

A digitális vezérlő- és szabályozórendszerek kiválasztásának és alkalmazásának kritériumai – általános elemzés

Digital control systems selection and application criteria – a general survey

Prof. SZÁSZ Csaba

Kolozsvári Műszaki Egyetem
Villamosmérnöki Kar

Memorandumului utca, 28 szám, Kolozsvár, 400114
csaba.szasz@emd.utcluj.ro

Abstract – The paper presents a general survey about main criteria of digital control systems selection for given applications. Currently digital technology offers several leading-edge microprocessor-based hardware architectures for a wide range of digital control systems implementation. How these structures should be chosen and what are the main criteria of their utilization for various applications is discussed in detail. There are also indicated most suited hardware topologies to control industrial, household, or other processes.

Keywords – digital control system, microprocessor, microcontroller, digital signal processor, FPGA

Kivonat – A dolgozat egy általános áttekintést tesz a digitális vezérlő- és szabályozórendszerek kiválasztásának legfőbb kritériumaira, adott alkalmazásokra vonatkozólag. Jelenleg, a digitális technológia többféle mikroprocesszor-alapú hardware topológiát tud biztosítani, amelyeket fel lehet használni igen sokféle digitális vezérlő- és szabályozórendszer felépítésére. Elemezve van, hogyan kell ezeket a struktúrákat kiválasztani és melyek a legfőbb szempontok az alkalmazásukban. Tanácsok vannak megfogalmazva a legmegfelelőbb hardware topológiák kiválasztására ipari-, háztartási-, vagy bármely más alkalmazásokra.

Kulcsszavak – digitális vezérlőrendszer, mikroprocesszor, mikrovezérlő, digitális jelprocesszor, FPGA

1. Bevezetés

A digitális elektronika jelenlegi technológiai fejlettségi szintjéből kiindulva, nem nehéz megállapítani, hogy napjainkban a korszerű vezérlő- és szabályozórendszerek döntő többsége mind valamilyen mikroprocesszor-alapú megoldásra van megtervezve és megépítve. Ami magát a mikroprocesszorokat illeti - mint az ilyen rendszerek aritmetikai-logikai műveletet végző alapegységei, ezek jelen pillanatban a következő típusúak lehetnek:

- általános felhasználású mikroprocesszorok (mint például az asztali- vagy *laptop* személyi számítógépekben használt mikroprocesszorok);
- mikrovezérlők (háztartási gépekben, korszerű személygépkocsikban, mindenfajta ipari vezérlésekben, stb.);
- digitális jelprocesszorok (DSP - Digital Signal Processor);
- programozható logikai vezérlők (PLC - Programmable Logic Controller, vagy ipari számítógép);
- FPGA-alapú processzorok (Field Programmable Gate Array processzorok);
- ASIC típusú processzorok (Application Specific Integrated Circuits).

Az előbbi felsorolás után majdnem automatikusan feltevődik az a jogos kérdés, hogy egy adott alkalmazásra vonatkozólag melyik megnevezett processzor típusra épített digitális vezérlő - vagy szabályozórendszert volna a legmegfelelőbb használni? Milyen mikroprocesszor-alapú hardware topológiát lenne célszerűbb kiválasztani egy adott esetben? Hogyan lehetne árban a legkedvezőbb és teljesítményben a legjobb vezérlő-, vagy szabályozórendszert megtervezni és kivitelezni az adott alkalmazásra? Ugyanakkor, az sem egészen világos, hogy milyen alapvető kritériumokat kellene figyelembe venni egy helyes választáshoz.

Nem egyértelmű, hogy milyen elméleti alapokról kellene kiindulni, vagy milyen gyakorlati szempontokat kellene számon tartani egy tervezőnek, hogy ne egy tévesen megválasztott digitális rendszert használjon egy adott folyamat vezérléséhez vagy szabályozásához.

