

DR. TARNAY KÁLMÁN—DR. SZÉKELY VLADIMÍR
BME Elektronikus Eszközök Tanszék

A TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program

ETO 621,372.2.09:681.3.06

Az áramkörtervezői gyakorlatban az utóbbi években egyre inkább tért hódítanak a számítógépi módszerek. Ma már rendszeresen olvasunk, hallunk számítógéppel tervezett vagy ellenőrzött elektronikus áramkörökről. Jellemzőes tény, hogy a gépek ilyen célú felhasználásakor az áramkörtervező nem az általános rendeltetésű programnyelvek egyikén ír programot a problémájához, hanem a kifejezetten áramköranalízis vagy szintézis feladatok megoldására létrehozott programok valamelyikét használja.

Különösen az „analizáld az áramkört!” feladatkitűzés bizonyult olyannak, amelyre általános, vagy legalábbis a felmerülő problémák igen nagy kategóriáját lefedő számítógépi programokat lehet létrehozni, univerzális segédeszközt adva velük a tervezők kezébe. Ezzel magyarázható, hogy az elmúlt évtizedben szép számmal jöttek létre univerzális áramköranalízis programok (holott egy-egy ilyen program kidolgozása mögött sok mérnök-évnnyi munka áll), és hogy ezek ma már jelentős elterjedtségnek örvendenek (néhányuk több száz számítógéppontban hozzáférhető). E programok legismertebb képviselői a NET-1, az ECAP, az AEDNET, a CALAHAN, a SCEPTRE [4, 5]. Mindegyikük felhasználó-orientált bemeneti nyelven rendelkezik — vagyis a felhasználtól egyik sem követel a szó szokványos értelmében vett programozási ismereteket, csak egy használati utasítás áttanulmányozását.

Kétségtelen, hogy az univerzális analízisprogramok használatbavételével kialakuló gyakorlat a célszerű és gazdaságos megoldás vonalát követi, hiszen az e programok létrehozásához szükséges egyszeri nagy anyagi, szellemi ráfordítás a későbbi felhasználás során az áramköri problémák gyors és egyszerű megoldásán keresztül sokszorosan megtérül. Ezért, felismerve az ilyen programok létjogosultságát és szükségességét, a BME Elektronikus Eszközök és Félvezetők Tanszékén 1968-ban a félvezetőeszközök és félvezető áramkörök gépi analízisével kapcsolatos kutatómunkát kezdtünk [1]. E tevékenység egyik eredménye a TRANZ-TRAN (TRANZisztor-TRANziens) áramköranalízis program — aminek bemutatása e cikk célkitűzése.

1. Általános jellemzés, szolgáltatások

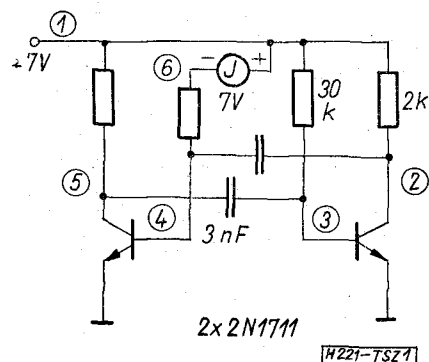
A TRANZ-TRAN programrendszer félvezetődiódákat, tranzisztorokat és egyéb, összetettebb félvezetőeszközöket tartalmazó nemlineáris hálózatok analízisére használható. A vizsgálandó áramkört az alábbi analíziseknek vethetjük alá:

- egyenáramú (DC) analízis
- transzfer karakterisztika számítás
- egyenáramú elem-érzékenység vizsgálat
- kiszeli váltakozóáramú (AC) analízis
- zajanalízis
- tranziens analízis.

Valamennyi analízisfeladatban lehetőség van a termikus hatások egzakt figyelembevételére.

A programrendszer nagyszámú, különböző jellegű félvezetőeszközre beépített modellel rendelkezik. Az egyes eszközök adatait kereskedelmi nevük alapján hívja a belső félvezetőkatalógusból.

A rendszert, hatékonyságának növelése végett, egy sor többlet-szolgáltatásra is felkészítettük. Ilyen lehetőségek: az alkatrész-módosítás és ismételt analízis, rész-áramkörök tárolása a program áramkör-tárában, hívásuk onnan, kívánt paraméterekkel rendelkező dióda vagy tranzisztor katalógusba vitele, lehetőség a megszakított analízis későbbi időpontban történő folytatására stb. A programrendszer jelenleg az Egyetemi Számítógéppont RAZDAN-3 gépen működik. Hossza kb. 70 000 szó. Az analízálható



1. ábra. Az analízálható multivibrátor. A rezgést a J jelforrás feszültségének nullára váltása indítja

maximális hálózat-méretre az alkalmazott gép memóriakapacitás- és sebesség adatai a meghatározóak; jelen esetben ez (analízisfajától függően) 60—80 csomópontban szabja meg a felső határt. A program eredetileg ALGOL nyelven íródott, de ma már FORTRAN változata is létezik.

Az alkalmazott, felhasználó-orientált bemeneti nyelvet egy példán mutatjuk be. Az 1. ábrán az analízálendő áramkör: egy astabil multivibrátor kapcsolását látjuk. Feladatunk az áramkör tranzienst viselkedésének vizsgálata.

Mindenekelőtt beszámoltuk a hálózat csomópontjait — e sorszámok szerint hivatkozunk majd a későbbiekben rájuk. Ezután a 2. ábrán látható módon irtuk le a feladatot a gép számára. Két jellegzetes adatcsoportot különböztethetünk meg az ábrán. Az első az áramkör topológiáját és elemeit definiáló rész, az *áramkörleírás*. Ebben találjuk meg az alkatrészek felsorolását — egy ellenállásnál pl. a csatlakozó csomópontok sorszámának és az ohmokban kifejezett értéknek a feltüntetésével. A második jellegzetes adatcsoport az «UTASÍTÁSOK» alapjel utáni. Az elvégzendő analízisfeladatokat és dokumentálási kívánalmakat soroljuk itt fel. Példánkban DC analízist, majd utána tranzienst vizsgálatot kértünk.

