

## Digitális rendszerek gyakorlat, amikor minden kötél szakad...

### On-Line laboratory for digital system education in pandemia

dr. VÁSÁRHELYI József

egyetemi docens, szenior IEEE tag  
Miskolci Egyetem, Automatizálási és Infokommunikációs Intézet,  
3530 Miskolc Egyetemváros  
vajo@uni-miskolc.hu

#### Abstract

*The article presents a possible solution in an emergency situation to teach on-line laboratory for the electrical engineering students. Using the instruments of the digital systems laboratory was possible for the students to perform the required measurements and meet the subject requirements.*

#### Kivonat

*A z alábbi cikk bemutat egy lehetséges megoldást arra, hogy vészhelyzet esetében hogyan lehet on-line gyakorlati oktatást folytatni. A digitális rendszerek laboratórium műszereit felhasználva lehetővé tettük a hallgatóknak, hogy a laboratóriumi számítógépeken keresztül elvégezhessék az adott méréseket és teljesítsék a tantárgy követelményeit.*

**Kulcsszavak:** digitális rendszerek oktatása, digitális áramköri technológiák, internetre csatlakoztatott eszközök, mérőműszerek

#### 1. Bevezetés

Jack Swigert (Apollo 13) űrhajós által mondott és James A. Lovell (Apollo 13) űrhajós által megismételt mondat: "Houston, we've had a problem here" (szabad fordításban: Houston van itt egy kis gondunk!), immár szállóigévé vált. Amikor márciusban nyilvánvalóvá vált, hogy a járvány miatt minden megváltozik, az oktatás átalakul és csak távoktatás lesz majd a második félévben, az űrhajósokhoz hasonlóan mi is felkiáltottunk: „Van egy kis gond!” Mi legyen a gyakorlatokkal?

Pillanatokon belül lezajlott egy ipari forradalom és minden az interneten keresztül zajlott. Nem akartuk, ma sem akarjuk. Véleményünk szerint a villamosmérnöki alapszintű oktatás (BSc) gyakorlat-orientált kell legyen, most is és a jövőben is. Ez pedig gyakorlatok, elvégzett gyakorlatok nélkül nem megy.

A Miskolci Egyetemen a Digitális Rendszerek tárgy 3 féléven keresztül oktatott tárgy, ahol a tárgy tematikáját is ennek megfelelően alakítottuk ki. A villamosmérnök hallgatók oktatásában a Digitális Rendszerek kötelező tárgy, és mint ilyen egyik „főtantárgynak” minősül. A tantárgy féléves tematikájában a laboratóriumi gyakorlatok a féléves követelményrendszerében és így a tantárgy minősítésében 40%-os súlyozással szerepelnek. Minden félév gyakorlatai feloszthatók tervezési és gyakorlati mérésekre.

A tervezési példák esetében a hallgatónak egy tervezési feladatot (kombinációs hálózat, sorrendi hálózat, funkcionális egység) kell megoldania, amelynek működését a gyakorlatban is ellenőrizheti. A tervezés során a megvalósítást Xilinx ISE 14.7 FPGA fejlesztő rendszeren kell megvalósítani. A feladat három elemet tartalmaz: kapcsolási rajz szerkesztés, Verilog hardver leíró nyelven megvalósított elem, vagy vegyes megoldást alkalmazva – mindez a feladatleírástól függően.

A mérési gyakorlatok három területet céloznak meg: Logikai kapukkal megvalósított huzalozás. Logikai kapuk és flip-flopok tanulmányozása – I. félév. Egyszerű logikai hálózat megvalósítása PAL emulátor segítségével (MIXI oktató bőrdísz 21-es mérés). Áramköri technológiák megismerése és az

áramköri jellemzők mérése (jellemzően CMOS logikai kapuk és TTL inverter). Funkcionális egységek megismerése, jellemzőiknek mérése (aszinkron számláló, multiplexer, demultiplexer, aritmetikai logikai egység) – II. félév. III: félév: időzítő áramkörök, gyűrűs oszcillátor mérése, ARM mikrovezérlős kártya átmenő furatos alkatrészeinek beültetése és üzembe helyezése (forrasztási gyakorlat és komplex mérések).

