előny	Hátrány	Alkalmazás
Tranzisztor	Kicsi Egyszerű CAB Általános blokkok	Sok kapcsoló Áramköri paraziták	Önfejlesztő áramkör
Műveleti erősítő OTA Áram konvejor	Kis uniformitású blokkok Közepes CAB méret Változatos CAB kialakíthatóság	Korlátozott nagyság Funkciófüggő teljesítmény	Szűrők Erősítők Jelkondicionálás Alacsonyszintű jelfeldolgozás
Fourier processzor	Nagy teljesítmény Egyszerű felhasználói interfész	Korlátozott rugalmasság Korlátozott funkcionalitás	Szűrők Jelkondicionálás

2.2. táblázat. A valós idejű programozható analóg áramkörök összehasonlítása

2.2.2. A diszkrét működésű FPAA-k

A publikációkban csakúgy, mint a kereskedelemben egyre-másra jelentek meg a különböző kapcsolt kondenzátoros architektúrák leírásai, illetve maguk az áramkörök. Az elméleti munkákban az egyszerű műveleti erősítőtől [17] [73] a hurokba kapcsolt integrátorokat tartalmazó, jóval komplexebb konfigurálható analóg blokkokig [77] találhatunk tanulmányokat, ajánlásokat. Ezen FPAA-k programozhatóságát a kapcsolt kapacitások (úgy is mint virtuális ellenállások) programozhatósága jelentette. A Motorola volt az első aki az MPAA020 és az MPAA1000 sorozattal, mint kereskedelemi termékkel jelent meg (2.3.2 szakasz). Ekkortájt a még igencsak újonc Anadigm korporáció, az Egyesült Államokban hozta forgalomba az első kapcsolt kapacitások elvén működő FPAA-t, amelynek CAB-jében kettő különböző műveleti erősítő-, programozható kondenzátor-bank, fokozatos közelítés elvén működő analóg-digitál átalakító-, és egy nagysebességű komparátor volt (2.3.5 szakasz). Mindazonáltal az első Anadigm áramkörök meglehetősen szerény, ám igen jól átgondolt szolgáltatást nyújthattak a négy konfigurálható blokkjukkal [120].



2.6. ábra. A kapcsolt áramok módszerének egy alkalmazása.

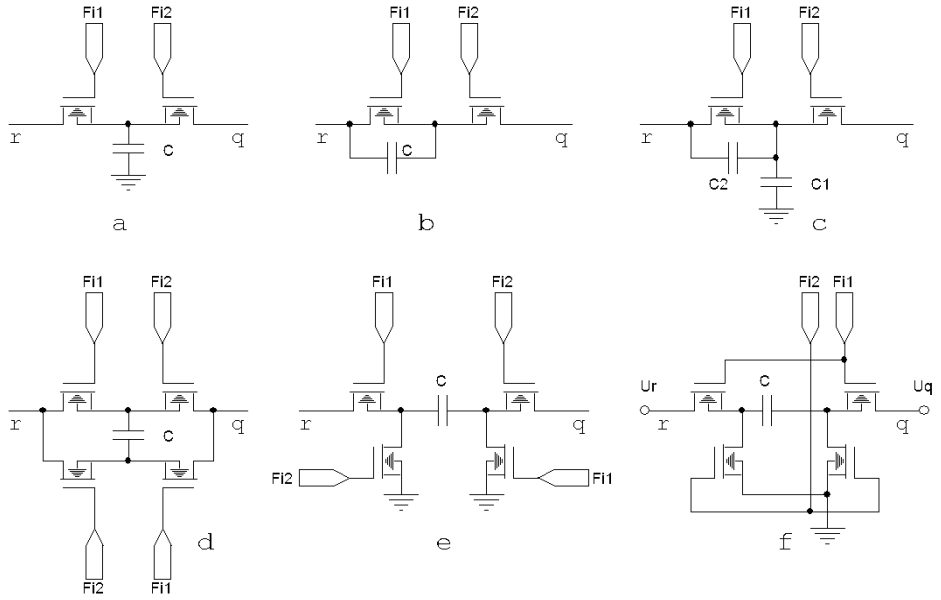
A kapcsolt kondenzátorok módszere mellett a diszkrét[21] FPAA-k használják a kapcsolt áramú eljárást is [11]. Az 2.6 ábrán látható kapcsolás egy vezérelt többfokozatú áramtükör, az alkalmazott FET-ek lebegő gate-es eszközök [61]. A Q_3, Q_5,...,Q_{15} tranzisztorok munkapontját U_m feszültséggel állítjuk be. A Q_4 Q_6,...,Q_{16} tranzisztorokat az S_n kapcsolókkal kapcsolhatjuk be. Egy-egy tranzisztor páron (pl. Q_3, Q_4) csakis a rá jellemző áram folyhat. Így I_{ki} értéke I_{be} értékétől függ, egy adott U_m mellett (2.4),

$$I_{ki} = k \cdot I_{be} U_m \sum_n (2^0 S_0 + 2^1 S_1 + 2^2 S_2 +, \ldots, +2^{n-1} S_{n-1}), \tag{2.4}$$

ahol: S, n helyiértékű bináris súlyozású kapcsoló, a k átalakítási tényező.

Az S_n kapcsolókkal kapcsolt tranzisztor párok számát 2^n hatvány szerint növelve, bináris súlyozású átalakítóhoz jutunk [95].

[21] időben és amplitúdóban is diszkrét, kvázi folytonos



2.7. ábra. A kapcsolt kapacitások lehetséges megoldásai.

2.2.3. Kapcsolt kapacitások módszere

Az integrált áramkörök ellenállásainak megvalósítása, különösen a nagy értékek esetén, technológiai nehézséget okoz. A kialakított ellenállások, az alkalmazott gyártási eljárás függvényében, instabilak, zajosak, feszültségfüggők, hőmérsékletfüggők lesznek. Kis kapacitású kondenzátorokat viszont igen jó elektromos paraméterekkel és olcsón, az integrált áramköri gyártási technológiához jól illeszkedően tudunk megvalósítani. Az ellenállások alkalmazásának kiküszöbölésére elterjedten használják a kapcsolt kapacitások módszerét, így a diszkrét idejű FPAA-kban is.

Ezeknél a megoldásoknál egy adott kondenzátornál, a töltés-kisütés gyakoriságának változtatásával, más-más látszólagos ellenállást tudunk megvalósítani, csupán a ki-, bekapcsolás frekvenciájának változtatásával.

Diszkrét időtartománybeli megközelítésnél, a kapcsolók és kondenzátorok,

„analóg regiszterek” amelyek a jelutakat és a tárolóelemeket alkotják. Az alapvető programozható elemek ezekben a CAB-ekben a műveleti erősítők és az analóg regiszterek, amelyeknek paraméterei a kapcsolt kapacitásokkal megvalósított virtuális ellenállásokkal állíthatók be. A beállítható paraméterek révén ez a módszer finomabb granularitást ad mint a valós idejű FPAA-knál, azonban az alkalmazott technika miatt a kapcsolási zaj, a zajfeszültség nonlinearitása nagyobb lesz [85]. Az eredő határfrekvencia a mintavételi frekvencia függvénye, így elengedhetetlen, hogy a diszkrét FPAA-k ki-, és bemenetein is a kapcsolási frekvenciát elnyomó, a maximális frekvenciát korlátozó szűrők helyezkedjenek el [85] [28].

A mai integrált áramköri gyártástechnológia mellett a kívánt stabilitású kondenzátorok értéke 0,5-30pF tartományban alakítható ki. Ezek a kapacitások különféle kapcsolt-kondenzátoros alapkapcsolásban használatosak.

A 2.7 ábrán a lehetséges megoldások láthatók. Általános elv, hogy kétfázisú (ϕ_1, ϕ_2), nem átlapolt órajelet (2.8 ábra) alkalmazunk. Az ábra kapcsolásainak megnevezését, az *r-q* pontok között keletkező látszólagos ellenállás értékeinek meghatározását a 2.3 táblázat foglalja össze.

Fontos feltétel: $f_\phi \gg f_t$, ahol f_t az áramkör felső határfrekvenciája. Ha ez teljesül, elhanyagolhatjuk a kondenzátor feszültségváltozását. További feltételként a kondenzátort ideálisnak tekintjük ($R_{Cp} \to \infty$ és $R_{Cs} \to 0$), valamint a ϕ_1, ϕ_2, órajelek közötti kikapcsolási időre (t_i) kikötjük: $t_i \ll \frac{1}{\phi_n}$.

A 2.7 ábrán látható mindegyik kapcsolást felhasználják programozható áramkörökben is, azonban különösen érdekes a „híd” és a „nem invertáló” kapcsolás [120].

A nem invertáló kapcsolás ellenállásának értékére az $r-q$ pontok között (r_{rq})

A kapcsolás megnevezése	**A virtuális ellenállás értéke**
a., párhuzamos, *b*., soros, *f*., nem invertáló	$R_{rq} = -\frac{1}{fC}$
c., soros-párhuzamos	$R_{rq} = \frac{1}{f(C_1C_2)}$
e., híd	$R_{rq} = \frac{1}{4fC}$
e., invertáló	$R_{rq} = -\frac{1}{fC}$

2.3. táblázat. Az egyes kapcsolt kapacitású alapáramkörök elnevezése és a származtatott virtuális ellenállás értéke.

megoldást ad az (2.5–2.10),

$$u_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i(t)dt, \tag{2.5}$$

$$i_C(t) = C \, \frac{d(U_r - U_q)(t)}{dt}, \tag{2.6}$$

$$r_{rq} = \frac{U_r - U_q}{i_C(t)}, \tag{2.7}$$

$$r_{rq} = \frac{U_r - U_q}{C \, \frac{d(U_r - U_q)(t)}{dt}}, \tag{2.8}$$

$$r_{rq} = \frac{t}{C}, \tag{2.9}$$

$$r_{rq} = \frac{1}{fC}. \tag{2.10}$$

A kapott „ellenállás” értéke (2.10) láthatóan csakis az alkalmazott frekvenciától és a kondenzátor kapacitásától függ.

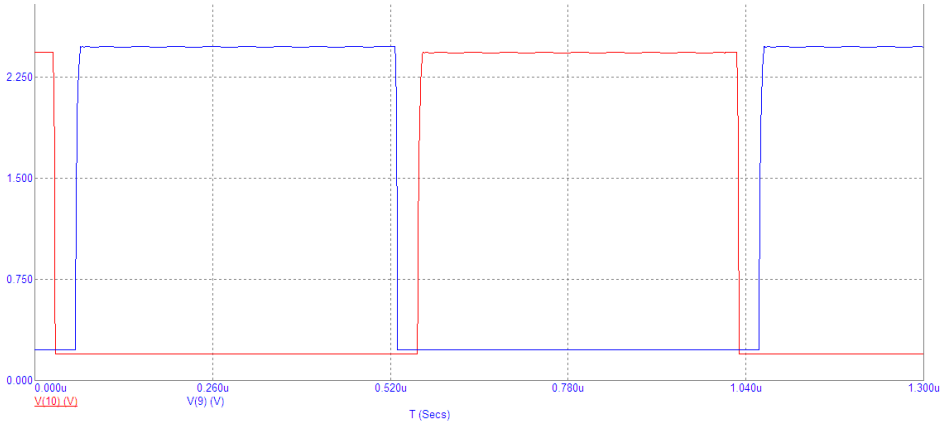
Az invertáló kapcsolásnál az (2.6), (2.11)-re módosul,

$$i_C(t) = -C \, \frac{d(U_q - U_r)(t)}{dt}, \tag{2.11}$$

így (2.10) is (2.12)-re változik,

$$r_{rq} = -\frac{1}{fC}. \tag{2.12}$$

A kapcsolt kapacitások módszerérével nagyobb átfogást valósíthatunk meg, mint hagyományos ellenállás alkalmazásával. A kialakított kapcsolt kondenzátoros, „ellenállás” a mai integrált áramkör gyártási technológia mellett, tipikusan $\pm 1\%$ tűrésű és $\pm 0,1\%$, pontosságú értékbeállíthatóságot enged meg. Az ellenállás hőmérsékleti együtthatójának értéke $3 \cdot 10^{-3}$–$5 \cdot 10^{-2}$ %/°K, feszültségfüggő linearitása $5 \cdot 10^{-4}$–$2 \cdot 10^{-1}$%/V nagyságú. A módszer további előnye az órajel



2.8. ábra. A nem átlapolt ellenfázisú órejelek értelmezése.

függő nagy átfogás. A kapcsolt kapacitás módszerével megvalósítható a, „negatív ellenállás", a nemlineáris funkció (egyenirányító) is. A kapcsoló félvezetők tulajdonságainak figyelembevételével, a felső határfrekvencia lineárisan változtatható, az órafrekvencia függvényében.

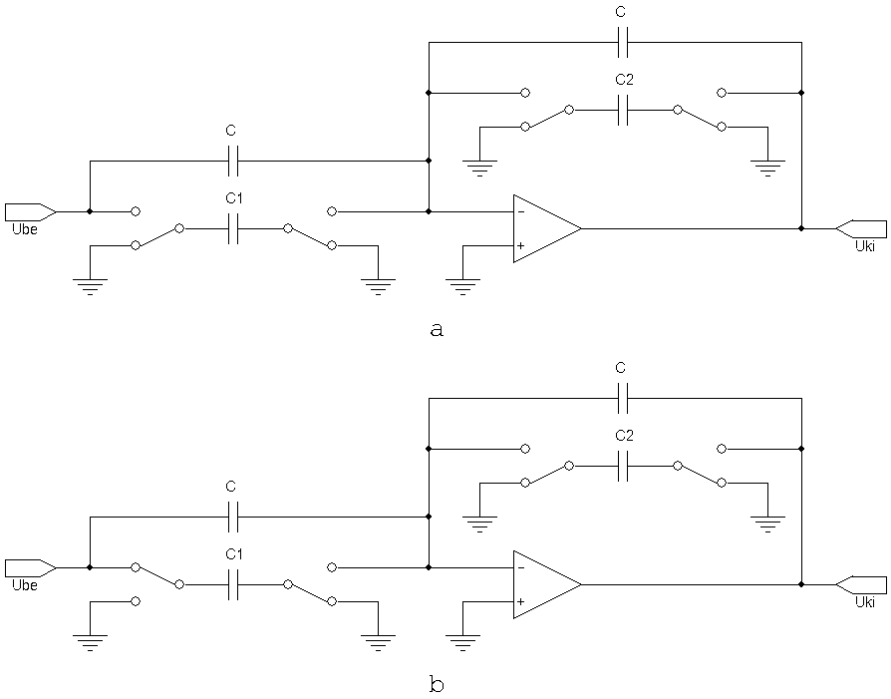
A 2.9 ábrán kapcsolt kondenzátoros invertáló-, és nem invertáló erősítő látható. A kapcsolók pillanatnyi állása az egyik órejel (ϕ_n) függvényében értendők. A kapcsolt kondenzátorokkal párhuzamosan kötött C kapacitások a műveleti erősítő nyílt hurkú telítődését gátolják. Az erősítő erősítését (2.12)-vel felírva, kapjuk (2.13),

$$U_{ki} = \pm U_{be} \frac{\frac{1}{fC_2}}{\frac{1}{fC_1}}, \tag{2.13}$$

illetve (2.14) összefüggést,

$$U_{ki} = \pm U_{be} \frac{C_1}{C_2}. \tag{2.14}$$

A 2.10 ábrán összegző erősítő látható. Ebben az esetben is az első kapcsoló mintavételi fázisától függ a bemenet együtthatójának előjele. Ezzel a módszerrel,

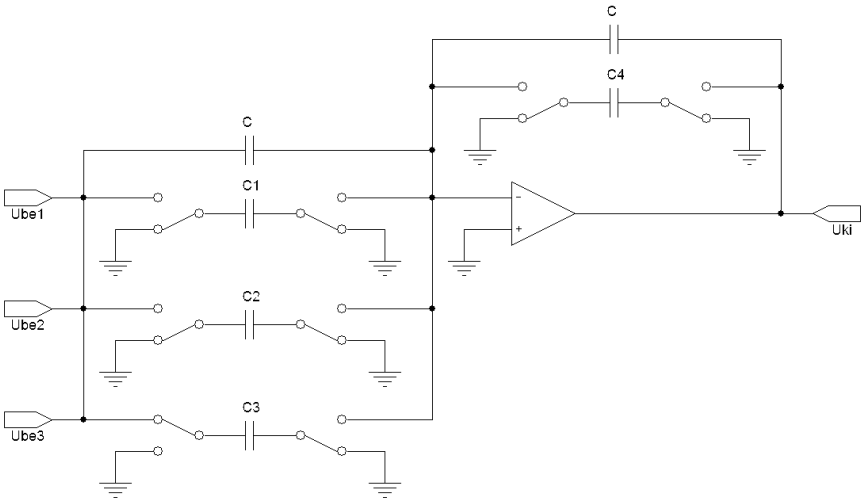


2.9. ábra. Kapcsolt kapacitásokkal megvalósított (a) invertáló és (b) nem invertáló erősítő.

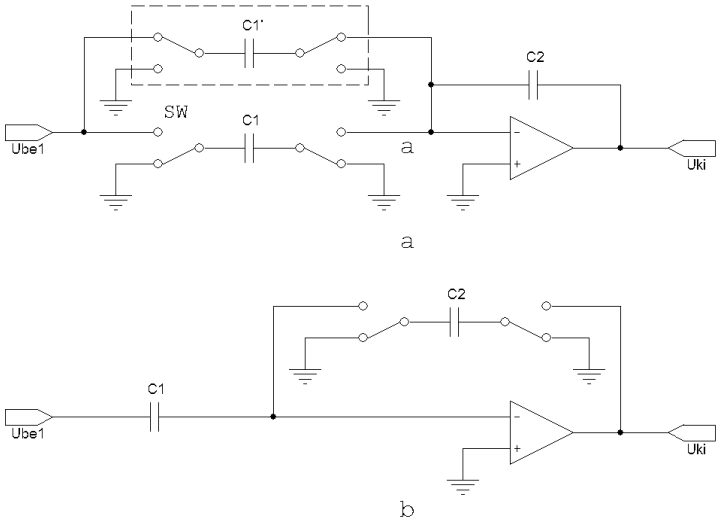
elvileg tetszőleges számú bemenet alakíthatunk ki. A 2.10 ábra kapcsolásának U_{ki}–U_{be} függvényét (2.15) írja le:

$$U_{ki} = \frac{1}{C_4}(U_{be3}C_3 - U_{be1}C_1 - U_{be2}C_2). \tag{2.15}$$

Az 2.11 (a) ábrán integrátor, az 2.11 (b) ábrán differenciator látható. Az integrátor együtthatójának előjele az *SW* kapcsoló mintavételi fázisától függ, nagysága a (2.16) szerint határozható meg,



2.10. ábra. Kapcsolt kapacitásokkal megvalósított összegzőerősítő.



2.11. ábra. Kapcsolt kondenzátoros (a) integráló és (b) differenciáló áramkör.

$$U_{ki} = f \pm \frac{C_1}{C_2} \int_0^t U_{be}(t)dt. \tag{2.16}$$

Kisebb virtuális ellenállás kialakítására használt az az eljárás, amikor is a 2.11 (a) ábra integrátorának ellenállását a szaggatott vonallal határolt áramköri részlettel egészítjük ki. A C_1 és C_1' kondenzátort ellentétes fázisban vezéreljük így annak látszólagos ellenállása (2.17),

$$r_{rq} = -\frac{1}{2fC_1}, \tag{2.17}$$

lesz, így az integrátor működése a (2.18) szerint viselkedik:

$$U_{ki} = -2f\frac{C_1}{C_2} \int_0^t U_{be}(t)dt. \tag{2.18}$$

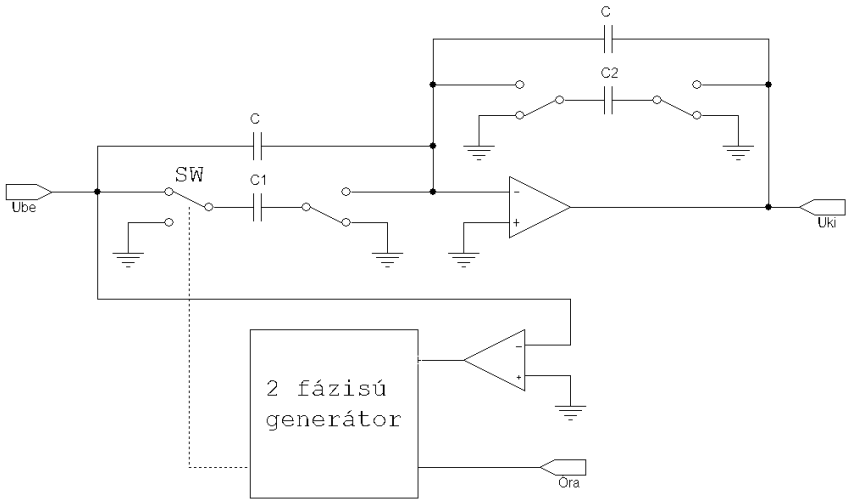
A 2.12 ábrán egy egyenirányító kapcsolás látható. Az U_{be} jel polaritásától függően, a kétfázisú generátor *SW* kapcsoló fázisát változtatja, így az U_{ki} értéke (2.19) összefüggés szerint:

$$U_{ki} = \begin{cases} U_{be}\frac{C_1}{C_2} & \text{ha } U_{be} \geq 0 \\ -U_{be}\frac{C_1}{C_2} & \text{ha } U_{be} < 0 \end{cases} \tag{2.19}$$

A kapcsolás a már tárgyalt elemekkel építkezik, előnye, hogy félvezető dióda nélkül valósít meg, a vezérlés függvényében, kétutas, vagy egyutas egyenirányítást.

A 2.13 ábra egy univerzális kapcsolt-kondenzátoros elrendezést mutat. A kapcsolásnak két bemeneti blokkja van ($C_0 - C_q$, $C_0 - C_m$), mindegyik bementhez tartozik egy-egy előjel-komparátor (K_1, K_2). Az ábrán az *SC* blokkjai más-más értékű kondenzátort tartalmaznak, a nagy tartományban történő programozhatóságot támogatandó.

Amennyiben egy egyenirányítót a (U_{Be1}) aluláteresztő szűrővel, és a (2.20) szerinti integrátort (U_{Be2}) szeretnénk kialakítani,



2.12. ábra. Kapcsolt kondenzátoros egyenirányító.

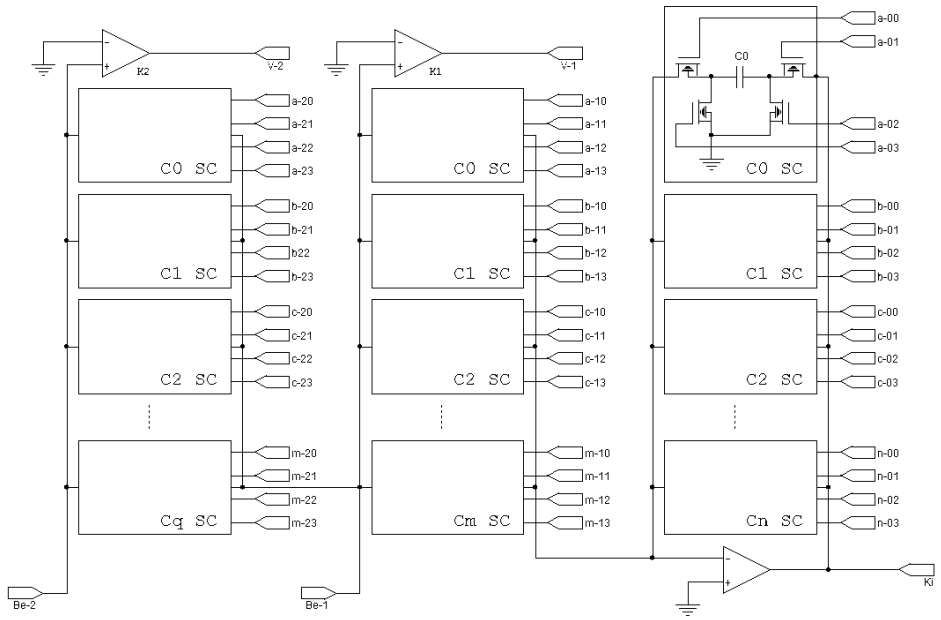
.

$$U_{ki} = \begin{cases} \frac{1}{C_2}(U_{Be1}C_1 - fC_0 \int_0^t U_{Be2}(t)dt) & \text{ha } U_{be} \geq 0 \\ -\frac{1}{C_2}(U_{Be1}C_1 + fC_0 \int_0^t U_{Be2}(t)dt) & \text{ha } U_{be} < 0 \end{cases} \tag{2.20}$$

az alábbi vezérlést kell létrehoznunk[22].

A visszacsatoló kondenzátor legyen C_2 ($c_{00} = U_v$, $c_{01} = U_v$). A U_{Be1}, bemenet „ellenállását” C_1 kondenzátor segítségével valósítsuk meg, f frekvencián úgy, ha $U_{Be1} \geq 0$ akkor $b_{10} = \phi_1$, $b_{12} = \phi_1$, illetve $b_{11} = \phi_2$, $b_{13} = \phi_2$ és ha $U_{Be1} < 0$, $b_{10} = \phi_1$, $b_{11} = \phi_1$, illetve $b_{12} = \phi_2$, $b_{13} = \phi_2$. Az U_{Be1} polaritását K_1 komparátor vizsgálja.

[22]Feltételezzük, hogy az *SC* blokok tranzisztorai U_v gate-feszültségnél telítésbe vezérlődnek, és U_0 feszültségnél teljesen zárnak.



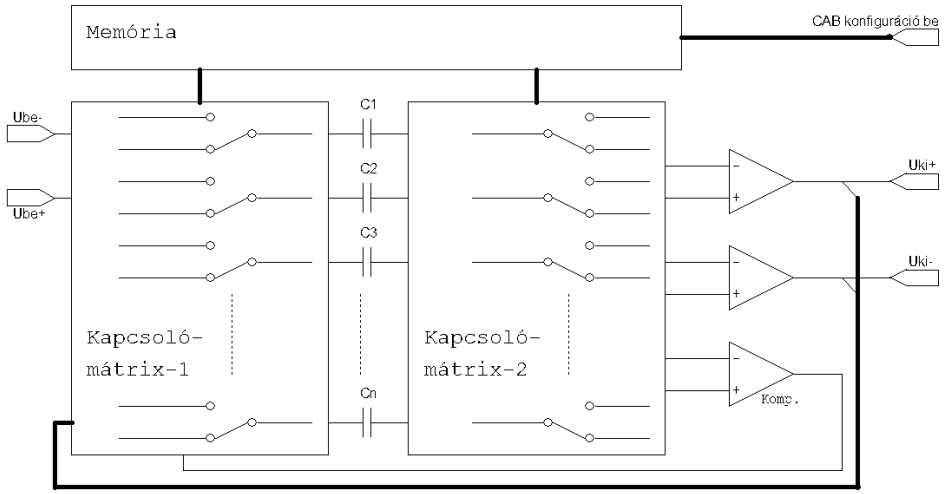
2.13. ábra. Egy univerzálisan felhasználható kapcsolt kondenzátoros konfigurálható analóg blokk elvi felépítése.

Az U_{Be2} bemenethez a C_0 kondenzátort használjuk fel, $a_{20} = \phi_1$, $a_{21} = \phi_1$, illetve $a_{22} = \phi_2$, $a_{23} = \phi_2$. Az összes többi *SC* blokk minden más vezérlőbemnete: U_0.

A bemutatott, nagy tartományban konfigurálható áramkör megkettőzésével további funkcionális egységek alakíthatók ki: sávzáró szűrő, sáváteresztő szűrő, aktív szűrő kapcsolások, harmonikus és relaxációs oszcillátorok, feszültség-vezérelt erősítő, négyzetre emelő,. . . ,stb.

2.2.4. Konfigurálható analóg blokkok

A konfigurálható analóg blokkok meghatározását illetően itt sincsen általánosítható terminológia, a csak paraméterezhető egyedi alkatrészektől, a makrókkal

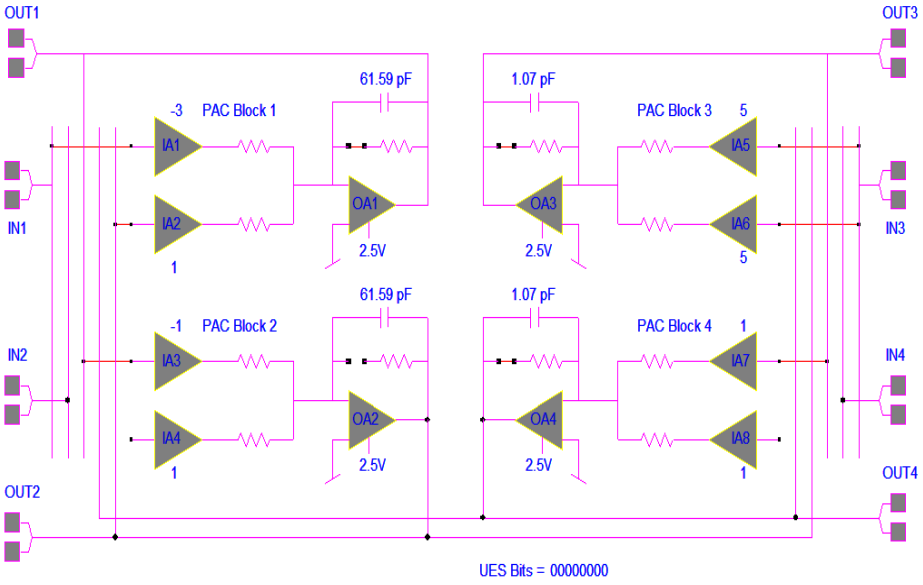


2.14. ábra. Kapcsolt kondenzátoros, két műveleti erősítős konfigurálható analóg blokk (Anadigm Inc. alapján).

meghatározható univerzális, több műveleti erősítőt-, nagy belső kapcsolómátrixot tartalmazó áramkörökig terjed (2.2 táblázat).

A 2.14 ábrán egy két műveleti erősítős konfigurálható analóg blokk látható [120]. A két kapcsolómátrix és a C_0–C_n kondenzátorok a korábban bemutatott (2.13 (e) ábra) kapcsolt kondenzátoros hídkapcsolását valósítják meg. A CAB belső kapcsolómátrixa az FPAA belső $+Be$ és $-Be$ bemenetei és $+Ki$ és $-Ki$ kimenetei, a memória vezérelésének függvényében kapcsolódnak más CAB-ekhez, vagy az FPAA ki-, és bemeneteihez. A kapcsolómátrixok statikus, vagy kapcsolóüzemű működését egy memória-vezérelt sorrendi hálózat működteti. Szükség van a külső órajel bemenet függvényében a kétfázisú vezérlőjelek (ϕ_1, ϕ_2) előállítására is, a kívánt kapcsoló-frekvencián (2.8 ábra).

Időben és amplitúdóban folytonos FPAA áramköröknél a kapcsolt kondenzátoros áramköröket diszkrét R-C hálózatok váltják fel [82]. Az 2.15 ábra egy szűrő realizációt mutat, egy Lattice (2.3.4 szakasz) isPAC20 áramkörben kialakítva. Itt a memória tartalom függvényében kapcsoljuk össze a mátrix sor és oszlop veze-



2.15. ábra. A Lattice isPAC10 programozható analóg áramköre. A sor és oszlopvezetékek összekötése itt, két aluláteresztő szűrőt konfigurál.

tékeit, egy-egy vezérelt tranzisztor párral (2.2.5 szakasz). Az ábrán látható FPAA eszköznél az egyes kondenzátor értékek ugyancsak egy kapcsolómátrixszal megváltoztathatók, így a szűrő paraméterek beállíthatók.

2.2.5. A kapcsolómátrix

Az FPAA-kban a különböző topológiát a konfigurálható analóg blokkok a bemenetek és kimenetek között a kapcsolómátrix valósítja meg. A mátrix aktív eszköze mátrixpontonként egy-egy pFET és nFET megfelelő vezérléssel, vagy lebegő gate-es FET [59]. Sajnos e tranzisztorok csatorna-impedanciája károsan befolyásolja a rajtuk átvezetett analóg jel paramétereit. Ugyancsak összedódó módon az egyenáramú komponens miatt sem lehet tetszőlegesen nagy kapcsolóhálózatot kialakítani, mivel a kapcsolóeszközként alkalmazott FET R_{DS} ellenállások is sorba

kapcsolódnak.

Részben az előbbi problémát oldja meg az az eljárás, amikor egyszerre alkalmazunk áteresztő- és lezáró tranzisztorokat [83]. Ebben az esetben csökken a nemkívánatos, „áthallások" hatása nő a linearitás és javul a jel/zaj viszony. A javasolt eljárásnál a FET U_{GS} értékével az R_{DS} ellenállás befolyásolható, így a kapcsoló vezérelt ellenállásként is felfogható, ehhez azonban már nem elég a tranzisztoronkénti egy bites memória [83].

Harmadik megoldásként, többnyire, mint elvi lehetőséget említik a mátrix pontjaiban alkalmazható antifuse kapcsolatot [60]. Ennek az eljárásnak programozható digitális áramkörökben hagyománya van, azonban kis szintű analóg jeleknél csak körülményesen lehet alkalmazni, aminek különösen, nagy méretű mátrixoknál korlátai vannak. Speciális alkalmazásoknál (világűrben, radioaktív

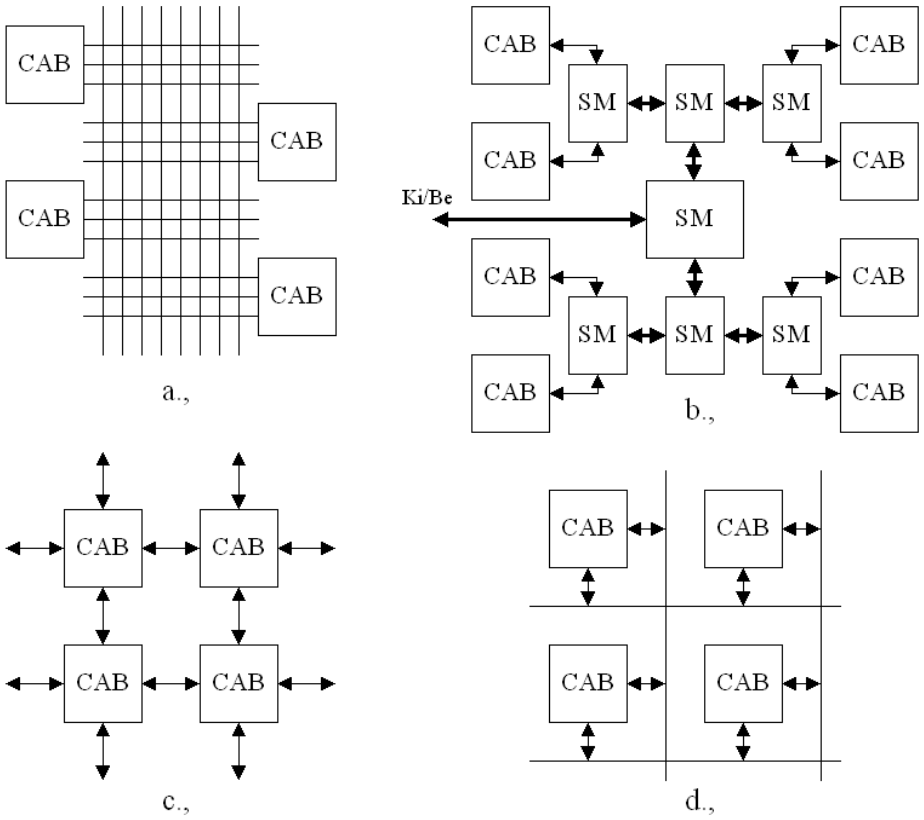
sugárzás esetén) a nagy háttérsugárzás miatt, fém-fém antifuse megoldást alkalmaznak, ahol az átmeneti ellenállás mindössze 15-25Ω nagyságú [17].

A valós idejű programozható analóg áramkörökben az áramkonvejor alkalmzása is előfordul kapcsolóelemként [102]. Ebben eredeti az a megközelítés, hogy míg a valós idejű FPAA CAB aktív eleme is áramkonvejor, itt az a kapcsoló funkcióját is elláthatja.

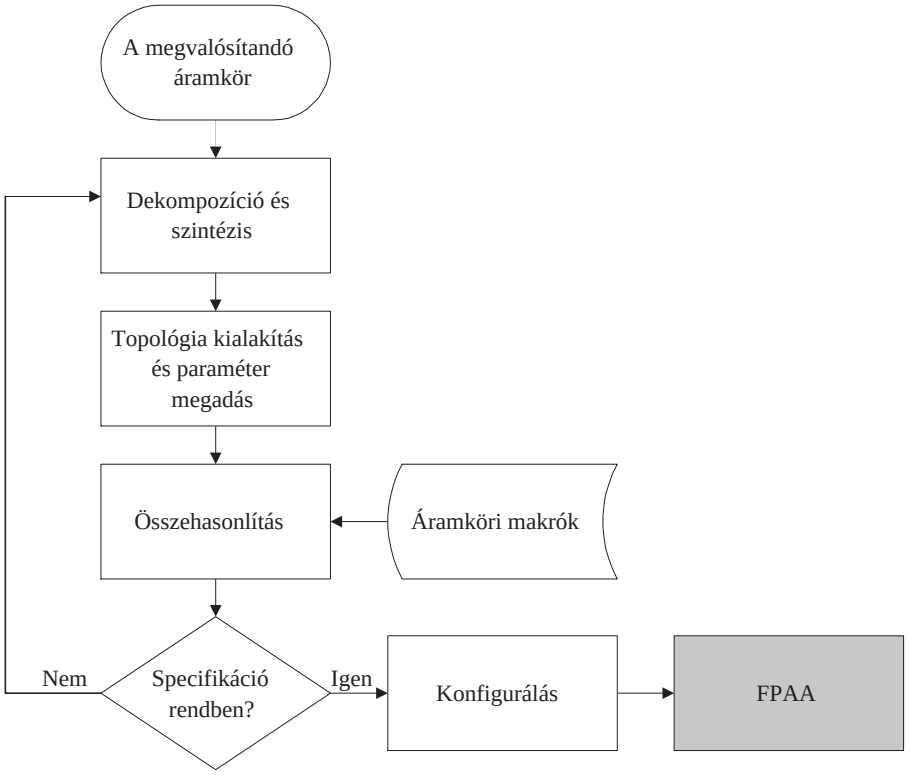
Az egyedi áramköri megoldások mellett négy alapvető topológiájú kapcsolómátrix megoldást alkalmaznak (2.16 ábra). Ezen megoldások közül, a megvalósítandó programozható áramkör funkciójának függvényében, a lehető legkevesebb kapcsolóeszköz felhasználását igénylő megoldások kiválasztása a célszerű.