A 2. ábra szerinti szöveget tartalmazó szalagot beolvasva, a program elvégzi a multivibrátor analízisét. Elvégzi — de csak akkor, ha a kapott feladatban semmi kifogásolni valót nem talált. Bármilyen egyszerű és jól memorizálható is a program bemeneti nyelve, a felhasználó mégis követhet el benne hibákat. Elfelejtí egy ellenállás értékét megadni, olyan tranzisztort hív, ami nincs a katalógusban stb. Jelentős funkciója tehát a programnak a feladat beolvasás utáni részletes vizsgálata, és a hibás, értelmezhetet-

```
<<ÁRAMKÖRLEÍRÁS>>
<<MULTIVIBRATOR>>
6
<<NPN-TRANZISZTOR>> 0 4 5 <<2N1711...>>
<<NPN-TRANZISZTOR>> 0 3 2 <<2N1711...>>
<<ELLENÁLLÁS>> 1 2 2000
<<ELLENÁLLÁS>> 1 5 2000
<<ELLENÁLLÁS>> 3 1 30000
<<ELLENÁLLÁS>> 4 6 30000
<<KONDENZÁTOR>> 2 4 3*10-9
<<KONDENZÁTOR>> 3 5 3*10-9
<<JELFORRÁS>> 1 6 7,0
<<TÁPFESZULTSEG>> 1 7,0
<<CSOMÓPONTI KÖZELÍTŐ FESZULTSEGEK>>
7,0 1,0 1,0 0,0 7,0 0,0

<<UTASÍTÁSOK>>

<<DC ANALÍZIS>>
<<ÁGAK,CSOMÓPONTOK>>
<<FELVEZETOK>>

<<MAX.GEPI00>> 15
<<IMPULZSGENERATOR>> 1 6
<<ALAPSZINT,AMPLITUDO>> 10,0 -10,0
<<ISMETLŐDESI IDO>> 0,001
<<TK,TF,TT,TE>> 2*10-5 0,0 5*10-4 0,0
<<TRANZIENTS ANALÍZIS>> 5*10-6 2*10-4
<<PRINT...>> 2
<<PRINT...>> 3
<<PRINT...>> 4
<<PRINT...>> 5

<<*VEGE...>>
```

2. ábra. Felhasználói program az 1. ábrán látható hálózat tranzienst viselkedésének vizsgálatára

len részek kijelölése. A TRANZ-TRAN programrendszer igen gondosan analizálja a bevitt feladatot, s a hibákat azok pontos helyének és természetének feltüntetésével jelzi. A rendszer több mint 100 hibakategóriát különböztet meg. A hibásan leírt feladatok részletes diagnosztikája biztosítja, hogy még nagy, bonyolult hálózatok analízisének indítása sem jár zökkenőkkel.

1972.09.27.

TRANZ-TRAN 2. FUTTATÁS: A 327362/720808 KÓDSZÁMRA

14.OLDAL

TRANSZFER KARAKTERISZTIKA

1972.09.27. 21H52*14**

VEZERLESI PONTOK		KÖRNYEZETI HŐMÉRSEKLET		KIMENŐ FESZULTSEG (HŐMÉRSEKLET)						
7 0		25,00 CELSIUS		B E M E N Ő						
				FESZULTSEG ÁRAM						
				15	2	6	3	17	16	EPS
0,000000	-0,00000852	1,091429	6,816251	6,816250	7,970942	7,943150	7,236705	..107/-05		
								T 5	NORMAL AKTIV	
								T 6	NORMAL AKTIV	
								T 7	NORMAL AKTIV	
								T 8	NORMAL AKTIV	
								T 9	NORMAL AKTIV	
								T 10	INVERZ AKTIV	
								T 11	NORMAL AKTIV	
								T 12	NORMAL AKTIV	
								T 13	NORMAL AKTIV	
								T 14	NORMAL AKTIV	
								D 15	LEZAR	
								D 16	LEZAR	
0,000250	-0,00000856	1,579560	6,813777	6,810211	7,966340	8,431291	7,724843	..137/-05		
0,000500	-0,00000861	2,016934	6,811562	6,804364	7,962000	8,868664	8,162211	..814/-03		
0,000750	-0,00000865	2,406813	6,809591	6,798696	7,957905	9,258548	8,552092	..608/-03		
								T 10	NORMAL AKTIV	
0,001000	-0,00000869	2,746745	6,807889	6,793239	7,954085	9,598484	8,892025	..990/-03		
0,001250	-0,00000874	2,863953	6,807760	6,789347	7,951966	9,715693	9,009233	..232/-05		
								T 10	NORMAL TELITES	
0,001500	-0,00000878	2,916770	6,808038	6,785843	7,950284	9,768510	9,062049	..343/-03		
0,001750	-0,00000882	2,958687	6,808329	6,782323	7,948609	9,810428	9,103967	..449/-05		
0,002000	-0,00000887	2,994728	6,808600	6,778752	7,946906	9,846469	9,140008	..677/-06		

A FUTÁS BEFEJEZŐDÖTT 1972.09.27. 21H58*42**

3. ábra. Egy oldal a TRANZ-TRAN eredmény-dokumentálási képéből

H221-TSZ3

A program felhasználó-orientált jellege az eredményközlés módjában is megnyilvánul. A dokumentálás formáját a felhasználó szabja meg; módjában áll az eredményeket tetszés szerinti (pl. félvezető-eszközök, vagy ellenállások, vagy csomópontok stb. szerinti) bontásban kérni. A nyomtatási képek kialakításánál az áttekinthető, minden magyarázat nélkül értelmezhető formára törekedtünk. Erre példa a 3. ábra faximilije: részlet egy TRANZ-TRAN futtatásból.

2. Modellkészlet

A TRANZ-TRAN programrendszer modellkészletének kialakítása során két igen lényeges szempontot tartottunk szem előtt: a modell-készlet egységességét és hierarchikus felépítését.

