

77-02-04 HB 1423

híradástechnika

VOLUME L.

1999/9

50th
ANNIVERSARY



journal on
communications
computers
convergence
contents
companies

JOURNAL ON C⁵

A PUBLICATION OF THE SCIENTIFIC SOCIETY FOR TELECOMMUNICATIONS, HUNGARY

SPONSORED BY

Főszerkesztő / Editor in chief
SIMONYI ERNŐ

Rovatvezetők / Senior editors
BARTOLITS ISTVÁN
KOSÁRSZKY ANDRÁS
TORMÁSI GYÖRGY
TÓTH LÁSZLÓ
ZSÓTÉR JENŐ

Munkatársak / Editorial assistants
HOLLÓ KATALIN
LESNYIK KATALIN
SELMECZI VILMOS

Szerkesztőbizottság / Editorial board
ZOMBORY LÁSZLÓ elnök / president
ANTALNÉ ZÁKONYI MAGDOLNA
BATTISTIG GYÖRGY
BERCELI TIBOR
BOTTKA SÁNDOR
CSAPODI CSABA
DROZDY GYÖZŐ
GORDOS GÉZA
GÖDÖR ÉVA
KAZI KÁROLY
PAP LÁSZLÓ
SALLAI GYULA
TÖLÖSI PÉTER

Szerkesztőség / Editorial office

HÍRADÁSTECHNIKA

1061 Budapest, Paulay E. u. 56. II.14/A.

Telefon:(361) 341-6421, (361) 470-0713

Fax: (361) 341-6421, (361) 470-0713

Előfizetés / Orders to

Híradástechnikai Tudományos Egyesület

1055 Budapest, Kossuth tér 6-8.

Tel./Fax: (361) 353-1027

* 2000. január 30-ig 50% kedvezmény.

2000-es ELŐFIZETÉSI DÍJAK (12 szám + 1 CD)

Hazai közületi előfizetők részére

1 évre 20000 Ft +12% ÁFA = Btto 22400 Ft

Hazai egyéni előfizetők részére*

1 évre 4000 Ft +12% ÁFA = Btto 4480 Ft

HTE tag előfizetők részére

1 évre 2000 Ft +12% ÁFA = Btto 2240 Ft

Subscription rates for foreign subscribers in 2000

(12 issues + 1 CD) 100 USD, single copies 10 USD

Transfer should be made to the Scientific Society for Telecommunications

H-1055 Budapest, Kossuth tér 6-8.

ERICSSON 



Communication Authority, Hungary

NOKIA

SIEMENS



antenna
hungária



HÍRADÁSTECHNIKA, JOURNAL ON C⁵ is published monthly, in English and in Hungarian by Regiszter Kft.

H-1164 Budapest, Csókakő u. 27. Phone: (361) 400-2166, 400-2167, Fax: 400-2168.

Type-setting by HTE. Printed by Regiszter Kft.

HU ISSN 0018-2028



50 years

from the Telecommunications Scientific Society

CONTENTS	1
Communications	
Ladvánszky J.: <i>Lineáris erősítők instabilitásának megszüntetése</i>	2
Computers	
Szabó Zs. és Iványi A.: <i>Anizotrop anyagok hiszterézis karakterisztikájának vektoriális szimulációja</i>	15
Convergence	
Heller K.: <i>A versenyszabályozás távközlési ágazat-specifikus alkalmazása</i>	39
Companies	
Molnár A. és Vámosy Z.: <i>Exploratores, a négylábú lépegető robot</i>	50

Abstract: In this issue 4 papers are presented. Section **Communications** is represented by a single contribution on Stabilisation of Linear Amplifiers. Section **Computers** is comprised of 1 contribution on Simulation of Vectorial Hysteresis in Anisotropic Materials. Section **Convergence** is formed by a single contribution written on the Applications of Competition Rules in Telecommunications. Section **Contents** is now not containing any specific contribution. Section **Companies** is now dealing with a single contribution on the Exploratores, the Quadruped Walking Robot developed at the Kandó Kálmán High-School. In this issue 2 submitted papers of the 4 ones are scientifically evaluated by 4 senior reviewers. These papers have been accepted by the reviewers as scientific contributions. They are marked on their first pages by the sign of \mathcal{L} giving the evidence of the scientific nature.

LINEÁRIS ERŐSÍTŐK INSTABILITÁSÁNAK MEGSZÜNTETÉSE

LADVÁNSZKY JÁNOS

TÁVKÖZLÉSI INNOVÁCIÓS RT, TKI
1142 BUDAPEST, UNGVÁR U. 64-66.
TEL.: 251 0888, FAX: 251 9878, E-MAIL: LADVAN@TKI.HU

Az áramkörök stabilitásával foglalkozó publikációk többsége a stabilitás leírásának problémájával foglalkozik. Ezzel ellentétben ez a cikk arra közöl eljárást, hogy egy instabil erősítő esetén mit kell tenni az instabilitás megszüntetéséhez. A módszert bizonyított tételek formájában ismertetjük, majd példákkal illusztráljuk.

1. BEVEZETÉS

A cikk azoknak a nem kívánt jeleknek a megszüntetésével foglalkozik, amelyek a kaszkád kapcsolású erősítők instabilitása következtében jönnek létre. A stabilizálási probléma két részből áll, hogy az erősítő mely részén és mit kell tenni. Ebben a cikkben az első problémára közlünk megoldást. Az instabilitást a teljesítmény-erősítés végtelen nagy értékeként definiáljuk. A teljesítmény-erősítés kifejezésének nevezője az erősítőrendszer admittancia-mátrixának determinánsa. Az erősítőrendszer admittancia-mátrixa tri-diagonális mátrix. Ezért a stabilizálási problémát tridiagonális mátrix determinánsának szorzatként történő felírására vezetjük vissza.

Két azonosságot adunk meg tridiagonális mátrixok determinánsának kifejtésére. Az egyik azonosság az alkalmazásával egy egyfokozatú erősítő admittancia-mátrixának determinánsát szorzat alakban fejezzük ki. Megmutatjuk, hogy a determináns minden tényezője az erősítő egy részének extrém lezárások mellett mutatott admittanciájával egyezik meg. Az erősítő stabilitásának eléréséhez egyik tényezőnek sem lehet a komplex frekvenciasík jobb oldalára eső gyöke. Ezért ezeknek a tényezőknek a Hurwitz-vizsgálata alkalmas az erősítő azon pontjainak megkeresésére, ahová stabilizáló áramköri elemeket lehet beiktatni. Ezenkívül azt is megmutatjuk, hogy a determináns tényezői a jól ismert Stern stabilitás-tényezővel vannak kapcsolatban.

A másik azonosság alkalmazásával megadjuk egy n -fokozatú (n tetszőleges, pozitív egész szám) erősítő determinánsának összes lehetséges szorzat felbontását. A determináns szorzótényezői ebben az esetben is az erősítő kapu-összekapcsolási pontjain mutatott admittanciákkal egyeznek meg, megfelelő lezárások mellett. Mivel a feltétel nélküli stabilitás eléréséhez egyik szorzótényezőnek sem lehet jobb félsíkbeli zérusa, és mivel a kapu-összekapcsolásokkal párhuzamosan kapcsolt stabilizáló elemek nem minden tényező értékét módosítják, ezért a tényezők Hurwitz-vizsgálatára alapozva egyszerű algoritmus adható meg a stabilizáló elemek helyének megtalálására. Ezzel az egyfokozatú erősítő esetére megadott stabilizálási módszert n -fokozatú erősítő esetére terjesztettük ki.

A lineáris áramkörök stabilitásának vizsgálata Bode és Nyquist munkáival kezdődött el. A stabilitással foglalkozó kezdeti cikkek célja az volt, hogy az áramkör adott vagy

tetszőleges lezárások mellett mutatott stabilitását biztosító feltételeket adjanak meg. A hatvanas évek elejére a lineáris áramköröknek számos stabilitás-feltételét publikálták. Ezeknek a stabilitás-feltételeknek a közös alapja a következő három egyenlőtlenséggel adható meg:

$$\operatorname{Re}(y_{11}) \geq 0 \quad (1.)$$

$$\operatorname{Re}(y_{22}) \geq 0 \quad (2.)$$

$$2\operatorname{Re}(y_{11})\operatorname{Re}(y_{22}) - [|y_{12}y_{21}| + \operatorname{Re}(y_{12})\operatorname{Re}(y_{21})] \geq 0 \quad (3.)$$

ahol y_{jk} a vizsgált áramkör admittancia-mátrixának elemét jelöli. Az említett stabilitás-feltételek a harmadik egyenlőtlenség felírásában térnek el egymástól, melyet a különböző stabilitás-tényezők bevezetésének megfelelően rendeztek át. Közülük a legismertebbek a következők: a Linvill [1], a Stern [2] és a Rollett [3] stabilitás-tényező. A Linvill és a Rollett stabilitás-tényezőt a feltétel nélküli stabilitás, a Stern stabilitás-tényezőt az adott lezárások mellett mutatott (feltételes) stabilitás jellemzésére vezették be.

Youla nem reciprok és egy hozzárendelt reciprok áramkör együttes stabilitását vizsgálta [4]. Rámutatott a stabilitás és a passzivitás szoros kapcsolatára. Scanlan és Singleton a stabil állapotban elérhető teljesítményerősítés legnagyobb értékét és ennek megvalósítását adta meg [5]. Ku a stabilitás-feltételek és a Rollett stabilitás-tényező S -paraméterekkel kifejezett alakjával foglalkozott [6]. Woods néhány ismert stabilitás-feltételt hasonlított össze, és egy újat adott meg, szintén S -paraméterekkel kifejezve [7].

Újabban a stabilitás leírásának problémájával ismét foglalkoztak. Vizsgálták a komplementer feltételek szerepét (vagyis azt, hogy valamely stabilitás-tényezővel megadott stabilitás-feltétel mellett még milyen mellék-feltételeket kell tenni) [11]. Majd sikeresen helyettesítették az összes mellékfeltételt egy, módosított stabilitás-kritériummal [12]. A mikrohullámú áramkörök elméletében a több aktív eszközt tartalmazó erősítők stabilitás-analízisét végezték el [13].

Minden említett publikáció egy áramkör stabilitásának jellemzésével foglalkozik. Emellett érdekes gyakorlati kérdés a következő is: Adott egy erősítő, amely instabil (gerjed). Mit kell tenni a nem kívánt jelek megszüntetése érdekében? Ez a kérdés különösen aktuális mikrohullámú erősítők esetén.

Cikkünk azzal a problémával foglalkozik, hogy meg lehet-e adni egy instabil erősítő azon pontjait, ahová stabilizáló áramkört elemeket kell beiktatni. A bemutatott módszer az erősítőrendszer admittancia-mátrixa determinánsának szorzattá történő felbontásán alapszik. A 2. fejezetben a probléma megoldásában felhasznált egyik matematikai azonosságot bizonyítjuk be. A 3. fejezetben egy fokozatú, a 4. fejezetben kétfokozatú erősítőt vizsgálunk. Az 5. fejezetben a Stern stabilitás-tényező és az általunk megadott stabilitás-feltételek kapcsolatát adjuk meg. A 6. fejezetben a stabilizálásra bemutatott módszernek n -fokozatú erősítő esetére történő általánosításával foglalkozunk. Az analízist a 3. és a 7. fejezetekben példákkal támasztjuk alá.

2. TRIDIAGONÁLIS MÁTRIXOK DETERMINÁNSÁNAK KIFEJTÉSE

Legyen A olyan négyzetes mátrix, amelynek csak a főátlóban és a szomszédos átlókban levő elemei különböznek zérustól (tridiagonális mátrix). A p_1, p_2, \dots, p_u sorszámú sorból és a q_1, q_2, \dots, q_v sorszámú oszlopból álló részmatrixot a következőképpen jelöljük [8]:

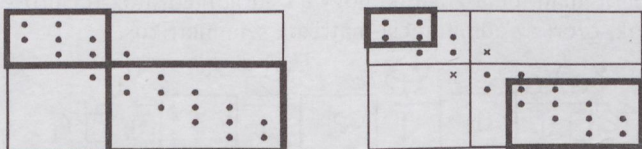
$$A \begin{matrix} p_1, p_2, \dots, p_u \\ q_1, q_2, \dots, q_v \end{matrix} \quad (4.)$$

Az A mátrix determinánsára az $|A|$ jelölést vezetjük be. **1. Tétel:** Az $n \times n$ -es A mátrix determinánsát a következőképpen lehet kifejtetni:

$$|A| = \begin{vmatrix} 1, 2, \dots, p \\ 1, 2, \dots, p \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p+1, p+2, \dots, n \\ p+1, p+2, \dots, n \end{vmatrix} - a_{p,p+1} * a_{p+1,p} * \begin{vmatrix} 1, 2, \dots, p \\ 1, 2, \dots, p \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p+1, p+2, \dots, n \\ p+1, p+2, \dots, n \end{vmatrix} \quad (5.)$$

ahol a_{ik} az A mátrix i -edik sorának és k -edik oszlopának eleme, és p tetszőleges egész szám, amely teljesíti az $1 \leq p \leq n$ egyenlőtlenséget.

Az (5.) egyenlet jelentését példán mutatjuk be. Legyen $n = 8$ és $p = 3$. Az (5.) egyenletben szereplő részmatrixokat az 1. ábrán vastag vonallal jelöltük.



1. ábra. Az (5.) egyenlet magyarázatához: A korongok és a keresztek zérustól különböző, az üresen hagyott helyek zérus mátrixelemet jelölnek. Az ábra bal oldalán az (5.) egyenlet első, jobb oldalán a második tagjában szereplő tényezőket jelöltük.

Bizonyítás: Teljes indukciót alkalmazunk, $n = 2$ és $p = 1$ esetén a következők állnak fenn:

$$\begin{vmatrix} a & c \\ b & d \end{vmatrix} = ad - bc \quad (6.)$$

$$\begin{vmatrix} 1, 2, \dots, p \\ 1, 2, \dots, p \end{vmatrix} = a \quad (7.)$$

$$\begin{vmatrix} p+1, p+2, \dots, n \\ p+1, p+2, \dots, n \end{vmatrix} = d \quad (8.)$$

$$a_{p+1,p} = b \quad (9.)$$

$$a_{p,p+1} = c \quad (10.)$$

és definícióként fogadjuk el, hogy

$$\begin{vmatrix} 1, 2, \dots, p-1 \\ 1, 2, \dots, p-1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} p+2, p+3, \dots, n \\ p+2, p+3, \dots, n \end{vmatrix} = 1 \quad (11.)$$

abban az esetben, ha az első sor- vagy oszlopindex nagyobb, mint az utolsó. Ha $n = 2$ és $p = 2$, akkor az (5.) egyenlőtlenség szintén teljesül.

Feltételezzük, hogy a tétel állítása igaz $n \times n$ -es tridiagonális mátrixok esetén, ha $1 \leq p \leq n$, és bebizonyítjuk, hogy igaz $(n+1) \times (n+1)$ -es tridiagonális mátrixok esetén is, ha $1 \leq p \leq n+1$.

A p -edik oszlopban három elem különbözik zérustól: $a_{p-1,p}$, $a_{p,p}$ és $a_{p+1,p}$. Ezért

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 1, 2, \dots, n+1 \\ 1, 2, \dots, n+1 \end{vmatrix} = \quad (12.) \\ & = -a_{p-1,p} * \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2, p, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} + \\ & + a_{p,p} * \begin{vmatrix} 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} + \\ & - a_{p+1,p} * \begin{vmatrix} 1, \dots, p, p+2, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

A jobb oldalon mindhárom determináns $n \times n$ -es tridiagonális mátrix determinánsa, melyekre alkalmazni lehet a tételt:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2, p, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} = \\ & = \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2 \\ 1, \dots, p-2 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p, \dots, n+1 \\ p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} - a_{p-2,p-1} * \\ & * a_{p,p-2} * \begin{vmatrix} 1, \dots, p-3 \\ 1, \dots, p-3 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p+1, \dots, n+1 \\ p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} \quad (13.) \end{aligned}$$

A tridiagonális tulajdonság következtében

$$a_{p,p-2} = 0 \quad (14.)$$

ezért (13.) a következőképpen alakítható át:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2, p, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} = \\ & = \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2 \\ 1, \dots, p-2 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p, \dots, n+1 \\ p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} \quad (15.) \end{aligned}$$

Ezután a tételt a (12.) egyenlet jobb oldalán levő második determináns kifejtésére alkalmazzuk:

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \\ 1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} = \\ & = \begin{vmatrix} 1, \dots, p-1 \\ 1, \dots, p-1 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p+1, \dots, n+1 \\ p+1, \dots, n+1 \end{vmatrix} - a_{p-1,p+1} * \\ & * a_{p+1,p-1} * \begin{vmatrix} 1, \dots, p-2 \\ 1, \dots, p-2 \end{vmatrix} * \begin{vmatrix} p+2, \dots, n+1 \\ p+2, \dots, n+1 \end{vmatrix} \quad (16.) \end{aligned}$$

A tridiagonális tulajdonság következtében most is érvényes, hogy minden olyan mátrixelem, melynek sor- és oszlopindexének különbsége egynél több, zérus értékű:

$$a_{p-1,p+1} = a_{p+1,p-1} = 0 \quad (17.)$$

Ezért (16.) a következőképpen rendezhető át:

$$\begin{aligned} & \left| A_{1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1}^{1, \dots, p-1, p+1, \dots, n+1} \right| = \\ & = \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (18.)$$

Végül a tételt a (12.) egyenlet jobb oldalán található harmadik determináns kifejtésére alkalmazzuk:

$$\begin{aligned} & \left| A_{1, \dots, p-1, p+2, \dots, n+1}^{1, \dots, p, p+2, \dots, n+1} \right| = \\ & = \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p, p+2, \dots, n+1} \right| - a_{p, p-1} * \\ & * a_{p-1, p+1} * \left| A_{1, \dots, p-2}^{1, \dots, p-2} \right| * \left| A_{p+2, \dots, n+1}^{p+2, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (19.)$$

Mivel

$$a_{p-1, p+1} = 0 \quad (20.)$$

ezért (19.) is egyszerűsödik:

$$\begin{aligned} & \left| A_{1, \dots, p-1, p+2, \dots, n+1}^{1, \dots, p, p+2, \dots, n+1} \right| = \\ & = \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p, p+2, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (21.)$$

A (12.), (15.), (18.), (21.) egyenletekből következik, hogy

$$\begin{aligned} & \left| A_{1, 2, \dots, n+1}^{1, 2, \dots, n+1} \right| = -a_{p-1, p} * \left| A_{1, \dots, p-2}^{1, \dots, p-2} \right| * \\ & * \left| A_{p-1, p+1, \dots, n+1}^{p, \dots, n+1} \right| + \\ & + a_{p, p} * \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| - \\ & - a_{p+1, p} * \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p, p+2, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (22.)$$

Az utóbbi egyenlet jobb oldalán az első sor második determinánsát átalakítjuk:

$$\begin{aligned} & \left| A_{p-1, p+1, \dots, n+1}^{p, \dots, n+1} \right| = \\ & = \left| A_{p-1}^p \right| \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| - a_{p+1, p-1} * \\ & * a_{p, p+1} * 1 * \left| A_{p+2, \dots, n+1}^{p+2, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (23.)$$

Mivel

$$\left| A_{p-1}^p \right| = a_{p, p-1} \quad (24.)$$

és

$$a_{p+1, p-1} = 0 \quad (25.)$$

(23.) új alakja a következő:

$$\begin{aligned} & \left| A_{p-1, p+1, \dots, n+1}^{p, \dots, n+1} \right| = \\ & = a_{p, p-1} * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (26.)$$

Az utolsó lépés annak felismerése, hogy a (22.) egyenlet jobb oldalának második és harmadik sora a következőképpen vonható össze:

$$\begin{aligned} & a_{p, p} * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| - a_{p+1, p} * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p, p+2, \dots, n+1} \right| = \\ & = \left| A_{p, \dots, n+1}^{p, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (27.)$$

A (22.), (26.) és (27.) egyenletek alapján

$$\begin{aligned} & \left| A_{1, 2, \dots, n+1}^{1, 2, \dots, n+1} \right| = -a_{p-1, p} * \left| A_{1, \dots, p-2}^{1, \dots, p-2} \right| * a_{p, p-1} * \\ & * \left| A_{p+1, \dots, n+1}^{p+1, \dots, n+1} \right| + \left| A_{1, \dots, p-1}^{1, \dots, p-1} \right| * \left| A_{p, \dots, n+1}^{p, \dots, n+1} \right| \end{aligned} \quad (28.)$$

és a bizonyítást befejeztük. A patológikus esetek ($n < p$) tárgyalása triviális, ettől eltekintünk.

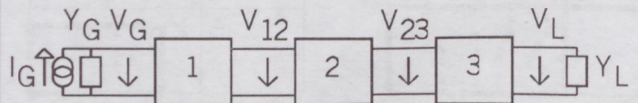
3. EGYFOKOSZTÚ ERŐSÍTŐ STABILIZÁLÁSA

Ebben a fejezetben az 1. tételt egyfokozatú erősítő stabilizálására alkalmazzuk. Az egyfokozatú erősítőt a következőképpen lehet jellemezni:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \quad (29.)$$

$$= \begin{bmatrix} Y_G + Y_{11}^{(1)} & Y_{21}^{(1)} & 0 & 0 \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(2)} & 0 \\ 0 & Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(2)} + Y_{11}^{(3)} & Y_{21}^{(3)} \\ 0 & 0 & Y_{21}^{(3)} & Y_{22}^{(3)} + Y_L \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_G \\ V_{12} \\ V_{23} \\ V_L \end{bmatrix}$$

ahol a jobb oldalon látható 4×4 -es mátrixot az erősítő admittancia-mátrixának nevezzük. A jelölések magyarázatát a 2. ábra tartalmazza. Az első és a harmadik blokk csatolóhálózatot, a második aktív eszközt (tranzisztort) jelöl. A (29.) egyenletben szereplő admittancia-mátrix elemeinek felírásában felhasználtuk, hogy a csatolóhálózatok reciprokok, ezért az admittancia-mátrixuk szimmetrikus.



2. ábra. Egyfokozatú, kaszkád kapcsolású erősítő blokkvázlata. A csatolóhálózatokat és az aktív elemet rendre 1, 3 és 2 jelöli.

A teljesítmény-erősítést a következő egyenlet definiálja:

$$G_T = \frac{P_L}{P_{G_{\max}}} \quad (30.)$$

A terhelés által elnyelt teljesítmény

$$P_L = \frac{1}{2} |V_L|^2 G_L \quad (31.)$$

ahol $G_L = \text{Re}(Y_L)$. A generátor által leadott legnagyobb teljesítmény

$$P_{G_{\max}} = \frac{|I_G|^2}{4G_G} \quad (32.)$$

ahol $G_G = \text{Re}(Y_G)$. A (30.)–(32.) egyenletek alkalmazásával a teljesítményerősítés

$$G_T = 2G_G G_L \left| \frac{V_L}{I_G} \right|^2 \quad (33.)$$

Látjuk, hogy a teljesítményerősítés a transzfer impedancia függvénye, melynek kifejezése az alábbi:

$$Z_T = \frac{V_L}{I_G} = -\frac{Y_{21}^{(1)} Y_{21}^{(2)} Y_{21}^{(3)}}{D} \quad (34.)$$

amely a (29.) egyenletből a Cramer szabály alkalmazásával nyerhető.

Az erősítő instabil, ha

$$G_T \rightarrow \infty \quad (35.)$$

egyébként stabil. Ezért

2. Tétel: Ahhoz, hogy az áramkör stabil legyen, az szükséges, hogy a D determináns zérusai a komplex frekvenciasík nyílt bal félsíkjára essenek. Ha a (34.) egyenlet számlálójában levő transzfer admittanciáknak nincs jobb félsíkbeli pólusa, akkor a megadott feltétel szükséges és elégséges.

Most az 1. tételt a D determináns meghatározásában alkalmazzuk. Az erősítőrendszer admittancia-mátrixát Y -nal jelöljük:

$$D = \left| Y_{1,2}^{1,2} \right| \left| Y_{3,4}^{3,4} \right| - y_{2,3} y_{3,2} |Y_1^1| |Y_4^4| \quad (36.)$$

A jobb oldalon látható determinánsokat a (29.) egyenlet alapján lehet felírni:

$$|Y_{1,2}^{1,2}| = (Y_G + Y_{11}^{(1)}) (Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)}) - (Y_{21}^{(1)})^2 \quad (37.)$$

$$|Y_{3,4}^{3,4}| = (Y_{22}^{(2)} + Y_{11}^{(3)}) (Y_{22}^{(3)} + Y_L) - (Y_{21}^{(3)})^2 \quad (38.)$$

$$y_{2,3} = Y_{12}^{(2)} \quad (39.)$$

$$y_{3,2} = Y_{21}^{(2)} \quad (40.)$$

$$|Y_1^1| = Y_G + Y_{11}^{(1)} \quad (41.)$$

$$|Y_4^4| = Y_{22}^{(3)} + Y_L \quad (42.)$$

A (37.) egyenletben $|Y_{1,2}^{1,2}|$ szorzat alakban is felírható:

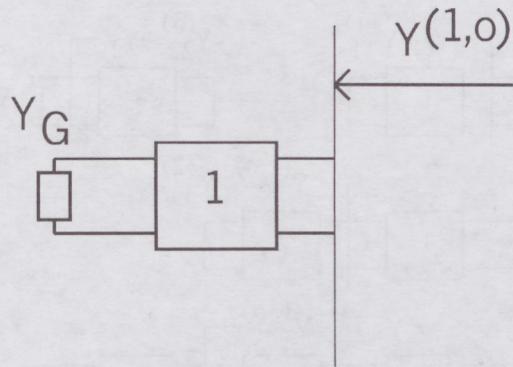
$$|Y_{1,2}^{1,2}| = (Y_G + Y_{11}^{(1)}) \left[Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} - \frac{(Y_{21}^{(1)})^2}{Y_G + Y_{11}^{(1)}} \right] \quad (43.)$$

A második tényezőben új jelölést vezetünk be. Az 1. blokk kimeneti admittanciája, ha a bemenetét Y_G -vel zárjuk le, a következő:

$$Y_{22}^{(1)} - \frac{(Y_{21}^{(1)})^2}{Y_G + Y_{11}^{(1)}} = Y^{(1,o)} \quad (44.)$$

Az új jelölés értelmezését a 3. ábrán is megadjuk. Ezzel a jelöléssel

$$|Y_{1,2}^{1,2}| = (Y_G + Y_{11}^{(1)}) (Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) \quad (45.)$$



3. ábra

A (38.) egyenlet alapján $|Y_{3,4}^{3,4}|$ a fentiekhez hasonlóan, szorzat alakban fejezhető ki:

$$|Y_{3,4}^{3,4}| = (Y_{22}^{(2)} + Y^{(3,i)}) (Y_{22}^{(3)} + Y_L) \quad (46.)$$

ahol $Y^{(3,i)}$ a 3. blokk bemeneti admittanciája, ha a kimenete Y_L -l-el van lezárva:

$$Y^{(3,i)} = Y_{11}^{(3)} - \frac{(Y_{21}^{(3)})^2}{Y_{22}^{(3)} + Y_L} \quad (47.)$$

A (45.) és (46.) egyenletek felhasználásával a (36.) egyenletben D a következőképpen bontható fel:

$$D = (Y_G + Y_{11}^{(1)}) \left[(Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) (Y_{22}^{(2)} + Y^{(3,i)}) - Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)} \right] (Y_{22}^{(3)} + Y_L) \quad (48.)$$

A (48.) egyenlet második tagja is átalakítható:

$$\begin{aligned} & (Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) \left[Y_{22}^{(2)} + Y^{(3,i)} - \frac{Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)}}{Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}} \right] = \\ & = (Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) (Y^{(2,o)} + Y^{(3,i)}) \end{aligned} \quad (49.)$$

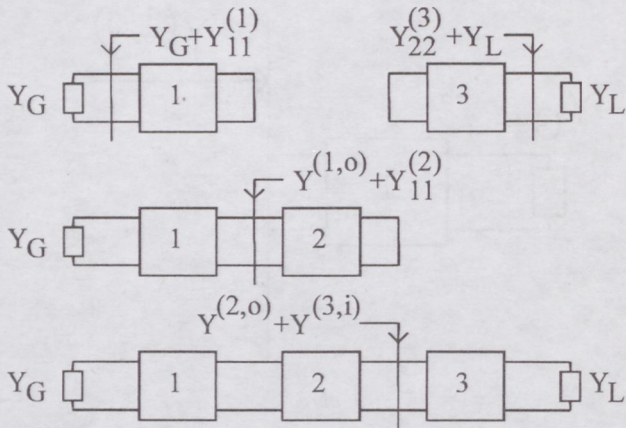
ahol $Y^{(2,o)}$ -val jelöltük a 2. áramköri blokk kimeneti admittanciáját abban az esetben, ha a bemenete $Y^{(1,o)}$ -val van lezárva:

$$Y^{(2,o)} = Y_{22}^{(2)} - \frac{Y_{12}^{(2)} Y_{21}^{(2)}}{Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}} \quad (50.)$$

Ezzel a determináns szorzat-dekompozíciója a következő:

$$\begin{aligned} D &= (Y_G + Y_{11}^{(1)}) (Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) \\ & (Y^{(2,o)} + Y^{(3,i)}) (Y_{22}^{(3)} + Y_L) \end{aligned} \quad (51.)$$

Vegyük észre, hogy a szorzótényezők az erősítő kapucsszekapcsolási helyein mutatott admittanciákkal egyeznek meg, megfelelő lezárások esetén, ahogyan az a 4. ábrán látható.



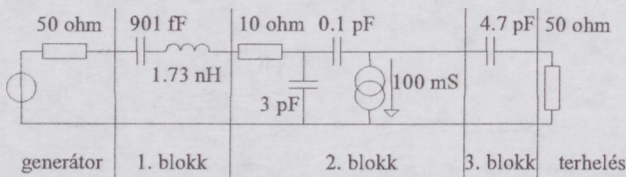
4. ábra. A determináns tényezői a kapu-összekapcsolások helyén mutatott admittanciákkal egyeznek meg, megfelelő lezárások esetén

3. Tétel: A determináns szorzat alakban történő felírásában a tényezők száma megegyezik az erősítőben az összekapcsolt kapuk számával. Egy szorzótényező összekapcsolt kapukon mutatott admittanciával egyezik meg, más kapu rövidre zárása nélkül. A többi tényező az összekapcsolt kapukon mutatott admittanciával egyezik meg, amikor egy másik kaput rövidre zárunk.

Bizonyítás: Egyfokozatú erősítőkre a 4. ábrán mutatjuk be. Az n -fokozatú erősítőkre történő általánosításra a 6. fejezetben térünk ki.

A 3. tétel alkalmazható stabilizáló áramköri elemek beiktatási helyének megtalálására. Ehhez azt kell felismerni, hogy a 3. blokk bemenetével párhuzamosan kapcsolt áramköri elem a csak a determináns harmadik tényezőjét változtatja meg. A 2. blokk bemenetével párhuzamosan kapcsolt elem csak a második és a harmadik tényezőt, az 1. blokk bemenetével párhuzamosan kapcsolt elem az első, második és harmadik tényezőt, a 3. blokk kimenetével párhuzamosan kapcsolt elem pedig a harmadik és a negyedik tényezőt módosítja. A tényezők Hurwitz-vizsgálata megadja, melyik tényezőt kell megváltoztatni az erősítő stabilizálásához, és ezzel megadja a stabilizáló áramköri elemek beiktatásának helyét.

Az utóbbi állítást példával illusztráljuk. Adott az alábbi egyfokozatú erősítő, melynek kapcsolási rajzát a 5. ábrán láthatjuk.