Jelen írás célja bemutatni a megoldásokat, amelyeket választottunk, annak érdekében, hogy a hallgatók tudják teljesíteni a tárgy követelményeit, valósítsák meg a méréseket (részben vagy teljes egészében) és lehetőleg ne virtuális térben történjenek a mérések, hanem azok legyenek valós áramköri mérések vagy megvalósítások. Jelen cikkben a II. féléves tapasztalatokat írjuk le – azaz, hogyan találtunk megoldást szinte pillanatok alatt az „on-line” mérések elvégzésére. Természetesen ehhez, az kellett, hogy már előzőleg olyan mérőműszereket (multiméter, frekvencia generátor, oszcilloszkóp) használjunk, amelyek vagy GPIB, vagy USB vagy Ethernet interfészen keresztül csatlakoztatható egy laboratóriumi számítógéphez. Biztosítanunk kellett a számítógép és a műszerek internet elleni védelmét is. A továbbiakban bemutatjuk a mérések elméleti hátterét és a mérési eredményeket is részletezzük.

## 2. Elméleti háttér

### 2.1. Áramköri tervezés és szimuláció

A hallgatók az első félév során megismerik a kapcsolási rajz szerkesztést az ISE rendszerben. Mondhatná valaki, hogy használhatnánk a legújabb Xilinx szoftvereket is Vivado és Vitis. Azért döntöttünk még mindig az ISE használata mellett, mert a szoftvernek nincs olyan nagy számítógépes hardver igénye mint az újabb verzióknak. Viszonylag gyorsan végzi a szintézist, huzalozást, bit térkép előállítását. Ezt a hallgatók az otthoni számítógépre is telepítették. Mivel online oktatás zajlott ezért biztosítottunk egy laboratóriumi számítógépet, amihez csatlakoztattunk egy Nexsys 2 kártyát, amelyen a hallgatók ellenőrizhettek az otthon elvégzett feladatot. A bejelentkezés távoli asztali gép elérésével volt lehetséges.

A tervezési feladatnál inkább a szimuláció elvégzésére helyeztük a hangsúlyt, ami otthoni gépen is elvégezhető. A módszer az eredményezte, hogy minden a tárgyat felvett hallgató megtanulta a digitális áramkörök szimulációját. Előzőleg ehhez nem ragaszkodtunk, hiszen tapasztalataink szerint már egy Verilog feladat megoldása és kapcsolási rajzba illesztése is – alapismeretek nélkül – komoly feladat elé állította a hallgatókat. Az így megszerzett hallgatói kompetenciát már az elektronikus vizsgákon keresztül tudtuk ellenőrizni. Ilyen módon a tervezési feladatok megvalósítása (programozható logikai áramkörök felhasználásával) nem jelenthetett különösebb problémát a távoktatás bevezetésével, mivel a hallgatók otthon saját számítógépeinken használhatták a szoftvert majd a távoli gépen letölthették és ellenőrizhettek a megoldást.

