

9. mérés

Logikai áramkörök vizsgálata

(átdolgozta: Krébesz Tamás, BME-MIT, 2024.09.09.)

Bevezetés

Logikai alapfüggvényeket számos különböző módon lehet megvalósítani. A digitális technika kezdeti korszakában relés és elektroncsöves megoldásokat használtak. Ezt követték a diszkrét tranzisztorokból, diódákból, ellenállásokból és kondenzátorokból felépített kapcsolások. Az első félvezető alapú, digitális áramkört 1958-ban készítették el. Napjainkban szinte kizárólag csak az integrált áramköri megoldások használatosak.

Az integrált áramkör formájában megvalósított logikai áramköröknek szintén számos formája van, melyek a technológia, kapcsolástechnika vonatkozásában eltérnek egymástól. Az azonos technológiával, kapcsolástechnikával megvalósított logikai elemek csoportjait logikai elemcsaládoknak nevezzük. Az egyes elemcsaládok eltérő célokhoz optimalizáltak. Ahhoz, hogy megfelelően tudjuk őket kiválasztani és alkalmazni, ismernünk kell a tulajdonságaikat.

A laborgyakorlatnak egyik célja az, hogy megismertesse a TTL (Transistor-Transistor Logic) és CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) elemcsaládok alaptulajdonságait. Bár a hagyományos TTL áramkörök ma már egyre kevésbé használatosak, azonban ezeknél az IC-knél megtanult fogalmak - mint például transzfer karakterisztika vagy felfutási idő és ezeknek a környezeti paraméterektől való függése - ugyanúgy megjelennek más eszközöknél, mint például egy FPGA vagy egy mikrokontroller esetében.

A laborgyakorlat másik célja, hogy bemutassa az elemek nemideális tulajdonságait és néhány tervezést nehezítő áramköri jelenséget. A logikai függvények megvalósítása során nehézséget okozhat az a tény, hogy a logikai függvényeket előállító elemek nem ideálisak. Ilyen nehézség lehet például nem várt jelszintek megjelenése az eszköz kimenetén vagy az eszköz nem várt állapotba kerülése. Más esetben pont a nem ideális tulajdonságot használjuk ki. Ilyen eset például a rövid idejű impulzus előállítása vagy analóg erősítő készítése CMOS IC-ből.

A mérés célja

- Logikai áramkör családok alaptulajdonságainak megismerése inverter IC-k vizsgálata alapján:
 - statikus IC tulajdonságok (transzfer karakterisztika, terhelhetőség...),
 - dinamikus IC tulajdonságok (késleltetés, felfutási idő...),
 - az eredmények összehasonlítása katalógus adatokkal.
- Flip-flop IC-k tulajdonságainak vizsgálata (igazságtábla, propagation delay...).

A mérés elméleti alapjai

Alapfogalmak

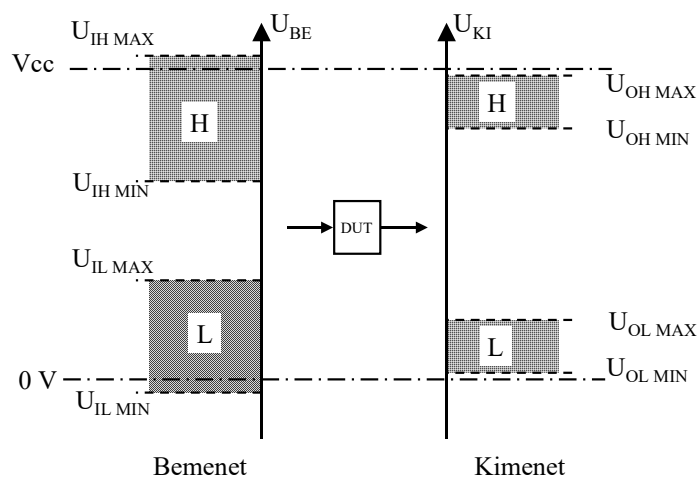
Egy digitális építőelemnek a felhasználó számára szükséges specifikációja tartalmaz

- működési jellemzőket (statikus elektromos jellemzők, időzítések, worst case értékek...),
- határadatokat (melyek túllépése az eszköz működését veszélyezteti),
- konstrukciós adatokat (tokméret, lábkiosztás).

Ahhoz, hogy megbízható működésű eszközöket tudjunk készíteni, ismernünk kell ezeknek az adatoknak az értékét és a pontos jelentését. A következőkben röviden áttekintjük a legfontosabb működési jellemzők értelmezését.

Logikai szintek

Az elektronikus digitális áramkörök bemenetén és kimenetén egy logikai változó 0 vagy 1 értékét egy-egy feszültségszint, az ún. logikai szint reprezentálja. Ez nem egy pontos feszültségérték, hanem egy feszültségtartomány, mivel a digitális áramkörök paramétereinek szórása van. A feszültségtartományokat az eszközök ki- és bemenetére külön definiálják (9-1. ábra). Ahhoz, hogy az eszközök megfelelően tudjanak működni zavaró jelek esetén is, a bemeneti feszültségtartományok tágabbak. Adatlapokon általában csak az U_{Hmin} és U_{Lmax} értékeket adják meg, mivel a gyakorlatban ezek határozzák meg a worst case eseteket. Példaként hagyományos TTL IC-k bemenetére $U_{Hmin} = 2.0 \text{ V}$, $U_{Lmax} = 0.8 \text{ V}$, a kimeneteknél $U_{Hmin} = 2.4 \text{ V}$, $U_{Lmax} = 0.4 \text{ V}$; 5 V-os CMOS IC-knél bemenetre $U_{Hmin} = 3.85 \text{ V}$, $U_{Lmax} = 1.35 \text{ V}$, kimenetre $U_{Hmin} = 4.9 \text{ V}$, $U_{Lmax} = 0.1 \text{ V}$.



9-1. ábra: Logikai feszültségszintek.