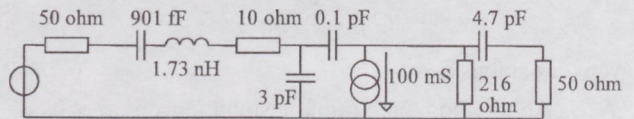
5. ábra. Egyfokozatú erősítő

Az ábrán bemutatott erősítő admittancia-mátrixának determinánsát fél-szimbolikus formában határoztuk meg [9], majd Hurwitz-vizsgálatot végeztünk. A Hurwitz-vizsgálat nem utal instabilitásra az első, második és negyedik szorzótényező esetén. Azonban az (51.) egyenletben szereplő harmadik tényező fél-szimbolikus alakja a következő:

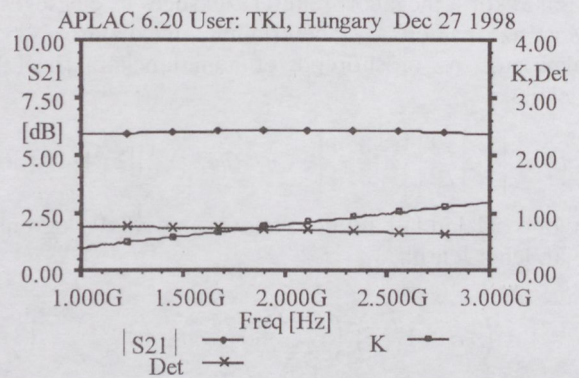
$$Y^{(2,0)} + Y^{(3,i)} = 2.499 * 10^{-3} \frac{A(p)}{B(p)} \quad (52.)$$

$$A(p) = 1 + 2.209 * 10^{-9} p + 1.038 * 10^{-19} p^2 + 3.065 * 10^{-30} p^3 + 1.099 * 10^{-41} p^4 - 4.217 * 10^{-67} p^5 \quad (53.)$$

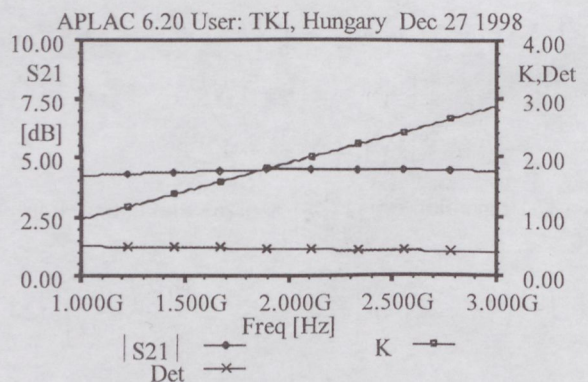
ahol p a komplex frekvencia. $A(p)$ nem lehet Hurwitz-polinom, mert az ötödfokú tag együtthatójának előjele a többi együttható előjelétől különbözik. Ezért olyan stabilizáló elemre van szükség, melyet a 3. blokk bemenetével kell párhuzamosan kapcsolni. Legyen ez az elem ellenállás, melynek értékét úgy határozzuk meg, hogy az áteresztő sáv szélén a Rollett stabilitás-tényező értéke 1. A stabilizált erősítőt és az erősítő jellemző paramétereit a stabilizálás előtt és után a 6., 7. és 8. ábrán mutatjuk be.



6. ábra. Stabilizált erősítő



7. ábra. Az erősítő jellemző paramétereit a stabilizálás előtt [10]



8. ábra. Az erősítő jellemző paramétereit a stabilizálás után

A 7. és 8. ábrán a Rollett stabilitás-tényezőt \bar{K} -val, a reflexiók mátrix determinánsát (amely a Woods stabilitás-feltételben szerepel) Det-tel jelöltük. A teljesítmény-erősítés a stabilizált erősítőben kisebb. $\text{Det} < 1$ mindkét esetben, teljesítve a determinánsra vonatkozó stabilitás-feltételt. A stabilizálás előtt $\bar{K} < 1$ az áteresztő sáv alján, ezzel megsértve a stabilitás-feltételt. A stabilizálás után $\bar{K} > 1$ az egész áteresztő sávban.

4. KÉTFOKOZATÚ ERŐSÍTŐK STABILIZÁLÁSA

Kétfokozatú, kaszkád kapcsolású erősítők a következő egyenlettel írhatók le:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_G + Y_{11}^{(1)} & Y_{21}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} & Y_{12}^{(2)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Y_{21}^{(2)} & Y_{22}^{(2)} + Y_{11}^{(3)} & Y_{12}^{(3)} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Y_{21}^{(3)} & Y_{22}^{(3)} + Y_{11}^{(4)} & Y_{12}^{(4)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{21}^{(4)} & Y_{22}^{(4)} + Y_{11}^{(5)} & Y_{12}^{(5)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Y_{21}^{(5)} & Y_{22}^{(5)} + Y_L \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_G \\ V_{12} \\ V_{23} \\ V_{34} \\ V_{45} \\ V_L \end{bmatrix} \quad (54.)$$

A teljesítmény-erősítés kifejezéséhez meg kell határoznunk a transzfer impedanciát, ahogyan az a (33.) egyenletből látható:

$$Z_T = - \frac{Y_{21}^{(1)} Y_{21}^{(2)} Y_{21}^{(3)} Y_{21}^{(4)} Y_{21}^{(5)}}{D} \quad (55.)$$

ahol D most a (52.) egyenletben szereplő, 6×6 méretű admittancia-mátrix determinánsát jelöli. Az alábbiakban D szorzat-felbontását adjuk meg. Ha az 1. tételt $n = 6$ és $p = 2$, majd $n = 4$ és $p = 2$ esetén az erősítőrendszer admittancia-mátrixára alkalmazzuk, és a kapott eredményt a 3. fejezetben leírtaknak megfelelően átrendezzük, a következő kifejezést kapjuk:

$$D = (Y_G + Y_{11}^{(1)}) (Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}) (Y^{(2,o)} + Y_{11}^{(3)}) (Y^{(3,o)} + Y^{(4,i)}) (Y_{22}^{(4)} + Y^{(5,i)}) (Y_{22}^{(5)} + Y_L) \quad (56.)$$

ahol a következő jelöléseket vezettük be:

$$Y^{(1,o)} = Y_{22}^{(1)} - \frac{(Y_{21}^{(1)})^2}{Y_G + Y_{11}^{(1)}} \quad (57.)$$

az 1. blokk kimeneti admittanciája a bemenet Y_G -vel történő lezárása esetén,

$$Y^{(5,i)} = Y_{11}^{(5)} - \frac{(Y_{21}^{(5)})^2}{Y_{22}^{(5)} + Y_L} \quad (58.)$$

az 5. blokk bemeneti admittanciája a kimenet Y_L -vel történő lezárása esetén,

$$Y^{(2,o)} = Y_{22}^{(2)} - \frac{Y_{21}^{(2)} Y_{12}^{(2)}}{Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)}} \quad (59.)$$

a 2. blokk kimeneti admittanciája a bemenet $Y^{(1,o)}$ -vel történő lezárása esetén,

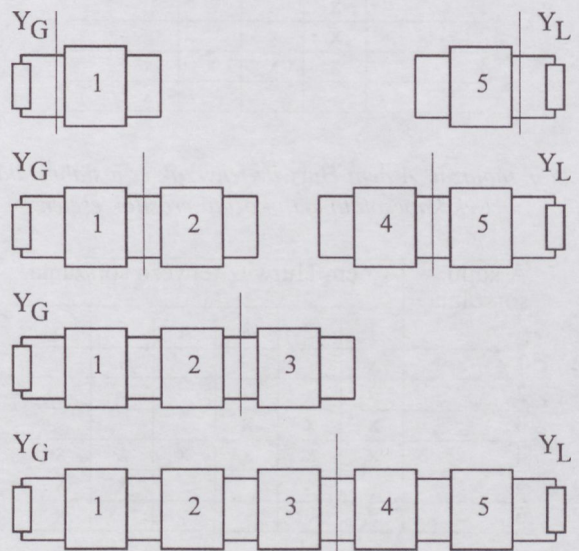
$$Y^{(4,i)} = Y_{11}^{(4)} - \frac{Y_{21}^{(4)} Y_{12}^{(4)}}{Y_{22}^{(4)} + Y^{(5,i)}} \quad (60.)$$

a 4. blokk bemeneti admittanciája a kimenet $Y^{(5,i)}$ -vel történő lezárása esetén,

$$Y^{(3,o)} = Y_{22}^{(3)} - \frac{(Y_{21}^{(3)})^2}{Y^{(2,o)} + Y_{11}^{(3)}} \quad (61.)$$

a 3. blokk kimeneti admittanciája a bemenet $Y^{(2,o)}$ -vel történő lezárása esetén.

A (56.) egyenletben D tényezői a 9. ábrán a szaggatott vonalak mentén mutatkozó admittanciákkal egyeznek meg.



9. ábra. A kétfokozatú erősítő admittancia-mátrixa determinánsának tényezői

Így a 3. fejezetben leírtakhoz hasonlóan, az (56.) egyenletben szereplő szorzótényezők Hurwitz-vizsgálatát a stabilizáló elemek bekötési helyének meghatározására lehet alkalmazni.

A determináns szorzat felbontása nem egyértelmű. A tényezők nem egyértelműsége következtében a stabilizálási problémát legalább kétféleképpen meg lehet oldani. Egy- és kétfokozatú erősítőkre vonatkozó megoldásokat összegeztünk a 1a-b. és a 2a-b. táblázatban.

Az 1a. és 1b. táblázat között az a különbség, hogy a determináns szorzat-felbontásában melyik tényezőt választottuk „középsőnek”.

A táblázatokban x-szel jelöltük azokat a kapukat, amelyek az oszlopnak megfelelő tényezőt módosítják. Így pl. ha az 1. tényező nem Hurwitz, akkor azt az 1., 2. vagy 3. kapura kapcsolt stabilizáló elemmel egyaránt módosítani lehet. Az erősítő stabilizálásában azt használjuk fel, hogy a táblázat szerint vannak az erősítőnek olyan kapui, amelyekre kapcsolt stabilizáló elem nem minden tényező Hurwitz-tulajdonságát befolyásolja. Például az 1. kapura kapcsolt stabilizáló elem a 2, 3, 4 sorszámú tényezőre nincs hatással.

1a-b. táblázat. A nem Hurwitz-tényezők és a stabilizálási helyek kapcsolata egyfokozatú erősítők esetén

A kapu sorszáma	A nem Hurwitz-tényező sorszáma			
	1	2	3	4
1	x			
2	x	x		
3	x	x	x	x
4				x

A kapu sorszáma	A nem Hurwitz-tényező sorszáma			
	1	2	3	4
1	x			
2	x	x		
3	x	x	x	x
4				x

2a-b. táblázat. A nem Hurwitz-tényezők és a stabilizálási helyek kapcsolata kétfokozatú erősítők esetén

A kapu sorszáma	A nem Hurwitz-tényező sorszáma					
	1	2	3	4	5	6
1	x					
2	x	x				
3	x	x	x			
4	x	x	x	x	x	x
5					x	x
6						x

A kapu sorszáma	A nem Hurwitz-tényező sorszáma					
	1	2	3	4	5	6
1	x					
2	x	x				
3	x	x	x	x	x	x
4				x	x	x
5					x	x
6						x

5. A STERN-STABILITÁSTÉNYEZŐ ÉSA DETERMINÁNS TÉNYEZŐINEK KAPCSOLATA

Az instabilitást az aktív elemek belső visszacsatolása okozza. Az instabilitást a determináns tényezői valós részének vizsgálatával is nyomon követhetjük. Ezért érdemes az egyes tényezők valós része visszacsatolással és visszacsatolás nélkül mutatott értéke hányadosát a vizsgálat tárgyává tenni. Például kétfokozatú erősítőben a determináns harmadik tényezője az (56.) egyenlet szerint

$$y_3 = Y^{(2,0)} + Y_{11}^{(3)} \quad (62.)$$

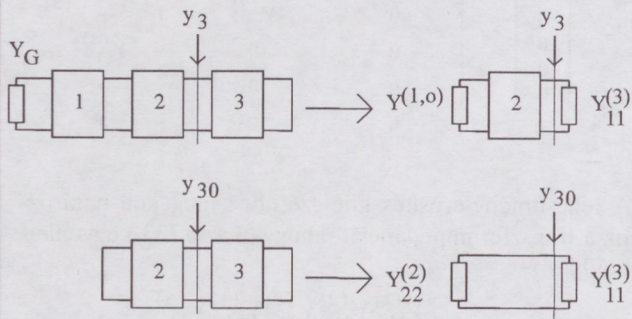
és y_3 értéke az aktív eszköz (itt a 2. blokk) visszacsatolása nélkül

$$y_{30} = Y_{22}^{(2)} + Y_{11}^{(3)} \quad (63.)$$

Az említett hányados a következő:

$$d_3 = \frac{\operatorname{Re}(y_3)}{\operatorname{Re}(y_{30})} \quad (64.)$$

A d_3 -mal jelölt mennyiségben szereplő tényezők fizikai interpretációját a 10. ábrán adjuk meg.



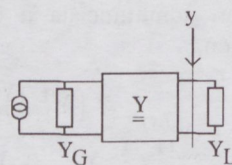
10. ábra

A Stern stabilitás-tényező és d_3 minimumának kapcsolata a következő:

$$d_{3\min} = 1 - \frac{1}{S_3} \quad (65.)$$

ahol S_3 a 10. ábra jobb felső részén látható áramkör Stern stabilitás-tényezője.

Jelöljük y -nal a determináns egy olyan tényezőjét, amely valamelyik aktív eszköz terhelés felőli kapu-összekapcsolási helyén mutatott admittanciával egyezik meg. (A következő gondolatmenet kis módosítással a generátor felőli tényezőkre is érvényes, ezért a 65. egyenlet egy általánosítása.) Jelöljük y_0 -lal y értékét az aktív eszköz visszacsatolásának elhagyása mellett. Jelöljük továbbá Y_G -vel illetve Y_L -vel az aktív eszközt lezáró admittanciákat a 11. ábra szerint.



11. ábra. Y_G és Y_L lezáró admittanciák között működő egyfokozatú erősítő

Legyen továbbá

$$d = \frac{\operatorname{Re}(y)}{\operatorname{Re}(y_0)} \quad (66.)$$

és jelölje S a 11. ábrán látható kapcsolás Stern stabilitás-tényezőjét!

4. Tétel:

$$d_{\min} = 1 - \frac{1}{S} \quad (67.)$$

Bizonyítás: Először azt kell felismerni, hogy d függ G_G -től, G_L -től és B_G -től, de nem függ B_L -től ($Y_G = G_G + jB_G$, $Y_L = G_L + jB_L$). Ezért ahhoz, hogy d -t a teljesítményerősítés változatlan értéke mellett minimalizáljuk, G_G -t és G_L -t állandó értéken tartjuk és a minimumot B_G függvényében keressük. Végül d_{\min} kifejezését a Stern stabilitás-tényező definíciójával hasonlítjuk össze.

A 11. ábra jelöléseit alkalmazva, az y admittanciát a következőképpen lehet kifejezni:

$$y = Y_{22} - \frac{Y_{12}Y_{21}}{Y_{11} + Y_G} + Y_L \quad (68.)$$

y valós részének meghatározásához az alábbi jelöléseket vezetjük be [2]:

$$Y_{12}Y_{21} = M + jN \quad (69.)$$

Az admittanciák valós részét G -vel, képzetes részét B -vel jelölve

$$G = G_{22} - \operatorname{Re} \frac{M + jN}{(G_{11} + G_G) + j(B_{11} + B_G)} + G_L \quad (70.)$$

ahol a következő jelöléseket alkalmaztuk:

$$G_G + G_{11} = G_1 \quad (71.)$$

$$G_{22} + G_L = G_2 \quad (72.)$$

$$B_{22} + B_L = B_2 \quad (73.)$$

y valós része a következő:

$$G = -\frac{MG_1 + NB_1}{G_1^2 + B_1^2} + G_2 \quad (74.)$$

A (74.) egyenlet szerint G valóban nem függ B_L -től. A fent említetteknek megfelelően, G minimumát keressük B_G változtatása mellett, ezért a következő egyenletet kell megoldanunk:

$$\frac{\partial G}{\partial B_G} = \frac{\partial G}{\partial B_1} = 0 \quad (75.)$$

Részletezve:

$$\frac{N(G_1^2 + B_1^2) - 2B_1(MG_1 + NB_1)}{(G_1^2 + B_1^2)^2} = 0 \quad (76.)$$

Az utóbbi egyenletet B_1 -re megoldva a következő eredményt kapjuk:

$$B_1 = G_1 \left[-\frac{M}{N} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{N}\right)^2 + 1} \right] \quad (77.)$$

G minimumát a (77.) egyenletnek a (74.) egyenletbe történő behelyettesítésével kapjuk meg:

$$G_{\min} = G_2 - \frac{\sqrt{M^2 + N^2} + M}{2G_1} \quad (78.)$$

A (77.) egyenlet jobb oldalának második tagja pozitív előjelét elhagytuk, mert nem G minimumát eredményezi. Ha az aktív elemnek nincs belső visszacsatolása, akkor $M = N = 0$, így (74.)-ből a következő adódik:

$$G_0 = G_2 \quad (79.)$$

A (78.) és (79.) egyenletből d_{\min} a következő:

$$d_{\min} = \frac{G_{\min}}{G_0} = 1 - \frac{\sqrt{M^2 + N^2} + M}{2G_1G_2} \quad (80.)$$

A Stern stabilitás-tényező definíciója [2]

$$S = \frac{2G_1G_2}{\sqrt{M^2 + N^2} + M} \quad (81.)$$

Ezért a Stern stabilitás-tényező és d_{\min} kapcsolata a következő alakban írható fel:

$$d_{\min} = 1 - \frac{1}{S} \quad (82.)$$

A Stern stabilitás-feltétel a következő:

$$S \geq 1 \quad (83.)$$

Ezért (82.) és (83.) alapján

$$d_{\min} \geq 0 \quad (84.)$$

a várt eredménnyel összhangban.

Megjegyezzük, hogy a bizonyításnak más tanulsága is van: a fenti eredmények felhasználásával a (3.) egyenlőség egyszerű bizonyítását kaphatjuk meg, a következőképpen. A stabilitáshoz a determináns tényezőinek nem lehet a zárt jobb félsíkon gyöke. Ebből és az y_0 admittancia passzivitásából (84.) következik (a $j\omega$ tengelyen). A (84.) és a (82.) következménye (83.), végül (83.) és (81.) következménye (3.).

Azt is megjegyezzük, hogy a kétfokozatú erősítő esetén az aktív elemek visszacsatolásának elhagyása nincs hatással az 1., 2., 5. és 6. tényezőre az (56.) szerinti felbontásban, ezért $d_i = 1$, ha $i = 1, 2, 5$ vagy 6. Ezekben az esetekben a 4. tétel nincs értelmezve. Azonban n fokozatú erősítőben a 4. tétel minden olyan tényező esetén fennáll, amely az aktív elemek visszacsatolásának megszüntetésével módosul.

6. AZ ISMERTETETT MÓDSZER ÁLTALÁNOSÍTÁSA N-FOKOZATÚ ERŐSÍTŐ ESETÉRE

A 3. és 4. fejezetben ismertetett stabilizációs módszert n -fokozatú erősítő esetére általánosítjuk. Az általánosítás azon alapszik, hogy a tridiagonális mátrixok determinánsának tényezőire megadott rekurzív formulában a rekurzió irányát egyszer meg lehet változtatni.

5. Tétel: Ha $A = [a_{ik}]$ $n \times n$ méretű tridiagonális mátrix, és m egész szám, $2 \leq m \leq n - 1$, akkor A determinánsát a következőképpen lehet kifejezni:

$$\det(A) = \prod_{k=1}^n a_k \quad (85.)$$

$$a_1 = a_{11} \quad (86.)$$

$$a_k = a_{kk} - \frac{a_{k-1,k}a_{k,k-1}}{a_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, m - 1 \quad (87.)$$

$$a_m = a_{mm} - \frac{a_{m-1,m}a_{m,m-1}}{a_{m-1}} - \frac{a_{m,m+1}a_{m+1,m}}{a_{m+1}} \quad (88.)$$

$$a_k = a_{kk} - \frac{a_{k,k+1}a_{k+1,k}}{a_{k+1}}, \quad k = m + 1, m + 2, \dots, n - 1 \quad (89.)$$

$$a_n = a_{n,n} \quad (90.)$$

Bizonyítás: Belátjuk, hogy a tétel állítása $m = n - 1$ -re fennáll, majd feltételezzük, hogy m -re is fennáll, és bebizonyítjuk, hogy akkor $(m - 1)$ -re is. Ismert, hogy

$$\det(\mathbf{A}) = \prod_{k=1}^n b_k \quad (91.)$$

$$b_1 = a_{11} \quad (92.)$$

$$b_k = a_{kk} - \frac{a_{k-1,k} a_{k,k-1}}{b_{k-1}}, \quad k = 2, 3, \dots, n \quad (93.)$$

A (93.) egyenlet szerinti $(n - 1)$ -edik és n -edik tényezőt részletesen felírjuk:

$$b_{n-1} = a_{n-1,n-1} - \frac{a_{n-2,n-1} a_{n-1,n-2}}{b_{n-2}} \quad (94.)$$

$$b_n = a_{n,n} - \frac{a_{n-1,n} a_{n,n-1}}{b_{n-1}} \quad (95.)$$

Majd e két tényező szorzatát átalakítjuk:

$$\begin{aligned} b_{n-1} b_n &= b_{n-1} a_{n,n} - a_{n-1,n} a_{n,n-1} = \\ & \left(b_{n-1} - \frac{a_{n-1,n} a_{n,n-1}}{a_{n,n}} \right) a_{n,n} = \\ & \left(a_{n-1,n-1} - \frac{a_{n-2,n-1} a_{n-1,n-2}}{b_{n-2}} - \frac{a_{n-1,n} a_{n,n-1}}{a_{n,n}} \right) a_{n,n} \end{aligned} \quad (96.)$$

Ha a (94.)-(95.) egyenletben b_{n-1} és b_n helyére a (96.) egyenlet utolsó sorának tényezőit írjuk, látjuk, hogy a tétel állítása $m = n - 1$ -re teljesül.

Most feltételezzük, hogy m -re is teljesül, és részletesen kiírjuk az $(m - 1)$ -edik és az m -edik tényezőt:

$$a_{m-1} = a_{m-1,m-1} - \frac{a_{m-2,m-1} a_{m-1,m-2}}{a_{m-2}} \quad (97.)$$

ha $m \geq 2$, és

$$a_m = a_{m,m} - \quad (98.)$$

$$- \frac{a_{m-1,m} a_{m,m-1}}{a_{m-1}} - \frac{a_{m,m+1} a_{m+1,m}}{a_{m+1}}$$

ha $m \leq n - 1$.

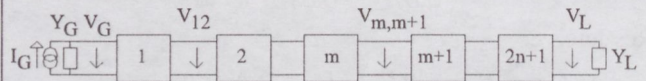
E két tényező szorzatát a (96.) egyenlethez hasonlóan átalakítjuk:

$$\begin{aligned} a_{m-1} a_m &= \\ &= a_{m-1} a_{m,m} - a_{m-1,m} a_{m,m-1} - a_{m-1} \frac{a_{m,m+1} a_{m+1,m}}{a_{m+1}} \\ &= \left(a_{m-1} - \frac{a_{m-1,m} a_{m,m-1}}{a_{m,m} - \frac{a_{m,m+1} a_{m+1,m}}{a_{m+1}}} \right) * \\ & * \left(a_{m,m} - \frac{a_{m,m+1} a_{m+1,m}}{a_{m+1}} \right) \end{aligned} \quad (99.)$$

Ha a (85.)-(90.) egyenlet szerinti felírásban az $(m - 1)$ -edik és az m -edik tényező kivételével minden tényező kifejezését változatlanul hagyjuk, és e két tényező helyére a (99.) egyenlet utolsó sorának tényezőit írjuk, akkor látjuk, hogy a tétel állítása $(m - 1)$ -re is fennáll.

Ezzel a tétel bizonyított.

Alkalmazzuk az 5. tételt n -fokozatú erősítő admittancia-mátrixára! A 12. ábra n fokozatú erősítő blokkvázlatát mutatja. A páratlan számú blokkok a csatolóhálózatokat, a párosok az erősítő eszközöket jelentik.



12. ábra. n -fokozatú erősítő blokkvázlata

Az ábrán látható n -fokozatú erősítő a következő egyenlettel jellemezhető:

$$\begin{bmatrix} I_G \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_G + Y_{11}^{(1)} & Y_{12}^{(1)} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} & \dots & 0 & 0 & 0 \\ Y_{21}^{(1)} & Y_{22}^{(1)} + Y_{11}^{(2)} & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & Y_{21}^{(2)} & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & Y_{22}^{(m-1)} + Y_{11}^{(m)} & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Y_{21}^{(m)} & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & Y_{22}^{(2n+1)} + Y_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ V_{12} \\ \dots \\ V_{m-1,m} \\ \dots \\ V_L \end{bmatrix} \quad (100.)$$

A (100.) egyenletrendszerben látható admittancia-mátrixra az 5. tételt alkalmazva, a determináns szorzat alakja a következő lesz:

$$\begin{aligned} |Y| &= \left(Y_G + Y_{11}^{(1)} \right) \left(Y^{(1,o)} + Y_{11}^{(2)} \right) \dots \\ & \dots \left(Y^{(m,o)} + Y^{(m+1,i)} \right) \dots \end{aligned} \quad (101.)$$

$$\left(Y_{22}^{(2n)} + Y^{(2n+1,i)} \right) \left(Y_{22}^{(2n+1)} + Y_L \right)$$

ahol a következő jelöléseket vezettük be: az 1. blokk kimeneti admittanciája a bemenet Y_G -vel történő lezárása esetén

$$Y^{(1,o)} = Y_{22}^{(1)} - \frac{Y_{12}^{(1)} Y_{21}^{(1)}}{Y_G + Y_{11}^{(1)}} \quad (102.)$$

Az m -edik blokk kimeneti admittanciája a bemenet $Y^{(m-1,o)}$ -val történő lezárása esetén

$$Y^{(m,o)} = Y_{22}^{(m)} - \frac{Y_{12}^{(m)} Y_{21}^{(m)}}{Y^{(m-1,o)} + Y_{11}^{(m)}} \quad (103.)$$

Az $m + 1$ -edik blokk bemeneti admittanciája, a kimenet $Y^{(m+2,i)}$ -vel történő lezárása esetén

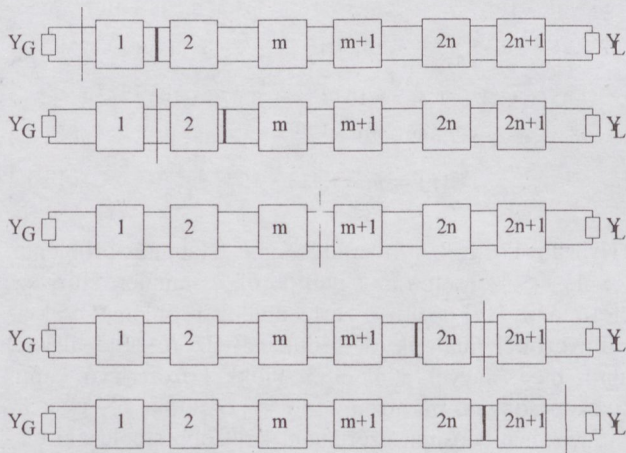
$$Y^{(m+1,i)} = Y_{11}^{(m+1)} - \frac{Y_{12}^{(m+1)} Y_{21}^{(m+1)}}{Y_{22}^{(m+1)} + Y^{(m+2,i)}} \quad (104.)$$

A $2n + 1$ -edik blokk bemeneti admittanciája a kimenet Y_L -lel történő lezárása esetén

$$Y^{(2n+1,i)} = Y_{11}^{(2n+1)} - \frac{Y_{12}^{(2n+1)} Y_{21}^{(2n+1)}}{Y_{22}^{(2n+1)} + Y_L} \quad (105.)$$

A (101.) egyenletben szereplő szorzótényezők fizikai tartalommal rendelkeznek. Az n -fokozatú erősítő esetén $2n + 2$ szorzótényezőt találunk a (101.) egyenletben, melyek közül $2n + 1$ tényező egyenlő az erősítőlánc valamelyik összekapcsolt kapupárjának admittanciájával, egy másik kapupár rövidre zárása mellett. Az $m + 1$ -edik szorzótényező esetén a rövidzár nem szükséges. A szorzótényezők fizikai jelentését a 13. ábrán foglaltuk össze. Ezzel teljessé tettük a 3. tétel bizonyítását is. A (101.) egyenletet a 3. és 4. fejezetben leírtak szerint lehet n -fokozatú erősítő stabilizálására alkalmazni. Megjegyezzük, hogy a számításokban nem aknáztuk ki mélyen azt, hogy a csatolóhálózatokat és az aktív elemeket az erősítőláncban felváltva egymás után következőnek tételeztük fel. Ezért az eredmények a csatolóhálózatok és az aktív elemek tetszőleges sorrendje esetére is értelemszerűen alkalmazhatók.

További egyszerűsítést jelentene, ha a (85.)–(90.) szerinti felírásban ismét meg lehetne fordítani a rekurzió irányát. Azonban beláthatjuk, hogy ezt nem lehet megtenni. A (85.)–(90.) szerinti felíráshoz ugyanis a (91.)–(93.) szerinti felbontásnak azt a tulajdonságát használtuk fel, hogy az egyes tényezők értéke nem függ a nála nagyobb sorszámúakétól. Ezzel ellentétben a (88.) egyenlettel kifejezett m -edik tényező egyaránt függ az $m - 1$ -edik és az $m + 1$ -edik tényező értékétől, minden ennél kisebb sorszámú az előző, minden ennél nagyobb sorszámú pedig a következő tényezőtől. Ezért a rekurzió sorrendjét csak egyszer lehet megfordítani.

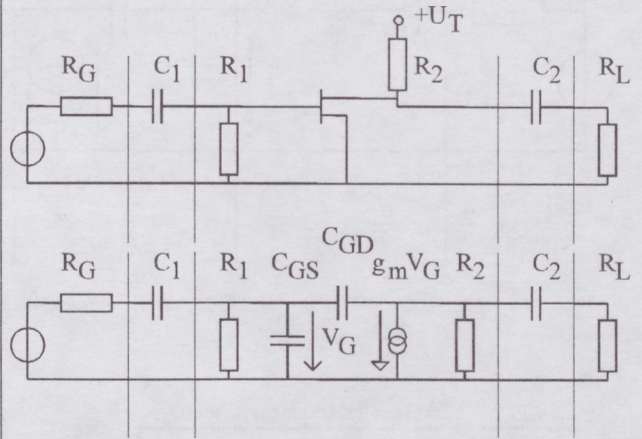


13. ábra. Az erősítőrendszer admittancia-mátrixa determinánsának szorzótényezői az ábrán vékony vonallal jelzett helyeken mérhető admittanciákkal egyeznek meg

7. PÉLDÁK

A következő egy egyszerű példa annak illusztrálására, hogy a determináns szorzat felbontását egyszerűen alkalmazni lehet a stabilitásnak az aktuális áramköri elemek értékével történő jellemzésére.

A determináns (51.) egyenlet szerinti felbontását egyfokozatú FET erősítőre alkalmazzuk. Az erősítő kapcsolási rajza a 14. ábrán látható.



14. ábra. Egyfokozatú, RC csatolású FET erősítő kapcsolási rajza és modellje. A hálózatrészeket szaggatott vonallal választottuk el.

A 3. tétel értelmében az ábrán látható hálózat admittancia-mátrixának determinánsa négy tényező szorzataként írható fel. Az első, második és negyedik tényezőnek csak a bal felső sarkban lehet gyöke. Így az erősítő stabilitását a harmadik tényező dönti el. Az (51.) egyenlet szerint a harmadik tényező a következőképpen írható fel:

$$y_3 = G_2 + pC_{GD} - \frac{(g_m - pC_{GD})(-pC_{GD})}{\frac{pC_1}{1 + R_G p C_1} + G_1 + pC_{GS} + pC_{GD}} + \frac{pC_2}{1 + R_L p C_2} \quad (106.)$$

ahol p a komplex frekvenciát jelöli. Ha $C_1, C_2 \rightarrow \infty$, akkor a fenti összefüggés a következőképpen egyszerűsödik:

$$y_3 = G_2 + pC_{GD} - \frac{(g_m - pC_{GD})(-pC_{GD})}{\frac{1}{R_G} + G_1 + pC_{GS} + pC_{GD}} + \frac{1}{R_L} \quad (107.)$$

Tehát az erősítő stabilitását az alábbi egyenlet gyökei valós részének az előjele határozza meg:

$$\left(\frac{1}{R_G} + G_1 + pC_{GS} + pC_{GD} \right) \left(\frac{1}{R_L} + G_2 + pC_{GD} \right) - (g_m - pC_{GD})(-pC_{GD}) = 0 \quad (108.)$$

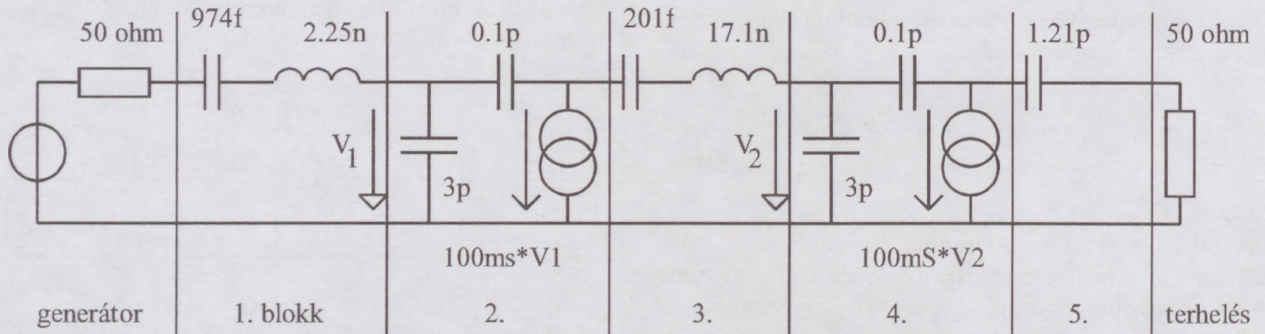
Felismerjük, hogy a (108.) egyenlet bal oldalán a FET rezisztív elemekkel kiegészített admittancia-mátrixának determinánsa látható. (Ha a FET nem rendelkezne belső visszacsatolással, akkor a második tag eltűnne, és a gyökök valós része mindig negatív lenne.) A példa tanulsága az, hogy az ismert módszer igen hatékonyan alkalmazható a stabilitás feltételének áramkör-specifikus felírására.

