

DR. CSURGAY ÁRPÁD

Távközlési Kutató Intézet

DR. GÉHER KÁROLY

BME Híradástechnikai Elektronika Intézet

DR. HÁZMAN ISTVÁN

BME Híradástechnikai Elektronika Intézet

Helyzetkép a hálózatelmélet fő fejlődési irányairól*

Az MTA Műszaki Tudományok Osztálya mellett dr. Kozma László akadémiai levelező tag elnöklétével működő Távközlési Rendszerek Bizottsága 1970 júliusában elhatározta, hogy tudományos helyzetképet dolgoz ki

- tipikus távközlési rendszerek (rádiórendszerek, vezetékes rendszerek, számítógép-hálózatok) és
- alapvető elméleti módszerek (információelmélet és hálózatelmélet)

területeken [1, 2]. Dolgozatunk az elektronikus áramkörök szempontjából a *hálózatelmélet fő fejlődési irányairól, nemzetközi és hazai helyzetéről igyekszik képet adni, rámutatva* néhány a távközlési rendszerek hazai fejlesztésével és kutatásával kapcsolatos feladatra is.

Mi a hálózatelmélet szerepe a távközlő rendszerek kutatásában és fejlesztésében?

A hálózatelmélet az elektronikus áramkörök — így azokon belül a távközlőrendszerek áramköreinek — *tervezési módszereit alátámasztó tudományág*. A hálózatelmélet kialakulásakor elvonatkoztatva az eszközök konkrét megjelenési formáitól és bevezetve az eszközöket az áramkörben jellemző R , L , C paramétereket és azok szimbolikus jeleit, a legegyszerűbb *eszközmodelleket*, majd szisztematikusan feldolgozva az

- ismert modellű elemekből felépített összetett hálózatok *analízisének* módszereit, később erre építve
- reaktáns és passzív hálózatok alapvető *szintézis* eljárásait

megteremtette a századforduló után (főként a húszas években) a távközlőhálózatok szűrőinek és korrektorainak tervezési eljárásait. A hálózatelmélet fejlődésének az első időszaka a széles sávú erősítők tervezési eljárásainak kidolgozásával, az elektroncső modelljének kialakításával és az elemi lineáris aktív áramkörök tervezési eljárásainak kidolgozásával a negyvenes évek elejére zárult le.

A negyvenes években a rádiólokáció *mikrohullámú és impulzustechnikai* áramköreinek tervezése, majd az ötvenes években kialakult *szilárdtest eszközök* elterjedése egy időre elszakította az áramkörtervezőt

gyakorlatot a hálózatelmélettől, mert a hálózatelmélet nem tudta követni a tervezői gyakorlat igényeit.

Az ötvenes évek elektronikus áramköreinek nagy része, a lineáris aktív, az impulzustechnikai, a nem-lineáris, az elosztott paraméterű és a digitális áramkörök tervezése empirikus vagy félempirikus úton történt. A tervezői gyakorlatban példaorientált heurisztikus eljárások terjedtek el, sokan a hálózatelmélet válságáról beszéltek, vitatva az áramkörtervezés egységes és átfogó elmélettel való megalapozásának lehetőségét.

A hatvanas években a korábban kialakult eszközökből felépített *nagybonyolultságú* áramkörök alakultak ki, megkezdődött az *integrált áramkörti* technológia kialakulása, a fejlődés egyik fő iránya az áramkörök *bonyolultsági fokának* növekedése lett. Ezzel egyidejűleg természetesen *új eszközök* is megjelentek, amelyek bonyolult funkciót egyesítettek egyetlen eszközben. E tendenciák igényelték, a *számítógépek* széles körű elterjedése pedig megteremtette az alapját a *hálózatelmélet* gyors fejlődésének és a tervezői gyakorlattal való összekapcsolódásnak. A hatvanas évek második felében a hálózatelmélet széles körű alkalmazásra talált az elektronikus, a mechanikai, ezen belül az akusztikai, pneumatikus, hidraulikus stb. rendszerek *leírásában és tervezésében*. Az egymás után gyors ütemben megjelenő szilárdtest eszközök a hálózatelméleti metodika mélyebb újraértelmezését és új tételek megfogalmazását követeli meg és viszont: a hálózatelmélet eredményei erőteljesen visszahatnak a szilárdtest áramkörök konstrukciójára.

Bár az elektronikus eszközök alapvető fizikai-kémiai tulajdonságai adottak, mégis az áramkörti alkalmazások lehetőségeinek fejlesztése iránti igény döntően befolyásolja a konkrét eszközök megjelenését. Természetesen a hálózatelméleti megfontolások realizálhatatlanok maradnak, ha a követelmények nem teljesítik az elektronikus eszközök adta konkrét feltételeket.

Itt e bevezetőben le szeretnők szögezni, hogy a legutóbbi évekig, pontosabban a számítógépek széles körű elterjedéséig a jelen tanulmány szerzői is lehetetlennek látták az átfogó hálózatelméleti megalapozás lehetőségét annak ellenére, hogy mindhárman a témakörben dolgoztak. A *hálózatelmélet* a számítógépek tervezésbeli alkalmazásával képes csak az áramkörtervezés átfogó *metodikai* megalapozására.

* A dolgozat az MTA Műszaki Tudományok Osztálya Távközlési Rendszerek Bizottsága által megvitatott tanulmány alapján készült.

Beérkezett: 1972. V. 17.

A hatvanas évek második felében a legfejlettebb elektronikai iparral rendelkező országokban széles körben megindult a számítógépek tervezői gyakorlatban való alkalmazása

- felhasználó-orientált (a tervezőtől programozási ismereteket nem igénylő),
- az eszközökön végzett modellmérések adatait mágnesszalagon tartalmazó (adattár),
- nagy bonyolultságú áramkörök analizisét elvégző programokkal,
- direkt és iteratív szintézis eljárásokkal,
- konstrukciós és rajzdokumentációs programokkal felszerelt programrendszerek kialakulásával.