A legrugalmasabb megoldást a crossbar-rendszerű kapcsolómátrix adja [104]. Ebben az esetben akár több bemenetet és kimenetet is összekapcsolhatunk, azonban a CAB-ek számával (n_{CAB}) és a kimenetek számával (O_{ki}) a mátrix nagysága $O_{ki} \cdot n_{CAB}^2$ szerint nő. A fa struktúrájú megoldás egy hierarchikus mátrix, azonban egyszerűbb alkalmazásoknál is a teljes utat (fát) be kell járni az analóg jelnek. Így, viszont az alkalmazott kapcsolók száma konstans, ami az adott frekvencia tartományban jól kompenzálható [83]. A lokális mátrix kis flexibilitású esetekben javasolt, ilyenkor kevés kapcsolóeszközre van szükség, azonban az egyes CAB csak a négy szomszédjával köthető össze. A globális kapcsolóknál a CAB számának növekedése egyre több kötöttséget jelent [97].

A programozható analóg áramkörök architektúrája, a valósidejű átprogramozást (rekonfigurálást) támogatja, a duplikált konfigurációs memóriával. Addig



2.16. ábra. A kapcsolómátrix különböző kialakítási lehetősége, (a) cross bar, (b) fa struktúrájú, (c) lokális kapcsoló, (d) globális kapcsoló.



2.17. ábra. Az FPAA áramkörök programozásának lépései.

amíg az egyiket programozzuk,a másik a CAB, illetve a mátrix működését vezérli.

2.2.6. Programozható áramkörök konfigurálása

Az áramköri topológia kialakítása és alkatrész paraméterek megadása együttesen az áramkör konfigurálását jelenti.

A programozható analóg áramkörök gyártói az egyes áramkör családra optimalizált fejlesztő környezetet tesznek elérhetővé. A kiindulás nagyon gyakran

egy kapcsolásirajz szerkesztő felület, amellyel, adott alkatrész készletből kapcsolást alakíthatunk ki, vagy áramköri modulokból építkezhetünk. Utóbbi esetben a fejlesztői környezet, a megvalósítandó áramkört, dekomponálja az FPAA elemkészletének megfelelően.

A 2.17 ábra a programozható analóg áramkörök konfigurálásának lépéseit mutatja. A programozás eredményeként a programozható áramkörben egy áramköri topológia alakítható ki, a benne szereplő alkatrészek megfelelő paramétereivel. Ezt, optimális esetben egy FPAA eszköz-orientált CAD program környezetében tehetjük meg.

Egy, többnyire a CAD részeként meglevő szimulációs program segítségével összehasonlítjuk az FPAA-ba töltendő áramkört a megvalósítani kívánt áramköri tulajdonságokkal, szükség esetén korrigálunk. Ezt mindaddig folytatjuk, amíg az FPAA-ba töltendő áramkörünk, kiválasztott paraméterei meg nem egyeznek a megvalósítani kívánt áramkörével. A fejlesztés eredményeként egy összeköttetés listát kapunk, az egyes alkatrészek (blokkok) paraméterével együtt, amit bináris sztringként (9.17 ábra) az FPAA-ba tölthetünk.

Jól használható az a kimenet, amely, valamilyen *C* program nyelvű, vagy mikroprocesszor közeli kódot generál. Ilyenkor lehetőség van a bit szintű beavatkozásra, korrigálásra is. A dinamikus újraprogramozást jól támogatja az a kimeneti fájl, ami generálja a kívánt jellemzőt meghatározó paramétertáblázatot.

Egymásnak ellentmondó megoldás, az egyre nagyobb áramköri makrókban történő megvalósítás, illetve az elemi áramköri szintű megközelítés. Előbbi a leggyorsabb, utóbbi a legrugalmasabb eredményt adhatja. A gyártók, ennek áthidalására az elemi áramköri fejlesztői környezetet kiegészítik olyan alkalmazásorientált tervezőrendszerrel, amellyel könnyen lehet funkcionális áramköröket tervezni; szűrőket, szabályozó-erősítőket, teljes oszcillátorokat,. . . , stb.

A fejlesztői környezet részeként jó szolgálatot tesz az idő-, frekvencia-, amplitúdó vagy fázisszög tartományban működő szimulációs program (2.29 ábra).

2.3. A programozható analóg áramkörök fejlődése

A programozható analóg áramkörök kialakulásuktól, az elmúlt két évtized alatt jelentősen fejlődtek, alkalmazási területük egyre szélesebb lett. Itt is, mint az

Kutatás/fejlesztés	Szabadalom	Termék
Pierzchala–Perkowski	—	GAP-01, 1982
Vall–Tsividis, ASP, 1987	Czarnul Transcond., 1987	—
Sivilotti, Proto-chip, 1988	—	—
Lee–Gulak, sub-treshold FPAA, 1990	—	Xicor, Digit.pot., 1990 IMP, Prog.filt., 1990
Lee–Gulak, Transcond	Actel FPMA, 1992	
FPAA, 1992	Pilkington FPAA, 1993	—
Analogix, Bipolar FPAA, 1994	Kawasaki Steel, 1994	IMP, EPAC, 1994
University Toronto, MADAR FPMA, 1995	—	Analog Devices, Var-Gain Amp.,1995
Pilkington, SC FPMA, 1996 Kutuk-Kang, SC FPAA, 1996	—	Zetex TRAC FPAA, 1996
Faura és mások, FIPSOC FPMA, 1997	—	Motorola acquires Pilkington, 1997
Anadigm, Inc., 2000	Field Programmable Analog Arrays	FPAA
Anadigm, Inc., 2005	Dynamically Programmable Analog Signal Processors	dpASP
Cypress, Inc., 2005	Programmable System on Chip (PSoC)	Mixed-Signal Array

2.4. táblázat. A programozható analóg áramkörök fejlődésének mérföldkövei

elektronikai fejlesztés egyéb területén, számos megoldás, visszanézve átmenetinek és zsákutcának bizonyult. Jó néhány FPAA termék gyártása már befejeződött, ami nem feltétlenül a szerényebb teljesítőképességüknek tudható be, hanem egyéb piaci és marketing folyamatoknak. Tény azonban, hogy mostanság a kereskedelemben beszerezhető programozható analóg áramkörök jó és stabil paraméterekkel, sokcélúan használható eszközök. Ezek kifejlesztése elsősorban annak a félszáznál alig több inventornak köszönhető, akik mára e terület klasszikusainak számítanak (2.4 táblázat).

A következőkben, időrendben találhatók a programozható analóg áramkörök mérföldkövei, amelyeknek tárgyalása a mai jelentőségük, felhasználhatóságuk miatt különböző mélységű.

2.3.1. Az EPAC áramkör

Az első elektronikusan programozható analóg áramkör[23] az EPAC, CMOS eszközökkel valósított meg digitális felületen keresztül beállítható, analóg integrált áramkört. Ezt később az Egyesült Államokbeli IMP kezdte gyártani, 1995-ben. Kategóriájában az EPAC50E10 volt az első, amit az EPAC50E30 követett [72]. Mindkét típus diszkrét idejű eszköz volt, a kapcsolt kapacitások módszerét alkalmazták.

Az első FPAA áramkör felépítése 2.18 ábrán látható. Az EPAC-nak kettő bemeneti-, (A, B) három mag-, (C, D, E) és három kimeneti (F, G, H) modulja van. Az A jelű műveleti erősítő bemenetére 15kHz határfrekvenciájú aluláteresztő szűrő kapcsolódik, amelynek paramétere a kapcsolt kondenzátorokkal megváltoztatható. A szűrő bemenetére analóg multiplexeren keresztül kerülhet a 16 unipoláris ($be_1 - be_{16}$), vagy nyolc differenciális bemenet ($be_1^{+-} - be_8^{+-}$) jele. A műveleti erősítő erősítése -6dB és 20dB között változtatható a digitál-analóg átalakítón keresztül. A B jelű műveleti erősítő bemenetén levő alulátersztő szűrő töréspontí frekvenciája 15kHz, erősítése -6dB és 20dB között beállítható.

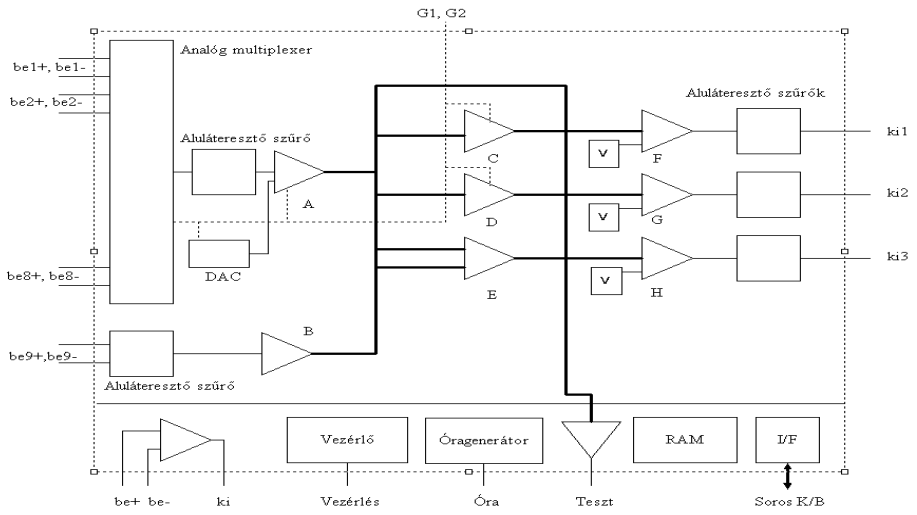
Mindkét műveleti erősítő kimenete egy belső sínre kapcsolódik. A „magmodul" műveleti erősítői 0dB és 20dB között erősíthetnek. az E erősítő a két differenciális bemenete révén előjeles összegző funkciót is elláthat.

Mivel mindhárom műveleti erősítő ki-, és bemenete is a belső sínre kapcsolódik, ezért ezek sorba-, és párhuzamosan is kapcsolhatók. A kimeneti modul erősítései programozhatóan beállíthatók, kimenetükön egy-egy ugyancsak 15kHz határfrekvenciájú aluláteresztő szűrő van. Az F jelű erősítő, mintavevő, és tartó funkcióval is kiegészül. Mindegyik műveleti erősítő bemenetén egy referencia feszültségforrás (V) is található.

Az EPAC programozása (konfigurálása) kétféle módon történhet. Lehet teljes vagy részleges (parciális). Utóbbit akkor használjuk, ha a G_1, G_2 bemenetek segítségével az analóg multiplexert, a bemeneti szűrőt, illetve az A, C, D műveleti erősítőket, a programozott, egyéb paraméterektől függetlenül, állítjuk be.

Az EPAC50E10 típus 200 biten volt konfigurálható, ezt egy SRAM-ban tárolta. Határfrekvenciája 125kHz volt, az óragenerátor is 1MHz-en működött. A

[23] Electrically Programmable Analog Circuit (EPAC)



2.18. ábra. Az IMP50E10 EPAC áramkör felépítése.

belső kapcsolás kialakítása illetve a paraméterek beállítása a soros *K/B* port segítségével történik, az adatok egy E^2PROM-ban tárolódnak.

Az EPAC50E30 kiegészült egy jelző áramkörrel, amely a bemeneti érték programban meghatározott nagyságát túllépve kezdett működni. Ebben az áramkörben a memória már E^2PROM, illetve egy konfigurációs léptetőregiszter. A teljes konfiguráció betöltése 250μs-ot vett igénybe.

A program fejlesztői környezete blokkdiagramszerűen valósítja meg a belső struktúrát, majd az egyes blokkok paraméterei tág határok között állíthatók be. A fejlesztői környezetnek része egy szimulációs program is. Az EPAC családnak manapság történeti jelentősége van. Elévülhetetlen.

2.3.2. A Motorola programozható áramköre

1997-ben jelent meg a Motorola MPAA020 áramköre (2.19 ábra), amely ebben a formában a ma alkalmazható kapcsolt kondenzátoros FPAA-k előfutárának tekinthető [4].

Az FPAA architektúra a CAB-orientált, a konfigurálás ezek tulajdonságainak megadását, illetve ezek összekapcsolását jelenti. Az architektúra egésze unipoláris (aszimmetrikus). A CAB-ek száma húsz, melyek 619 bites adattal programozhatók. A CABek egy elsőrendű szűrő funkciót tartalmaznak. Mindegyik blokk kapcsolódhat a szomszédjaihoz a lokális ki-, és bemeneteken keresztül, míg más CAB-ekhez a globális sínen keresztül alakíthatunk ki kapcsolatot.

Az $AN10E40$ áramkörnél a ki-, bemenetek mindegyike tartalmaz egy csak kimenet és csak bemeneti áramkört, illetve egy kivezetést, ezek között egy-egy műveleti erősítővel, amely konfigurálhatóan, közvetlenül összekapcsolja az egyes bemenetet a kimenettel. Csakúgy, mint az EPAC-nél az órafrekvencia 1MHz. Az alkalmazható felső határfrekvencia 250kHz, ebben a tartományban a torzítás jobb mint 65dB [91] [90].

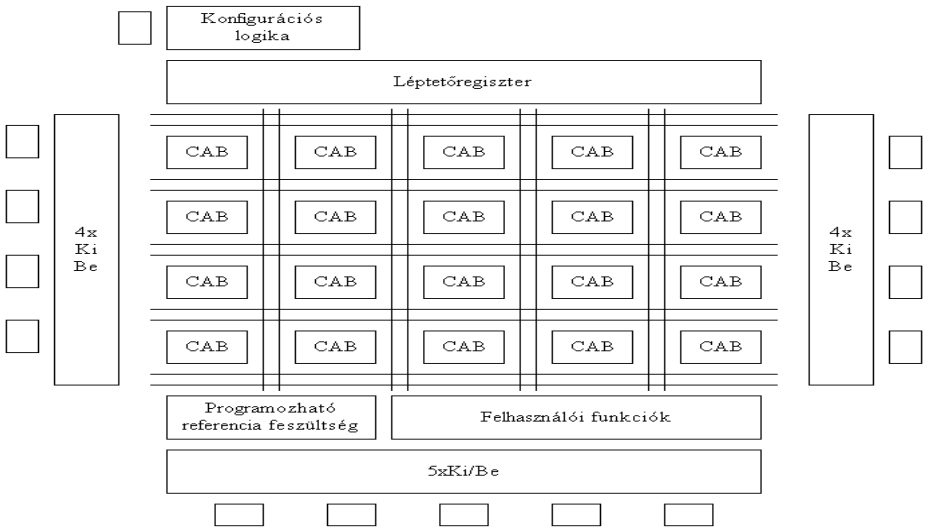
Az MPAA020 áramkör RS232 felületén keresztül volt programozható, akár közvetlenül számítógépről. A kialakított konfigurációt SRAM-ban tárolta. Áramköri környezetben a konfiguráció soros és párhuzamos ROM-ból, vagy mikroprocesszor kimenetéről volt feltölthető. Az áramkör mára elavult, jelentősége történeti.

2.3.3. A TRAC nagysebességű programozható áramkör

A Fast Analog Solution Inc. vezette be a *teljes mértékig rekonfigurálható analóg áramkör*[24] fogalmát.

Ezek az áramkörök időben folytonos működésűek voltak, 4MHz-es határfrekvenciával. A TRAC áramkör húsz konfigurálható blokkot tartalmazott két sorba szervezve. Az alkalmazott CAB-ek bipoláris tranzisztorokkal megvalósítottak, a következő funkciókkal: logaritmikus erősítő, exponenciáliserősítő, invertáló-, nem invertáló erősítő, összeadó, fázisfordító, műveleti erősítő, félhullámú egyenirányító. A nem használt CAB-ek, az áramfelvételt csökkentendő, kikapcsolhatóak. Az összekapcsolási lehetőség a 2.20 ábra szeint kialakított. A középen látható kivezetések ki- és bemenetként is konfigurálhatók, a CAB-ban kialakított funkció függvényében. Az egyes CAB-ek egy soros adatvezetékkel is összekapcsolódnak amelyen hatvan bites sztringgel állíthatjuk be az egyes cellák funkcióit.

[24] Totally Reconfigurable Analog Circuit (TRAC)



2.19. ábra. A Motorola MPAA020 áramkörének felépítése.

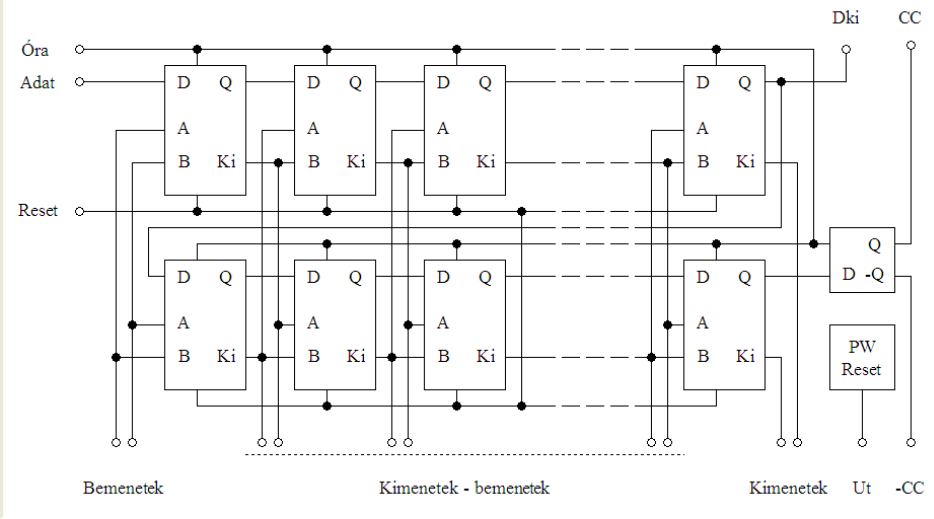
Mindegyik cellához kapcsolódik egy óravezeték és egy közös nullázó bemenet is.

A topológia programozása a ki- és bemenetek megfelelő összekapcsolását jelenti. A CAB műveleti erősítőjének erősítése a megfelelő integrált ellenállás-érték kiválasztásától függ. A tervezőrendszer tehát konfigurálja a CAB-eket, az összekapcsolásokat alakítja ki, szimulálja, letöltés előtt, az áramkör működését [10]. Az áramkör gyártását 2006-ban befejezték [128].

2.3.4. A Lattice programozható áramkör családja

A Lattice Semiconductor Corporation analóg programozható áramkörei[25] időben folytonos működésűek, a felső határfrekvenciájuk 15MHz. Az eszközök támogatják a dinamikus rekonfigurálást. Differenciális bemenetei és aszimmetrikus kimenetei vannak, a bemeneti impedanciája 1GΩ. Az áramkör család az egyszerűbb, műveleti erősítőt és passzív alkatrészeket tartalmazó CAB-ektől (2.15 ábra),

[25] in-system Programmable Analog Circuit (ispPAC)

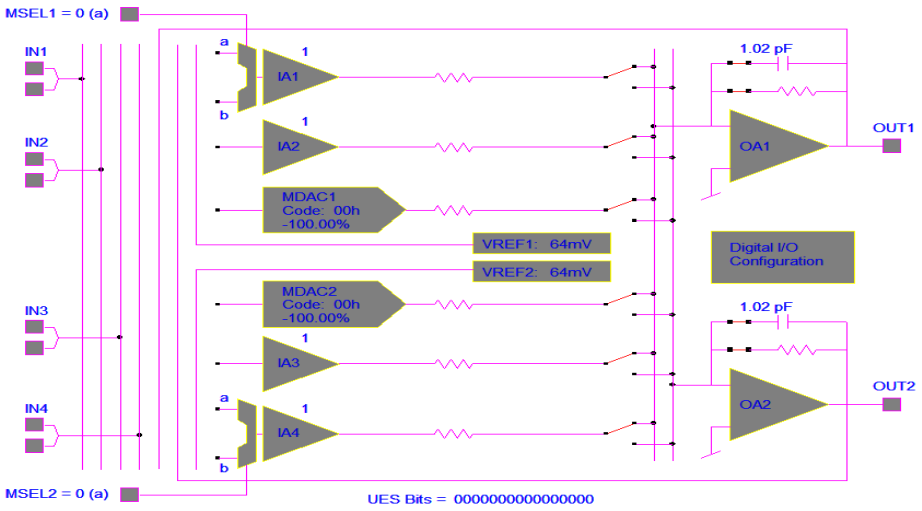


2.20. ábra. A TRAC020 FAS áramkör felépítése.

a komplexebb áramkörökig terjed (2.21 ábra). A CAB-ek száma legtöbb kettő lehet, viszont ezek már egy-egy konfigurálható szűrőt is tartalmaznak.

Ennél a típusnál, a paraméterek beállítása állandó értékű ellenállások és kondenzátor bankokból kiválasztott kapacitások segítségével történik. Az erősítők erősítése $\pm$20dB tartományban állítható. Az architektúra tartalmaz, egy automatikus kalibráló áramkört, amely az offset feszültséget állítja nullára, illetve egy hőkompenzált referencia feszültségforrást. A Lattice FPAA-inak egyes típusaiban (ispPAC30), 8 bit, szorzó típusú DAC is megtalálható digitál-analóg átalakító, amely hatékonyan támogathatja a beágyazott mikrovezérlővel való együtt alkalmazását.

A Lattice is kínál kevert jelű programozható áramköröket; programozható óragenerátorokat analóg bemeneti jelkondicionálással, fáziszárt hurokkal, programozható tápeszültség monitorozó áramköröket, programozható szűrőt,. . . ,stb.



2.21. ábra. A Lattice isPAC30 áramkör felépítése egy-egy kialakított szűrővel.

A programozás SPI[26] vagy JTAG[27] felületen történhet. A duplikált, E^2CMOS RAM illetve SRAM tár, megengedi a topológiai-, illetve parametrikus dinamikus újraprogramozást.

A javasolt felhasználás: rekonfigurálható áramkörök vagy adaptív jelkondicionálás, analóg-digitál konverterek illesztő egysége, programozható analóg szabályozó elem, precíziós programozható erősítő.

A fejlesztő környezet[28] az áramköri elemek összekapcsolását és konfigurálását teszi lehetővé, kiegészítve szűrő tervező programmodullal, illetve a kevert jelű áramkörök paraméterezését segítő interaktív környezettel.

[26] Serial Peripheral Interface (SPI), soros periféria interfész

[27] Joint Test Action Group (JTAG) az IEEE 1149.1 ajánlás szerinti szabványos tesztelési lehetőség és protokoll.

[28] PAC-Designer©

2.3.5. Az Anadigm FPAA áramkörei

A valamikori Anadyn nevű spin-off cég, némi átalakulás[29] után ma Anadigm néven a világ egyik legnagyobb programozható analóg áramkör gyártója, a diszkrét működésű eszközök terén piacvezető.

A gyártó által ajánlott felhasználási terület; analóg jelfeldolgozás, RFID alkalmazások alapsávi szűrője, valósidejű szoftver-vezérelt analóg rendszer-perifériák,

intelligens szenzorok, adaptív szűrők és vezérlések, adaptív front-end DSP alkalmazások, önkalibráló rendszerek, ultra-alacsonyfrekvenciás jel kondicionálás, felhasználói jelfeldolgozás.

Ezen alkalmazások egy része különösen a rekonfigurációt, működés közbeni részleges-, vagy teljes átprogramozást is megengedő AN22xx típusokra ajánlott.

A tipikus sávszélesség DC-2MHz, ebben a tartományban a jel-zaj viszony jobb mint 90dB, míg az alacsonyfrekvenciás sávszélességre 120dB. A teljes harmonikus torzítás jobb mint 100dB. A kapcsolt kondenzátoros megoldásnak köszönhetően a bemeneti offset feszültség értéke kisebb mint 50μV. Az áramkör egy tápfeszültséget igényel.

A négy konfigurálható analóg blokkot tartalmazó eszköz blokkvázlata illetve felépítése a 2.14, 2.22 ábrákon látható. Ezen FPAA-k jellemzője a teljes differenciális architektúra, megengedve az aszimmetrikus ki-, és bemenetek kialakítását is. A CAB-ek mellett található konfigurációs RAM megkettőzése a dinamikus átkonfigurálhatóságot támogatja. Az árnyék RAM-ba töltött újabb konfiguráció egyetlen óra-ciklus alatt aktiválódik[30]. Így a kisebb, a csak parametrikus változások, az analóg működés megszakítása nélkül is megtörténhetnek.

A hőkompenzált referencia feszültséggenerátor elsősorban a négy CAB komparátorait látja el a kívánt feszültség értékkel ($\pm 3V$).

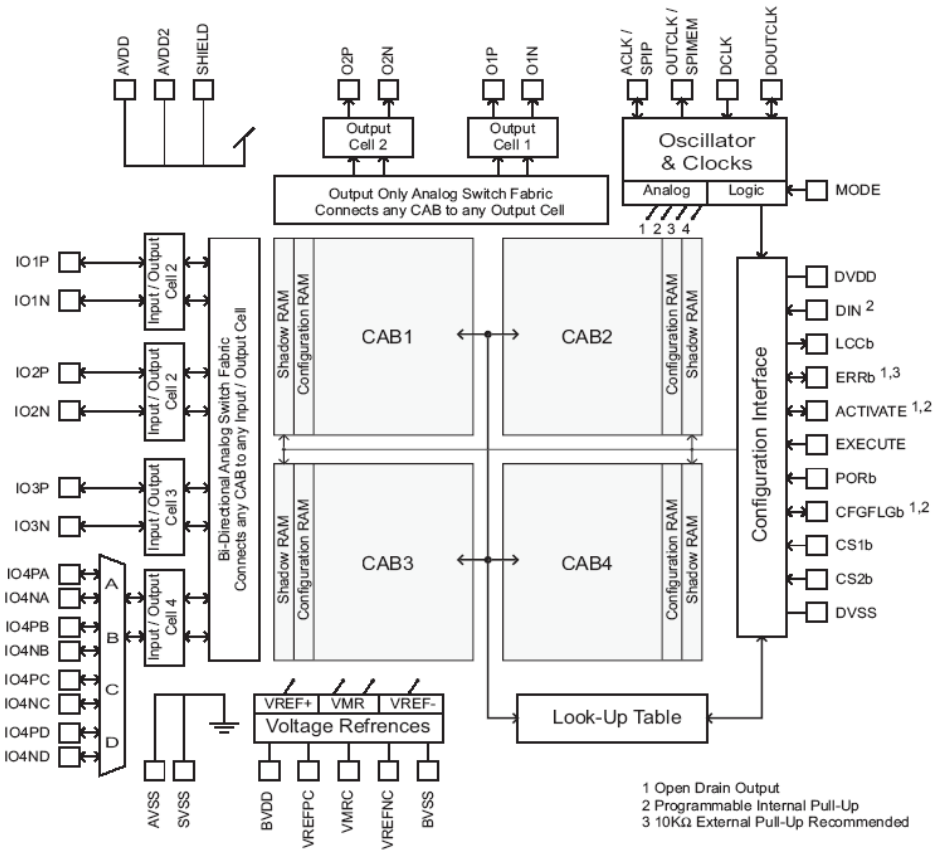
A 256 bájt nagyságú külön memória[31], mint feltölthető tartalommal bíró táblázat, alkalmazása előnyös tetszőleges átviteli karakterisztika (ADC – LUT – DAC), vagy kód-konverzió megvalósításakor. A LUT adatvezetékei és nyolc cím vezetéke elérhető mindegyik CAB intervallumfelezéses[32] ADC kimenetéről.

[29] Anadigm-Vortex, Anadigmvortex, Anadigmampex

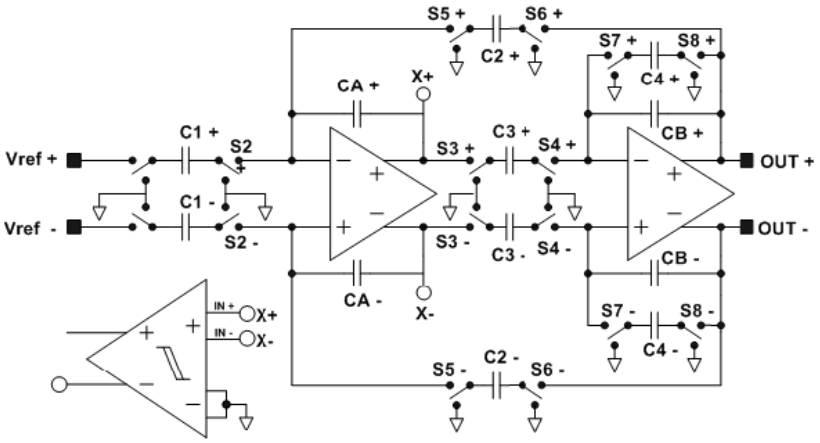
[30] on-the-fly modification

[31] Look-Up Table (LUT)

[32] successive approximation register (SAR)



2.22. ábra. Az Anadigm Inc. gyártmányú négy konfigurálható analóg blokkot tartalmazó programozható analóg áramkörének (AN221E04) blokkvázlata.

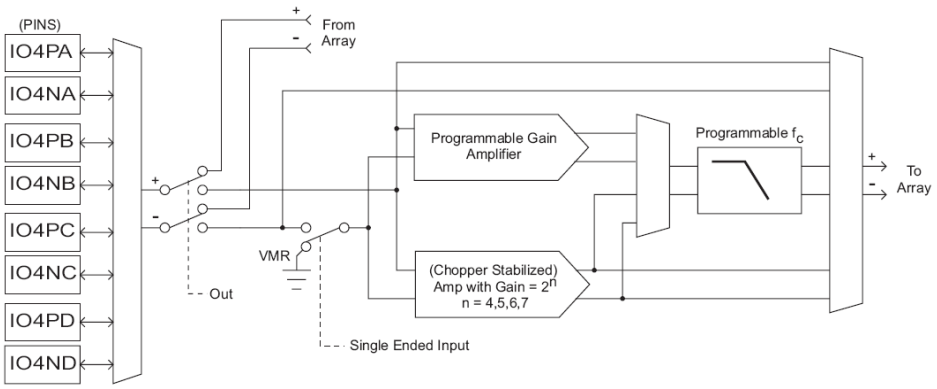


2.23. ábra. Az Anadigm FPAA áramköreiben alkalmazott teljes CAB konfiguráció, egy alkalmazásban.

A 2.23 ábra az Anadigm FPAA-kban alkalmazott programozható cella felépítését mutatja. A CAB-ekben aktív elemként kettő differenciaerősítő és egy komparátor található, a kapcsolómátrix és a kondenzátor-bank mellett. Mindegyik konfigurálható analóg blokkban nyolc kondenzátor van, melyek relatív értéke $0-255$ között programozható. A CAB-ekben kialakított áramkör pontossága nem függ az alkatrész-bázis eleminek értékeitől, viszont azok aránya befolyásolja az áramköri pontosságot, amely így is jobb mint 0,1%.

A komparátor és a műveleti erősítő erősítésének megfelelő vezérlésével, lehetőség van a nyolc bites intervallumfelezéses analóg digitális átalakító működtetésére.

Az áramkör (AN231E04) négy, az egyes CAB-ekhez rendelt konfigurálható ki-, bemenettel rendelkezik, amelyekből IO_1-IO_3 a CAB_1-CAB_3 blokkokhoz, míg a CAB_4-hez az IO_{4A}-IO_{4D} ki-, bemenetek rendelhetők. A globális kimenetek száma, típustól függően, 2–3. Mindegyik ki-, bemenet lehet szimmetrikus vagy aszimmetrikus, illetve a globális kimenetek lehetnek digitális típusúak is. A kapcsolóüzemű FPAA miatt elengedhetetlen a bemeneteken (2.24 ábra) és a kimeneteken (2.25 ábra) elhelyezett szűrők alkalmazása. Ezen szűrők áteresztő tartomá-



2.24. ábra. Az Anadigm FPAA-k bemeneti áramkörének felépítése.

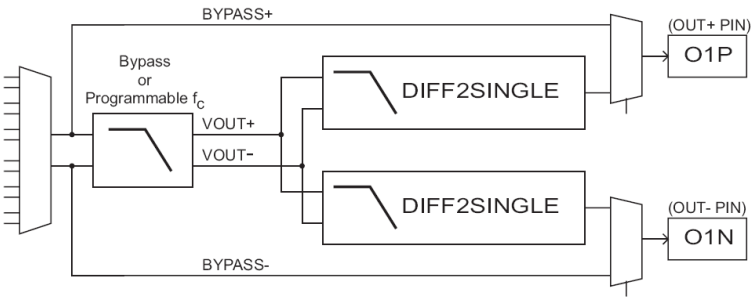
nya ugyancsak programozható. Az IO_{4A}-IO_{4B} bemeneteken, a CAB funkcióktól függetlenül lehetőség van külön programozható erősítő ($a_u = 2^n$ ahol, $4 \leq n < 8$), illetve kapcsolóüzemű[33] stabilizálással offset-korrekciós erősítő, alkalmazására. A felvett villamos teljesítmény minimalizálása érdekében lehetőség van a nem használt kimenetek kikapcsolására.

Az Anadigm FPAA eszközei képesek külső órajelről illetve saját óragenerátorról működni. Az óragenerátor felépítése a 2.26 ábrán látható. Az órajelet négy szinkronizált belső kapcsolt, nem átlapolt kétfázisú órajellé alakítja (2.8 ábra), a programozott osztók beállításainak megfelelően.

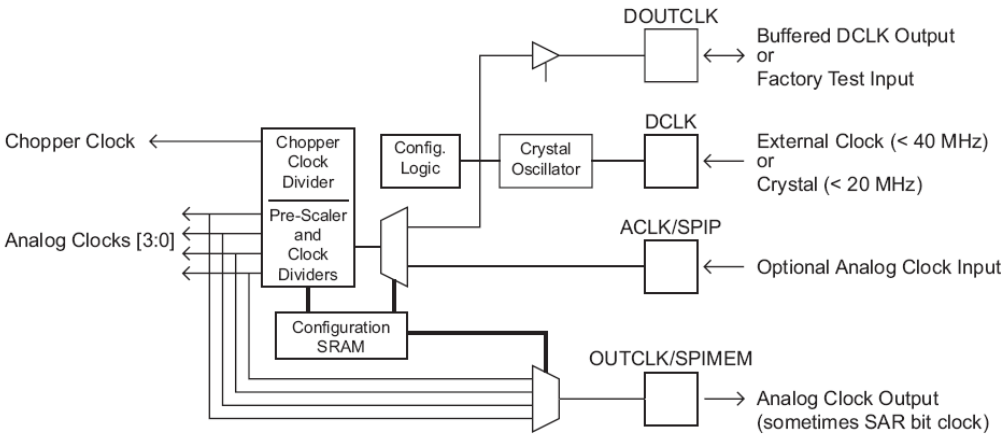
Az FPAA programozása (konfigurálása) SPI vagy SSI[34] felületen történhet. A *stand-allone* alkalmazásoknál lehetőség van, soros EPROM-ból bekapcsolás utáni automatikus program-betöltésre, amihez az FPAA órajelet is generál. A programozás történhet az FPAA-val együttműködő beágyazott eszköz segítségével.

Az Anadigm FPAA eszközökhöz ajánlott fejlesztő környezet[35] legnagyobb előnye, hogy áramköri makrókat generál. Ilyen kész elemi áramkörök, a CAB erőforrásaiból építkezve, különféle erősítők, szűrők, integrátorok, differenciátorok,

[33] chopper
[34] Serial Synchronous Interface (SSI), soros szinkron interfész
[35] AnadigmDesigner2©



2.25. ábra. Az Anadigm FPAA-k kimeneti áramkörének felépítése.



2.26. ábra. Az ANxx típusú FPAA-k óragenerátorának felépítése és annak működési lehetőségei.

oszcillátorok, komparátorok, mintavevő-tartók, egyenirányítók, szorzók, összegzők, analóg-digitál átalakítók,. . . ,stb. lehetnek[36]. Ezeket az elemi áramköröket egy listából (2.27 ábra) kiválasztva, miután paramétereztük, helyezhetjük el az FPAA-ban [120].

A 2.28 ábrán egy 4 CAB-es FPAA áramkörbe töltött dinamikusan rekonfigurálható PID szabályozó elem és két analóg bemenet digitalizálását megvalósító áramkör látható. Az ábra jobb oldalán az FPAA erőforrásainak kihasználtsága látható, az egyes CAB-ekre is részletezve. Látható, hogy a kialakított áramkörök a CAB4-et nem használják és az FPAA teljesítményfelvétele 400$\pm$120mW. A 2.29 ábra, egy a tervezőprogrammal megvalósított inverz Csebisev sávzáró szűrő átviteli és késleltetési karakterisztikáit mutatja.

2.3.6. Kevert-jelű programozható áramkör

A PSoC[37] egy olyan kevert-jelű programozható áramkör család, amely az analóg és digitális programozható áramköri elemek mellett mikrovezérlőt is tartalmaz, felépítése a 2.30 ábrán látható. Ezzel a megoldással egy rugalmas, sokcélúan felhasználható, a dinamikus átprogramozást is hatékonyan támogató architektúrát kapunk.

Az áramkör tizenkettő programozható analóg-, és nyolc programozható digitális blokkot tartalmaz, maximum 12 bites különböző működésű analóg-digitál konverterrel. Az analóg cellák programozhatóan folytonos, vagy diszkrét idejű elven működők lehetnek. A valós idejű megoldásokat precíziós erősítők és komparátorokhoz ajánlják. A pontos paraméterek itt programozható ellenállásokkal állíthatók be. A kapcsolt kondenzátoros megoldások, a különböző analóg-digitál átalakítók, és szűrők megvalósításához ajánlottak.