A következőkben kétfokozatú erősítőt vizsgálunk. Az erősítő a 0,5–2,5 GHz-es sávra van tervezve és nem teljesíti a feltétel nélküli stabilitás követelményeit. Az erősítő

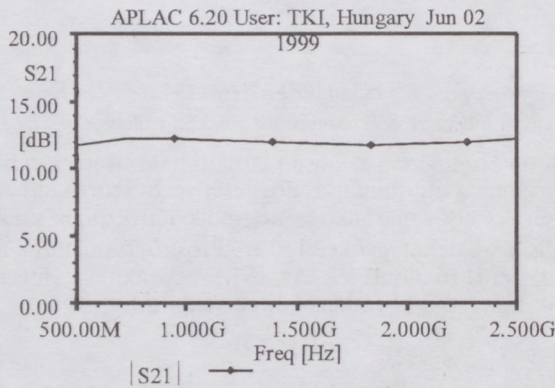
admittancia-mátrixa determinánsának tényezőit analizáljuk és megadjuk a stabilizálás egy lehetséges módját.

Az erősítő kapcsolási rajzát a 15. ábrán tüntettük fel. Az erősítő jellemző paraméterei a 16. és 17. ábrán láthatók. Az erősítő a $K > 1$ stabilitás-feltételt megsérti, ahol K a Rollett stabilitás-tényező.

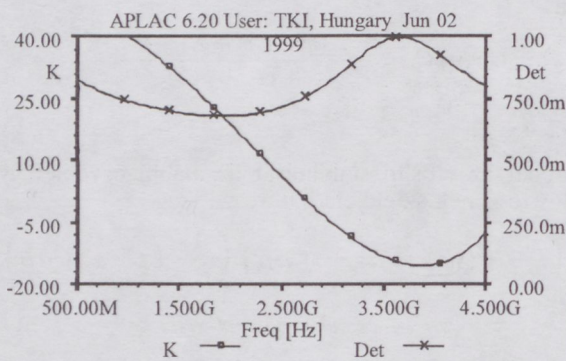
Vegyük észre, hogy az általunk ismertetett módszer alkalmazásához az áramkört a 15. ábrán feltüntetettől eltérően kell blokkokra bontanunk. Ugyanis a 15. ábra szerinti 1. és 3. blokk transzfer admittanciájának pólusa van a $j\omega$ tengelyen, és ez a 2. tétel feltételeit sérti. Az új blokkokat a 18. ábra mutatja.



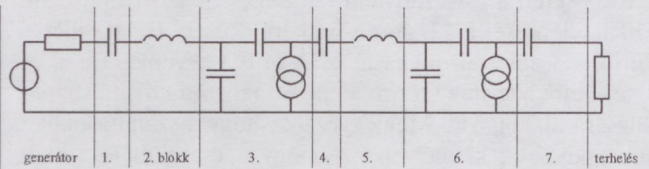
15. ábra. Kétfokozatú erősítő kapcsolási rajza



16. A kétfokozatú erősítő erősítésének frekvenciamenete



17. ábra. A kétfokozatú erősítő Rollett stabilitás-tényezője és a reflexiós mátrix determinánsa a frekvencia függvényében. A feltétel nélküli stabilitás feltétele $K > 1$, $Det < 1$ egyidejű teljesülése



18. A kétfokozatú erősítő módosított felosztása blokkokra

Most a (101.) egyenletet alkalmazzuk hét blokk esetén, ezért a tényezők száma nyolc. Az áramkört a 4. és 5. blokk között vágjuk el, ezért $m = 4$. A szorzat felbontásban az 1., 2. és 8. tényező nyilvánvalóan nem mutat instabilitást. A többi tényező számlálóját, melyet $A_i(p)$, $i = 3, 4, \dots, 7$ jelöli, fél-szimbolikus formában határozzuk meg. A legkisebb kitevőjű tagot 1-re normalizáljuk:

$$A_3(p) = p + 3.706 * 10^{-11} p^2 + 1.668 * 10^{-21} p^3 \quad (109.)$$

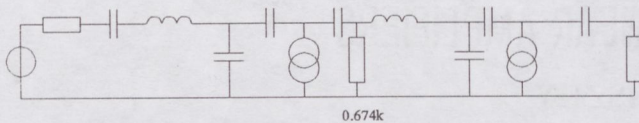
$$A_4(p) = 1 + 1.703 * 10^{-10} p + 6.687 * 10^{-21} p^2 + 2.023 * 10^{-31} p^3 + 4.528 * 10^{-58} p^4 \quad (110.)$$

$$A_5(p) = 1 + 6.623 * 10^{-10} p + 9.369 * 10^{-20} p^2 + 5.636 * 10^{-30} p^3 + 2.688 * 10^{-40} p^4 + 6.998 * 10^{-51} p^5 + 1.28 * 10^{-61} p^6 + 4.101 * 10^{-73} p^7 - 1.773 * 10^{-97} p^8 \quad (111.)$$

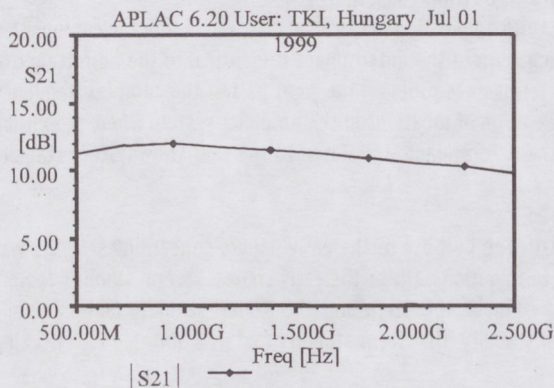
$$A_6(p) = 1 + 1.352 * 10^{-10} p + 6.078 * 10^{-20} p^2 + 2.369 * 10^{-31} p^3 \quad (112.)$$

$$A_7(p) = p + 4.618 * 10^{-12} p^2 \quad (113.)$$

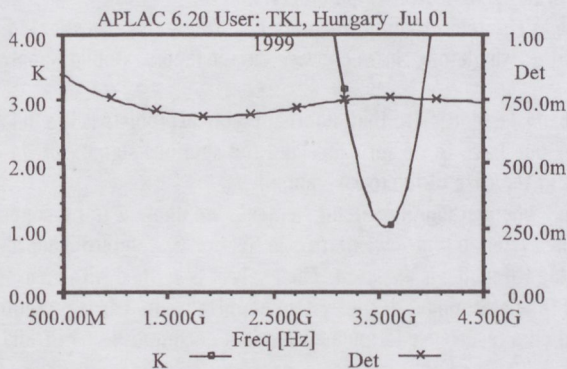
Nyilvánvaló, hogy A_7 esetén nincs stabilitás-probléma. A_3 , A_4 és A_6 esetén az együtthatók és minden Hurwitz-determináns [14] pozitív. Ezért stabilitás-problémát csak az 5. tényezőnél találunk. A problémát az R_5 ellenállással oldjuk meg, melyet a 4. és 5. blokk között levő kapuösszekapcsolással párhuzamosan kapcsolunk. R_5 csak az 5. tényezőt módosítja, ezért nem kell több stabilizáló elemet beiktatnunk. Ahhoz, hogy A_5 együtthatói pozitívak legyenek, $R_5 \leq 0.674 \text{ k}\Omega$ -os ellenállást kell alkalmaznunk. A stabilizált erősítő kapcsolási rajzát és jellemző paramétereit a 19–21. ábrán adjuk meg.



19. ábra. A kétfokozatú erősítő kapcsolási rajza a stabilizálás után



20. ábra. A kétfokozatú erősítő erősítésének frekvenciamenete a stabilizálás után



21. A kétfokozatú erősítő stabilitását jellemző paraméterek frekvenciamenete a stabilizálás után

8. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS MEGJEGYZÉSEK

Kaszád kapcsolású erősítők azon pontjainak megtalálására vonatkozó problémát oldottunk meg, ahová az erősítő működését stabilizáló áramkört elemek kapcsolhatók. Megmutattuk, hogy a probléma tridiagonális mátrixok determinánsa szorzat alakban történő felírására vezet. Ezért tridiagonális mátrixok determinánsáknak kifejtésére vonatkozó azonosságokat adtunk meg, és ezeket kaszád kapcsolású erősítők admittancia mátrixa determinánsának szorzat felbontására alkalmaztuk. Megmutattuk, hogy a determináns tényezőinek Hurwitz-vizsgálata lehetőséget nyújt a stabilizáló elemek helyének megtalálására. Bebizonyítottuk, hogy a determináns szorzótényezői a Stern stabilitás-tényezővel kapcsolatban vannak.

A gyakorlatban kényelmesen lehet a stabilizáló elemeket az áramkörti blokkok összekapcsolásával párhuzamosan kapcsolni. Ezért a stabilizálási problémát az erősítőrendszer admittancia-mátrixából kiindulva oldottuk meg. Más, impedancia formalizmus is használható, amely az áramkörti blokkok kapuival sorosan kapcsolt stabilizáló elemekre vezet.

A stabilitást visszacsatolás alkalmazásával is biztosíthatjuk. A visszacsatoló áramkörben kis veszteségű elemeket alkalmazva a maximális stabil erősítés megközelíthető. Az általunk ismertetett módszerrel a stabilizálás után az erősítés kisebb. Azonban az itt bemutatott módszer előnye a kényelem: a stabilizáló elemeket utólag is be lehet építeni.

A bemutatott módszer közvetlenül nem alkalmazható elosztott paraméterű áramkörök stabilizálására. Ehhez a tápvonalak koncentrált elemű modelljét kell alkalmazni.

A bemutatott szorzat felbontás nem egyértelmű, a (101.) egyenletben m választásától függ. Példákon bemutattuk, hogy a (101.) egyenlet hatékonyan alkalmazható az áramkör-specifikus stabilitás-feltételek felírásában, és azt, hogy bonyolultabb erősítő-kapcsolások esetén ügyelni kell arra, hogy a blokkok transzfer admittanciája ne tartalmazzon jobb félsíkbeli pólust.

A szerző köszönetét fejezi ki Rózsa Pál professzor úrnak a cikk átnézése során adott hasznos tanácsaiért.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J. G. Linvill, J. F. Gibbons: „*Transistors and Active Circuits*”, McGraw-Hill, 1961, p. 248
- [2] A. P. Stern: „Stability and Power Gain of Tuned Transistor Amplifiers”, *Proceedings of the IRE*, March 1957, pp. 335-343
- [3] J. M. Rollett: „Stability and Power -Gain Invariants of Linear Twoports”, *IRE Transactions on Circuit Theory*, March 1962, pp. 29-32
- [4] D. C. Youla: „A Note on the Stability of Linear, Nonreciprocal n -Ports”, *Proceedings of the IRE*, Vol. 48, pp. 121-122
- [5] J. O. Scanlan, J. S. Singleton: „The Gain and Stability of Linear Two-Port Amplifiers”, *IRE Trans. on CT*, September 1962, pp. 240-246
- [6] W. H. Ku: „Unilateral Gain and Stability Criterion of Active Two-Ports in Terms of Scattering Parameters”, *Proceedings of the IEEE*, Nov. 1966, pp. 1617-1618
- [7] D. Woods: „Reappraisal of the Unconditional Stability Criteria for Active 2-Port Networks in Terms of S Parameters”, *IEEE Transactions on CAS*, Vol. CAS-23, No. 2, February 1976, pp. 73-81.
- [8] P. Rózsa: „*Linear Algebra and Its Applications*”, in Hungarian, Budapest, Tankönykiadó, 1991
- [9] DesignSoft Inc.: „*TINA 3.0 – Toolkit for Interactive Network Analysis*”, 1995, Users Guide
- [10] M. Valtonen et al.: „*APLAC – An Object Oriented Analog Circuit Simulator and Design Tool*”, 1992, Helsinki University of Technology
- [11] R. Meys: „Review and Discussion of Stability Criteria for Linear 2-Ports”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 37, No. 11, November 1990, pp. 1450-1452
- [12] M. L. Edwards: „A New Criterion for Linear 2-Port Stability Using a Single Geometrically Derived Parameter”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 40, No. 12, December 1992, pp. 2303-2311
- [13] M. Ohtomo: „Stability Analysis and Numerical Simulation of Multidevice Amplifiers”, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 41, No. 6/7, June/July 1993, pp. 983-991
- [14] F. R. Gantmacher: „*Theory of Matrices*”, Chelsea, 1959
- [15] J. Ladvánszky: „*On the Stability of Multistage Amplifiers*”, Proceedings of the European Conference on Circuit Theory and Design, ECCTD'99, Stresa, Italy, Aug.-Sept. 1999

STABILISATION OF LINEAR AMPLIFIERS

J. LADVÁNSZKY

INNOVATION COMPANY FOR TELECOMMUNICATIONS, TKI

The paper deals with the problem of cancelling spurious signals that arise due to instability in amplifiers of cascaded structure. The solution of the stabilisation problem is based on the product decomposition of the determinant of tridiagonal matrices.

Two identities for expressing the determinant of tridiagonal matrices are presented. With application of the identities, the product decomposition of the determinant of the system admittance matrix is obtained. We show that each term of the determinant is identical to the admittance of a part of the amplifier system under proper termination. For stability, none of the terms have roots on the right half of the complex frequency plane. As a consequence, the Hurwitz test of these terms can be applied for identification of locations in the amplifier system where stabilising circuit elements are allowed to be inserted. Moreover we show that the terms of the determinant are related to the well-known Stern stability factor.

Throughout this paper, linear time invariant lumped-element circuits are considered.

Stability investigations of linear circuits began with the works of Bode and Nyquist. The purpose of the early papers concerning stability was to find conditions providing stability of the circuit under the actual or all possible terminations. Up to the early sixties, several stability factors for linear circuits were presented. The most well known ones among them are the Linvill, the Stern and the Rollett stability factors. While the Linvill and the Rollett stability factors are suitable for checking unconditional stability, the Stern stability factor is suitable for checking stability under given terminations.

Youla considered the problem of simultaneous stability of a non-reciprocal and a related reciprocal circuit. Interconnection between stability and passivity was emphasised. Scanlan and Singleton investigated the maximum value of the power gain in a stabilised circuit and its realisation. Ku obtained the stability conditions and the Rollett stability factor in terms of scattering parameters. Woods compared some different forms of the previously published stability conditions and derived a new one, also in terms of scattering parameters.

More recently, the characterisation problem of circuit stability is still studied. The role of complementary conditions was investigated, then a successful attempt was made to replace the set of stability conditions with a single one. In microwave circuit theory, stability analysis of multidevice amplifiers has been performed.

All the mentioned papers consider the characterisation problem of circuit stability. In addition to that, another practical problem is the following. Given a circuit that produces spurious signals due to instability. What does one have to do for cancelling the spurious signals, or, in other words, how is the circuit stabilised? This problem is especially characteristic in the case of microwave amplifiers.

This paper deals with the identification of locations inside an unstable circuit where stabilising circuit elements are allowed to be connected. The method is based on the product decomposition of the determinant of the system admittance matrix. In Section 2, a determinant identity is given that we use in the development of our method. In Section 3, a one-stage amplifier is analysed. The analysis is verified with an example. In Section 4, the relation between the Stern stability factor and the terms of the determinant of the system admittance matrix is presented. In Section 5 extension of our method for multiport amplifiers is presented based on a recurrence formula for product decomposition of tridiagonal matrices. Section 6 contains some examples.

It is shown that the background of the problem is the product decomposition of the determinant of tridiagonal matrices. We also proved that the terms of the determinant of the system admittance matrix are related to the Stern stability factor.

In a practical situation, the most convenient way of stabilisation is the insertion of circuit elements in parallel with a junction of the amplifier. Consequently the stabilisation is formulated in terms of the system admittance matrix. Other, i. e. impedance formulation is also possible that results in stabilising elements connected in series with the junctions.

Stability can also be provided using feedback circuit. In that way, applying low-loss elements in the feedback circuit, nearly the maximum stable gain can be achieved in practice. Gain achievable by our method is smaller. However, convenience is an advantage of our method: Parallel stabilising elements can be inserted into the circuit subsequently.

The presented method is directly not applicable to distributed amplifier circuits. For this purpose, finite lumped element approximations of the transmission lines can be applied.

The product decomposition is not unique, it depends on the choice of m in Eq. 89. Application of Eq. (89) is very efficient in formulation of stability condition in terms of circuit elements.



Ladvánszky János a Távközlési Innovációs Rt. tudományos tanácsadója. Okleveles villamosmérnök (1978), a műszaki tudomány kandidátusa (1988), egyetemi doktor (1990). Szakmai érdeklődési köre az elektronikus eszközök áramköri modellezése, a mikrohullámú S paraméter-mérés, az áramkörök elmélete, mikrohullámú, majd mikrohullámú-optikai áramkörök tervezésének problémái, köztük a zajcsökkentés és más témakörök. Számos szakmai szervezet, köztük a Híradástechnikai és Informatikai Tudományos Egyesület, a Magyar Tudományos Akadémia Köztudományi Osztálya és a New York-i Tudományos Akadémia tagja, huzamosan a Híradástechnika c. lap szerkesztője.

ANIZOTROP ANYAGOK HISZTERÉZIS KARAKTERISZTIKÁJÁNAK VEKTORIÁLIS SZIMULÁCIÓJA

SZABÓ ZSOLT és IVÁNYI AMÁLIA

BUDAPESTI MŰSZAKI EGYETEM, ELMÉLETI VILLAMOSSÁGTAN TANSZÉK
1521 BUDAPEST

TEL: (36 1) 463 2914, FAX: (36 1) 463 3189, E-MAIL: SZABO@EVTSZ1.EVTBME.HU

A mágneses hiszterézis jelenség modellezése izotrop anyagok esetén is számos problémát vet fel. Anizotrop anyagok esetén még nehezebb a feladat megoldása, mivel a mágneses térerősség és a mágneses indukció vektorai szöget zárnak be egymással.

A ferromágneses anyagokat kis azonos irányú mágneses momentummal rendelkező tartományok összességének (doméneknek) tekinthetjük, melyek telítéssig mágnesezettek. A Stoner–Wohlfarth modell az anyagot apró ellipszoid alakú részecskéknak tekinti, melyek nincsenek egymással kölcsönhatásban. Mindegyik részecske M_s telítési értékig mágnesezett, és egy mágneses domént jelképez, amely szabadon elfordulhat a mágneses térerősség hatására. A modell a doménfalakat nem veszi figyelembe.

Egy Stoner–Wohlfarth részecske energiája, az anizotropiából származó energia, és a mágneses kölcsönhatásból származó energia összege. A mágnesezettség vektorának helyzete megfelel egy energia minimumnak, melyet az egyensúlyi feltételből határozhatunk meg (az energia első és második deriváltja). A második deriváltat kiértékelve egy aszteroid egyenletét kapjuk, amely két tartományt különít el. Az aszteroidon kívül a részecskének egy energia minimum létezhet, míg az aszteroid belsejében kettő. Az M mágnesezettség iránya párhuzamos az aktuális energiaminimumhoz tartozó érintővel.

A Stoner–Wohlfarth részecskét elemi vektor hiszterézis operátornak tekinthetjük. Az operátor bemenete a mágneses térerősség vektora, kimenete a mágnesezettség vektora.

Bevezetve a modellmátrix fogalmát, kölcsönhatásban nem levő, elemi vektor hiszterézis operátorok segítségével különféle makroszkopikus hiszterézis modelleket lehet előállítani. A modell kimenete a modellmátrix sorainak és oszlopainak vektor összege.

Izotrop modell esetén az elemi vektor hiszterézis operátorok fő mágnesezési irányai egyenletesen elosztottak a térben. Az operátorok mágnesezettségei és anizotropikus állandói azonosak. Anizotrop modellt az operátorok fő mágnesezési irányainak, mágnesezettségeinek és anizotropikus állandóinak különféle eloszlásaival lehet felépíteni.

A kölcsönhatásban nem levő hiszterézis operátorokkal felépített modellek csak részleges leírást adnak a mágnesezési folyamatról. Bevezetve egy domináns hiszterézis operátort, valamint a Preisach modellhez hasonló eloszlásfüggvényt, egy általánosabb vektor modellt kapunk.

1. BEVEZETÉS

A mágneses anyagok hiszterézis karakterisztikával jellemezhető tulajdonságai jöhetnek már régen ismertek, mégis a jelenség bonyolult volta miatt számos, különböző filozófiaiakra és anyagmodellekre épülő hiszterézis modelleket dolgoztak ki a mágnesezési folyamat leírására [1], [5], [6], [15]. Anizotrop közegek esetén külön problémát jelent, hogy a mágneses térerősség és mágneses indukció vektorok nem párhuzamosak, szöget zárnak be egymással.

Ebben a dolgozatban összefoglaljuk a Stoner–Wohlfarth hiszterézis modellt és annak működését. A kapott eredmények egy részét felhasználva egy általánosabb anyagmodellt vezetünk be, melynek kialakításában fő szempont volt az egyszerűség és a könnyű kezelhetőség, valamint a CAD rendszerekbe való beilleszthetőség.

Az anyagokat a mágneses térben való viselkedésük alapján különféle csoportokba sorolhatjuk. A gyengén mágneses anyagok a para- és a diamágnesek, rendezett mágneses anyagok a ferro-, ferri-, valamint az antiferromágneses anyagok. Ez utóbbiak esetén a mágnesezettséget biztosító elemi mágneses momentumok a kristályok tengelyeihez képest valamilyen adott rendben sorakoznak, és a hiszterézis karakterisztikával bíró anyagok csoportját képezik.

A ferro- és ferrimágneses anyagok szobahőmérsékleten nagyon erősen mágnesezhetőek, és még külső tér hiányában

is megtartják mágnességüket, amely a korábbi mágneses előélet függvénye. A mágnesezési folyamat nem reverzibilis, mágnesezési görbéjük hiszterézis karakterisztikát eredményez.

Az anyagok mágneses tulajdonságai elválaszthatatlanok a szerkezetüktől. A mágneses momentumok az elemi részecskék perdületéhez (spinhez) tartozó elemi mágneses momentumokból, és a részecskék által keltett mikróáramokhoz tartozó mágneses nyomatékokból erednek. A részecskék mozgásából származó mágneses momentumok kicsik. A nagy mágnesezettségek az elektronok perdületéből származnak. Ez határozza meg a ferro- és ferrimágneses anyagok viselkedését. Ezek az anyagok kis, azonos irányú mágneses momentummal rendelkező tartományokból (doméneknekből) állnak melyek telítéssig mágnesezettek. A domének esetén az elektronok perdületéből származó elemi mágneses momentumok párhuzamos beállása valósul meg kvantummechanikai kölcsönhatások következményeként. A domének szerkezetét különféle energiák határozzák meg, mint pl. a kristályszerkezetből adódó anizotropikus energia, a mágneses kölcsönhatásból származó energia, a kicserélődési energia, a magnetosztatikus energia, a magnetostrikációs energia, stb. [1], [2], [6].

Minden rendezett mágneses anyag a hőmérséklet növekedésével egy bizonyos hőfokon elveszti mágneses tulaj-

donságait, ezt nevezzük a ferro- és ferrimágneses anyagoknál Curie hőmérsékletnek. Felmelegítés a doménszerkezet megszűnését eredményezi, lehűtve az anyagot a Curie hőmérséklet alá, a domének kezdenek újra kialakulni. A lehűlés során a doménméreteket a magnetostrikció és a doménhatárok energiatöbblete határozza meg. A domének belül az elemi momentumok párhuzamosan állnak, de az egyes domének mágnesezettsége különböző irányba mutat. Ezért lehűtés után az eredő mágneses momentum nulla, mivel a domének egymás hatását kiegyenlítik. Növekvő amplitúdójú mágneses tér hatására, a mágneses anyagok belső energiája csökken, ha a térrel párhuzamos momentumok száma megnő. Emiatt megnő azon doméneknek a mérete melyeknek a mágnesezettsége a gerjesztő tér irányába mutat azon domének rovására, melyek a térrel ellentétesen állnak, vagy azzal nagy szöveget zárnak be. Ezzel párhuzamosan megfigyelhető a mágneses momentumok bizonyos mértékű, a tér irányba való befordulása is. Ha a domének növekedése már nagyon korlátozott, akkor a mágnesezettség mértéke csak a momentumok elfordulásával nőhet, végül kialakul egy telítési állapot. Ekkor az anyagban a mágneses momentumok gyakorlatilag azonos irányba mutatnak. Az anyag lemágnesezéséhez egy ellentétes irányú mágneses teret kell alkalmazni. Csökkentve a mágneses térerősséget a mágnesezettség nem követi az előző mágnesezési görbét, hanem a felett tér vissza. Ha a mágneses térerősség nullára csökken a remanens mágnesezettség értékét kapjuk. Tovább csökkentve a külső mágneses teret, a mágnesezettség a koercitív térerősség értékénél lesz nulla. Ebben az irányba gerjesztve tovább az anyagot, megint elérhető a telítés. Egy fel és le mágnesezési ciklus esetén egy teljes hiszterézis karakterisztikát kapunk. A hiszterézis karakterisztika szimmetrikus, ha mindkét irányba telítésig mágnesezünk.

A kristályszerkezetből adódóan minden anyagnál van egy olyan irány, amely mentén az anyag legkisebb H térerősség hatására telítődik. Az M_s telítési érték minden irányban ugyanakkora, de ezt különböző irányú H gerjesztés esetén más és más térerősnél lehet elérni. Azokat az irányokat ahol a telítést a legkisebb térerősségnél érhetjük el fő mágnesezési irányoknak nevezzük (easy axis). Azokat az irányokat, amelyek mentén a legnehezebb az anyagot a telítési mágnesezettség értékéig felmágnesezni kereszt mágnesezési irányoknak nevezzük (hard axis) [2], [6].

A doménhatárok nem kiterjedés nélküli tartományok, hanem bizonyos vastagságú rétegek, amelyeken belül a mágnesezettség iránya a doménfal rétegein keresztül fokozatosan változik. Az egyes doméneket elválasztó határok, a Bloch falak vastagságát a kicserélődési és az anizotropikus energiák együttesen szabják meg. A kicserélődési energia az elemi momentumokat egymással, az anizotropikus energia pedig a fő mágnesezési iránnyal akarja párhuzamosan állítani. Tehát a doménfalak meghatározott energiatöbblettel tartományok, ezért a doménszerkezet nem aprózódhat tetszőlegesen kis méretekre. Mindig olyan doménszerkezet alakul ki, amelyhez a legkisebb szabad energia tartozik.

Anizotrop közegek esetén a hiszterézis karakterisztikát mint a mágnesezettségnek az alkalmazott külső mágneses térre való vetületét szokás értelmezni.

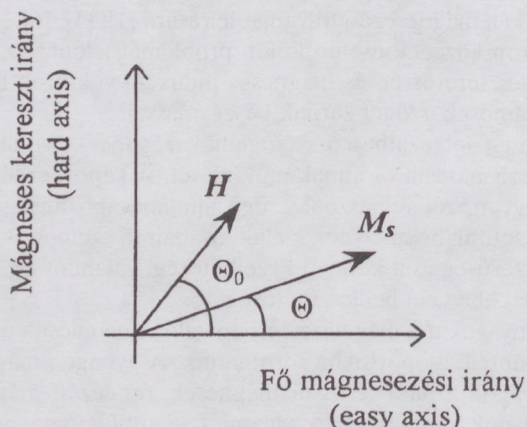
2. A STONER-WOHLFARTH MODELL

A Stoner–Wohlfarth modell alkalmas az anizotropiát mutató anyagok modellezésére [3], [1], [11], [12]. Az anizotropia vagy a részecskék alakjából származik, vagy a mágneses kristály anizotropiából. Tekintsük az anyagot apró ellipszoid alakú részecskék sokaságának, melyek nincsenek egymással kölcsönhatásban. Szimmetria okok miatt elegendő a feladatot síkban vizsgálni. A részecskének nagyobb mágnesezési tényező felel meg az ellipszis kis tengelye irányába mint a nagy tengelyébe. A fő mágnesezési irány az ellipszis nagy tengelye felé mutat, a keresztirány a kis tengely irányába esik. Mindegyik részecske M_s telítési értékig mágnesezett, és egy mágneses domént jelképez. A részecske mágnesezettsége a gerjesztő tér hatására elfordulhat a mágneses térerősség és a fő mágnesezési irány által meghatározott síkban. A modell a doménfalakat nem veszi figyelembe.

A klasszikus Stoner–Wohlfarth modell, felépítésénél fogva, jól modellezi az egydoménű anyagokat, vektori leírást ad a mágnesezési folyamatról. Figyelembe veszi a mágneses doménekre ható nyomatékok hatására a mágnesezettség vektor elfordulását az egyirányú anizotropiát mutató közegekben. Ezekkel a nyomatéki egyensúlyi állapotokhoz tartozó elfordulásokkal egyaránt ábrázolhatók a reverzibilis és irreverzibilis mágnesezési folyamatok.

2.1. Ellipszoid alakú részecske viselkedése

Tekintsünk egy mágneses szempontból ellipszoid alakú telítésig mágnesezett részecskét. Vizsgáljuk ennek a részecskének a viselkedését, egyirányú anizotropiát feltételezve. Kétdimenziós elrendezés esetén megkülönböztethetünk egy fő mágnesezési irányt, valamint egy rá merőleges mágneses kereszt irányt. Külső tér hiányában a részecske M_s mágneses momentuma a fő mágnesezési irányba mutat. A részecske mágnesezettségének iránya csak akkor tér el a fő mágnesezési iránytól, ha a rendszerbe egy külső gerjesztés hatására energiát táplálunk. Könnyű belátni, hogy a mágnesezettség vektora mindig a gerjesztő tér és a fő mágnesezési irány között található, amint ez az 1. ábrán látható.



1. ábra. Az ellipszoid alakú részecske mágnesezettsége

Külső gerjesztés esetén a mágnesezettség vektorára két forgatónyomaték hat, egyik az anizotropiából származó

forgatónyomaték, amely a fő mágnesezési irányba akarja fordítani a részecske mágneszettségét, míg a másik a külső mágneses tér hatására a gerjesztő tér irányába való elfordulást eredményezi. A mágneszettség stabil helyzete megfelel a forgatónyomatékok egyensúlyi helyzetének.

Az ellipszoid alakú részecske energiája, az anizotropiából származó energia és a mágneses kölcsönhatásból származó energia különbségeként írható fel

$$w = K \sin^2 \Theta - \mu_0 H M_s \cos(\Theta_0 - \Theta), \quad (1)$$

ahol K az anizotropikus állandó, H a külső mágneses térerősség abszolút értéke, M_s a Stoner–Wohlfarth részecske telítési mágneszettségének nagysága, Θ_0 a gerjesztő térerősség és a fő mágnesezési irány által bezárt szög, Θ a részecske mágneszettsége és a fő mágnesezési irány közötti szög.