Az *egységesség* követelménye azonnal felmerül, amint egy programot több analízis-fajta elvégzésére teszünk alkalmassá. A problémát itt az okozza, hogy más módon kell az eszközöket modellezni pl. a nemlineáris, egyenáramú viselkedés szempontjából, mint a kisjelű, frekvenciafüggő sajátosságokra vonatkozóan — ugyanakkor nem szabad, hogy az egyes analízisek ellentmondó (vagy akár csak pontatlanul összevágó) eredményekre vezessenek. Programunkban az egyes analízis-szegmensek közös eszközmodellekből származtatják, redukálják a számukra szükséges részmodelleket — így az egységesség követelménye messzemenően teljesítve van. Egy DC analízis eredménye mikrovolt pontossággal megegyezik a stacionárius állapotra kapott tranziens megoldással, a DC analízisnél dokumentált erősítésadat az igen kis frekvenciára kért AC eredménnyel stb.

A modell-készlet *hierarchikus felépítése*, az egyes modellek egymásra épülése egyrészt kényelmes lehetőséget biztosít a programrendszer fejlesztésére (az új, bonyolult modellek a régiekre épülhetnek), másrészt biztosítja, hogy a modellrendszer elemei pontossági, bonyolultsági szempontból is összhangban legyenek.

A TRANZ-TRAN modell-hierarchiát a 4. ábrán látjuk. A program megoldó algoritmus csupán az első szinten szereplő két elemet (vezetés és áramgenerátor) ismeri; ezekre épül minden további modell. A második szint az egyszerű áramköri elemeké: feszültségforrás, kapacitás, pn átmenet stb. A harmadik szinten állnak a diszkrét félvezetőeszközök: bipoláris, tervezérelt, multiemitteres tranzisztor stb. A több ellenállásból, tranzisztorból álló, összetettebb elemek modelljei foglalják el a negyedik szintet. Ide a beépített DTL—TTL alapáramkör-modelleket, valamint a parazita hatásokat is figyelembe vevő integrált áramköri elemeket soroljuk. Az ötödik, legösszetettebb modellezési szinttel már a felhasználó rendelkezik: tetszőleges, az előbbiekből összeállított hálózatrészletet áramköri modulként deklarálhat, és a program áramkörtárában elraktározhatja.

Az eszköz-sajátosságok leírásának módjára a fizikai megközelítés jellemző minden modellünkben. A modell-topológiák a technológiai megvalósítás tényleges elrendezéséből adódnak, a jellemző nemlineáris függvények fizikai megfontolásból származnak. Ez többek között a modellrendszer fejlesztése szempontjából célszerű: egy-egy másodlagos

effektus a fizikai helyettesítőképebe iktatott újabb elemmel könnyen figyelembe vehető.

A modellrendszer bonyolultságát úgy állapítottuk meg, hogy az egészséges kompromisszumot adjon a futásidő és pontossági követelmények tekintetében. Véleményünk szerint a modellek pontosságát az általunk megvalósított 1—5%-hoz képest fokozni szükségtelen, mert az esetek többségében az egyes félvezetőeszköz-egyedek adatait ugyanis ennél pontatlanabban ismerjük, és a legtöbb paraméter stabilitása sem sokkal kedvezőbb ennél az értéknél. (Meg azután: egy valamennyire is jó áramkör működése csak kevésbé függ a félvezetőeszközök adataitól. Így néhány százalékos modell-pontatlanság nem befolyásolja számottevően a gépi analízis eredményét.) A nem túl bonyolult modellrendszer egyszerűsége az az előny jár, hogy egy-egy konkrét eszköztípus megadása viszonylag kevés paraméter megállapítását igényli. E paraméterek megválasztásánál azt is szem előtt tartottuk, hogy ezek az áramkörtervező mérnökök által is használt, ismert adatok legyenek.

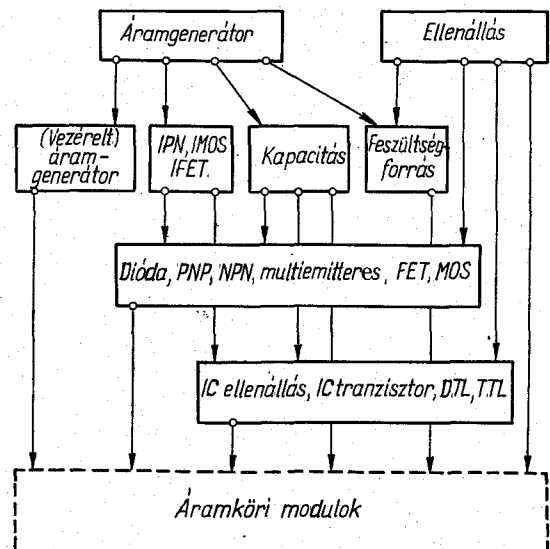
E cikk terjedelme nem engedi meg, hogy modelljeinket rendre ismertessük. A legfontosabbikat, a bipoláris tranzisztor modellt mutatjuk be csupán. A helyettesítőképek Ebers-Moll típusú, a fontosabb másodlagos effektusok figyelembevételével (5. ábra). A diódák nyitókarakterisztikája

$$I_0(e^{U/m \cdot U_T} - 1) \quad (1)$$

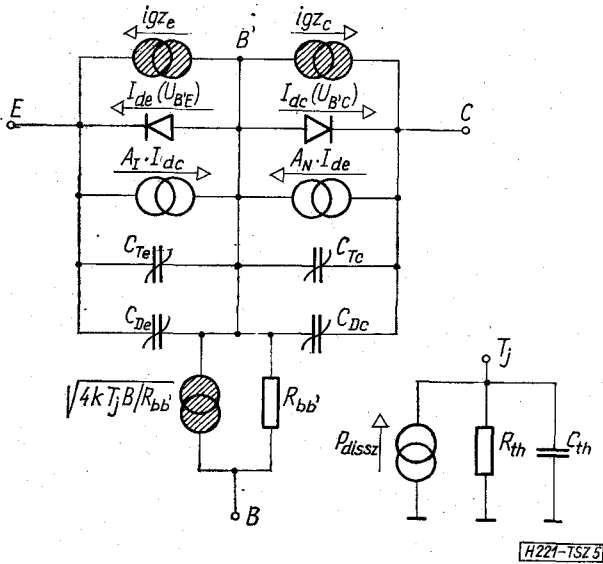
alakú (m állandó). A zárótartományban $\sqrt{-U}$ -val változó generációs árammal számolunk. Nagy áramoknál figyelembe vesszük a soros ellenállások hatását. A lavinasokszorozást a szokásos