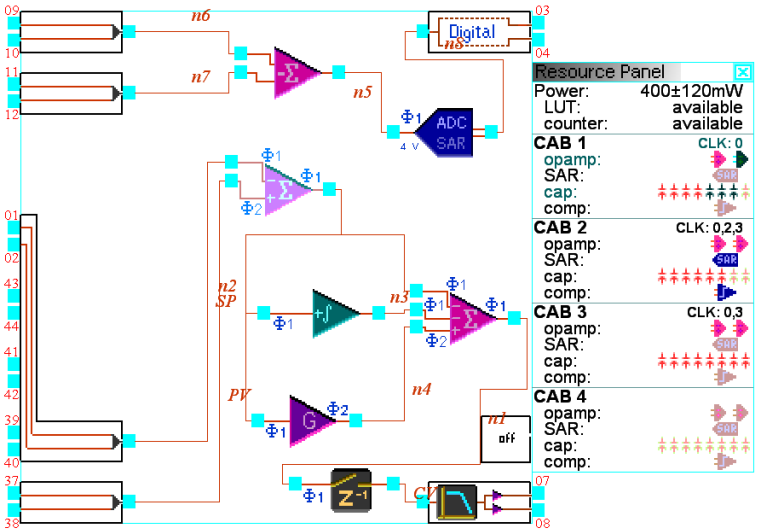
Az egyes analóg blokkok összekapcsolását végző kapcsolóáramkör, hierarchikus mátrix, így csak bizonyos jelutak definiálhatók. Az architektúra, olyan duplikációk kialakítását azonban lehetővé teszi, amely a rekonfigurációs alkalmazásokat is támogatja. Az áramkör család analóg ki-, bemenetekre vonatkoztatott felső határfrekvenciája 10MHz.

[36] Az AN231E04 FPAA áramkörnél 34 áramköri makró van.

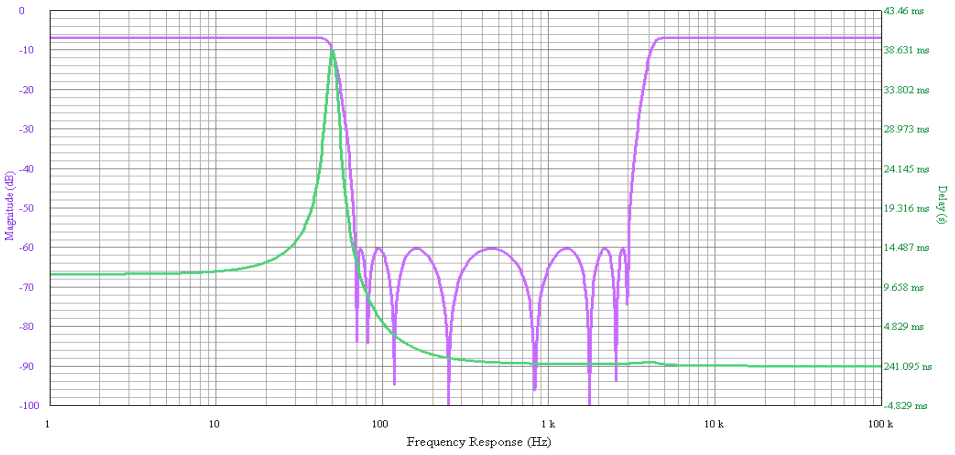
[37] Programmable System-on-Chip (PSoC), Cypress Semiconductor Corporation

CAM	Description	Version	Approved
ADC-SAR	Analog to Digital Converter (SAR)	(*)	Yes
Comparator	Comparator	(*)	Yes
Differentiator	Inverting Differentiator	(*)	Yes
Divider	Divider	(*)	Yes
FilterBilinear	Bilinear Filter	(*)	Yes
FilterBiquad	Biquadratic Filter	(*)	Yes
FilterDCBlockLP	DC Blocking HPF with Optional LPF	0.0.7	No
FilterLowFreqBi...	Low Corner Frequency Bilinear LPF (External...	(*)	Yes*
FilterVoltageCo...	Voltage Controlled Filter	1.4.0	No
GainHalf	Half Cycle Gain Stage	(*)	Yes
GainHold	Half Cycle Inverting Gain Stage with Hold	(*)	Yes
GainInv	Inverting Gain Stage	(*)	Yes
GainLimiter	Gain Stage with Output Voltage Limiting	(*)	Yes*
GainPolarity	Gain Stage with Polarity Control	(*)	Yes
GainSwitch	Gain Stage with Switchable Inputs	(*)	Yes
GainVoltageCo...	Voltage Controlled Variable Gain Stage	(*)	Yes
Hold	Sample and Hold	(*)	Yes
HoldVoltageCo...	Voltage Controlled Sample and Hold	(*)	Yes
Integrator	Integrator	(*)	Yes
Multiplier	Multiplier	(*)	Yes
MultiplierFilterL...	Multiplier with Low Corner Frequency LPF (E...	(*)	Yes*
OscillatorSine	Sinewave Oscillator	(*)	Yes
PeakDetect2	Peak Detector	(*)	(*)
PeakDetectExt	Peak Detector (External Caps)	0.0.3	No
PeriodicWave	Arbitrary Periodic Waveform Generator	(*)	Yes
RectifierFilter	Rectifier with Low Pass Filter	(*)	Yes
RectifierHalf	Half Cycle Rectifier	(*)	Yes
RectifierHold	Half Cycle Inverting Rectifier with Hold	(*)	Yes
SquareRoot	Square Root	(*)	Yes
SumBiquad	Sum/Difference Stage with Biquadratic Filter	(*)	Yes
SumDiff	Half Cycle Sum/Difference Stage	(*)	Yes

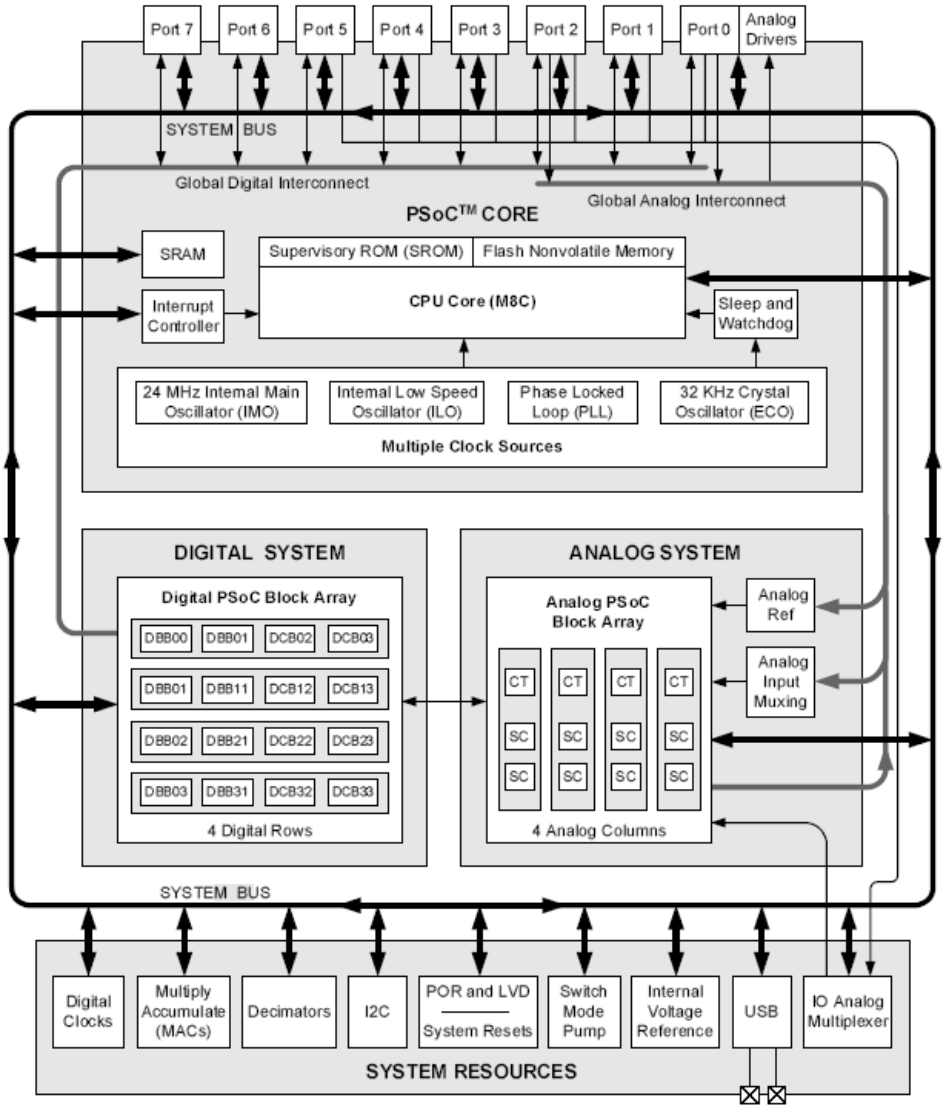
2.27. ábra. Az AN221E04 típusú FPAA-k konfigurálható blokkjaiban kialakítható áramköri makróinak egy részlete.



2.28. ábra. Az AnadigmDesigner2 program felülete, egy megvalósított PID-, és két analóg bemenet digitalizálását végző áramkörrel.



2.29. ábra. Az Anadigm FPAA-ba kialakított sávzáró szűrő frekvencia és késleltetés karakterisztikája.



2.30. ábra. A Cypress Inc. kevertjelű programozható áramkörének blokkvázlata.

A mikrovezérlő 8-bites Harvard architektúrájú, programmemóriája típustól függően 16KB nagyságú lehet, ISSP[38] program betöltési módot lehetővé téve. Az adatmemória nagysága 256 bájt. Az akkumulátor 32 bites. A belső óragenerátor 24MHz.

A mikroprocesszor alapvetően a konfiguráció kialakításában, a CAB-ek, digitális cellák konfigurálásában, a kapcsolómátrix összeköttetéseinek vezérlésében játszik szerepet. Az egyes CAB-ek a digitális cellák, a kapcsolómátrix konfigurálása 256 speciális regiszter segítségével történik. A PSoC blokkok, periféria címen érhetők el, írhatók és olvashatók.

Az architektúrában az analóg alkalmazásokat támogatandó, megjelent egy *decimator* modul, amely a bitsoros 12 bites analóg-digitál átalakító jelét konvertálja több bites digitális jellé. A bekapcsolási alaphelyzetbe állításon kívül, ugyancsak az analóg alkalmazást támogatja az *POR* és *LVD*[39] modul, amely programozható analóg bemeneti feszültség esetén hajt végre program eseményt, vagy készenléti állapotba kapcsolja a processzort.

A gyártó a szabadon felhasználható fejlesztő környezetet[40] kínálja, amely az analóg és digitális áramköri makrók konfigurálását és összekapcsolását teszi lehetővé[41]. Az eszköz programozását támogatja a számos felhasználói könyvtár, amelyet a mikroprocesszor programjába beszerkeszthetünk, módosíthatunk. A konfigurációs kód generálása automatikus, de természetesen lehetőség van *C* és assembly szintakszisú, programozásra is. A felhasználói program lehetőségek fontos része az API[42], amely a perifériák, és a főprogram kommunikációját támogatja, illetve a hatékony megszakítás beállítását segíti.

A környezetnek része egy in circuit emulator is, amellyel a program, a kialakított áramkör helyes működését tudjuk ellenőrizni. A nagysorozatú gyártást támogatja a JTAG-felületről történő programbetöltés lehetősége is [14].

[38] In-System Serial Programming
[39] Power On Reset, Low Voltage Detect
[40] PSoC^{TM} Designer
[41] Integrated Development Environment (IDE)
[42] Application Program Interface, (API)

2.4. Megállapítások

A 2.1-2.3.6 részben bemutattam a programozható analóg áramkörök fejlődését, alkalmazási lehetőségeit, alapvető működésüket, felépítésüket. Sokszor csak a terminológia egyértelműsítése miatt is, a funkcionális egységek milyenségét, azok működését, megvalósítási, felépítési lehetőségeit is ismertettem. Ezekkel együtt taglaltam a technológiai korlátokat, a felhasználás szempontjából fontos jellemzőket.

Az FPAA-k alapvető működését illetően két nagy csoportba sorolhatók; a diszkrét idejű (2.2.2 szakasz) és a valós idejű (2.2.1 szakasz) típusok. A két alapvető elv között a felhasználástól függően választhatunk, a megfelelő eszköz megvásárlásával vagy akár (konfigurálással) programozással (2.3.6 szakasz).

Az „analóg vagy digitális" polémia ebben az esetben is az „analóg és digitális" kompromisszumot eredményezi.

A lgefrisseb programozható analóg áramköri fejlesztések, a több konfigurálható blokk, a nagyobb határfrekvencia, kisebb teljesítmény igény, komplexebb- és speciálisabb eszközök kialakítását szorgalmazzák. Egyre többrétűbb a számítógépes támogatottsága e fejlesztői környezeteknek, egyre nagyobb a kapcsolódási felületük más szimulációs és E-CAD programokhoz. A fejlesztések ugyancsak fontosnak tartják az átkonfigurálhatóság, rekonfigurálhatóság támogatását, akár megkettőzött memória (2.3.5 szakasz) kialakításával, akár egy közreműködő mikrokontroller (2.3.6 szakasz) architektúrába integrálásával.

A bemutatott mérföldkőnek számító alaptípusok (2.3.1-2.3.6 szakaszok), azok fejlődése, fejlődésük minősége, (2.3) igazolja: **A programozható analóg áramkörök jól használhatók, bizonyos előnyük más technológiákkal szemben jelentős, alkalmazási területük egyre bővül. A dinamikus átprogramozás lehetősége a legtöbb FPAA-ban támogatott vagy megoldható. Az áramkörök felhasználási, kapcsolástechnikai kialakítása további lehetőségeket kínál.**

A felhasználás milyenségét, az egyes gyártmányok piaci részesedést figyelve, megállapíthatjuk, hogy manapság a kapcsolt kondenzátoros, diszkrét FPAA-k a legelterjedtebbek (2.3.5 szakasz). Ezeket részletesebben tárgyaltam, nem csak ennek okán, hanem a dolgozatomban ezeket kívánom a továbbiakban felhasználni (4.9 ábra).

3. fejezet

A programozható analóg rendszerek

Egy analóg áramkör struktúráján egy adott topológiai kapcsolatban levő áramköri elemek rendszerét, áramköri elem alatt, egy bizonyos gyártási technológiával előállított alkatrészt értünk [106] [63] [81]. Az áramkör struktúrája egy meghatározott topológia mellett az áramköri elemek értékeinek (alkatrész-paraméterek) $\overline{P}$ vektorát jelenti (3.1),

$$\overline{P} = [p_0, p_1, p_2, \ldots, p_{n-1}], \tag{3.1}$$

ahol p_n az egyes alkatrész releváns értéke [25] [117]. Egy-egy áramkör így definit módon leírható a topológiát meghatározó hálózatfüggvénnyel ($\boldsymbol{n}$), amely az egyes alkatrész lábaknak, külső kapcsoknak az összekapcsolását adja meg, akár összekapcsolási utasítás[1] formájában is. Az elektronikus áramkör funkciója ($\mathbb{F}$) a struktúra függvénye, amelyet formálisan

$$\mathbb{F} = \mathbf{n}(\overline{P}), \tag{3.2}$$

[1] Elektronikus CAD alkalmazások *netlist* állománya

összefüggéssel adhatunk meg [25]. A (3.2) ármkör leírás formálisan használható, azonban alkatrész és hálózatfüggő, ezért általánosan csak az előzőek figyelembevételével alkalmazható.

3.1. Programozható analóg áramkörök

Egy adott analóg áramkör kialakítása, konfigurálása, egy meghatározott felületen keresztül programozása, egyrészt a lehetséges alkatrészek megfelelő összekapcsolását, a topológia kialakítását, másrészt az alkatrész paraméterek megfelelő értékének megadását jelenti. Formálisan (3.3) módon írhatjuk le,

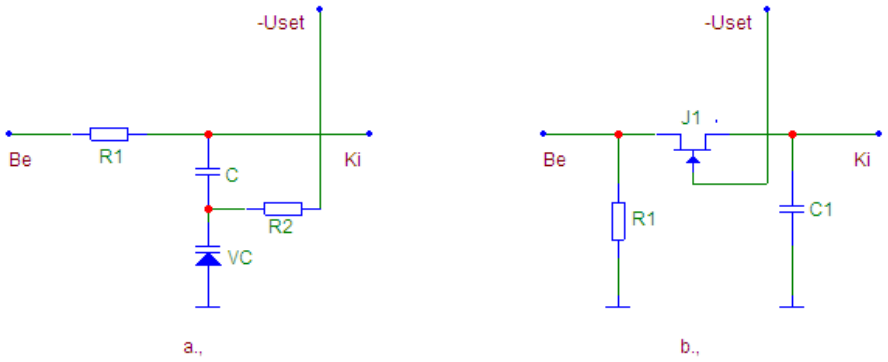
$$\mathbb{F} = \mathbf{b}(\mathbf{n}, \overline{P}), \tag{3.3}$$

ahol **b** bináris sztring, amely a hálózatfüggvényt (**n**) és az alkatrész paraméterek vektorát ($\overline{P}$) adja meg.

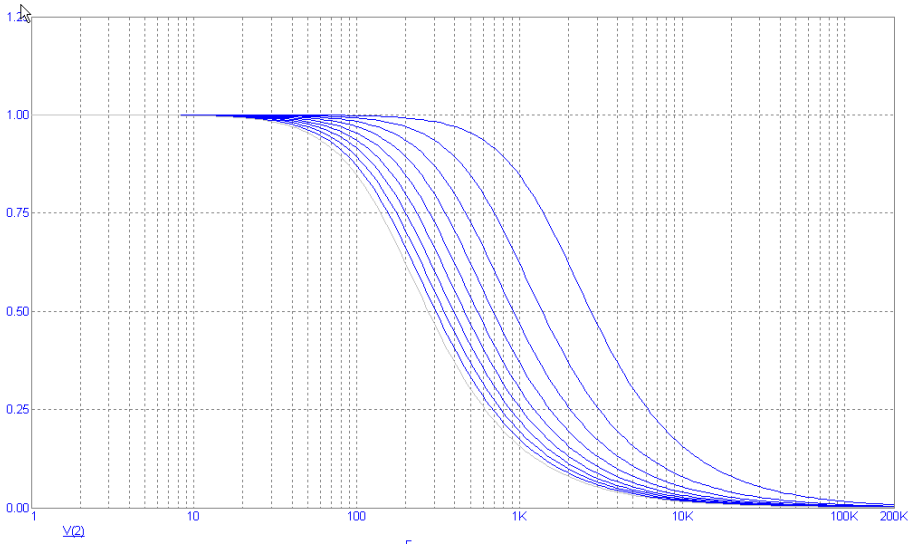
Egy adott topológia mellett, az elektronikus áramkörökben régóta alkalmazott eljárás, egy-egy alkatrész megfelelő külső tényező-függő paraméterének megváltoztatásával, az áramköri felhasználás szempontjából fontos más paraméterét módosítjuk. Ide kell érteni azokat az elektronikus eszközöket, ahol pl. villamos mennyiséggel tudjuk az alkatrész egy-egy jellemzőjét megváltoztatni. Elég ha a 3.1 ábra elterjedten használt alkatrészeire gondolunk, ahol a kapacitás-dióda záróirányú feszültségével, annak kapacitását-, vagy a FET U_{GS} feszültségével, annak R_{DS} ellenállását változtathatjuk meg. Utóbbi esetben egy aluláteresztő szűrő karakterisztikája 3.2 ábrán látható módon viselkedik [111].

Az áramköri jellemzőket digitális értékekkel is megváltoztathatjuk, ehhez azonban digitál-analóg átalakítókra van szükségünk. Az áramköri paraméterek így digitális felületen, bármilyen digitális vezérlővel megváltoztathatók. A fenti lehetőségnél, az alkatrész paraméterek megváltoztatásával módosíthatjuk egy bizonyos áramkör tulajdonságait [96] [107]. Ha a digitális értékeket egy memóriába írjuk, s ezeket valamilyen eljárással a digitál-analóg átalakító bemenére juttatjuk, akkor az áramköri fukciót, annak bizonyos részét, a memória tartalom határozza meg.

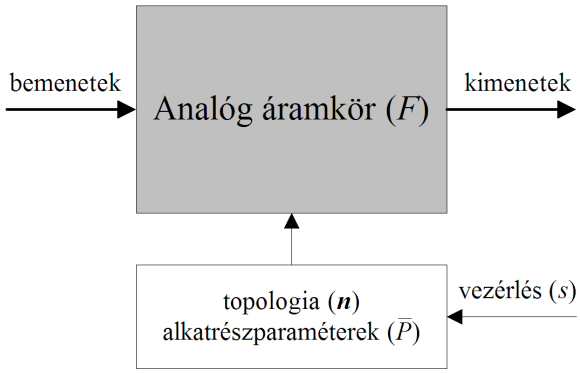
Az integrált áramköri technológia fejlődésével azonban, olyan analóg kapcsolók, kapcsoló mátrixok alakíthatók ki (2.2.5 rész), amellyel az alkatrészek, funk-



3.1. ábra. Alulátersztő szűrő kapacitás-diódával (a) és FET-tel (b).



3.2. ábra. Az alulátersztő szűrő transzfer függvénye a FET U_{GS} feszültsége (U_{set}) szerint paraméterezve.



3.3. ábra. A konfigurálható analóg áramkörök funkcionális blokkvázlata.

cionális egységek, részáramkörök is nagy szabdság mellett kapcsolhatók össze, a kívánt áramköri topológiát is kialakítva [70] [76].

A ma rendelkezésre álló programozható analóg áramkörök ezt a kettős konfigurálhatóságot biztosítják, a felhasználás milyenségétől függően áramköri és analóg áramköri rendszer szintjén is.

3.2. Konfigurálható-rekonfigurálható áramkörök

A 3.1 szakasz jelöléseit felhasználva, a 3.3 ábrán láthatók, a programozható analóg áramkörnek, mint konfigurálható áramkörnek, a legfontosabb összetevői. A bemenetek és kimenetek között a kívánt funkciót ($\mathbb{F}$) megvalósító analóg áramkör helyezkedik el. A (3.2) szerint az áramköri funkciót a topológia (**n**) és az áramköri elemek paraméterei ($\overline{P}$) határozzák meg. Az áramkör konfigurálása (3.3) szerinti áramköri topológia kialakítását és az alkatrész paraméterek megadását jelneti.

A 3.3 ábra „vezérlés” (s) jele lehetővé teszi különféle áramköri funkciók kialakítását. A (3.3) összefüggésben szereplő bináris érték (b) az éppen aktuális (s) vezérlőjel függvényében adja meg az áramköri funkciót ($\mathbb{F}$), formálisan (3.4) írja le:

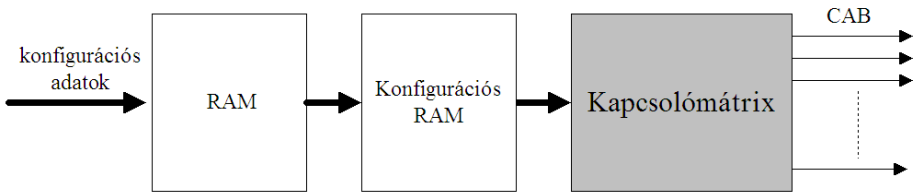
$$\mathbb{F}_s = b(\mathbf{n}, \overline{P}, s). \tag{3.4}$$

Amennyiben a (3.4) összefüggésben a vezérlés időfüggvény, akkor a rekonfigurálható áramköri funkció ($\mathbb{F}_r$) (3.5) szerint módosul, paraméterként az idő is megjelenik,

$$\mathbb{F}_r = b(\mathbf{n}, \overline{P}, s(t)). \tag{3.5}$$

A (3.5)-ben az éppen kialakított topológia (**n**) illetve az áramköri paraméter vektor ($\overline{P}$) és az időfüggő vezérlés ($s(t)$) határozza meg az analóg áramkör éppen aktuális funkcióját. Ebben az esetben rekonfigurálható a programozható áramkör, működés közbeni átprogramozhatóságot kapunk [105] [116] [126] [108] [118].

A hivatkozott szakirodalmak, a programozható analóg áramkörök gyártói sem egységesek a rekonfiguráció meghatározásában. Általában a fentiek szerinti teljes átprogramozhatóságot nevezik rekonfigurációnak [120] [14] [16]. Egyes gyártók [120], a programozható analóg áramkör működését, meg nem zavarva történő átprogramozást, újrakonfigurálást dinamikus rekonfigurációnak nevezik.



3.4. ábra. A rekonfigurálható analóg áramkörök programozása megkettőzött memória segítségével.

A 3.4 ábra a rekonfigurálhatóság feltételeként mutatja a minden konfigurálható analóg blokkhoz tartozó megkettőzött memóriát. A konfigurációs RAM az analóg áramkört pillanatnyilag vezérlő konfigurációt tartalmazza. A második, „árnyék-RAM" a működés közbeni konfigurációs adatok betöltését teszi lehetővé.

Utóbbi tartalmát, az analóg áramkör működésének folyamatossága mellett tudjuk a konfigurációs RAM-ba átírni[2] [120] [14].

3.3. Megállapítások

Az áramkörök átkonfigurálhatósága, az áramköri multifunkcionalitás, adaptivitás lehetőség szerint már többé-kevésbé alkalmazott technika. Ennek segítségével a megváltozott körülményekhez, alkalmazási igényekhez jobban illeszkedő elektronikus megoldások készíthetők, használhatók. A hagyományos diszkrét kapcsolástechnikai elemek, alkatrészek felhasználásával, többnyire a parametrikus átkonfigurálhatóság a jellemző megvalósítás.

A konvencionális áramköri elemekkel, a nyilvánvaló kötöttségekkel, technológiai korlátokkal, lehetőség van a topológiai átkonfigurálás megvalósítására is, azonban ez a nyilvánvaló körülményesség miatt nem alkalmazott eljárás.

A parametrikus és topológiai átkonfigurálás bizonyos alkalmazásokban jelentős előnyöket nyújthat, a költséges áramköri realizálás azonban korlátozza a felhasználás területeit.

A rekonfigurálás tovább növelheti egy analóg áramkör adaptivitását, kiszélesítheti az alkalmazás kereteit.

[2] on-the fly programming

4. fejezet

A robusztus elektronikus rendszerek

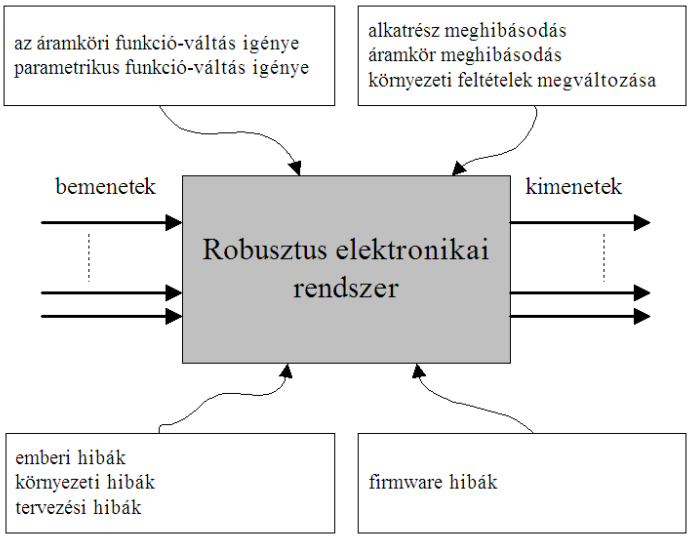
A „robusztus rendszer” egy „rendszer robusztus volta” valamikor a gépészeti alkalmazások körében honos kifejezés volt, ami ma egyre több tudományterületen használatos. A robusztusság mint fogalom, gyakran együtt jelenik meg a megbízhatóság, alkalmazkodóság, hibatűrés, skálázhatóság, rekonfigurálhatóság (3.2 rész) fogalmakkal, néha egy kissé át is fedve ezeket [88] [89].

Magának a robusztusság fogalmának egzakt meghatározása nem egységes, minőségének mértéke uniformizáltan általában nem adható meg. A szakirodalom is bizonyos szöveges meghatározásokat használ, úgymint; nagy megbízhatóságú, nehezen meghibásodó, a megváltozott igényeket is kiszolgáló, költség hatékony,. . . , stb. [23] [62].

A robusztus viselkedésre a „bizonytalan körülmények között is jó működés[1]” meghatározás a leggyakoribb [94], vagy ennél csak egy kissé pontosabb a „kiszámíthatatlan körülmények között is egy hibahatáron belüli működés” definíció [13]. Ugyancsak nehezen meghatározhatók a „körülmények” mennyiség-, és minőség paraméterei s ezzel együtt a robusztusság mértéke sem.

Rendszer szemléletű megközelítés szerint, kisebb teljesítményű egységekből, az összekapcsolás milyenségétől függően is készíthető robusztus berendezés. Ek-

[1] Performance in presence of uncertainties.



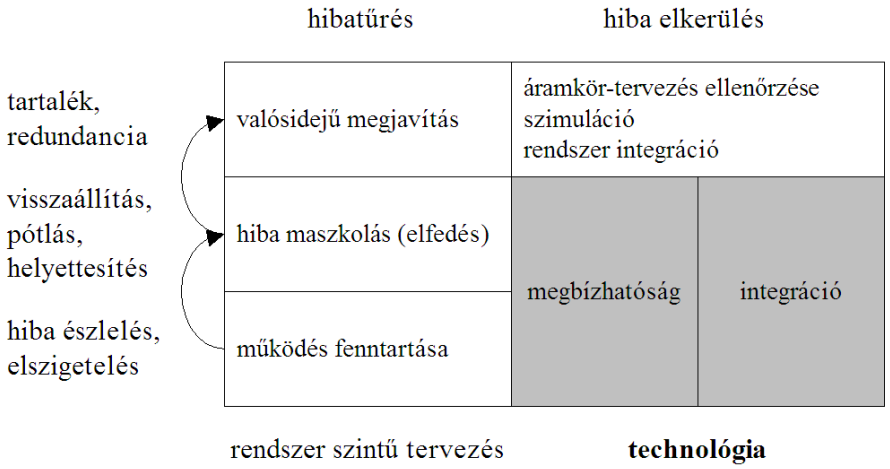
4.1. ábra. Robusztus elektronikai rendszer működését befolyásoló környezeti hatások.

kor, ha a részegységek kapcsolatának minőségét, szükség szerint, meg tudjuk változtatni tovább tudjuk növelni a megvalósított rendszer robusztusságának minőségét [13].

A fentiek alapján egy elektronikus áramkört akkor nevezünk robusztusnak, ha az a stressz-szerű változásokat is meghibásodás nélkül, lehetőleg a normál működést nem zavarva, viseli el.

4.1. Robusztus analóg áramköri rendszerek

Elektronikai rendszer alatt olyan nagy, részegységekből felépülő berendezést értünk, amelyben az egyes funkcionális egységek önálló működésre is képesek. Ez a rendszer robusztus, ha a részegységek, a részegységek kapcsolata révén a teljes rendszer működése a megváltozott körülmények között is biztosított.



4.2. ábra. Egy robusztus elektronikai rendszer működésének összetevői.

A 4.1 ábrán a robusztus elektronikai rendszerre ható külső és belső tényezők láthatók, amelyek egyenkénti, vagy együttes előfordulása mellett is a működés fenntartása kívánatos.

Belső tényezők, melyek magából, a rendszert alkotó, áramkörből származnak; alkatrész meghibásodás, áramkör (részegység) meghibásodás, tervezési hibák, firmware hibák. Ide sorolhatók továbbá a túlmelegedés, belső zaj megnövekedése, alkatrész paraméter megváltozása,..., stb.

Külső hibák közé elsősorban az emberi hibák, a környezeti hibák sorolhatók, úgy mint; nem megfelelő működtetés, magas környezeti hőmérséklet, rádiófrekvenciás zavar sugárzás[2],..., stb.

Egy rendszer adaptivitása ugyancsak a robusztusság szinonimája, ha a környezeti feltételek megváltozásának toleranciája, az áramköri funkció-váltás, a parametrikus funkció-váltás igénye fogalmazódik meg.

Egy robusztus áramkörnél a fenti kívánalmakat részben, az áramköri redundanciával, a túlbiztosítottsággal, illetve a rendszer adaptivitásával, a részegységek

[2]EMC

skálázható kialakításával érik el. Így a teljes rendszer működése, az egyes részegységek rendszerbe kapcsolásával, vagy kikapcsolásával, az egyes részegységek működési paramétereinek megváltoztatásával, módosítható. Ha egy robusztus rendszert kellően sok részegységre osztunk, s e részegységek egyenként konfigurálhatók, az elektronikus eszközök, berendezések adaptivitása, megbízhatósága jelentősen javítható [87].

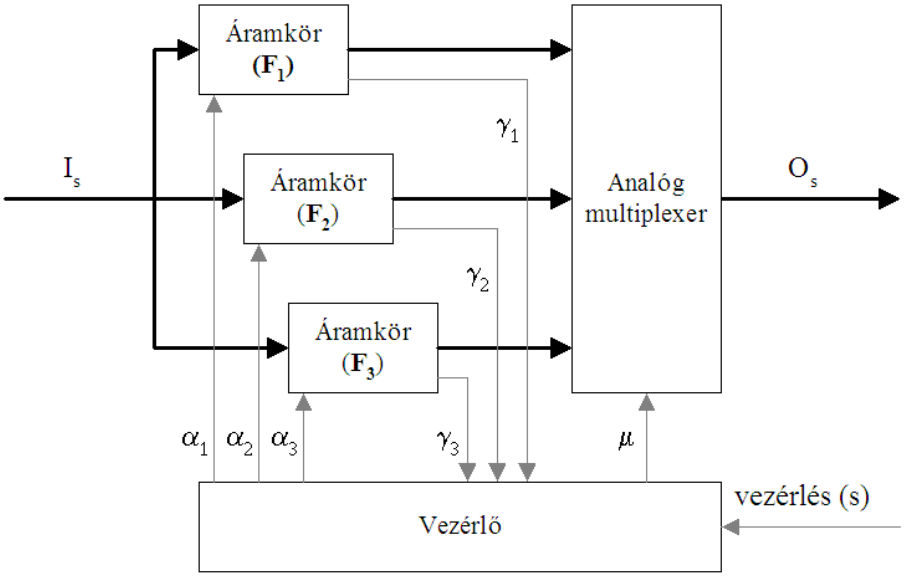
A 4.2 ábra a robusztus elektronikus rendszer működésének összetevőit, azok kölcsönhatását szemlélteti [89]. Egy analóg áramköri rendszert akkor nevezhetünk robusztusnak, ha a megváltozott külső körülményekre hibatűréssel válaszol. Ennek célja a működés fenntartása, akár a hiba maszkolása, akár a hibák valósidejű megjavítása révén. Az áramköri működés fenntartása a hibák észlelésével és azok elszigetelésével történik. A hibák maszkolása a meghibásodott részegység eredeti állapotának helyreállítását, annak pótlását jelenti. A valós idejű megjavítás, akár a karbantartással is, mindig jelenlevő tartalékok aktiválást igényli. A felsorolt komponensek helyes kölcsönhatása, működése, a hagyományos tervezési metodikától eltérő, rendszer szintű tervezéssel valósítható meg.

Magának az áramkörnek, a részegységek meghibásodásának elkerülése többnyire technológiai kérdés, amelybe az áramköri szimulációval támogatott tervezés, a korszerű automatizált gyártás és ellenőrzés, a megfelelő rendszer kialakítási technológia megválasztása értendő [119].

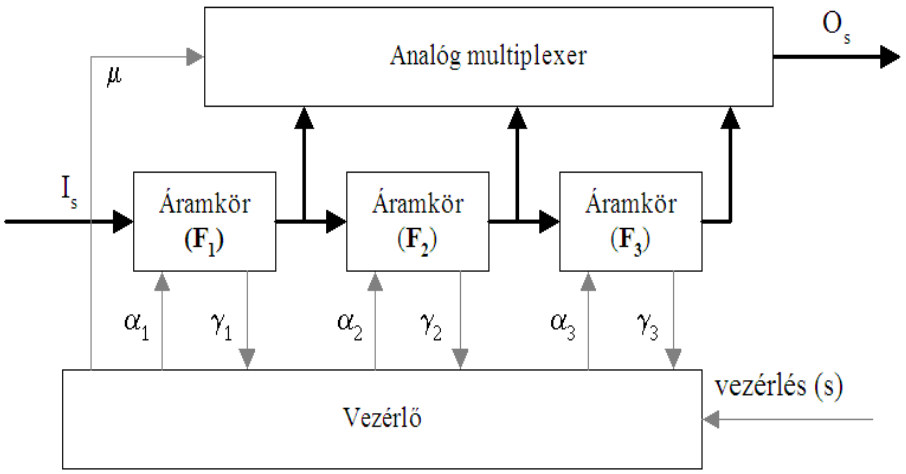
4.2. Robusztus analóg áramköri rendszerek kialakítása

A robusztus analóg áramköri rendszerek kialakításának mikéntjére nem létezik általánosítható megoldás. A 4.2 ábra ajánlásának megfelelően, ez elsősorban rendszer szintű tervezéssel és megfelelő technológiával valósítható meg. Utóbbi a minden idők alkatrész és gyártási technológiájának függvénye, amelynek fejlődése önmagában is az áramköri rendszerek nagyobb megbízhatóságát eredményezi.

Az áramköri redundanciák megengedése, ugyancsak növeli, növelheti a rendszer robusztusságát. Ehhez olyan rendszer szintű tervezés szükséges, ahol megoldott; a működés alatti hibadetektálás, a diagnosztizálás, az ön-helyreállítás, az ön-javítás, a rendszer automatikus ön-menedzselése, amelyhez ajánlott a 4.3 ábrán látható rendszerkialakítási eljárás.



4.3. ábra. Robusztus analóg áramköri rendszer párhuzamos kialakítása.