### 2.2. Egyszerű tervezési feladatok és PAL

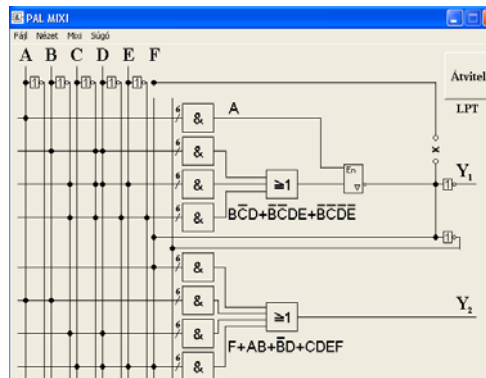
A II. félév egyik „fejtörője” a PAL (Programmable Array Logic) emulátor áramkörtön megvalósított egyszerű feladatok. Ehhez a Mixi 21 oktató bördöt használtuk a laboratóriumban, viszont a mérés internetre csatlakoztatását még a cikk írásának pillanatában sem oldottuk meg (Van megoldásunk, de más fontosabb mérési gyakorlatokat szeretnénk az interneten keresztül elérhetővé tenni). A probléma ezzel a méréssel az, hogy a szoftver egy adott számítógépen fut és a licenc nem hordozható. Ezért a PAL emulátort, amelyet tulajdonképpen egy Xilinx FPGA áramkör valósít meg, átvittük kapcsolási rajz formájában az Xilinx ISE rendszerbe.

A PAL emulátor elemei az első ábrán láthatók. Mivel a PAL áramkör a logikai feladatokat a teljes konjunktív normál alak felhasználásával valósítja meg, amelynek általános egyenlete:

$$F(x_0, x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=0}^{2^n-1} f_i * m_i \quad (1)$$

ahol F a logikai függvény,  $x_0, x_1, \dots, x_n$ , a logikai változók,  $f_i$  karakterisztikus együttható (0 vagy 1) és  $m_i$  a minterm.

Az 1. ábra látható „mixi kép” az (1) egyenlet alapján megvalósítja az ÉS kapcsolatokat VAGY kapcsolatát, lehetőség van a kimenetek visszacsatolására és nagy impedanciás kapu használatára is (Az ábrán egy lehetséges példa!).



1. ábra. A PAL áramkör kapcsolási rajza

A Mixi 21 mérés elemeit megvalósítottuk ISE kapcsolási rajz alkatrészként (ÉS kapcsolatok, VAGY kapcsolatok, kimeneti függvények). A mérések egy részét szimulációval vizsgálták a hallgatók.

A digitális áramkörök bemenetén megjelenő jelváltozások bizonyos időkésséssel változtatják meg a kimenetek logikai értékét. Ezzel a jelkésleltetéssel jellemezhetjük az áramkörök működési sebességét.

**Meghatározás:** Lefutási késésnek  $t_{pHL}$  ( $t_{pd0}$ ) nevezzük a kimenet logikai '1'-ről logikai '0'-ra változásának késési idejét. Felfutási késésnek  $t_{pLH}$  ( $t_{pd1}$ ) nevezzük a kimenet logikai '0'-ról logikai '1'-re változásának késési idejét. A terjedési idő ( $t_d$ ) az áramkör kimenet változásának késése a változást előidéző bemeneti jelváltozáshoz képest. A terjedési idő a két késési idő átlaga:

$$t_{pd} = \frac{t_{pLH} + t_{pHL}}{2}; \quad (2)$$

A terjedési időt a  $U_k$  komparálási feszültség szint elérésénél mérjük (meghatározását lásd lentebb). A gyakorlat során a hallgatók megméri a fenti áramköri jellemzőket.

### 2.3 Transzfer karakterisztika és disszipált teljesítmény [3]

A logikai áramkörök esetében transzfer karakterisztikán a feszültség-transzfer karakterisztikát értjük, azaz a grafikonon a kimenő feszültség változását ( $U_{KI}$ ), a bemenő feszültség ( $U_{BE}$ ) változásának függvényében ábrázoljuk.

$$U_{KI} = F(U_{BE}); \quad (3)$$

A karakterisztika megmutatja az áramkör viselkedését, amikor a bemenő feszültség eltér a névleges logikai szintektől. Ezt az eltérést okozhatják például zavarjelek.

**Meghatározás:** A transzfer karakterisztikának azt a pontját, amelynél a kimenő feszültség megegyezik a bemenő feszültséggel, komparálási szintnek nevezzük, és az ehhez a ponthoz tartozó feszültséget pedig komparálási feszültségnek ( $U_K$ ). TTL áramkörök esetében az  $U_K = 1,4$  V.