E programrendszerek nem helyettesítik a tervezőt, de hatékony tervező-gép kapcsolat (interaktív, on-line tervezés) biztosításával megsokszorozzák a tervező alkotóképességét.

E programrendszerek jelentős szerepet játszottak a harmadik generációs áramkörkészlet kialakításában (integrált áramkörök), lehetővé teszik a félvezető technológia rohamos fejlődésének kiaknázását és a negyedik generációs áramkörök tervezésében nélkülözhetetlenek.

Az újabb és újabb eszközök felfedezése (tömbeffektusú félvezető eszközök, amorfi félvezetők stb.), az áramkörtechnológia (többrétegű nyomtatott lapok, hibrid integrált áramkörök stb.) rohamos fejlődése változatlanul és minden bizonnyal folyamatosan igényli a hálózatelméleti metodika és ennek alapján a tervezést alátámasztó programrendszerek továbbfejlesztését.

Ahogy az elektronika egészének fejlődését legmélyebben az új eszközök kidolgozása befolyásolja, úgy adott eszközkészlet esetén az elektronikai berendezések — így a távközlőrendszerek — fejlődése is döntő mértékben függ az áramkörtervezési metodika, tehát a hálózatelmélet fejlődésétől.

A hálózatelmélet módszere

A hálózatelmélet tárgya — e dolgozat célkitűzése és értelmezése szerint — az áramkörtervezés metodikai megalapozása. Módszere az

- áramkör építőelemekre való bontása és
- áramkör építőelemek összekapcsolt rendszereként történő vizsgálata.

A hálózatelmélet építőelem-készlete együtt fejlődik az elektronikus eszközökkel. Minden új eszközhöz meg kell határoznunk az eszköz — rögzített alkalmazási körön belül — összekapcsolás-invariáns modelljét, amely az eszköz áramkörbeli viselkedését jól leírja. A hálózatelmélet fejlődését döntően befolyásolják az

(I) eszközök és környezet kölcsönhatását leíró modellek.

A hálózatelmélet vizsgálja az eszközök összekapcsolási lehetőségeit: az

- (II) összekapcsolási problémakör

tisztázza a „megengedett” összekapcsolási struktúrák halmazát és bonyolult összekapcsolt rendsze-

rek állapotegyenleteinek felírási módját. Az állapotegyenletek megoldásával a

(III) hálózatanalízis

témakör foglalkozik, amely adott modellű építőelemek egy megengedett módon összekapcsolt rendszerében meghatározza a jelek (gerjesztések és feleletek) tulajdonságait.

Előírt specifikációjú áramkör adott építőelem-készlettel való realizációjának kérdéseivel a

(IV) hálózatszintézis

problémakör foglalkozik.

Az áramkör konkrét fizikai struktúrájának tervezése adott modellekből összekapcsolt kapcsolási rajz alapján

- (V) az áramkör-konstrukciós eljárások feladata.

A konstrukció eredményét az áramkör

(VI) rajzdokumentációja

rögzíti.

Mégegyszer hangsúlyozni szeretnők a hálózatelmélet metodikai alapkonceptióját: a fizikai rendszerek közelítő modelljeit építőelem-készletnek (black-box) tekintjük, vizsgáljuk az építőelemek egy rögzített halmazát, azon összekapcsolási műveleteket definiálunk és az így nyert struktúrákat hálózatnak nevezzük. Az építőelem-modellek és a megengedett összekapcsolási műveletek együtt definiálnak egy-egy hálózatostályt. A hálózatelmélet tárgyat e szempontok alapján részterületekre bonthatjuk:

- analóg működésű hálózatok, amelyek közönséges és parciális differenciálegyenletekkel, mint állapotegyenletekkel leírt építőelemekből épülnek fel;
- digitális működésű hálózatok, amelyek két vagy több diszkrét állapotú kapcsolóelemeket tartalmaznak és időfüggetlen vagy időfüggő logikai függvényekkel, illetve függvényrendszerrel írhatók le (kombinációs és szekvenciális hálózatok);

Ezenkívül sok esetben célszerű megkülönböztetni az aktív és passzív hálózatokat, az elosztott paraméterű és koncentrált paraméterű hálózatokat, a lineáris és nemlineáris hálózatokat.

Hangsúlyozni szeretnők, hogy egy adott áramkört, (erősítőt, tárolót) a tervezés különböző fázisában más-más osztályba eső hálózatnak kell tekintenünk és így a tervezési metodika kidolgozása során a hálózatelmélet különböző területeit kell segítségül hívunk. Az 1. ábrán megadtuk a hálózati modellek egy lehetséges osztályozási sémáját.

A klasszikus hálózatelmélet tárgya az analóg működésű koncentrált paraméterű lineáris passzív hálózatok volt. E hálózatok R, L, C elemekből épülnek fel (modellezve a disszipációt, mágneses és villamos energiafelhalmozást). E hálózatok példája azt bizonyította be, hogy a fent említett metodika milyen sikeresen alapozhatja meg az áramkörök széles osztályának tervezési módszereit.

Természetesen az új modellek új problémákat hoztak és a hálózatelméleti kutatóknak egy sor olyan

		Koncentrált		Elosztott C			
		0	1	3	2		
Digitális	A	0000	0001	0011	0010	Passzív	
		4	5	7	6	Aktív	
Analog	A	0100	0101	0111	0110	B	
		12	13	15	14		
		1100	1101	1111	1110	Passzív	
		8	9	11	10		
		1000	1001	1011	1010		
		Nem lin.	D Lineáris		Nem lin.		