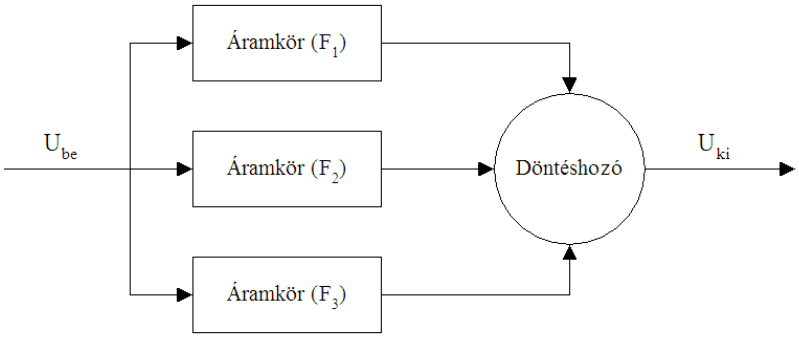


4.4. ábra. Robusztus analóg áramköri rendszer soros kialakítása.

A rendszert alkotó mindegyik áramkör megkapja a rendszer szintű bemenet jelét (I_s). A vezérlő egység az egyes áramkörök működésének helyességéről a γ_n jeleken keresztül szerez információt. A γ_n a bemeneti jeleknek olyan leképezése, amely a vezérlő számára értelmezhető, bizonyos esetekben ez akár az áramkör kimenő jele is lehet.

Az egyes áramköri funkciót ($\mathbb{F}$), az α_n jelek segítségével tudjuk, egy vezérlő kimenetéről megváltoztatni. A megfelelő áramkör kiválasztása a μ felületen keresztül, az analóg multiplexer segítségével történik. A kiválasztott áramkör kimenete lesz a rendszer kimenet (O_s). A vezérlés lehet külső (s) is, amely a további rendszer integrációt támogatja [89] [87]. Az áramkörök ($\mathbb{F}_n$) számának növelésével a rendszer robusztussága is növekszik.

A 4.4 ábrán egy robusztus analóg áramköri rendszer soros kialakítása látható. Az ábra jelölései és az egyes funkciók megegyeznek a 4.3 ábrán használtakkal. Ez az elrendezés a megnövekedett minőségi áramköri funkciók ($\mathbb{F}$) ellátását támogatja. Ha az egyes áramköri funkciókba a transzfer funkciót is beleértjük, be-



4.5. ábra. Hibamaszkolás többségi döntés alapján.

látható, hogy az áramköri tartalékok ebben az esetben is megvannak, amely az áramkörök számának növelésével növelhető.

A 4.3 ábrán látható redundás robusztus analóg áramköri rendszer, mint architektúra, különböző vezérlési, eljárási megoldásokat kínál. Ezek közül, álljon itt néhány, a továbbiakban fontos vezérléstechnikai dekompozició.

A 4.5 ábrán látható eljárásnál a hibamaszkolás többségi „szavazó” algoritmus segítségével történik. Ilyenkor azt a részegységet, amelynek kimeneti érétke hibás, a rendszer működéséből kikapcsoljuk a (4.1) szerint,

$$U_{ki} = \begin{cases} \mathbb{F}_1(U_{be}) & \text{ha} \quad \mathbb{F}_1(U_{be}) = \mathbb{F}_2(U_{be}) = \mathbb{F}_3(U_{be}) \\ \mathbb{F}_1(U_{be}) & \text{ha} \quad \mathbb{F}_1(U_{be}) = \mathbb{F}_2(U_{be}) \neq \mathbb{F}_3(U_{be}) \\ \mathbb{F}_1(U_{be}) & \text{ha} \quad \mathbb{F}_1(U_{be}) = \mathbb{F}_3(U_{be}) \neq \mathbb{F}_2(U_{be}) \\ \mathbb{F}_2(U_{be}) & \text{ha} \quad \mathbb{F}_2(U_{be}) = \mathbb{F}_3(U_{be}) \neq \mathbb{F}_1(U_{be}) \end{cases} \tag{4.1}$$

ahol, $\mathbb{F}_n$ az áramköri funkció. A (4.1)-ben is, az egyszerűbb leírás miatt feltételezzük, hogy az egyes áramkörök releváns értékei a feszültség-jelek.

A (4.1)-ben a 4.5 ábra elrendezésére egy lehetséges megoldást ad. A szavazóegység ettől eltérő, több hasonlóan jó reláció esetén is jó működést eredményez.

Fontos megjegyezni, hogy ezzel a módszerrel csak egyetlen részáramkör meghibásodása deríthető fel. Viszont két egység azonos meghibásodása a rendszer meghibásodását is eredményezi.

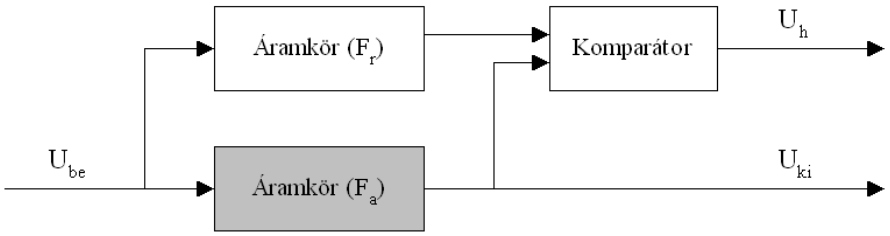
A 4.6 ábrán az áramköri hiba érzékelésének egy megoldása látható. Egy referencia áramkör ($\mathbb{F}_r$) és az aktuális áramkör ($\mathbb{F}_a$) kimeneteinek különbsége hibát jelent (U_h) a (4.2) szerint,

$$U_h = \begin{cases} U_k & \text{ha} \quad |\mathbb{F}_r(U_{be}) - \mathbb{F}_a(U_{be})| \geq U_c \\ 0 & \text{ha} \quad |\mathbb{F}_r(U_{be}) - \mathbb{F}_a(U_{be})| < U_c \end{cases} \tag{4.2}$$

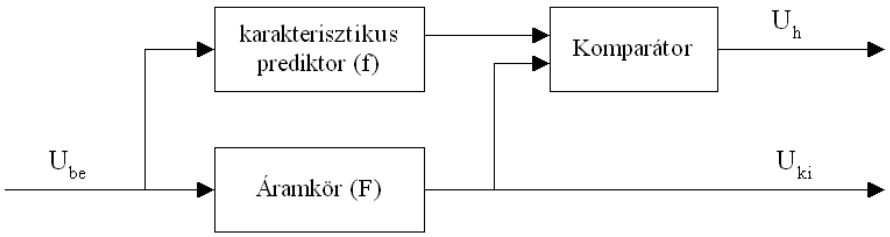
ahol, U_k a komparátor kimeneti feszültsége, U_c a komparátor komparálási feszültsége.

A 4.7 ábra kapcsolása, hasonlóan a 4.6 ábrán látottakhoz, hibaérzékelést végez. Ebben az esetben egy jósló áramkör a bemeneti jelből, a „jó" működés közben megengedett értékeit, tartományát képezi le. Így az aktuális áramkör ($\mathbb{F}$) kimeneti jelét a karakterisztikus prediktor áramkör (f) kimenetével hasonlítjuk össze. A komparátor ablak-komparátorként működik és az áramkör kimeneti értékének, a tartományon belüli voltát ellenőrzi a (4.3) szerint,

$$U_h = \begin{cases} U_k & \text{ha} \quad U_{cl} > (f(U_{be}) - \mathbb{F}(U_{be})) \geq U_{co} \\ 0 & \text{ha} \quad U_{cl} \leq (f(U_{be}) - \mathbb{F}(U_{be})) < U_{co} \end{cases} \tag{4.3}$$



4.6. ábra. Hibadetektálás referencia áramkör alkalmazásával.



4.7. ábra. Hibadetektálás karakterisztikus prediktorral

ahol, U_{cl}, komparátor alsó-, U_{co} felső komparálási küszöb-függvénye, ami az f kimenetéből és a komparátor hiszteréziséből (h) számítható (4.4),

$$U_{cl} = f(U_{be}) - \frac{h}{2}, \tag{4.4}$$

illetve,

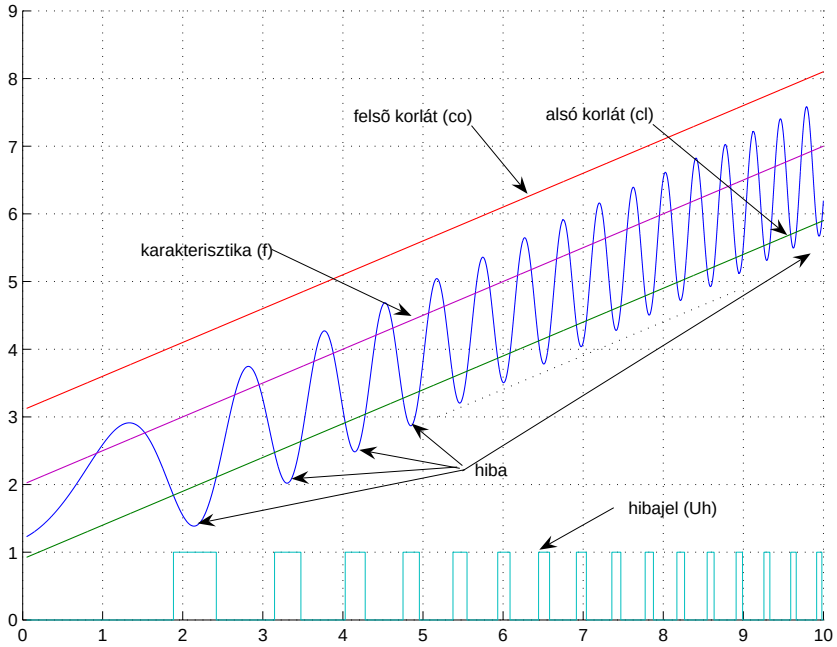
$$U_{co} = f(U_{be}) + \frac{h}{2}. \tag{4.5}$$

A 4.8 ábra a karakterisztikus prediktor működését szemlélteti. A prediktor egység a karakterisztikus függvényt (f) határozza meg, amiből, a (4.3) jelöléseivel, a U_{cl}, U_{co} jelek számíthatók. A kimeneti jel a tartományon kívülre kerül ott hibajel (U_h) keletkezik.

Hiba esetén a kimenet jelének, további felhasználása, illetve, magának az aktuális áramkörnek, valamint a referencia áramkörnek a kiválasztása, cseréje, javítása további rendszertechnikai feladat.

4.3. Megállapítások

Robusztus analóg áramköri megoldásokkal biztosítható a konzisztens, folyamatosan magas szintű működés, amely széles tartományban skálázható, megváltoztatható. Növelhető az analóg áramköri rendszer biztonsága, hatásfoka, csökkenthető a teljesítményfelvétel, a karbantartási és javítási költség.

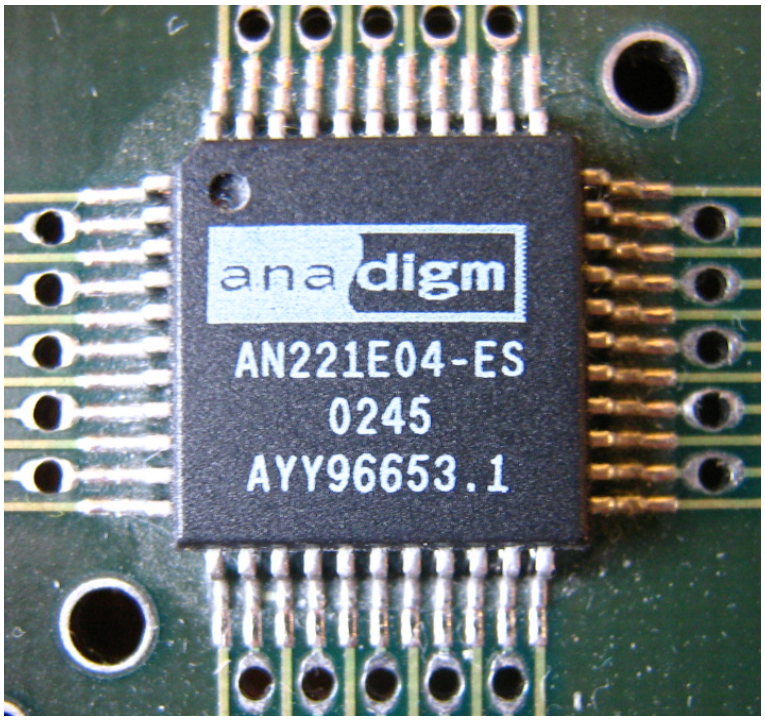


4.8. ábra. Predikcióval meghatározott tartomány és a keletkezett hibajel. A karakterisztikus függvény: $f = 2+2^{-1}t$, $h = 2,2$ hiszterézisnél az alsó korlát-függvény $U_{cl} = 2+2^{-1}t-1,1$, a felső korlát-függvény: $U_{cl} = 2+2^{-1}t+1,1$.

Megvalósítható a robusztus rendszer működés alatti tesztelése, kiküszöbölhetők az inkorrekt jelszintek. Csökkenthető a zajnak, mint hibaforrásnak a jelentősége, megszüntethetők az esetleges túlvezérlési hibák.

A különböző vezérlési eljárások és rendszer topológiák a megjósolható és meg nem jósolható hibák esetére is adhatnak robusztus megoldást.

A robusztus rendszerek minősége tovább növelhető, ha az analóg rendszer digitális felületen keresztül kapcsolódik beágyazott vezérlőhöz, amely



4.9. ábra. Az Anadigm legelterjedtebb programozható analóg áramköre.

nem csak a rendszer topológiáját, de az egyes részegységek áramköri funkcióját is képes megváltoztatni. A fentiek alapján kínálkozik a programozható analóg áramkörök felhasználása a robusztus analóg rendszerekben.

rész I

Javasolt alkalmazási metodika

5. fejezet

Programozható analóg áramkör mint transzfer tényező

Analóg és digitális áramköröket is tartalmazó hibrid elektronikus rendszerekben szükségessé válhat olyan alkalmazás, amikor is analóg paraméterekkel befolyásolunk digitális átviteli jellemzőket és viszont.

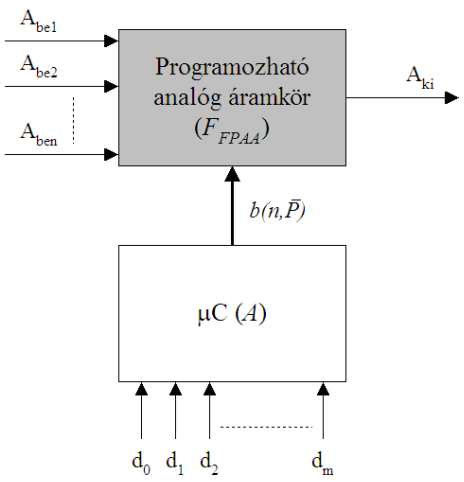
A programozható analóg áramkörök a nagy tartományban megváltoztatahtó áramköri funkciójuk révén alkalmasak erre a célra, megfelelő áramköri rendszer kialakításával.

5.1. Állapotfüggő transzfer karakterisztika

Hibrid áramkörökben előnyös lehet olyan szimbiózis, amikor az analóg áramkörök transzfer karakterisztikája a digitális hálózat bizonyos állapotainak függvénye szerint kell, hogy változzon.

Programozható analóg áramkör és mikrovezérlő 5.1 ábra szerinti kapcsolata ezt teszi lehetővé. Az FPAA A_{be1}- A_{ben} bemenetinek analóg jele az A_{ki} kimeneten jelenik meg az $\mathbb{F}_{FPAA}$ áramköri funkciója (5.1) szerint:

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be1}, A_{be2}, \ldots, A_{ben}). \tag{5.1}$$



5.1. ábra. Programozható analóg áramkör áramköri funkciójának vezérlése digitális függvénnyel.

A mikrovezérlő a programozott algoritmusa (**A**) megszabta módon végzi az FPAA konfigurálását az áramköri topológia és az alkatrészek (makrocellák) értékeinek $(\mathbf{n}, \overline{P})$ megadásával, amit (5.2) alapján írhatunk le:

$$\mathbb{F}_{FPAA} = A[b(n, \overline{P})]. \tag{5.2}$$

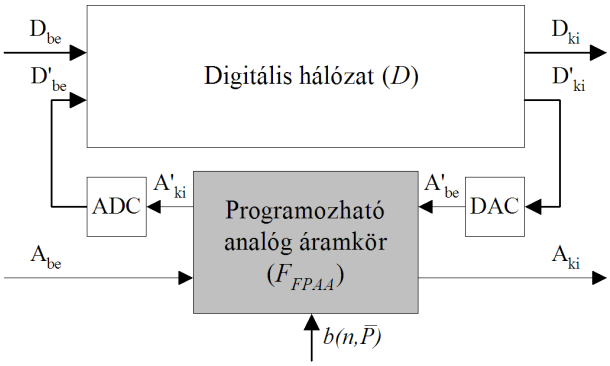
Itt b az $(\mathbf{n}, \overline{P})$-t leíró bináris sztring.

A mikrovezérlő megfelelő digitális párhuzamos bemenetei (d_0, d_1, d_2,...,d_m) a program működését határozzák meg (5.3) alapján,

$$\mathbf{A} = f(d_0, d_1, d_2, \ldots, d_m). \tag{5.3}$$

A (5.1)-(5.3) összefüggésekből formálisan írhatjuk (5.4)-et:

$$(d_0, d_1, d_2, \ldots, d_m) \Rightarrow \mathbf{A} \Rightarrow b(\mathbf{n}, \overline{P}) \Rightarrow \mathbb{F}_{FPAA} \Rightarrow A_{ki}(A_{be1}, A_{be2}, \ldots, A_{ben}). \tag{5.4}$$



5.2. ábra. Visszacsatolt digitális hálózat programozható analóg áramkör ki és bemenetein keresztül

Az eljárás alkalmazható soros bináris állapotokra is. Ebben az esetben a mikrovezérlő módosított algoritmusa a soros állapotok dekódolását végzi, amihez felhasználhatjuk valamelyik alkalmas belső perifériát is.

A mikrovezérlő a megfelelő kódtranszformációt végzi ($b(\mathbf{n},\overline{P})$ kialakítása), a rekonfigurálás gyakoriságának függvényében, akár állapot vezérelte megszakítás alprogrammal, ami lehetővé teszi egyéb feladatok ellátását is.

5.2. Analóg érték függő visszacsatolás digitális hálózatokban

A kombinációs hálózatokban (5.2 ábra) a kimenetek (D_{ki}) értékét a digitális hálózat logikai függvényei ($\mathbb{D}$) és a bemeneti gerjesztés (D_{be}) határozzák meg. Sorrendi (vagy visszacsatolt) hálózatokban $D_{ki} = \mathbb{D}(D_{be}, D_{ki}^{-1})$ függvénye, ahol D_{ki}^{-1} a kimenetek előző állapota [124] [6] [69].

Ha a visszacsatolt hálózatot időinvariáns hálózatként tekintjük, elvonatkoztatunk a szinkron, aszinkron megkülönböztetéstől, akkor a hálózat működése a (5.5) szerint írható le,

$$D_{ki} = \mathbb{D}(D_{be}, D'_{be}). \tag{5.5}$$

Lehetőségünk van egy kombinációs hálózat működését egy programozható analóg áramkör működésétől függően befolyásolni és viszont, ha a 5.2 ábra digitális hálózatának D'_{ki} kimenetét digitál-analóg átalakító után az FPAA A'_{be} bemenetére vezetjük. A programozható analóg áramkör A'_{ki} értéke az áramköri függvényétől ($\mathbb{F}_{FPAA}$), az A_{be} és az A'_{be} feszültségektől függ. Így a (5.5)-ben szereplő D'_{be} a (5.6) szerint,

$$D'_{be} = \mathbf{d}\{\mathbb{F}_{FPAA}[\mathbf{a}(D'_{ki}), A_{be}]\}, \tag{5.6}$$

határozható meg. A ***d*** és az ***a*** jelölje az analóg-digitál, illetve a digitál-analóg átalakítók transzfer függvényeit.

A digitális hálózat kimeneti értékei a (5.5)-ből és (5.6)-ből írható fel,

$$D_{ki} = \mathbb{D}\{D_{be}, \mathbf{d}[\mathbb{F}_{FPAA}(\mathbf{a}((D'_{ki}), A_{be}))]\}. \tag{5.7}$$

A programozható analóg áramkör A_{ki} feszültsége az $\mathbb{F}_{FPAA}$ áramköri funkciótól, az A_{be} értékétől függ, amit a (5.8) alapján határozhatjuk meg,

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be}, A'_{be}). \tag{5.8}$$

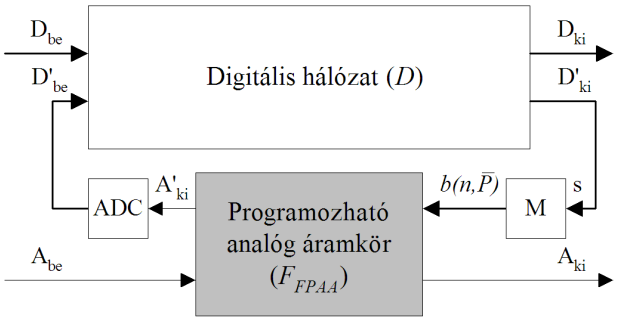
Az A'_{be} értéke a 5.2 ábra jelöléseit követve a (5.9) összefüggés alapján írható fel:

$$A'_{be} = \mathbf{a}\{\mathbb{D}[\mathbf{d}(A'_{ki}), D_{be}]\}. \tag{5.9}$$

Az analóg áramkör kimenetének meghatározásához a (5.7) és (5.8) egyenleteket felhasználva kapjuk (5.10) egyenletet:

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}\{A_{be}, \mathbf{a}[\mathbb{D}(\mathbf{d}(A'_{ki}), D_{be})]\}. \tag{5.10}$$

A (3.5) szerint a programozható analóg áramkör funkciója ebben az esetben is változhat, $\mathbb{F}_{FPAA} = b(\mathbf{n}, \overline{P}, s(t))$, így (5.7) és (5.10) is függvénye a programozható áramkör konfigurációjának.



5.3. ábra. Visszacsatolás digitális hálózat programozható analóg áramkörr kimenetén és programozó bemenetén kersztül.

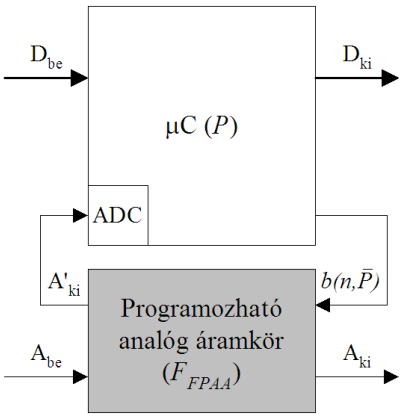
A 5.2 ábra digitális hálózatának D'_{ki}–A'_{be}, vagy az A'_{ki}–D'_{be} visszacsatolások megszüntetésével is működőképes eljárást kapunk. Előbbi esetben a programozható áramkör A'_{ki} értékétől is függő D_{ki} értékeket kapunk, illetve a második esetben D'_{ki} értékeitől is függő A_{ki} értékhez jutunk.

A 5.2 ábra módosított változata látható a 5.3 ábrán. Ebben az esetben a digitális hálózat D'_{ki} kimenete a programozható analóg áramkör konfigurálását, rekonfigurálását meghatározó memóriát (M) címzi. A memória a programozó bemeneten keresztül kapcsolódik az FPAA-hoz.

A (3.4) szerint az áramköri funkció $\mathbb{F}_{FPAA}$ a hálózati toplógia (**n**) és az alkatrész paraméterek ($\overline{P}$) függvénye. Továbbá az $\mathbb{F}_{FPAA}$ függ egy külső vezérlő jeltől (s), ami az egyes **n** és $\overline{P}$ értékeket határozza meg, esteünkben $D'_{ki} \equiv s$. A teljes visszacsatolási hurok ebben az esetben is az D'_{ki} vagy az A'_{ki} helyen megszakítható.

Mivel az alkalmazott memóriák soros elérésűek, így ez a lehetőség többnyire elvi.

A 5.2 és 5.3 ábrákon látható analóg-digitál-, és digitál-analóg átalakítók néhány bites nagyságban, akár magában a programozható analóg áramkörben is megvalósíthatók. Analóg-digitál átalakítóként, komparátorokat kialakítva, összehasonlító elvű analóg-digitál átalakítót konfigurálhatunk, míg digitál analóg átalakítóként súlyozott bemenetű áramösszegző kapcsolás FPAA-ra módosított vált-



5.4. ábra. Mikrovezérlő és programozható analóg áramkör visszacsatolt együttműködése.

zata a célravezető [121].

Az ábrákon szereplő digitális hálózat (D) mikrovezérlőben is megvalósítható, az architektúrából adódó soros feldolgozás sajátosságainak figyelembe vételével.

5.3. Analóg érték függő visszacsatolás mikrovezérlő környezetben

A 5.3 ábra digitális hálózatát mikrovezérlőre cserélve jutunk a 5.4 ábra kapcsolásához.

Az ábrán a korábbiaktól eltérően nem jelenik meg külön egységként az analóg-digitál átalakító. Erre a célra a mikrovrzérlőkben többnyire megtalálható analóg-digitál átalakító perifériát használjuk, de felhasználhatjuk a programozható áramkörökben esetenként megtalálható, vagy általunk kialakított átalakítókat is [64].

A mikrovezérlő digitális kimenetinek (D_{ki}) értéke (5.11) szerint írható fel,

$$D_{ki} = \mathbf{A}(D_{be}, A'_{ki}), \tag{5.11}$$

ahol: (**A**) jelentse a mikrovezérlő programja által meghatározott leképezéseket. A programozható analóg áramkör A'_{ki} kimenetének értékét a (5.12) írja le,

$$A'_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be}), \tag{5.12}$$

ahol: az áramköri funkció ($\mathbb{F}_{FPAA}$) az FPAA-t konfiguráló vezérlés függvénye. A a 5.4 ábra alapján a programozható áramkör áramköri funkcióját meghatározó vezérlés a digitális bemenetek és az FPAA visszacsatoló kimenetének a függvénye, formálisan: $b(\mathbf{n},\overline{P}) \Rightarrow \mathbb{F}_{FPAA}$, ezzel együtt $b(\mathbf{n},\overline{P}) = f(\mathbf{A})$, vagyis $\mathbf{A} \Rightarrow \mathbb{F}_{FPAA}$.

Az ellőbbiek alapján és a (5.11) és (5.12) egyenletből felírhatjuk a (5.13) összefüggést:

$$D_{ki} = \mathbf{A}(D_{be},A_{be}). \tag{5.13}$$

A (5.12) alapján a programozható áramkör kimenete is : $A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be})$. Ezek alapján a programozható analóg áramkör kimeneti feszültségére kapjuk (5.14) összefüggést:

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}\{A_{be},[\mathbb{P}((A'_{ki}),D_{be})]\}. \tag{5.14}$$

Mivel $\mathbf{A} \Rightarrow \mathbb{F}_{FPAA}$, ezért a (5.14) is egyszerűbb alakban írható fel (5.15) szerint:

$$A_{ki} = \mathbf{A}(D_{be},A_{be}). \tag{5.15}$$

Olyan mikrovezérlő programozható analóg áramkör elrendezéshez jutottunk, ahol mind a digitális, mind az analóg kimenet értékeit a program, az analóg, illetve digitális bemeneti értékek határozzák meg.

Ebben az esetben is igaz, ha visszacsatolási hurkot megszüntejük vagy a $b(\mathbf{n},\overline{P})$, vagy az A'_{ki} helyeken, akkor is más minőségben, de működőképes lesz az elrendezés. Ebben a visszacsatolás milyensége, nem csupán topológiai kategória, de a mikrovezérlő program kódjának is függvénye.

stabilitás

6. fejezet

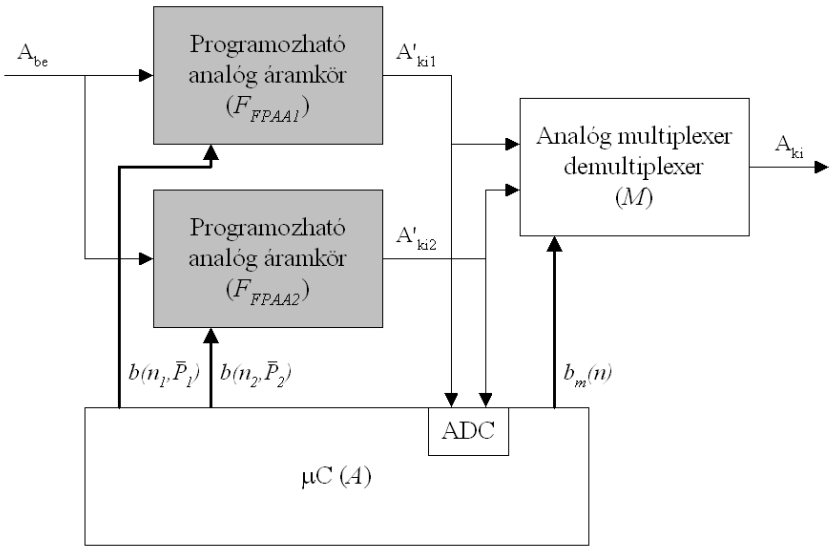
Mikrovezérlővel támogatott rekonfigurálható áramköri megoldások

Mai elektronikus eszközeinkben a beágyazott mikrovezérlő (mikroprocesszor) a legtöbb alkalmazásban kardinális része a digitális vagy analóg áramkörnek. A felhasználás milyenségétől függően, az elektronikus eszközök, a mikrovezérlők különböző típusát az egész berendezést felügyelő beágyazott vezérlőktől a „csak" bizonyos áramköri részfunkciót ellátó „programozható hardver"-ig alkalmazzák.

Ha valamilyen megfontolásból, programozható analóg áramköröket kívánunk felhasználni mikrovezérlő környezetében, akkor az összekapcsolás milyensége, az együttműködés minősége, a megfelelő rekonfiguráció eredményeképpen lehetőséget kapunk új rendszertechnikai megoldások megvalósítására.

A mikrovezérlő programozható áramkörrel történő együttműködése számos olyan lehetőséget nyújt, amely a megvalósított eljárás révén, újabb, az alkalmazástól függően, hatékonyabb áramkör kialakítást tesz lehetővé.

A kialakított mikrovezérlő programozható analóg áramkör együttműködése, gyorsabb, alkalmazkodóbb, olcsóbb áramkörök kialakítását engedi meg.



6.1. ábra. Áramköri funkció váltás mikrovezérlővel és programozható analóg áramkörökkel.

6.1. Áramköri funkció látens megváltoztatása

A programozható analóg áramkörök nyújtotta elvi lehetőségek egyike az áramköri funkció megváltoztatása az áramkör működésének megzavarása nélkül. Ezt támogatja az FPAA-k gyors újrakonfigurálásának, rekonfigurálásának lehetősége. Ezzel igen kis idő alatt tudunk egy programozható analóg áramkörben új topológiát ($\mathbf{n}$), vagy alkatrész (makrocella) paramétereket ($\overline{P}$) kialakítani. Így egy FPAA áramkörön belül, az erőforrásai adta lehetőségeit nem túllépve tudunk eljárni. Ebben az esetben a kimenő jel, az új konfiguráció működésének kezdetén természetesen bizonyos tranzienst tartalmazhat, amely gyakran zavaró.

A 6.1 ábrán látható megoldásnál kettő programozható analóg áramkört (F_{FPAA1}, F_{FPAA2}) használunk amelyek a $b(\mathbf{n}_1,\overline{P}_1)$, $b(\mathbf{n}_2,\overline{P}_2)$ felületen konfigurálhatók. Az FPAA áramkörök kimenetén megjelenő A'_{ki1} és A'_{ki2} jelek az egyes FPAA-k áramköri funkciójától, illetve a bemeneti jeltől (A_{be}) függenek (6.1):

$$A'_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be}), \tag{6.1}$$

ahol: az áramköri funkció ($\mathbb{F}_{FPAA}$) a topológia (**n**) és a paraméterek ($\overline{P}$) függvénye.

Az analóg multiplexer (M) az A'_{ki1} és A'_{ki2} jelekből a b_m digitális bemenetének függvényében kapjuk az A_{ki} jelet (6.2):

$$A_{Ki} = \{b_m[\mathbb{F}_{FPAA1}(A_{be})]\} \vee \{\overline{b}_m[\mathbb{F}_{FPAA2}(A_{be})]\}. \tag{6.2}$$

A két programozható analóg áramkör és a multiplexer működését egy mikrovezérlő felügyeli a programozott algoritmusa (**A**) függvényében. Ugyancsak a mkrovezérlő konfigurálja az éppen nem a jelútban levő, inaktív FPAA-t. A mikrovezérlő analóg-digitál átalakítójának bemeneteire vezetjük az A'_{ki1} és A'_{ki2} jeleket. Ez lehetőséget ad a kellő átkapcsolási pillant megválasztására, ami akkor a legkedvezőbb ha (6.3)szerint:

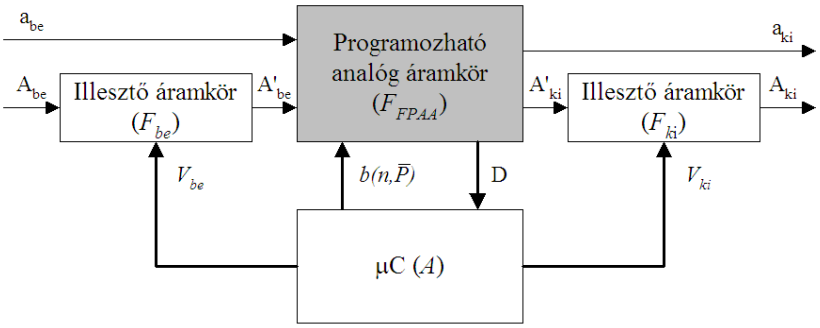
$$|A'_{ki1} - A'_{ki2}| \leq A_j, \tag{6.3}$$

ahol, A_j a még megengedhető tranziens az A_{ki} jelben.

Mivel az analóg-digitál átalakítás elvégzéséhez, a mikrovezérlő analóg bemeneteinek kiválasztásához egy adott idő szükséges, a kimeneti jel frekvenciája, jel-változási sebessége nem lehet tetszőleges nagyságú. Egy bizonyos A_j érték megtartása mellett, a mikrovezérlő órafrekvenciájának növelésével, gyors működésű analóg-digitál átalakító alkalmazásával, megfelelő működtető programmal a javasolt eljárás sebessége növelhető.

A fenti eljárás amplitúdó tartományban biztosít tranziensmentes átkapcsolást a két programozható analóg áramkör kimenete között. A javasolt megoldás azonban kiterjeszthető frekvencia tartományban történő alkalmazásra is. Ilyenkor (6.3), (6.4)-re módosul:

$$|f_{Aki_1} - f_{Aki_2}| \leq f_{min}, \tag{6.4}$$



6.2. ábra. Programozható analóg áramkör kimeneti és bemeneti illesztő áramkörökkel mikrovezérlő környezetben.

ahol, f_j a még megengedhető frekvencia különbség az A_{ki} jel frekvenciájában. Itt a mikrovezérlő az A'_{ki1} és A'_{ki2} kimeneti jelek frekvenciáját méri, komparátoros bemenetein keresztül. Ha különbség a megengedett értéknél kisebb, akkor a multiplexert átkapcsolja.

6.2. Programozható áramkörök illesztése paraméter transzformációval

A programozható áramkörök alkalmazhatóságát, csakúgy mint bármilyen elektronikus alkatrészét, az áramköri határértékek szabják meg. Ilyen paraméter a frekvencia, a kimeneti-, bemeneti feszültségek, áramok, teljesítmények,. . . ,stb. Ha az FPAA nyújtotta előnyöket szeretnénk olyan áramköri környezetben is tudni, amelyben az alkalmazási paraméterek ezt nem teszik lehetővé, akkor a 6.5 ábra elrendezését alkalmazhatjuk.

A programozható analóg áramkör (F_{FPAA}) egyes bemenetei (a_{be}) és bizonyos kimenetei (a_{ki}) közvetlenül kapcsolódhatnak a parametrikusan megfelelő áramköri környezethez. A bemenetek egy része (A_{be}) csakis egy bemeneti illesztő áramkörön (F_{be}) kapcsolódhat az FPAA bemenetére. Ez az áramkör a megfelelő

paraméter transzformációját hatja végre (6.5)szerint:

$$A'_{be} = \mathbb{F}_{be}(A_{be}), \tag{6.5}$$

ahol: $\mathbb{F}_{be}$ a bemenetei illesztő áramkör áramköri funkciója (6.6),

$$\mathbb{F}_{be} = f(V_{be}). \tag{6.6}$$

V_{be} a bemeneti illesztő áramköri funkcióját meghatározó jellemző, amely lehet topológiai ($\mathbf{n}$) vagy parametrikus ($\overline{P}$), vagy mindkettő.

A programozható analóg áramkör egyes kimeneteinél is, hasonlóan a fentiekhez, el kell végezni a megfelelő paraméter átalakítást (6.6) alapján,

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{ki}(A'_{ki}), \tag{6.7}$$

ahol (6.8):

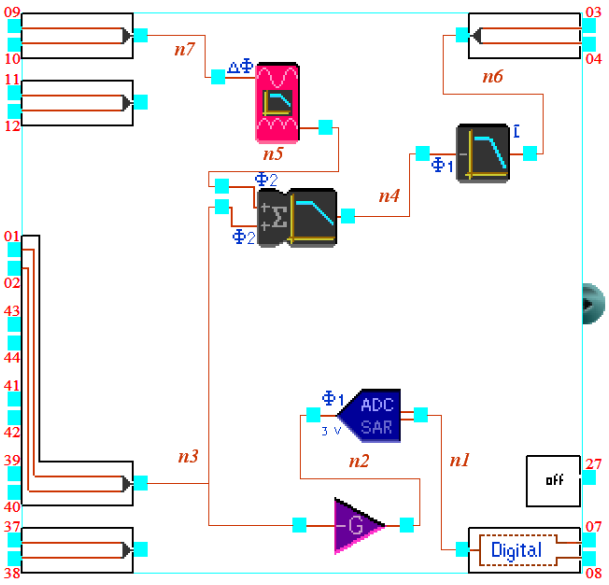
$$\mathbb{F}_{ki} = f(V_{ki}). \tag{6.8}$$

Itt V_{ki} a kimeneti illesztő áramköri funkcióját meghatározó jellemző.