Természetesen, az előbbi kérdések megválaszolására néhány alapvető kritériumot már előre figyelembe lehet venni, melyek nélkülözhetetlenek a helyes tervezéshez és választáshoz. Talán az egyik ilyen legfontosabb szempont, hogy a digitális rendszer az adott alkalmazás csak vezérlésére, vagy éppen szabályozására lesz-e használva. A vezérlőrendszer megnevezés ugyanis egy nyílt-hurok típusú struktúrára vonatkozik, amelyek esetében nincs információ visszaolvasva az adott folyamatból. Tehát nincsenek használva szenzorok, nincsen semmilyen visszacsatolás, a digitális rendszer nem olvas be adatokat az alkalmazásból, nem szükséges szabályozók beépítése a rendszerbe. Ebben az esetben a digitális rendszernek csupán csak utasításokat kell generálnia az alkalmazás fele. Ebből kifolyólag, az ilyen digitális architektúrák sokkal egyszerűbb felépítésűek, olcsóbbak, és megtervezésük is jóval könnyebb. A szabályozórendszerek viszont egy zárt-hurok felépítésű konfigurációra vonatkoznak. Ilyenkor, már többféle visszacsatolás is létezhet, amikor szenzorok segítségével fizikai mennyiségek vannak mérve és visszaolvasva a digitális rendszerbe. Mindez feltételezi a bonyolult adatbeolvasó- és átalakító digitális áramkörök használatát, szabályozó algoritmusok beépítését, vagy a valós időben történő gyors vezérlőjelek generálását. Magától érthetően, az ilyen digitális topológiák sokkal költségesebbek, bonyolultabb felépítésűek és szigorúbb elvárásoknak kell megfelelniük. A rendszerben bepített processzor is sokkal nehezebb követelményeknek kell megfelelnie a működési- és feldolgozási sebesség szempontjából, párhuzamos adatfeldolgozási képességeket kell biztosítani, vagy több algoritmust kell végrehajtania ugyanabban az időintervallumban.

Egy másik igen fontos kritérium a digitális vezérlő- és szabályozórendszerek kiválasztásában az, hogy az adott alkalmazás vagy folyamat mechanikai- és elektromos időállandói milyenek. Nagy időállandók (szekundumok, órák, vagy még nagyobb időintervallumok) esetében a digitális rendszer is valószínűleg egyszerűbb felépítésű és sokkal olcsóbb lesz. Viszont, egészen más megfontolások alapján kell kiválasztani és más architektúrája is lesz a digitális rendszernek, ha az adott időállandók kicsik (például *ms*, vagy éppen *μs* nagyságúak). Ez esetben nagyon fontos lesz a valós időben történő szabályozás megvalósításának a képessége. Ugyancsak egy igen fontos szempont az, hogy a digitális rendszernek képes kell lennie torzítások nélkül beolvasni a fizikai jeleket (melyek általában elektromos feszültséggé vagy elektromos árammá vannak alakítva a szenzorok által) az adott folyamatból. Ez azt jelenti, hogy mindenképpen be kell tartani Nyquist törvényét, mely kimondja, hogy a digitális rendszer mintavételezési frekvenciája (a jel digitális átalakításakor) több mint kétszer nagyobb kell lennie a beolvasott jel maximális frekvenciájánál. Így elkerülhetővé válik a jelek torzítása (az *aliasing* jelenség), amikor a mintavételezett jelben a magas frekvenciák tévesen alacsonyabb frekvenciaként jelennének meg [1].

Ugyancsak fontos szempont figyelembe venni azt is, hogy milyen intervallumban változnak az adott folyamat fizikai mennyiségei. Például, egészen más felépítésű lesz egy hőmérséklet szabályozó digitális rendszer, ha a hőmérséklet a 0-30 °C, vagy éppen a ±30 °C intervallumban változik. Nem utolsó szempont az sem, hogy milyen pontossággal kell szabályozni egy adott fizikai mennyiséget. Ha egy lakóhelységben kell szabályozni a hőmérsékletet, akkor figyelembe kell venni azt, hogy az emberi test nagy valószínűséggel nem fogja érdemben érzékelni a szobahőmérséklet századnyi- vagy ezrednyi változásait. Tehát most nem lesz szükséges egy nagy pontosságú digitális vezérlőrendszer megtervezése. Ekkor a 32 bit vagy 16 bit felbontású rendszerek helyett igencsak elégséges lesz egy 8 bites, hiszen ebben az esetben is a feldolgozási hiba nagysága (kvantuma) csak $1/2^8 = 0.0039$ lesz. Nagymértékben más lesz a digitális szabályozórendszer architektúrája akkor is, ha például egy adott mechanikai mozgás pontosságát az alkalmazásból néhány *cm* vagy éppen *μm* pontossággal kell szabályozni. Természetesen, még sok más egyéb kritériumot is lehetne elemezni a digitális vezérlő- és szabályozórendszerek kiválasztásakor, de az előbbiekből kiindulva már mindenképpen körvonalazni lehet, hogy a felsorolt lehetséges mikroprocesszor-alapú rendszerek külön-külön milyen alkalmazásokhoz volnának a legalkalmasabbak és megfelelőbbek. A következőkben ennek kielemezése lesz röviden bemutatva és felvázolva