Külső mágneses tér hatására a mágneszettség vektorának helyzete megfelel egy energia minimumnak, melyet az egyensúlyi feltételből határozhatunk meg. Az energia Θ szerinti első deriváltja az energia szélsőértékét, míg a második derivált pozitív volta az energia minimumát definiálja

$$\frac{\partial w}{\partial \Theta} = 0, \quad \frac{\partial^2 w}{\partial \Theta^2} \geq 0. \quad (2)$$

Az (1) szerinti energia kifejezésnek két, vagy négy szélsőérték felelhet meg, amely egy minimum és egy maximum, vagy két minimum és két maximum lehet. A második derivált egy olyan tartomány határvonalát határozza meg, amelyen belül az energiának négy szélsőértéke van, míg a tartományon kívül kettő.

Bevezetve az alábbi mennyiséget

$$\alpha = \frac{2K}{\mu_0 M_s}, \quad (3)$$

valamint a térerősség komponenseit derékszögű koordináta-rendszerbe felírva

$$H_x = H \cos \Theta_0, \quad H_y = H \sin \Theta_0, \quad (4)$$

az (1) egyenlet Θ szerinti első deriváltját kiértékelve az alábbi egyenletet kapjuk

$$\alpha \sin \Theta \cos \Theta + H_x \sin \Theta - H_y \cos \Theta = 0. \quad (5)$$

Ez egy negyedrendű egyenlet, melyből meghatározható a mágneszettség Θ iránya. A második deriváltat képezve a két tartományt elválasztó határvonal egyenlete a következő alakban adható meg

$$H_x^{2/3} + H_y^{2/3} = \alpha^{2/3} \quad (6)$$

Ez egy aszteroid egyenlete. Az α paraméter az aszteroid nagyságát határozza meg. Mértanilag értelmezve a fenti egyenletet, az aszteroid a síkot két tartományra osztja. Egy \mathbf{H} gerjesztő tér esetén az energiaminimumnak megfelelően az M_s mágneszettség iránya párhuzamos az aszteroid azon érintőjével, amelyet a \mathbf{H} vektor határoz meg. Az aszteroid belsejébe, ahol négy energia szélsőérték van ott négy érintő húzható, az aszteroidon kívül pedig kettő, a két energia szélsőértéknek megfelelően. Az aszteroid határvonalánál instabil állapotot ír le, a mágneszettség minimuma itt ugrásszerűen változhat. A mágneszettség irányát mindig az aktuális energiaminimum adja. Az érintési pont koordinátái

$$H_{xe} = -\alpha \cos^3 \Theta, \quad H_{ye} = \alpha \sin^3 \Theta. \quad (7)$$

Az aszteroidon kívül ahol az energiaegyenletnek két szélsőértéke van, csak egy energiaminimum létezik és ezzel a mágneszettség iránya egyértelműen meghatározott. Az aszteroid belsejében két energiaminimum van, közülük mindig csak az egyik az éppen aktuális. Az aktuális energiaminimumot abból a feltételből határozhatjuk meg, hogy a mágneszettség iránya folyamatosan változik mikor a gerjesztő mágneses térerősség a külső tartományból lép be az aszteroid belsejébe. A mágneszettség iránya ugrásszerűen változik mikor a gerjesztő mágneses térerősség az aszteroid belsejéből lép ki a külső régióba.

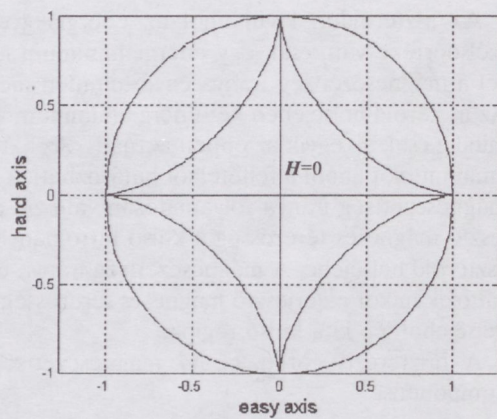
A hiszterézis görbe az M mágneszettség H irányú komponense

$$M = M_s \cos(\Theta - \Theta_0). \quad (8)$$

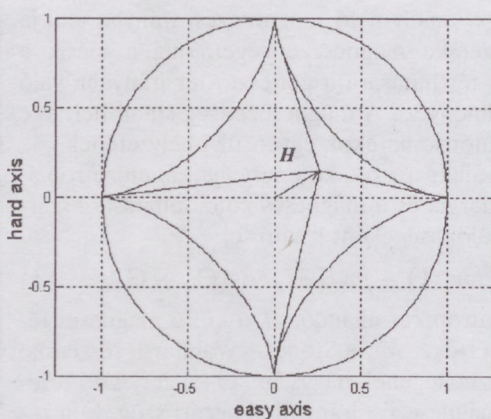
2.2. A Stoner–Wohlfarth részecske hiszterézise

A következőkben egy lineárisan növekvő majd csökkenő külső mágneses térnek a Stoner–Wohlfarth részecske-re való hatását vizsgáljuk. A külső tér iránya zárjon be $\Theta_0 = 30^\circ$ szöget a fő mágnesezési iránnyal, nagysága változzon $+H$ és $-H$ között. Az ellipszoid alakú részecske mágneszettsége legyen $M_s = 1$, valamint az $\alpha = 1$. A 2. ábrákon lineárisan változó mágneses térerősség estén az aszteroidhoz húzható, energia szélsőértékeket jelképező érintők vannak ábrázolva. A 3. ábrákon az adott nagyságú és irányú mágneses térerősség vektorához tartozó aktuális energiaminimumot kifejező érintő és a vele párhuzamos mágneszettség vektora látható.

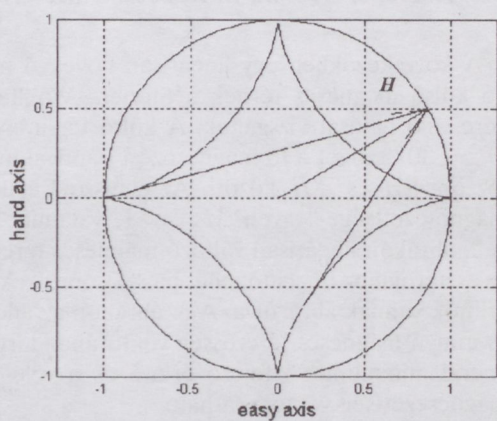
A 2.a ábra a kezdeti helyzetnek felel meg. A mágneses térerősség hiányában a négy érintő vízszintes és függőleges irányú. A mágneszettség vektora a fő mágnesezési irányba mutat, ahogy a 3.a ábrán látható. A mágneses térerősség növelésével, amíg a mágneses térerősség vektora az aszteroid belsejében található, négy érintő húzható (2.b ábra), a mágneszettség vektora elfordul a fő mágnesezési irányból a gerjesztő tér felé (3.b ábra). Ha a mágneses térerősség vektora az aszteroidon kívül található, a két energia szélsőértéknek megfelelően két érintő húzható (2.c ábra), melyek közül az egyik az energia minimumnak, a másik a maximumnak felel meg, a mágneszettség helyzete egyértelműen meghatározott (3.c ábra). Az aszteroid határvonalánál átlépésekor ebben az esetben nem történt ugrás, az aktuális energiaminimumok az aszteroid ugyanazon az oldalához húzható érintőknek felelnek meg. Tovább növelve a mágneses térerősség nagyságát, a pozitív telítési szakasz következik. Csökkentve a mágneses térerőssége nagyságát a részecske mágneszettsége kezd visszafordulni a fő mágnesezési irányba. Ha a mágneses térerősség zéróra csökken a mágneszettség vektora megint a fő mágnesezési irányba mutat. Ellenkező irányba mágneszelve (2.d és 3.d ábra), a mágneszettség vektora a gerjesztő tér irányába fordul, amint elérjük az aszteroid határvonalát, a mágneszettség vektora ugrásszerűen változik, az energiaminimumot jelképező érintő átkerül az aszteroid bal oldaláról a jobb oldalra (2.f és 3.f ábra). Tovább növelve a mágneses térerősség értékét a negatív telítési szakasz következik (2.e és 3.e ábra).



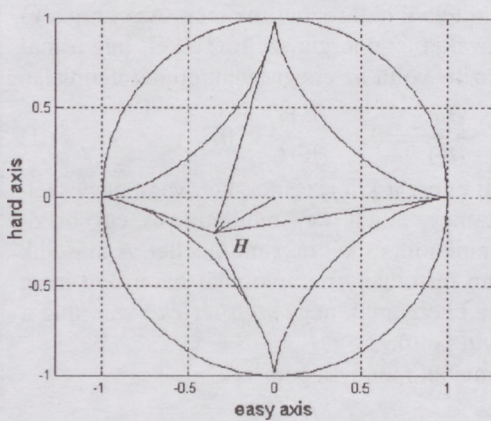
(a)



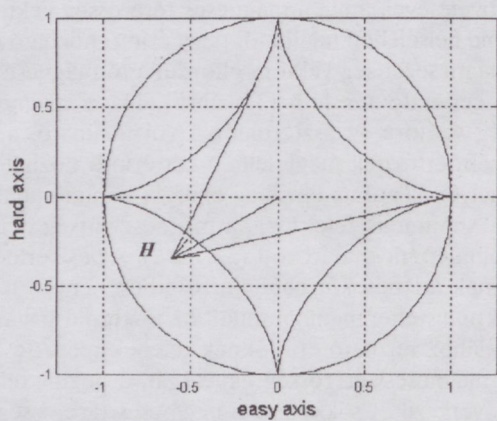
(b)



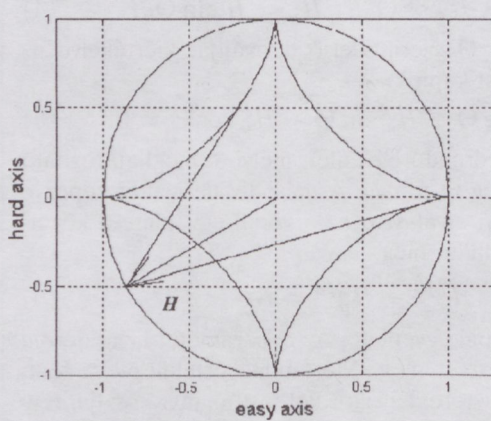
(c)



(d)

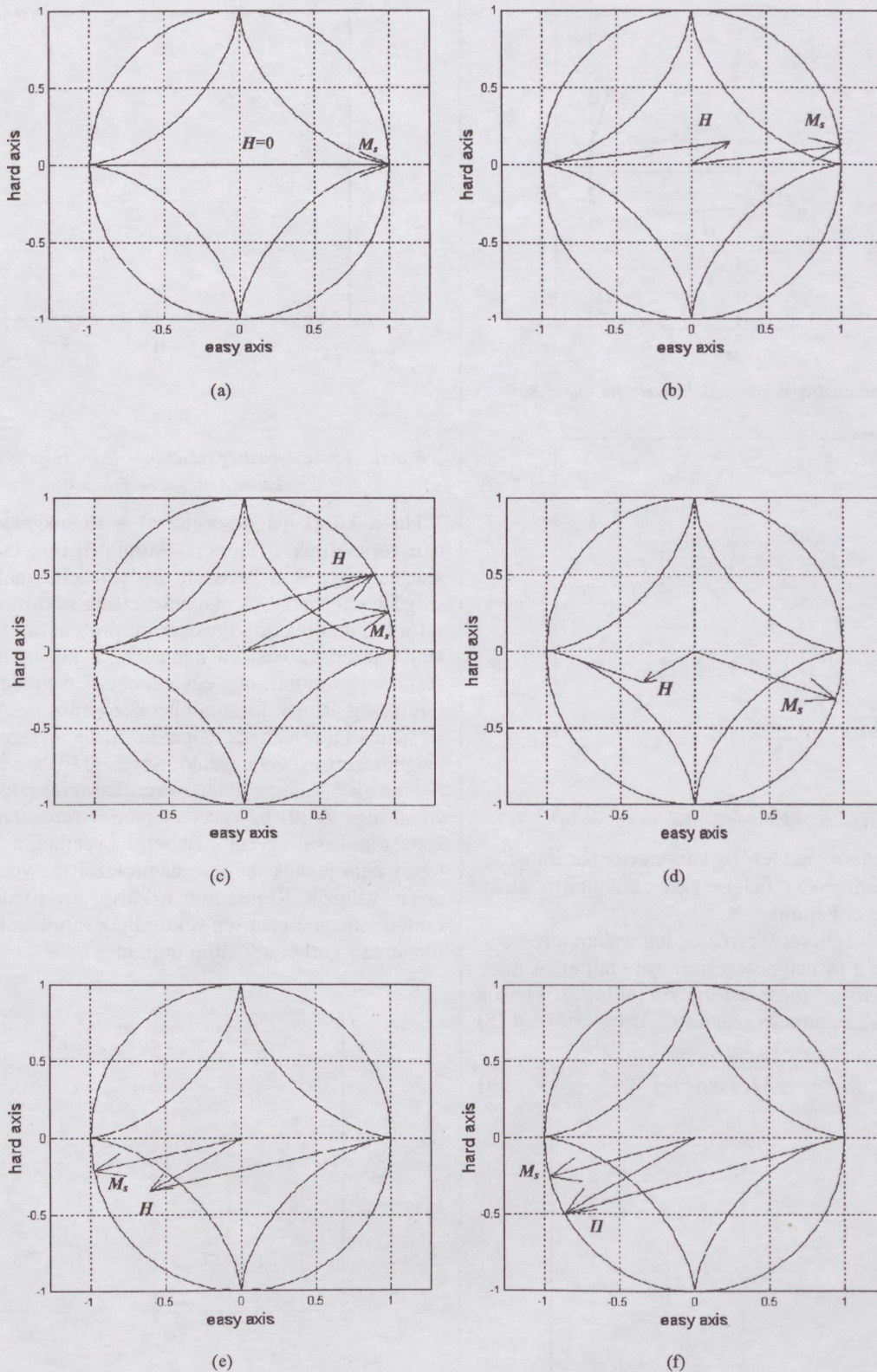


(e)



(f)

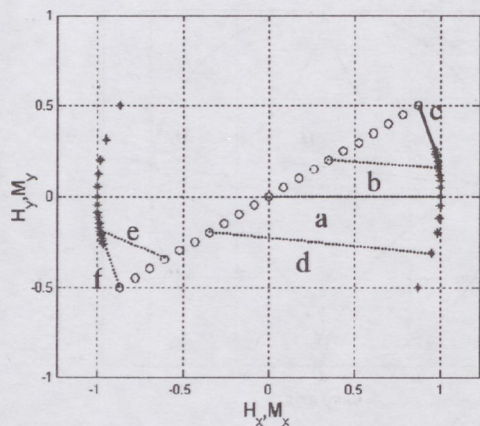
2. ábra. Különböző nagyságú mágneses térerősség vektorokhoz tartozó érintők, ha $\Theta_0 = 30^\circ$



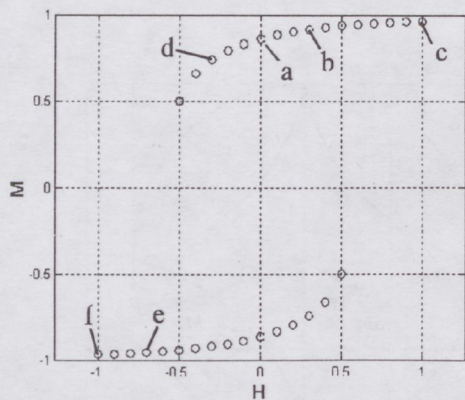
3. ábra. A mágneses térerősség és a mágnesezettség vektora különböző helyzetekben, ha $\Theta_0 = 30^\circ$

A 4. ábrán egy teljes fel és lemágnesezési ciklusnak megfelelően a mágneses térerősség és mágnesezettség vektorának végpontjai vannak ábrázolva. Rávetítve a mágnesezettség vektorát a mágneses térerősségre megkapjuk a Stoner–Wohlfarth részecske hiszterézis karakterisztikáját, amely az 5. ábrán látható. A hiszterézis karakterisztika felső és alsó szárán a mágnesezési folyamat reverzibilis, az

irreverzibilis szakasz a mágnesezettség vektorának ugrásával valósul meg. A mágnesezettség irányának ugrásszerű változása a Barkhausen jelenségnek felel meg. Egy teljes fel és lemágnesezési ciklus során a két ugrás energiavesztéseinek abszolút értékei egyenlők.



4. ábra. A mágnesezettség vektorának helyzete, ha $\Theta_0 = 30^\circ$

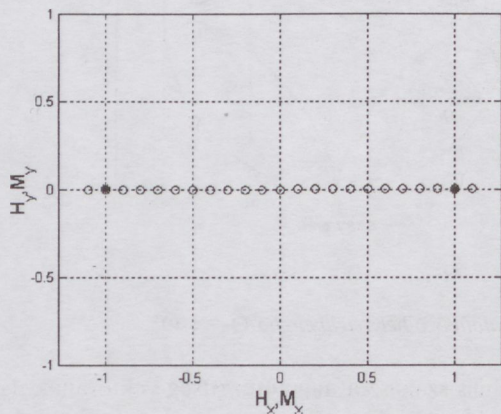


5. ábra. A hiszterézis karakterisztika, ha $\Theta_0 = 30^\circ$

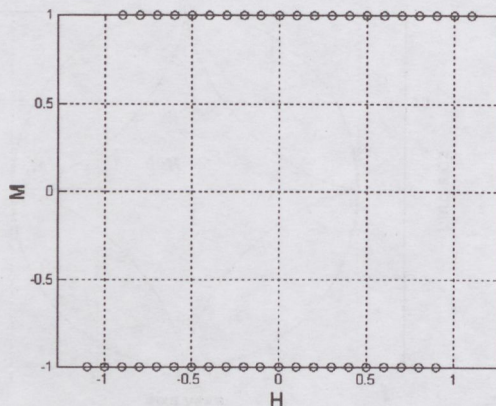
A modellből kapott hiszterézis karakterisztika irányfüggő, különböző irányokba mágnesezve, különböző alakú hiszterézis görbéket kapunk.

Mint láttuk, a mágneses térerősség hiányában a részecske mágneseessége a fő mágnesezési irányba mutat. A mágnesezettség és a fő mágnesezési irány által bezárt Θ szög vagy 0, vagy π . A remanens mágnesezettség értéke a (8) egyenlet alapján

$$M_r = \pm M_s \cos(\Theta_0). \quad (9)$$



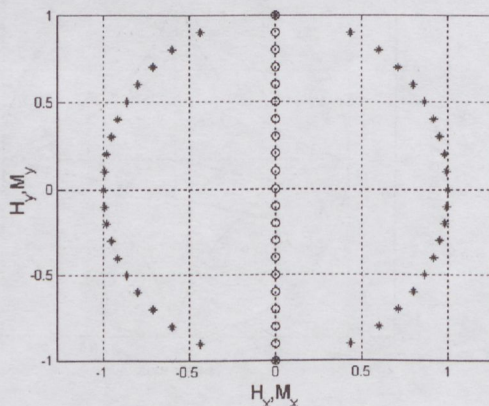
(a)



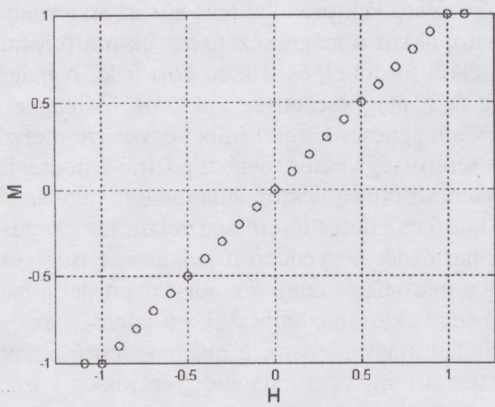
(b)

6. ábra. A mágnesezettség vektorának helygörbéje és a hiszterézis karakterisztika, ha $\Theta_0 = 0^\circ$

Ha a külső mágneses térrel a fő mágnesezési irányban gerjesztünk, a Stoner–Wohlfarth részecske hiszterézise megegyezik a Preisach modellnél használatos változóhiszterontal. A mágnesezettség vektorának változását a 6a, a derékszögű hiszteront a 6b ábra szemlélteti. A mágnesezettség vektora mindaddig a pozitív fő mágnesezési irányba mutat, míg egy ellenkező nagyságú mágneses térerősség át nem fordítja ellenkező irányba. A (9) egyenlet alapján a remanens mágnesezettség a részecske telítési mágnesezettségével egyenlő. Keresztirányban gerjesztve, a hiszterézis eltűnik, a mágnesezési karakterisztika egy ferde vonal lesz. A (9) egyenlet alapján a remanens mágnesezettség nullával egyenlő. Ebben az esetben a Barkhausen ugrás nem jelenik meg, a mágnesezettség vektora folytonosan változik. Keresztirányú külső térrel való gerjesztés esetén a mágnesezettség vektorának változását, valamint a hiszterézis görbét a 7. ábra mutatja.

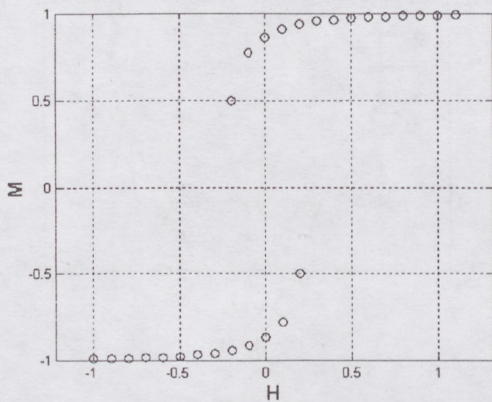
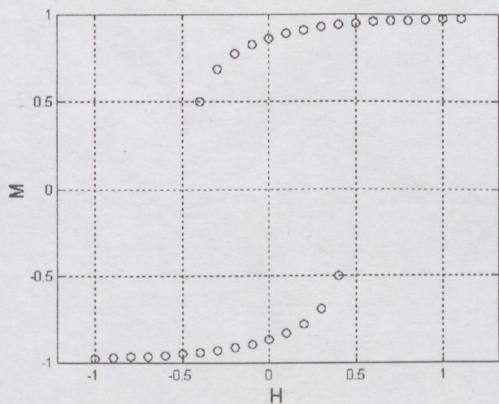


(a)



(b)

7. ábra. A mágneszettség vektorának helygörbéje és a hiszterézis karakterisztika, ha $\Theta_0 = 90^\circ$

(a) $\alpha = 0.4, M_s = 1$ (b) $\alpha = 0.8, M_s = 1$

8. ábra. Hiszterézis karakterisztikák különböző koercitív télerősségekkel, ha $\Theta_0 = 30^\circ$

A hiszterézis karakterisztikán a koercitív télerősség nagyságát az aszteroid mérete szabja meg. A normált aszteroid esetén ($\alpha = 1$), a H_c koercitív tér nagysága 0,5 és 1 között változik. A koercitív télerősség az M_s mágneszettség vektor Θ szögének, valamint az α paraméter függvényében a következő alakban adható meg

$$H_c = \frac{\alpha^{2/3}}{(\sin^{2/3} \Theta + \cos^{2/3} \Theta)^{3/2}} \quad (10)$$

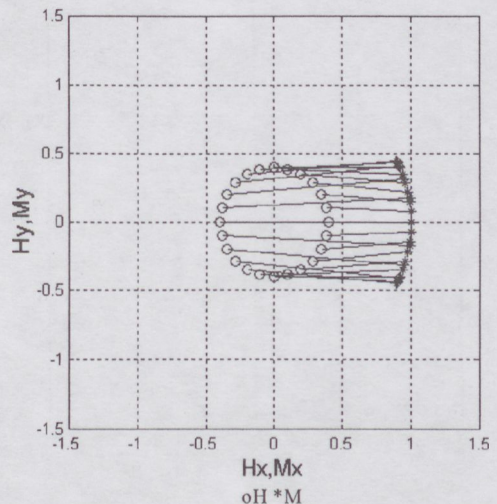
A (3) egyenlet szerint az paraméter egyenesen arányos a K anizotropikus állandóval és fordítottan az M_s telítési mágneszettséggel. Állandónak tartva a telítési mágneszettség értékét, $M_s = 1$, és változtatva a K anizotropia paraméter értékét, különböző szélességű hiszterézis karakterisztikákat kapunk, ahogy az a 8. ábrán látható. A Barkhausen jelenség a koercitív térnél következik be.

2.3. A Stoner–Wohlfarth részecske forgó mágneses térben

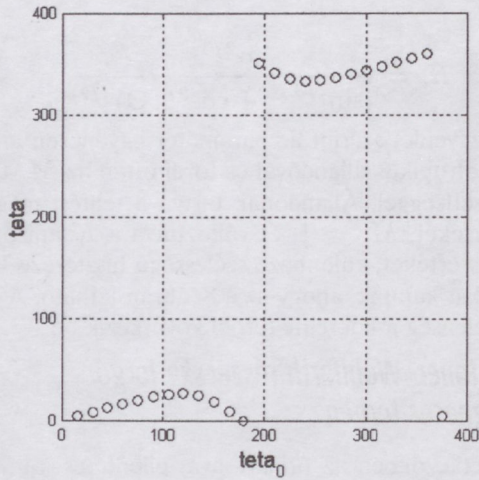
A következőkben az órajárásával ellentétes irányú, állandó nagyságú forgó mágneses térben vizsgáljuk meg a Stoner–Wohlfarth részecske viselkedését. Amikor a külső mágneses télerősség nulla, a Stoner–Wohlfarth részecske mágneszettsége a fő mágnesezési irányba mutat. Növelve a mágneses télerősséget a fő mágnesezési irányban egy bizonyos értékig, majd állandónak tartva az amplitúdót forogni kezdjük. Ha a télerősség vektora elfordul, akkor a mágneszettség vektora fokozatosan követi azt. Az amplitúdó nagyságának függvényében a részecske három különböző viselkedését különböztetjük meg.

Ha a télerősség vektora az aszteroid belsejében forog, akkor a részecske mágneszettsége egy oszcilláló mozgást fog végezni, ahogy az a 9.a ábrán látható. A Barkhausen ugrás nem következik be, a külső mágneses térnek nincs annyi energiája, hogy átfordítsa a részecske mágneszettségét. A 9.b ábrán a mágneszettség vektor elfordulási szögének változása látható a mágneses télerősség szögének függvényében.

Ha a télerősség vektora által leírt kör metszi az aszteroidot, a mágneszettség irányának ugrásszerű változásai vannak, amint a 10. ábrán megfigyelhető. A mágneszettség bizonyos lemaradással követi a külső gerjesztő teret, amikor az energia eléri a kellő értéket, a Barkhausen ugrás bekövetkezik.

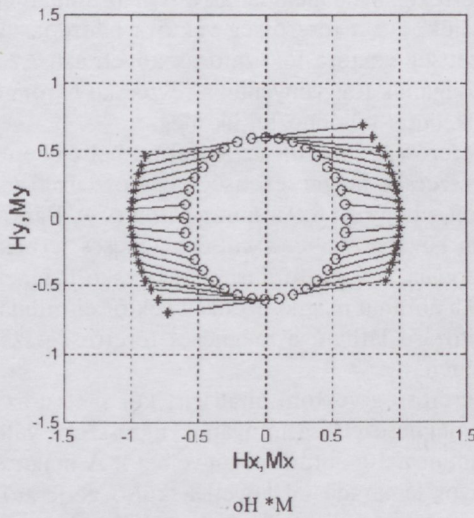


(a)

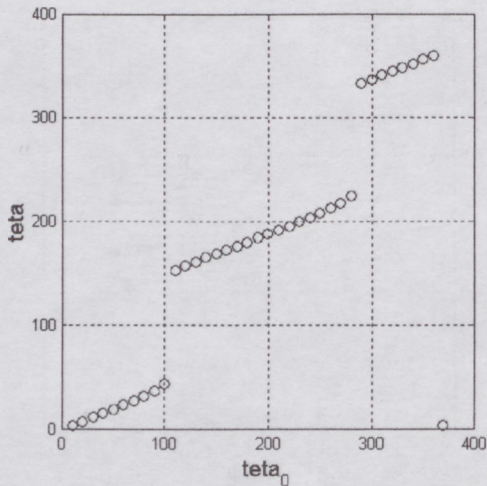


(b)

9. ábra. A külső mágneses térerősség vektora az aszteroid belsejében forog



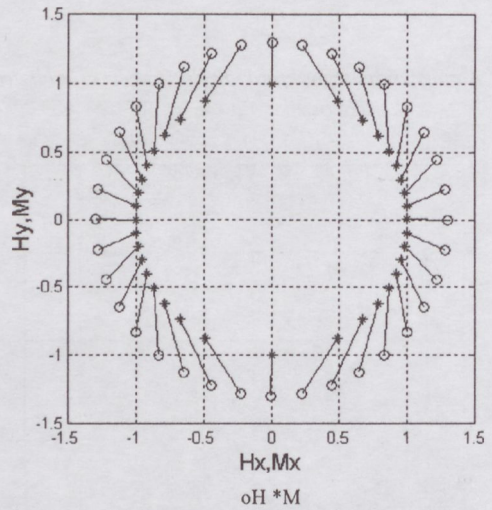
(a)



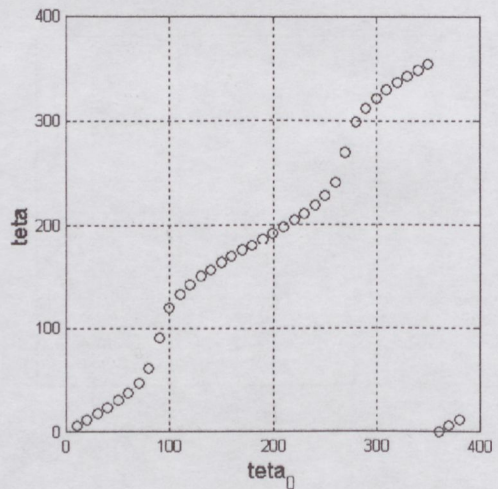
(b)

10. ábra. A külső forgó mágneses térerősség vektora metszi az aszteroidot

Ha a térerősség vektora által leírt kör az aszteroidon kívül található, akkor a mágnesezettség vektora folyamatos, ugrások nélkül fordul el, és szintén kört ír le. A mágneses térerősség és a mágnesezettség vektorok fő mágnesezési tengelyt és a mágneses kereszt irányt egyszerre metszik. A mágneses térerősség vektor további pozícióiban megfigyelhető a mágnesezettség vektor lemaradása, vagy sietése a gerjesztő külső mágneses térerősség vektorához képest. Az első és a harmadik negyedben a mágnesezettség vektora késik, míg a második és negyedik negyedben siet a mágneses térerősség vektorához képest. Ez a jelenség az egyensúlyi feltétellel magyarázható, a mágnesezettség mindig a fő mágnesezési irány és a mágneses térerősség közé esik, ahogy azt a 11. ábra szemlélteti.



(a)



(b)

11. ábra. A mágneses térerősség vektora által leírt kör az aszteroidon kívül található

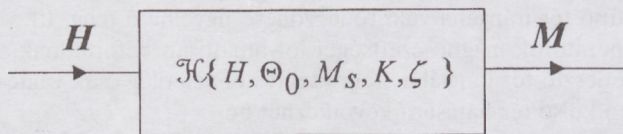
A ferromágneses közegek esetén általában a doménfalak elmozdulása és a mágnesezettségek elfordulásai felelősek az irreverzibilis mágnesezési folyamatokért. A klasszikus Stoner–Wohlfarth modellt egydoménú anyagok leírására

sára alkalmazhatjuk. Ezeknek az a sajátossága, hogy nem alakulnak ki benne doménfalak. Az irreverzibilis mágnesezési folyamatok ebben az esetben egyedül a mágnesezettség elfordulásából származnak.

2.4. A Stoner–Wohlfarth részecske mint elemi vektor hiszterézis operátor

A továbbiakban a Stoner–Wohlfarth részecskét elemi vektor hiszterézis operátornak tekintjük. Az operátor bemenete legyen a \mathbf{H} mágneses térerősség vektora, a kimenet pedig az \mathbf{M} mágnesezettség vektora, ahogy az a 12. ábrán látható.

$$\mathbf{m} = \mathcal{H}(H, \Theta_0, M_s, K, \zeta) \quad (11)$$



12. ábra. Az elemi vektor hiszterézis operátor

Rendeljünk az operátorhoz egy globális, valamint egy lokális derékszögű koordinátarendszert. A globális koordinátarendszer legyen a mágneses térerősség vektorához rendelve. A lokális koordinátarendszer mutasson a hiszterézis operátor fő mágnesezési irányába. A ζ szög legyen a két koordinátarendszer transzformációs szöge. A két koordinátarendszer közötti transzformációs összefüggések, ha $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2$ a globális, valamint $\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2$ a lokális koordinátarendszer egységvektorai

$$\begin{bmatrix} \mathbf{e}'_1 \\ \mathbf{e}'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \zeta & \sin \zeta \\ -\sin \zeta & \cos \zeta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{bmatrix}. \quad (12)$$

A mágneses térerősség vektorát ismerve a globális koordinátarendszerben, a (12) összefüggés segítségével transzformáljuk azt a lokális koordinátarendszerbe. Ismerve az M_s, K, ζ paramétereket, a mágnesezettség vektora meghatározható a lokális koordinátarendszerben. Inverz transzformációt alkalmazva, a mágnesezettség előállítható a globális koordinátarendszerben.