Transzfer karakterisztika

Transzfer karakterisztikának nevezzük a vizsgált eszköz kimeneti feszültségének függését a bemeneti feszültségtől. Ha több bemenete is van az eszköznek, minden bemenetre meg lehet adni a transzfer karakterisztikát a többi bemenetre adott jelszint valamilyen értéken történő rögzítése mellett.

Lefutási, felfutási és késleltetési idők

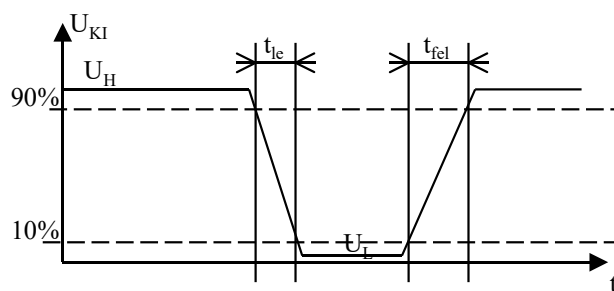
Felfutási idő: amíg egy áramkör kimenetén jelváltáskor a kimeneti feszültség a felfutó jel amplitúdójának 10%-áról 90%-ra növekszik (9–2. ábra).

Lefutási idő: amíg egy áramkör kimenetén jelváltáskor a kimeneti feszültség a lefutó jel amplitúdójának 90%-áról 10%-ára csökken (9–2. ábra).

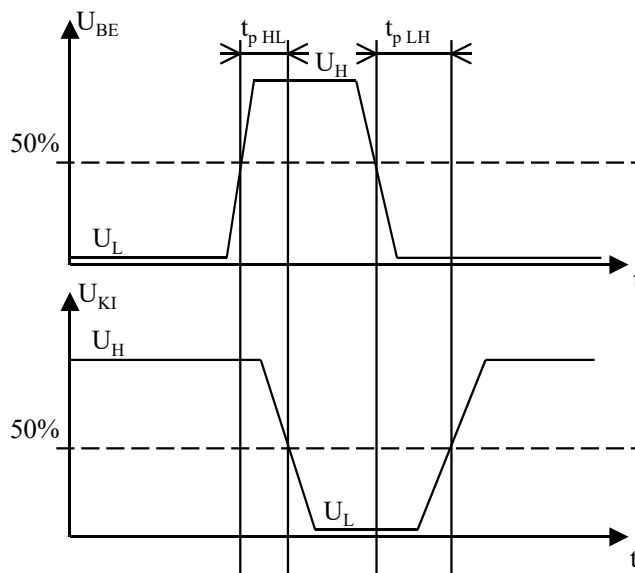
Késleltetési idő: a bemenő jel megváltozása és a kimenő jel megváltozása között eltelt idő (9–3. ábra). A késleltetési időt a között a két pont között mérjük, ahol a bemenő jel és a kimenő jel eléri az U_K komparálási feszültséget (komparálási szintet). Ezt SN74, SN74S, SN74F áramköröknél szabványosan 1.5 V-nak veszik, SN74LS, SN74AS, SN74ALS áramköröknél 1.3 V-nak.

CMOS áramkörök komparálási szintje elég nagy szórású, ezért ott gyakran az U_{Hmin} és U_{Lmax} értékeknél mérik a késleltetést majd a rosszabbik értéket választják.

Gyakran a komparálási feszültségnek egyszerűen a tápfeszültség felét választják.



9–2. ábra: A fel- és lefutási idő értelmezése



9–3. ábra: A késleltetési idő értelmezése

Fan out

Egy digitális eszköz kimenetére nem kapcsolható tetszőleges számú további digitális áramkör, mivel ezek bemenete terhelést jelent, és a kimenet terhelhetősége véges. A kimenet terhelhetősége az a legnagyobb áram, amelynél a kimeneti feszültségszintre vonatkozó előírások még teljesülnek.

Egy adott áramkör család esetén a kimenetre kapcsolt egyetlen bemenet által okozott terhelést egységterhelésnek nevezik (egy kapu terhelése). Gyakran a terhelhetőséget az egységterhelés számban, azaz a fan-out -ban adják meg, ami meghatározza, hogy hány darab kapu bemenet kapcsolható egy kimenetre.

Setup time, hold-time, propagation delay

A *setup time*, *hold-time*, *propagation delay* fogalmak a flip-flop-okra vonatkoznak.

Előkészítési idő – *Setup time*: az az idő, amennyivel a mintavételezést jelentő órajel-változás előtt már stabilnak kell lennie a flip-flop bemeneti jelének.

Tartási idő – *Hold time*: az az idő, amennyivel a mintavételezést jelentő órajel-változás után még stabilnak kell lennie a flip-flop bemeneti jelének.

Jelterjedési idő – *Propagation delay*: ennyi idő szükséges ahhoz, hogy a mintavételezést jelentő órajel-váltás után megjelenjen a kimeneten a flip-flop új értéke.

Hőmérséklet

A logikai áramkörök paraméterei hőmérsékletfüggők. TTL áramkörök esetén az IC-t felépítő tranzisztorok bázis-emitter nyitófeszültségének hőmérsékletfüggése miatt a kimeneti magas (high) szint és a komparálási feszültség egyaránt hőmérsékletfüggő. A kimeneti magas szint hőmérsékletfüggése kb. $+4 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$, a komparálási feszültségé pedig kb. $-4 \text{ mV/}^{\circ}\text{C}$. A jelterjedési idő hőmérsékletfüggése nem jelentős, a $0\text{--}70^{\circ}\text{C}$ tartományban legfeljebb $\pm 10\%$.

CMOS IC-knél a komplementer tranzisztorok hőmérsékletfüggése kiejti egymást, így a komparálási szint gyakorlatilag független a hőmérséklettől. A MOS tranzisztorok csatorna-ellenállása azonban a hőmérséklet növekedésével nő, ami miatt a jelterjedési idő csökken nagyjából 0.3% -kal.