HT76-CGH1

1. ábra. Az elektronikus áramkörök osztályozásának egyik lehetséges módja. Az áramkört a tervezés különböző fázisaiban gyakran más-más osztályba eső hálózatnak kell tekintenünk

problémával kellett megküzdeniük, amelyek a klasszikus hálózatelméletben fel sem vetődtek. Az új problémák új módszereket követeltek, átalakították a szemléletet. Talán nem túlzás az az állítás, hogy a hálózatelmélet ma csak annyiban azonos a klasszikus hálózatelmélettel, amennyiben ma is *idealizált modellekből összekapcsolt struktúrák vizsgálatával* foglalkozik.

Az 1. ábrán osztályoztuk a hálózatelmélet tárgyát képező hálózatokat. Az egyes hálózatostályokkal kapcsolatos problémák *jellegét is osztályoznunk kell*, hogy áttekinthessük a fejlődési irányokat, a megoldott és nyitott problémákat:

1. Alapproblémák:

- fizikai struktúrák modellezése az adott hálózatostályba eső modellekkel, e modellek alkalmazási korlátai, modell-leírási problémák;
- összekapcsolási problémakör: egzisztencia (megoldás-létezési), egyértelműségi problémák (analízis);
- adott építőelem-készletből felépített hálózatok realizálhatósági kritériumai;
- szintézisproblémák (approximáció, realizálási eljárások);
- algoritmizálhatóság egzisztenciaproblémái.

2. Algoritmikus problémák:

- a modelleket mért adatokból generáló, vagy fizikai térből előállító algoritmusok;
- adott hálózat állapotegyenletét ellentmondásmentesen és minimális leíró paramétert tartalmazó módon generáló algoritmusok;
- hálózatostályonként az állapotegyenleteket hatékonyan megoldó algoritmusok (numerikus és szimbolikus algoritmus);
- optimalizálási stratégiák algoritmusai;
- direkt szintézis algoritmusok.

3. Programrendszerek kidolgozásával kapcsolatos problémák:

- modelleket, szabványokat, tervezési tapasztalatokat tartalmazó adattárak kidolgozása;
- az algoritmusok egységes adatbázisú, láncolható és interaktív beavatkozást biztosító programrendszerének kidolgozása, érvényesítve a dokumentációautomatizálás és az optimális ember-gép kapcsolat szempontjait (felhasználó orientált rendszerek).

Ma a hálózatelmélet a gyakorlati tervezői munkát elsősorban a programrendszereken keresztül támogatja, de a hatékony programrendszerek kidolgozása igényli (feltételezi) az algoritmusok kidolgozását, azok pedig az alapproblémák megoldására épülnek. Az egyes hálózatostályokban a felsorolt feladatok súlya, jelentősége különböző; sok algoritmust és programot dolgoztak ki, amelynek egzisztenciális kérdései, korlátai nem ismertek, a gyakorlatban mégis sikeresen alkalmazásra kerültek. Ez természetesen nem csökkenti az alapproblémák megoldásának jelentőségét.

1. A hálózatelmélet fejlődési irányai

A következőkben néhány általunk fontosnak tartott megjegyzéssel szeretnők a fejlődés irányait érzékeltetni. A megadott referenciák csak illusztrálni igyekeznek — a teljességre való törekvés igénye nélkül — a főbb irányokat, elsősorban az alapproblémák hangsúlyozva; azokat is csak néhány tipikus területen. A megoldott alapproblémákra épülő — sok esetben heurisztikus alapokon nyugvó — konkrét tervezési feladatok kidolgozása, tehát a hálózatelmélet alkalmazása a témakörben megjelenő publikációk döntő többségét alkotja. E rendkívüli aktivitás jelentősége nagy, mert biztosítja az elmélet és a gyakorlat kapcsolatát, de emellett visszahat az alapproblémák kitzzésére és megoldására is.

Koncentrált paraméterű modellek

Az áramkörök igen széles osztályában az áramköri építőelemek koncentrált paraméterű, tehát közönséges differenciálegyenlet-rendszernek eleget tevő állapotváltozójú modellezése kielégítő. A passzív alkatrészek és a félvezető eszközök széles osztályára ismeretesek az *egyenáramú*, egy-egy rögzített egyenáramú munkapont kis környezetében érvényes *lineáris* és a nagyobb jelekre is helyes választ adó nemlineáris *transziens* modellek. Az elmúlt években nagy figyelmet fordítottak a félvezető eszközök közelítő modellezéséhez vezető szisztematikus eljárások kidolgozására [1–1j], amelyek különösen integrált áramkörök esetén jelentősek [1–2].

A koncentrált paraméterű elemekből felépített közelítő modellek állapotát egy időfüggvényekből álló véges dimenziójú vektor írja le ($x(t)$), és az eszköz és a környezet kölcsönhatását

elsőrendű (általában nemlineáris) differenciálegyenlet-rendszer, vagy Volterra típusú nemlineáris integrálegyenlet írja le.

Valamennyi eszköznél ismernünk kell a környezet hatását reprezentáló határfeltételek megengedett halmazát és a megengedett határfeltételekhez tartozó feleleteket.

Elosztott paraméterű modellek

Az elosztott paraméterű modellek a fizikai rendszerek állapotát leíró egyenletek (Maxwell-egyenletek, Schrödinger-egyenlet, félvezetőtranszport-egyenletek) közvetlen modellezései, így pontosabb képet adnak az építőelemekről, de a parciális differenciál-egyenletek megjelenése megnehezíti a modellek áramkörbeli kezelését.

Az egyes koncentrált paraméterű félvezetőeszközmodellek érvényességi köre korlátozott, az összekapcsolás invariáns módon érvényes, munkaponti és hőfokfüggést is helyesen leíró modellek csak néhány eszköze állnak rendelkezésre. Nehézségek vannak az egyes modellek érvényességi korlátainak meghatározásában is, ezért a közelmúltban és a közeljövőben az eszközökben lejátszódó fizikai folyamatok mélyebb modellezésének az áramköri modellekkel való összevetése fontos feladat. Az elektromágneses tér és a félvezető eszközök kölcsönhatásának vizsgálata (fizikai terek modellezése) egy sor esetben választ ad az összekapcsolási struktúrától függő viselkedésre és néhány új eszköznél a működési mechanizmus követésének egyetlen útja.