3. KÖLCSÖNHATÁSBAN NEM LEVŐ OPERÁTOROK SOKASÁGÁBÓL ÁLLÓ MODELLEK

Az operátorok sokaságából álló modellt számos elemi vektor hiszterézis operátor szuperpozíciójának tekinthetjük. Az operátorok közötti kölcsönhatásokat nem vesszük figyelembe. Lokális mágnesezettségen az egyes operátorok mágnesezettsége értendő, míg a teljes \mathbf{M} mágnesezettség ezek vektori összege, ami a modell kimenetét képezi. Tekintsünk számos operátort. Definiáljunk egy \mathbf{m} modellmátrixot. A mátrix elemei legyenek az elemi vektor hiszterézis operátorok $\mathbf{m}_{i,j}$ mágnesezettségei. Általános esetben, mindegyik operátornak különbözhet az M_s, K és a ζ paramétere.

$$\mathbf{m} = [\mathcal{K}_{i,j}(H, \Theta_0, M_{s,i,j}, K_{i,j}, \zeta_{i,j})] = [\mathbf{m}_{i,j}], \quad i = 1 \dots m, \quad j = 1 \dots n. \quad (13)$$

A mágneses térerősség vektora adott a globális koordinátarendszerben. A (11) segítségével transzformáljuk min-

den egyes operátornak megfelelő lokális koordinátarendszerbe, így megkapjuk a lokális mágneses térerősséget. Ismerve minden egyes operátor $M_{s,i,j}, K_{i,j}, \zeta_{i,j}$ paramétereit meghatározhatók a lokális $\mathbf{m}_{i,j}$ mágnesezettségek. Visszatranszformálva őket a globális koordinátarendszerbe a modellmátrix sorait és oszlopait kapjuk. A vektor hiszterézis modell kimenete a modellmátrix sorainak és oszlopaik összege

$$\mathbf{M} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \mathbf{m}_{i,j}. \quad (14)$$

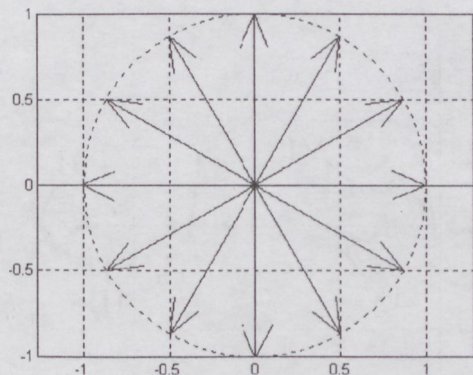
Mivel a modell elemi hiszterézis operátorai között a kölcsönhatások nincsenek figyelembe véve, ezért bármely operátor bárhol állhat a modellmátrixban. Különböző modelleket vezethetünk be a fő mágnesezési irányok, valamint a vektoriális hiszterézis operátorok paramétereinek különböző eloszlásait véve figyelembe. Hogy a modellek által realizált hiszterézis karakterisztika szimmetrikus legyen, ezért minden esetben a lokális mágnesezettségek vektoriális összege nulla, ha nincs külső gerjesztő tér

$$\mathbf{M} = 0, \quad \text{ha} \quad \mathbf{H} = 0. \quad (15)$$

3.1. Izotrop modell

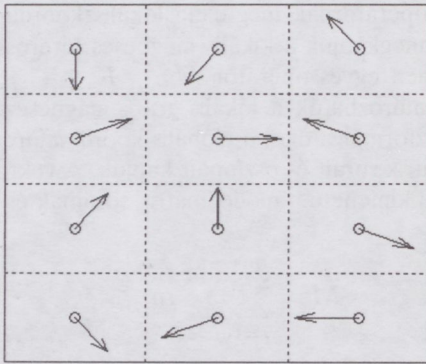
Izotrop modell esetén számos, a tér minden irányába mutató operátort veszünk figyelembe, azonos mágnesezettséggel és anizotropikus állandóval, a fő mágnesezési irányok egyenletes eloszlásával.

A modell könnyebb követhetősége érdekében tekintünk először egy 12 operátorból álló modellt. Mágneses tér hiányában, mindegyik operátor mágnesezettsége a fő mágnesezési irányába mutat, ezek kezdeti eloszlását a 13. ábrán látható vektorrendszer határozza meg. Mindegyik operátornak van egy azonos nagyságú, de ellentétesen irányított operátor párja, így kezdetben, a külső tér hiányában a mágnesezettségek vektoriális összege nulla.

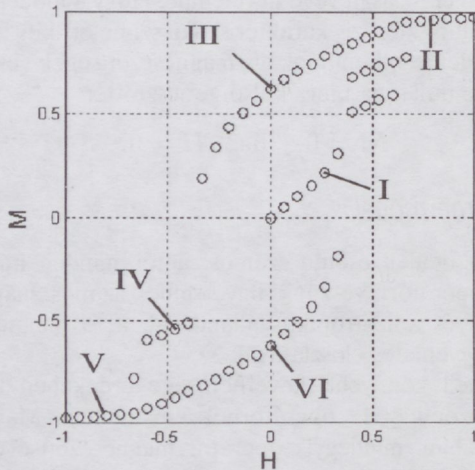


13. ábra. Az operátorok paramétereit megadó vektorrendszer

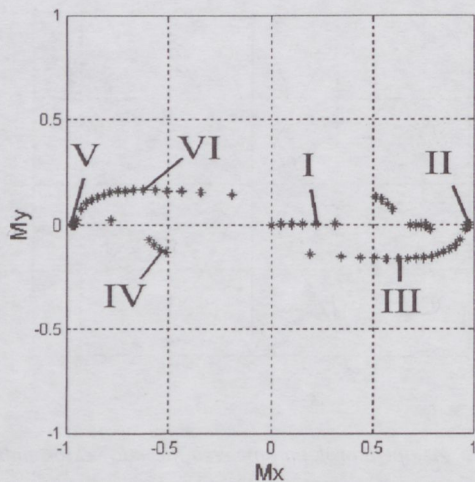
Az operátorokat egy téglalap alakú tartományban való véletlenszerű szétszórásával, határozzuk meg a modellmátrixot, ahogy ez a 14. ábrán látható. Mivel mindegyik operátor paramétere egyformák, és nincsenek egymással kölcsönhatásban, viselkedésüket egyedül a mágneses gerjesztés szabja meg, nincs jelentősége melyik hol található. Nagyszámú operátor esetén a modell viselkedése nem függ a gerjesztés irányától.



14. ábra. A lokális mágnesezettségek kezdeti helyzete a modellmátrixban



(a)



(b)

15. ábra. A hiszterézis karakterisztika és a mágnesezettség vektor végpontjának változása

Vizsgáljuk a modellt működését lineáris gerjesztésben. Egy teljes mágnesezési ciklus esetén a hiszterézis karakterisztikát és a mágnesezettség vektorának változását a 15. ábra szemlélteti.

A hiszterézis karakterisztikán, a megjelölt pontokban a modellmátrix hiszterézis operátorinak lokális mágnesezettségének pozícióit a 16. ábra mutatja.

Kezdetben, a lokális mágnesezettségek különböző irányokba mutatnak, a tér növelésével, a gerjesztő tér irányába kezdenek fordulni, I. pozíció. Ez egy reverzibilis szakasz. Ahogy a mágnesező térerősség eléri a kritikus értéket, a lokális mágnesezettségek ugrásszerűen elfordulnak, Barkhausen ugrások történnek. Ez felel meg az irreverzibilis szakasznak. Telítésnél, ami gyakorlatilag már a II. pozíció környezetében kialakul, a lokális mágnesezettségeknek a külső tér irányába való rendeződése figyelhető meg. Itt az operátorok mágnesezettségei folyamatosan befordulnak a gerjesztő tér irányába. Teljes telítés elméletileg csak végtelen külső tér hatására következhet be.

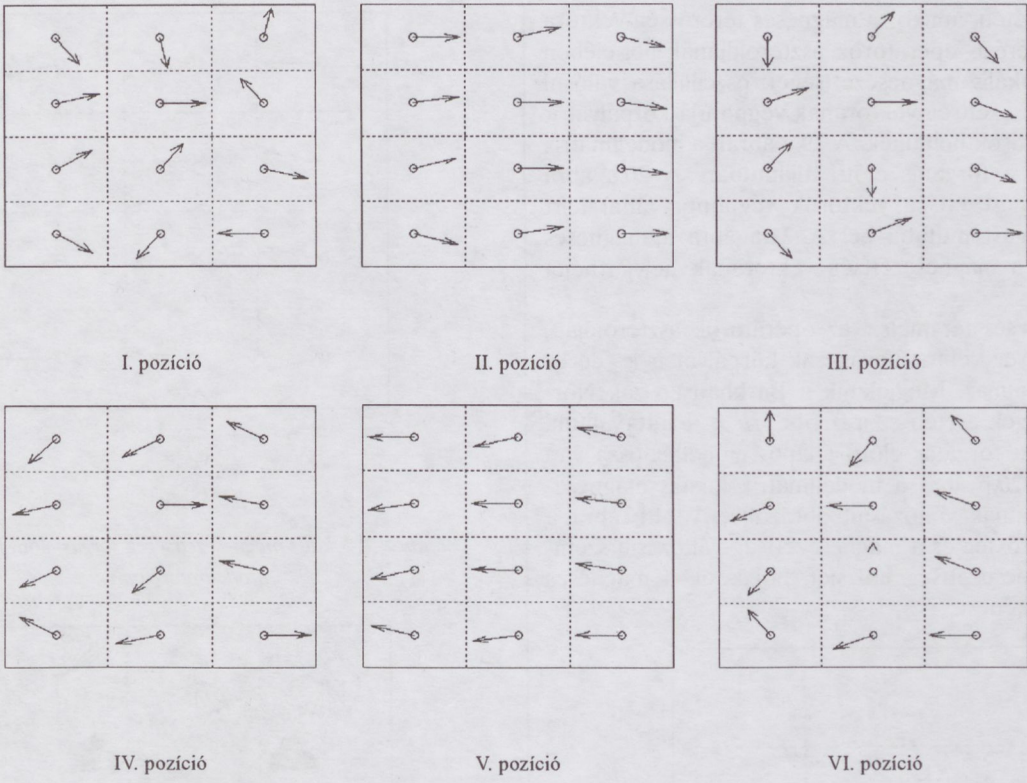
Csökkentve a mágnesező térerősség értékét, az M mágnesezettség nem ugyanazokat az értékeket fogja felvenni, mivel az elemi operátorok $m_{i,j}$ mágnesezettségei ugrások következtében más helygörbét írnak le. Ha a külső tér nulla a remanens mágnesezettséget kapjuk, ami a III. pozíciónak felel meg. Ellenkező irányba mágnesezve az elemi operátorok ellentétes irányú rendeződése figyelhető meg.

Az V. pozíció a negatív telítési érték környezetét mutatja, a modellmátrix $m_{i,j}$ mágnesezettségei ellenkező irányúak mint a II. pontban. Megint növelve a mágnesező térerősséget, a lemágnesezési görbével szimmetrikus mágnesezési görbét kapunk. A pozitív és a negatív értékű remanens mágnesezettségek abszolút értékei egyenlők, a modellmátrix operátorai ellentétes mágnesezettséget mutatnak, VI. pozíció. Mivel a modell nagyon kisszámú operátort tartalmaz, ezért az egyes operátorok hatása nagy.

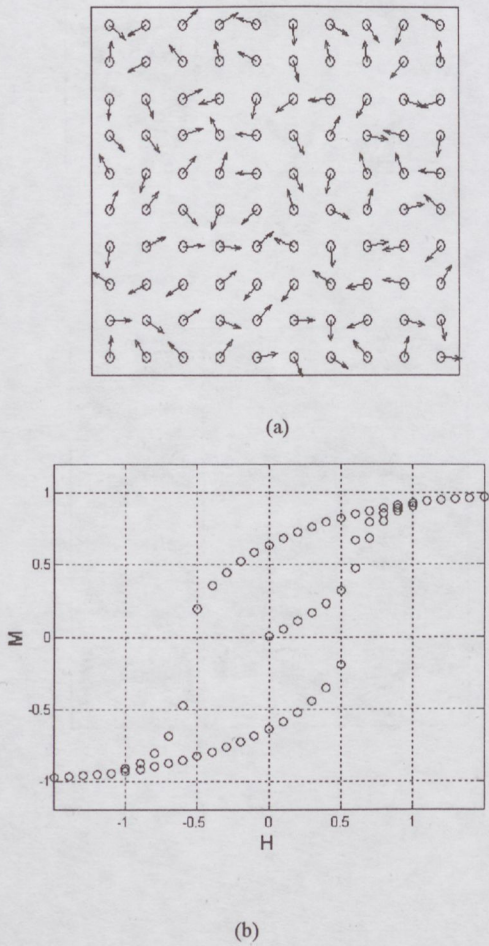
100 operátorból álló modell esetén a modellmátrixot a 17.a ábra, a hiszterézis karakterisztikát a 17.b mutatja.

Az irreverzibilis szakaszon csökkentve a térerősséget a modell képes elsőfokú visszatérési görbét is leírni, ahogy az a 18. ábrán látható. Ezek a visszatérési görbék reverzibilis szakaszt képeznek, míg a mágnesező térerősség nagysága újra át nem lépi valamelyik operátoroz rendelhető aszteroid határvonalát, ugrásszerűen változtatva a lokális mágnesezettséget. A modell azonban nem képes bármilyen minorhurkot leírni.

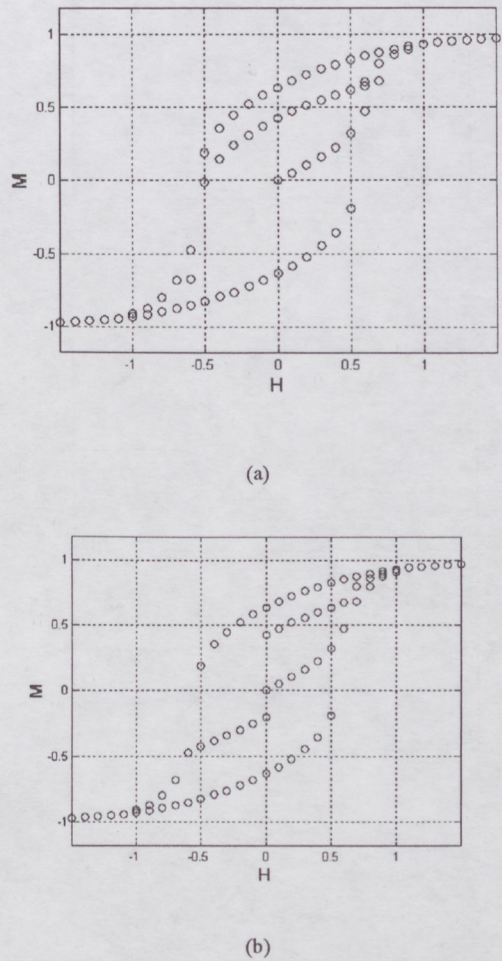
Forgó mágnesező térben vizsgálva a modellt, azt tapasztaljuk, hogy a mágnesezettség vektor végpontja körpályát ír le.



16. ábra. A modellmátrix elemei különböző nagyságú gerjesztések esetén



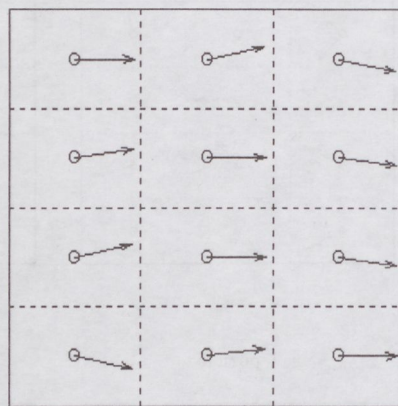
17. ábra. A kezdeti modellmátrix és a hisztérezis görbe 100 operátor esetén



18. ábra. Hisztérezis karakterisztikák visszatérési görbékkel

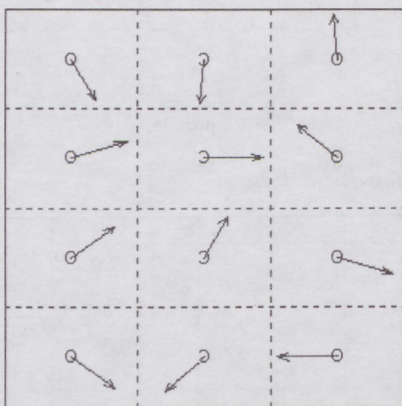
Kis terek esetén, amikor a mágneses térerősség vektora az egyes hiszterézis operátorok aszteroidjának belsejében fordul el, a lokális mágnesezettségek oszcillálása valósul meg. A mágnesezettség vektorának végpontja körpályát ír le, pozíciói ugrások nélküliek. A 19.a ábrán a modellmátrix van ábrázolva a forgatás előtti állapotban. A 20.a ábra a lokális mágnesezettség vektorok végpontjai által leírt oszcilláló mozgást mutatja be. A 21.a ábra a mágneses térerősség és a mágnesezettség vektorának helygörbéjét szemlélteti.

Ha a mágneses tér metszi az operátorok aszteroidjait, a mágnesezettség vektor ugyancsak körpályát ír le, de ez ugrásokat tartalmaz. Megjelenik a Barkhausen zaj. Normált mennyiségek esetén ez a $0,5 < H < 1$ intervallum. A 19.b ábrán a forgatás előtti állapot modellmátrixa van bemutatva. A 20.b ábra a modellmátrix lokális mágnesezettség vektorainak változásait ábrázolja. A 21.b ábra a mágneses térerősség és a mágnesezettség változását szemlélteti. A mágnesezettség hol siet, hol késik a mágneses térerősséghez képest.

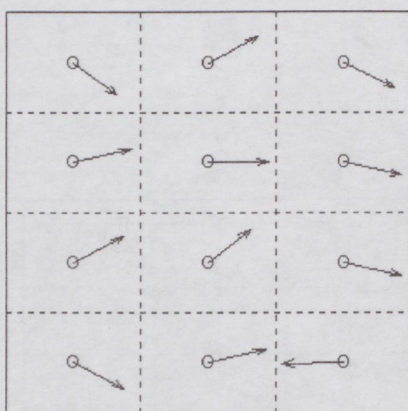


(c)

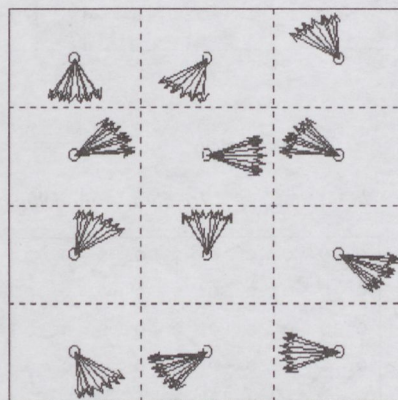
19. ábra. A lokális mágnesezettségek forgás előtti helyzete a modellmátrixban



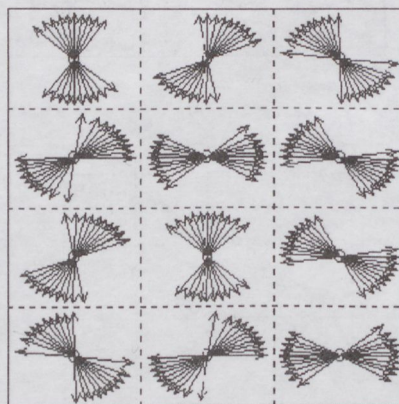
(a)



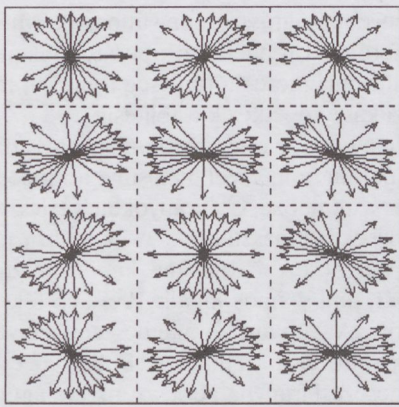
(b)



(a)

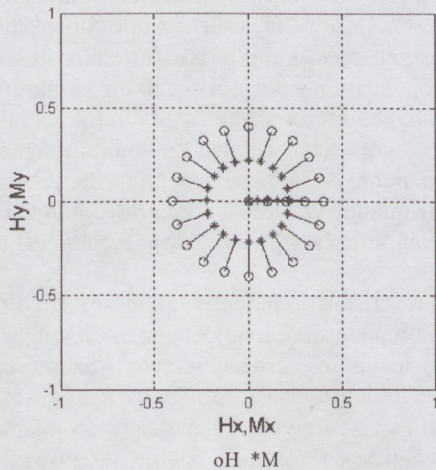


(b)

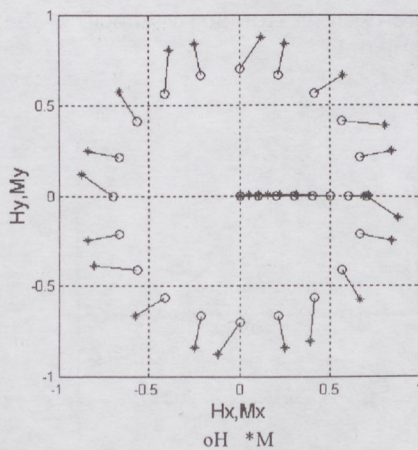


(c)

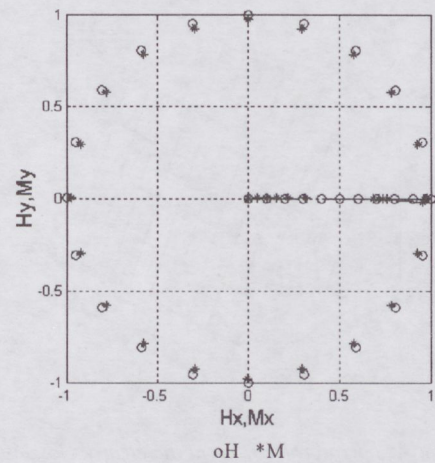
20. ábra. A lokális mágnesezettségek elmozdulása a modellmátrixban



(a)



(b)



(c)

21. ábra. A mágneses térerősség és mágnesezettség vektorának helygörbéi

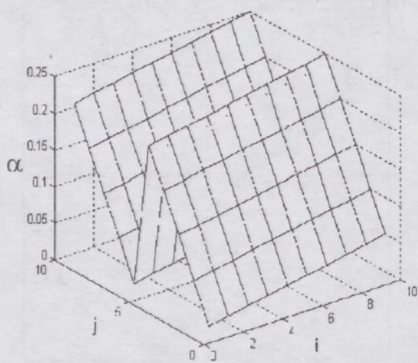
Nagy mágneses terek esetén a mágnesezettség vektora, a mágneses térerősséggel együtt forog. A Barkhausen zaj nem jelenik meg. A 19.c ábrán a lokális mágnesezettségek forgatás előtti állapotát, 20.c ábra a forgó gerjesztés hatására ezek pozícióját, míg a 21.c ábra a mágneses térerősség és a mágnesezettség vektorának forgását szemlélteti.

3.2. Anizotrop modell

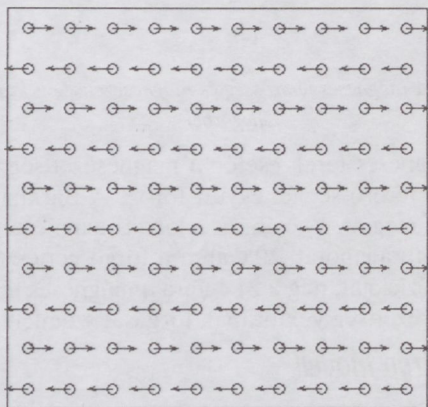
Az izotrop modell esetén, mint láttuk, minden egyes részecskének azonos volt a mágnesezettsége, telítési értéke és a fő mágnesezési irányok eloszlása egyenletes volt.

Modellezzünk egy fő mágnesezési irányval és egy rá merőleges mágneses keresztiránnyal rendelkező anizotrop anyagot. A vektoriális hiszterézis operátorok fő mágnesezési irányainak különböző eloszlásával valamint változtatva az operátorok M_s , K , ζ paramétereit különböző anizotrop modelleket lehet létrehozni.

(1) Tekintsük egy 100 vektoriális hiszterézis operátorból álló modellt. Az operátorok fő mágnesezési irányának egy olyan kezdeti eloszlását tekintjük, ahol mindegyik vízszintes irányú, de kettőszéves ellenkező irányítottágúak. Mivel külső tér hiányában az operátorok mágnesezettsége a fő mágnesezési irányba mutat, ezért kezdetben a mágnesezettség zéró, az egyes operátor-párok mágnesezettségei kiegyenlítik egymást. Ezzel az eloszlással létrehoztunk egy olyan anyagmodellt, amelynek a fő mágnesezési iránya, derékszögű koordináarendszert használva a vízszintes x-tengely, keresztiránya pedig a függőleges y-tengely. Az egyes operátorok lokális fő és kereszt mágnesezési iránya megegyezik az anyag fő és kereszt mágnesezési irányával. Minden operátor mágnesezettsége legyen egyforma, azonban különböző K állandók bevezetésével változtassuk meg az operátorokhoz rendelt aszteroidok nagyságát. A különböző K állandókkal számított aszteroidok méretének az eloszlását a 22. ábra szemlélteti. Az operátorok mágnesezettségeinek kezdeti helyzetét a modell mátrixban a 23. ábra mutatja be. Gerjesztést alkalmazva először a legkisebb anizotropikus állandóval rendelkező operátor mágnesezettsége fog ugrásszerűen megváltozni, egy megfelelő nagyságú mágneses tér hatására.



22. ábra. Az operátorok aszteroid méreteinek eloszlása



23. ábra. Az operátorok mágneszettségének kezdeti eloszlása a modellmátrixban

Vizsgáljuk a modellt Θ_0 irányú lineáris gerjesztésben. Növekvő tér hatására az operátorok mágneszettségei a külső gerjesztő tér irányában kezdenek fordulni. A modell kezdeti szakasza reverzibilis mágnesezési folyamat, mindaddig míg a mágneses térerősség vektora el nem éri a legkisebb koercitív térrel rendelkező operátor aszteroidjának határvonalát. Ezután egy irreverzibilis mágnesezési szakasz következik, az operátorok mágneszettségei a beállított ér-

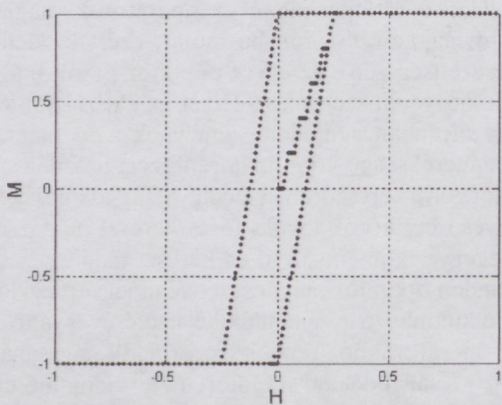
tékek függvényében ugrásszerűen változnak. Miután a legnagyobb aszteroiddal rendelkező operátor mágneszettsége is befordult a mágneses térerősség irányába megint egy reverzibilis szakasz következik a telítésig.

Csökkentve a teret az operátorok mágneszettségei nem ugyanott fognak ugrani, ezzel biztosítva a modell hiszteretikus jellegét. Különböző Θ_0 irányokba gerjesztve különböző viselkedéseket tapasztalunk. A 24.a ábra mutatja be a modell fő mágnesezési irányába kapott hiszterézis karakterisztikáját, ami számos lokális Preisach féle hiszteron szuperpozíciója. A 24.b ábra a mágneszettség vektorának végpontjának változását szemlélteti. Ebben az esetben mivel a fő mágnesezési irányba gerjesztünk a mágneszettség vektora és a gerjesztő mágneses térerősség között bezárt szög nulla. A mágneses térerősség $\Theta_0 = 30^\circ$ irányú esetén a modell viselkedését a 24.c és 24.d ábrák mutatják.

Keresztirányú gerjesztés esetén anhiszteretikus görbét kapunk. A görbe egész szakasza reverzibilis, mivel mágneses térerősség vektorának iránya merőleges minden operátor fő mágnesezési irányára, ezért az operátorok hiszterézis nélküli mágnesezési karakterisztikát írnak le, amelyek szuperpozíciója szintén hiszterézis nélküli karakterisztikát eredményez. Ezt az esetet a 24.e és 24.f ábrák szemléltetik.

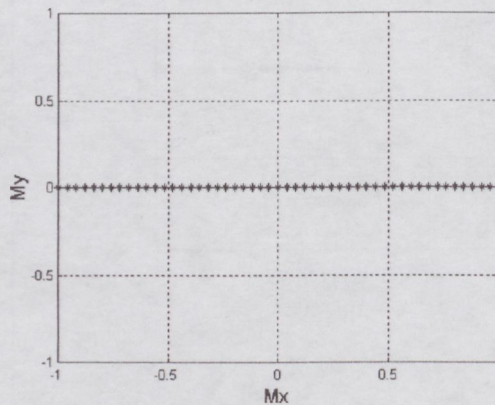
A hiszterézis görbe reverzibilis, azonban a mágneszettség változása nem. Az ábrákon megfigyelhetjük az egyirányú anizotropiából származó forgatónyomaték hatását, amely a fő mágnesezési irányba akarja fordítani a mágneszettséget.

Vizsgáljuk az anizotrop modell működését forgó mágneses térben. Előmágnesezve a modellt az irreverzibilis szakaszig, és forgó mágneses térbe helyezve, a mágneszettség változása ugrásokkal tarkított, ahogy az a 25.a ábrán látható. A mágneszettség vektora mindig a fő mágnesezési irány és a mágneses térerősség vektora között található. Ha a mágneses térerősség értéke nagy, a mágneszettség egyszerre metszi a mágneses térerősség vektorával a mágneses fő és kereszt irányokat, azonban megfigyelhetjük a mágneszettség vektorának elmaradását illetve sietését a mágneses térerősség vektorához viszonyítva, ahogy azt a 25.b ábrán láthatjuk.