A gyártók az áramkörök működőképességét csak meghatározott hőmérséklet-tartományban garantálják. A jellemzően használt hőmérséklet-tartományok az alkalmazás függvényében eltérnek:

- általános: $0 \dots +70^{\circ}\text{C}$,
- ipari: $-40 \dots +85^{\circ}\text{C}$,
- katonai: $-55 \dots +125^{\circ}\text{C}$.

TTL áramkörök

Az első TTL áramkör elemeket 1963-ban fejlesztette ki a Texas Instruments. Ez volt az SN74 sorozat, amelyet általános célokra használtak és használnak ma is. Készült még egy SN54 jelzésű sorozat is, ami nagyobb hőmérséklet-tűrésű és jellemzően katonai eszközökben alkalmazzák.

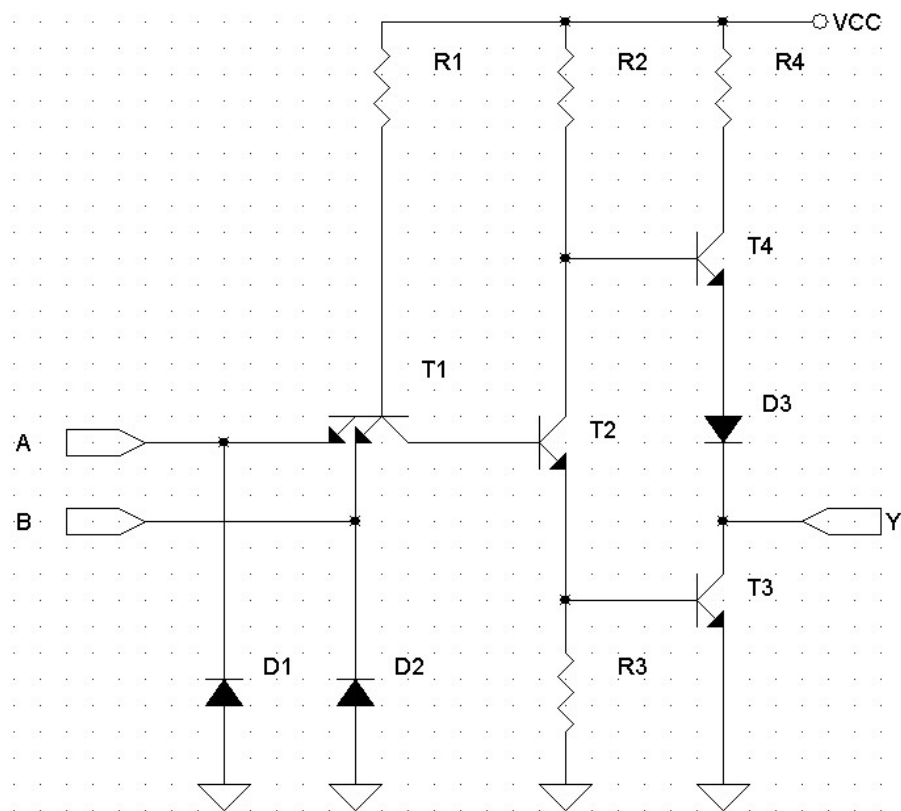
A különböző alkalmazási célokra nem sokkal később új variációkat fejlesztettek ki. Az SN74L jelzésű sorozat lassabb működésű (tipikusan 33 ns jelterjedési idejű), de alacsonyabb fogyasztású volt (tipikusan 1 mW/kapu), az SN74H sorozat többet fogyasztott

(20 mW/kapu), de gyorsabb volt (6 ns). (Az alap TTL kapuk tipikus jelterjedési ideje 10 ns, fogyasztásuk pedig tipikusan 10 mW).

1969-ben fejlesztették ki a Schottky-diódával telítésgátolt TTL eszközöket, ami jelentősen csökkentette a tranzisztorok kikapcsolási idejét és így a jelterjedési időket (20 mW tipikus fogyasztás mellett 3 ns). Hamarosan a Schottky-diódás eszközökből is több változatot hoztak létre. Az LS jelzésű eszközök (1971) 10 ns jelterjedési idő mellett csak 2 mW-ot fogyasztanak kapunként. A 80-as években módosított kapcsolású és gyártástechnológiájú Schottky TTL-eket hoztak forgalomba TTL-F (Fast, /Fairchild gyártmány/), TTL-AS (Advanced Schottky), TTL-ALS (Advanced Low-power Schottky) neveken. Ezek még nagyobb határfrekvenciájú eszközök voltak.

TTL alapkaps

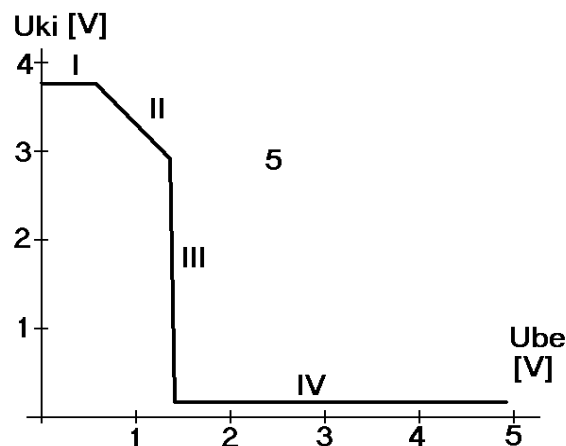
A TTL alapkaps egy TTL-NAND kaps, ami reprezentálja a hagyományos TTL áramkörök jellegzetes felépítését és működési paramétereit. Felépítése a 9-4. ábrán látható. Az eszköz bemenetén egy több-emitteres tranzisztor található (csak akkor zár, ha mindkét emitter magas logikai szinten van), a kimeneten pedig ellenütemű kimenet (totem-pole).



9-4. ábra: A TTL alapkaps.

A TTL áramkörök minden bemenetén egy-egy vágódiódát is találunk. Ennek elektromosan hosszú jelvezeték esetén van szerepe. Az ekkor fellépő reflexióknál a keletkező negatív hullámokat a diódák levágják, így csökkentik azok hatását.