A kimeneti és bemeneti illesztő áramkörök hagyományos alkatrészekből készült, digitális felületen vezérelhető áramkörök. A bemeneten feszültségosztók áramosztók, frekvenciaosztók, a kimeneti illesztőben teljesítményerősítők, szintézerek,..., stb. találhatók.

Az illesztő áramkörök és az FPAA áramköri funkcióit egyaránt a mikrovezérlő (μC) programozott algoritmusa ($\mathbf{A}$) határozza meg a topológiák és az áramköri paraméterek ($\mathbf{n}, \overline{P}$) bináris (b) leképezésével.

A programozható analóg áramkör optimális illesztéséhez ismernünk kell a bemeneti illesztő áramkör kimenetén megjelenő jel számunkra fontos értékét. Ennek megoldására az FPAA egy digitális kimenetét összekötjük a mikrovezérlő megfelelő bemenetével (D), majd a programozható analóg áramkör konfigurálásával a bemeneti illesztő áramkör kimeneti jelét mérjük. Az FPAA kimeneti jelét is hasonlóan mérjük, majd a kimeneti illesztő áramkört ennek megfelelően konfiguráljuk.



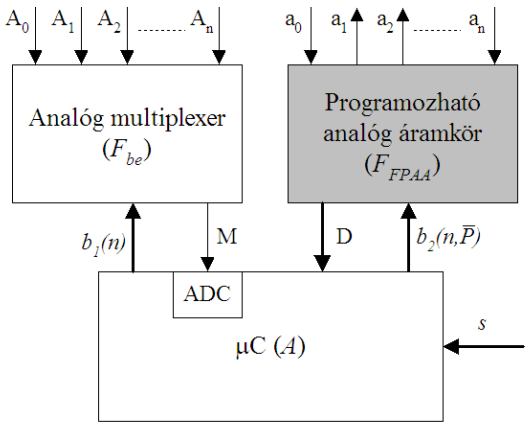
6.3. ábra. Programozható analóg áramkör illesztése a környezetéhez a kimeneti és bemeneti feszültségek mérésével.

A mikrovezérlő programja a D függvénye, ennek viszont függvénye a kimeneti és bemeneti illesztő áramkörök vezérlése, formálisan: $D \Rightarrow \mathbf{A} \Rightarrow (V_{be}, V_{ki})$. Ezzel együtt a mért jellemző értéke (6.9):

$$D = f(A'_{be}, V_{be}, \mathbb{F}_{FPAA}), \tag{6.9}$$

tehát a visszacsatolás megvalósult.

A 6.3 ábrán az $n3 - n7 - n6$ áramkört kívánjuk illeszteni a környezethez, ebben az esetben, a megfelelő feszültség értékeket nem túllépve, de biztosítva a maximális kivezérelhetőséget. Ehhez az $n3 - n1$ áramköri részletet használjuk, amely itt, egy programozható erősítésű erősítőből és egy analóg-digitál átalakítóból áll. Az analóg-digitál átalakító kimenete ($U_{07,08}$) kapcsolódik a mikrovezérlő D bemenetére. Az FPAA rekonfigurálásával a másik bemenet ($U_{09,10} - n7$) jelét, vagy szükség szerint bármelyik belső csomópont feszültségét, is mérni tudjuk



6.4. ábra. FPAA és analóg áramkör különböző pontjainak feszültség mérése mikrovezérlő környezetben.

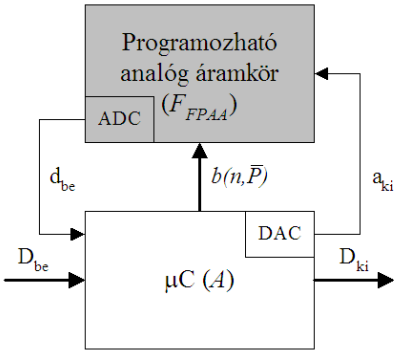
csakúgy, mint az ($n6 - U_{03,04}$) kimeneti jelet.

A fent alkalmazott analóg értékek visszacsatolása a különböző áramköri pontok mérésének funkciójával, kiterjeszthető a programozható áramkör környezetére is (6.4 ábra). Az analóg multiplexer a $b_1 n$ bináris érték függvényében az $A_0 - A_n$ pontok feszültség jelét (M) juttatja a mikrovezérlő bemenetére, ami egy belső analóg-digitál átalakító periféria segítségével ezt digitalizálja.

A programozható analóg áramkör, a már tárgyalt módon, a rekonfiguráció eredményeként más-más pontok jelét digitalizálja a belső analóg-digitál átalakító segítségével. Így a mikrovezérlő programozott algoritmusa (**A**) az M és D érték függvényében is változhat.

Az eljárást feszültség jelekre alkalmaztam, de a mikrokontroller komparátor típusú bementét felhasználva, az FPAA-ban is a megfelelő jel átalakítást kialakítva, impulzus jellemzők mérése is megoldható.

A fenti eljárás egy változata lehet, amikor a multiplexer M kimenete nem a mikrovezérlő bemenetére, hanem az FPAA valamelyik bemenetére (a_n) kapcsolódik. Ilyenkor a már leírtak szerint eljárva, a programozható analóg áramkör erőforrásait kihasználva minimalizáljuk a diszkrét külső áramkörök számát.



6.5. ábra. Programozható analóg áramkör mint mikrovezérlővel együttműködő analóg jelfeldolgozó.

6.3. FPAA mint jelfeldolgozó koprocesszor

A 6.5 ábrán látható mikrovezérlő programozható analóg áramkör elrendezés olyan újragondolása a hibrid számítógép megoldásoknak, amely pragmatikusan felhasználható analóg és digitális áramköri környezetben.

A mikrovezérlő (μC) a digitál-analóg átalakító perifériáján keresztül kapcsolódik az FPAA egyik bemenetére (a_{ki}). Ezt a jelet a programozható analóg áramkör az áramköri funkciójának ($\mathbb{F}_{FPAA}$) megfelelően leképezi (6.10) és a belső analóg-digitál átalakítója segítségével a d_{be} jelet adja a mikrovezérlő egyik bemenetére:

$$d_{be} = \mathbf{d}[\mathbb{F}_{FPAA}(a_{ki})], \tag{6.10}$$

Itt **d** az analóg-digitál átalakító transzfer karakterisztikája.

A mikrovezérlő a $b(\mathbf{n},\bar{P})$ programozó felületen konfigurálja a programozható analóg áramkört, míg a D_{be}, D_{ki} felületen kapcsolódik a környezetéhez, a programozott algoritmusa (**A**) meghatározta módon.

A mikrovezérlőnek, a hagyományos digitális funkciókon kívül valamilyen analóg jelfeldolgozási feladatot is végre kell hajtania. Ilyen funkciók; átlagérték képzés, frekvencia tartományban szűrés, alapharmonikus keresés, spektrum analízis, torzítás mérés,..., stb.

A mikrovezérlő digitális algoritmusának része egy analóg jelet manipuláló algoritmus (α_a), vagyis: $\alpha_a \in \mathbf{A}$, ezért írhatjuk (6.11):

$$a_{ki} = \alpha_a(d_{be}). \tag{6.11}$$

A mikrovezérlő kimeneti jele az összes bemenetre (6.12) szerint:

$$D_{ki} = \mathbf{A}(D_{be} + d_{be}). \tag{6.12}$$

A (6.10)-(6.12) egyenletekből ből következik (6.13):

$$D_{ki} = A\{D_{be} + \mathbf{d}[\mathbb{F}_{FPAA}(\alpha_a(d_{be}))]\}. \tag{6.13}$$

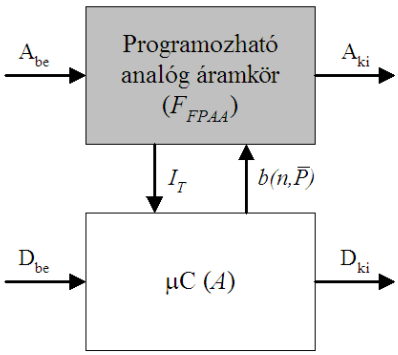
A mikrovezérlő szükség esetén a $(\mathbf{n}, \overline{P})$ áramköri paraméterek megfelelő kódolásával (b) rekonfigurálja a programozható analóg áramkört, az éppen szükséges áramköri funkció ($\mathbb{F}_{FPAA}$) kialakításával.

A digitális jel analóg jellé alakítása majd újra digitalizálása a legszűkebb keresztmetszete a javasolt eljárásnak. Az átalakítás felbontása és az ahhoz szükséges idő, az ami aluláteresztő jelleggel korlátozza az alkalmazhatóság felső határfrekvenciáját. Ha impulzus szélesség modulációs átalakítókat használunk, akkor egy adott felbontásnál, a beágyazott vezérlő órafrekvenciájának növelésével a határfrekvencia is nő.

6.4. Programozható analóg áramkör megszakításos kapcsolata mikrovezérlővel

A a 5.1, 6.1, 6.2, 6.3 szakaszokban bemutatott mikrovezérlő és programozható áramkörök különböző kapcsolatainak speciális esete a 6.6 ábrán látható elrendezés.

A mikrovezérlő (μC) a D_{be}, D_{ki}, a programozható analóg áramkör az A_{be}, A_{ki} felületen kapcsolódik a digitális vagy analóg áramköri környezethez, vagy a 5.1, 6.1, 6.2, 6.3 szakaszokban leírtak szerint egymáshoz. A $b(\mathbf{n}, \overline{P})$ kapcsolat az FPAA konfigurálását végzi az áramköri topológia ($\mathbf{n}$), és az alkatrészek, makrocellák paramétereinek ($\overline{P}$) megadásával.



6.6. ábra. Mikrovezérlő és programozható analóg áramkör kapcsolata megszakítással.

A mikrovezérlő firmware erőforrásai jelentősen tehermentesíthetők, ha nem a környezet (D_{be}, A_{be}) állandó lekérdezésének eredményeként következik be a kívánt program-esemény, hanem a programozható analóg áramkör által generált megszakítás (I_T) hatására.

A megszakítást a programozható analóg áramkör egy kimenete váltja ki, a bemenetek és az áramköri funkció függvényében (6.14):

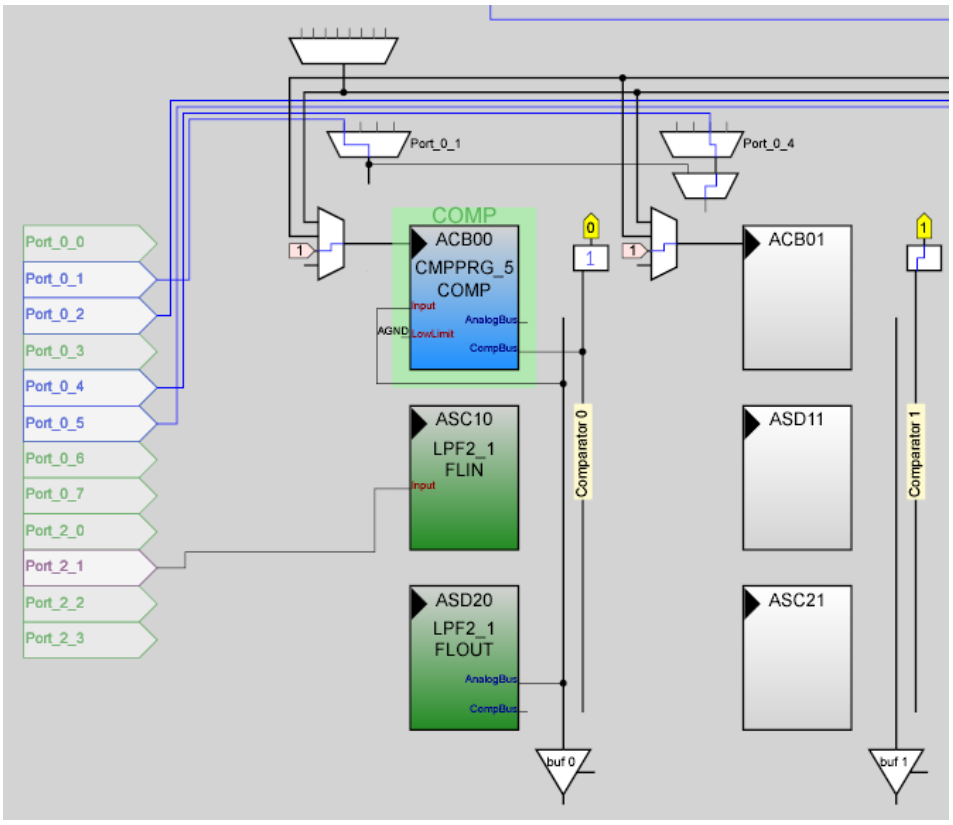
$$I_T = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be}). \tag{6.14}$$

A megszakítást kezelő program részlet (α_{IT}) része a mikrovezérlő programjának (**A**), formálisan: $\alpha_{IT} \in \mathbf{A}$.

Megszakításkor a mikrovezérlő az áramköri funkciót meghatározó jellemzők $(\mathbf{n}, \overline{P})$ betöltésével, a rekunfigárálást végrehajtja (6.15):

$$\mathbb{F}_{FPAA} = \alpha_{IT}[b(\mathbf{n}, \overline{P})]. \tag{6.15}$$

A megszakítás hatására végezheti el a mikrovezérlő az újabb konfiguráció FPAA-ba töltését (5.1, 6.1, 6.2, 6.3 szakaszok), vagy a kívánt analóg bemeneti jel előállítását (5.2, 5.3 szakaszok).



6.7. ábra. Megszakítást kiváltó áramköri részlet PSoC áramkörben.

A fentiek alapján különböző megszakításokat is képezhetünk, más-más megszakítás bemenethez tartozóan, vektoros megszakításkezeléssel.

A 6.7 ábrán látható áramköri részlet egy aluláteresztő szűrőt (ASC_{10}, ASD_{20}) és annak kimenetéhez kapcsolódó programozható komparátort (ACB_{00}) tartalmaz. A komparátor a komparátor sín kimenetén (D) generál megszakítás-jelet, ha a szűrő áteresztő tartományában kellően nagy amplitúdójú jel van.

7. fejezet

Robusztus áramköri alkalmazások programozható analóg áramkörök felhasználásával

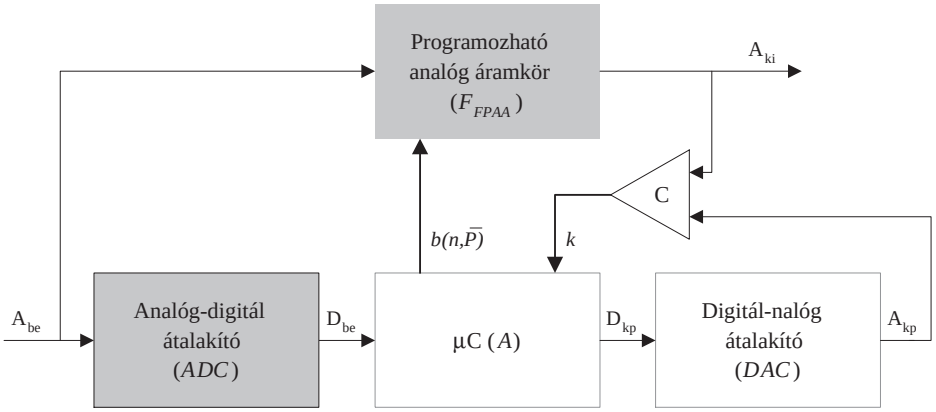
A robusztus elektronikai megoldások legtöbbjében megtalálható a kisebb-nagyobb rendszer szintű, illetve a részegységek áramkör szintű átkonfigurálásának igénye, lehetősége. Ezek lehetnek topológiai, kapcsolástechnikai változtatások, illetve az áramköri paraméterek módosításai.

A programozható analóg áramkörök, megfelelő vezérléssel önmagukban is eleget tesznek a robusztusság által támasztott követelményeknek.

Azonban a mikrovezérlő és a rekonfigurálható analóg áramkörök megfelelő rendszertechnikai kialakítása számos további újabb lehetőséget, előnyt nyújthat.

Ezek a lehetőségek elsősorban, olyan már használatos rendszer kialakítási elvek egyszerűbb, olcsóbb, jobb minőségű megvalósítását jelentik, ahol a rugalmasság, a megváltozott körülményekhez történő alkalmazkodás minősége javul.

A programozható analóg áramkörökből és mikrovezérlőből felépülő rendszer robusztussága gazdaságosan javítható.



7.1. ábra. Robusztus elektronikus áramkör kialakítása karakterisztikus predikcióval.

7.1. Robusztus áramkörök karakterisztikus predikcióval

A 4.2 szakaszban leírtak szerinti robusztus rendszerek hibadetektálásának egyik lehetséges megoldása a karakterisztikus prediktor alkalmazása (4.7 ábra).

Ennek, mikrovezérlővel és programozható analóg áramkörrel megvalósított dekompozicíója látható a 7.1 ábrán. A programozható analóg áramkör ($\mathbb{F}_{FPAA}$) bemenetére érkezik a robusztus rendszer bemenő jele (A_{be}), kimenete (A_{ki}) a rendszer kimenőjele is (7.1) szerinti leírással,

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_{be}), \tag{7.1}$$

ahol: $\mathbb{F}_{FPAA}$ a programozható analóg áramkör áramköri funkciója.

Az A_{be} jel az analóg-digitál átalakító (*ADC*) bemeneti jele is, amely D_{be} jelet állítja elő (7.2),

$$D_{be} = \mathbf{d}(A_{be}). \tag{7.2}$$

Itt **d** az analóg digitál átalakító transzfer karakterisztikája.

A D_{be} jel a mikrovezérlő (μC) egyik bementére kerül, ami ebből előállítja karakterisztikus predikcióval (4.8 ábra) a D_{kp} jelet (7.3),

$$D_{kp} = \alpha_{kp}(D_{be}), \tag{7.3}$$

ahol: α_{kp} a mikrovezérlő $\boldsymbol{A}$ algoritmusának karakterisztikus predikciót megvalósító rész-algoritmusa, vagyis $\alpha_{kp} \in \mathbf{A}$.

A digiál-analóg átalakító a D_{kp} jelet analóg jellé alakítja (7.4) alapján,

$$A_{kp} = \mathbf{a}(D_{kp}), \tag{7.4}$$

ahol: **a** a digitál-analóg átalakító transzfer karakterisztikája.

A hiszterézises komparátor (C) az A_{ki} és az A_{kp} jelekt hasonltja össze (7.5) szerint:

$$k = \begin{cases} \mathbf{01} & \text{ha} \quad (A_{kp} + \frac{h}{2}) \leq A_{ki} \\ \mathbf{00} & \text{ha} \quad (A_{kp} + \frac{h}{2}) > A_{ki} > (A_{kp} - \frac{h}{2}) \\ \mathbf{10} & \text{ha} \quad (A_{kp} - \frac{h}{2}) \geq A_{ki} \end{cases} \tag{7.5}$$

Itt h a komparátor programozható hiszterézise.

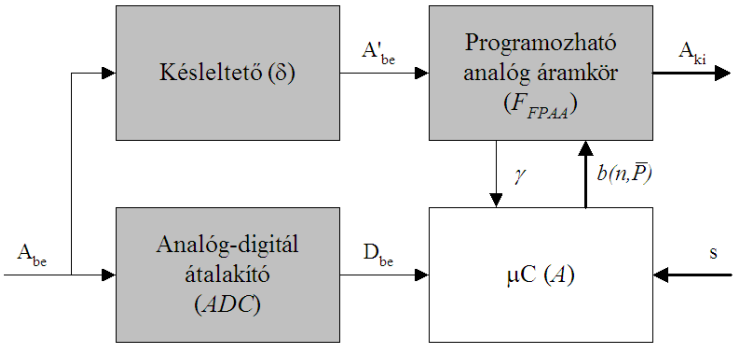
Ha az A_{ki}, a predikció által meghatározott értéktől ($A_{kp} \pm h$) tartományon kivülre esik, akkor a komparátor kimenete (k) bináris **1** lesz, ami a mikrovezérlő számára hibajelzés értékű.

A hiba hatására a mikrovezérlő az **A** algoritmus szerint újra konfigurálhatja az FPAA áramkört a $b(\mathbf{n}, \overline{P})$ felületen keresztül, ezzel kialakítva az újabb áramköri funkciót (7.6):

$$\mathbb{F}_{FPAA} = \mathbf{A}[b(\mathbf{n}, \overline{P})]. \tag{7.6}$$

A (7.1)-(7.6) egyenletekben leírtak alapján a karakterisztikus predikcióval működő robusztus elrendezés működése formálisan: $(A_{ki}, A_{kp}) \Rightarrow k \Rightarrow \mathbf{A} \Rightarrow b(\mathbf{n}, \overline{P}) \Rightarrow \mathbb{F}_{FPAA}$, valamint $\mathbb{F}_{FPAA} \Rightarrow A_{ki}$ és $\alpha_{kp} \Rightarrow A_{kp}$, így a visszacsatolás létrejött.

A mikrovezérlő karakterisztikus program szegmense (α_{kp}), a predikció bonyolultságától, a megkívánt pontosságától függően erőforrás (idő) igényes lehet.



7.2. ábra. Robusztus elektronikus áramkör kialakítása prediktív vezérléssel.

Így ez az eljárás bonyolult algoritmus esetén csak az analóg jel (A_{be}) felső határfrekvenciájának csökkentésével valósítható meg.

A 7.1 ábrán javasolt elrendezés architektúrája a valóságban jóval egyszerűbb, hiszen a szürkével jelzett blokkok a programozható analóg áramkörben alakíthatók ki, a komparátor és a digitál-analóg átalakító a legtöbb mikrovezérlőben megtalálható periféria.

7.2. Prediktív rekonfigurálás

Egy elektronikus rendszer robusztusságának egyik jellemzője, a jelentősen megváltozott bemeneti értékekre adott helyes áramköri reakció. Ide értendő az áramkör „jó” működésekor definiált paraméterek egész sora; a torzítás egy megengedett értéknél nem nagyobb volta, a megfelelő jel-zaj viszony, a hatásfok megfelelően alacsony értéke,..., stb., vagy egyáltalán a meghibásodás nélküli helyes működés.

A 7.2 ábra egy olyan „jósló” elrendezést ábrázol, ahol a programozható elektronikus áramkör ($FPAA$) segítségével robusztus megoldást alakíthatunk ki.

A bemenőjel (A_{be}) egy analóg késleltető egység (δ) és egy analóg-digitál átalakító (ADC) bementére kerül. Az ADC kimenetén megjelenő D_{be} jel a mikrovezérlő

(μC) bemenetére kapcsolódik (7.7),

$$D_{be}(t) = \mathbf{d}[A_{be}(t)], \tag{7.7}$$

ahol: **d** az analóg-digitál átalakító transzfer karakterisztikája. A konverziós időt elhanyagolhatóan kicsinek tekintjük.

A késleltető kimenetén megjelenő A'_{ki} jelre idő tartományban igaz (7.8):

$$A'_{be}(t) = A_{be}(t+\delta), \tag{7.8}$$

ahol δ a késleltető egység késleltetési ideje.

A mikrovezérlő a D_{be} jelet jó közelítéssel t időben megkapja, így a programozott algoritmus (**A**) függvényében az FPAA konfigurálását az $(\mathbf{n}, \overline{P})$ jelek előállításával elvégzi (7.9) szerint,

$$b(\mathbf{n}, \overline{P}) = \mathbf{A}(D_{be}), \tag{7.9}$$

illetve (7.10) szerint,

$$\mathbb{F}_{FPAA} = f[b(\mathbf{n}, \overline{P})]. \tag{7.10}$$

A programozható analóg áramkör kimenetén megjelenő jel (A_{ki}) az áramköri funkció ($\mathbb{F}_{FPAA}$) és a bemenőjel (A'_{be}) függvénye a (7.11) szerint:

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A'_{be}). \tag{7.11}$$

A (7.7)-(7.11) egyenletekből következik időtartományban:

$$A_{ki}(t+\delta) = f\{\mathbf{A}[D_{be}(t), A_{be}(t+\delta)]\}. \tag{7.12}$$

A predikció itt eufém módon a valós idejű működést jelenti, amihez képest δ idővel késleltetjük a rendszer működését az A_{be}, A_{ki} jelekre vonatkozóan. A javasolt eljárás működőképességének feltétele, hogy a mikrovezérlő a programozható analóg áramkör rekunfigárlását kisebb idő alatt végezze el, mint a késleltető késleltetési ideje (7.13),

$$(t_{\mu C} + t_{rec}) < \delta, \tag{7.13}$$

ahol: $t_{\mu C}$ a mikrovezérlő szükséges program-végrehajtási ideje, t_{rec} a programozható analóg áramkör rekonfigurálásához szükséges idő.

A 7.2 ábrán szürkével jelölt áramköri blokkok, az FPAA erőforrásait nem túllépve, mindegyike kialakítható a programozható anlóg áramkörben, illetve az anlóg-digitál átalakító a mikrovezérlőben is elhelyezhető. Késleltető áramkörként mindent áteresztő szűrőt használhatunk.

A 7.2 ábrán szereplő γ jel elvi lehetőség a programozható áramkör egyéb jellemzőinek lekérdezésére (6.4 szakasz).

7.3. Hibamaszkolás robusztus rendszerekben

Robusztus, hibatűrő rendszerek egyik hiba maszkoló eljárása a 4.1 szakasz 4.5 ábráján látható. A többségi szavazó a (4.1) összefüggés szerint kapcsolja ki a rendszerből a meghibásodott egységet, részáramkört.

Programozható analóg áramkörökből és mikrovezérlőből megvalósított hibamaszkoló megoldás látható a 7.3 ábrán.

Jóllehet, egy bizonyos áramköri funkcióból akár három is elhelyezhető egyetlen FPAA-ban, a javasolt elvet nem sértve, de az integrált áramkör katasztrofális meghibásodásából adódó rendszerhibát elkerülendő, három programozható áramkört ($\mathbb{F}_{FPAA1}$-$\mathbb{F}_{FPAA3}$) használunk fel.

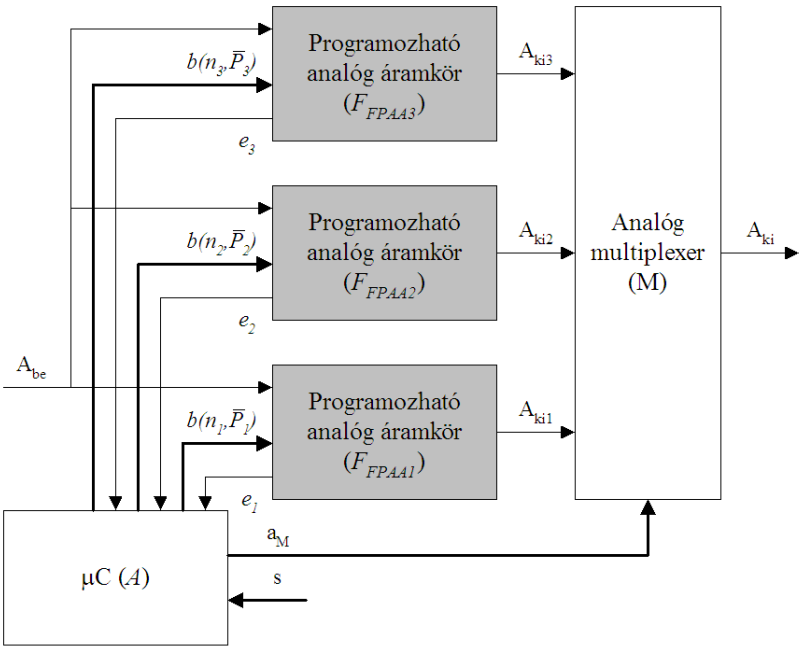
A mikrovezérlő (μC) az s felületen kapcsolódik a rendszer más elemeihez, míg az egyes FPAA-kat a $b(\mathbf{n},\overline{P})$ felületen tudja rekonfigurálni, a programozott algoritmus ($\mathbf{A}$) függvényében.

A programozható analóg áramkörök mindegyikének bemeneti jele az A_{be}, amiből a programozott áramköri funkciójának ($\mathbb{F}_{FPAA}$) megfelelően előálltja az A_{kin} jelet (7.14) szerint,

$$A_{kin} = \mathbb{F}_{FPAAn}(A_{be}), \tag{7.14}$$

ahol: n:1,2,3.

Mindhárom programozható analóg áramkörből egy-egy visszacsatolás (e_n) érkezik a mikrovezérlő bemenetére. Az e_n jelek, az FPAA konfigurálással kiválasztható belső áramköri pontjához, beleértve a kimenetet is, kapcsolódhatnak. A visszacsatolás típusa lehet, a 6.3 ábrán látható analóg-digitál átalakító típusú,



7.3. ábra. Többségi szavazó elvű hibamaszkolás programozható áramkörökkel és mikrovezérlővel.

alacsony frekvenciás analóg jelek feszültségének méréséhez. Lehet továbbá analóg, a mikrovezérlő három komparátor típusú bemenetéhez kapcsolódóan, vagy digitális, a frekvencia, illetve időméréshez.

Ha a kimeneti analóg jeleket komparátoros összehasonlítással vizsgáljuk ($e_n \equiv A_{kin}$), képezzük a három hibajelet a (7.15-7.17) szerint:

$$e_{12} = |A_{ki1} - A_{ki2}|, \tag{7.15}$$

$$e_{13} = |A_{ki1} - A_{ki3}|, \tag{7.16}$$

$$e_{23} = |A_{ki2} - A_{ki3}|. \tag{7.17}$$

A keletkezett hibajelek függvényében, az A_{ki} és $A_{ki1}, A_{ki2}, A_{ki3}$ közötti relációt adja meg a (7.18),

$$A_{ki} = \begin{cases} A_{ki1} \vee A_{ki2} \vee A_{ki3} & \text{ha} \quad (e_{12} \leq \varepsilon) \wedge (e_{13} \leq \varepsilon) \wedge (e_{23} \leq \varepsilon) \\ A_{ki1} \vee A_{ki2} & \text{ha} \quad (e_{12} \leq \varepsilon) \wedge (e_{13} > \varepsilon) \wedge (e_{23} > \varepsilon) \\ A_{ki1} \vee A_{ki3} & \text{ha} \quad (e_{12} > \varepsilon) \wedge (e_{13} \leq \varepsilon) \wedge (e_{23} > \varepsilon) \\ A_{ki2} \vee A_{ki3} & \text{ha} \quad (e_{12} > \varepsilon) \wedge (e_{13} > \varepsilon) \wedge (e_{23} \leq \varepsilon), \end{cases} \tag{7.18}$$

ahol: az ε a még megengedett legnagyobb hibát jelenti.

A mikrovezérlő az anlóg multiplexer[1] (M) címzésével (a_M) a (7.18)-ben meghatározott kimenő jelek egyikét a rendszer kimeneteként (A_{ki}) definiálja.

A (7.15-7.17) egyenletek feszültség és idő tartományban is használható eredményeket adnak. Komparátorként a mikrovezérlő komparátor perifériái felhasználhatók, vagy az analóg bemenetek, multiplexelés segítségével a belső digitál-analóg átalakítóval is működhetnek.

[1] Az anlóg multiplexer vagy demultiplexer megkülönböztetésnek csak az adatáramlás iránya szerint van jelentősége, egyébként analóg multiplexer-demultiplexer.

Amennyiben idő, vagy frekvencia értékek összehasonlítására van szükségünk, a programozható analóg áramkör belső komparátorával digitális kimenetet képezhetünk, majd az e_n jelek aktuális értékeit a mikrovezérlő belső időzítő[2] perifériáival mérhetjük, vagy akár magával az algoritmussal.

A programozható analóg áramkörök rekonfigurálással a hiba, a felderítés után kiküszöbölhető. Így nem csak a hiba elfedését, maszkolását tudjuk megoldani, hanem az FPAA-k erőforrásai adta lehetőségen belül azok javítását is.

7.4. Önszabályozó robusztus eljárás

A méréstechnikában számos olyan alkalmazás fordul elő, ahol a mért objektumról kapott jel különféle paraméterei igen tág határok között változhatnak. A programozható analóg áramkörök felhasználásával olyan robusztus megoldásokat készíthetünk, amelyekben a bemenő jel paraméter-szórásától függetlenül megfelelő minőségű kimenőjelet produkálhatunk.

Tipikus az olyan mérési feladat, ahol a 7.4 ábrán láthatóan a mérendő objektumot (o) generátor (g) oldalon hajtjuk meg, majd az érzékelő (z) oldalon kapott jelet dolgozzuk fel. Itt az analóg jelfeldolgozó egységtől[3] olyan kimeneti jelet várunk amely, nagy dinamikájú, kellően kis zajú, és a kívánt átviteli karakterisztikát valósítja meg.

Ilyen felhasználás az orvos-elektronikai alkalmazások, a különféle érzékelők, szenzorok területén, az ipari mérőberendezésekben lehet jelentős, ott ahol a mérési feladat, annak minősége, a megkövetelt pontosság szükségszerűen változhat.

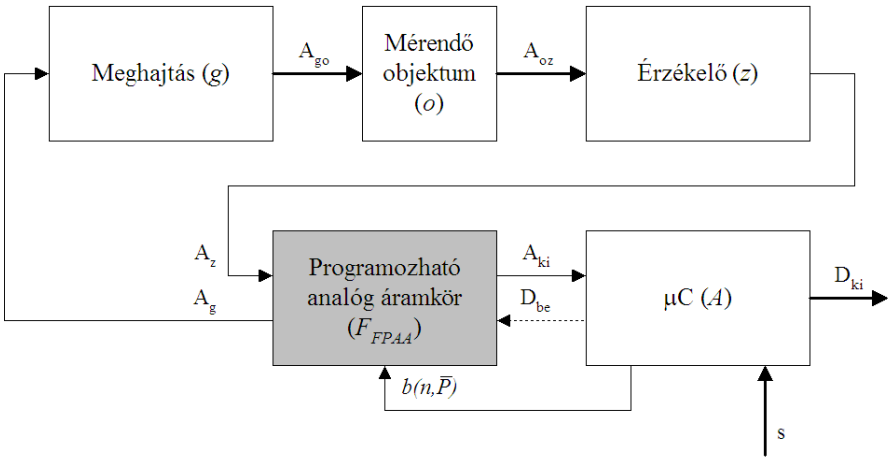
A 7.4 ábrán a mérendő objektumot az A_{go} jellel hajtjuk meg. Ennek hatására a saját transzfer karakterisztikája függvényében (f_o) az A_{oz} kimenő jelet produkálja (7.19),

$$A_{oz} = f_o(A_{go}). \tag{7.19}$$

Hasonlóan a meghajtásra is felírhatjuk (7.20):

$$A_{go} = f_g(A_g), \tag{7.20}$$

[2]Timer
[3]Pre-processor



7.4. ábra. Önszabályozó analóg robusztus rendszer kialakítása mérőberendezésben.

illetve az érzékelőre is (7.21):

$$A_z = f_z(A_{oz}). \tag{7.21}$$

Itt f_g a meghajtás-, f_z a lezárás transzfer függvénye.

A programozható analóg áramkör kimenete (A_g) és bemenete (A_z) közötti teljes átvitel a (7.19)-(7.21) egyenletekből (7.22) következik:

$$A_z = f_s\{f_o[f_g(A_g)]\}. \tag{7.22}$$

A meghajtó generátort vezérlő jel (A_g) a programozható áramkör kimenetén jelenik meg. Ez vagy mint oszcillátor jel az FPAA-ban keletkezik, ilyenkor: $A_g = \mathbb{F}_{FPAA}$, vagy a mikrovezérlő (μC) programjától (**A**) függően alakul ki a D_{be} vezetéken (7.23),

$$A_g = \mathbb{F}_{FPAA}(D_{be}), \tag{7.23}$$

ahol: (7.24)

$$\mathbb{F}_{FPAA} = \mathbf{A}[b(\mathbf{n}, \overline{P})]. \tag{7.24}$$

A a mikrovezérlő programozott algoritmusa, $b(\mathbf{n}, \overline{P})$ az áramkört leíró hálózatfüggvény és alkatrész paraméter-vektor bináris leképezése.

A programozható analóg áramkör kimenetén megjelenő A_{ki} jel az FPAA áramköri funkciójától és az A_z jeltől függ (7.25):

$$A_{ki} = \mathbb{F}_{FPAA}(A_z). \tag{7.25}$$

A mikrovezérlő D_{ki} kimenetén megjelenő bináris jel, az A_{be} és **A** algoritmus függvénye (7.26):

$$D_{ki} = \mathbf{A}(A_{ki}). \tag{7.26}$$

Mivel a programozható analóg áramkör átviteli karakterisztikája, a D_{be} jel értéke is a mikrovezérlőt működtető program függvénye, a kimeneti jel a (7.22)-(7.26) alapján a lehetséges egyszerűsítések elvégzése után(7.27),

$$D_{ki} = \mathbf{A}\{f_z[f_g(f_o)]\}. \tag{7.27}$$

Tehát, a D_{ki} kimenet értéke alapvetően, a mikrovezérlőt működtető program, a meghajtó-, és érzékelő áramkör transzfer karakterisztikájától és a mérendő objektum átvitelétől függ.

A javasolt eljárás előnyösen használható olyan alkalmazásoknál, ahol a mérendő objektum transzfer karakterisztikája nem lineáris, az orvosi alkalmazások legtöbbje ilyen (pl. feszültségfüggő a bőr ellenállása).

Előnyösen felhasználható a javasolt elrendezés áramkörök átvitelének méréséhez, akár egy mérőautomata kimeneti és bemeneti egységeként. Így olyan gyártást támogató autonóm mérőkészülékekben[4], amelyek, a mért objektumról a lehető legtöbb, a hibaanalízist, a minőségbiztosítást a legjobban kiszolgáló parametrikus jellemzőt kell, hogy adják. Ennek érdekében, a mérendő áramkört generátor oldalról más-más jellel (feszültség, frekvencia, fázis,..., stb.) vezéreljük, és lezárás oldalon is, a vezérlés függvényében módosuló jelfeldolgozást hajtjuk végre.