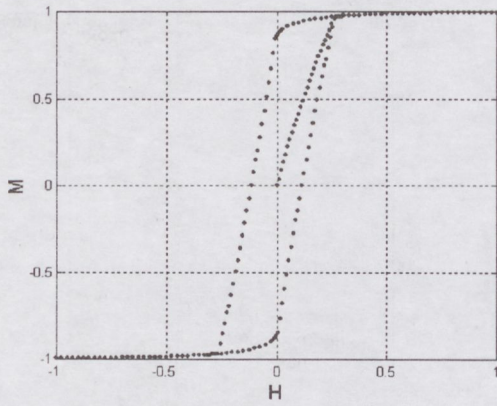


(a)

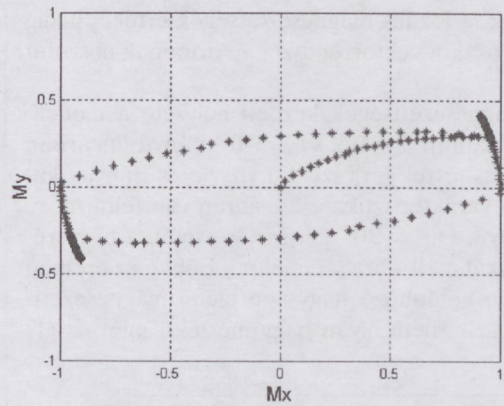
$\Theta_0 = 0^\circ$



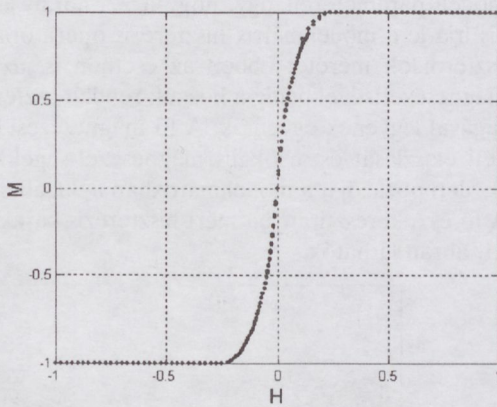
(b)



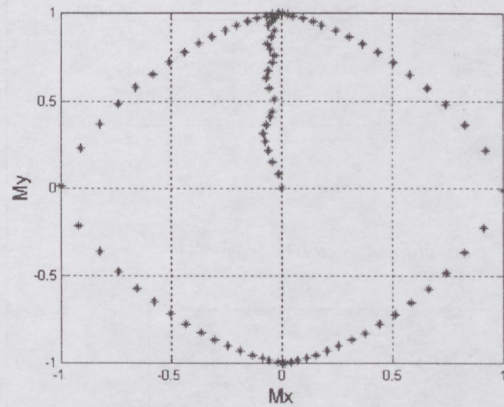
(c)

 $\Theta_0 = 30^\circ$ 

(d)



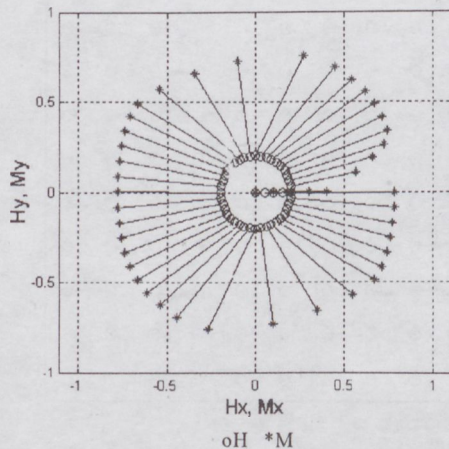
(e)

 $\Theta_0 = 90^\circ$ 

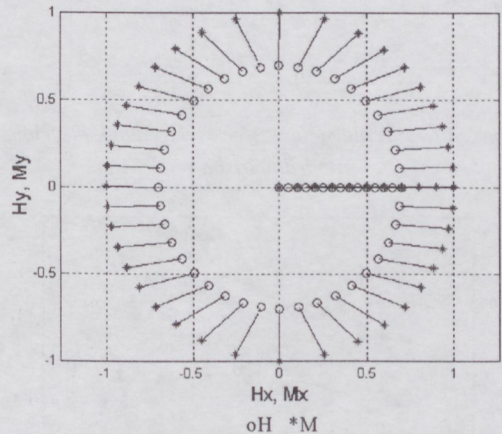
(f)

24. ábra. A hiszterézis karakterisztika és a mágnesezettség vektor végpontjainak pozíciója különböző irányokat mutató, lineárisan változó mágneses térerősségek esetén

Az anyagok többségének esetén azonban nem olyan hiszterézis karakterisztikát kapunk mint az előbbi, 24. ábrán vázolt esetben. Különbőféle anyagok esetén a fő mágnesezési irányban és a mágneses kereszt irányban mért külső hiszterézis karakterisztikák segítségével tudjuk a modellt illeszteni.



(a)



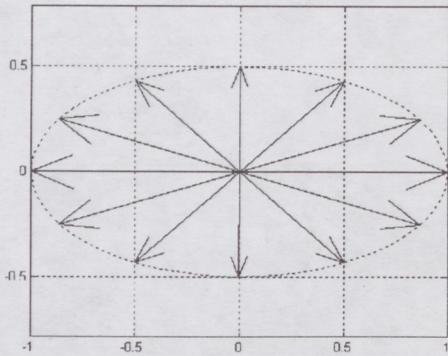
(b)

25. ábra. A mágneses térerősség és mágnesezettség forgó mágneses tér esetén

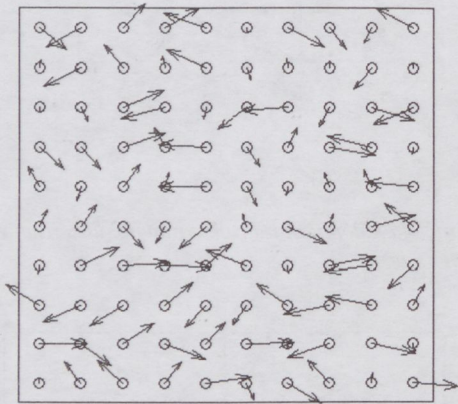
(2) Egy más viselkedésű anizotrop modellt vezethetünk be, a 26. ábrán levő vektorrendszer segítségével. A modellmátrix elemi vektor hiszterézis operátorainak a lokális mágnesezési fő irányai legyenek a vektorok által megha-

tározott irányok, a lokális mágnesezettségek értékei pedig legyenek arányosak a vektorrendszer vektorainak abszolút értékeivel.

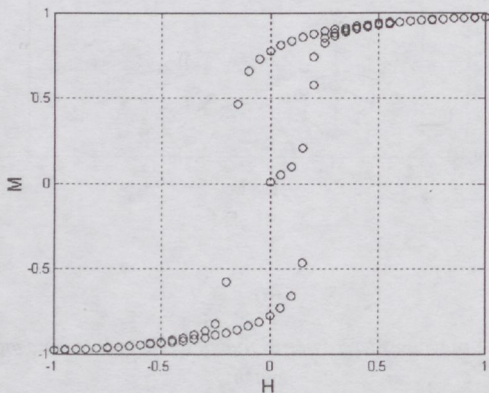
A lokális mágnesezettségek kezdeti helyzete a modellmátrixban a 27. ábrán látható. $\Theta_0 = 0^\circ$ irányú lineárisan változó mágneses térrel gerjesztve a vízszintes irányba kapott hiszterézis karakterisztika a 28. ábrán van felrajzolva. Merőleges irányú, $\Theta_0 = 90^\circ$ gerjesztés esetén a hiszterézis karakterisztikát a 29. ábra szemlélteti. Ebben az esetben az anizotropia a különböző nagyságú elemi mágnesezettségekből származik, nem olyan nagy mértékű mint az (1) esetben.



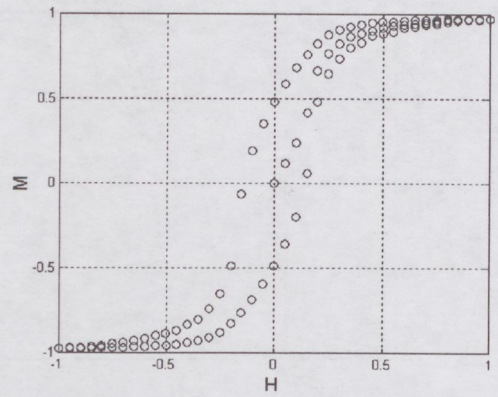
26. ábra. A vektorrendszer



27. ábra. A lokális mágnesezettségek vektorainak pozíciója a modellmátrixban

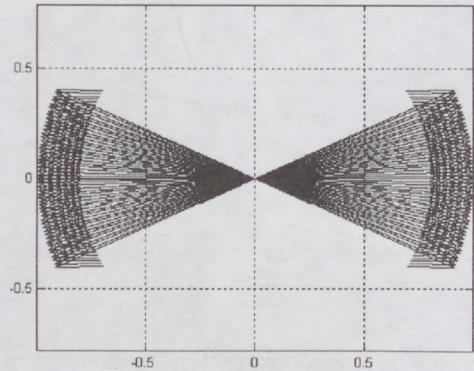


28. ábra. Vízszintes irányú gerjesztés esetén kapott hiszterézis karakterisztika

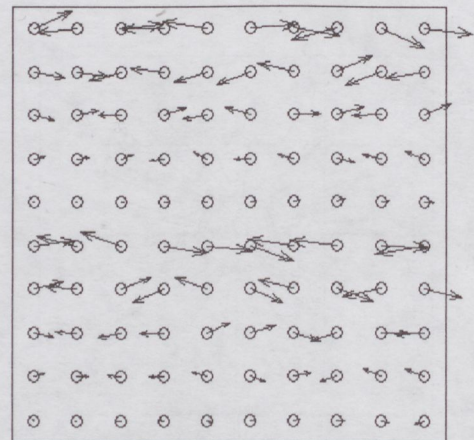


29. ábra. Függőleges irányú gerjesztés esetén kapott hiszterézis karakterisztika

(3) A következő modell esetén válasszuk az anizotrop modell paramétereit úgy, hogy a 22. ábrán látható eloszlás írja le a modellmátrix hiszterézis operátoraihoz rendelt aszteroidok méretét ebben az esetben is, az operátorok mágnesezettségei pedig a hozzájuk rendelt aszteroidok nagyságával legyenek egyenlők. A fő mágnesezési irányok kezdeti eloszlását és a lokális mágnesezettségek vektorainak kezdeti pozícióját a 30. ábra mutatja be. A fő és a keresztirányba mért hiszterézis karakterisztikák a 31. ábrán láthatók.



(a)

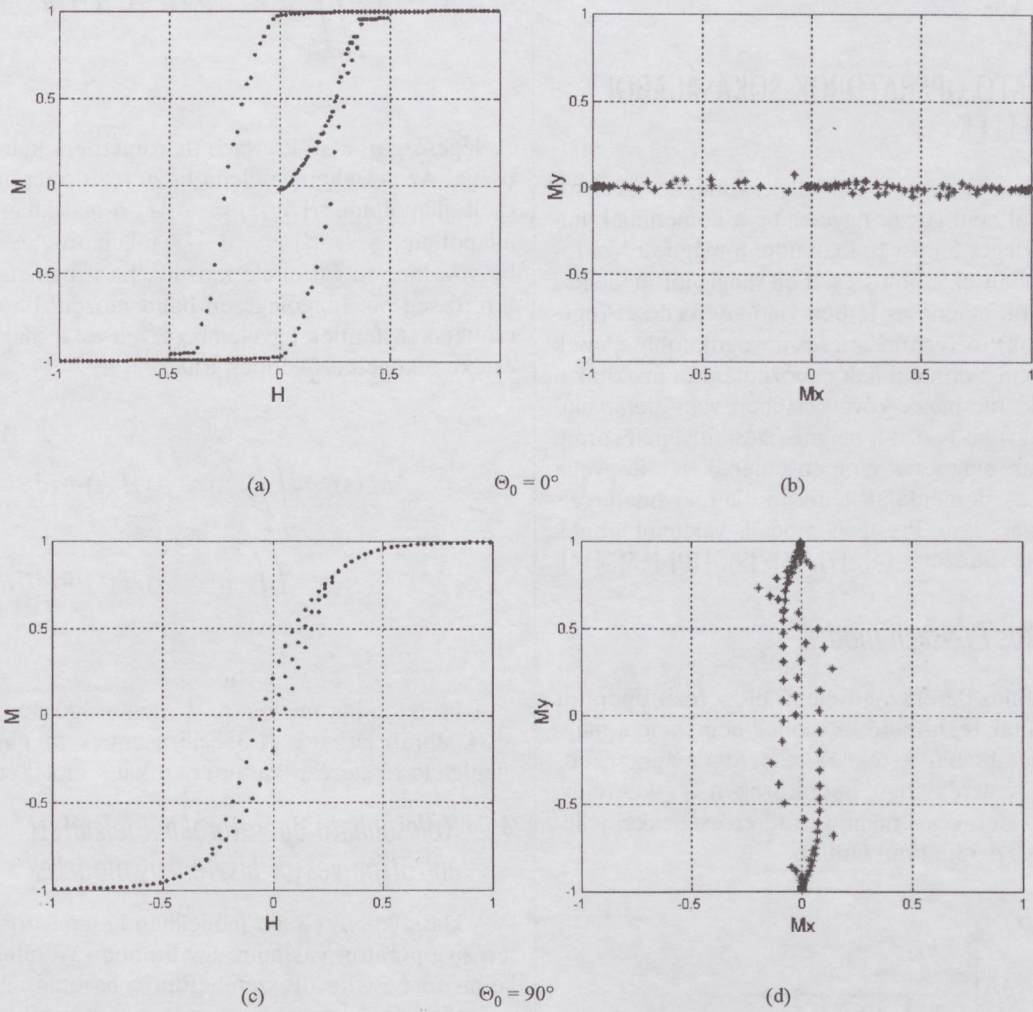


(b)

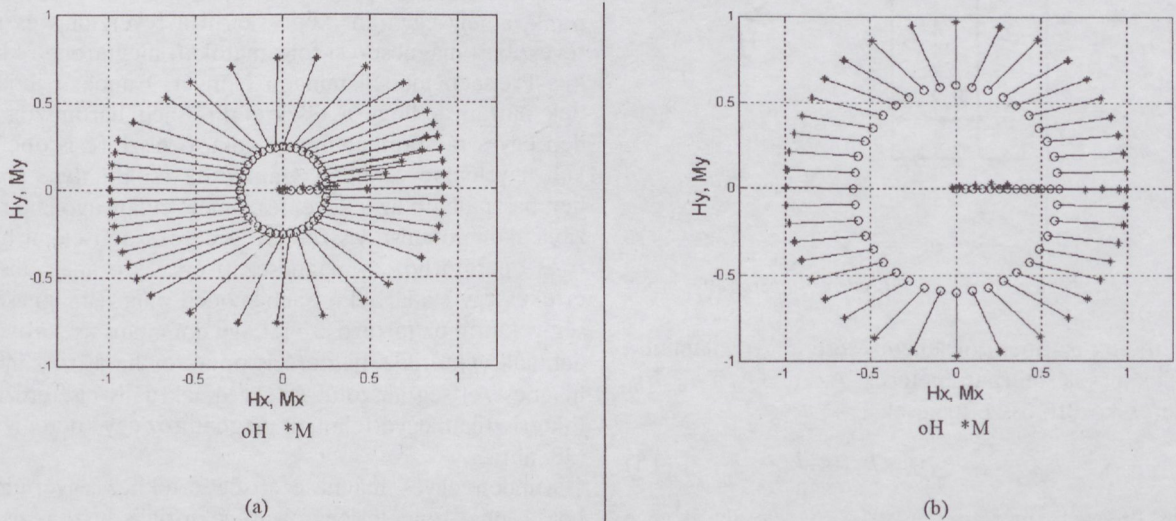
30. ábra. A vektorrendszer és a kezdeti modellmátrix

Megfigyelhető hogy a fő mágnesezési irányba kapott hiszterézis karakterisztika sokkal szélesebb mint a keresztirányba kapott hiszterézis görbe. Keresztirányú mágnesezés esetén kell a legnagyobb energiát befektetni az anyag

felmágnesezéséhez. A mágneszettség vektora a gerjesztő mágneses térerősség iránya körül oszcillál, a hiszterézis operátorok ugrásszerűen beforduló mágneszettségei hatására.



31. ábra. A fő mágnesezési irányba, valamint a rá merőleges keresztirányba kapott hiszterézis karakterisztikák, és a mágneszettség vektor végpontjának pozíciói



32. ábra. A mágneses térerősség és mágneszettség vektorok végpontjainak pozíciói forgó mágneses tér esetén

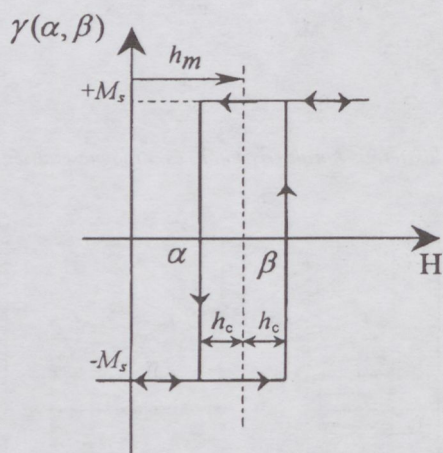
A modell viselkedését forgó mágneses térben a 32. ábra szemlélteti. Ebben az esetben megfigyelhető az előmágnesezés hatása. Ha az anyag nincs telítésben a mágnesezettség vektor végpontjai által leírt ellipszis nem szimmetrikus. Telítés esetén azonban a mágnesezettség vektor végpontjai által leírt pálya kör.

4. KÖLCSÖNHATÓ OPERÁTOROK SOKASÁGÁBÓL ÁLLÓ MODELLEK

Az előzőekben bevezetett modellek a mágnesezési folyamat leírásánál nem veszik figyelembe a doménfalak hatását. Csak részleges leírást tudnak adni a mágnesezési folyamatról, azonban ez számos esetben mégis jól modellezi bizonyos anyagok mágneses térben való viselkedését (egydoménú anyagok). A ferromágneses anyagok többségének esetében azonban a doménfalak elmozdulása és azoknak a szennyeződések, rácshibák következtében való „letapadása” fejti ki a nagyobb hatást a mágnesezési folyamat során, nem a domének mágneses momentumának tér irányába való fordulása. A doménfalak leírásán alapuló hiszterézis modell pl. a klasszikus Preisach modell, valamint annak továbbfejlesztett változatai [4], [7], [8], [9], [10] [13], [14], [15].

4.1. A klasszikus Preisach modell

A modell számos derékszögű elemi hiszterézis operátor superpozíciójának tekinthető. A modell bemenete a mágneses térerősség abszolút értéke, kimenete a mágnesezettség nagysága. A derékszögű operátorok a h_c koercitív, valamint a h_m interakciós mágneses térerősségekkel jellemezhetők, ahogy a 33. ábrán látható.



33. ábra. Az elemi derékszögű hiszterézis operátor

Bevezethetők az operátor jellemzésére az α , valamint a β fel- és lekapcsolási térparaméterek. Az α , β és a h_c , h_m paraméterek közötti összefüggések

$$\alpha = h_m - h_c \quad \beta = h_m + h_c. \quad (16)$$

Számos Preisach operátor egy $\mu(\alpha, \beta)$ eloszlását véve figyelembe, az α , β síkon definiálható a Preisach háromszög, amelyen belül a hiszterézis operátorok fel- és lekapcsolásának változása történik, valamint a modellt szabá-

lyozó lépcsőgörbe. Az M mágneszettséget a következő összefüggéssel lehet előállítani

$$M(t) = \iint_{T(\alpha, \beta)} \mu(\alpha, \beta) \gamma(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta. \quad (17)$$

A lépcsőgörbe a Preisach háromszög síkját két részre osztja. Az egyikben az elemi hiszterézis operátorok lekapcsolt állapotban, $\gamma(\alpha, \beta) = -M_s$ a másikban felkapcsolt állapotban, $\gamma(\alpha, \beta) = +M_s$ találhatók. A lépcsőgörbe vízszintesen és felfele mozdul, ha a bemenő mágneses térerősség nő, függőlegesen balra mozdul ha a gerjesztés csökken. A fentiek figyelembe vételével a mágneszettség értéke a következőképpen írható:

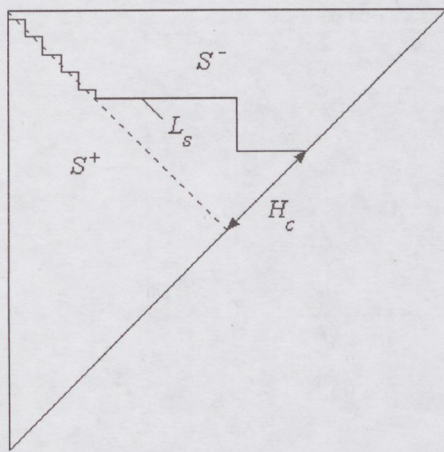
$$M(t) = \iint_{T^+} \mu(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta - \iint_{T^-} \mu(\alpha, \beta) H(t) d\alpha d\beta. \quad (18)$$

A Preisach háromszög, az L_s lépcsőgörbe egy helyzete a 34. ábrán látható. A 35. ábra ennek az elrendezésnek megfelelő hiszterézis karakterisztikát szemlélteti.

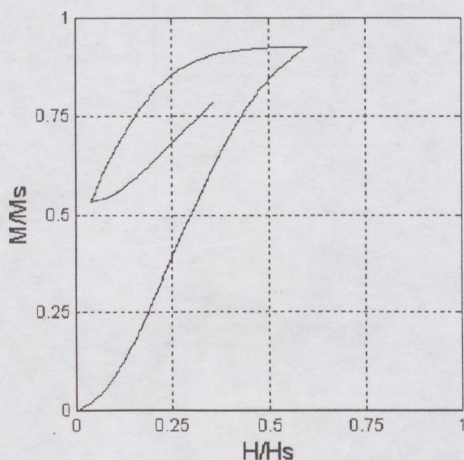
4.2. Kölcsönható operátorokból felépített anizotrop vektor hiszterézis modellek

A klasszikus Preisach modellben használatos elemi hiszterézis operátor, valamint egy Stoner–Wohlfarth részecske hiszterézise között szembevetendő a hasonlóság. A fő mágnesezési irányba gerjesztve a részecskét derékszögű hiszterézis operátort kapunk. A Preisach modellben helyettesítve a derékszögű elemi hiszterézis operátort a bevezetett vektor hiszterézis operátorral egy olyan vektor modellt kapunk, amely egyaránt képes leírni a reverzibilis és az irreverzibilis mágnesezési folyamatokat, megtartva a klasszikus Preisach modell minden előnyét. Ennek a módszernek hátránya, hogy a diszkrét Preisach háromszög minden egyes rácspontjában egy vektori hiszterézis operátort kell figyelembe venni. A számítások csökkentése érdekében használható az a közelítés, amely elhanyagolja a reverzibilis komponens, visszatérve a derékszögű elemi hiszterézis operátorhoz, a mágneszettség vektorának abszolút értékét egy skaláris Preisach modell, míg a mágneszettség vektorához tartozó szöveget egy domináns aszteroid által definiált vektoriális hiszterézis operátor határozza meg. A mágneszettség abszolút értéke az aktuális hiszterézis karakterisztikán egyértelműen meghatároz egy koercitív teret (38. ábra).

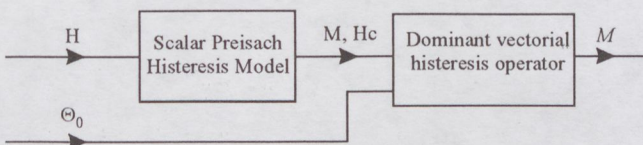
Minden egyes mágneszettség értékhez egyértelműen hozzá lehet rendelni egy olyan vektoriális hiszterézis operátort, melyhez egy domináns aszteroid tartozik, amelynek a méretét a koercitív tér határozza meg. Vázlatosan szemlélítve az elrendezést a 36. ábra mutatja.



34. ábra. A Preisach háromszög és a lépcsősgörbe



35. ábra. A lépcsősgörbe pozíciójának megfelelő hiszterézis karakterisztika



36. ábra. A modellszerkezet vázlata

Tekintsünk egy kétirányú anizotropiát mutató ferromágneses anyagot. A fenti modell működéséhez szükséges az $\mu(\alpha, \beta)$ eloszlásfüggvény ismerete, egy bizonyos irányú gerjesztés esetén. Az eloszlásfüggvény meghatározása a fő és kereszt mágnesezési irányokba végzett mérések alapján történik. A modell eloszlásfüggvényét normális eloszlással lehet közelíteni

$$\mu(\alpha, \beta) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-r^2}} \quad (19)$$

$$e^{-\frac{1}{2(1-r^2)} \left[\frac{(a-m_1)^2}{\sigma_1^2} - 2r \frac{\alpha-m_1}{\sigma_1} \frac{\beta-m_2}{\sigma_2} + \frac{(\beta-m_2)^2}{\sigma_2^2} \right]}$$

Az r paraméter az α és β valószínűségi változók korrelációs együtthatója, σ_1 és σ_2 az eloszlás szórása. Az eloszlásfüggvény szimmetrikus az m_1, m_2 paraméterekre, itt van a függvény maximuma. A fenti paraméterek különböző megválasztásával lehet elérni az eloszlásfüggvény illesztését egy mért hiszterézis karakterisztikához.

A 37. ábra a paraméterek változtatásával kapott különböző eloszlásfüggvényeket mutatja be, valamint az eloszlásfüggvényeknek megfelelő, számított hiszterézis karakterisztikákat. Mindegyik karakterisztika esetén $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$ a hiszterézis karakterisztika szimmetriája miatt. Változtatva a σ paraméter nagyságát és állandónak tartva az r paramétert, a hiszterézis karakterisztika koercitív terét tudjuk szabályozni, a remanens mágnesezettség értéke nem változik. Az r paraméter mind a koercitív, mind a remanens mágnesezettség értékeit változtatja.

Ismerve a fő és keresztirányba az eloszlásfüggvényeket, egy tetszőleges irányban az eloszlásfüggvényt a következő összefüggéssel lehet meghatározni

$$\mu = \mu_e \cos^2 \Theta_0 + \mu_h \sin^2 \Theta_0. \quad (20)$$

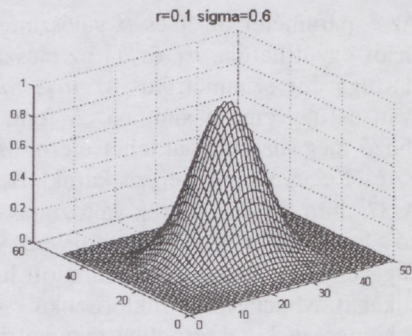
ahol μ_e a mágneses fő irányban az eloszlásfüggvény, μ_h a mágneses kereszt irányban az eloszlásfüggvény, Θ_0 a fő mágnesezési irány és a mágneses térerősség vektora által bezárt szög. A közelítés pontosságát növelhetjük a $(\cos^2 \Theta_0 + \sin^2 \Theta_0)^n$ sorfejtést felhasználásával.

Ha ismert az eloszlásfüggvény, a Preisach háromszög segítségével meghatározhatjuk a mágnesezettség vektorának abszolút értékét. Az abszolút érték egyértelműen definiál egy H_c koercitív térerősséget. A koercitív térerősség nagysága és a mágneses térerősség iránya meghatározzák a modellhez rendelt domináns vektoriális hiszterézis operátor aszteroidjának méretét a (6) alapján

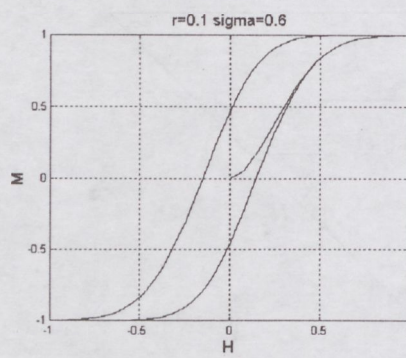
$$\alpha = \left[(H_c \cdot \cos \Theta_0)^{\frac{2}{3}} + (H_c \cdot \sin \Theta_0)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (21)$$

A hiszterézis karakterisztika, valamint a hozzárendelt domináns aszteroid a mágneses térerősség és mágnesezettség vektorával a 38. ábrán mutattuk be. Kezdeti lemágnesezett állapotból indulva valamely Θ_0 irányban, növelve a mágneses térerősség értékét egyre nagyobb területű aszteroid családot kapunk. Egy felmágnesezett állapotból csökkentve a mágneses térerősséget, a domináns aszteroid mérete nem változik, míg el nem érjük a koercitív térerősség értékét, vagy újból nem kezdjük növelni a mágneses térerősség nagyságát. A koercitív tér után a domináns aszteroid területe csökken, majd a mágneses térerősség ellenkező irányú növelésével újra növekedni kezd. A mágnesezettség vektora párhuzamos a mágneses térerősség vektorától a domináns aszteroidhoz húzott érintővel, ahogy az a 38. ábrán látható.

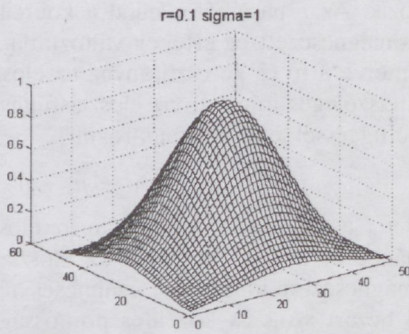
Lineáris gerjesztés esetén, ha a mágneses térerősség párhuzamos a fő mágnesezési irányval a hiszterézis karakterisztika a 39.a ábrán látható. A mágnesezettség vektorának helyzetét a 39.b ábra szemlélteti. A mágneses térerősség vektora párhuzamos a mágnesezettség vektorával.



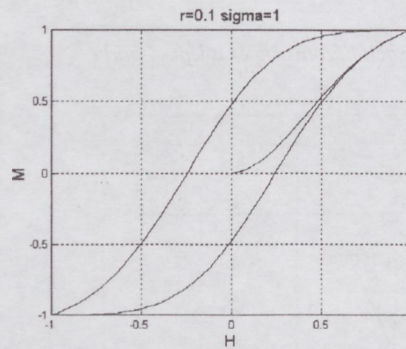
(a)



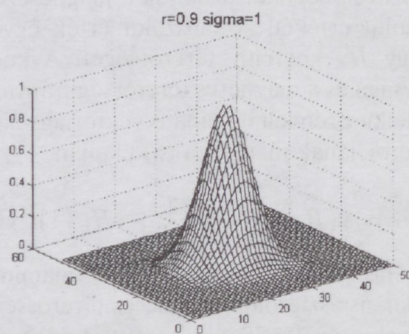
(b)



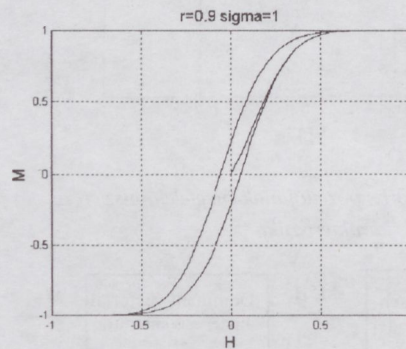
(c)



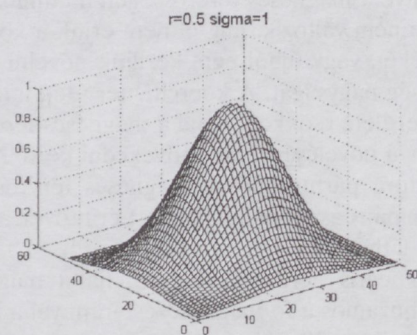
(d)



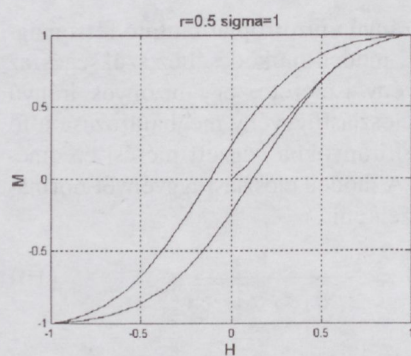
(e)



(f)

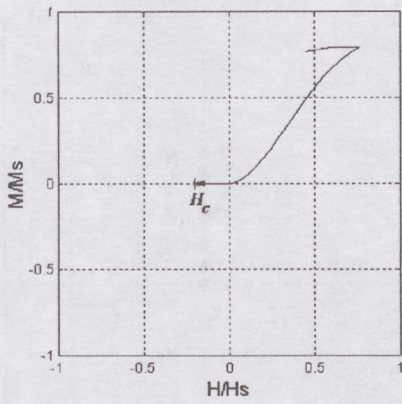


(g)

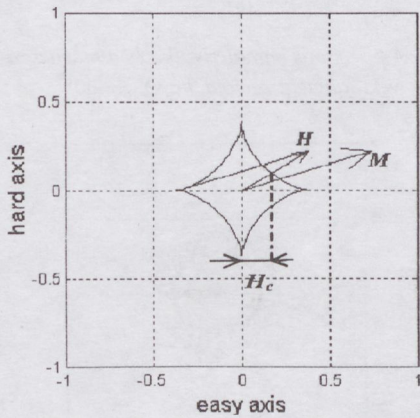


(h)

37. ábra. Különböző paraméterű eloszlásfüggvények és az azoknak megfelelő hiszterézis karakterisztikák

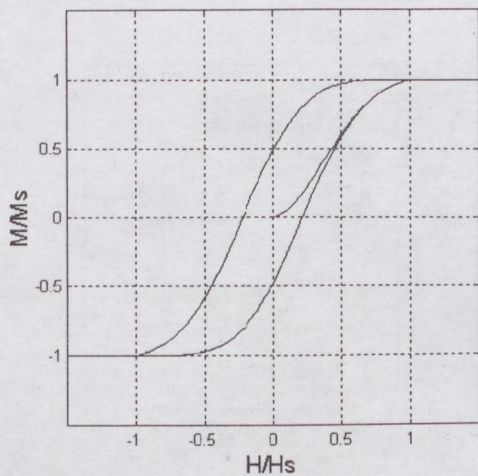


(a)

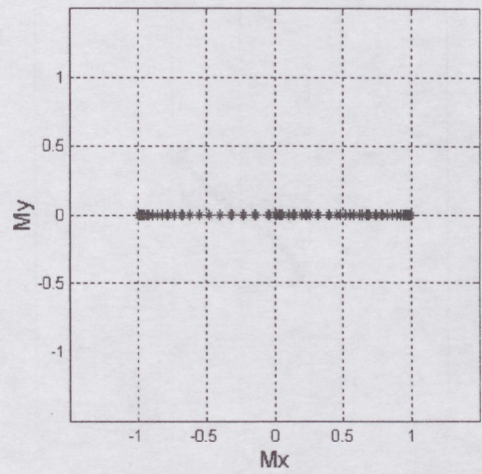


(b)

38. ábra. A hiszterézis görbe és a hozzárendelt domináns aszteroid



(a)



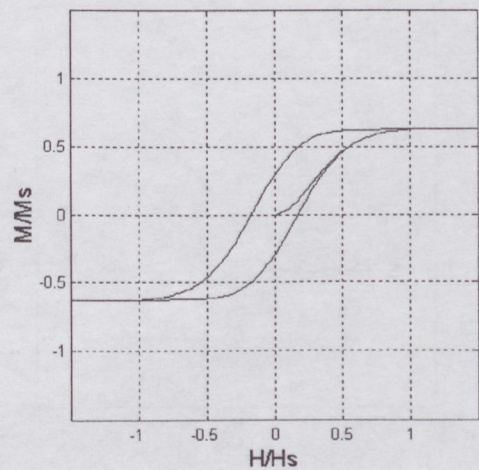
(b)

39. ábra. A hiszterézis karakterisztika és a mágnesezettség vektorának pozíciója, ha $\Theta_0 = 0^\circ$

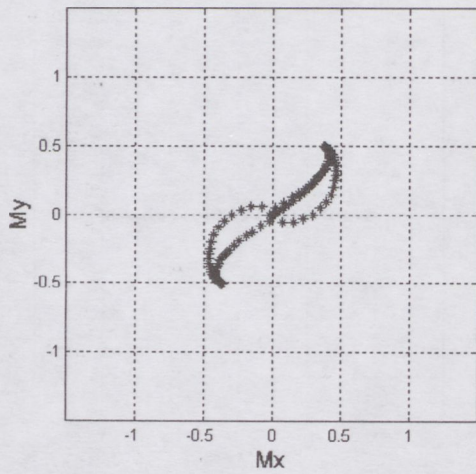
Ha a mágneses térerősség vektora $\Theta_0 = 60^\circ$ szöget zár be a mágneses fő irányval, a hiszterézis karakterisztikát és a mágnesezettség vektorának helyzetét a 40. ábra mutatja be. Az anyag felmágnesezésekor a mágneses térerősség vektorának a gerjesztő tér irányába való fordulása figyelhető meg. Lemágnesezéskor a mágnesezettség vektora a mágnes fő irányba fordul el, miközben az abszolút értéke is csökken. A hiszterézis karakterisztika koercitív terének értékénél a mágnesezettség nulla értéket vesz fel. A domináns aszteroid mérete a koercitív tér után ugrásszerűen lecsökken.