A kapuáramkörök a komparálási szintnél kisebb bemeneti feszültséget L szintnek, ennél nagyobb feszültség szintet, pedig H értéknek érzékelik. Ezért az áramkörök helyes működése csak akkor garantált, ha a bemenő vezérlő jelek az előírt feszültség tartományban vannak.

A komparálási szint meghatározás: a statikus méréssel nem lehetséges, mert a bemenő feszültség csak nagyon rövid ideig tartózkodik az  $U_K$  feszültség közelében. Az  $U_K$  feszültség közelében jelentősen megnő az áramkörök áramfelvétele, ami a kapuk felmelegedését eredményezi.

**Disszipált teljesítmény:** Az áramkörök teljesítményfelvételének csökkentése növeli az áramkörök megbízhatóságát. A disszipált teljesítmény csökkentése eredményezte a CMOS technológia kifejlesztését. A CMOS áramkörök villamos teljesítményfelvétele alacsony. Annak ellenére, hogy a CMOS

áramkörök villamos áram fogyasztása jóval alacsonyabb (alacsony frekvenciákon), mint a TTL áramköröké mégis meg kell tudni mérni vagy kiszámítani az egyes eszközök teljesítményfelvételét.

Ismernünk kell, hogyan számítsuk ki egy eszköz teljesítmény igényét. Fontos azt is megértenünk, hogy milyen tényezők befolyásolják a teljesítmény felvételt? (lásd bemeneti feszültség szintje, a jel fel-futási ideje, az áramkör terhelése a kimeneten, parazita kapacitás, stb.) A nagyfrekvencián működő digitális rendszerek teljesítmény felvételének csökkentése elsődleges feladat. A rendszer villamos teljesítmény igénye befolyásolja a rendszer fizikai méreteit, hűtést (ventilátor) és áramkörök kiválasztását, a működési frekvenciát. A CMOS áramkörök teljesítmény igényének két összetevője van: a statikus és a dinamikus teljesítmény.

**Statikus teljesítmény:** A legtöbb CMOS adatlap meghatároz egy  $I_{CC}$  maximális áramot (10  $\mu\text{A}$  – 40  $\mu\text{A}$ ), amelynek összetevője a szivárgási áram is. A gyakorlaton eltekintünk az egyéb statikus áram komponensektől (pl. küszöbalatti áram). Ily módon a CMOS áramkörök statikus teljesítménye meghatározható a szivárgási áram és a tápfeszültség szorzataként (lásd 4. egyenlet)

$$P_s = I_{CC} * V_{CC}, \quad (4)$$

ahol  $I_{CC}$  az áramkör által felvet összes áram és  $V_{CC}$  a tápfeszültség.

Ez a teljesítményfelvétel akkor mérhető, amikor az integrált áramkör összes bemenete egy adott logikai szinttel vezérelt és nincs állapotváltozás. Ilyen körülmények között ha az IC minden kapuját egyszerre vezéreljük, akkor a disszipált teljesítmény a két logikai szinten mért statikus teljesítmény összegének átlaga:

$$P_s = \frac{I_{CCH} + I_{CCL}}{2} * V_{CC}, \quad (5)$$

A szivárgási (és küszöbalatti) áramokból adódó órajel - ciklusonkénti statikus teljesítményfelvétele arányos az órajel ciklus hosszával, így nagyon alacsony működési frekvencia esetén ez a veszteség meghatározó lehet.