Az áramköri alkalmazásoknak azokban az esetekben, amikor az építőelem elosztott paraméterű jellege a működésben lényeges szerepet játszik (mikrohullámú, ultrarövidhullámú analóg áramkörök, integrált áramkörök néhány osztálya, pikosecundumos logikai áramkörök stb.) természetesen a modelleknek is vissza kell tükrözniük e tény. Figyelve e területet, jelentős aktivitás kibontakozásának lehetünk tanúi e témakörben, amit a „fizikai terek modellezése” címmel jelölnek meg és amely az elektronikai eszközök modellezésében jelentős szerepet játszik [1–3, 1–4].

Az univerzális analízisprogramokban használt modellekről rövid áttekintést ad az [1–5] referencia.

Lineáris koncentrált paraméterű hálózatok

A klasszikus hálózatelmélet elsősorban ebbe az osztályba eső hálózatok realizálhatósági kritériumait, analízisének és szintézisének problémáit vizsgálta [1–6, 1–7, 1–8]. Az alapproblémák, egzisztenciális problémák és szintézis algoritmusok e hálózatok széles osztályára, mind a passzív, mind az aktív esetben megoldottak tekinthetők [1–9, 1–10, 1–11, 1–12]. E témakörben a rögzített technológiájú áramkörök által felvetett alapproblémák (tolerancia és érzékenységvizsgálattal kapcsolatos tételek, adott értéktartományba eső elemekkel realizálható osztályok, lineáris integrált áramkörökkel végzett szintézisfeladatok stb.) megoldása áll az érdeklődés középpontjában. Éppen e hálózatok elméletének sikerei ösztönöztek a korszerű hálózatelméleti módszerek továbbfejlesztésére.

Lineáris elosztott paraméterű hálózatok

Az elosztott paraméterű hálózatok realizálhatósági vizsgálatai jelentős szerepet töltenek bé mind az építőelemek modellezésének, mind analízis- és szintézisproblémáknak megoldásában. A passzív n-kapuk realizálhatósági kritériumainak kidolgozása után [1–13] a közelmúltban olyan fizikai rendszerek hálózati modellezésének is kialakulóban van az elmélete, amelyek kapui nem időfüggvénypárral, hanem fizikai térjellemező párral vannak jellemezve [1–14]. Az építőelemek halmazának rohamos bővülése igényli a hálózatelmélettől az építőelem-invariáns elvek és tulajdonságok vizsgálatát is [1–15]. Az elosztott paraméterű hálózatok elméletének axiómatikus felépítése igyekszik ezeket az építőelem-invariáns tulajdonságokat felismerni és rendszerezni. A koncentrált paraméterű rendszerek építőelem-invariáns elmélete [1–16] teljes összhangban van az építőelemek felvételével felépített hálózatelméleti eredményekkel. Ez az állítás az elosztott paraméterű hálózatok elméletében nem mondható el. Ha azonban az elosztott paraméterű hálózatok építőelemeinek a jellegét, pl. veszteségmentes távvezeték szakaszok rögzítjük, akkor a többkomplexváltozós leíró függvények bevezetése már megteremtheti az axiómatikus (deduktív) és az építőelemekből kiinduló (induktív) elméleti felépítés összhangját.

A lineáris időinvariáns elosztott paraméterű hálózatok elméletének jelenlegi fejlődésére a többkomplexváltozós realizálhatósági kritériumok és szintézis-eljárások [1–17], az inhomogén és többszörösen csatolt tápvonalakat tartalmazó hálózatszintézis-eljárások kidolgozása a jellemző [1–18, 1–19, 1–20].

Analóg áramkörök analízise számítógépeken

Lineáris és nemlineáris koncentrált paraméterű áramkörök digitális számítógépen történő szimulációjára az elmúlt évtizedben felhasználó-orientált univerzális programokat dolgoztak ki [1–22, 1–23, 1–24]. A kidolgozott programok alkalmasak kis- és közepes méretű áramkörök DC, AC, tolerancia és tranziens analízisére.

A programok alkalmazását nehezíti az a tény, hogy az állapotegyenletek automatikus generálásához a határ és kezdeti feltételeket ellentmondásmentesen kell megadni, a DC és AC megoldás stabilitásának ellenőrzésére nincsenek beépítve automatikus ellenőrző algoritmusok és azokban az esetekben, amikor erősen eltérő időállandójú az állapotegyenletrendszer (stiff-egyenletek) a megoldáshoz szükséges gépidő igen nagy. E problémák elhárítására jelentős erőfeszítéseket kell tenni [1–23, 1–24].

N. Wiener és munkatársai vizsgálatokat végeztek analitikus nemlineáris elemekből felépített rendszerek analízisére. A Volterra-soros reprezentáció bevezetése lehetőséget ad arra, hogy kis nemlinearitású áramkörök torzításvizsgálatait komplex algebrai feladatra vezessük vissza [1–21].

Lineáris elosztott paraméterű aktív áramkörök analízisének a frekvenciatartománybeli felelet létezési feltételeit, a kauzalitást és a stabilitást a numerikus analízis megkezdése előtt ugyancsak automatikusan kell ellenőrizni.

Elosztott paraméterű nemlineáris áramkörökben a megoldás létezésének, egyértelműségének és stabilitásának általános feltételei nem ismertek, csak speciális esetekben ismeretes a megoldás.

Nemlineáris áramkörök szimulációjában az analóg és digitális számítógépet egyidejűleg alkalmazó hibrid módszerek alkalmazása sokatígérőnek látszik [1–37].

Az analóg áramkörök szimbolikus (betűs) analízise fontos szerepet játszik az áramkörök stabilitásvizsgálatában és tervezési algoritmusaiban [1–26].