Mágneses kereszt irányban gerjesztve a vektor modellt, a 41. ábra mutatja be a hiszterézis karakterisztikát és a mágnesezettség vektorának pozícióját.

Az ábrákból látható, hogy az anyagot legkönnyebb a mágneses fő irányban felmágnesezni, és legnehezebb a mágneses kereszt irányban.



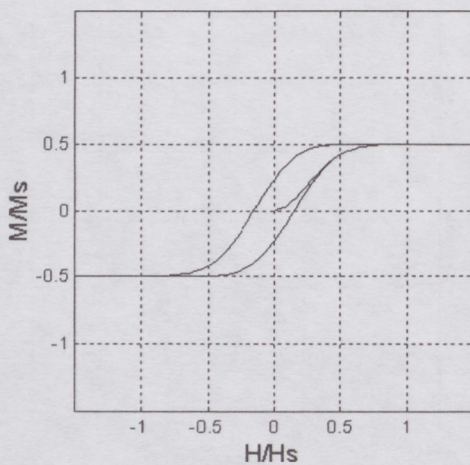
(a)



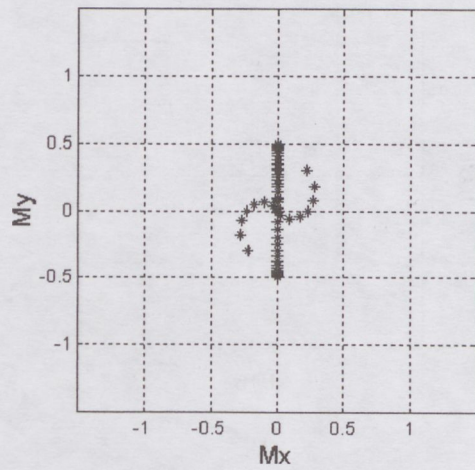
(b)

40. ábra. A hiszterézis karakterisztika és a mágnesezettség vektorának pozíciója, ha $\Theta_0 = 60^\circ$

Forgó mágneses tér esetén a modell működését a 42. ábra szemlélteti. Kis terek esetén a mágnesezettség vektora körpályát ír le (42.a ábra), a térerősség növekedésével ez torzul és az anizotropia hatására ellipszis alakú lesz a mágnesezettség végpontjai által leírt görbe (42.a ábra). Mindhárom ábrázolt esetben megfigyelhető a mágnesezettség vektorának elmaradása és sietése a mágneses térerősség vektorához képest, miközben a mágneses fő és kereszt irányt egyszerre metszik. A modell segítségével minorhurkokat, visszatérési görbéket, is lehet leírni. A skalár Preisach modell számos tökéletesített változatát lehet alkalmazni, figyelembe lehet venni a reverzibilis komponenst, a domináns vektoriális hiszterézis operátor definiálásánál több energiátagot tekintve lehet növelni a modell pontosságát. Nem egyirányú anizotropiát mutató anyag mágneses térben való modellezésére, több fő és kereszt mágnesezési irányt mutató elemi hiszterézis operátort kell bevezetni.

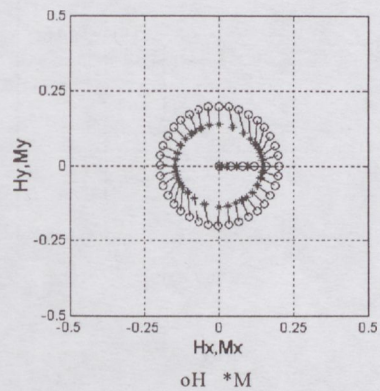


(a)

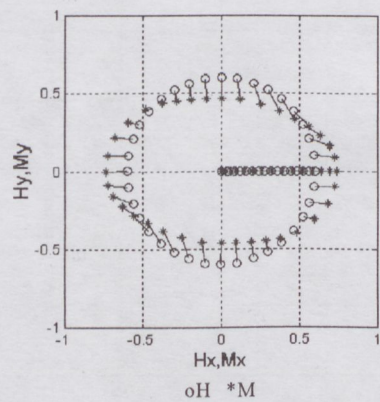


(b)

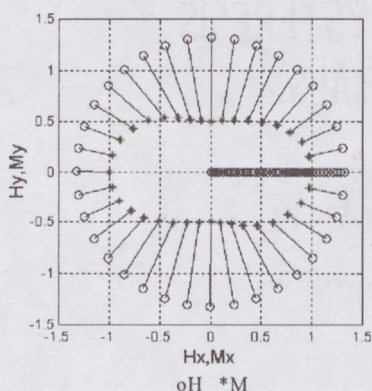
41. ábra. A hiszterézis karakterisztika és a mágnesezettség vektorának pozíciója, ha $\Theta_0 = 90^\circ$



(a)



(b)



(c)

42. ábra. A mágneses térerősség és mágnesezettség vektorának helyzete forgó tér esetén

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] A. Iványi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, Akadémia Kiadó, Budapest, 1997.
- [2] S. Chikazumi, Physics of Magnetism, John Wiley & Sons Inc., New York-London-Sydney, 1964.
- [3] E. C. Stoner, E. P. Wohlfarth, A Mechanism of Magnetic Hysteresis in Heterogeneous Alloys, Reprinted in IEEE Trans. on Magn., Vol. 27, 1991, pp. 3475-3518.
- [4] D. Mayergoyz, G. Friedmann, Vector Preisach Hysteresis Models, J. of Appl. Phys., Vol. 63, 1988, pp. 2995-3000.
- [5] G. Bertotti, Hysteresis in Magnetism, Academic Press, NY, 1998.
- [6] D. Jiles, Magnetism and Magnetic Materials, Chapman & Hall, London, 1995.
- [7] J. Füzi, Computationally Efficient Rate Dependent Hysteresis Model, COMPEL, Vol. 13, No. 3, 1999, pp. 445-456.
- [8] J. Füzi, A. Iványi, Zs. Szabó: Preisach Model with Continuous Output in Electrical Circuit Analysis. Journal of Electrical Engineering, Bratislava, Slovakia, 1997, Vol. 48, No. 8/s (4th Japanese-Czech-Slovak Joint Seminar on Applied Electromagnetics), pp. 18-21.
- [9] J. Füzi, Zs. Szabó, A. Iványi: Convergence of Electromagnetic Field Computation with Preisach Model, Proceedings of the 6th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipments, Brasov, Romania, 1998, pp. 7-11.
- [10] J. Füzi, Gy. Székely, Zs. Szabó: Experimental Construction of Preisach Model. Proceeding of the 8th IGTE Symposium on Numerical Field Calculation in Electrical Engineering, 21-24, Sept, Graz, Austria, 1998, pp. 452-457.
- [11] Zs. Szabó, A. Iványi, Computer Aided Simulation of Stoner – Wohlfarth Model, 14th International Conference on Soft Magnetic Materials, Balatonfüred, Hungary, Szeptember 8-10, 1999, Conference Abstract, pp. 47, megjelenés alatt.
- [12] Zs. Szabó, A. Iványi, The Stoner – Wohlfarth Model in Rotational Magnetic Field, EMES 7th, 1999, pp. 115-121.
- [13] F. Ossart, F. Cortial, The Moving Vector Preisach Model Applied to Metal Evaporated Tapes, in Non-Linear Electromagnetic Systems, ed. by V. Kose, J. Sievert in Series of Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 13, FOS Press, Amsterdam, 1998, pp. 467-470
- [14] F. Vajda, E. Della Torre, Relationship Between the Moving and the Product Preisach Model, IEEE Trans. on Magn., Vol. 27, 1991, pp. 3823-3826.
- [15] D. Mayergoyz, Mathematical Models of Hysteresis, Springer, 1991.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott modellek vektori leírást adnak a mágnesezési folyamatról. A Stoner – Wohlfarth modellben használatos ellipszoid alakú részecskét egy elemi vektor hiszterézis operátornak lehet tekinteni. Az így bevezetett vektor hiszterézis operátorral képzett modellmátrixokkal különféle makroszkopikus, izotrop és anizotrop modelleket lehet felépíteni. Ezek a modellek nem veszik figyelembe a doménfalakat, valamint azok elmozdulásait, ezért csak részleges leírást adnak a mágnesezési folyamatról. Egy általánosabb modellt vezethetünk be, a klasszikus Preisach modell felhasználásával, a modellnek vektori jellege a bevezetett domináns vektor hiszterézis operátornak köszönhető. A módszer általános, bármilyen skaláris hiszterézis modell vektor modellé alakítható az eljárás segítségével.

Egy reverzibilis és irreverzibilis mágnesezési folyamatokat egyaránt leíró modell lehet bevezetni a kölcsönhatásban nem levő és a kölcsönható operátorok által alkotott modellek kombinációjaként, ahol a vektor jellegét továbbra is a domináns vektor hiszterézis operátor biztosítja.

SIMULATION OF VECTORIAL HYSTERESIS IN ANIZOTROPIC MATERIALS

ZS. SZABÓ and A. IVÁNYI

DEPARTMENT OF ELECTROMAGNETIC THEORY, TECHNICAL UNIVERSITY OF BUDAPEST
H-1251 BUDAPEST, HUNGARY
PHONE: (00 36) 4632914
E-MAIL: SZABO@EVTSZLEVTBME.HU

In anisotropic materials the simulation of hysteresis characteristics has several difficulties. In lot of cases the magnetisation process is necessary to be considered as a vectorial process.

The ferromagnetic materials can be considered to be built up from small domains, magnetised up to saturation. The classical Stoner–Wohlfarth model is designed as an assemble of noninteracted, small, uniaxial ellipsoidal magnetic particles, it allows an easy representation of the anisotropy. The interaction between the magnetic moments is not considered. In the model the domain walls are disregarded, so the magnetisation vector can be rotated freely.

The energy of a Stoner–Wohlfarth particle can be expressed as the sum of the interaction energy between the external field and the magnetisation of the particle and the anisotropic energy contribution. The position of magnetisation vector corresponds to the energy minimum, which can be obtained under extreme energy conditions (the first and the second derivative of the energy). Computing the second derivatives the result is an asteroid shape. Inside of the asteroid two energy minima exist, outside only-one energy minimum can be found. The energy minima correspond for the tangent lines to the asteroid. The magnetisation vector is parallel with the actual tangent line of the asteroid.

The Stoner–Wohlfarth particle can be regarded as a elementary vectorial hysteresis operator. The input is the vector of magnetic field intensity, the output is the magnetisation vector.

In the noninteracted assembled models of hysteresis lot of elementary vectorial hysteresis operators are considered. Introducing a model matrix concept, the operators can be considered as elements of the matrix. The output of the model is the sum of rows and columns of the model matrix. Different models can be introduced considering different distributions of the easy axis and size of the asteroids.

In the case of isotropic model the orientation of the easy axes are considered uniform distributed in the space. The anisotropic constant and the saturated magnetisation are the same for all of the operators. The anisotrop model can be built in different ways, considered different distributions of the easy axes, magnetisations and anisotropic constants for each operators. These models have several limits, because the domain walls and the interaction between the operators are disregarded and the identification of parameters in the case of real material is difficult. Introducing an dominant vectorial hysteresis operator and distributions similar to the Preisach model this limits can be eliminated.



Szabó Zsolt villamosmérnök. Egyetemi tanulmányait a Brassói „Transilvania” Egyetem Villamosmérnöki Karán végezte. Ugyanitt szerzett Master Degree fokozatot a Számítógépes Rendszerek és Folyamatok Ellenőrzése szakon 1998-ban. Jelenleg a Budapesti Műszaki Egyetem, Elméleti Villamoságtan Tanszék doktorandusz hallgatója. Érdeklődési területe a hiszterézis karakterisztikák modellezése, numerikus térszámítási módszerek, mágneses mérések.

Iványi Amália mérnöki oklevelének megszerzése óta a Budapesti Műszaki Egyetem Elméleti Villamoságtan Tanszékén dolgozik. Tudományos pályafutása során a műszaki doktor címet 1981-ben, a műszaki tudomány kandidátusa címet 1991-ben szerezte meg, PhD fokozatát 1997-ben kapta. A tanszéken végzett oktatói munkája mellett részt vesz tankönyvek és példatárak összeállításában. Eddig megjelent publikációinak és nemzetközi konferencia előadásainak száma eléri a százat. Két könyve jelent meg az Akadémiai Kiadónál. Kutatási területei az elektromágneses terek és numerikus módszerei, a globális variációszámítás és az R-függvények, az ionizációs problémák és a koronakisülések elektromos terének számítása, valamint a mágneses anyagok hiszterézis karakterisztikájának szimulációja, anizotrop mágneses anyag viselkedése elektromágneses térben, veszteségek a mágneses lemezekben, mágneses árnyékolás.

A Kapsch Meridian1 Call Center-nek köszönhetően minden hívás tökéletes

LOWE | GGGK



Mindig az első benyomás a döntő – telefonáláskor is. A Call Center a vállalat kommunikációs központja, ahol a nagyszámú bejövő és kimenő telefonhívás lebonyolódik – ezért mindig gyorsan és hatékonyan kell működnie. A Kapsch a Meridian1 Call Center-rel testreszabott megoldást kínál. A Kapsch az Ön személyreszóló kommunikációs rendszerét

tervezi meg, szállítja le és helyezi üzembe. Az Ön befektetése hosszútávon is értékálló marad, hiszen a rendszerbe minden további fejlesztés egyszerűen integrálható. A Meridian1 Call Center együtt növekszik az Ön sikereivel és megnövekedett kommunikációs igényeivel. Ha szeretne ennél is többet megtudni a Meridian1-ről, már most

beszéljen a Kapsch-sal: Kapsch Telecom Kft.
1113 Budapest, Bocskai út 77-79,
telefon: (1)-209 2110, fax: (1)-209 2111,
vagy keresse fel internetes honlapunkat:
www.kapsch.net.

 **KAPSCH**
the communications company



TETRA – professzionális mobil távközlő rendszer

A TETRA (TErrestrial Trunked RAdio), mely a GSM és DECT rendszerekhez hasonlóan szintén a második generációs európai mobil szabvány család része, olyan cellás elven működő földfelszíni nyálábolt rádió rendszer, mely egyaránt képes kiszolgálni a készenléti szervezetek (rendőrség, mentők, tűzoltóság, határőrség stb.) speciális kommunikációs igényeit, valamint a civil felhasználói körbe tartozó diszpécsereszerű kapcsolattartási igénnyel rendelkező ügyfelek körét.

A rendszer rendkívül rugalmasan alakítható, az egyes felhasználói csoportok sajátos igénye szerinti virtuális hálózatok szolgálhatják a különböző felhasználói csoportok, biztonságos hang-, adat- és képátviteli igényeit.

A nyílt európai szabványnak (ETSI) köszönhetően szállítói verseny alakult ki, számos távközlési világcég (Motorola, Nokia, Simoco stb.) kínálja már az egymással együttműködni képes hálózati elemeket, valamint a különböző végberendezéseket.

A Magyarországon kijelölt működési frekvenciasávok az európai sávkijelöléssel harmonizálnak, biztosítva ezáltal az egész kontinensre kiterjedő használat lehetőségét (európai roaming).

A Frekvenciasávok Nemzeti Felosztási Táblázata (FNFT) a schengeni egyezménynek megfelelően a 380–400 MHz-es frekvenciasávot biztosítja az európai készenléti szolgálatok egységes és kizárólagos használatára, míg a civil TETRA működésére a 410–430 MHz sávreszt jelöli ki.

A TETRA különlegesen megbízható technológia. Az információátvitel biztonságát mind a beszéd, mind az adatátvitel esetén háromszintű rejtjelezési eljárás védi, amely gyakorlatilag lehetetlenné teszi az információk illetéktelen lehallgatását. A jogosultságvizsgálat és a szigorú hozzáférés-ellenőrzés mechanizmusai garantálják, hogy csak az arra jogosult személyek férhessenek hozzá a hálózathoz.

A rendszer rendkívül gyors hívásfelépítést biztosít, mind a hálózati infrastruktúrán keresztül, mind pedig a rádiós végberendezések közötti közvetlen kommunikáció esetén.

A TETRA-rendszer gazdaságossági szempontból is egyedülálló jellemzőkkel bír. Egyrészt a rendszer által alkalmazott csatornakiosztás ma a leghatékonyabb megoldásnak tekinthető (25 kHz/4 csatorna), másrészt a trónkolési (nyalábolási) technika segítségével minden csatornához minden felhasználó hozzáfér. Mindebből az következik, hogy egy közös országos infra-



TETRA BERENDEZÉSGYÁRTÓK				
Gyártó	Infrastruktúra	Végberendezés	Diszpécser	Mérőműszer
Cleartone		●		
DeTeWe		●		
ETELM	●			
Marconi Communications	●			
ICOM		●		
IFR Ltd.			●	●
Kenwood		●		
Motorola	●	●		
Nokia	●	●		
OTE	●	●		
Panasonic Deutschland		●		
Rohde&Schwarz	●			●
Simoco/Frequentis	●	●		
Tait	●	●		
Teltronic		●		
Tetrafix		●		
Uniden American Corp.	●	●		

Tetra News '99/1



TETRA ENGEDÉLYEK

struktúrán működtethető az összes minisztérium készenléti szolgálata oly módon, hogy a hálózaton az egyes szolgálatok tevékenységi körének megfelelően virtuálisan szétválasztva, egymástól teljesen függetlenül működnek.

A katasztrófa vagy rendkívüli állapotok esetére olyan műveletek programozhatók a rendszerbe, amelyek automatikusan biztosítják a különböző operatív csoportok megtervezett együttműködéséhez szükséges többleterőforrásokat és a szervezetek közötti, csak rendkívüli helyzetben szükséges hierarchikus kapcsolatokat.

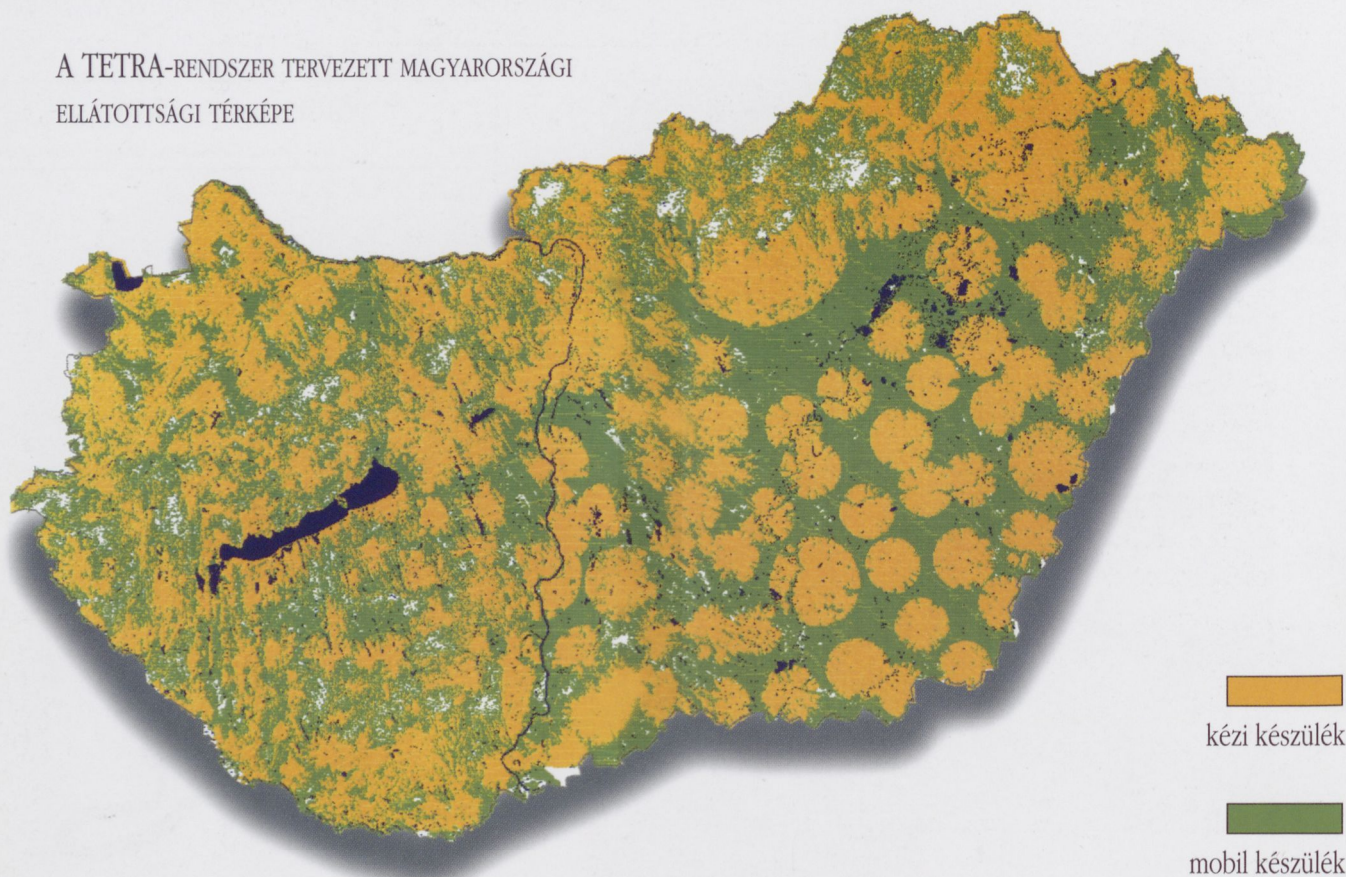
A virtuális hálózatokat diszpécserek ellenőrzik, felügyelik. Egy diszpécserhez több hálózat is tartozhat, de akár az is elképzelhető, hogy több diszpécserre jut egy hálózat. (A virtuális háló-

zat tulajdonképpen nem más, mint adott tevékenységhez kapcsolható intenzív kommunikációban álló felhasználók csoportja.)

A rendszer fő működési módja a **csoporkommunikáció**, mely tipikusan egy diszpécser és a hozzá tartozó csoport tagjai közötti kapcsolattartást szolgálja, és ezáltal mindenki közvetlenül nyomon követheti a történéseket.

A rendszer **egyedi hívási** lehetőséget is biztosít a felhasználók adott jogosultságainak megfelelően. Az ilyen hívások a saját vagy partner TETRA-hálózatok címzett felhasználójának elérésén kívül nyilvános távközlőhálózatokhoz, különböző adatbázisokhoz való hozzáférést is lehetővé teszi.

A TETRA-RENDSZER TERVEZETT MAGYARORSZÁGI
ELLÁTOTSÁGI TÉRKÉPE



kézi készülék

mobil készülék

A **segélykérő hívások** minden esetben elsőbbséget élveznek, szükség esetén akár a meglévő összeköttetés törlésével is, mely bejut az egyedi vagy a központi diszpécserhez, ahonnan automatikusan bekapcsolódnak a segítségnyújtásra készen állók készülékei, és e szolgálatok a diszpécserrel egy időben tájékozódhatnak a riasztás körülményeiről.

Az **adatkommunikáció** a TETRA-rendszer kiemelkedően hatékony és rendkívül biztonságos funkciója. A nyilvános mobilrendszerek által biztosított adatátviteli lehetőségeket rugalmasságban, adatsebességben, valamint biztonságosságban jelentősen felülmúló adatszolgáltatások állnak a felhasználók rendelkezésére, megnyitva ezzel az utat a különböző alkalmazási lehetőségek széles körű bevezetése előtt.

A **rövid adatüzenetek** továbbítására szintén lehetőség nyílik. A szolgáltatás a kontrollcsatornát veszi igénybe, egy kijelzőkön megjelenő kódolt üzenet 127 karakterből állhat.

A **státuszüzenetek funkció** előre meghatározott állapotok (pl. programozott szövegek) átküldését teszi lehetővé. A rendszerben 32 ezer ilyen üzenetet lehet előre definiálni.

A rendszer fontos sajátossága a független távbeszélő- és adathálózatokhoz való csatlakoztathatóság, valamint hogy a TETRA-hálózat régebbi, analóg hálózatokkal történő együttműködésre is képes.

Az Antenna Hungária Rt. fejlett infrastruktúrával, kiválóan képzett szakembergárdával rendelkezik, felkészült a TETRA-hálózat gyors, országos kiépítésére. Az országos rendszertervek elkészítése után cégünk immár gyakorlati tapasztalatokkal is ren-

delkezik. A Belügyminisztérium és az Antenna Hungária Rt. közötti együttműködés eredményeképpen kiépült és 1998. november 4-én átadták a Budapest majd teljes területén ellátottságot biztosító kísérleti TETRA-rendszert.

A rendszer üzemi körülmények közötti alkalmazása mellett (két rendőrségi szolgálatnál 70 kézi készülék, a rohammentő-szolgálatnál 40 ambulanciakocsiba szerelt mobil rádió segíti a napi tevékenységet) folyamatosan történik annak bővítése és az alkalmazói szoftverek új elemeinek telepítésével a szolgáltatások teljesebb körűvé tétele.

A távközlési világcégek (Nokia, Motorola) bevonásával folyó egyedülálló kísérlet ékesen bizonyította a TETRA-rendszerben rejlő előnyöket. A kísérleti üzem kiemelkedő állomása volt a résztvevő gyártók berendezéseinek szabvány szerinti együttműködését demonstráló teszt sorozat, mely Európában üzemi körülmények között először Budapesten valósulhatott meg.

Az egységes és összehangolt kommunikációs rendszer országos kiépítése már a közeli jövőben megkezdődhet, jelentősen hozzájárulva ezzel a kényszerű és civil felhasználói csoportok hatékonyabb munkavégzéséhez, mindennapjaink biztonságosabbá és kiszámíthatóbbá tételéhez.



Adatátvitel az Ön hullámhosszán

Az Antenna Hungária Rt. üzleti kommunikációs adatátviteli és professzionális Internet szolgáltatása segítségével nyugodtan belevetheti magát az adattengerbe. A mikrohullámon történő kapcsolattartás végleg megoldhatja eddigi, „hagyományos” rendszerekből adódó kommunikációs nehézségeit, és végtelen lehetőségeket nyújt Ön és üzleti partnerei számára...

Végtelenül egyszerű,

hiszen az adatátvitel országos lefedettségű, digitális mikrohullámú hálózaton keresztül történik.

Végtelenül rugalmas,

hiszen az Ön által meghatározott végpontok között gyorsan teremt állandó összeköttetést. Sőt szolgáltatásunkat és annak díjazását személyre szabottan alakítjuk ki.

Végtelenül megbízható,

hiszen folyamatos, 24 órás központi felügyelettel, menedzseléssel és országos szervizhálózattal állunk ügyfeleink rendelkezésére.

Végtelenül széles körű,

hiszen igény szerint professzionális Internet- kapcsolatot is biztosítunk.

Végtelenül sokoldalú,

hiszen kommunikációs adatátviteli szolgáltatásunk a pénzügyektől az állami szektoron és kereskedelmi egységeken keresztül a kábeltelevíziós társaságokig mindenki előtt végtelen távlatokat nyit.

További információkért hívja a 464-2583-as számot, kattintson a www.ahrt.hu honlapra.

antenna  hungária



Connecting@Speed, a Nokia széles sávú megoldása.



Gyors szolgáltatások – ezt kínálja a Nokia széles sávú IP-hozzáférési megoldása. Segítségével az operátorok, a szolgáltatók és a felhasználók jobban kihasználhatják az internetben rejlő lehetőségeket. Megismerhetik az új, izgalmas szolgáltatásokat, nagyobb bevételre tehetnek szert, és több lehetőségük lesz a választásra.

A Nokia széles sávú megoldása lehetővé teszi a legújabb, nagy sebességű szolgáltatások gyors elérését. Az ADSL-technológia segítségével a felhasználók egy szempillantás alatt elérhetik az internetet. Ám a sebesség önmagában még nem elég.

A költségek éppen olyan fontosak: az Ön üzemeltetési költségei és ügyfelei számára a szolgáltatás költségei. A Nokia széles sávú megoldásával kedvező áron nyújthat teste szabott szolgáltatást akár kis-, közép- vagy nagyvállalatoknak, akár egyéni felhasználóknak. Mi több, szolgáltatásait a minőség, sebesség és felhasználás alapján kínálhatja, árazhatja és számlázhatja.

Csak néhány ok, amiért elmondhatjuk, hogy a Connecting@Speed a Nokia széles sávú megoldásával többet jelent a gyorsaságnál.

Connecting@Speed, a Nokia széles sávú megoldása.



Connecting@Speed. A Nokia széles sávú megoldása.

NOKIA
CONNECTING PEOPLE

www.nokia.hu



ERICSSON tények

75 000 000

Az ERICSSON mobiltelefon-rendszereit világszerte több mint **75 millió** előfizető használja.

100 000

Az ERICSSON a világ egyik vezető távközlési cége. Ezt 100 ezer felkészült és tehetséges munkatársa **szakértelmének** köszönheti.

34 000 000

Az ERICSSON új **GSM 1800**-as és GSM 900-as rendszereihez csatlakozik a világ GSM-előfizetőinek közel fele, mintegy 34 millió ember.

78 000

Az ERICSSON rendszereit használó mobiltelefon-előfizetők száma világszerte **naponta** 78 000-rel nő.

130

Az ERICSSON a világ 130 országában **elismert szállító**. Ehhez az üzleti sikerhez a maga innovatív értékeivel négy regionális szakértői központ is hozzájárul. Ezek egyike **Magyarországon** található.

20

Az ERICSSON bevételeinek több mint 20 százalékat fordítja **kutatásra** és **fejlesztésre**. Infokommunikációs rendszereiben mindig ott van az a **többlet**, amely méltán teszi az ERICSSON-t a távközlési világpiac legjelentősebb szereplőjévé.

NO 1.

Annak, aki az első helyen áll, nagy a felelőssége. Az ERICSSON soha nem feledkezik meg a **legfontosabbról!**

A lényeg az emberek közötti kommunikáció. A többi – technológia.