2. Általános felhasználású mikroprocesszorokra épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

Ahogy már említve volt, az általános felhasználású mikroprocesszorok leginkább az asztali (*desktop*) vagy *laptop* számítógépekbe vannak beépítve. Ezek az úgynevezett *office* (vagy irodai) típusú személyi számítógépek. Maga a mikroprocesszorok is amelyek be vannak építve ezekbe arra vannak megtervezve, hogy adatokat (és nem jeleket) dolgozzanak fel a lehető leggyorsabban, a négy alapvető aritmetikai műveletre támaszkodva. Adódik a kérdés, hogy az ilyen típusú mikroprocesszorokat hogyan

lehetne mégis vezérlő- vagy szabályozórendszerek megépítésére felhasználni? Tehát, tulajdonképpen egy adatfeldolgozó számítógépet átalakítani jelfeldolgozó számítógéppé. Kialakításukat és fizikai méretüket figyelembe véve, a *laptop* típusú számítógépek kevésbe alkalmasak erre, habár a korszerű típusok *USB* kapuk segítségével könnyen tudnak digitálisan kommunikálni a külvilággal. A *desktop* számítógépek nagyon is alkalmasak lehetnek különböző vezérlő- és szabályozó alkalmazásokra, például különösen a mindenfajta ipari folyamatokban. Ennek egyik fontos oka az, hogy maguk a számítógépek tervezői is előre gondoltak erre, hiszen az ilyen számítógépek memóriatérképében külön megtartották a *300-31F* memória zónát olyan bővítőkártyák illesztésére, amelyek igen hatékony jelfeldolgozó számítógéppé tudják alakítani az előzőleg csak adatok feldolgozására használt gépet. Napjainkban egy egész külön iparág fejlődött ki a *desktop* számítógépekbe illeszthető interfészáramkörök és bővítőkártyák gyártására és fejlesztésére. Gyakorlatilag mindenféle, az alkalmazók bármely igényeit kiegészítő ilyen interfészeket gyárt sok igen jelentős cég szerte a világban. Az 1. ábrán egy éppen egy ilyen bővítőkártya látható. A DAS (Digital Analog System) megnevezés itt arra utal, hogy a rendszer képes mint analóg- mint digitális jelek generálására és beolvasására (ebben az esetben 2 analóg kimenet, 16 analóg bemenet, valamint 32 digitális ki/bemenet létezik). A DAS-1600 saját 10 MHz órajelével működik, és képes $10\mu s$ nagyságrendű mintavételezés megvalósítására (100000 analóg/digitális átalakítás/s) [2].



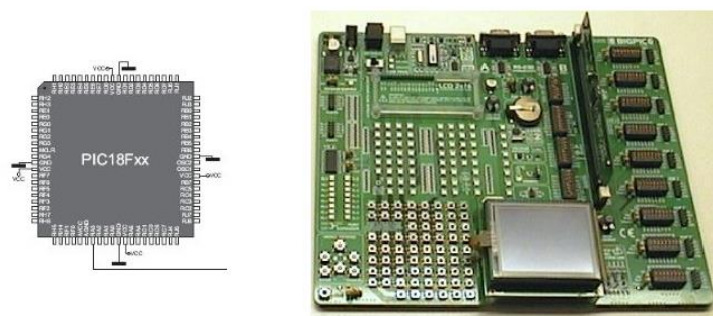
1. ábra. A DAS-1600 adatfeldolgozó kártya [2]