Az alapkapu A bemenetre vett transzfer karakterisztikája a 9–5. ábrán látható. A többi, azaz nem vizsgált (tehát A bemenettől eltérő) bemenet szintjét rögzíteni kell, és a transzfer karakterisztika csak az adott rögzített értékek mellett igaz. Jelen esetben a többi bemenetből csak egy darab, a B van, és $B = U_H$ esetében vizsgáljuk az A bemenetre vett transzfer karakterisztikát.



9–5. ábra: A TTL alapkapu transzfer karakterisztikája.

Az I. szakaszban T_2 és T_3 le van zárva, T_4 nyitva van. A kimenő feszültség ekkor kb. 3.6 V, ami úgy adódik ki, hogy a tápfeszültségből levonódik a T_4 tranzisztor bázis-emitter feszültsége és a D_3 dióda nyitófeszültsége (mindkettő kb. 0.7 V).

A II. szakaszban a T_2 tranzisztor már vezet, de T_3 még zárt. A kimenő feszültség csökken.

A III. szakaszban T_3 is vezet. Az eszköz ilyenkor úgy működik, mint egy ellenütemű kimenettel ellátott erősítő. Az erősítés > 10 , tehát a feszültség meredeken csökken. Ez a pont kb. $U = 1.4$ V bemeneti feszültségnél következik be. Körülbelül itt van a TTL alapkapu komparálási szintje (ahol a bemeneti és a kimeneti feszültség egyenlő).

Érdemes megjegyezni, hogy más típusú áramkörök esetén a komparálási feszültség kicsit eltér, például Schottky kapcsolások esetén kicsit alacsonyabb. Az alacsonyabb komparálási feszültség nem jó a zavarvédelem szempontjából, viszont a Schottky kapuknak sokkal szögletesebb a karakterisztikája (gyakorlatilag nincs II.-es szakasz), ami viszont kedvezőbb.

A IV. szakaszban T_4 zárt (az üzembiztos lezárásban segít a D_3 dióda), T_2 és T_3 telítésben van. A kimeneti feszültség kb. 0.2 V.

CMOS áramkörök

Az első jól használható CMOS logikai áramkör rendszer 1971-ben került a piacra. Ez volt a CD4000A sorozat. Később kifejlesztették az ún. puffert kimenetű változatot CD4000B néven. Puffert kimenet esetén plusz invertert (vagy invertereket) építettek a kimenethez, amelyek felfrissítették a jeleket és a kimeneti karakterisztika emiatt rendkívül szögletessé vált.

Ezek az eszközök rendkívül alacsony fogyasztásúak, viszont a kapcsolási idejük általában jóval lassabb, mint a TTL eszközöké. A CD4000B típusú eszközöké például tipikusan 100 ns.

A technológia javításával később kifejlesztettek gyors működésű CMOS kapukat is. A 74HC (High-speed CMOS) sorozat tipikus jelterjedési ideje 10 ns. Speciális gyártástechnológia alkalmazásával még nagyobb sebességű CMOS IC típusokat is létrehoztak. Ezeket 74AC (Advanced high-speed CMOS) és 74ACT (Advanced high-speed, TTL compatible) névvel illették.

Fontos megjegyezni, hogy a CMOS kapuk logikai jelszint tartományai eltérnek a TTL kapukétól. A TTL kapuk maximális kimeneti feszültsége tipikusan 3.6 V, viszont a CMOS kapuk bemeneti minimális H szintje a tápfeszültség 70%-a, azaz 5V esetén kb. 3.5 V. A legrosszabb, azaz a worst-case esetet feltételezve a TTL kapu kimeneti szintje nem éri el a CMOS kapu H szintjét, emiatt a két eszköztípus nem helyettesíti egymást: általában vagy tisztán TTL, vagy tisztán CMOS eszközökből kell építkezni.

De azért, hogy a CMOS IC-ket TTL áramkörökkel is lehessen vezérelni, kifejlesztették a 74HCT TTL kompatibilis sorozatot. Itt a komparálási feszültség kb. 2.5 V-os értékét a TTL 1.4 V-os szintre csökkentették.

Áramkör megvalósítási nehézségek

Tápfeszültség ellátás, latch-up

A TTL és CMOS áramkörök áramfelvétele nem egyenletes. CMOS áramköröknél az áramfelvétel statikus állapotban gyakorlatilag nulla, átkapcsoláskor viszont (amikor az ellenütemű kimenet tranzisztorai egymásba vezetnek) megnő. TTL áramköröknél tipikusan a kimenet L-H átmeneténél jelentkezik egy rendkívül nagy áramcsúcs. Ezek az áramcsúcsok - a felépített eszközben levő véges vezetőképességű tápvezetékek miatt - zavarokat okozhatnak az áramkör adott pontján mérhető tápfeszültségben, ami zavarokat okozhat az eszköz működésében. Ezeket a zavarokat az IC közelében elhelyezett tápfeszültségű szűrő (hidegítő) kondenzátorokkal szokták kiküszöbölni. Ezek értéke körülbelül 100 nF és közvetlenül az IC tokok mellett szokás őket elhelyezni.

CMOS áramköröknél gondatlan tervezés vagy használat mellett felléphet az ún. *latch-up* jelenség: ha a CMOS áramkör bemenetére a tápfeszültségnél pozitívabb vagy a földnél negatívabb feszültséget kötünk, esetleg a bemeneten rendkívül gyors jelváltozást produkálunk, a CMOS IC zárlatos lesz és tönkremegy. Ennek az az oka, hogy a szokásos CMOS struktúrában a gyártási technológia miatt megjelennek parazita négyrétegű eszközök, azaz tirisztorok. Ezek normális működés mellett zárva vannak, azonban gyors felutó jelre vagy nagy bemeneti feszültség hatására "begyújtanak" és zárlatot okoznak. Ennek elkerülésére a bemenetre gyakran soros áramkorlátozó ellenállásokat kötnek, esetleg túlfeszültség-védelemmel is ellátják azokat. Ez a jelenség nemcsak alap logikai áramköröknél, hanem minden CMOS eszköznél előfordulhat, akár mikrokontrollereknél, processzoroknál is.