$$M = \frac{1}{1 - \left(\frac{U}{U_L}\right)^n} \quad (2)$$

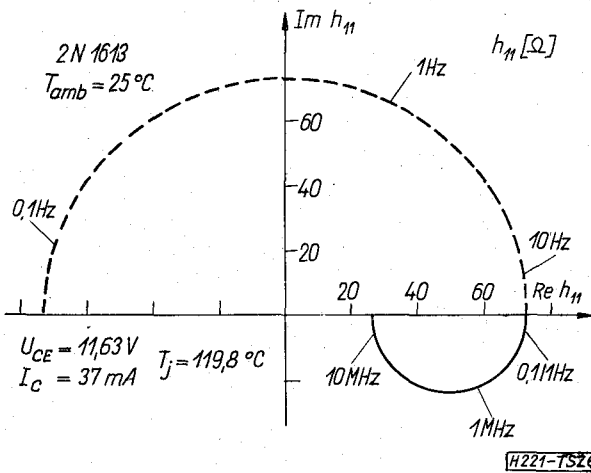
tényezővel számoljuk. Három paraméter réteghőmérséklet-függését vesszük figyelembe (nyitó- és záróáram együttható, valamint U_T). Az A_N , A_I áramerősítések állandók. A C_T tértöltés kapacitások győ-



4. ábra. A TRANZ-TRAN modell-hierarchia



5. ábra. A bipoláris tranzisztor teljes modellje



6. ábra. A beépített modellek ellenőrzését célzó TRANZ-TRAN futtatás eredménye: a 2N1613 tranzisztor h_{11} paraméterének helygörbéje. A termikus eredetű komponenseket elhanyagoló futtatás eredményét folytonos vonallal, az azt figyelembe vevő futtatását szaggatott vonallal ábrázoltuk. 1 kHz felett a kettő egybeesik

közen függenek a zárófeszültség és a diffúziós potenciál összegétől, a C_D diffúziós kapacitások a diódák nyitóáramával arányosak. Az ig_{ze} és ig_{zc} zajgenerátor-áramokban a sörétzaj, árameloszlási zaj és flickerzaj hatását vesszük figyelembe.

Az 5. ábrán látható modell közösnek tekinthető a program minden analízis szegmensére vonatkozóan — természetesen azonban, hogy az egyes analízisfajták kivonatolják a modellt, csupán a számukra szükséges részeket használva belőle. Például a három zajgenerátor csak a zajanalízis részére létezik, az R_{th} hőellenállást és C_{th} hőkapacitást csak a termikus analízisek veszik figyelembe. Egyenáramú analízis esetén minden kapacitív ág elmarad, s a modell a két diódából, az injektált áramokat leíró két generátorból, még az $R_{bb'}$ ellenállásból áll. A kisjelű AC analízis linearizálja az Ebers-Moll modellt: a diódákat a megelőző DC analízis által meghatározott munkapontra vonatkozó differenciális ellenállásukkal és kapacitá-

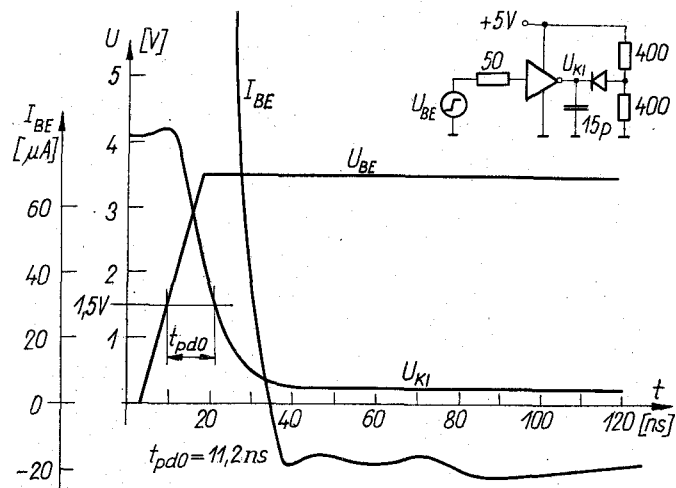
sukkal helyettesítve. Ez a gyakran használt hibrid $-\pi$ -vel egyenértékű és a tranzisztor minden üzemmódjában használható kisjelű képet ad. Példaként tekintsük a 6. ábrát. A modellből számolható h_{11} helygörbe a tranzisztorok ismert viselkedésével egybevág. Külön érdekesség, hogy termikus analízis esetén a modellek tükrözik a termikus időállandók elektromos oldalra transformálódott hatását is (a 6. ábra szaggatott helygörbéje).

A modellekhez csatlakozó adattár, katalógus a különböző félvezetőeszközök gyakran használt típusait tartalmazza. E kipróbált adatok használata esetén jó egyezést várhatunk a program által számolt és a kérdéses eszköztípusra garantált viselkedés között. Példa erre a 7. ábrán bemutatott eredmény: az SN74 sorozatú TTL inverter terjedési idő számítása. Ha szükséges, a felhasználónak lehetősége van további félvezető-elemek adatainak katalógusba vitelére. Ilyenkor a számított és a tényleges eszköz-paraméterek egyezése a bevitt katalógusadatok megállapításának pontosságától függ.

Szükségesnek látjuk kiemelni a program kialakítása során sokszorosan beigazolódott tény, ami szerint a modell- és az algoritmus-probléma egymástól el nem választható, szoros kölcsönhatásban levő kérdések. A TRANZ-TRAN modellrendszerének kialakítását is befolyásolták a megoldó-algoritmus sajátosságai. Az alkalmazott Newton-Raphson algoritmus megköveteli például a modellfüggvények mellett azok deriváltjainak előállítását is. Ez azután más helyen is nagyon hasznosnak bizonyul: e deriváltak felhasználásával épülnek össze minden kisjelű számításnál a linearizált hálózatmátrixok.