[4] In Circuit Tester (ICE), In board Tester (IBT)

Ajánlható a javasolt eljárás bizonyos érzékelőkben történő felhasználásra, amikor is nem csak a szenzor jelét tudjuk igen tág határok között kondicionálni, előfeldolgozni, hanem alkalmunk van, az objektum változásának függvényében, a generátor meghajtó jelének változtatására is.

A programozható analóg áramkör kívánt átviteli karakterisztikája, ugyancsak a rekonfigurálás segítségével, a belső, a kívánt adattal feltölthető táblázat (LUT), segítségével kényelmesen megvalósítható, módosítható.

7.5. Soros-párhuzamos analóg robusztus rendszer kialakítása

A 4.2 szakaszban, a 4.3 ábra a robusztus rendszer párhuzamos-, míg a 4.4 ábra a soros megvalósítását mutatja. A soros kialakítás a minőségi-, a párhuzamos architektúra a mennyiségi feldolgozási igényeket szolgálja, mint a környezet megváltozására adott robusztus válasz.

A fenti két megoldás közötti, „mennyiségi" vagy „minőségi" dilemmát oldja fel a 7.5 ábrán látható, a soros és párhuzamos topológiájú rendszer előnyeit ötvöző robusztus megoldás.

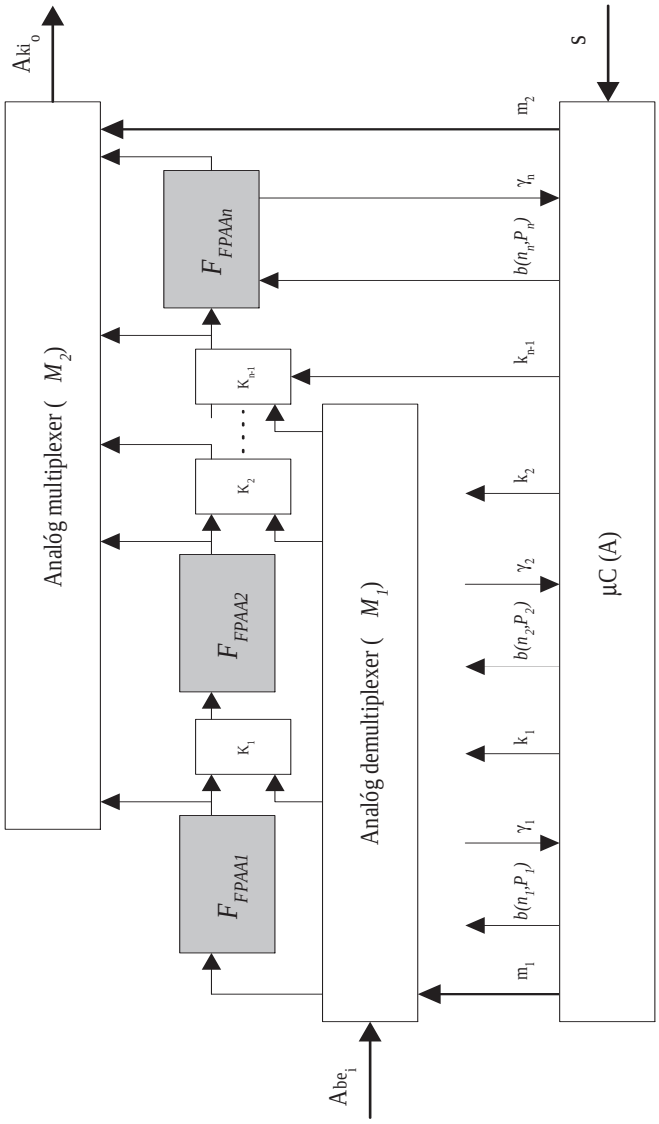
A bemenetek (Abe_i) egy anlóg demultipkexer (M_1) bemenetei, amely a bemeneti jelek számától (i) függően (7.28),

$$i(1 \rightarrow \frac{n}{i}), \tag{7.28}$$

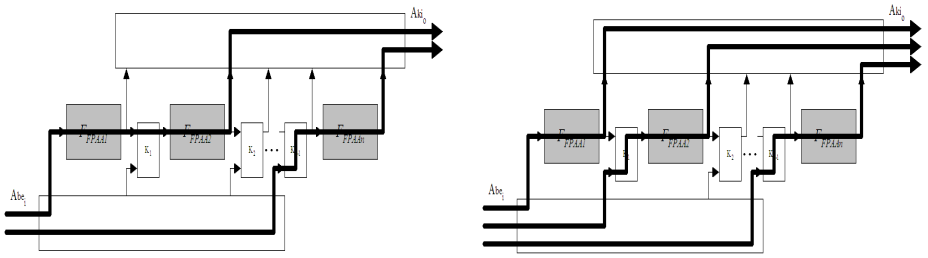
szervezésű, ahol: i=1; 2; 3;...;n. A demultiplexer címzését (m_1) a mikrovezérlő (μC) végzi.

A demultiplexer kimenetein $2 \rightarrow 1$ szervezésű multiplexerek (K_1–K_{n-1}) találhatók amelyek vagy az előző programozható analóg áramkör ($\mathbb{F}_{FPAA}$) kimenetét, vagy az Abe_i jelet kapcsolják a következő FPAA bemenetére, a k_n címző bemenet értékétől függően.

Mindegyik programozható analóg áramkör konfigurálható a $b(\mathbf{n}_n, \overline{P}_n)$ bemeneteken keresztül, amit a mikrovezérlő a külső s jel függvényében, illetve a γ_n visszacsatoló jelek függvényében tesz meg a programozott algoritmusa ($\mathbf{A}$) függ-



7.5. ábra. Soros-párhuzamos topológiájú robusztus rendszer programozható analóg áramkörökkel.



(a) (b)

7.6. ábra. Különböző robusztus topológiák kialakítása, két soros és egy párhuzamos (a), illetve három párhuzamos (b) kapcsolású programozható analóg áramkör.

vényében. Az FPAA-k kimenete m_2 cím függvényében a multiplexer (M_2) kimeneteire (Aki_o) kerül. A multiplexer (7.29),

$$i(\frac{n}{i} \rightarrow 1), \tag{7.29}$$

szervezésű, ahol: i=1; 2; 3;. . . ;n.

Az M_1, M_2 és a K_n kapcsolók egy kapcsoló mátrixot képeznek, amelyek nagy konfigurációs szabadságot engednek meg, ebben az esetben a programozható analóg áramkörök összekapcsolását illetően. A K_n multiplexerek az egyes FPAA-kban is kialakíthatók, az adatválasztó bemeneteik így beleértendők a $b(\mathbf{n}_n, \overline{P}_n)$ konfigurációs függvényekbe.

Ezzel az architektúrával n-től függően nagyfokú áramköri redundanciát képezhetünk, akár a 7.3 szakaszban leírt hiba detektálás eredményeként is.

A 7.6 ábra két különböző konfigurációjú robusztus rendszert mutat. A 7.6 (a) ábrán két soros ($\mathbb{F}_{FPAA1}$, $\mathbb{F}_{FPAA2}$) anlóg programozható áramkör helyezkedik el az egyik bemenet és az egyik kimenet között, melyek a nagyobb minőségi jelfeldolgozási igényt támogatják. A másik jelút az $\mathbb{F}_{FPAAn}$-en megy keresztül. A 7.6 (b) ábrán három párhuzamos elrendezésű FPAA található, amely három bemenet és három kimenet között helyezkedik el, a nagy mennyiségű analóg jel feldolgozását támogatandó.

A javasolt eljárással olyan univerzális nagy robusztus rendszer alakítható ki, amelyben a rendszer topológiája rugalmasan változtatható. Ezzel együtt a programozható analóg áramkörök használatával a rendszerelemek is nagy tartományban konfigurálhatók. Az elrendezés támogatja a 7.3 szakaszban leírt hibamaszkolást és a 7.4 szakaszban javasolt önszabályozó analóg robusztus rendszer kialakítását.

Az elrendezés a feladat, a megkívánt robusztusság függvényében skálázható, amely az FPAA-k számának növelésével nő.

8. fejezet

Önszabályozó adaptív rendszerek kialakítása programozható analóg áramkörökkel

Hagyományos alkatrészekből, heurisztikus tervezéssel egy bizonyos áramköri funkció sokféle módon megvalósítható. Különböző peremfeltételek meghatározta módon lehet egy-egy áramkört kialakítani. Egyik leggyakoribb ilyen szempont, az alkatrész bázisra optimalizált tervezés.

Programozható analóg áramkörökben a lehetséges alkatrészek, makrocellák milyensége és felhasználható mennyisége is determinált. A kialakítható áramköri funkció a topológia, a lehetséges makrocellák és azok paramétereinek a függvénye. Ez igen nagy mozgásteret enged a konfigurálásnak, azonban ez nem végtelen.

A 6 és a 7 fejezetekben ajánlott alkalmazásoknál a programozható analóg áramkörök konfigurálását megvalósító aktuális topológia (**n**), és az éppen megfelelő paraméterek ($\overline{P}$) rendelkezésre áltak.

Az FPAA-k konfigurációja és rekonfigurálása mikrovezérlői támogatottsággal, az adott alkalmazás sajátosságainak legmegfelelőbben, rugalmasan és hatékonyan megvalósítható.

Jól meghatározott korlátokkal a nem túl hatékony algoritmusok is gyorsabbá, konvergensebbé tehetők.

Rekonfiguráció	Adatbázisból (Statikus)	Algoritmussal (Dinamikus)
Egyes paraméterek cseréje $(p_0, p_1, p_2, \ldots p_n)$	Egyszerű, gyors, μC –, M +	Közepesen gyors μC +, M +
Teljes paraméter-vektor cseréje $(\overline{P})$	Egyszerű, gyors, μC –, M +	Közepesen bonyolult μC ++, M ++
Topológia cseréje $(\mathbf{n})$	Egyszerű, gyors, μC –, M ++	Bonyolult μC +++, M ++

8.1. táblázat. Programozható analóg áramkörök konfigurálásának szintjei és jellemzői, a mikrovezérlő (μC) és a memória (M) felhasználás szerint.

Megfelelő áramköri architektúra és az alkalmazott algoritmus interakciója további lehetőségeket ad némi önszerveződés megvalósítására.

8.1. Programozható analóg áramkör rekonfigurálása mikrovezérlő támogatásával

A korábbi fejezetek alapján a programozható analóg áramkörök konfigurációját, az áramköri funkció ($\mathbb{F}_{FPAA}$) kialakítását az áramköri topológia ($\mathbf{n}$) és az alkatrészek paraméter vektorának ($\overline{P}$) a megadása jelenti, a (8.1) szerint:

$$\mathbb{F}_{FPAA} = b(\mathbf{n}, \overline{P}), \tag{8.1}$$

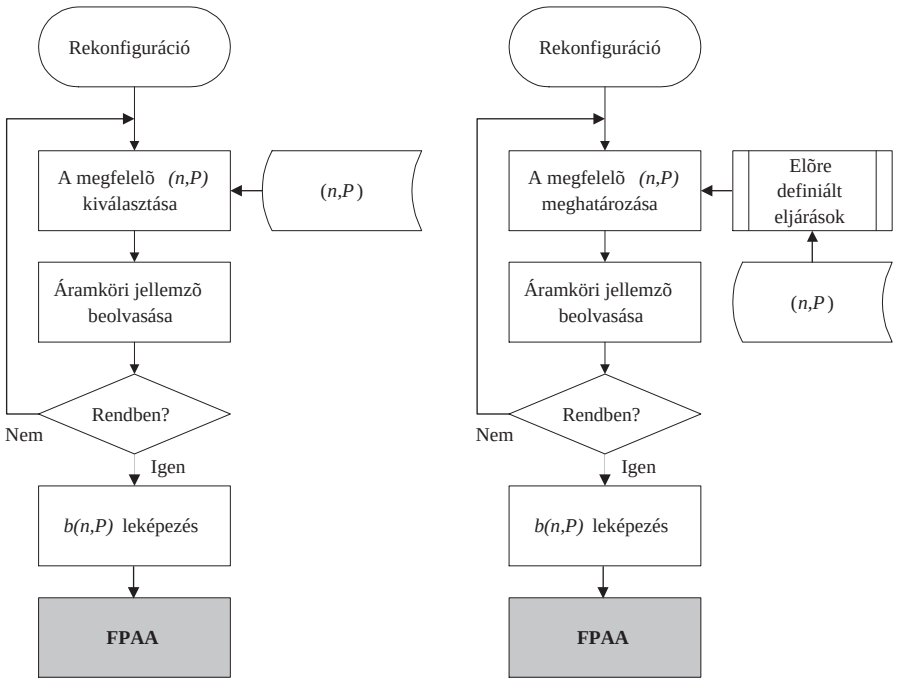
ahol: b az $(\mathbf{n}, \overline{P})$ értékek adott FPAA-ra történő leképezésének függvénye.

A (8.1)-ben leírtak a (3.1) alapján három különböző konfigurációs szintet (eseményt) jelentenek. Ezek összefoglalását tartalmazza a 8.1 táblázat.

A megfelelő áramköri funkció kialakítható statikusan, amikor is a programozható analóg áramkör bekapcsolása után egyszer betöltjük a konfigurációt jelentő $b(\mathbf{n}, \overline{P})$ bináris függvényt, sztringet.

Dinamikus konfigurálás, rekonfigurálás esetén a $b(\mathbf{n}, \overline{P})$ függvényt, valamilyen külső áramköri jellemző függvényében módosítva, újra és újra a programozható analóg áramkörbe töltjük. A táblázat alapján láthatóan a statikus adatbázisból

történő rekonfigurálás a mikrovezérlő erőforrásait nem igazán használja fel. A dinamikus rekonfigurálás esetén a processzor-, és a memóriaigény is nagyobb.



8.1. ábra. Programozható analóg áramkörök rekonfigurálása előre definiált paraméterekkel és topológiával (a), illetve adatbázisi támogatottsággal a megfelelő eljárás kiválasztásával (b).

A 8.1 ábrán látható a dinamikus rekonfigurálás két lehetséges alapesete. A 8.1 (a) ábrán az FPAA-val megvalósított alkalmazás lehetséges $(\mathbf{n}, \overline{P})$ változóit, azok összes szükséges kombinációit egy adatbázisban helyezzük el. A szabályozandó áramköri jellemző megváltozásakor egy kiválasztási eljárással, olyan $(\overline{P})$ illetve $(\mathbf{n})$ érték-kombinációt választunk, amely megfelelő. Mindezt annyiszor és addig tesszük, amíg a felügyelt áramköri jellemző értéke megfelelő nem lesz. Ezt

követően elvégezzük a (8.1) transzformációt és rekonfiguráljuk a programozható áramkörünket.

Ennél az eljárásnál a megfelelő $(\mathbf{n}, \overline{P})$ értékeit kiválasztó procedúra milyensége határozza meg az algoritmus konverzióját.

A 8.1 (b) ábrán az FPAA áramköri funkcióját leíró változók meghatározásához különféle előre definiált eljárásokat használhatunk. Ezek az eljárások, egyrészt egy $(\mathbf{n}, \overline{P})$ értékeket tartalmazó adatbázisból vehetik a szükséges értékeket, másrészt kalkulálhatják is azokat.

Ilyenkor kisebb méretű adatbázis szükséges, mint az előzőekben ajánlott eljárásnál, azonban a mikrovezérlő erőforrásait egy számításigényes algoritmus jelentősen igénybe veszi, ami a meghatározandó paraméterek számával tovább nő. Különösen igaz ez a topológia esetleges algoritmikus meghatározására.

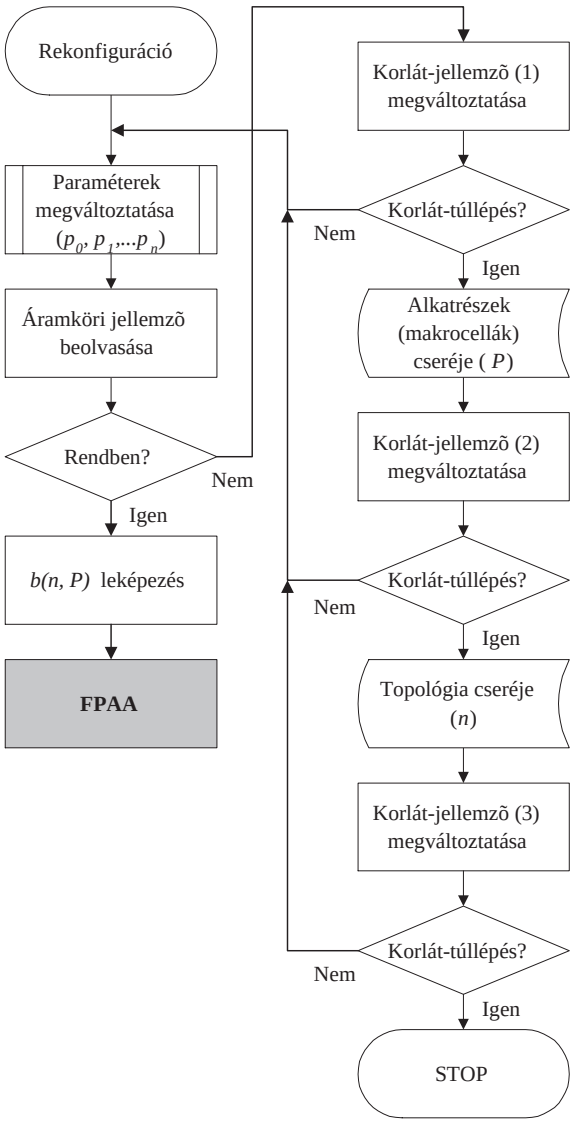
Olyan áramköri jellemző-megváltozás is előfordulhat amelyre nincsen megfelelő $(\mathbf{n}, \overline{P})$ válasz (8.1 (a) ábra), illetve ilyen nem is határozható meg (8.1 (b) ábra), ilyenkor az algoritmus, korlátok beiktatása nélkül, folyamatosan „próbálkozik".

A fenti két eljárás ötvözését mutatja a 8.2 ábra. Itt előre meghatározott eljárásokkal kalkulálható a kevésbé számításigényes paraméter-értékek $(p_0, p_1, \ldots, p_n)$ melyek elemei a $(\overline{P})$-nek.

Ha a $p_0, p_1, p_2, \ldots, p_n$ szükséges elemeinek változtatása nem hozott eredményt, a beolvasott áramköri jellemző értéke nem megfelelő, akkor az adatbázisból új alkatrész, makrocella $(\overline{P})$ választásával az eljárás újra indítható.

Ha az adatbázis összes alkatrészére az összes paraméter módosítását elvégeztük és így sem kaptunk megfelelő eredményt, akkor új topológia $(\mathbf{n})$ kialakításával ismét az algoritmus elejére jutunk.

Ahhoz, hogy a fenti három iterációs eljárás ne tarthasson tetszőlegesen hosszú ideig, úgynevezett korlát-jellemzőket célszerű bevezetni. Ezek lehetnek, a hozzáfordulásokat számláló regiszterek, vagy időkorlátok, akár a mikrovezérlő belső időzítő perifériáinak felhasználásával. Mindhárom korlátozó tényezőt az eljárás szükséges sebessége, vagy pontossága szerint lehet korrigálni.



8.2. ábra. Programozható analóg áramkör rekonfigurálása korlát-jellemző bevezetésével.

8.2. Programozható analóg áramkörök önkonfiguráló eljárása

A 8.1 táblázatban látható, hogy az $(\mathbf{n},\overline{P})$ értékek algoritmussal történő meghatározása erőforrás és időigényes tevékenység. A gyakorlatban alkalmazott mikrovezérlőkkel egy sokváltozós függvény valósidejű megoldása, még igen jó algoritmus mellett is, csak korlátozottan valósítható meg.

A 6.1, a 7.1 és a 7.4 fejezetek alapján a 8.3 ábrán egy mikrovezérlő és programozható analóg áramkörökből kialakított duplikált elrendezés látható.

A bemenő jel (A_{be}) az analóg multiplexereken (M_1, M_2) keresztül, azok címzésének függvényében (b_{m1}, b_{m2}) a programozható analóg áramkörök bemeneteire kerülhet. A z FPAA-k áramköri funkcióit ($\mathbb{F}_{FPAA1}$, $\mathbb{F}_{FPAA2}$) is a mikrovezérlő (μC) alakítja ki a $b(\mathbf{n}_1,\overline{P}_1)$, $b(\mathbf{n}_2,\overline{P}_2)$ felületeken keresztül, a hozzá kapcsolódó $(\mathbf{n},\overline{P})$ adatbázisból statikusan, vagy az **A** algoritmus segítségével.

A javasolt elrendezés kimenőjele (A_{ki}) vagy az A_{ki1} vagy az A_{ki2} lesz, az M_3 analóg multiplexer címzésétől (b_{m3}) függően.

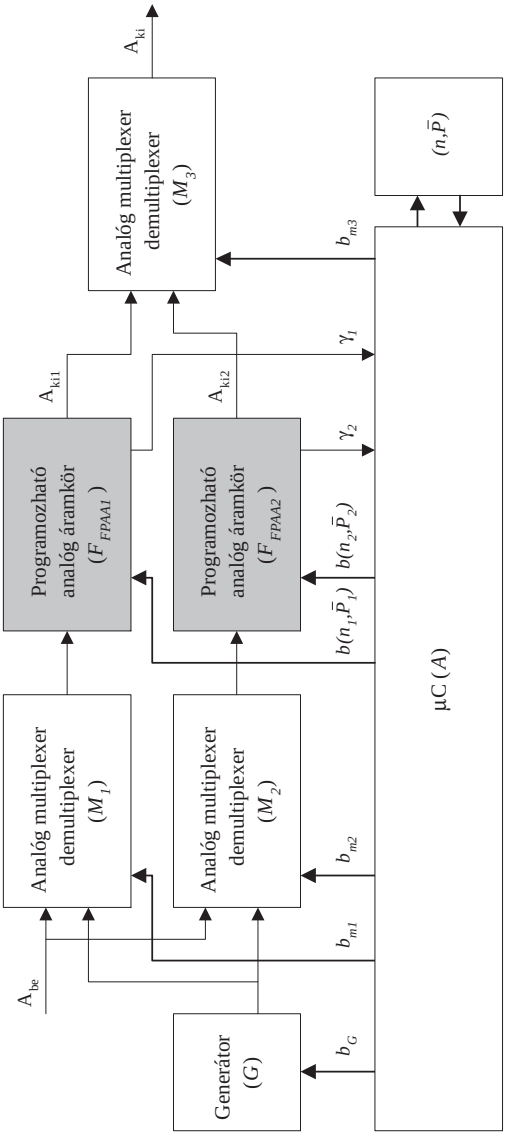
A rendszernek része egy b_G felületen vezérelhető generátor (G), amelynek jelalakja, frekvenciája, amplitúdója beállítható. Mindkét programozható analóg áramkör egy-egy vezetéken (γ_1, γ_2) kapcsolódik a mikrovezérlő megfelelő felületéhez. A γ vezetékek aktuális kapcsolódási helye az FPAA-kon belül, a bemenetek és a kimenetek között, a $b(\mathbf{n},\overline{P})$ felületen keresztül bárhova megadható.

Mivel az aktív jelútban (A_{be}–A_{ki}) vagy az $FPAA_1$, vagy az $FPAA_2$ programozható analóg áramkör helyezkedik el. Az inaktív áramkör a mikrovezérlő felügyeletével, a 7.4 szakaszban leírtak alapján, önálló hurkot alkot a $G - M_n - FPAA_n - \gamma_n - \mu C$ láncolattal. A γ értékére felírhatjuk (8.2) összefüggést:

$$\gamma_n = \mathbb{F}_{FPAAn}(A_{be}), \tag{8.2}$$

ahol: n:1,2.

A javasolt rendszertechnikai elrendezéssel a mikrovezérlőnek lehetősége van a háttérben történő transzfer függvény meghatározására. Ehhez a generátor releváns paraméterét kell a kívánt tartományban változtatni, majd a programozható analóg áramkör γ kimenetén mérni a gerjesztésre adott válaszjelet. A transzferfüggvényt a programozható analóg áramkör áramköri funkciója határozza meg,



8.3. ábra. Programozható analóg áramkör transzfer karakterisztikájának mérése a háttérben mikrovezérlő segítségével.

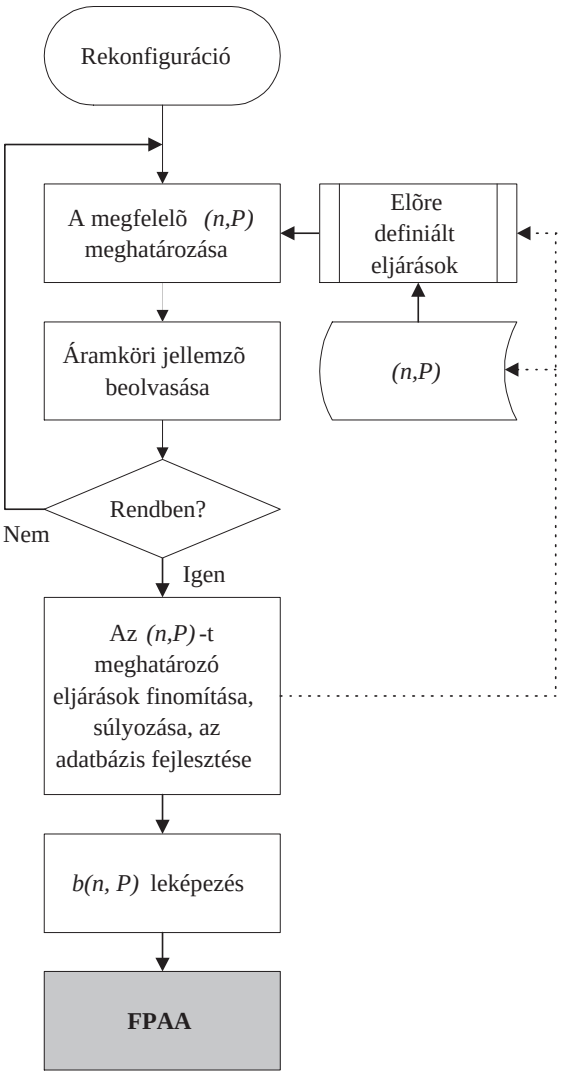
akár a 8.2 ábra algoritmusa alapján. Az $\mathbb{F}_{FPAAn}$-t meghatározó áramköri topológia és paraméter-vektort, ezzel az eljárással meghatározhatjuk. Az újonnan kialakított $(\mathbf{n}, \overline{P})$ értékek a a statikus adatbázisba írhatók.

Az eljárás természetesen időigényes, viszont ha a mikrovezérlőnek a rekonfiguráláson kívül más teendője nincsen, akkor jelentős erőforrás szabadítható fel erre a célra. Ebben az esetben is előnyösen alkalmazható a 6.4 fejezetben leírt megszakításos kapcsolat.

A mikrovezérlő programozott algoritmusa ($\mathbf{A}$) függvényében a 8.3 ábra elrendezése bizonyos önszerveződésre, adaptiv $(\mathbf{n}, \overline{P})$ strukturák kialakítására képes.

A 8.3 ábrán látható áramköri egységek is (G, M_n) programozható analóg áramkörben kialakíthatók, a szabad erőforrások függvényében. Ugyancsak az FPAA kínálta lehetőségeken belül, egyetlen programozható analóg áramköri is használhatunk a javasolt architektúra kialakítására, nyilván két egymástól független áramkört kialakítva a javasolt módon.

A 8.4 ábra algoritmusa olyan öntanuló elrendezést mutat, ahol a rekonfiguráláshoz sikeresen felhasznált adatbázis elemeit súlyozzuk, így a következő konfigurációhoz már ennek megfelelően választja ki az $\mathbf{n}, \overline{P}$ elemeket. Ilyen súlyozást nem csak az adatbázisban végezhetünk, de az alkalmasság függvényében az előre definiált eljárásokat is, az adott felhasználáshoz alkalmazhatósága szerint sorbarendezhetjük.



8.4. ábra. Programozható analóg áramkör rekonfigurációja dinamikus és statikus adatbázis segítségével.

Gyakorlati alkalmazások

9. fejezet

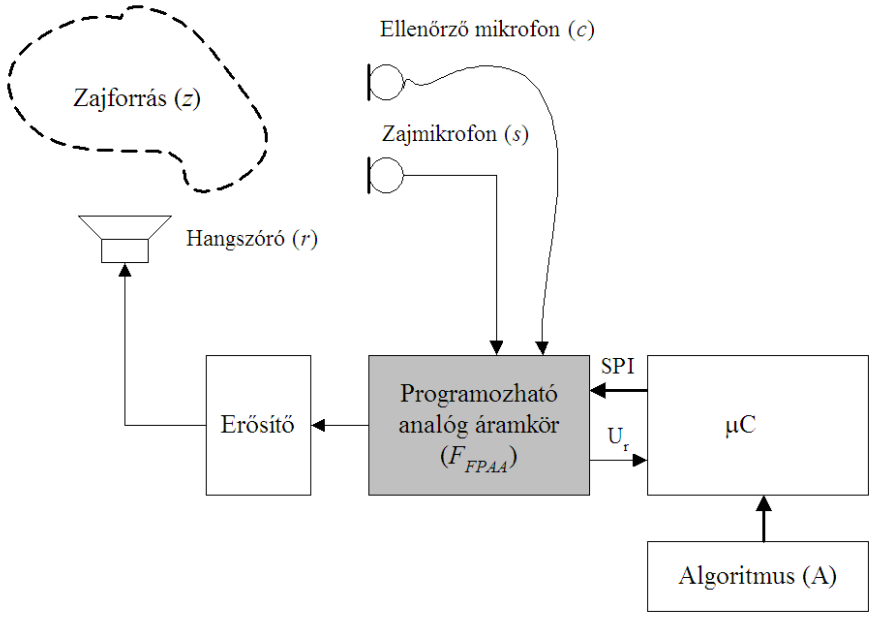
Rekonfigurálható eljárások alkalmazása

A tézisekben kidolgozott eljárások, ajánlások alkalmazhatóságának szemléltetésére álljon itt néhány, a gyakorlatban már kipróbált, illetve fejlesztés alatt álló, eredményekkel, részeredményekkel már bíró, alkalmazási példa [54, 48, 40]. A bemutatott megoldások a konfigurálás, rekonfigurálás lehetőségeit alkalmazzák, sajátos rendszerbe illesztési eljárásokkal [79, 80].

9.1. Akusztikus zajelnyomás programozható analóg áramkör dinamikus rekonfigurálásával

Egy akusztikus térben (9.1 ábra) legyen egy zajforrás (z), melynek jelét egy zajmikrofonnal (s) érzékeljük. Célunk, hogy a megfigyelt pont környezetében közel nulla hangnyomást érjünk el. Ehhez egy hangszóróval megfelelő amplitúdójú, és a kívánt késleltetésű ellenfázisú jellel (r) a (9.1) összefüggés szerint,

$$U_r(t) = k \cdot U_z \underbrace{(t-\tau)}_{\phi}, \tag{9.1}$$



9.1. ábra. Az akusztikus zajelnyomás funkcionális blokkvázlata.

oltjuk ki a zaj jelet, ahol: τ a késleltetés a zaj jelhez mérten, k egy konstans. Az $U_r(t)$ értékének meghatározásához a (9.2)-et,

$$U_s(t) = U_z(t) - U_r(\phi), \tag{9.2}$$

0-ra megoldva jutunk (9.3) összefüggéshez:

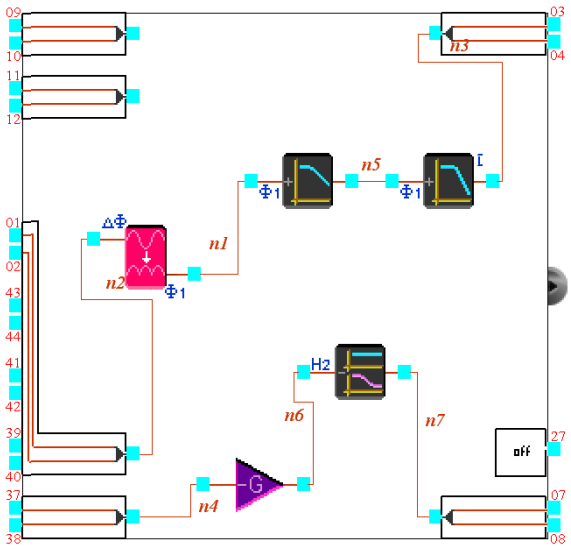
$$U_r(t) = k \cdot U_z(\phi). \tag{9.3}$$

Mivel a megfigyelt pont helye változik, a védett személy, vagy környezet mozog az akusztikus térben, ezért a kioltó jel amplitúdóját és fázisát is megfelelően, időről-időre módosítani kell. A zajelnyomás sikerességéről egy ellenőrző mikrofon (c) segítségével győződünk meg. A (9.3) szerint, ami τ és k értékére két ismeretlenes egyenletet ad [15]. A kontroll mikrofon és zajforrás távolságának függvényében τ nagysága meghatározható [84]. Az akusztikus tér tulajdonságának ismeretében a késleltetés (fázistolás) és a kioltó jel amplitúdója között is ugyancsak meghatározható az összefüggés, amely egy valós akusztikus térben a számtalan visszaverődést is figyelembe véve, leginkább heurisztikus [53, 52, 38, 56].

Az analóg áramköri részeket egy Anadigm AN221E04 típusú programozható analóg áramkörben alakítottuk ki (9.2 ábra). A kontroll mikrofon U_c jelét az $U_{01,02}$ bemenetre vezettük, ami egy kétutas egyenirányítóba jut. Ennek kimenetén két aluláteresztő szűrő (*n1-n3*) található. Ezek kimentén megjelenő jel ($U_{03,04}$) amplitúdója a kioltott zaj-jel intenzitásától függ. Ha τ, és/vagy k értéke nem megfelelő, akkor $U_c(t) \neq 0$. Az FPAA-val együttműködő mikrokontroller analóg-digitál átalakítója segítségével $U_c(t)$ mérjük. Ennek függvényében BF[1] módszerrel változtatjuk előbb τ, majd k értékét. Ezért az U_s jelet az $U_{37,38}$ bemenetre vezetve felerősítjük (*n4-n6*), majd egy mindent áteresztő szűrő (*n6-n7*) fázistolásának megváltoztatásával, és az erősítő erősítésének módosításával, dinamikus átprogramozással addig változtatjuk míg $U_s(t) = 0$ teljesül [68, 56, 50, 58].

A 9.3 (a) ábra a zaj-jelet és az éppen megfelelő kioltó-jelet mutaja, a 9.3 (b) ábra felül a zaj jelet, alul a közel 40dB-lel csillapított értéket ábrázolja. A 9.4 (a) ábrán egy harmonikus, a zajra szuperponált, annál 30dB-lel kisebb hasznos jel, illetve a 9.4 (b) ábrán a zajelnyomás eredménye látható [67, 41].

[1] Brutal Force (BF), nyers erő



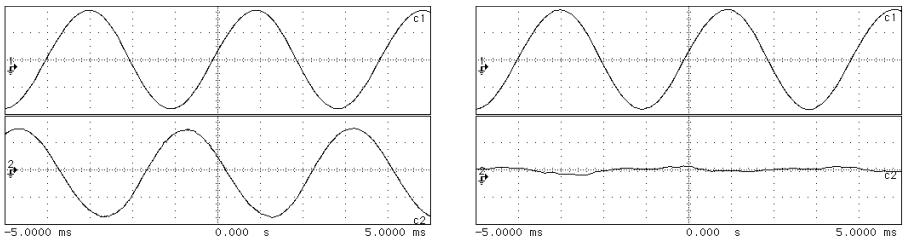
9.2. ábra. Az akusztikus zajelnyomás analóg áramköri funkcióinak FPAA realizációja.

A bemutatott eljárásnál a zajforrás is harmonikus jel, ami kiterjeszthető nem szinuszos jelekre is.

A megvalósított zajcsökkentő eljárás egy analóg áramkört folyamatosan rekonfiguráló, beágyazott vezérlővel együttműködő eszköz, a tézisben megfogalmazottak szerinti működéssel [49].

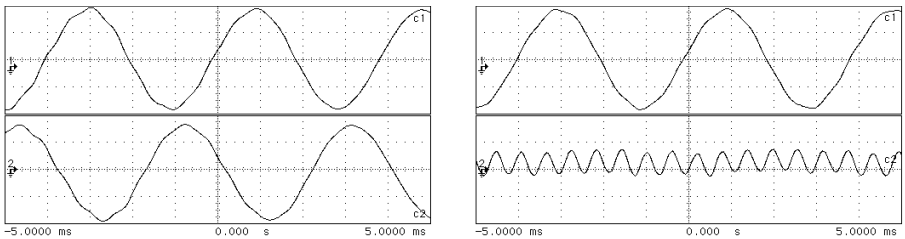
9.2. Átviteli karakterisztikát mérő készülék FPAA dinamikus rekonfigurálásával

Elektronikai gyártásnál szükség lehet olyan mérést támogató eszközre, amely egyes részegységek, alkatrészek frekvenciafüggő paramétereit ellenőrzik, akár csak mintavételi jelleggel is. A 9.5 ábrán látható elrendezéssel a mérendő ob-



(a) (b)

9.3. ábra. A zaj és ellenfázisú kioltójel (a), illetve a zaj és a „csendes” eredmény (b).



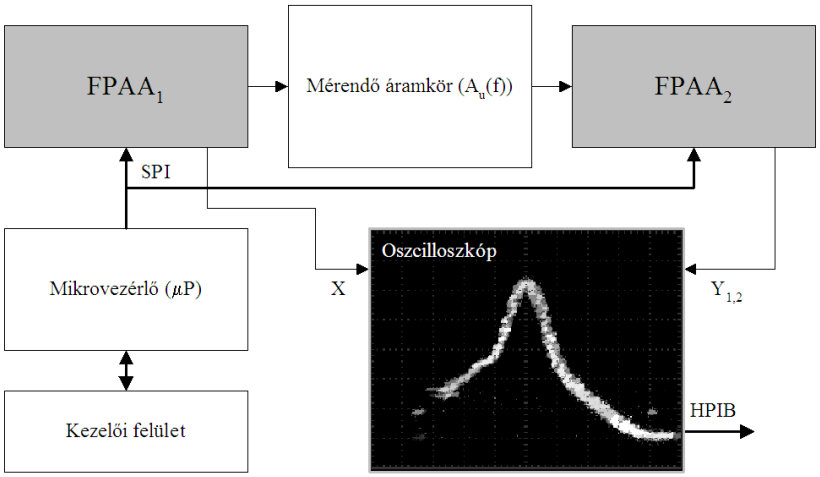
(a) (b)

9.4. ábra. A zajra szuperponált -30dB-es akusztikus jel és kioltójele (a), valamint a zajos és a zajmentes jel (b).

jektum átviteli karakterisztikájának egy beállítható frekvencia-tartományát kell ellenőrizni oszcilloszkóppal és a hozzá kapcsolódó mérési adatgyűjtő eszközzel [47, 42, 57, 31].