Késleltetések

Az eszközök véges jelterjedési tulajdonságai miatt ahhoz, hogy egy eszköz kimenetén vagy bármelyik belső pontján megjelenjen egy adott jel, valamekkora időre van szükség. Ez az idő gyakran nem azonos az áramkör különböző pontjain, tehát egy adott jel hatása eltérő időpontokban jelenik meg az eszköz egyes részein. A késleltetést és a késleltetés különbséget okozhatja például a részegységek paramétereinek szórása, a különböző hosszúságú jelvezetékek eltérő késleltetése vagy parazita ellenállások és kapacitások jelkésleltető hatása.

A késleltetések miatt előfordulhat, hogy az eszköz kimenetén nem várt jelek jelennek meg, amelyek a működésben zavarokat okozhatnak. Ezek az ún. házárdjelenségek, de jelen mérésben vizsgálatukra már nem kerül sor.

A mérésen alkalmazandó tesztpanel

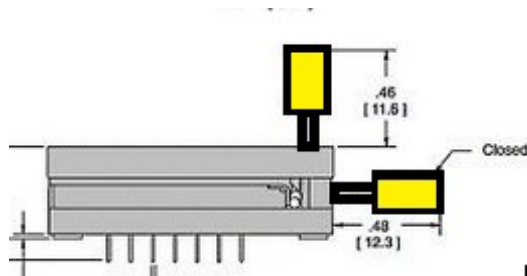
A logikai áramkörök vizsgálatához szolgáló tesztpanel az alábbi fontosabb részekből áll:

- inverter IC-k vizsgálatára szolgáló panel részlet,
- flip-flop IC-k vizsgálatára szolgáló panel részlet,
- impulzusgenerátor,
- négyszög- és háromszög-jel generátor,
- szabványos TTL kimenet terhelés.

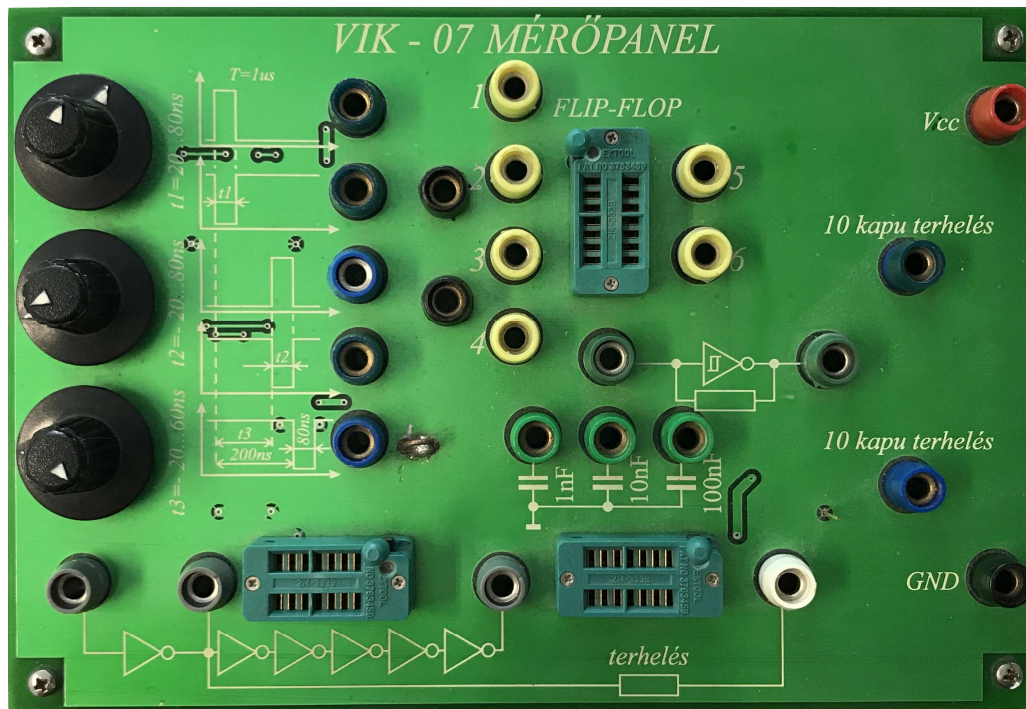
Ezek a részegységek egymás mellett helyezkednek el a panelon, be- és kimenetei banánhüvely csatlakozókon keresztül érhetőek el. A részegységekből lehet kialakítani az adott mérési feladathoz szükséges elrendezést. A panel felülnézeti képe a 9–6. ábrán, az egyes részegységek kapcsolási rajza pedig az utána következő ábrákon látható.

A feladatok során vizsgált IC-eket a panelen levő ún. TexTool IC foglalatokba kell behelyezni. Ezek a foglalatok az oldalukon egy kis karral vannak ellátva. A kar függőleges helyzetében lehet az IC-t a foglalatba behelyezni. Ezen a foglalatban az IC 1-es láb helye az a csatlakozás lyuk, amelyik a karhoz legközelebb esik (pöttyel jelölt).