A kép jobb-alsó részén látható a sínrendszer mely a számítógép üres foglalatába lesz illesztve, valamint a *desktop* kimeneti csatlakozó kapuja. Egy ilyen interfész áramkör felhasználásával az eredeti számítógép egy igen korszerű és hatékony jelfeldolgozó számítógéppé válik. A kérdés most csak az, hogy mikor éri meg egy ilyen bonyolult digitális rendszert használni, például ipari folyamatok vezérlésére? A válasz abban rejlik, ha elemezve vannak egy ilyen megoldásnak az előnyei. Általában a desktop-bővítőkártya kombináció akkor igen hasznos, amikor bizonyos folyamatokat a számítógép nagyfelbontású képernyője segítségével kell követni vizuálisan. Ilyenkor nemcsak hogy hatékony, de igen bárátságos felhasználói *software* interfész megjelenítését is lehetővé teszi. Vagy, ha szükséges a számítógép billentyűzete a gyors és igen gyakori adatbevitelre és változtatásokra. De nagymennyiségű mért adatot lehet lementeni és tárolni a gép merevlemez adathordozóra (HDD – hard disk drive). A számítógépen futó *multitasking* operációs rendszer pedig igencsak hasznos lehet sok folyamatvezérlési alkalmazásban. Igaz, hogy egy ilyen megoldás nagyobb fizikai helyet igényel, és nagyobb elektromos teljesítményt is használ fel, de az általános felhasználású mikroprocesszorokon alapuló megoldásoknak igencsak megvannak a jellegzetes alkalmazási területei a korszerű vezérlő- és szabályozórendszerek kiépítésében.

3. Általános felhasználású mikrovezérlőkre épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

A jól ismert általános meghatározás szerint a mikrovezérlő tulajdonképpen egy kompakt számítógép egyetlen *chip*-ben (rendelkezik saját központi aritmetikai-logikai egységgel, belső memóriával, és ki/bemeneti kapukkal), melyet célzott (vagy specifikus) vezérlési- és szabályozási feladatokra használnak. Tehát az általános célú számítógépekkel ellentétben a mikrovezérlő (vagy mikrokontroller) úgy van megtervezve, hogy sajátos működésével konkrét feladatokra lehessen alkalmazni. Általában 8/16/32 bit konfigurációkban gyártják, és a különböző gyártók mikrovezérlői nagyrészt nem kompatibilisak egymással. Magát csak a *chip*-et egymagában nem lehetséges használni, tehát szükséges a mikrovezérlő körül egy olyan

fejlesztőrendszert megtervezni, mely lehetővé teszi az adatok minél egyszerűbb bevitelét, az eredmények kijelzését, vagy az adatok elmentését. A 2. ábra éppen ezt az alapvető követelményt igyekszik szemléltetni.



2. ábra. A PIC18Fxx mikrovezérlő *chip* és a köréje épített BigPIC6 fejlesztőrendszer [3]

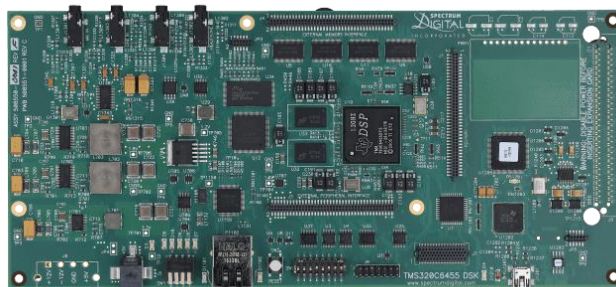
Az ábra bal oldalán egy PIC18Fxx-típusú mikrovezérlő *chip* látható, ami egymagában csak egy integrált áramkör, amely nincsen hozzacsatolva semmilyen más áramkörhöz. Ahhoz, hogy használható legyen valamilyen alkalmazás vezérlésére, köréje kell építeni egy fejlesztőrendszert. Egy ilyen rendszer lehet például a jobboldalon látható BigPIC6 korszerű rendszer, mely lehetővé teszi a PIC18Fxx *chip* használatát igen sokféle alkalmazásra, köztük ipari vezérlő- vagy szabályozó alkalmazásokra is. Ebben az esetben a *desktop* számítógépnél használt billentyűzet hiányozni fog, ennek szerepét itt az ábrán is látható nyomógombok veszik át. A nagyfelbontású képernyőt pedig a lapra beillesztett grafikus LCD kijelző fogja betölteni, vagy az áramkörbe beépített LED diódák. Tehát a *hardware* felépítés most teljesen más lesz mint az előző fejezetben tárgyalt esetben. Itt a *multitasking* fogalom nem értelmezett, hiszen a mikrovezérlő csak egyetlen futtatható programot képes végrehajtani egy adott időben, és nem létezik operációs rendszer sem.

Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy számos előnyeik miatt a mikrovezérlő-alapú vezérlő- és szabályozórendszerek rendkívül elterjedtek a legkülönbözőbb alkalmazásokban. Megtalálhatóak igen nagy számban a korszerű autóiparban, orvosi műszerekben, háztartási eszközökben, katonai alkalmazásokban, de a legváltozatosabb ipari célú felhasználásokban is. A leggyakrabban akkor használják őket, amikor kis fizikai hely áll rendelkezésre, vagy mobil eszközökben, célzott alkalmazásokra. Energia felhasználásuk kicsi, viszonylag olcsók, ár/érték arányuk nagy, és könnyen átalakíthatók a legváltozatosabb alkalmazásokra.

4. Digitális jelprocesszorokra épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

Közismert, hogy a digitális jelfeldolgozó processzor vagy jelprocesszor (DSP) egy olyan speciális mikroprocesszor, melynek hardware felépítése kimondottan a digitális jelfeldolgozás igényeinek és műveleti kritériumainak megfelelően lett kialakítva. A DSP legfontosabb feladata az, hogy beolvassa és a leghatékonyabban feldolgozza a különböző analóg fizikai jeleket. Ezeket a jeleket szükséges mérni, megszünti, vagy tömöríteni, ami sok ismétlődő matematikai művelet elvégzését feltételezi egymás után. Természetesen, más típusú processzorok is képesek hasonló műveletek elvégzésére, de a DSP úgy lett megtervezve, hogy mindezeket a lehető leggyorsabban és a legjobb energiahatékonysággal hajtsa végre.

A digitális jelprocesszorok esete is hasonlít a mikrovezérlőkéhez. Maga a DSP *chip* itt sem használható egymagában, szükséges egy ráépített fejlesztőrendszer megtervezése és használata a különböző vezérlési- és szabályozási folyamatokra. A 3. ábra egy ilyen, igen korszerű, DSP processzorra épített fejlesztőrendszert mutat be.

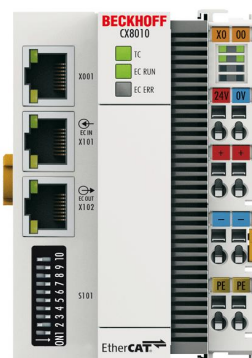


3. ábra. A TMS320C6455 jelprocesszorra épített fejlesztőrendszer [4]

A rendszer alapját a Texas Instruments cég által gyártott, 1.2 GHz órajel frekvenciával működő, 64 bites és fixpontos TMS320C6455 jelprocesszor képezi [4]. Körülötte igen hatékony interfészáramkörök vannak telepítve, melyek biztosítják a nagysebességű kommunikációt és ki/bemeneti adatátvitelt a legváltozatosabb alkalmazások esetében is, kezdve az igényes audio-video alkalmazásoktól egészen a bonyolult ipari folyamatvezérlésekig. A digitális vezérlő- és szabályozórendszer tervezőjének az ilyen típusú fejlesztőrendszerek használatánál két fontos alapvető kritériumot kell figyelembe vennie. Az egyik az, hogy digitális jelprocesszorra épült rendszert inkább akkor kell használni, ha az adott alkalmazás esetében sok matematikai műveletet kell elvégezni, és bonyolult matematikai algoritmusokat kell végrehajtani. A másik szempont pedig az, hogy a DSP processzor képességeinek teljes kihasználását nagyban segítik a már rendelkezésre álló jellegzetes *software* csomagok. Ilyen például a dSPACE fejlesztői programcsomag, amely egy igen felhasználóbarát grafikai interfész segítségével biztosítja a legbonyolultabb folyamatok követését, monitorizálását, vagy valós-idejű szabályozását [5]. Mindezt úgy, hogy nem igényel magasfokú programozói felkészülést és tervezést a felhasználó részéről.