Digitális hálózatok

Jellegzetességük a hálózat funkcióinak logikai kapcsolatok rendszerében történő kifejezése. A teljes hálózat elemi logikai műveleteket megoldó „tipizált” elemi hálózatok ismételt kombinálásával épül fel, sok összetevős nagy rendszerre. Tárgyalásuk így két lépcsőre tagolódik:

- tipizált elemi hálózatok problémaköre;
- elemi hálózatok optimális rendezésének problémaköre adott funkciók legkedvezőbb teljesítése érdekében.

A hálózatok elemzésénél kezdetben intuitív módszereket alkalmaztak (pl. egyszerűbb telefonközpontok tervezése). A fejlődés során a megoldandó feladatok egyre nagyobb rendszerbonyolultsággal párosultak, így szisztematikus eljárások alakultak ki [1–41, 1–42, 1–43].

Az automataelmélet kialakulása és alkalmazása, majd az itt különösen indokolt (elemi műveletek igen nagy számban történő megismétlése) számítógépes eljárások bevezetése igen nagy bonyolultságú rendszerek modellezését is lehetővé tette.

Az elemi hálózatok kialakításának témaköre függ a mindenkor technikai színvontól. Így a kezdetben alkalmazott elektromechanikus (jelfogós) elemi hálózatokat jelenleg az integrált áramköri technika alapuló elemi hálózatok váltották fel, amelyek kis helyigényű, nagysebességű rendszerek kialakításának előfeltételét biztosították. Az elemi hálózatok felépítése kihat a leíró logikai függvények bázis-rendszerére és a megépítendő rendszer diszkutálásánál felhasználandó algebrai struktúrára is (Boole, SHEFFER-PEIRCE algebra).

Az adott funkciót legjobban teljesítő digitális rendszerek kialakításánál általában optimalizálási feladatokat kell megoldani, melyek rendszerint több, alkalmanként rangsorolt feltételt vesznek figyelembe. A klasszikus struktúrákban az optimalizáló megoldás általában a matematikai minimál Boole-alakhoz vezetett. Integrált eszközök felhasználásával számos egyéb szempont (minimál alak, szintek száma, terhelési kötöttségek, hazardmentesség, tok-optimum, költség, megbízhatóságjellemzők teljesítésének mértéke stb.) szerinti optimalizálás került előtérbe.

A nagy bonyolultságú, nehezen áttekinthető rendszerek vizsgálata szisztematikus szimulációs és diagnosztizáló eljárások kidolgozását tette szükségessé.

Külön problémakör a tranzienst és hazard jelen-

ségek alapján történő rendszervizsgálat, továbbá a rendszer megbízhatósági követelmények előzetes tervezés útján történő teljesítése.

A tervezés automatizálásának problémái

Azokban az áramkörösztályokban, ahol az építőelemek modellezésének és az áramkör gépi szimulációjának alapproblémái (megoldáslétezés, egyértelműség, állapotegyenlet-generálás és megoldás) megoldottak, felvethető a tervezési feladat részleges automatizálásának problémája:

- a specifikációt közelítő modellekkel teljesítő áramkör meghatározása a tervező és a gép közvetlen kapcsolatának biztosításával (interaktív vagy on-line módon), egyes speciális lineáris időinvariáns áramkör esetén direkt szintézissel,
- a közelítő modelleket tartalmazó realizációban a pontos modellek bevezetése elrontja a specifikációt, ami iteratív tervezési algoritmusokkal állítható vissza.

Az iteratív tervező algoritmusok ismételt analízisre épülnek, így azok a módszerek, amelyek az ismételt analízis alkalmazását egyszerűsítik (szimbolikus analízis, érzékenységmódszerek stb.) fontos szerepet játszanak [1–27].

A hálózatelméleti módszerek alkalmazása a tervezési automatizálásban csak akkor bizonyul gazdaságosnak, ha a specifikációtól a rajzdokumentációig terjedő tervezési folyamat minden munkai igényes és algoritmizálható fázisa kihasználja a gép nyújtotta lehetőségeket [1–28, 1–29].

Ez indokolja a közelmúltban tapasztalható serénységet a geometriai struktúrák (nyomtatott lapok alkatrész-elrendezése és huzalozástervezése, hibrid integrált áramkörök maszktervezése) tervezésének algoritmizálásában. A tervezendő geometriai struktúrát cellaszimbólum konfigurációval modellezzük [1–30] és a különböző struktúrákhoz rendelt bűntetőfüggvények minimalizálására vezetjük vissza a feladatot.

A jelenlegi helyzetben mind a kapcsolási rajz, mind a geometriai struktúra tervezésében csak a tervezés egy része algoritmizálható, így igen fontos az ember–gép kapcsolat hatékonyságának biztosítása [1–31, 1–32].

A rajzdokumentáció feladatainak algoritmizálásához hatékony algoritmusokra van szükségünk két-dimenziós geometriai alakzatok kezeléséhez és a rajzolóautomaták vezérléséhez [1–36].

2. Hazai helyzetkép

A Budapesti Műszaki Egyetem Villamosmérnöki Karán az 1950-es években kezdett kialakulni a hálózatelméleti oktatás és kutatás. Az 1960-as években ez néhány magyar és idegen nyelvű könyvben [2–1, 2–2, 2–3, 2–4, 2–5], továbbá néhány említésre méltó publikációban tükröződött. Az 1960-as évek végén a Műszeripari Kutató Intézetben és a Távközlési Kutató Intézetben is olyan osztályok

alakultak, melyek fő tevékenységüként a hálózatelméleti kérdések vizsgálatát választották. 1969-ben pedig a Számítástechnikai Koordinációs Intézetben tervezésautomatizálási laboratórium létesült. Ezen intézmények fő kutatási irányait az alábbiakban foglalhatjuk össze.