**A dinamikus teljesítmény:** Amikor a CMOS áramköröket nagy frekvencián működtetjük, a tranzisztorok kapcsolásából adódó dinamikus teljesítményfelvétel meghatározza a teljes teljesítmény igényt. A kapcsoló üzemmódban működő tranzisztorok teljesítmény felvétele a kapcsoló áramcsúcsok és a tápfeszültségtől a föld felé folyó áramok eredménye (a p és n csatornás tranzisztor egyszerre nyitott). A működési frekvencia amellyel kapcsoljuk a tranzisztorokat, a bemeneti jel felfutási és lefutási ideje (rise time, fall time) hatással van a kapcsoló áram csúcsokra. Nagyon gyors állapot átmenetek esetén a tápfeszültségtől felvett áram elhanyagolható a kapcsolási áramhoz képest. Ezért a dinamikus tápáram felvétel az integrált áramkörök belső kapacitásának és a terhelő kapacitásfeltöltődésének és kisülésének függvénye. A dinamikus teljesítményt tovább növeli a kimeneti terhelő kapacitás feltöltődése és kisülése. A dinamikus teljesítmény fogyasztása a terhelő kapacitás által fogyasztott teljesítmény ( $P_D$ ) és a tranziens teljesítmény összege ( $P_T$ ). A tranziens kapcsoló áramok következtében disszipálódó teljesítmény kiszámítható következő képlettel:

$$P_T = C_{PD} * V_{CC}^2 * f_I * N_{SW}, \quad (6)$$

ahol  $P_T$  a tranziens teljesítmény;  $C_{PD}$  dinamikus teljesítményt disszipáló kapacitás,  $V_{CC}$  tápfeszültség,  $f_I$  a bemeneti jel frekvenciája,  $N_{SW}$  az egyszerre kapcsoló bitek (esetünkben logikai kapuk) száma. A  $C_{PD}$  dinamikus disszipált kapacitás értékét az áramkörök adatlapja tartalmazza.

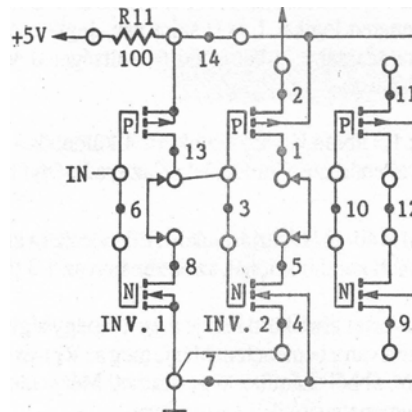
A gyakorlati mérés a CMOS inverter paramétereinek mérését célozta meg. A CMOS inverter két MOS tranzisztorból épül fel (PMOS és NMOS). A gyakorlaton a hallgatók, az inverter működését, transzferkarakterisztikáját, terhelhetőségét, disszipált teljesítményét a frekvencia függvényében és az áramkörök késleltetési idejét is mérik.

### 3. Mérések

A mérések során a Keysight (korábban Agilent, még korábban HP) műszereit használtuk. A műszerek a következők: Jelgenerátor – 33220A, digitális multiméter – 34410A, oszcilloszkópok: MSO7014A, MSO7014B. Az eszközöket a BenchVue szoftver kezeli.

A gyakorlati mérés megvalósításához a következő alapkapsolást használtuk -- az EB220 [1], EB134 [2] mérőpanelen található -- és a lehetséges összes pontot multiméteren mértük, illetve a jelalapot, és a jelek egymáshoz mért késését oszcilloszkóp segítségével mértük.

A 2. ábra az alapkapsolást mutatja. Amint az ábrán látható a P és N MOS tranzisztorok segítségével 3 CMOS inverter alakítható ki. A távmérés során a három invertert sorba kapcsoltuk és az utolsó kimenetre pedig egy HCT típusú terhelést kapcsoltunk. Az R11-es ellenállásra eső feszültség segítségével mérhető az inv1 által felvett áramerősség ( $I = U/R$ ), ennek segítségével számítható a felvett teljesítmény (0 és 1 állapotban.)