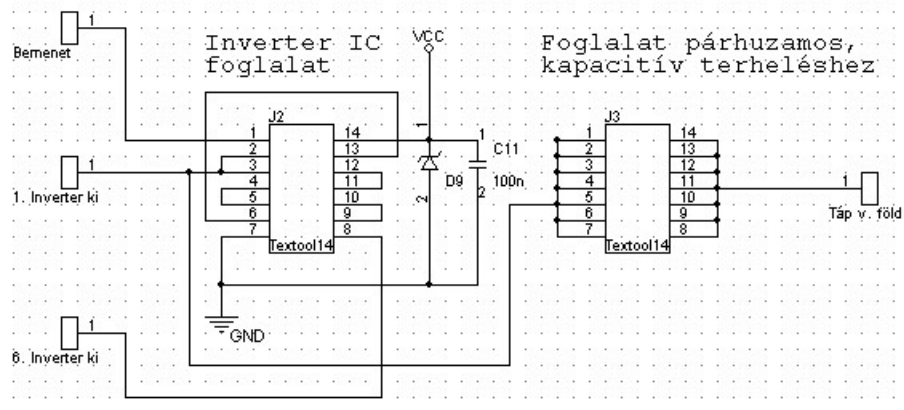
A foglalat karjának lehajtásával lehet az IC-t fizikailag rögzíteni és egyúttal a megbízható villamos kontaktust létrehozni az áramköri környezettel: a TexTool foglalat karját le kell nyomni a foglalat meghosszabbításának irányába (nem pedig oldalirányba). A kar összesen negyed fordulatot kell végezzen, nem kell többször körbetekerni:



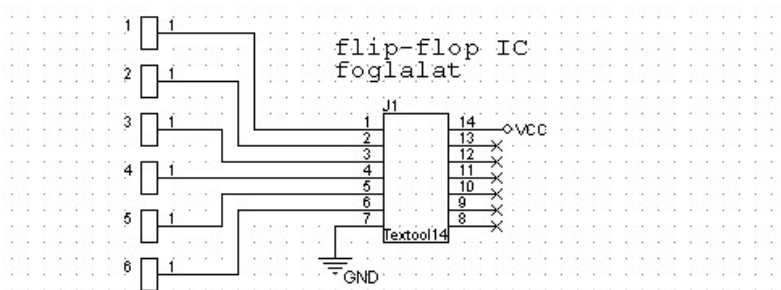
A reflexiók elkerülése érdekében a panel bemenetére mérés során $50\ \Omega$ -os lezárást csatlakoztathatunk. Ebben az esetben figyeljünk, hogy a jelgenerátort helyesen állítsuk be: a jelgenerátoron be kell állítani, hogy mekkora a terhelést kapcsolunk a kimenetére. Ez a funkció a jelgenerátor előlapi panelján található Output Setup gomb megnyomásával érhető el. Megfelelően beállított terhelés esetén a jelgenerátoron megadott feszültség szint jelenik meg a terhelésen. (A generátor belső ellenállása $50\ \Omega$, a terhelés ezzel sorba kapcsolt ellenállás, amivel a generátor belső ellenállása feszültségosztót képez. A terhelés megadásával a jelgenerátor lényegében kompenzálja a feszültségosztás hatását és a terhelésre vonatkoztatva értelmezi a megadott feszültség szintet.)



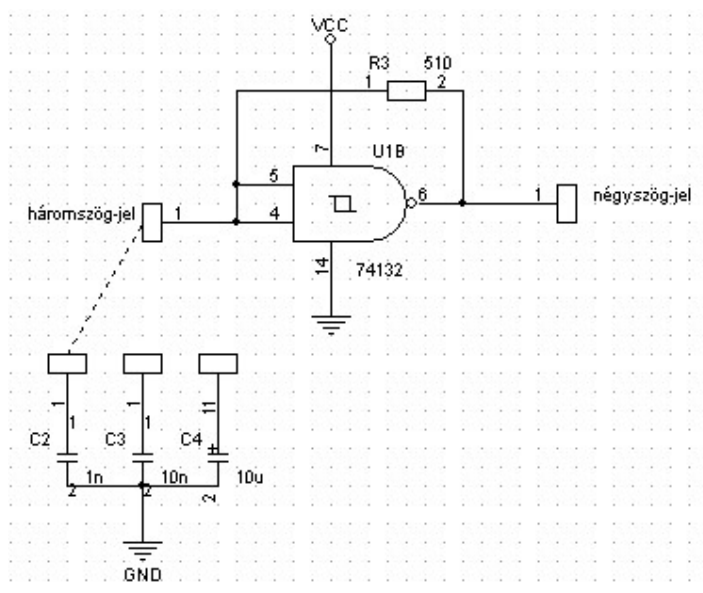
9-6. ábra VIK-07 Mérőpanel



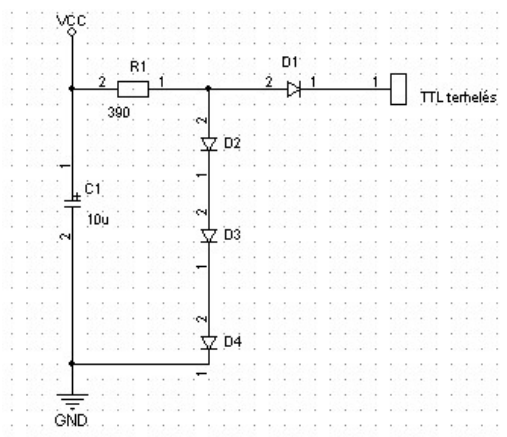
9-7. ábra: Tesztpanel részlet inverter IC-k vizsgálatához.