A *Műszeripari Kutató Intézet* elsősorban az elektronikus áramkörök analízisére vonatkozó számítógépprogram-rendszer kidolgozásában ért el eredményeket, továbbá úttörő szerepet játszott az aktív RC áramkörök elméletének és tervezési módszereinek kidolgozásában, valamint a korszerű elektronikus áramkörtervezési módszerek meghonosításában. A *Távközlési Kutató Intézet* az elektronikára vonatkozó számítógépprogram-rendszer kidolgozásával elsősorban a mikrohullámú berendezések fejlesztését segíti elő. E munkák igen széles területet fognak át az elektronikus eszközök modellezésétől egészen a konstrukciós tervezésig és dokumentáció megoldásáig. Külön kiemelendő az a sikeres tevékenység, amely a Távközlési Kutató Intézetben a hálózatelmélet alaproblémáinak, elsősorban az elosztott paraméterű hálózatok kérdéseinek megoldására irányul.

A hazai helyzet ismertetésénél kiemeljük a *Híradástechnikai Ipari Kutató Intézetben* folyó munkákat, amelyek a félvezető alapú és szigetelő alapú integrált áramkörök hazai bevezetését támasztják alá. Az *MTA—AKI* kiterjedt tevékenységet folytat a digitális berendezések konstrukciós tervezésével kapcsolatban. A nyomtatott áramkörök tervezésében már eddig is jelentős eredményeket értek el. A *Számítástechnikai Koordinációs Intézet* tervezésautomatizálási osztálya a digitális berendezések huzalozási, rajzoló és szimulációs kérdéseivel foglalkozik és biztosítja hazánk részvételét az egységes számítástechnikai rendszer kialakításában.

A hálózatelmélettel foglalkozó magyar nyelvű publikációk elsősorban a Híradástechnika folyóiratban jelennek meg. 1970-ben elkezdődött a Távközlési Kutató Intézet szeminárium közleményeinek kiadása, mely szisztematikusan feldolgozza a hálózatelmélet területén elért eredményeket. Az 1966–69 periódusban elért hazai hálózatelméleti eredményeket az *URSI* (Nemzetközi Rádió Tudományos Unió) Magyar Nemzeti Bizottságának jelentése tekinti át [2–6]. Az elektronikára vonatkozó számítógépprogramok katalógusait a Híradástechnika c. folyóirat évenként rendszeresen közzé teszi [2–7, 2–8, 2–9]. Az idegen nyelvű publikációkat a *Periodica Polytechnica* és az *Acta Technica* közli.

A hazai hálózatelméleti kutatások szempontjából fontos szerepet játszik az *MTA Műszaki Tudományok Osztálya* és a Híradástechnikai Tudományos Egyesület rendezésében 4 évenként sorra kerülő *Mikrohullámú Összeköttetések Kollokvium* [2–10, 2–11, 2–12]. Ezen nemzetközi rendezvény keretében állandó hálózatelméleti szekció működik. 1959-től 1971-ig így a hálózatelmélet több neves képviselője járt Magyarországon, tartott előadást és adott lehetőséget személyes konzultációkra.

Több hazai konferencia is rendszeresen foglalkozik a számítógépes áramkörtervezés kérdéseivel, pl. az

Országos Elektronikus Műszer- és Méréstechnikai Konferencia [2–13].

1971-ben megalakult a Híradástechnikai Egyesületben a Számítástechnikai Szakosztály, mely többek között feladatának tekinti a hálózatelméleti eredmények gyakorlati bevezetésének elősegítését is.

3. Oktatási kérdések

Az eddig leírtakból kiviláglik, hogy az elektronikus áramkörök tervezésének és a hálózatelméleti kérdéseknek meghatározó szerepük van a villamosmérnökök, különösen a híradástechnika szakos hallgatók képzésében. A jelenlegi oktatás elsősorban villamosságtan, elméleti villamosságtan, elektroncsövek és félvezetők, lineáris hálózatok, erősítők, nemlineáris áramkörök, impulzustechika, antennák és tápvonalak, logikai kapcsolástan tantárgyak keretében folyik. A Villamosmérnöki Karon indított szakmérnöki szakok többségében találunk hálózatelmélettel és elektronikus áramkörtervezéssel foglalkozó tantárgyakat. Ezek segítséget nyújtanak a korszerű hálózatelméleti és elektronikai eredmények szélesebb körű ismertetésére. A BME Továbbképző Intézet tanfolyamai az egyetemen és a kutatóintézetekben dolgozó szakértők bevonásával a gyárakban dolgozó mérnökök számára biztosítják a hazai munkák eredményeinek megismerését. Az elmúlt évtizedben többen szereztek doktori címet és kandidátusi fokozatot a hálózatelmélet területéről.

Az integrált áramköri technológia és a számítógépes módszerek elterjedése következtében a lineáris passzív áramkörök, a lineáris aktív áramkörök, a nemlineáris áramkörök, az impulzustechikai áramkörök, digitális áramkörök és az elosztott paraméterű áramkörök vizsgálata közösen végezhető el. A fejlődés útja tehát az, hogy ezen elektronikus áramkörök analízisérol, szintézisérol és tervezésérol egységes képet lehet majd kialakítani. Ennek érdekében a közös elméleti alapok hangsúlyozása mellett jelentős laboratóriumi képzésre is szükség van. Az elektronikus áramkörök oktatásánál elsőként lehet és kell megvalósítani a „tervezz—építs—mérj” elvet. Ennek elengedhetetlen feltétele a számítógépekkel történő számítások elvégzésének lehetősége, az integrált áramköri eszközök részbeni előállítás, az integrált áramkörök alkalmazástechnikáját lehetővé tevő laboratóriumi felszerelések és mőhelykapacitás biztosítása.

A korszerű számítási módszerek és az új tervezési metodika elsajátítása érdekében szorgalmazni kell a hazai kidolgozású felhasználó-orientált program-rendszerek ismertetését különböző tanfolyamok (BME Továbbképző Intézet, METESZ) keretében.