3. Algoritmusok

A programrendszer a hálózategyenletek megoldását *csomóponti potenciál* módszerrel végzi. Az analízisfeladatok azon csoportjánál, amelyek nemlineáris egyenletrendszer megoldására vezethetők vissza, a



7. ábra. Az SN7404 TTL kapu tranziens vizsgálatának eredménye. A számolt terjedési idő 11,2 ns-nak adódott; az áramkörre 8–15 ns közti értéket specifikálnak. (A belső tranziensek jóval lassabban zajlanak le — ez pl. az I_{BE} bemenőáram viselkedéséből látható.) Ez a 11 csomópontos tranziens vizsgálat 4 perc 20 mp gépidőt igényelt

megoldás iteratív úton történik, módosított Newton—Raphson módszerrel. (Felmerült az a gondolat is, hogy egyenleteink ismeretleneinek számát, a megoldási időt csökkenthetné valamely, a csomóponttól eltérő analízis, pl. a nemlineáris ágakra redukálás módszere — de egy rövid vizsgálódás meggyőzött minket arról, hogy éppen a mai, integrált áramkörös korban ennek különösebb előnye nem volna, hiszen egy IC gyakran több nemlineáris kaput tartalmaz, mint csomópontot.)

A hálózat analízisre kerülő helyettesítőképének általános ága a 8. ábrán látható. A G vezetés az ág lineáris ohmos elemeiből származik; minden nemlinearitást, transzfer-effektust, időfüggést, kapacitív áramot az IG áramgenerátor ír le. Ez a viszonylag egyszerű ág egyes elemek közvetlen modellezését nem teszi lehetővé, az ebből származó problémák azonban könnyen áthidalhatók. Feszültségforrás helyett pl. 0,001 ohm belső ellenállású Norton-ekvivalenst generál a program — ami gyakorlatilag teljesen kielégítő. Induktivitás vezérelt áramgenerátor segítségével modellezhető.

A nemlineáris analízisfeladatok kiindulásaként a hálózat lineáris részéből *admittancia-mátrixot* számolunk

$$Y_{mp} = A_{nn} G_{nl} A_{lp}, \quad (3)$$

ahol A_{ij} az *incidencia-mátrix*, melynek első indexe az ágakon, a második a csomópontokon fut át, és G_{ij} az ágadmittanciák diagonál-mátrixa. Ebből a hálózat lineáris részének ág-csomópont típusú *impedancia-mátrixa*

$$Z_{mn} = A_{nq} Y_{mq}^{-1}. \quad (4)$$

Az U_m csomóponti feszültségekre vonatkozó egyen-áramú hálózategyenletek tehát

$$f_m(U_p) = U_m + Z_{mn} \cdot IG_n(U_p) = 0, \quad (5)$$

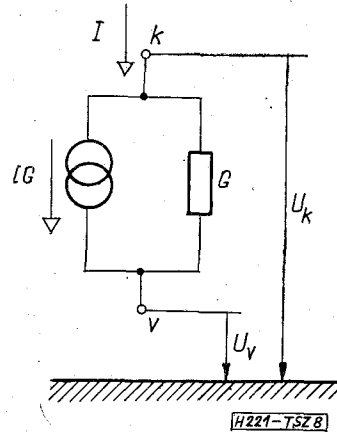
és a Newton—Raphson iteráció teljes feszültség-lépése

$$\Delta U_q = -J_{qm}^{-1} \cdot f_m(U_p), \quad (6)$$

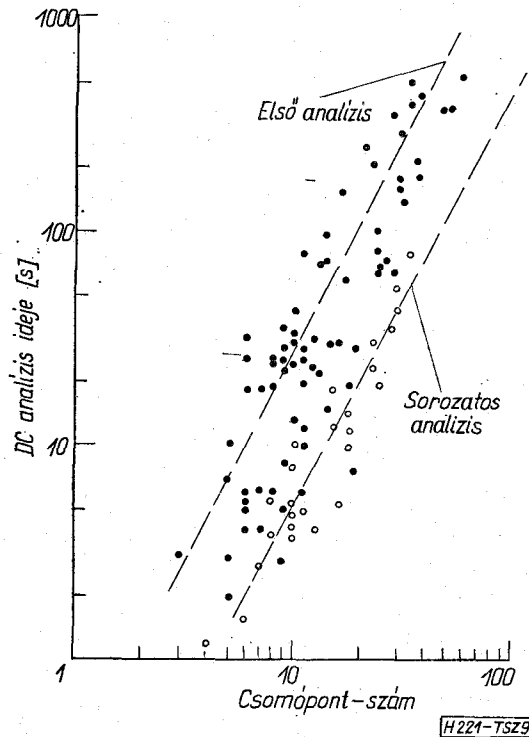
ahol J_{mp} az $f_m(U_p)$ függvényrendszer *Jacobi-mátrixa*.

A ΔU_q feszültséglépést sokszor nem célszerű minden további nélkül elfogadni. Az a mód, az az iterációs taktika, ahogyan belőle a végül is alkalmazandó feszültségváltozásokat előállítjuk, nagymértékben befolyásolja a konvergencia gyorsaságát, kulcsfontosságú tehát az algoritmus hatékonysága szempontjából. A DC algoritmus egyik sajátossága, hogy nem engedélyez extrém nagy iterációs ugrásokat; $\Delta U_q - t$ (ha kell) arányosan leosztja egy, a hálózat tápfeszültségeihez kapcsolódó korlát alá. E korlát mértéke azonban nem marad állandó, a megkötés az iteráció elhúzódása esetén fokozatosan feloldódik. Másik jellegzetesség, hogy ahol az algoritmus ezt megengedhetőnek ítéli, nem képez és invertál újabb Jacobi-mátrixot, hanem az előző iterációét használja — a számítás leginkább időigényes részét takarítja meg ezzel. A tranzines szegmens megoldó algoritmus ezenfelül a lépés utáni hibára optimalizált ΔU_q töredék meghatározására is képes, és fel van készítve a megoldástól távoli hiba-minimumokból való kiugrássra, kiszabadulásra is.

Sok különféle hálózat megoldásának iterációs folyamatát figyelemmel kísérve, a következő tapasztal-



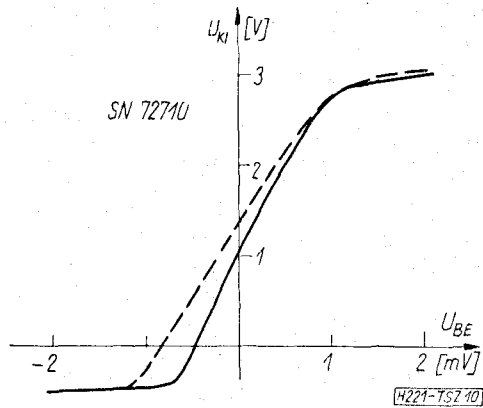
8. ábra. Ilyen ágakból álló hálózattal helyettesít a program minden áramkört



9. ábra. DC analízis idők a csomópont-szám függvényében, a kb. 10 000 átlagművelet/s sebességű RAZDAN—3 gépen.