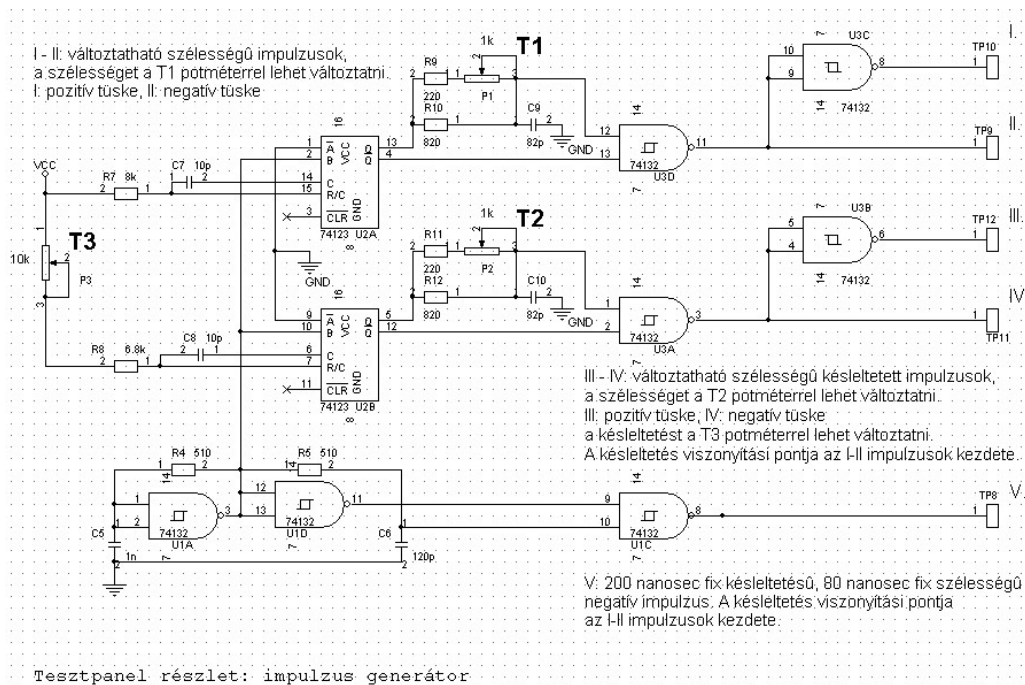
9–8. ábra: Tesztpanel részlet flip-flop IC-k vizsgálatához.



9–9. ábra: Teszt panel részlet, jelgenerátor.



9–10. ábra: Teszt panel részlet, szabványos 10 fan out TTL IC terhelés.



9–11. ábra: Tesztpanel részlet, 1 µsec periódusidejű, több kimenetű impulzus generátor.

Hivatkozások, felkészüléshez ajánlott irodalom

- [1] Dr. Benesóczky Zoltán: *Digitális technika c. tárgy Digitális elektronika c. jegyzete*
Elérhető online: a mérés anyagai között
- [2] Dr. Hainzmann János – Dr. Varga Sándor – Dr. Zoltai József: *Elektronikus áramkörök*,
Műegyetemi Kiadó, 44570, Bp., 1992
Digitális áramkörök jellemzői, 312-321. o.
TTL áramkörök, 325-340. o.
CMOS áramkörök, 347-357. o.
Digitális áramkörök jellemzői, 361-367. o.
Digitális rendszerek megvalósítási problémái, 368-378. o.

Feladatok a felkészüléshez

A mérést megelőző otthoni felkészülésként végezze el az alábbiakat önállóan!

1. Olvassa át alaposan *A mérés elméleti alapjai* c. szakaszban foglaltakat!
2. A WEB-en elérhető jegyzőkönyvvázban olvassa el és gondolja végig a *Mérési feladatokat*!
3. Legyen képes, megválaszolni az *Ellenőrző kérdéseket*!

A ismereteke a mérésvezető ellenőrzi. Elégtelen felkészülés esetén a mérés nem végezhető el, a mérést a pótlási lehetőségek szabályai szerint meg kell ismételni.

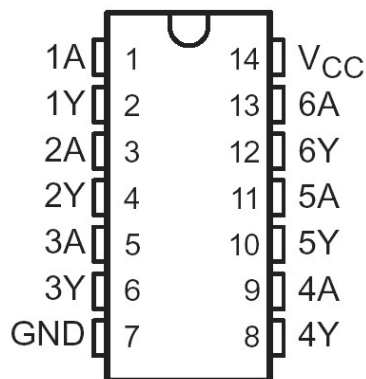
Ellenőrző kérdések

1. Mire szolgálnak a TTL bemeneteken található vágódiodák?
2. Mit nevezünk transzfer karakterisztikának?
3. Ismertesse a TTL alapkülső transzfer karakterisztikáját!
4. Milyen információkat szoktak általában egy digitális áramkörrel a katalógusok megadni? Soroljon fel néhányat!
5. Mi a logikai feszültség szintek definíciója?
6. Mi a FAN OUT (terhelhetőség) definíciója?
7. Hogyan definiáljuk egy TTL áramkör felfutási, lefutási, késleltetési idejét?
8. Mi egy TTL áramkör komparálási feszültsége?
9. Flip-flopnál mi a setup time, a hold time és a propagation delay fogalma?
10. Milyen tápfeszültség tartománya van a TTL és CMOS áramköröknek?

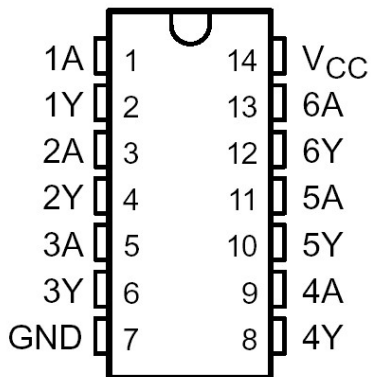
A válaszok megtalálhatóak jelen dokumentumban, illetve az IC-k adatlapját is érdemes megnézni.

A gyakorlat során használt IC-k lábkiosztása

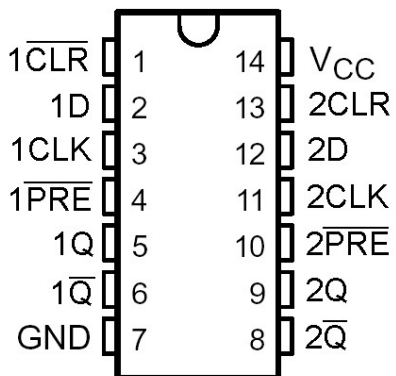
SN54LS04, SN54S04 . . . J OR W PACKAGE
SN7404, SN74S04 . . . D, N, OR NS PACKAGE
SN74LS04 . . . D, DB, N, OR NS PACKAGE
(TOP VIEW)