5. Programozható logikai vezérlőkre épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

A programozható logikai vezérlő (PLC) egy ipari digitális számítógép, amelyet kimondottan a szerszámgépek és az automatizált gyártási folyamatok vezérlésére- és szabályozására tervezték, a korábbi relés automatizálások kiváltására. Minden PLC-nek van egy bemeneti csatlakozó sora, és egy kimeneti csatlakozó sora is. A bemeneteken jeleket fogad különböző szenzoroktól, nyomógomboktól, kapcsolóktól, vagy más érzékelőktől. A központi aritmetikai-logikai egysége elemzi ezeket az információkat, és egy tárolt program logikai szabályai alapján döntéseket hoz, utasításokat generálva a kimeneti soron. Ezek lehetnek motorvezérlő utasítások, jelek különböző szelepeknek, világítóknak, mágneskapcsolóknak, hidraulikus szelepeknek, vagy tengelykapcsolóknak. Könnyen programozhatóak (például létradiagram segítségével, vagy a korszerűbbek *C* nyelven is), és végrehajthatnak számláló/időzítő feladatokat, feltételes- vagy feltétel nélküli ugrásokat, aritmetikai műveleteket, vagy más logikai operációkat. Egy ilyen korszerű PLC felépítése a 4. ábrán van bemutatva.



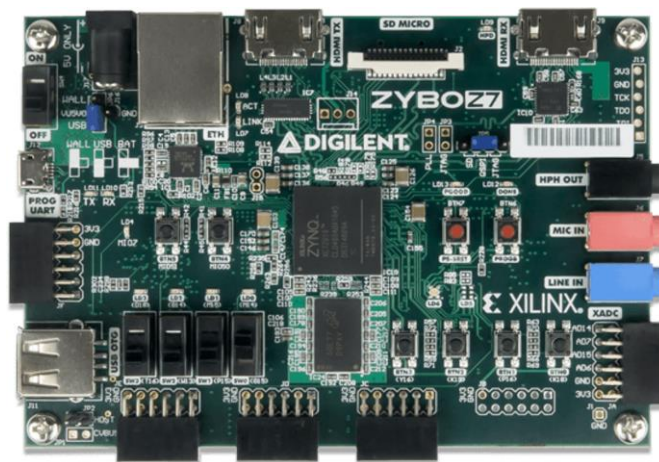
4. ábra. A Beckhoff CX8010 beágyazott Arm9™ PLC rendszere [6]

A képen látható Beckhoff cég által gyártott CX8010 sorozatú PLC rendszer már magába foglal egy 400 MHz frekvencián működő Arm9™ típusú processzort, 64 MB DDR2 RAM memóriát, és egy 1MB microSD kártyát is. Az ilyen típusú változatok már ipari számítógépek néven vannak emlegetve és *C* nyelven igen kényelmesen programozhatóak [6].

Egy digitális rendszer tervezőjének azt kell tudnia, hogy a PLC-ken alapuló vezérlő megoldásokat kimondottan ipari alkalmazásokra tervezték (gyártóipar, folyamatvezérlés), de igen gyakran használják az épületautomatizálásban, különböző biztonsági rendszerekben, vízkezelési folyamatokban, de a robotok vezérlésére is. Robusztos és zárt mechanikai felepítésük rendkívülien alkalmassá teszi őket a szélsőséges ipari környezetekben (vegyileg szennyezett, poros, magas nedvességű, vagy elektromos zajok jelenléte), nem érzékenyek a hőmérséklet nagy ingadozásaira, saját szellőzéssel/hűtéssel rendelkezhetnek, a korszerű PLC-k be- és kimenetei pedig túlterhelésvédelemmel vannak ellátva, relés vagy optoelektronikus galvanikus leválasztást használva. A rájuk feltöltött programokat pedig PC-re telepített fejlesztőkörnyezetben tervezik.