- — első analízis
- — sorozatos analízis

latokra jutottunk. Egyenáramú analízisfeladatok esetén a szükséges iterációk száma átlagos hálózatoknál 4—12, ennek általában a fele igényel új Jacobi-mátrixot. Jellegzetesség, hogy az erősen visszacsatolt hálózatoknál több iteráció kell a megoldáshoz. Többállapotú hálózatok DC analízise bármelyik lehetséges megoldást megfoghatja, a metastabilt is (utóbbi esetben tranziens analízissel folytatva a megoldást, a hálózat spontán módon valamelyik stabil állapotába tér át). A nem többállapotú, de ahhoz igen közelebb beállításban lévő áramkörök néha konvergenciaproblémákat vetnek fel. Az iteráció folyamatára jellemző egy kezdeti, többé-kevésbé rendszertelen ugrálás az U_m csomóponti feszültség-térben, majd (rátalálva a megoldás környezetére) egy igen gyors, néhány lépésben történő „beszaladás” a megoldásig.

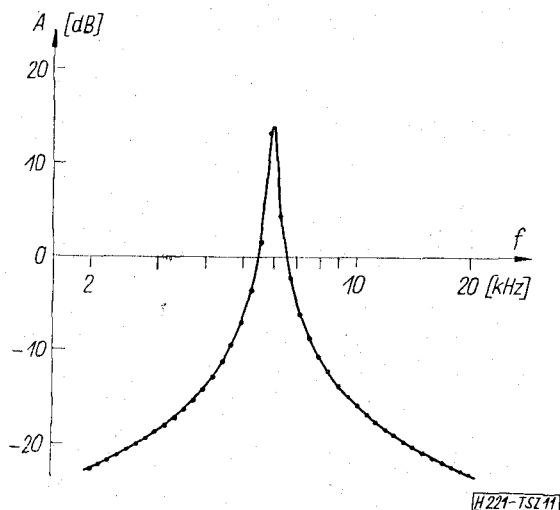
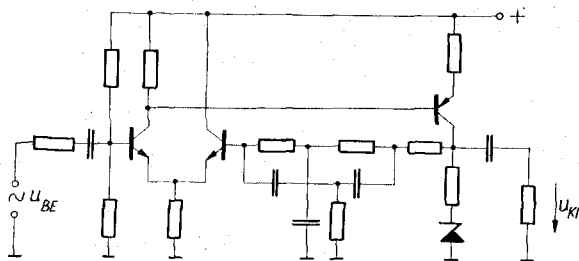


10. ábra. Az SN 72710 differenciál-komparátor transzfer karakterisztikája. Folytonos vonal: számított görbe, szaggatott vonal: az áramkör adatlapján szereplő görbe

Az egyenáramú megoldás időigényének érzékeltesére szolgál a 9. ábra: DC analízis idők a csomópontszám függvényében. Az időigény szórása meglehetősen nagy; az átlagos idő kb. a csomópontszám négyzetével arányos. Az ábrába berajzolt szaggatott egyenesek meredeksége éppen e négyzetes kapcsolatnak felel meg.

A DC megoldás egy különleges szolgáltatása az egyenáramú, differenciális kapuellenállások és erősítések nyomtatása. Az ezek számításához szükséges differenciális csomóponti admittancia-mátrixot az alábbi módon képezzük:

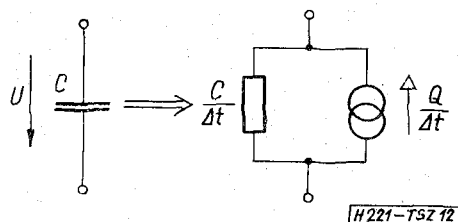
$$GD_{mq} = Y_{mp} J_{pq} \quad (7)$$



11. ábra. Szelektív erősítő kapcsolása és TRANZ-TRAN-nal számolt amplitúdó-átvittele. A DC, AC analízis és dokumentálás összejeze 7 perc 25 mp volt

Megjegyezzük, hogy az algoritmust leíró fenti egyenletek mátrixainak egy része nem kerül ténylegesen felépítésre a memóriában; ez mind a mátrixműveletek ideje, mind a helykihasználás szempontjából így célszerű. A DC (és minden további nemlineáris) analízis összesen két mátrixot jelöl ki; ezek a Z és a J.

Két további analízisfajta: a transzfer karakterisztika számítás és az érzékenység-vizsgálat voltaképpen DC analízisek sorozatának tekintendő. Az előbbinél valamelyik bemeneti generátor feszültsége változik a felhasználó által meghatározott határok közt és lépésekben, s a program minden egyes állapotra megoldja a nemlineáris hálózategyenleteket. Az utóbbinál a program az összes ellenállás értékét, az összes tranzisztor β , R_{bb} és I_{CB0} paramétereit külön-külön 1%-kal megnöveli, ismét analízisek sorozatát végezve. Az egy megoldáshoz szükséges idő most kisebb, mint az első DC analízisnél, hiszen a számítás mindig



12. ábra. A kapacitások helyettesítőképe a tranziens algoritmusban

a megoldáshoz közeli feszültségekről indul. Példaként a 10. ábrán egy 30 csomópontos hálózat: a $\mu A710$ integrált-kör számított transzfer karakterisztikáját látjuk. Egy-egy megoldás itt csak 48 mp időt vett igénybe!