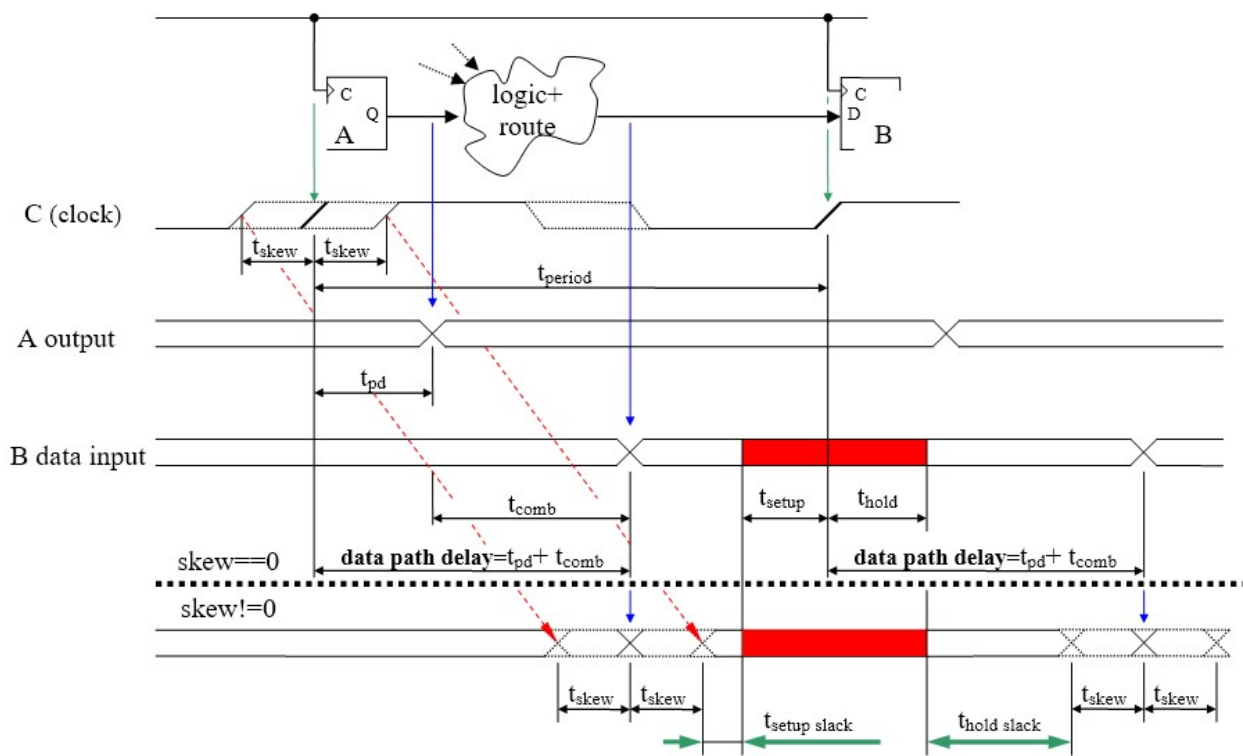
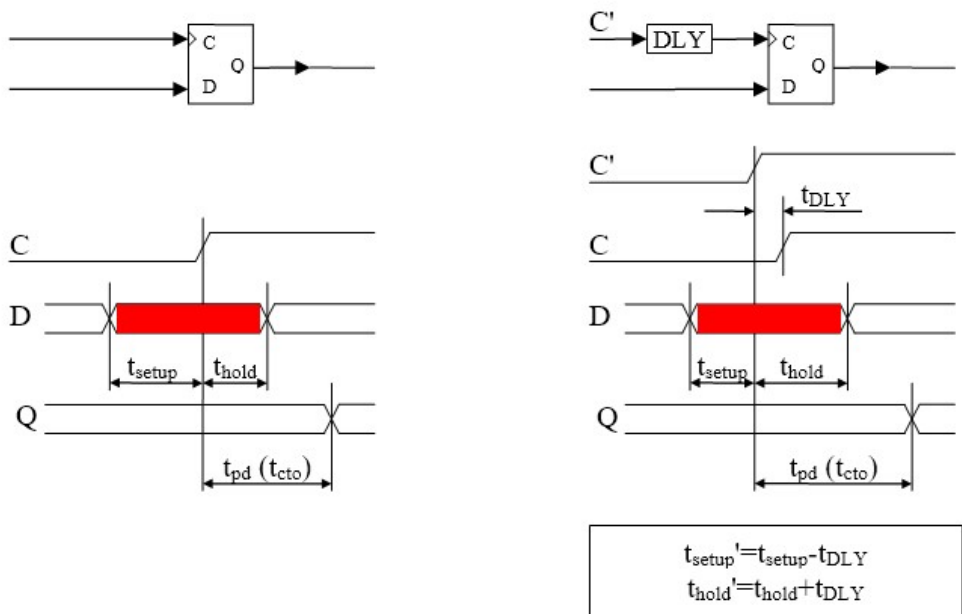
SN5414, SN54LS14 . . . J OR W PACKAGE
SN7414 . . . D, N, OR NS PACKAGE
SN74LS14 . . . D, DB, OR N PACKAGE
(TOP VIEW)



SN7474
(TOP VIEW)



Szinkron hálózatok időzítése - segédlet a házi feladathoz



Fogalmak a xilinx "*Timing Constraints User Guide*" (UG612) szerint:

t_{pd} : a Flip-Flop kimenetének késleltetése, Propagation Delay, *Clock-to-Out delay* (datasheet: T_{CKO})

t_{comb} : a kombinációs hálózat késleltetése, *combinational delay*

data path delay: az adat által elszenvedett teljes késleltetés az órajel felfutó élétől a cél Flip-Flop bemenetéig (a huzalozás késleltetése is benne van)

$t_{setup\ slack} = t_{period} - (\max(t_{data\ path\ delay}) + t_{setup} + t_{skew})$	($t_{setup\ slack} < 0$) \rightarrow setup violation
$t_{hold\ slack} = \min(t_{data\ path\ delay}) - (t_{hold} + t_{skew})$	($t_{hold\ slack} < 0$) \rightarrow hold violation

Megj: a hold slack-ban nincs benne az órajel periódus, ami azt jelenti, hogy nagy skew-val lehet olyan hálózatot készíteni, ami semmilyen frekvencián nem működik...