6. FPGA-alapú processzorra épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

Az eddig tárgyalt mikroprocesszorok fő jellemzője az volt, hogy *hardware* architektúrájuk merev, vagyis a legyártásuk után nem lehet változtatni rajta. Az FPGA viszont egy olyan integrált áramkör, amelynek belső fizikai felépítése tetszőlegesen változtatható, a felhasználó igényeinek megfelelően. Ezt nevezik a *rekonfigurálható hardware* technológiának. Az FPGA áramkörök másik igen nagy előnye a programok párhuzamos-disztributív végrehajtása, ami azt jelenti, hogy a különböző programok ugyanazon a *chip*-en belül, de fizikailag külön részekben futnak, ami rendkívülien nagy végrehajtási sebességet eredményez. Az FPGA körül ebben az esetben is szükséges a megfelelő fejlesztőrendszer megtervezése és felépítése, mint ahogyan ez a 5-ös ábrán is látható.



5. ábra. A ZyboZ7-10 FPGA-alapú fejlesztőrendszer [7]

A képen egy ZyboZ7-10 kártya van bemutatva, amely az AMD Zynq™-7000 központi egységre van építve. Ez magába foglal egy kétmagos ARM Cortex-A9 processzort, valamint egy AMD-7-típusú FPGA áramkört. A tervezőknek FPGA-alapú vezérlő- és szabályozó rendszereket a nagy feldolgozási sebességeket igénylő alkalmazásokban ajánlott használni, a programok párhuzamos-disztributív végrehajtásával. Ha pedig a különböző gyártási folyamatok során gyakran van szükség a *hardware* változtatására, akkor a *rekonfigurálható hardware* technológiát jelentő FPGA-alapú digitális rendszerek ideális megoldást kínálnak igen sok gyakorlati alkalmazásban.

7. ASIC processzorra épülő vezérlő- és szabályozórendszerek

Az ASIC egy olyan áramkör amelyet egyetlen specifikus feladat végrehajtására terveztek. Mivel ezeket célzott alkalmazásokban használják, sokkal hatékonyabbak mint más típusú processzorok lennének ugyanabban a feladatban. A kötött tervezés miatt funkciójuk nem változtatható meg, nem újraprogramozhatóak. Az ASIC-típusú processzorokra épített vezérlő- és szabályozórendszerek igen költségesek, ezért csak tömeges alkalmazásuk esetén lesznek igazán hatékonyak és versenyképesek más hasonló digitális rendszerekkel. Az is előnyük, hogy energia fogyasztásuk alacsonyabb, és kisebb fizikai helyet tudnak elfoglalni. Főbb alkalmazási területük: audio-video eszközök (okos TV, digitális kamera), távközlés, orvostudományi eszközök, katonai alkalmazások, autópár, stb.

ÖSSZEFOGLALÓ

Az előbbi rövid elemzésekből kiderül, hogy mindegyik típusú mikroprocesszorra épülő vezérlő- és szabályozórendszernek igencsak megvan a pontos és legalkalmasabb felhasználási célterülete. A tervező szakmai tudásán és gyakorlati tapasztalatán múlik, hogy helyes döntést tud-e meghozni amikor a kiválasztást megteszi. Fontos, hogy a legmegfelelőbb digitális rendszer legyen használva az adott alkalmazásra, figyelembe véve a hatékonyság és az ár/érték kritériumokat is. Az elemzés az előbbiekre próbál rávilágítani, alap kritériumokat sorol fel és tárgyal, a legmegfelelőbb vezérlő- és szabályozórendszer kiválasztására.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] Z. Zeng, J. Liu and Y. Yuan, "A Generalized Nyquist-Shannon Sampling Theorem Using the Koopman Operator," in *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 72, pp. 3595-3610, 2024.
- [2] <https://br.omega.com/omegaFiles/das/pdf/CIO-DAS1600.pdf>
- [3] <https://www.romanblack.com/bigpic6.htm>
- [4] <https://www.ti.com/tool/TMDSDSK6455>
- [5] https://www.dspace.com/en/pub/home/medien/product_info/automation.cfm
- [6] <https://www.beckhoff.com/en-en/products/ipc/embedded-pcs/cx8000-arm9/cx8010.html>
- [7] <https://digilent.com/shop/zybo-z7-zynq-7000-arm-fpga-soc-development-board/>