A berendezés egy wobbulátor, melynél az oszcilloszkóp vízszintes eltérítése adja a frekvencia tengelyt, a függőleges eltérítése az amplitúdót.

Ehhez két programozható analóg áramkört használtunk fel, amelyeket egy mikrovezérlő konfigurál, dinamikusan rekonfigurál. Az $FPAA_1$ áramkörben egy szinusz oszcillátort alakítottunk ki (9.6 (a) ábra), amelynek kimenő feszültsége, illetve a frekvencia értéke dinamikusan programozható [44, 30]. A kimeneti fe-

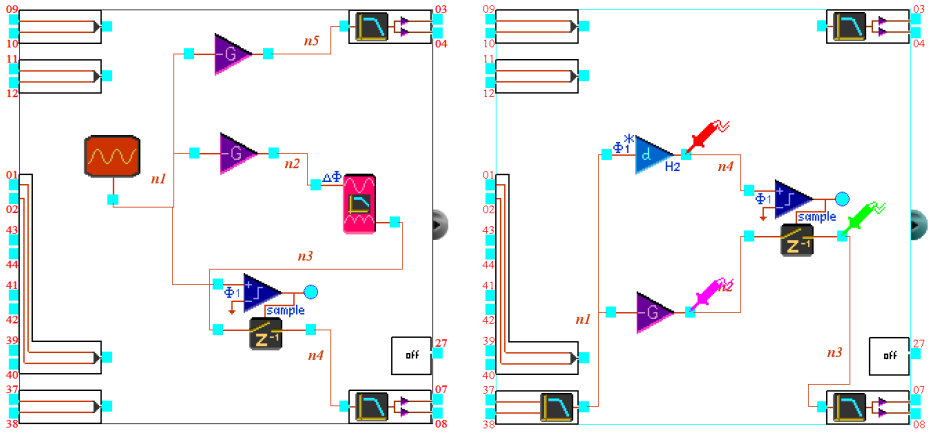


9.5. ábra. Az átviteli függvényt mérő készülék blokkvázlata.

szültség nagysága az invertáló erősítő ($n5-n1$) erősítésének beállításától függ. A kimeneti frekvencia, a sweepelési sebesség, a mikrokontroller programozott algoritmusának függvénye. Ugyancsak az $FPAA_1$-ben található egy f–U konverter, amelynek $U_{07,08}$ kimenete az oszcilloszkóp vízszintes eltérítését vezérli [55, 34].

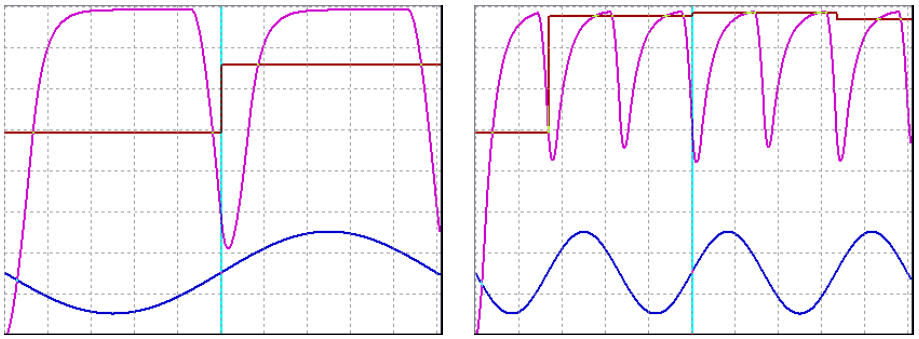
A frekvencia-feszültség átalakítónál kihasználtuk a teljes hullámú egyenirányító kimenetén levő aluláteresztő szűrő lineáris meredekségű záró tartományát [101]. Az egyenirányító kimeneti feszültségéből, (*n3*) a bejövő jel nulla átmeneténél (*n1*) egy minta vevő-tartó áramkörrel veszünk mintát, ami frekvencia függő (9.7 ábra).

Az $FPAA_2$-ben (9.6 (b) ábra) csúcs-detektorral megvalósított AC-DC konverter található. Az $U_{37,38}$ bemenetei jelet erősítjük (*n1-n2*), illetve deriváljuk (*n1-n4*). A mintavevő tartó áramkör a derivált függvény nulla átmeneténél (9.8 ábra) vesz mintát a felerősített bemeneti jelből (*n2*). Az $U_{07,08}$ kimeneten megjelenő mindenkori csúcsfeszültség vezérli az oszcilloszkóp függőleges bemenetét a (9.4) szerint:



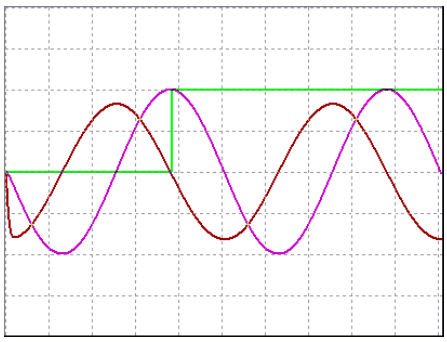
(a) (b)

9.6. ábra. Az átviteli függvényt mérő készülék két FPAA áramköre, az oszcillátorral és a frekvencia-feszültség átalakítóval (a), illetve az AC-DC átalakító csúcsdetektorral (b).



(a) (b)

9.7. ábra. A minta-vevő tartó áramkör a bemenőjel (alul) nulla átmeneténél az egyenirányító kimeneti jeléből mintát vesz. 20kHz 1,41V (a), 28,57kHz 2,43V (b).



9.8. ábra. A mintavevő tartó áramkör működése.

$$U_{07,08}(f) = \hat{U}_{37,38} \cdot A_u(f), \tag{9.4}$$

ahol: $A_u(f)$ a mérendő eszköz átviteli karakterisztikája a (9.5) szerint:

$$A_u(f) = \frac{U_{ki}(f)}{U_{03,04}}, \tag{9.5}$$

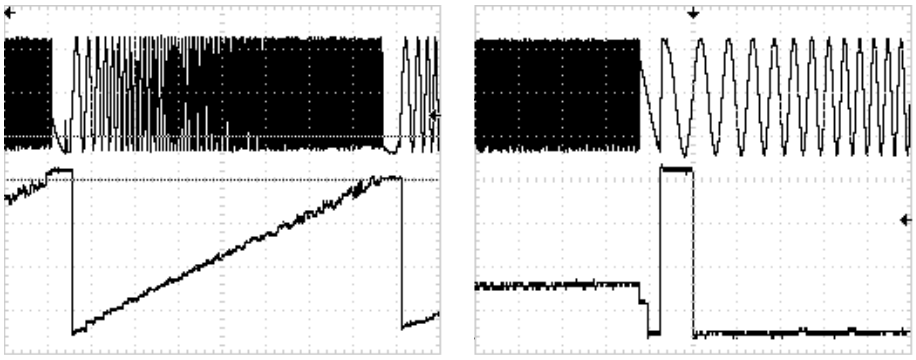
az $U_{03,04}$ az $FPAA_1$ kimeneti jele, $U(f)$ a mérendő objektum kimetének frekvencia függő feszültsége [43].

Az f–U átalakító jellemző jelalakjai láthatók, két különböző sweepelési sebességnél a 9.9 (a) ábrán 400kHz/20s illetve 400kHz/5s a 9.9 (b) ábrán. A kimenő jelben levő amplitúdó bizonytalanság a frekvencia növekedésével nö, ami a kétutas egyenirányító kimenő jelének dzsitteréből keletkezik [35, 74, 75].

A 9.10 ábrán az f–U átalakító kimenti feszültség–idő függvényei, illetve egy-egy mért eszköz kimeneti feszültség idő függvényei láthatók [99, 100].

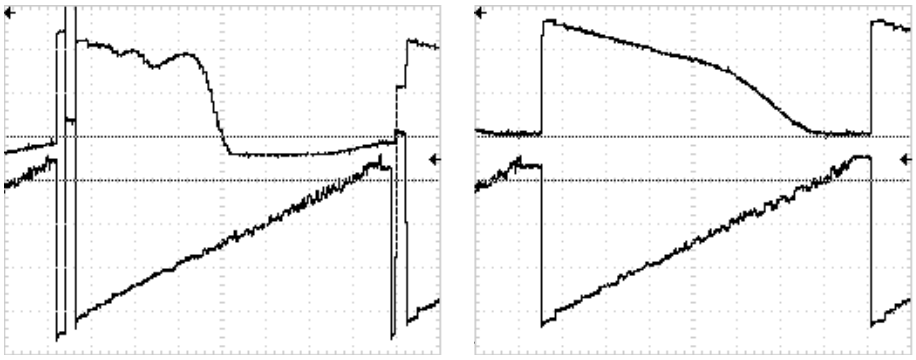
A 9.11 (a) ábrán az f–U átalakító kimenti feszültsége, illetve egy sávátersztő szűrő feszültség-idő függvényei láthatók. A 9.11 (b) ábrán a sávátersztő szűrő A_u–f karakterisztikája látható [32].

A megvalósított berendezéssel, a bemutatott alkalmazástól eltérően, a generátor áramkör frekvenciájának megadásakor tetszőleges kimeneti feszültséget állíthatunk be, a dinamikus rekonfigurálás segítségével [46].



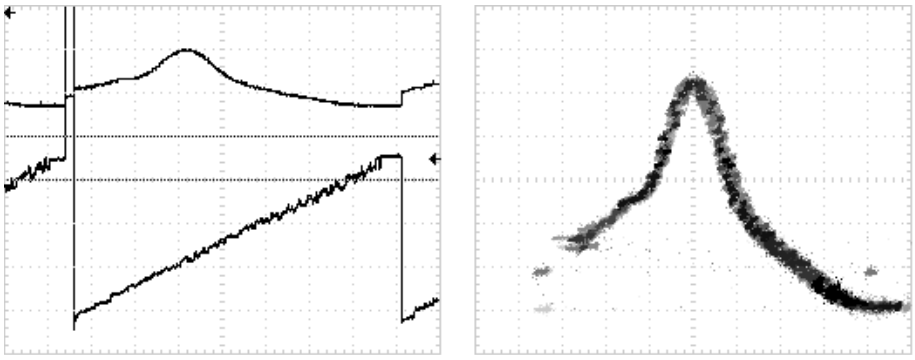
(a) (b)

9.9. ábra. Az *U-f* átalakító karakterisztikája. Az oszcillátor sweepelési sebesség 400kHz/20s (a) illetve 400kHz/5s (b).



(a) (b)

9.10. ábra. A készülékkel mért aluláteresztő szűrő karakterisztikája (a), illetve optocsatoló $A_u(f)$ karakterisztikája (b) (felül), illetve az $U-f$ átalakító kimenete (alul) látható.



(a) (b)

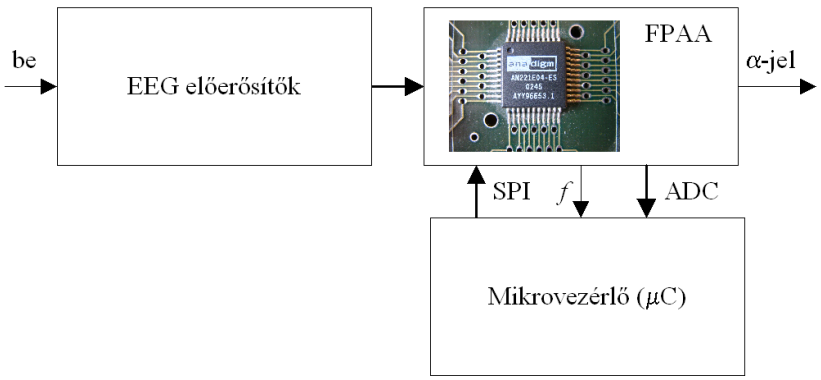
9.11. ábra. Az f–U átalakító kimenti feszültsége (alul), illetve egy sávátersztő szűrő feszültség idő függvénye látható (felül) (a). A sávátersztő szűrő A_u–f karakterisztikája (b).

9.3. EEG bementi egység programozható analóg áramkör dinamikus rekonfigurálával

A kis jelszintű bemeneteknél, problémát jelent a megfelelő jel-zaj viszony megvalósítása. Különösen igaz ez a biológiai érzékelőkre, így az EEG, EKG berendezések bemeneti egységeire. Ezek a berendezések nagyon kis jelet kapnak a biológiai objektumból, általában nagy zajjal együtt. Ilyen zajok a villamos hálózatból eredők, a kapcsolóüzemű tápegységekből, a műsorszóró és egyéb rádióberendezésekből származó villamos jelek [45].

Bizonyos tanulási, vagy más monitorozó eljárásoknál nagyon fontos lehet a biológia visszacsatolás[2] megvalósítása. Az emberi agy „kikapcsolt”, pihenő állapotában speciális EEG-jeleket bocsát ki. Ezek az α-hullámok, melyeknek frekvenciája, az agy állapotától függően, 3-15Hz közötti értékek. E jel amplitúdója, egyedenként is változik, de erősen függ a mérés (érzékelés) körülményeitől is [37].

[2]bio-feedback

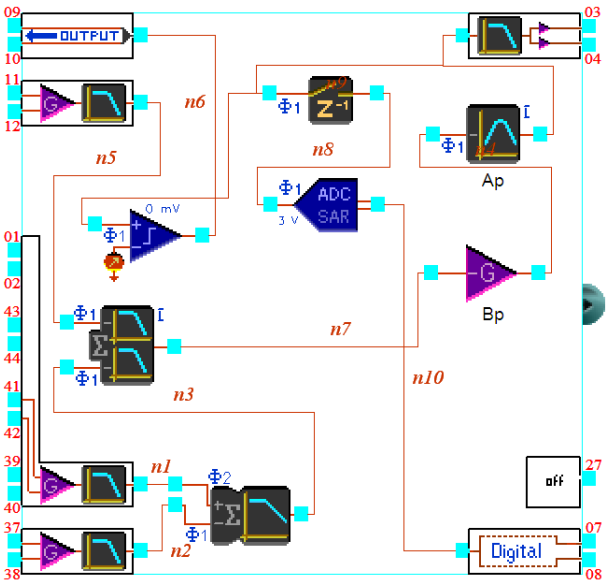


9.12. ábra. Agyi α-hullámokat érzékelő berendezés jelkondicionáló előfeldolgozó áramkörei.

Hagyományosan aluláteresztő és sávszűrőket használnak ilyen berendezésekben, ahol is a jel várható frekvenciáján ezek a szűrők áteresztenek [33].

Változó frekvenciájú jeleknél jobb jel-zaj viszonyt érhetünk el, ha az aluláteresztő szűrőket kombináljuk sáváteresztő szűrő alkalmazásával. Ilyenkor a kívánt jel frekvenciájára hangolt sáváteresztő szűrőt kell használni. A konkrét feladatnál viszont az α hullámok frekvenciája is változik. Ebben az esetben használhatunk egy dinamikusan konfigurálható hangolt szűrőt, a kimeneti jel kíván értékét is szabályozó erősítővel. Ehhez az 9.12 ábra elrendezését használjuk [39, 29].

Az FPAA áramkör itt hármas funkciót lát el (9.13 ábra). Egy EEG erősítőből kapott $U_{11,12}$, $U_{41,42}$, $U_{37,38}$, jeleket differenciálisan 20dB-t erősíti a bemeneteken található erősítővel, illetve 76kHz határfrekvenciájú aluláteresztő szűrővel sáv határolja. Ezek jelét egy-egy alulátersztő összegző erősítő (*n3,n5-n7*) tovább erősíti 3dB-lel, 160Hz-es határfrekvenciával. Ennek kimenete (*n7*) egy dinamikusan, 0-20dB tartományban programozható erősítőbe (Bp) kerül. Ezt egy dinamikusan programozható sáváteresztő szűrő (Ap) követi, amelynek frekvenciája 2-20Hz között dinamikus programozással beállítható. A sávhatárolt és amplitúdóra is normált jel az $U_{03,04}$ kimenten mérhető (9.6) szerint,



9.13. ábra. Az α-hullámokat érzékelő berendezés dinamikusan programozható áramköre AN221E04 FPAA-ban.

$$U_{03,04} = \zeta_{Bp} \cdot G_{Ap}[(G_{41,42}U_{41,42} - G_{37,38}U_{37,38}) - G_{11,12}U_{11,12}], \tag{9.6}$$

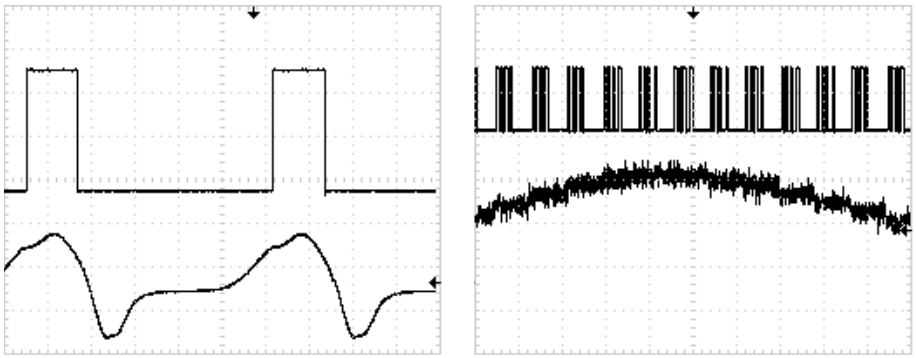
ahol: ζ_{Bp} a sávátersztő szűrő átviteli karakterisztikája.

A sávátereszt̋ szűrő pontos hangolásához ismerni kell az $U_{03,04}$ jel frekvenciáját. Ennek mérést a mikrovezérlő végzi (9.13 ábra f jele) az $U_{09,10}$ jel segítségével (9.14 (a) ábra). A komparátor komparálási szintje 800mV, így (9.7):

$$U_{09,10} = \begin{cases} 5V & \text{ha } U_{03,04} \geq 800\text{mV} \\ 0V & \text{ha } U_{03,04} < 800\text{mV} \end{cases} \tag{9.7}$$

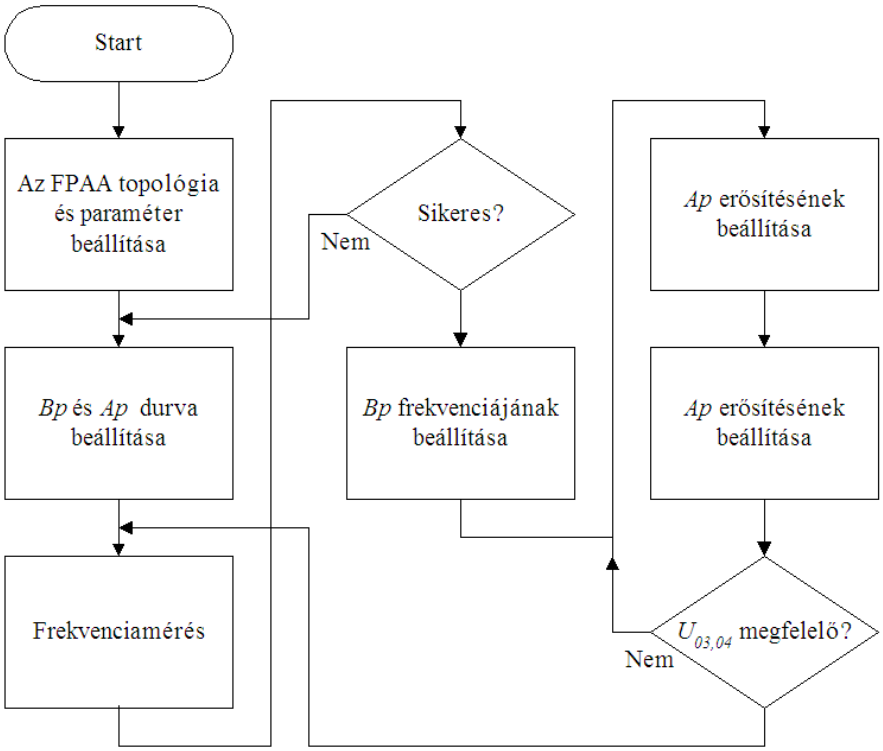
A kimeneti amplitúdó pontos értékének szabályozásához a visszacsatoló jelet (ADC) az FPAA-ban található analóg-digitál átalakító adja, a mindenkori kimenő feszültség ($U_{03,04}$) csúcsértékét konvertálva (9.8) kapjuk:

$$U_{07,08} = \mathbf{a}(\hat{U}_{03,04}), \tag{9.8}$$



(a) (b)

9.14. ábra. Az EEG jel és a komparátor kimenete (a), az EEG jel egy részlete és a DAC kimenete (b).



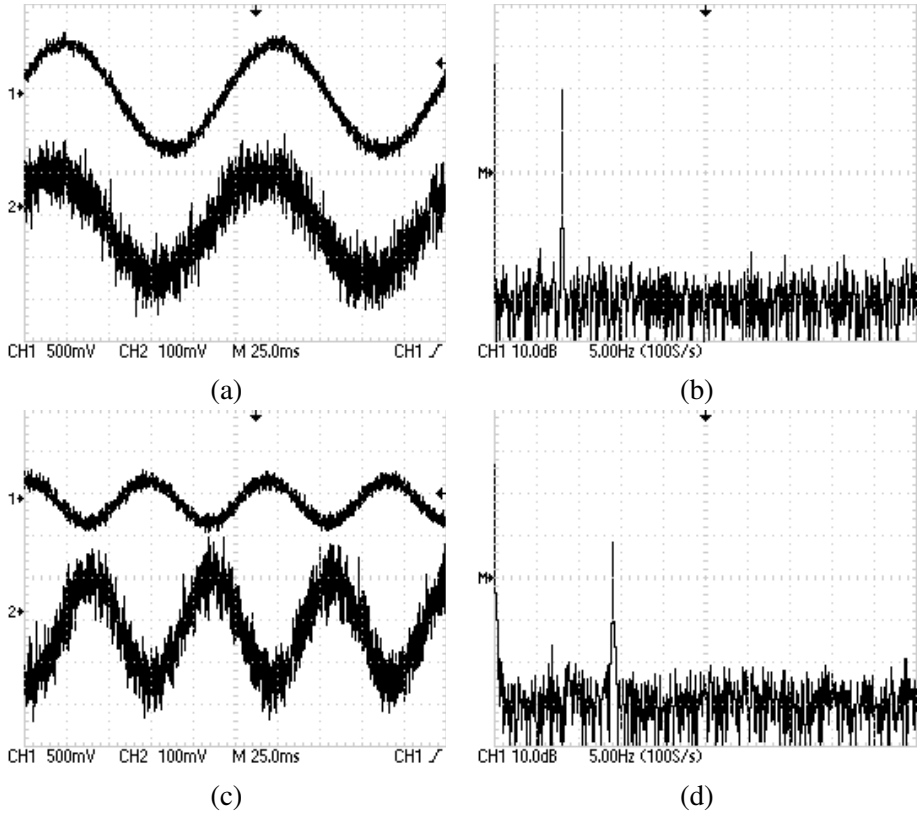
9.15. ábra. Az α-detektort vezérlő program folyamatábrája.

ahol: **a** az analóg-digitál átalakító transzfer karakterisztikája.

A 9.15 ábrán az α-detektort vezérlő program folyamatábrája látható. A mikrovezérlő az áramköri topológia és az A_p, B_p alapbeállításait betölti. A durva beállítás most a sáváteresztő szűrő sávszélességét megnöveli, így $U_{03,04}$-ből előbb lesz, $U_{09,10}$ kimeneten a frekvenciamérést támogató digitális kimenet. Frekvencia mérési vismajor esetén is ide tér vissza a program. A sikeres frekvenciamérés után a B_p frekvenciáját állítjuk be, most már a kisebb sávszélességgel. Az FPAA ADC-jének lekérdezésével (9.14 (b) ábra) az $\hat{U}_{03,04}$ értékét ellenőrizzük, amit a A_p dinamikus rekonfigurálásával korrigálunk [36].

A 9.16 ábrán a 8Hz-re hangolt sáváteresztő szűrő bemenetei (a, c) és kimenetei illetve a kimenő jelek spektruma (b, d) látható. A bemenőjelek jel-zaj viszonya 7dB, a kimenőké; 8Hz esetén U_{ki8}=19dB, 14 Hz esetén U_{ki14}=19dB.

A 9.17 ábra a dinamikus rekonfiguráláshoz használatos 72 bájtos bináris sztringekből mutat néhányat. Ebből itt 180 darab van. Az első blokk a sáváteresztő szűrőt 2Hz-re hangolja, az erősítő erősítését 1-szeresre, a második 72 bájt értékei; 2Hz és 2-szeres erősítés. Az utolsó blokké 20Hz és az erősítés 10-szeres.



9.16. ábra. A sávátereszt ő szűrő bemenetei (CH2) és kimenetei (CH1) illetve a kimenő jelek spektrumai.

```
********************************************************************************

                            Primary Configurations

********************************************************************************
********************************************************************************

                            Transition Configurations

********************************************************************************
--------------------------------------------------------------------------------
                        eeg: Fo[0.002], G[1] (72 bytes)
--------------------------------------------------------------------------------
D50105C0021C0801819A00109B00100A0182000707018207000000A018287002000882AC1030481
AC00982ACB030B980081AE000000419D81AC2A80080AFF0010FF0181FF0010FF2A00
--------------------------------------------------------------------------------
                        eeg: Fo[0.002], G[2] (72 bytes)
--------------------------------------------------------------------------------
D50105C0021C0801819A00109B00100A0182000707018207000000A018287002000882AC1030481
AC00982ACB030B980081AE000000419D81AC2A80080AFE0010FE01817F00107F2A00
--------------------------------------------------------------------------------
                        eeg: Fo[0.002], G[3] (72 bytes)
--------------------------------------------------------------------------------
D50105C0021C0801819A00109B00100A0182000707018207000000A018287002000882AC1030481
AC00982ACB030B980081AE000000419D81AC2A80080AFF0010FF0181550010552A00
--------------------------------------------------------------------------------
                                        .
                                        .
                                        .
                                        .
                                        .
--------------------------------------------------------------------------------
                         eeg: Fo[0.02], G[10] (72 bytes)
--------------------------------------------------------------------------------
D50105C0021C7F0181E10010E10010DF0182000790018207000DF0182FF002000FF2AC1030481
AC00982ACB030B980081AE000000419D81AC2A80080AFA0010FA0181190010192A00
--------------------------------------------------------------------------------
```

9.17. ábra. A dinamikus rekonfiguráláshoz használt bináris sztingek egy része.

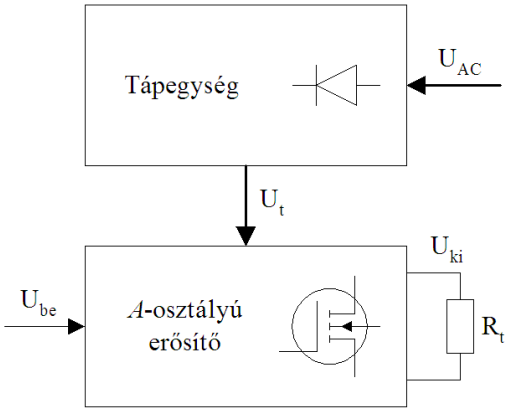
10. fejezet

Robusztus alkalamazás programozható analóg áramkörrel

A következőkben bemutatandó robusztus megoldás, egy áramkör működését optimalizálja, a felvett villamos energia minimumára, ezzel együtt védve az aktív eszközt is a szükségtelenül nagy disszipációtól.

10.1. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozással

Számos olyan elektronikai alkalmazás létezik, ahol az *A*-osztályú szabályozás, vezérlés előnyös vagy szükséges. Ilyen szempontok az *AB*-, vagy *C*-osztályú erősítőkkel összehasonlítva; a kisebb jeltorzítás, lineárisabb átvitel, nagyobb sávszélesség, a jobb frekvencia tartománybeli viselkedés,. . . ,stb. Ezekkel együtt az *A*-osztályú kapcsolástechnika aktív eszközén disszipált teljesítménye a legnagyobb, hatásfoka a legrosszabb. E két utóbbi paraméter javítása, az *A*-osztályú előnyök megtartása mellett, energia megtakarítást eredményez, és növelheti az aktív eszköz várható élettartamát a javasolt predikciós eljárás segítségével [51].



10.1. ábra. Az *A* osztályú erősítő teljesítmény viszonyai.

Az *A*-osztályú szabályozás olyan helyen, ahol a kimenő jel torzításának alacsony volta igen fontos minőségjellemző, az előbb felsorolt hátrányok ellenére használatos. Az *A* osztályú vezérlésnél egy aktív eszközt félvezetőt, esetleg elektroncsövet olyan munkapontban használunk, ahol a teljes tápfeszültség tartományt a terhelésre tudjuk, az aktív eszköz vezérlésének függvényében, kapcsolni.

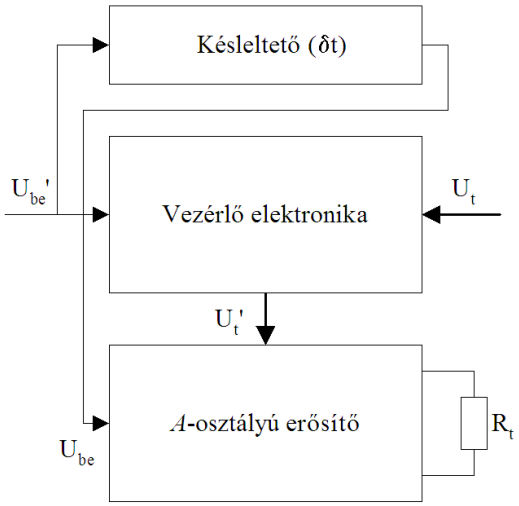
Az *A* osztályú vezérlésnél az aktív eszköz munkapontjának megválasztása nagy körültekintést igényel. Az aktív eszköz által disszipált teljesítmény (10.1) szerint határozatható meg:

$$P_{dev} = \left(\frac{U_t - U_{ki}}{R_t}\right) U_{ki}, \tag{10.1}$$

ahol: P_{dev} az aktív eszköz disszipációja, U_t a tápfeszültség, U_{ki} a kimenő feszültség, R_t a terhelő ellenállás.

A P_{dev} értéke akkor a legnagyobb, amikor $U_{ki} = U_t/2$.

A relatív nagy disszipált teljesítmény minimalizálására illetve csökkentésére javasoljuk azt az eljárást, amikor a vezérlő jel függvényében dinamikusan módosítjuk az *A* osztályú erősítő tápfeszültségét (10.2). Elvileg, a bejövő jel függvényében prediktív módon képesek vagyunk meghatározni az *A* osztályú erősítő



10.2. ábra. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozással.

éppen szükséges és optimális működéséhez szükséges tápfeszültségét (U_t), majd ennek beállítása után az analóg bemenőjel (U_{be}) az erősítőt vezérli.

Az 10.2 ábrán látható egy olyan késleltető művonal alkalmazása, amelynek a késleltetési ideje (10.2) összefüggés szerint:

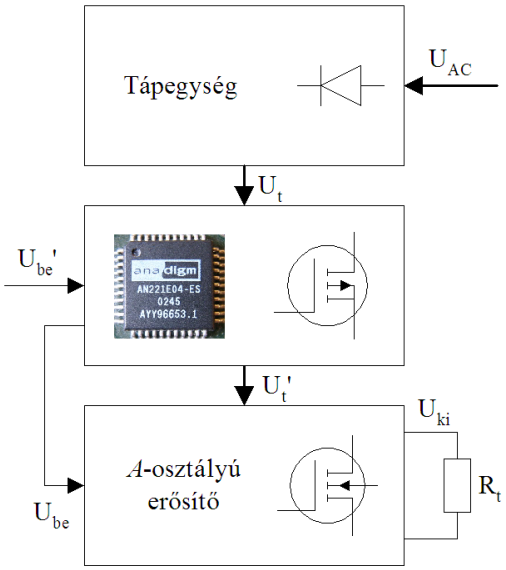
$$U'_{be}(t) = U_{be}(t+\delta), \tag{10.2}$$

ahol: $U_{be}(t)$ a bemenő feszültség időfüggvénye, δ a művonal késleltetése, ami a tápfeszültség szabályozó áramkör késleltetési idejével egyezik meg.

A javasolt megoldásnak sarkalatos kérdése a késleltetés minimálisan szükséges értéke. Mivel U_{be} jó közelítéssel sztochasztikus jel, annak predikciója a gyakorlatban szinte lehetetlen. Ezért az U_{be} jelet késleltetjük, U'_{be} jelhez képest. A (10.2) összefüggést átírva kapjuk (10.3)-t:

$$U_{be}(t) = U'_{be}(t-\delta). \tag{10.3}$$

A javasolt eljárásnál (10.3 ábra) a tápfeszültség vezérlése kapcsoló üzemű esz-



10.3. ábra. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozása programozható analóg áramkörrel.

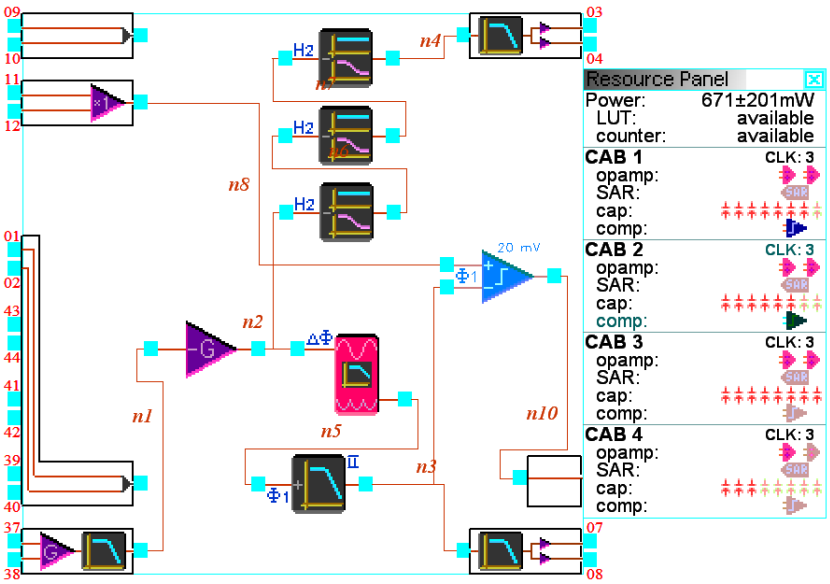
köz segítségével történik impulzus szélesség modulációval. A kapcsolóüzemű félvezetőket telítésbe vezérelve azok disszipációja minimalizálható.

A módosított tápfeszültség értéke (U_t') átlagolást követően egy disszipációs konstanstól (U_d), és egy k erősítési tényezőtől függ (10.4),

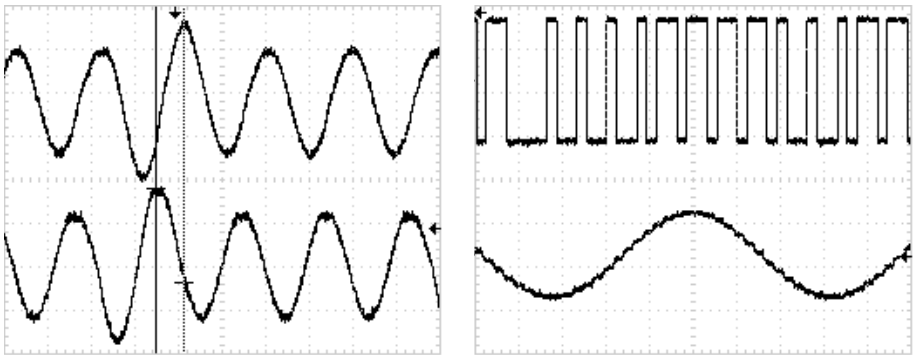
$$U_t' = k \int_0^{\delta} |U_{be}'(t)| dt + U_d, \tag{10.4}$$

ahol: k értékének megválasztása az alkalmazott aktív eszköz még megengedett torzítású legkisebb feszültségű munkapontjától függ.

A javasolt eljárás vezérlő és késleltető áramkörét egy FPAA áramkörben valósítottuk meg (10.4 ábra). Az erősítendő analóg jelet az $U_{37,38}$ bemenetre kapcsoljuk. Ezt a jelet 20dB erősítés után három mindent áteresztő szűrőn ($H2$), azok

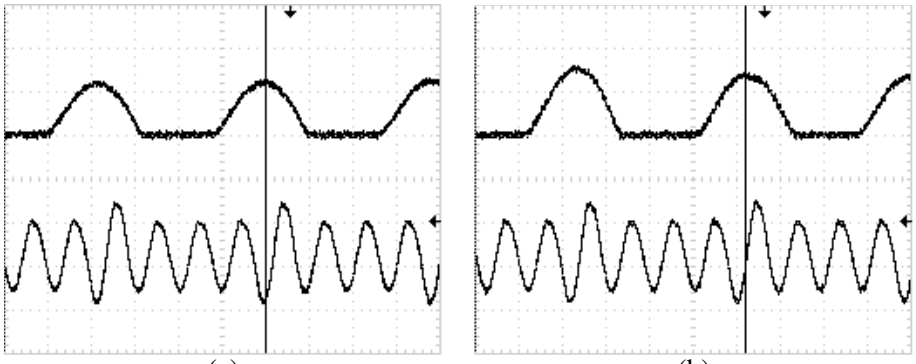


10.4. ábra. Az *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozás vezérlője FPAA-ban megvalósítva



(a) (b)

10.5. ábra. A késleltető ramkör működése (a két kurzor közötti távolság 1,2 ms) (a) és az impulzus szélesség modulátor kimenete szinuszos bemenőjelre (b).