Az AC analízis a hálózat egyenáramú részének (7) alatti differenciális admittancia-mátrixából, és az ágkapacitásokból álló részhálózat

$$CD_{mp} = j\omega A_{nm} C_{nl} A_{lp} \quad (8)$$

admittancia-mátrixából indul ki. Egyetlen (vagy több, de fázisban levő) szinuszos meghajtógenerátor ig_n ágáram-oszlopvektorából ezután a csomóponti váltakozó feszültségek így származtathatók:

$$\begin{aligned} Re u_m &= X_{mn} i g_n, \\ Im u_m &= jGD_{mq}^{-1} CD_{qp} X_{pn} i g_n, \end{aligned} \quad (9)$$

ahol

$$X_{mn} = (GD_{mq} - CD_{mp} GD_{ps}^{-1} CD_{sq})^{-1} A_{nq} \quad (10)$$

Egy AC analízis futtatás eredményét mutatjuk be a 11. ábrán. A program a kettős T-vel felépített szelektív erősítő jellegzetes karakterisztikáját szolgáltatta.

A zajanalízis algoritmusá hasonló az AC kisjelű algoritmuséhoz. Az eltérés, hogy meghajtásként most az eszközmodellekben jelenlevő zaj-áramgenerátorok szerepelnek, és hogy az ezek által létrehozott feszültséget az egyes csomópontokon négyzetesen összegezzük. A csomóponti zajfeszültség négyzetek tehát:

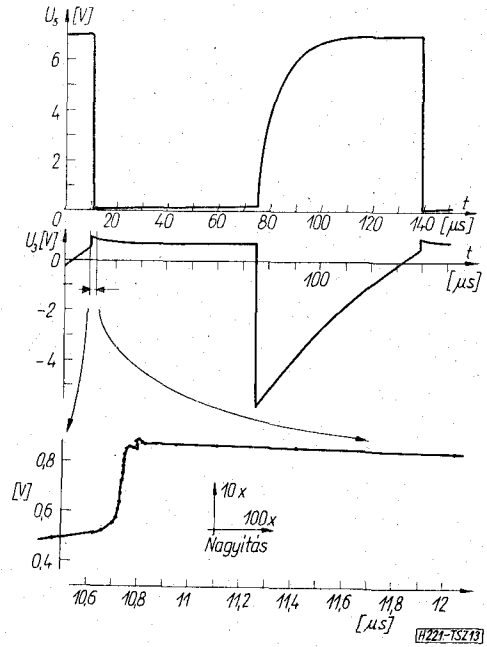
$$n_m^2 = (|X_{mn}|^2 + |GD_{mq}^{-1} CD_{qp} X_{pn}|^2) \cdot |ig_n|^2, \quad (11)$$

ahol igz_n a zajgenerátor-áramok oszlopvektora, és a $[\]^2$ jelölés a zárójelben álló mátrix elemeinek egyenkénti négyzetre-emelését jelenti.

A tranziens analízis algoritmus a hálózat kapacitásait a 12. ábrán látható módon, párhuzamosan kapcsolódó vezetéssel és áramgenerátorral helyettesíti. A vezetés nagysága $C/\Delta t$, a generátor forrásárama $Q/\Delta t$ — ahol Δt az analízis soronkövetkező időlépése, Q a kapacitás pillanatnyi értékének és feszültségének szorzata az előző, már megoldott időpillanatra. A kapacitások e helyettesítése után a következő időpillanat csomóponti feszültségeit szolgáltatató megoldó-algoritmus a DC analízisnél leírttal azonos. Egy-egy időlépésre vonatkozóan nemlineáris egyenletrendszer megoldására vezettük vissza tehát a nemlineáris differenciálegyenlet formájában megfogalmazódó tranziens problémát. A vázolt algoritmus a differenciálegyenletrendszer Euler-módszerrel történő integrálásával egyenértékű (pontosabban: az ún. visszafelé lépő Euler módszerrel). Ez a numerikus számolás stabilitása szempontjából igen jó, megbízható, de nem túl pontos algoritmus — a szükséges potosságot hatékony időlépés-szabályozással biztosítjuk.

A lépésköz-szabályozási stratégia fő vonásai a következők. A program minden új időlépésköz első iterációjánál megvizsgálja, hogy az adott lépéssel nem kerülne-e ki a megoldás környezetéből — ha igen, akkor azonnal leoszt (felezi az időlépést). Ugyanez történik akkor is, ha három iterációban nem sikerült a lépést megtenni. Ha ez többször egymásután bekövetkezik, igen nagy, akár 10^3 – 10^4 -szeres leosztásokhoz is eljuthatunk. E tekintetben az algoritmus egyetlen határt szab: 1 ns alá nem csökkenti a lépésközt, így akadályozva meg, hogy az eszközmódelleket érvényességi határukon túli frekvenciatartományban használjuk. A nagymértékű leosztás soha nem növeli szükségtelenül a számítási időt, mert az algoritmus a leosztás utáni második lépéstől már duplázást kísérel meg, s ezek sorozatával hamar visszatér az eredeti lépésköze. Szép példa erre az 1. ábrán már bemutatott multivibrátor tranziens analízise (13. ábra). Látható, hogy az eredeti, $5\mu s$ -os lépésközt a bázis-hullámforma egy kritikus szakaszán való átkeléskor (visszahatás a kollektor-bázis kapacitáson át) $2,5$ ns-ig volt kénytelen leosztani, de utána igen gyorsan, 10 lépésben visszatért az eredeti, $5\mu s$ lépésköze. Így az ábrán látható $150\mu s$ idő-intervallumot 116 lépésben tettük meg; lépésköz-szabályozás nélkül ez $150\mu s/2,5\text{ ns} = 60\,000$ lépést, azaz kb. 500-szor több gépidőt igényelt volna!

Az analízisek során a program (a felhasználó kívánására) a hálózatban lezajló termikus hatásokat is figyelembe veszi. A melegedési viszonyok sztatikus számításbavételén túl a félvezetőeszközökön bekövetkező termikus-elektromos csatolás által a hálózatba transzformált termikus admittanciák is modellezésre kerülnek. Mindegyik analízis-algoritmus fel van készítve a termikus hatások figyelemmel kísérésére — így a programmal a hőáramlási, melegedési folyamatok dinamikája is nyomonkövethető [9 10]. Például a 14. ábrán egy túlterhelt Ge-dióda termikus tranziens analízis eredményét látjuk; jól megfigyelhető a hőmegfutás folyamata.