4. Következtetések

Az előzőekben a hálózatelméleti kérdéseket a távközlési rendszerek szempontjából fontos elektronikus áramkörök vonatkozásában tekintettük át. Bemutattuk, hogy a hálózatelmélet a korszerű áramkörtervezés alapvető módszere. A hálózatelmélet, mely első alapvető sikereit a távközlő berendezések

szűrőinek, korrektorainak és erősítőinek tervezésénél érte el, napjainkban igen széles szakmai területen alkalmazásra talál.

Az MTA Távközlési Rendszerek Bizottsága előző helyzetképei az alkalmazások szempontjából tipikus távközlési rendszerekkel foglalkoztak, úgymint a mikrohullámú rádióösszeköttetésekkel [1], a vezetékes távközlés problémáival [2] és az adatátviteli hálózat kérdéseivel. A felsorolt helyzetképekből kiviláglik, hogy a rádióösszeköttetések technikájának fejlesztése érdekében különös fontosságot kell tulajdonítani az elektronikus áramkörök tervezési módszereinek kidolgozására, különös tekintettel a nemlineáris áramkörök családjára. A vezetékes távközlés szempontjaiból említést érdemel a digitális szűrés és korrigálás (pl. transzverzális korrektor) problémaköre. Az adatátviteli hálózat biztosítja a tervezéshez szükséges számítógép háttérrel azáltal, hogy az alkalmazók széles körének lehetőséget nyújt az on-line, interaktív tervezésre, az elektronikai adatbank használatára stb.

A hálózatelméleti módszerek nemcsak a távközlőrendszerek fejlesztéséhez csatlakoznak, hanem szoros kapcsolatban állanak az elektronikus eszközök kidolgozásával.

A hálózatelmélet hazai fejlődésére az elkövetkezendő években az integrált áramkörti technológia, a számítógép-program-rendszerek kialakulása és a digitális áramkörti kérdések előtérbe kerülése lesz jellemző.

Az alábbiakban felsorolunk több témacsoportot, melyeknek hazai művelése indokoltnak látszik:

1. Egységes áramkörtervezési elmélet kidolgozásában való közreműködés;
2. Elektronikai tervezésre vonatkozó számítógép-program-rendszer kidolgozása és bevezetése;
3. Elektronikus eszközök, elsősorban integrált áramkörök tervezésének hálózatelméleti kérdései;
4. Integrált áramkörök alkalmazástechnikájára vonatkozó kutatások;
5. Nemlineáris elektronikus áramkörök számítási módszereinek vizsgálata;
6. Logikai hálózatok számítógépes vizsgálata digitális berendezések tervezése céljából.

5. Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetüket fejezik ki az MTA Műszaki Tudományok Osztálya Távközlési Rendszerek Bizottsága tagjainak a dolgozat alapjául szolgáló tanulmány részletes megvitatásáért és sokoldalú észrevételeikért.

IRODALOM

- [1] *Berceli T.*: A mikrohullámú összeköttetések fejlődési irányai. Híradástechnika, 1971. jún. XXII. évf. 6. sz. 161—164. old.
- [2] *Lajtha Gy., Gordos G., Horváth I., Lajkó S.*: A vezetékes távközlés tudományos helyzetképe. Híradástechnika, 1971. dec., XXII. évf. 12. sz. 353—359. old.
- [1—1] *F. A. Lindholm, D. J. Hamilton*: A Systematic Modeling Theory for Solid-State Devices, Solid-State Electronics, Pergamon Press, London, 1964. pp. 771—783.
- [1—2] *J. G. Linvill*: Modelling of Integrated Circuits, SSCT-68, Prága, 1968.
- [2—3] *L. B. Felsen, N. Marcuvitz*: Model Analysis and Synthesis of Electromagnetic Fields, PIBMRI Report sorozat, Polytechnic Institute of Brooklyn, New York.
- [1—4] *A. Scott*: Active and Nonlinear Wave Propagation in Electronics, Wiley-Interscience, New York, 1970.
- [1—5] *C. O. Harbourt*: Models for Computer Analysis Programs, 5. fejezet, W. Zobrist, Network Computer Analysis, McDonald, London, 1969.
- [1—6] *O. Brune*: Synthesis of Finite Two Terminal Networks, J. Math. and Phys. vol. 10, pp. 191—236, Oct. 1931.
- [1—7] *Y. Oono, K. Yasura*: Synthesis of Finite Passive 2n-Terminal Networks, Mem. Kyushu Univ. vol. 14, No. 2, 1954.
- [1—8] *V. Belevitch*: Classical Network Theory, Holden-Day, London, 1968.
- [1—9] *D. C. Youla, P. Tissi*: n-port Synthesis via Reactance Extraction, IEEE Convention Record, 1966 Part 7, pp. 183—208.
- [1—10] *D. C. Youla*: Cascade Synthesis of Passive N-ports, PIB Report, No RADC-TDR-64-332, New York 1964.
- [1—11] *B. McMillan*: Introduction to Formal Realizability Theory, BSTJ, Vol. 31, pp. 217—279, 541—600, 1952.
- [1—12] *Y. Oono*: Formal Realizability of Linear Networks, Proc. of the Symposium on Active Networks, PIB, New York, 1960.
- [1—13] *D. C. Youla, L. Castriota, R. J. Carlin*: Foundations of Linear Passive Networks, IRE Trans. on Circuit Theory, CT-6/1, pp. 102—124, 1959.
- [1—14] *A. H. Zemanian*: The Hilbert-Port: An Extension of the Concept of the N-port, Research Report, S.U.N.Y., Stony Brook, N.Y. 1969.
- [1—15] *H. J. Carlin*: Network Theory without Circuit Elements, Proc. of the IEEE, 55/4, pp. 482—497, 1967.
- [1—16] *R. E. Kalman*: Mathematical Description of Linear Dynamical Systems, Journal of SIAM on Control, A-1/2, 1963.
- [1—17] *T. Koga*: Synthesis of Finite Passive N-Ports with Prescribed Positive Real Matrices of Several Variables, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-15/1, pp. 2—23, 1968.
- [1—18] *E. N. Protonotarios, O. Wing*: Theory of Nonuniform RC Lines, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-14/1 pp. 2—20, 1967.
- [1—19] *D. C. Youla*: Analysis and Synthesis of Arbitrarily Terminated Lossless Nonuniform Lines, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-11, pp. 363—372, 1964.
- [1—20] *J. D. Rhodes*: The Theory of Generalized Interdigital Networks, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-16/3, pp. 280—288, 1969.
- [1—21] *S. Narayanan*: Transistor Distortion Analysis using Volterra Series Representation, BSTJ, vol. 46, pp. 99—1024, 1967.
- [1—22] *W. Zobrist*: Network Computer Analysis, McDonald London, 1969.
- [1—23] *I. W. Sandberg*: Some Theorems on Properties of DC Equations of Nonlinear Networks, BSTJ, 48/1, 1969.
- [1—24] *H. Shichmann*: Integration System of a Nonlinear Network Analysis Program, CT-17/3, 1970.
- [1—25] *R. E. Kalman, P. L. Falb, M. A. Arbib*: Topics in Mathematical System Theory, McGraw Hill, N.Y. 1969.
- [1—26] *T. Kobylarz*: Computer Determination of Symbolic State Equations for Nonlinear Circuits, IEEE Conference on CAD Southampton, 1969.
- [1—27] *S. W. Director, R. A. Rohrer*: Automated Network Design—The Frequency Domain Case, IEEE Trans. on Circuit Theory, CT-16/3, pp. 330—337, 1969.
- [1—28] *I. Dugalch*: The Applicability of Computer-Aided Design as a System Engineering Tool, Proc. of IEEE 55/11. November, 1967.
- [1—29] *J. A. Narud*: Present and Future Trends in Integrated Circuits, Technical Report, New York University, 1968.