(a) (b)

10.6. ábra. A tápfeszültség (felül) változása a bemenőjel függvényében ha késleltetés 0,4ms (a) és ha a késleltetés 1,2ms (b).

késleltetésével jut a $U_{03,04}$ kimenetre. A késleltetés nagysága 1,2ms (10.5 ábra). A felerősített bemeneti jel (*n2*) jel egy egyenirányító és aluláteresztő szűrő áramkörön

keresztül jut az $U_{7,8}$ kimenetre. Az aluláteresztő szűrő megfelelő időállandójának megválasztása a 10.6 ábra bemenőjeleinek hatására a kívánt tápfeszültség vezérlő jeleket eredményezi.

Az $U_{11,12}$ bemenetre háromszög jelet adva a komparátor az *n3-n8* jelekből az *n10* vezeték kimenetére az impulzus szélesség modulációs jelet állítja elő (10.5 (b) ábra). A felerősített kapcsoló üzemű impulzusból egy szűrőkör segítségével állítjuk elő a módosított U_m tápfeszültséget.

A javasolt eljárás segítségével az aktív eszköz disszipációja állandó értéken tartható, illetve a félvezető eszköz típusának megfelelően annak dinamikáját és torzítását figyelembe véve tetszőleges karakterisztika szerint vezérelhető. Ebben az esetben szükséges egy mikrovezérlő, amely a bemenőjel függvényében, a kívánt vezérlést valósítja meg, a programozható analóg áramkör dinamikus rekonfigurálása révén. A késleltető áramkör a fent bemutattak szerint (10.4 ábra) az FPAA áramkörben is kialakítható.

Ábrák jegyzéke

2.1. Analóg áramkör fejlesztése hagyományos módszerrel és FPAA-val 12
2.2. A Gene-törvény DSP és FPAA eszközökre. 14
2.3. Egy programozható analóg áramkör belső felépítése. 18
2.4. A transzkonduktancia erősítő egy áramköri megvalósítása. 20
2.5. Az áramkonvejor és egy alkalmazása szűrő áramkörben. 21
2.6. A kapcsolt áramok módszerének egy alkalmazása. 23
2.7. A kapcsolt kapacitások lehetséges megoldásai. 24
2.8. A nem átlapolt ellenfázisú órejelek értelmezése. 27
2.9. Kapcsolt kapacitásokkal megvalósított invertáló és nem invertáló erősítő. 28
2.10. Kapcsolt kapacitásokkal megvalósított összegzőerősítő. 29
2.11. Kapcsolt kondenzátoros integráló és differencialó áramkör 29
2.12. Kapcsolt kondenzátoros egyenirányító. 31
2.13. Egy univerzálisan felhasználható kapcsolt kondenzátoros konfigurálható analóg blokk elvi felépítése. 32
2.14. Kapcsolt kondenzátoros, két műveleti erősítős konfigurálható analóg blokk 33
2.15. A Lattice isPAC10 programozható analóg áramköre 34
2.16. A kapcsolómátrix különböző kialakítási lehetősége 36
2.17. Az FPAA áramkörök programozásának lépései. 37
2.18. Az IMP50E10 EPAC áramkör felépítése. 41
2.19. A Motorola MPAA020 áramkörének felépítése. 43
2.20. A TRAC020 FAS áramkör felépítése. 44
2.21. A Lattice isPAC30 áramkör felépítése egy-egy kialakított szűrővel. 45

2.22. Az Anadigm gyártmányú programozható analóg áramkör. 47
2.23. Az Anadigm FPAA áramköreiben alkalmazott teljes CAB konfiguráció, egy alkalmazásban. 48
2.24. Az Anadigm FPAA-k bemeneti áramkörének felépítése. 49
2.25. Az Anadigm FPAA-k kimeneti áramkörének felépítése. 50
2.26. Az ANxx típusú FPAA-k óragenerátorának felépítése és annak működési lehetőségei. 50
2.27. Az AN221E04 típusú FPAA-k konfigurálható blokkjaiban kialakítható áramköri makróinak egy részlete. 52
2.28. Az AnadigmDesigner2 program felülete, egy megvalósított PID-, és két analóg bemenet digitalizálását végző áramkörrel. 53
2.29. Az Anadigm FPAA-ba kialakított sávzáró szűrő frekvencia és késleltetés karakterisztikája. 53
2.30. A Cypress Inc. kevertjelű programozható áramkörének blokkvázlata. 54

3.1. Alulátersztő szűrő kapacitás-diódával és FET-tel 59
3.2. Az alulátersztő szűrő transzfer függvénye 59
3.3. A konfigurálható analóg áramkörök funkcionális blokkvázlata. . . 60
3.4. A rekonfigurálható analóg áramkörök programozása 61

4.1. Robusztus elektronikai rendszer működését befolyásoló környezeti hatások. 64
4.2. Egy robusztus elektronikai rendszer működésének összetevői. . . 65
4.3. Robusztus analóg áramköri rendszer párhuzamos kialakítása. . . . 67
4.4. Robusztus analóg áramköri rendszer soros kialakítása. 68
4.5. Hibamaszkolás többségi döntés alapján. 69
4.6. Hibadetektálás referencia áramkör alkalmazásával. 70
4.7. Hibadetektálás karakterisztikus prediktorral 71
4.8. Predikcióval meghatározott tartomány és a keletkezett hibajel. . . 72
4.9. Az Anadigm legelterjedtebb programozható analóg áramköre. . . 73

5.1. Programozható analóg áramkör áramköri funkciójának vezérlése digitális függvénnyel. 76

5.2. Visszacsatolt digitális hálózat programozható analóg áramkör ki és bemenetein keresztül 77
5.3. Visszacsatolás digitális hálózat programozható analóg áramkörr kimenetén és programozó bemenetén kersztül. 79
5.4. Mikrovezérlő és programozható analóg áramkör visszacsatolt együttműködése. 80

6.1. Áramköri funkció váltás mikrovezérlővel és programozható analóg áramkörökkel. 83
6.2. Programozható analóg áramkör kimeneti és bemeneti illesztő áramkörökkel mikrovezérlő környezetben. 85
6.3. Programozható analóg áramkör illesztése a környezetéhez a kimeneti és bemeneti feszültségek mérésével. 87
6.4. FPAA és analóg áramkör különböző pontjainak feszültség mérése mikrovezérlő környezetben. 88
6.5. Programozható analóg áramkör mint mikrovezérlővel együttműködő analóg jelfeldolgozó. 89
6.6. Mikrovezérlő és programozható analóg áramkör kapcsolata megszakítással. 91
6.7. Megszakítást kiváltó áramköri részlet PSoC áramkörben. 92

7.1. Robusztus elektronikus áramkör kialakítása karakterisztikus predikcióval. 95
7.2. Robusztus elektronikus áramkör kialakítása prediktív vezérléssel. . 97
7.3. Többségi szavazó elvű hibamaszkolás programozható áramkörökkel és mikrovezérlővel. 100
7.4. Önszabályozó analóg robusztus rendszer kialakítása mérőberendezésben. 103
7.5. Soros-párhuzamos topológiájú robusztus rendszer programozható analóg áramkörökkel. 106
7.6. Különböző robusztus topológiák kialakítása. 107

8.1. Programozható analóg áramkörök rekonfigurálása 111

8.2. Programozható analóg áramkör rekonfigurálása korlát-jellemző bevezetésével. 113
8.3. Programozható analóg áramkör transzfer karakterisztikájának mérése a háttérben mikrovezérlő segítségével. 115
8.4. Programozható analóg áramkör rekonfigurációja dinamikus és statikus adatbázis segítségével. 117

9.1. Az akusztikus zajelnyomás funkcionális blokkvázlata. 120
9.2. Az akusztikus zajelnyomás analóg áramköri funkcióinak FPAA realizációja. 122
9.3. A zaj és ellenfázisú kioltójel és annak eredménye. 123
9.4. A zajra szuperponált -30dB-es akusztikus jel és kioltójele. 123
9.5. Az átviteli függvényt mérő készülék blokkvázlata. 124
9.6. Az átviteli függvényt mérő készülék két FPAA áramköre. 125
9.7. A minta-vevő tartó áramkör működése. 125
9.8. A mintavevő tartó áramkör működése. 126
9.9. Az $U-f$ átalakító karakterisztikája. 127
9.10. A készülékkel mért aluláteresztő szűrő karakterisztikája (a), illetve optocsatoló $A_u(f)$ karakterisztikája (b) (felül), illetve az U–f átalakító kimenete (alul) látható. 127
9.11. Az f–U átalakító kimenti feszültsége (alul), illetve egy sávátersztő szűrő feszültség idő függvénye látható (felül) (a). A sávátersztő szűrő A_u–f karakterisztikája (b). 128
9.12. Agyi α-hullámokat érzékelő berendezés jelkondicionáló előfeldolgozó áramkörei. 129
9.13. Az α-hullámokat érzékelő berendezés dinamikusan programozható áramköre AN221E04 FPAA-ban. 130
9.14. Az EEG jel a komparátor-, és a DAC- kimenete 131
9.15. Az α-detektort vezérlő program folyamatábrája. 132
9.16. A sávátereszto szűrő bemenetei és a kimenő jelek spektrumai . . . 134
9.17. A dinamikus rekonfiguráláshoz használt bináris sztingek egy része. 135

10.1. Az *A* osztályú erősítő teljesítmény viszonyai. 137
10.2. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozással. 138

10.3. *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozása programozható analóg áramkörrel. 139
10.4. Az *A* osztályú erősítő dinamikus tápfeszültség szabályozás vezérlője FPAA-ban megvalósítva 140
10.5. A késleltető és az ISZM áramkör működése 141
10.6. A késleltető áramkör és a tápfeszültség változása 141

Az alkalmazott szimbólumok

α_a	A mikrovezérlő $\boldsymbol{A}$ algoritmusának analóg értékeket manipuláló rész-algoritmusa
α_{IT}	A mikrovezérlő $\boldsymbol{A}$ algoritmusának FPAA jellemző értékeket manipuláló rész-algoritmusa
α_{kp}	a mikrovezérlő $\boldsymbol{A}$ algoritmusának karakterisztikus predikciót megvalósító rész-algoritmusa
δ	késleltetési idő
ε	a még megengedett legnagyobb hiba
$\mathbb{F}$	az áramöri funkció, amely az áramkör toplógiájának n, és az áramköri elemk paramétervektorának $\overline{P}$ függvénye
$\mathbb{F}_{FPAA}$	az FPAA áramköri funkciója
$\overline{P}$	A p_0, p_1, p_2,...,p_{n-1} áramköri paraméterek vektora
ϕ	Fáziskésleltetés
ρ_s	általános alkatrész-paraméter
τ	Késleltetés az akusztikus térben
$\mathbf{A}$	A mikrovezérlő programozott algoritmusa, firmware-je, programja

$\mathbf{a}$	a digitál-analóg átalakító transzfer karakterisztikája
$\mathbf{d}$	az analóg-digitál átalakító transzfer karakterisztikája
$\mathbf{n}$	az áramkör hálózat topológiája
ζ_{Bp}	a sáv-átersztő szűrő átviteli karakterisztikája
A, a	analóg jelek
A_j	a még megengedhető tranziens
A_{kp}	a karakterisztikus prediktor kimenő jele
b	az $(\mathbf{n},\overline{P})$-t leíró bináris sztring
B_n	egy n helyiértékű bináris szám
e	hibajel
f_g	a meghajtó egység átviteli karakterisztikája
f_j	a még megengedhető frekvencia-ugrás
f_o	a mérendő objektum átviteli karakterisztikája
f_z	a lezárás átviteli karakterisztikája
h	a komparátor programozható hiszterézise
k	Átalakítási tényező
P_{dev}	az aktív eszköz disszipációja
R_{DS}	a FET drain-source ellenállása
R_{rq}	Az r - q pontok között értelmezett látszólagos ellenállás
r_{rq}	Az r - q pontok között értelmezett dinamikus ellenállás
S	Az n helyiértékű bináris súlyozású kapcsoló

s	vezérlő jel
$t_{\mu C}$	a mikrovezérlő szükséges program végrehajtási ideje
t_{rec}	a programozható analóg áramkör rekonfigurálásához szükséges idő
U_{GS}	a FET gate-source feszültsége
U_r	A kioltó jel feszültsége
U_z	Zajfeszültség
V_{be}	a bemeneti illesztő áramköri funkcióját meghatározó jellemző
V_{ki}	a kimeneti illesztő áramköri funkcióját meghatározó jellemző
R_{Cp}	A C kondenzátor párhuzamos ellenállása
R_{Cs}	A C kondenzátor soros ellenállása

Irodalomjegyzék

[1] N. Ádám. Single input operators of the df kpi system. *Acta Polytechnica Hungarica*, 7(1):73–86, 2010.

[2] W. J. Adams, A. Nedungadi, and R. L. Geiger. Design of a programmable OTA with multi-decade transconductance adjustment. *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 1(5):663–666, March 1989.

[3] P. Andersen. Evolvable hardware artifical evolution of hardware circuits in simulation and reality. Department of Computer Science University of Aarhus Thesys, 1998.

[4] D. Anderson, C. Marcjan, D. Bersch, H. Anderson, P. Hu, O. Palusinski, D. Gettman, I. Macbeth, and A. Bratt. A field programmable analog array and its application. In *CICC '97*, 1997.

[5] C. C. Antini, R. Zebulum, M. A. C. Pacheco, M. M. R. Vellasco, and M. H. Szwarcman. Evolvable hardware, 2001. proceedings. *The Third NASA/DoD Workshop*, 2001.

[6] P. Arató. *Logikai rendszerek tervezése*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1985.

[7] I.A. Awad and A. M. Soliman. Inverting second generation current conveyors: the missing building blocks CMOS realizations and applications. *Int. J. Electronics*, 86(2):413–432, 1999.

[8] S. Bains. FPAA's energize analog future. http://www.eetasia.com.

[9] J. M. Birkner and H-T. Chua. Programmable array logic circuit. US Patent, 1970.

[10] A. Bratt and I. Macbeth. Design and implementation of a field programmable analogue array. In *FPGA '96 procedings*, 1996.

[11] S. Chang, B. Hayes-Gill, and C. Paul. Multi-function block for a switched current field programmable analog array. *1996 Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1996.

[12] P. Chow, S. Seo, J. Rose, Chung, G. K. Paez-Monzon, and I. Rahardja. The design of an SRAM-based field-programmable gate array. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 7:191–197, 1999.

[13] P. Csermely. A hálózatok világában. http://hps.elte.hu/oktaeder/Halovilag.-mht.old2.

[14] MicroSystems Cypress. Configurable mixed-signal array with on-board controller cy8c25122, cy8c26233, cy8c26443, cy8c26643 device data sheet for silicon revision d august 18, 2003. http://www.cypress.com/.

[15] T. Ádám, A. Kane, A. Varga, and J. Vásárhelyi. Overview of digital signal processing based active noise cancellation strategies. *6th International Carpathian Control Conference*, 1(2):519–528, 24th May 2005.

[16] D. R. D'Mello and P. G. Gulak. Design approaches to field-programmable analog integrated. In *Special Issue on Programmable Analog Systems, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, Kluwer Academic Publishers*, volume 17, pages 7–34, 1998.

[17] R. T. Edwards, K. Strohbehn, and S. E. Jaskulek. A field-programmable mixed-signal array architecture using antifuse interconnects. *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 3(5):319–322, 2000.

[18] R. T. Edwards, K. Strohbehn, S. E. Jaskulek, and R. Katz. Analog module architecture for space-qualified field-programmable mixed-signal arrays. klabs.org/richcontent/MAPLDCon99/Papers.

[19] R. Ellis, H. Yoo, D. Graham, P. Hasler, and D. Anderson. A continuous-time speech enhancement from-end for microphone inputs. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Phoenix, AZ,*, 2(5), 2002.

[20] S. Embabi, X. Quan, N. Oki, A. Manjrekar, and E. Sanchez-Sinencio. A field programmable analog signal processing array. *IEEE 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1, 1996.

[21] S. H. K. Embabi, X. Quan, N. Oki, A. Manjrekar, and E. Sanchez-Sinencio. A current-mode based field-programmable analog array for signal processing applications. *Kluwer Analog Integrated Circuits and Signal Processing - Special Issue on Field Programmable Analog Arrays*, 17(1-2):125, September 1998.

[22] J. Eyre and B. Bier. The evolution of DSP processors. *IEEE Signal Processing Magazine*, 17(2):43–51, March 2000.

[23] O. Faurax, L. Freund, and F. Bancel. Robustness of circuits under delay-induced faults : test of aes with the pafi tool. *Universit´e de la M´editerran´ee, Syst'emes Informatiques Communicants, 13288 Marseille, FRANCE*.

[24] G. Frantz. Digital signal processor trends. *IEEE Micro*, 2(6):52–59, 2000.

[25] J. Gaál. *Elektronikus áramkörök analízise és szintézise Monte-Carlo módszerrel*. Akadémiai Kiadó, 1999.

[26] V.C. Gaudet and P.G. Gulak. CMOS implementation of a current conveyor-based field-programmable analogarray. *Conference Record of the 31st Asilomar Conference on Signals Systems and Computers*, 11:1156–1159, 1997.

[27] V.C. Gaudet and P.G. Gulak. Implementation issues for high-bandwidth field-programmable analog arrays. *Journal of Circuits, Systems, and Computers Special Issue on Analog and Digital Arrays*, 8:541–558, 2000.

[28] P. G. Gulak. Field-programmable analog arrays: past, present and future perspectives. *IEEE Region 10th International Conference on Microelectronics and VLSI*, 11:123–126, 1995.

[29] Gy. Györök. Analog Predictive Circuit with Field Programmable Analog Arrays. *ÓBUDA UNIVERSITY E-BULLETIN 1:(1) pp. 43-49. (2010).*

[30] Gy. Györök. Electronic Robustness by Circuit Polling and Reconfiguration. ICCC 2013, Proceedings of IEEE 9th International Conference on Computational Cybernetics, Tihany, Magyarország, 2013.07.08-2013.07.10. IEEE Communications Society, 2013. pp. 251-256. (ISBN:978-1-4799-0061-9; 978-1-4799-0060-2).

[31] Gy. Györök. Programozható analóg áramkörökből felépített rendszerek szintézise. *PhD dolgozat, BMGE, Budapest, 2009. pp. 143.*

[32] Gy. Györök. Special Application of Embedded Mocrocontrollers. Ust-Kamenogorsk: East-Kazakhstan Technical University, 2011. 52 p.

[33] Gy. Györök. Special Hybrid Control Application of Field Programmable Analog Arrays. *ÓBUDA UNIVERSITY E-BULLETIN 1:(1) pp. 61-70. (2010).*

[34] Gy. Györök. The FPAA Realization of Analog Predictive Circuit. 8th IEEE International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI 2010): Proceedings Herlany, Szlovákia, 2010.01.28-2010.01.30.IEEE Hungary Section, 2010. pp. 1-4. (ISBN:978-1-4244-6422-7).

[35] Gy. Györök, J. Lakner, M. Makó. Robust Electronic Application by PSoC. *10th International Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMI), 2012 IEEE Herlany, Szlovákia, 2012.01.26-2012.01.28.*

[36] Gy. Györök, L. Simon. Programozható analóg áramkör megszakításos alkalmazása mikrovezérlő környezetben. Alkalmazott informatika és határterületei Székesfehérvár, Magyarország, 2009.11.06 Óbudai Egyetem, 2009. pp. 1-4. (ISBN:978-963-7154-94-2).

[37] Gy. Györök, M. Horváth. Hybrid Controller Application with PSoC Device. *International Symposium on Applied Informatics and Related Areas: AIS 2010 Székesfehérvár, Magyarország, 2010.11.12 pp. 1-5. (ISBN:978-615-5018-07-7; 978-615-5018-22-0).*

[38] Gy. Györök, M. Makó. Configuration of EEG Input-unit by Electric Circuit Evolution. INES 2005, 9th International Conference on Intelligent Engineering Systems, 2005 September 16-19, 2005 Cruising on Mediterranean Sea, ISBN 0-7803-9474-7, IEEE 05EX1202C.

[39] Gy. Györök, M. Makó. Configuration of universal analog input-unit by electronic circuit evolution. *6th International Carpatian Control Conference, 24-27 May, 2005., Miskolc, Hungary, ISBN 963 661 644 2.*

[40] Gy. Györök, M. Makó. Self configuration Analog Circuits. XVIIth Kandó conference 2006 „In memoriam Kálmán Kandó" Budapest Tech Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, 12-14 January 2006, ISBN 963 7154 426.

[41] Gy. Györök, M. Makó, J. Lakner. Combinatorics at Electronic Circuit Realization in FPAA. *SISY 2008 6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics September 26-27, 2008 Subotica, Serbia, ISBN 978-1-4244-2407-8, IEEE Catalog Number CFP0884-CDR, Library of Congress 2008903275.*

[42] Gy. Györök, M. Makó, J. Lakner. Combinatorics at Electronic Circuit Realization in FPAA. Acta Polytechnica Hungarica, Journal of Applied Sciences, Budapest Tech, Volume 6, 1, 2009, ISSN 1785-8860, p. 151-160.

[43] Gy. Györök, T. Orosz, M. Makó, T. Treiber. Special Application of FPAA in Area of Circuit Robustness. *7th International Symposium on Applied*

Informatics and Related Areas Székesfehérvár: Óbudai Egyetem, 2012. pp. 125-130. (ISBN:978-615-5018-40-4).

[44] Gy. Györök, T. Orosz, M. Makó, T. Treiber. To Achieve Circuit Robustness by Co-operation of FPAA and Embedded Microcontroller. SACI 2013 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics Timisoara, România, 2013.05.23-2013.05.25. (IEEE).

[45] Gy. Györök, Z. Polyák. Robust Electronics Application in Practice by PSoC. *10th International Symposium on Applied Informatics and Related Areas: AIS 2010 Székesfehérvár, Magyarország, 2010.11.12 pp. 1-6.*

[46] Gy. Györök. A-class Amplifier with FPAA as a Predictive Supply Voltage Control. CINTI 2008, 9th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics, November 6-8, Budapest, Hungary, ISBN 978-963-7154-82-9, p.361-368.

[47] Gy. Györök. Effect optimized Peltier – cooling system. *IEEE-INES2002 Intelligent Engineering Systems Conference, Opatija, Croatien, 2002 May 26.-29., INES 2002, ISBN953-6071-17-7, ISSN 1562-5850.*

[48] Gy. Györök. Functional and Parametrical Self Adjustment in Analog Circuit. SISY 2007 5th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics August 24-25, 2007 Subotica, Serbia, ISBN 1-4244-1443-1, IEEE Catalog Number 07EX1865C, Library of Congress 2007930059.

[49] Gy. Györök. Programmable Analog Circuit in Reconfigurable Systems. *5th Slovakien – Hungarien Joint Symposium on Applied Machine Intelligence, 2007 January 25-26, Poprad, Slovakia, ISBN 978-963-7154-56-0.*

[50] Gy. Györök. Programozható biztonságtechnikai szenzor. Informatika korszerű technikái konferencia-sorozat, Dunaújvárosi Főiskola 2005, november 23.

[51] Gy. Györök. Reconfigurable Control in Robust Systems by FPAA. *SISY 2008 6th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics*

September 26-27, 2008 Subotica, Serbia, ISBN 978-1-4244-2407-8, IEEE Catalog Number CFP0884-CDR, Library of Congress 2008903275.

[52] Gy. Györök. Reconfigurable Security Sensor by CCD Camera. 6th International Symposium of Hungarian Researches on Computational Intelligence, 2005 November 18-19, Buadapest, ISBN 963 7154 43 4.

[53] Gy. Györök. Self Configuration Analog Circuit by FPAA. *4th Slovakien – Hungarien Joint Symposium on Applied Machine Intelligence, 2006 January 20-21, Herlany, Slovakia, ISBN 963 7154 44 4.*

[54] Gy. Györök. Self Organizing Analogue Circuit by Monte Carlo Method. LINDI 2007 International Symposium on Logistics and Industrial Informatics September 13-15, 2007 Wildau, Germany, ISBN 1-4244-1441-5, IEEE Catalog Number 07EX1864C, Library of Congress 2007930060.

[55] Gy. Györök. Szoftver-támogatott analóg áramkör realizáció. *„A tudomány és az európai felsőoktatási térség" konferencia Dunaújvárosi Főiskolán 2003. nov. 5., Konferencia kiadvány, ISSN 1586-8567.*

[56] Gy. Györök. The function-controlled input for the IN CIRCUIT equipment. IEEE-INES2004 Intelligent, Engineering Systems Conference, Cluj-Napoca, Romania, 2004 September 19-21, INES 2004, ISBN 973-662-120-0.

[57] Gy. Györök. Univerzális bemeneti egység IN CIRCUIT mérőberendezéshez. *BMF regionális Konferencia 2004, Székesfehérvár, 2004. november 8. Konferencia kiadvány: ISBN 963 7154 33 7.*

[58] Gy. Györök. Univerzális bemenőfokozat FPAA-val. Dunaújvárosi Főiskola Közleményei, 2004 „OKTATÁS – KUTATÁS – GAZDASÁG", Konferencia a Dunaújvárosi Főiskolán, ISBN1586-8567.

[59] T. S. Hall. Field programmable analog arrays:a floatinggate approach. A Dissertation Presented to The Academic Faculty, School of Electrical and Computer Engineering Georgia Institute of Technology July 12, 2004.

[60] T. S. Hall, M. Christopher, T. Paul Hasler, and D. V. Anderson. Developing large-scale field-programmable analog arrays for rapid prototyping. *Internationale Journal in Embedded Systems*, 1(3/4):179–192, 2005.

[61] T. S. Hall, C. M. Twigg, P. Hasler, and D. V. Anderson. Application performance of elements in a floating-gate FPAA. *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 5, 2004.

[62] L.P. Hansen and T.J. and Sargent. Robustness. www.home.uchicago.-edu/ lhansen.

[63] S. Hauck. The future of reconfigurable systems. http://www.ee.washington.edu/people/faculty/hauck/publications/ReconfigFuture.PDF.

[64] D. Ibrahim. *Advanced PIC Microcontroller Projects in C*. Elsevier-Newnes, New York, Oxford, 2008.

[65] Microchip Technology Inc. High-Performance, 16-Bit Digital Signal Controllers, dsPIC30F6010A/6015 Data Sheet. http://www.microchip.com.

[66] G. F. Ivars, B. J. Maundy, I. A. Omole, and P. Aronhime. On the Design of CMOS Current Conveyors. http://www.enel.ucalgary.ca.

[67] M. Jankovics. Önszerveződő analóg áramkörök. BMF Diplomamunka, 2007, Konzulens: dr. Györök György.

[68] M. Jankovics and T. Adamek. Akusztikus zajcsökkentés FPAA-val. Tudományos Diák Köri dolgozat, 2006, Konzulens: dr. Györök György.

[69] S. Janovics and M. Tóth. *A logikai tervezés módszerei*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.

[70] R. Kastner, A. Kaplan, and M. Sarrafzadeh. *Synthesis Techniques and Optimizations for Reconfigurable Systems*. Kluwer Academic Pub, 2003.

[71] D. Keymeulen, R. S. Zebulum, Y. Jin, and A. Stoica. Fault-tolerant evolvable hardware using field-programmable transistor arrays. *IEEE Transactions on Reliability*, 49(3):351, 2000.

[72] H. W. Klein. The EPAC architectura: An expert cell approach to field programmable analog devices. In *FPGA '96*, 1996.

[73] K. S. Koneru, E. K. F. Lee, and C. Chu. A flexible 2-d switched-capacitor FPAA architecture and its mapping algorithm. *42nd Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1:269–299, 1999.

[74] J. Kopják. Dynamic analysis of distributed control network based on event driven software gates. *IEEE 11th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia*, ISBN: 978-1-4673-4751-8:p. 293–297, 2013.

[75] J. Kopják and J. Kovács. Implementation of event driven software gates for combinational logic networks. *IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, Subotica, Serbia*, ISBN: 978-1-4673-4751-8:p. 299–304, 2012.

[76] M. Kouider, M. Nadi, J. Prado, and D. Kourtiche. Embedded system design and implementation of standard auto-calibrated measurement chain. *1st International Conference on Sensing Technology,*, Palmerston North, New Zealand, November 21-23, 2005.

[77] H. Kutuk and S. M. Kang. A field-programmable analog array (FPAA) using switched-capacitor techniques. *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 4:41–44, September 1996.

[78] H. Kutuk and S.-M. Kang. A switched capacitor approach to field-programmable analog array (FPAA) design. *Kluwer Analog Integrated Circuits and Signal Processing - Special Issue on Field Programmable Analog Arrays*, 17:51–65, September 1998.

[79] K. Lamár. A világ leggyorsabb mikrovezérlöje. *ChipCAD Kft.*, page 96, January 1999.

[80] K. Lamár and Veszprémi K. A mikroszámítógépek térnyerése a villamos hajtások szabályozásában. *Proceedings of the Kandó Conference 2002, Budapest, Hungary*, pages 1–7, January 2002.

[81] D. Lanza, J. Lyke, P. Zetocha, D. Fronterhouse, and D. Melanson. Responsive space through adaptive avionics. http://www.responsivespace.com-/Papers/RS25CSESSION%20PAPERS%5CSESSION%206

[82] Semiconductor Corporation Lattice. ispPACxx in-system programmable analog circuit data sheet. www.lattice.com.

[83] K. Lee and P. G. Gulak. A transconductor-based field-programmable analog array. *IEEE International Solid-State Conference Digest of Technical Papers*, 2(1):198–199, 1995.

[84] L. Madarász and Zivcak J. Aspects of computational intelligence: Theory and applications. *Revised and Selected Papers of the 15th IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems 2011, Springer-Verlag , Berlin Heidelberg*, ISBN 978-3-642-30667-9:p. 436, 2011.

[85] D. Marsh. Programmable analogue IC's challenge spice-and-breadboard designs. In *EDN Europe, http://www.ednmag.com: Reed Business Information*, 2001.

[86] A. D. Martin, H. S. Lee, and I. Masaki. A mixed-signal array processor with earli vision applications. In *IEEE Journal of Solid-State Circuit*, volume 33, 1998.

[87] S. Mitra. Circuit failure prediction for robust system design in scaled cmos. Departments of Electrical Engineering and Computer Science Stanford University, Stanford, CA.

[88] S. Mitra. Introduction to robust systems. www.stanford.edu/ subh/-robust.html.

[89] S. Mitra, V. Narayanen, L. Spainhower, and Y. Xie. Robust system design from unreliable components. www.cse.psu.edu/ yuanxie/isca05.pdf.

[90] Corporation Motorola. MPAA020 datasheet. http://www.datasheetcatalog.com/datasheets.pdf.MPAA020.html.

[91] Corporation Motorola. MPAA020 Field Programmable Analog Array. http://datasheet.digchip.com/311/311-3-099474-MPAA020.pdf.

[92] A. I. Muhammed and H. Kuntman. A CMOS Realization of Inverting Second Generation Current Conveyor POSITIVE (ICCII+). http://www.-norsig.no.

[93] R. S. Muller and T. I. Kamins. *Device Electronics for Integrated Circuits*. John Wiley and Sons, 1986.

[94] R.M. Murray. Robust performance. http://www.cds.caltech.edu/ murray/-Robust Performance, California Institute of Technology.

[95] A. Pankiewicz, M. Wojcikowski, S. Szczepanski, and Y. Sun. A CMOS field programmable analog array and its application in continuous-time OTA-C filter design. *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 1(5):5–8, 2005.

[96] E. Pierzchala, G. Gulak, L. O. Chua, and Rodríguez-Vázquez A. *Field-Programmable Analog Arrays*. Springer, 1999.

[97] E. Pierzchala and M. Perkowski. High speed field programmable analog array architecture design. *Proc. of the FPGA '94, 1994 ACM/SIGDA Second International Workshop on Field-Programmable Gate Arrays*, 4:1–10, 1994.

[98] E. Pierzchala, M. A. Perkowski, P. V. Halen, and R. Schaumann. Current-mode amplifier/integrator for a field-programmable analog array. *IEEE International Solidstate Conference Digest of Technical Papers*, 1995.

[99] A. Pilat and J. Klocek. Programmable analog hard real-time controller [programowalny sterownik analogowy]. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89(3 A):38–46, 2013. cited By (since 1996) 0.

[100] A. Pilat and J. Klocek. Programmable analog hard real-time controller [programowalny sterownik analogowy]. *Przeglad Elektrotechniczny*, 89(3 A):38–46, 2013. cited By (since 1996) 0.

[101] Adam Pilat. Control toolbox for industrial programmable analog controller embedding state feedback controller. pages 1–4, 2012.

[102] C. Premont, R. Grisel, N. Abouchi, and J-P. Chante. Current-conveyor based field programmable analog array. *IEEE 39th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1(8):155–157, 1996.

[103] X. Quan, S. Embabi, and E. Sanchez-Sinencio. A current-mode based field programmable analog array architecture for signal processing applications. *IEEE 1998 Custom Integrated Circuits Conference, Santa Clara, CA*, 1998.

[104] A. Ray, P. P. Chaudhuri, and P. K. Nandi. Design of OTA based field programmable analog array. *Proc. 13th International Conference on VLSI Design*, 2000.

[105] C. Reiser. Optimization of performance of dynamically reconfigurable mixed-signal hardware using field programmable analog array (FPAA) technology. PhD thesis, (1998).

[106] C. Reiser, L. Znamirowski, O.A. Olgierd A. Palusinski, S.B.K. Vrudhula, and D. Rakhmatov. Dynamically reconfigurable analog/digital hardware – implementation using FPGA and FPAA technologies. http://www.ece.-arizona.edu/ cmsl/publications.htm.

[107] F. Scott, L. Kemper, S. Afreen, and O.L. Weck. Flexible and reconfigurable systems: Nomenclature and review. In *Proceedings of the ASME 2007 International Design Engineering Technical Conferences Computers and Information in Engineering Conference*, volume IDETC/CIE, 2007, Las Vegas, Nevada, USA.

[108] H. Scott. The future of reconfigurable systems. In *Proceedings of 5th Canadian Conference on Field Programmable Devices, Montreal, June 1998 The Future of Reconfigurable Systems*, volume IDETC/CIE, 1998, LEvanston, IL 60208-3118 USA.

[109] S. Sergyán. Edge detection techniques of thermal images. *2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, SISY 2012*, pages 227–231, 2012.

[110] S. Sergyán. Useful and effective feature descriptors in content-based image retrieval of thermal images. *LINDI 2012 - 4th IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics, Proceedings*, pages 55–58, 2012.

[111] A. S. Shedra and K. C. Smith. *Microelectronic Circuits*. Oxford University Press, New York, Oxford, 1998.

[112] M. Sivilotti. A dynamically configurable architecture for prototyping analog circuits. In *MIT VLSI Conference*, 1998.

[113] P. D. Smith, M. Kucic, R. Ellis, P. Hasler, and D. V. Anderson. Mel-frequency cepstrum encoding in analog floating-gate circuitry. *International Symposium on Circuits and Systems, Phoenix, AZ*, 4, 2002.

[114] G. Sánchez-Suárez. Field programmable analog array. www.ufps.edu.co.

[115] P. P. Sotiriadis and Y. Tsividis. Single-URC integrators. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 50(2):304–307, February 2003.

[116] A. Stoica, R. Zebulum, D. Keymeulen, R. Tawel, T. Daud, and A. Thakoor. Reconfigurable VLSI architectures for evolvable hardware: from experimental field programmable transistor arrays to evolution-oriented chips. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 9(1):227–232, 2001.

[117] K. Tarnay and et al. *Modelling in Semiconductor electronics*. Akadémiai Kiadó, 1992.

[118] P.M.M. Tawdross. Biologisch inspirierte methoden zur schaltungsdimensionierung und justierung für dynamisch rekonfigurierbare sensorelekronik

in industriellen eingebetteten systemen. Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der Universität Kaiserslautern zum verleihung des akademischen Grades Thesys, 2007.

[119] Michael A. Terry, Jonathan Marcus, Matthew Farrell, Varun Aggarwal, and Una-May O'Reilly. GRACE: generative robust analog circuit exploration. In Franz Rothlauf, Jurgen Branke, Stefano Cagnoni, Ernesto Costa, Carlos Cotta, Rolf Drechsler, Evelyne Lutton, Penousal Machado, Jason H. Moore, Juan Romero, George D. Smith, Giovanni Squillero, and Hideyuki Takagi, editors, *Applications of Evolutionary Computing, EvoWorkshops2006: EvoBIO, EvoCOMNET, EvoHOT, EvoIASP, EvoInteraction, EvoMUSART, EvoSTOC*, volume 3907 of *LNCS*, pages 332–343, Budapest, 10-12 April 2006. Springer Verlag.

[120] Anadigm the dpASP Company. Dinamically programmable analog signal processing. http://www.anadigm.com/.

[121] U. Tietze and Ch. Schenk. *Analóg és digitális áramkörök*. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.

[122] Z. Vámossy. Thermal image fusion. *2012 IEEE 10th Jubilee International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, SISY 2012*, pages 385–388, 2012.

[123] L. Vokorokos, N. Ádám, and B. Madol. The process control for p-single operators. *19th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region, RAAD 2010 - Proceedings*, pages 119–123, 2010.

[124] J. F. Wakerly. *Digital Design: Principles and Practices*. Prentice-Hall, 1987.

[125] H. Yoshizawa, Y. Huang, P. F. Ferguson, and G. C. Temes. Mosfet-only switched-capacitor circuits in digital cmos technology, March 1999.

[126] S. Zebulum, R, A. Stice, and K. Didier. The design process of an evolutionary oriented reconfigurable architecture. www.coe.uncc.edu/ kdatta/-papers/The/20Design/20Process/20o...urable/20Architecture.pdf.

[127] M. Zemian, M. J. Hughes, H. Royan, and L. Ong. The PH processor: A soft embedded core for use in university research and teaching. *2nd UK Embedded Forum*, 3, 2005.

[128] Semiconductors Company Zetex. TRAC support circuit. www.zetex.-com/3.0/pdf/tracs2q.pdf/.