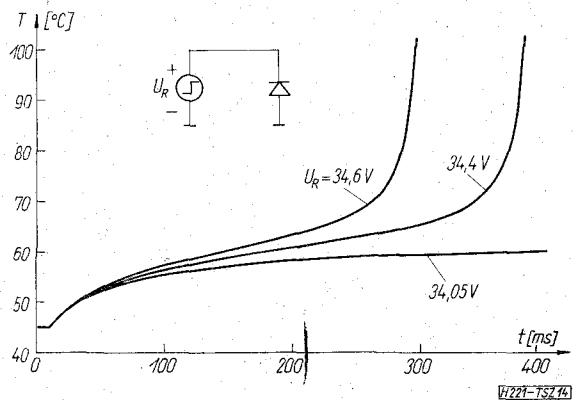


13. ábra. A multivibrátor hullámformái. A legfelső jelalak az U_2 kollektorfeszültség. Az U_3 bázis-jelforma egy részletét feszültség szerint tízszeres, idő szerint százszoros léptékben kinagyítva is ábrázoltuk. A fekete pontok jelölik a számolt értékeket. A 0– $150\mu s$ intervallumra vonatkozó számítási idő 9,5 perc volt

4. A programrendszer gyakorlati alkalmazása

A programrendszer egyetemi oktatási-kutatási igények kielégítésére készült, felhasználói a Villamosmérnöki Kar hallgatói, oktatói. Az első, DC szegmens 1969 óta működik, már akkor megindult az oktatásban való felhasználás is [2, 3]. Kibővült a felhasználók köre, amikor a DC szegmenst 1971 decemberében az általános használat számára megnyitottuk. Az e cikkben ismertetett, teljes rendszer 1972. szeptemberétől vált mindenki számára hozzáférhetővé a BME Villamosmérnöki Karán [8].

A programrendszer jelenlegi oktatási igénybevétele hetenként kb. 50 feladat, továbbá néhány diploma-tervező hallgató rendszeres futtatásai. Az egyetemi



14. ábra. Egy OA 1160 dióda számolt hőmegfutási tranziensei $45^\circ C$ környezeti hőmérséklet mellett, három különböző zárófeszültségre. A feszültségek a $t = 10$ ms időpillanatban léptek be

oktatók kutatómunkájához kapcsolódva, nagyobb volumenű feladatok megoldása is folyik a segítségével.

Tekintve, hogy a jelenleg működő rendszerben az egy évvel előbb használatbaadott DC analízis szegmens üzeme során szerzett minden gyakorlati tapasztalatot figyelembe vettünk, a program üzemi sajátosságai jól megfelelnek azoknak a követelményeknek, amelyeket a feladatok sorozatfuttatása, az átlagos villamosmérnök-hallgató mérsékelt gyakorlata a számítógép-használatban stb. támasztanak. Itt elsősorban a részletes hibajelzés-rendszerre, a felhasználó által értelmezhetetlen program-elakadások kizárására, az operátori teendők kevés és egyszerű voltára gondolunk. Feltétele volt még természetesen a széleskörű felhasználásnak a rendszer részletes leírásának, felhasználói kézikönyvének megjelentetése. Ezt a program használatbaadásával egyidejűleg, megfelelő példányszámban hozzáférhetővé tettük [11].

*

Szerzők e helyen kívánnak köszönetet mondani a Budapesti Műszaki Egyetem és a Villamosmérnöki Kar vezetésének a TRANZ-TRAN programrendszer létrehozásával kapcsolatos munkájuk nívódíjjal való elismeréséért, Dr. Valkó Iván Péter tanszékvezető egyetemi tanárnak a félvezetőeszközök és félvezetős áramkörök gépi analízisével kapcsolatos kutatómunka támogatásáért. Hálájukat fejezik ki dr. Ambrózy András, dr. Gártner Péter, dr. Tassi Gézőné, dr. Telkes Béla, Török Sándor kollégáiknak, továbbá a számítógépes áramkörtervezéssel foglalkozó tudományos diákkör tagjainak, akik a programrendszer felhasználása során szerzett tapasztalataik közlésével hozzájárultak a végleges rendszer optimális kialaki-

tásához. Köszönet illeti az Egyetemi Számítóközpont operátorait a gyakorlati munka során nyújtott segítségért.

I R O D A L O M

- [1] Dr. Csurgay Árpád, dr. Géher Károly, dr. Házman István: Helyzetkép a hálózatelmélet fő fejlődési irányairól. Híradástechnika, XXIII. évf. 10. sz. 161—164. old. (1972)
- [2] Dr. Géher Károly: Számítógép programok katalógusa, 1970. Híradástechnika, XXII. évf. 8. sz. 246—255. old. (1971)
- [3] Dr. Géher Károly: Számítógép programok katalógusa 1971. Híradástechnika, XXIII. évf. 8. sz. 243—250. old. (1972)
- [4] F. H. Branin, G. R. Hogsett, R. L. Lunde, L. E. Kugel: ECAP—2, a new electronic circuit analysis program, IEEE Journal of Solid-State Circuits, V. SC—6, No. 4 (1971)
- [5] F. H. Kuo, W. G. Magnuson: Computer oriented circuit design, Prentice-Hall, Inc. 1969
- [6] Dr. Tarnay Kálmán, Székely Vladimír: Dióda és tranzisztormodellek számítógépes áramkörtervezés céljára, Mérés és Automatika, 17. évf. 4. szám, 130—135. old. (1969)
- [7] Dr. Tarnay Kálmán, dr. Székely Vladimír: TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program, a III. Országos Méréstechnikai Konferencia Kiadványa, 11—18. old. (1972)
- [8] Dr. Tarnay Kálmán, dr. Székely Vladimír: TRANZ-TRAN 2 nemlineáris áramköranalízis rendszer, a Programozási Rendszerek '72 találkozó kiadványa, 299—303 old. Szeged, 1972
- [9] V. Székely, K. Tarnay: Accurate algorithm for temperature calculation of devices in nonlinear circuit analysis programs, Electronics Letters, V. 8, No. 19, pp. 470—472 (1972)
- [10] V. Székely: Accurate calculation of device heat dynamics: a special feature of TRANZ-TRAN circuit analysis program, Electronics, Letters V. 9, No. 6, pp. 132—134 (1973)
- [11] Dr. Tarnay Kálmán, dr. Székely Vladimír: TRANZ-TRAN nemlineáris áramköranalízis program, használati utasítás (1972)