- [1—30] C. Y. Lee: An Algorithm for Path Connections and Its Applications, IEEE Trans. on Electronic Computers, EC-10/3, pp. 346—365, Sept. 1961.
- [1—31] M. L. Dertouzos: CIRCAL: On-line Circuit Design, Proc. IEEE, 55/5, pp. 637—654, 1967.
- [1—32] H. C. So: Analysis and Iterative Design Networks Using On-line Simulation, System Analysis by Digital Computer (F. F. Kuo, J. F. Kaiser), Wiley, 1966.
- [1—33] C. Pottle: State-space Techniques for General Active Circuit Analysis, System Analysis by Digital Computer (F. F. Kuo, J. F. Kaiser), Wiley, 1966.
- [1—34] E. S. Kuh, D. M. Layton, J. Tow: Network Analysis and Synthesis via State Variables, Network and Switching Theory (G. Biorci), Academic Press, N. Y. 1968.
- [1—35] J. K. Hawkins: Circuit Design of Digital Computers, John Wiley, New York, 1968.
- [1—36] G. Bracchi, D. Ferrari: A Graphic Language for Describing and Manipulating Two-Dimensional Patterns (CADEP), Computer Graphics Symposium, Uxbridge, April, 1970.
- [1—37] W. Chen: Iterative Solution of Large-Scale Systems by Hibrid Techniques, IEEE Trans. Computers, C-19, pp. 879—889, 1970.
- [1—38] W. H. Kautz: Bypass Switching for Cellular Cascades, IEEE Trans. on Computers, C-19, pp. 837—839, 1970.
- [1—39] T. Janisz, R. C. Martin: Interconnection of High-Speed Logic Circuits. IEEE Trans. on Computers, C-19, pp. 831—837, 1970.
- [1—40] ICL-LIDO, Logic In Documentation Out, CAD Conference, Southampton, 1969.
- [1—41] Szittya O.: Logikai kapcsolástan, J5-963, Tankönyvkiadó, 1971.
- [1—42] M. A. Harrison: Introduction to Switching and Automata Theory, McGraw-Hill, 1965.
- [1—43] F. C. Hennie: Finite State Models for Logical Machines, John Wiley, 1968.
- [2—1] Hennyey Z.: Lineáris áramkörök elmélete, Akadémiai Kiadó, 1958.
- [2—2] Z. Hennyey: Linear Electric Circuits, Pergamon Press, Oxford, 1962.
- [2—3] Szendy K.: Korszerű hálózatszámítási módszerek, Akadémiai Kiadó, 1967.
- [2—4] Géher K.: Lineáris hálózatok, Műszaki Könyvkiadó, 1968.
- [2—5] T. Bereeli: Reflex Klystron Circuits, Akadémiai Kiadó, 1967.
- [2—6] Hungary, Report of the URSI National Committee 6.3. Circuit Theory, Budapest, 1969.
- [2—7] Számítógépprogramok áramkörök tervezésére. Híradástechnika, XIX. évf. 6. sz. 169—173. old. 1968. június.
- [2—8] Számítógépprogramok katalógusa 1968. Híradástechnika, XX. évf. 8. sz. 238—251. old. 1969. augusztus.
- [2—9] Számítógépprogramok katalógusa 1969. Híradástechnika, XXI. évf. 6. sz. 178—184. old. 1970. június.
- [2—10] Proceedings of the Second Colloquium on Microwave Communication. Akadémiai Kiadó, 1963.
- [2—11] Proceedings of the Third Colloquium on Microwave Communication. Akadémiai Kiadó, 1968.
- [2—12] G. Bognár (Ed.): Proceedings of the Fourth Colloquium on Microwave Communication. Akadémiai Kiadó, 1970.
- [2—13] Mérés és Automatika, XVII. évf. 4. sz. 121—176. old. 1969. április.