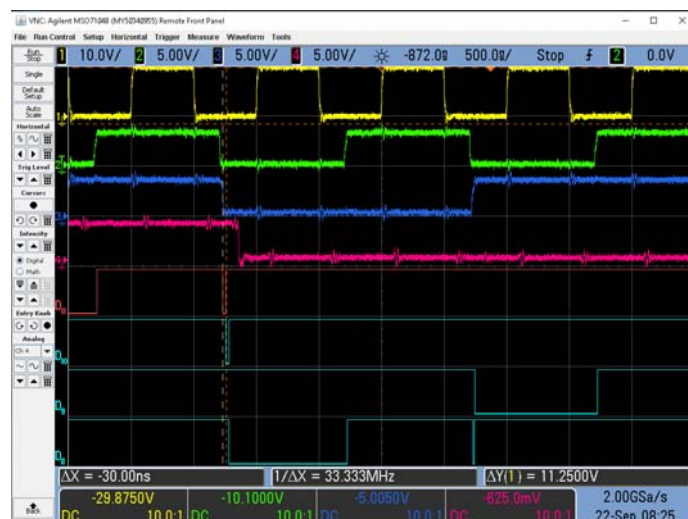


2. ábra. CMOS áramkör mérőkapcsolás

A multimétereket a 2. ábra szerinti bemenetre, a 13-as pontra és az R11-es ellenállás csatlakozására csatoltuk. A függvénygenerátort pedig az áramkör bemenetére csatoltuk (IN). A 3. ábra 1. számú multimétere (DMM//34410A//USBInstrument3) R11-es ellenállásra eső pillanatnyi feszültséget mutatja (fordított polaritással).



3. ábra. CMOS áramkör mérőkapcsolás



4. ábra. Demultiplexer kimenetén megjelenő hazard ábrázolása

A 2. multiméter (DMM//34410A//192.168.201.112) -- 3. ábra -- a bemeneti feszültség változását, míg a 4. ablakban 3. multiméter (DMM//34410A//192.168.201.117) a kimeneti feszültségalakot ábrázolja. a 3. számú ablak pedig a bemenetre csatlakoztatott függvénygenerátor ablaka, amelynek segítségével a függvénygenerátort táv vezéreljük. Ilyen ódon mérhetjük a transzfer karakterisztikát, a késleltetéseket (oszilloszkóp), disszipált teljesítmény (vizsgálható még a  $P_d$  frekvencia függése is.)

A 4. ábra pedig a funkcionális áramköri mérés egy részletét mutatja be az oszcillogramon. Jól látható, hogy az aszinkron számláló által vezérelt demultiplexer kimenetén hazardok jelennek meg, ha növeljük a vezérlő órajel frekvenciáját.

#### 4. Összegezés

Röviden összefoglaljuk az eredményeket: Nagyon rövid idő alatt sikerült átállnunk az interneten végzett gyakorlati mérésekre. Úgy az áramköri technológiák, mint a funkcionális áramkörök vizsgálata esetében.

További fejlesztéseken is dolgozunk. Lehetővé tesszük az első éves hallgatók számára, hogy ne csak papíron tervezzék meg beadandó feladataikat, hanem az internetre csatlakoztatott oktatókártyák segítségével, táv vezérlést használva, ki is próbálják a megtervezett feladatot.

#### Köszönetnyilvánítás

"A cikkben/előadásban/tanulmányban ismertetett kutató munka az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg"

#### Irodalmi hivatkozások

- [1] Bartók Roland: EB220 mérés leírás és jegyzőkönyv minta, [http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/\\_fzXQON\\_\\_djHBIH.docx](http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/_fzXQON__djHBIH.docx)
- [2] Koba Máté: EB134 mérés leírás, [http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/\\_fvMMZV\\_\\_buOWOY.pdf](http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/_fvMMZV__buOWOY.pdf)
- [3] Vásárhelyi József: Gyűrűs oszcillátor, [http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/\\_gsVTPX\\_\\_efKKfoH.pdf](http://mazsola.iit.uni-miskolc.hu/DATA/storages/files/_gsVTPX__efKKfoH.pdf)