ERICSSON 

A VERSENYSZABÁLYOZÁS TÁVKÖZLÉSI ÁGAZAT-SPECIFIKUS ALKALMAZÁSA

HELLER KRISZTINA

WESTEL 900 RT. TÁVKÖZLÉSPOLITIKAI ÉS SZABÁLYOZÁSI IGAZGATÓSÁGA

A távközlési piacnak még léteznek, és hosszú ideig fenn is fognak maradni azon sajátosságai, amelyek következtében a versenyszabályozás általános intézményrendszere egy országban sem bizonyult elegendőnek a távközlési piac fejlesztéséhez. Az EU távközlés-szabályozása számos feladattal ruházta fel a nemzeti távközlési hatóságot, hogy ágazat-specifikus eszközeivel elősegítse az általános versenyszabályok hatékony érvényesülését a távközlés területén, továbbá hogy a piaci szereplők számára kiszámítható versenykörüzetet teremtsen, ezzel ösztönözve a befektetéseket. A távközlési hatóság feladatai számos párhuzamosságot mutatnak a versenyhatósággal, ezért szükség van a munkamegosztás és a kompatibilis eljárások lehető legpontosabb meghatározására az új egységes hírközlési törvényben. A cikk részletesen bemutatja a távközlési ágazat-specifikus versenyszabályozási feladatokat az európai jogi dokumentumok alapján.

1. A VERSENYSZABÁLYOZÁS LÉNYEGE

A versenyszabályozás feladata az, hogy védje a piaci verseny szabadságát és tisztességét, ahol a verseny konkrét „terepe” az ún. érintett (releváns) piac.

A verseny szabadságát veszélyeztetik:

- az összehangolt magatartás, különösképpen az árak egyeztetése, a termelés korlátozása vagy ellenőrzés alatt tartása, az értékesítési források felosztása, versenyeztesben összejátszás, diszkrimináció a partnerek között, indokolatlan szerződéses feltételek kikötése, piacra lépés akadályozása.
- az összefonódások (fúziók), azaz az irányítási jogok megszerzése tulajdonosi jog, szavazati jog vagy vezető tisztségviselők többségének kijelölésére vonatkozó jog birtoklása útján.

A verseny tisztességét veszélyeztetik:

- a versenytársak és fogyasztók törvényes érdekeit sértő módon végzett gazdasági tevékenység (üzleti titok megszerzése vagy felhasználása, jó hírnév rontása, megtévesztés stb.),
- a fogyasztói döntések tisztességtelen befolyásolása és választási szabadságának korlátozása,
- a gazdasági erőfölénnyel való visszaélés, azaz indokolatlanul előnytelen szerződéses feltételek kikötése, diszkrimináció, termelés vagy forgalmazás korlátozása, túlzottan alacsony árak alkalmazása abból a célból, hogy a versenytárs számára indokolatlanul hátrányos piaci helyzetet teremtsen.

Egy-egy konkrét verseny-ügyet mindig egy konkrét érintett piacon vizsgálnak és értelmeznek. Az érintett piac meghatározása kétségtelenül a verseny-eljárás legizgalmasabb momentuma. Az adott termék által érintett piac mindazon termékek összessége, amelyek elfogyasztásuk/felhasználásuk során egymás helyettesítésére alkalmasak jellemzőik, árak és felhasználási körülményeik tekintetében. Az érintett piacot mindig földrajzilag is értelmezik.

A helyettesíthetőség meghatározása magában foglalja a termék – felhasználás szempontjából lényeges – jellemzőinek azonosítását, az előállítás lehetséges módjaira vonatkozó információkat, a termelés és fogyasztás szempontjából szóba jöhető földrajzi területet.

Az érintett piac megállapítása során az ún. „hipotetikus

monopolista próbáját” célszerű alkalmazni. Ennek lényege a következő. Meg kell vizsgálni, hogy mi történne az adott termék árának 5–10 %-os emelése esetén. Ez esetben a fogyasztók nyilván nem szívesen fizetnék ki ezt az összeget: megpróbálnának más, az igényeiket hasonló módon kielégítő terméket vásárolni. Ha találhatók ilyen termékek, ezek a keresleti oldalról helyettesítő termékek. Az ár emelésére a gyártók úgy reagálnának, hogy mindazok elkezdik gyártani az adott (vagy helyettesítő) terméket, akiknek van erre beállítható termelési kapacitásuk. Ha vannak ilyen kapacitások, ezek alkotják a kínálati oldali helyettesítést. Az érintett piacba beletartoznak mind a keresleti, mind pedig a kínálati oldalról helyettesítő termékek.

Az érintett piacon vizsgálják a versenyhatóságok a verseny létét, az eljárás alá vont magatartás vagy cselekedet hatását a verseny szabadságára mind a piaci működés, mind pedig a piacra lépési lehetőség tekintetében.

A versenyhatósági eljárás tárgyát képező magatartás vagy cselekedet által érintett piac és a versenyre gyakorolt hatás meghatározása mindig csak az adott eset összefüggésében történhet. Éppen ezért igen nagy a jelentősége annak az eljárásnak, amely ezt a célt szolgálja. Az eljárás az érintett piaci szereplők által szolgáltatott érveken és bizonyítékokon alapul, amelyeket a versenyhatóság saját gyűjtésű bizonyítékokkal is kiegészíthet. A versenyhatóság ezeket a bizonyítékokat mérlegeli és ezek alapján dönt. Döntésében valamely magatartást vagy cselekedetet jóvá hagyhat, megtilthat vagy feltételekhez köthet. Az érintett felek bíróságon megfellebbezhetik az eljárást és a határozat érdemi tartalmát is.

A piac működése szempontjából igen előnyös, ha a piaci szereplők tisztában vannak azzal, hogy mely magatartásuk és cselekedetük elfogadható és melyik nem. Éppen ezért a versenyszabályozásban (is) az EU-ban fontos szerep jut a közleményeknek és értelmezéseknek, továbbá a bírósági eseteknek, amelyek egy-egy fontos kérdés megítéléséhez adnak útmutatást. Számunkra ezek közül a legfontosabbak a vertikális integrációra¹, valamint az ún. nélkülözhetetlen

¹ Vertikális integrációról beszélünk, amikor egy termelési láncnak több kapcsolódó elemét egyetlen vállalkozás tartja ellenőrzése alatt.

eszközök² (essential facilities) birtoklásából fakadó erőfölényes helyzetekre vonatkozóak.

Az erőfölényes helyzetekre a Római Szerződés (módosított) 82. (korábban 86.) cikkelye irányítja rá a figyelmet, meghatározva az azzal való visszaélésnek (korábban is említett) eseteit. A vertikális integráció és a nélkülözhetetlen eszközök birtoklása egyaránt alkalmas arra, hogy egy bizonyos érintett piacon túlmenő piacra is kiterjessze az erőfölényt, ezért megkülönböztetett figyelmet érdemelnek. A jogesetek és közlemények (Communication és Notice elnevezésű dokumentumok) kialakították a versenyjog alkalmazása során azokat a feltételeket, amelyek mellett az ilyen helyzetek fenntarthatók és kezelhetők. A távközlés területén két ilyen közlemény született: az egyik általánosságban jelölte meg, hogy mely magatartások nem minősülnek a verseny korlátozásának, a másik pedig kifejezetten a hálózati szerződések verseny-szempontrú megítélésével foglalkozik.

2. AZ ÁGAZAT-SPECIFIKUS VERSENYSZABÁLYOZÁS LÉTÉNEK INDOKAI

2.1. Elsődleges jogforrások: a Római Szerződés, illetve a WTO

A WTO (Világkereskedelmi Egyezmény) a magyar jog számára ugyanolyan elsődleges jogforrás, mint az EU számára. Azért idézzük mégis a Római Szerződést, mert a jogharmonizáció alapja ez. Természetesen a Római Szerződés és a WTO egyezmény egymással összhangban vannak.

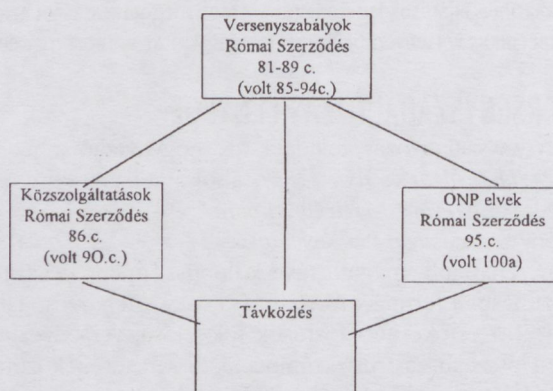
Ahhoz, hogy a távközlési ágazat-specifikus versenyszabályozási feladatok elvi kereteit tisztázzuk, a Római Szerződésből két szálon kell levezetnünk a versenyszabályozási feladatokat.

- A távközlési ágazat teljes egészében alá van vetve a versenyszabályozásnak. Ezt a tényt az (Amsterdamban módosított) Római Szerződés 86. (korábban 90.) cikkelye mondja ki azzal, hogy a versenyszabályokat olyan mértékben kell alkalmazni, amely nem veszélyezteti a *közszolgáltatások*³ nyújtását. E cél elérése érdekében a Római Szerződés felhatalmazza a Bizottságot irányelvek megalkotására az ilyen szolgáltatások esetében. Ez a cikkely adja az alapját a távközlési ún. *liberalizációs irányelveknek*, amelyek a 90/388 irányelv és módosításai.
- A Római Szerződés (módosított) 95. (korábban 100a.) cikkelye a versenyszabályokkal azonos szintű közösségi céllá emeli az egységes belső piac kialakítását. A távközlési eszközök és szolgáltatások piaca azért kitüntetett piac, mert nem csak része az *egységes belső közösségi piacnak*, hanem az áruk, szolgáltatások, emberek és tőke

² Nélkülözhetetlen eszköznek minősül az az erőforrás, amely elengedhetetlenül szükséges ahhoz, hogy valamely piacra lépés megtörténhessen.

³ Általános gazdasági érdekű szolgáltatások (Services of general economic interest) nyújtását a kormányzat bizonyos vállalkozásokra bízta, és különleges vagy kizárólagos jogok is adhatók annyiban, amennyiben a szolgáltatások nyújtása érdekében ezekre szükség van.

szabad mozgásának feltételeit is képezi. Éppen ezért az Európa-szintű harmonizációs körbe bevont szolgáltatók esetében irányelvek megalkotására hatalmazza fel a Tanácsot. Ez a cikkely adja az alapját a távközlési ún. harmonizációs vagy ONP⁴ irányelveknek, amelyek gyökere a 90/387 sz. irányelv. Így kerültek meghatározásra a harmonizált szolgáltatások (telefon, ISDN, GSM mobil rádiótelefon, bérelt vonal, kapcsolt adatátvitel, DECT és személyi úrtávközlés). A legfontosabb ONP irányelvek a telefon, a bérelt vonali, az összekapcsolási, az engedélyezési és az adatvédelmi irányelvek. Az ezekben megfogalmazott ún. ONP alapelvek mint távközlés-specifikus „lényeges követelmények” szükséges és elégséges jogos alapját képezik a verseny korlátozásának.



1. ábra.

2.2. A távközlési piac sajátosságai

A távközlési piac átmeneti állapotban van, ahol szemünk előtt alakul át az egy-termékes és egy-technológiás piac sok-termékes és sok-technológiás piaccá.

A valószínűségű piac Pareto-féle kritériumai a következők (vegyük észre a hasonlóságot az érintett piac behatárolásával):

- a keresleti oldalon akárhány szereplő lehet, miközben egyiknek sincs befolyásolási lehetősége a piac működésére,
- a kínálati oldalon szintén akárhány szereplő lehet, miközben egyiknek sincs befolyásolási lehetősége a piac működésére,
- a piacra lépés és a piac elhagyás költségei nullával egyenlőek,
- nincsenek tovagyrúzó hatások (externalitások) sem a keresleti, sem a kínálati oldalon.

Ezek a kritériumok szemmel látható módon nem érvényesülnek a teljes távközlésben, legfeljebb csak annak egy-egy szegmensében. A távközlési piacnak a verseny szempontjából legfontosabb tulajdonságai a következők.

- A távközlés eszköz-igényessége és ennek következtében a *piacra lépés költsége* igen nagy. Ezt a hatást fokozza a viszonylag nagy méretgazdaságosság. A technológia fejlődésével egyre inkább lehetőség nyílik bizonyos tekin-

⁴ ONP (Open Network Provision, magyarul nyílt hálózat-ellátás vagy nyílt hálózati hozzáférés): a mindenki által hozzáférhető távközlő hálózatokról történő szabályozói gondoskodás elve.

terben a hálózat nélküli, ún. virtuális hálózati szolgáltatók működésére és más új piaci szereplők belépésére.

- A nagy eszközigenyesség az állandó költségek nagy – és a változó költségek kicsi – arányával párosul. Ennek következtében csak hosszú távon értelmezhető a piactudásnak az a tétele, hogy a piaci árak a verseny következtében a *határköltségekhez* igazodnak. Rövid távon ugyanis az állandó költségeknek is meg kell térülniük az árban.
- Ugyancsak a sajátos költségösszetétel hatása az, hogy tág tere van a *keresztfinanszírozásoknak*, ami a piacok tönkretételéhez vezethet.
- A *hálózati externalitás* (vagyis az a tulajdonság, hogy a nagyobb hálózat használati értékét növeli az, hogy több ember tudja egymást hívni) a nagy hálózatokat hatványozottan felértékeli a kisebbekhez képest, rontva ezzel az új piacra lépők üzleti esélyeit. A technológia fejlődésével az összekapcsolási lehetőségek javulnak, és ez ellensúlyozni képes a hálózati externalitásokat.
- Az egymást kiegészítő tevékenységek esetében a hálózatokra épülő szolgáltatások, majd az azokra épülő alkalmazások *vertikumot* alkotnak, amelynek egy szolgáltató által kézben tartása jelentős gazdasági megtakarításokat és ún. választék-gazdaságosságot eredményezhet. Ezen keresztül erőfölényes helyzetek is kialakulnak, amelyek a verseny gátlása révén a termék és a piac fejlődését is gátolják. (Az 1. táblázat ezt a piaci tagozódást igen jól ábrázolja.) A technológia fejlődésével egyre gyakrabban fordul elő, hogy üzletileg is ésszerűvé válik

egy-egy szegmens önállósulása.

- A távközlés fejlődésével a termékek és a technológiák differenciálódnak, fejlődnek, és bizonyos érintett piacok szétválnak *vagy újraalakulnak egymáshoz kapcsolódó piacokra* (vagy a Verseny törvény szóhasználatában kiegészítő tevékenységekre). Ilyen pl. a kábeltelevíziós hálózaton nyújtott kétirányú távközlés, vagy a fix és a mobil szolgáltatások konvergenciájából kialakult integrált szolgáltatás. Ilyen esetekben az új erőfölényes helyzet nem a piaci szereplő versenyellenes magatartása, hanem inkább a technológia fejlesztése és a piac átalakulása révén jön létre.
- A távközlésben a frekvencia, a hívószámok és más azonosítók, valamint a közterület olyan nélkülözhetetlen eszköznek számítanak, amelyek egyben *szüksős erőforrások is*. E nélkülözhetetlen eszközök közé sorolandók azok a hálózati interfészek, amelyek az új szolgáltatók számára a meglévő hálózatok erőforrásainak felhasználásához szükségesek. Ezen interfészek műszaki, gazdasági és használati feltételei egyaránt lényegbevágóak az új szereplő számára.
- A távközlési piac tovább sajátossága, hogy piaci adottság a nagy piaci erővel rendelkező szolgáltatók jelenléte. A feladat tehát nem is annyira az ilyen helyzetek kialakulásának megakadályozása, hanem inkább az *új piacra lépők lehetőségének* javítása az akadályok lebontásával, az ehhez szükséges műszaki, gazdasági, használati, kereskedelmi előfeltételek kikényszerítése.

1. táblázat. Távközlési szolgáltatók: a piaci szerkezet alakulása

HÁLÓZATI INFRASTRUKTÚRA TULAJDONOS =>	Kiskereskedő =>	Teljes szolgáltatás-készlet =>		Belföldi =>	Távolsági Regionális Nagyvárosi	
		Csak üzleti szolgáltatások =>		Belföldi ->	Távolsági Regionális Nagyvárosi	
	Nagykereskedő =>	Nemzetközi =>		Vezetékes ->	Tengeralatti Szárazföldi	
		Belföldi =>		Műholdas	Távolsági Regionális Nagyvárosi	
	VIZSZONT-ELADÓ =>	Kapcsolt viszonteladó =>	Arbitrátor (közvetítő) =>		Call back Aggregátor ("összeállító") Internet telefon	
			Szolgáltatást értékesítő =>	Nagykereskedő =>	Értéknövelt üzenetközvetítés Virtuális magánhálózat Hívókártyák	
Kiskereskedő =>				Internet szolgáltatást értékesítők Hívókártyák		
Értéknövelt üzenetközvetítés =>			IP-alapú Nem IP alapú			
Kapcsolás nélküli viszonteladó =>		Arbitrátor (közvetítő) =>		Aggregátor ("összeállító") Call back		
		Szolgáltatás értékesítő =>	Speciális hívószámok =>	Prémiumdíjas szolgáltatások Ingyen hívható számok		
Helyet meghatározó szolgáltatások =>			Üzenetközvetítés "Követő" szolgáltatások			

Forrás: CommunicationsWeek International, 29 June 1998.

A valódi versenypiac és a távközlési piac különbségeit a 2. táblázatban foglalhatjuk össze.

2. táblázat. A valódi versenypiac és a távközlési piac különbségei

VALÓDI PIAC	TÁVKÖZLÉSI PIAC
A piacra lépés és elhagyás költsége = 0	A piacra lépés és elhagyás költsége nagy
Az árak a határköltséghez igazodnak	Az árak az állandó költségeket is fedezik
Externalitások nincsenek	Keresleti oldalon externalitások vannak Kínálati oldalon externalitások vannak
Keresleti oldalon nincsenek domináns szereplők	
Kínálati oldalon nincsenek domináns szereplők	Kínálati oldalon a domináns szereplők léte a jellemző Szűkös erőforrások korlátozzák a piacra lépést
A termelési eszközök helyhez kötöttsége nem jelent tőkeemelési akadályt	Gyakoriak a nélkülözhetetlen eszközök. A szűkösséget a termelő eszközök – hálózatok – helyhezkötöttsége csak fokozza.

2.3. Szabályozási sajátosságok

A piaci sajátosságok természetesen szabályozási sajátosságokat is előhívnak, amelyek közül a legfontosabbak a következők.

- Amennyire új és kialakulatlan a távközlési piac, annyi-
ra kialakulatlan az ágazat-specifikus versenyszabályozási
gyakorlat is. Ráadásul ez a piac a technológiai fejlődés-
sel együtt változik. Márpedig a technológia gyors fejlődése és a hatalmas befektetett eszközök nem várhatnak
évekig arra, hogy megtudják: lépéseik elfogadhatóak-
e a versenyszabályozás szempontjából. A tétel fordítva
is igaz: a társadalom nem mondhat le a távközlési pi-
ac gyors fejlődéséről, és meg kell találnia a szabályozási
kompromisszumot a biztonság és a gyorsaság között. Ezért
olyan nagy jelentőségűek a piac alakulását rugalmasan
követő és a verseny-szempontokat előzetesen megfogal-
mazó hatósági állásfoglalások, amelyek előre közzéte-
szik, hogy az adott – tipikus – esetben a versenyha-
tóság hogyan és milyen szempontok alapján döntene.
- A távközlési ágazat-specifikus versenyszabályozásnak
együtt kell fejlődnie a technológiával és a piaccal, ami
átmeneti jellegére is utal. Perspektivikusan a távközlé-
si piac is eléri azt a fejlettségi szintet, amikor már az
általános versenyszabályozás is elegendő lesz az ágazati
feladatok ellátásához (a jelek szerint ez Finnországban
például már bekövetkezett). A szabályozásba be kell épí-
teni a folyamatos visszavonulás lehetőségét is.
- Minden ágazati sajátosság ellenére az általános és az
ágazat-specifikus versenyszabályozásnak egymással össz-
hangban kell lennie, és elengedhetetlen a konzisztens al-
kalmazás. Ez nemcsak elvi, hanem gyakorlati követel-
mény is: egyetlen piaci szereplőtől sem lehet elvenni azt a
jogát, hogy versenyhatóságához forduljon, amely a meg-
felelő eljárásokat alkalmazva elkerülhet a Bizottsághoz
vagy egészen az Európai Bírósághoz is. Mivel a ver-

senyszabályozás harmonizáltsági foka a hazai jogrend-
ben igen mély és a többi jogágot is gyakran megelőzi,
ez az ágazat-specifikus versenyszabályozás harmonizáci-
ós igényére és kereteire is meghatározó hatást gyakorol.
A szabályozási cél azonban a két eljárás összehangja,
nem pedig megkettőzése. Ez csak úgy lehetséges, ha
a jogszabályok megfogalmazzák és struktúráltan kiala-
kítják a versenyhatóság és a távközlési hatóság közös
felelősségét, valamint az ezekhez szükséges kompatibilis
eljárásokat.

2.4. A távközlési ágazat-specifikus versenyszabályozási feladatokkal szembeni követelmények

A fentiekben bemutatott jogi és piaci sajátosságok ered-
ményeképpen alakultak ki a távközlési ágazat-specifikus
versenyszabályozási feladatok, amelyeket nem lehet egy-
egy szállal a gyökerekhez kötni, hanem amelyek szintetizált
válaszokat adnak a különböző természetű sajátosságokra
és szabályozási szükségletekre.

- Erőfölényes helyzetek kihasználásának megakadályozá-
sa, erőfölényes helyzetek leépítésének támogatása.
- Piacra lépés megkönnyítése a távközlés-specifikus mű-
szaki (pl. unbundling, azaz a szolgáltatások felbontása),
gazdasági (pl. keresztfinanszírozás), kereskedelmi (pl.
közös eszközhasználatban megegyezés) akadályok elhár-
ításával.
- Szűkös erőforrások diszkrimináció-mentes elosztása.
- Konzisztencia az általános verseny-szabályokkal.
- Gyorsaság.
- Kiszámíthatóság.
- Piac alakulásának (technológia fejlődésének) rugalmas
követése, a folyamatos visszavonulás lehetősége.

E követelmények hatásaként az általános és a távközlési
ágazat-specifikus feladatok közötti különbségeket a 3.
táblázatban foglaljuk össze.

3. táblázat. A versenyhatóság és a távközlési hatóság közötti különbségek

	Versenyhatóság	Távközlési hatóság
Megközelítés	Versenyt korlátozó magatartások megakadályozása	Piacra lépés műszaki, kereskedelmi, gazdasági és szervezeti akadályainak elhárítása
Az eljárás kezdeményezése	Konkrét esetekben, az érintett felek kezdeményezésére	Tipikus piaci helyzetekre és cselekményekre vonatkozóan, hatósági kezdeményezésre
Eljárás ideje	Utólagos	Előzetes
Hatósági döntés hatása	Korrektív	Preventív
Erőfölény forrása	Piaci részesedés, tulajdonosi koncentráció	Nélkülözhetetlen eszközök és szűkös erőforrások birtoklása, szolgáltatások felbonthatatlansága („bundling”)
Piaci hatás számszerűsítése	Határköltések egybevetése az árakkal	Keresztfinanszírozás felderítése, hosszútávú jövőbeni határköltések egybevetése az árakkal

3. A TÁVKÖZLÉSI ÁGAZAT-SPECIFIKUS VERSENY-SZABÁLYOZÁSI FELADATOK AZ IRÁNYELVEKBE

1997 – 1998 fordulóján megjelent négy irányelv⁵, amelyek a távközlési szolgáltatások liberalizált piacának működéséhez szükségesek. A piacra lépést a 97/13 sz. ún. engedélyezési irányelv szabályozza. A szolgáltatói és előfizetői kapcsolatokra vonatkozóan szabályozást találunk a 98/10 sz. ún. telefon-irányelvben, az 1998-ra módosított, eredetileg 92/44 sz. ún. bérelt vonali irányelvben. (Ezen kívül most is hatályosak a – korábban megjelent – ISDN-re és a csomagkapcsolt adatátvitelre vonatkozó ajánlások, amelyek e két szolgáltatást mint közérdekű szolgáltatásokat definiálják, azonban a kielégítő verseny miatt nem tartalmaznak kötelező szabályozásokat.) A szolgáltatói együttműködésekre vonatkozóan két európai irányelvben találunk szabályozást: a 97/33 sz. ún. összekapcsolási irányelv az összekapcsolási eseteket szabályozza, a telefon-irányelv pedig azokat a rákapcsolási eseteket, amikor tovább-szolgáltatók veszik igénybe a hordozó szolgáltatásokat.

3.1. Az engedélyezési irányelv

Rövid általános ismertetés

A 97/13 sz. irányelv a távközlési szolgáltatások piaca lépésének szabadságát mondja ki, és megalkotja az engedélyezések egységes szabályait is. Ennek értelmében – mintegy lezárva a 90/388 irányelvvel elindított liberalizációs folyamatot – a versenyt kiterjesztik az egész szektorra úgy, hogy

- bevezetik az általános engedélyezés közös jogintézményét, ami azt jelenti, hogy bárki jogosult egyszerű beje-

⁵ 98/10/EC Directive of the European Parliament and of the Council of 26 February 1998 on the application of open network provision (ONP) to voice telephony and on universal service for telecommunications in a competitive environment. 97/33/EC Parliament and Council Directive of 30 June 1997 on interconnection in telecommunications with regard to ensuring universal service and interoperability through application of the principles of open network provision (ONP). 97/13/EC Parliament and Council Directive of 10 April 1997 on a common framework for general authorizations and individual licences in the field of telecommunications services. Council Directive 92/44/EEC of 5 June 1992 on the application of open network provision to leased lines.

lentes alapján távközlő hálózatot létesíteni vagy távközlési szolgáltatást nyújtani, ha nincs igénye szűkös erőforrásokra (hívószám, frekvencia, ingatlan) és ha nem vállal közszolgáltatási kötelezettségeket, tehát nem kötelezi a vállalkozást kifejezett hatósági határozat megszerzésére azon jogok gyakorlásának megkezdése előtt, amelyek a feljogosításból erednek,

- egyedi engedélybe foglalt különleges szolgáltatási kötelezettségeket és ezek teljesítéséhez szükséges különleges jogokat⁶ kaphat az, akit erre a kormányzat kijelöl,
- objektív, átlátható, arányos és nem-diszkriminatív kritériumok és eljárások útján lehet a szűkös erőforrásokhoz hozzájutni,
- az egyik tagországban kapott engedély feljogosít más tagországban is a szolgáltatás nyújtására.

A verseny szabályozási feladatok ismertetése

Az egyedi engedélyezéshez kapcsolódó különleges jogok és kötelezettségek önmagukban gátolják a versenyt, ezért a szabályozás – a Római Szerződés vonatkozó cikkelyeinek megfelelően – az egyenlő esélyek fenntartásának módjáról szól. Ezek nem klasszikus versenyszabályozási feladatok, itt a hatóság felelőssége az azonos piaci esélyek biztosítása. Az irányelv értelmében az alábbi eszközöket kell alkalmazni.

Előzetesen nyilvánosságra kell hozni azokat a kritériumokat, amelyek az egyedi engedély elnyerésének feltételét képezik, miközben az irányelv előírja a versenyztetés alkalmazását. Mindazok elnyerik a szolgáltatási engedélyt, akik ezeket a feltételeket teljesítik. Amennyiben azonban a kormányzat(!) (itt kormányzaton kifejezetten nem a ha-

⁶ Különleges jogok definíciója (az összekapcsolási irányelv meghatározása)

Az adott Tagállamban bármely jogszabályi, szabályozási vagy államigazgatási eszközzel, az objektív, arányos és megkülönböztetésmentes feltételektől eltérő módon adott olyan jogosultság, amely az adott földrajzi területen kettőre vagy többre korlátozza egy szolgáltatás nyújtására vagy egy tevékenység végzésére feljogosított vállalkozások számát, vagy több egymással versenyben álló vállalkozást jelöl ki egy szolgáltatás nyújtására vagy egy tevékenység végzésére, vagy olyan jogszabályi vagy szabályozási előnyhöz juttat egy vagy több vállalkozást, amely lényegesen befolyásolja bármely más vállalkozásnak ugyanazon szolgáltatás nyújtására vagy ugyanazon tevékenység végzésére irányuló képességét ugyanazon a földrajzi területen, lényegében egyenértékű feltételek mellett.

tóságot kell érteni, hanem a minisztériumot) a fentiekhez képest

- a piaci szereplők esélyeit diszkriminálni lenne kénytelen a frekvenciák vagy a hívószámok korlátossága miatt, vagy
- az adott speciális jogokat és kötelezettségeket módosítani kívánja,

olyan eljárásom keresztül kell ezt megtennie, amely objektív kiválasztási kritériumokon alapul, megkülönböztetésektől mentes, részletes, átlátható, valamint arányban áll a feladat jellegével és jelentőségével. Az eljárás során az érdekeltek véleményét ki kell kérni, és a döntést megfelelően indokolni kell (8. és 10. cikkely). Az eljárásokra az irányelv határidőket is előír.

3.2. A telefon-irányelv

Rövid általános ismertetés

A 98/10 sz. irányelv a telefonról szól, amely egyetemes szolgáltatás lesz az Unió tagországaiban. A szabályozás célja az, hogy biztosítsa a közérdekű távbeszélő hálózathoz történő nyílt és hatékony hozzáférést, továbbá e hálózatok és szolgáltatások ugyanilyen igénybevételét. A szabályozás felkészül a versenykörülményekre, és rendelkezik a különleges jogok esetleges fenntartásának lehetőségeiről és feltételeiről.

Ez az irányelv foglalkozik az egyetemes szolgáltatás fenntartásával és fejlesztésével a verseny körülményei között úgy, hogy

- bizonyos szolgáltatókra olyan kötelezettségeket ruháznak, miszerint *specifikált minőségű távközlési szolgáltatások (telefon, bérelt vonal, mobil rádiótelefon) egy minimális választékát nyújtani kötelesek,*
- a szolgáltatási kötelezettségeket teljesítő szolgáltatók jogos pénzügyi kompenzációt kaphatnak bizonyos közös elvek alapján akkor és ott, amikor és ahol a kötelezettségek teljesítése bizonyíthatóan üzletileg életképtelen,
- az irányelv meghatározza a telefon szolgáltatás kereskedelmi feltételeit úgy, hogy azokat a szerződő felek szerződéseikben érvényesítsék.

Az irányelv előírja az alkalmazandó díjazási alapelveket is az általános ONP feltételeknek megfelelően. A távközlési hatóságnak jogában áll a tisztességtelen tarifákat módosítani, amelyet csak megfelelő, mindenki számára hozzáférhető nyilvános eljárás alkalmazásával végezhet el. Olyan költségfelosztási rendszert kell alkalmazni, amely lehetővé teszi az ezen irányelvekben lefektetett követelmények megvalósítását, s amelyet a távközlési hatóság jóváhagyott. Ezen adatok auditálандók és nyilvánosak.

A versenyszabályozási feladatok ismertetése

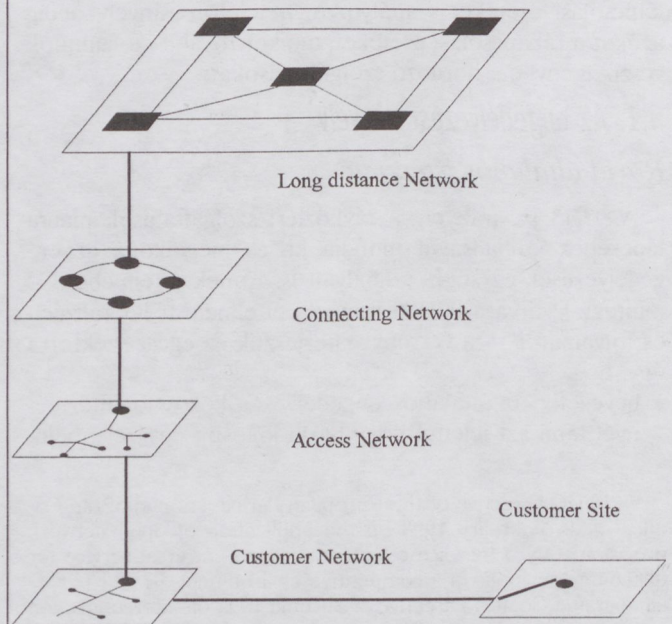
Ez az irányelv rendelkezik arról, hogy milyen feltételek teljesülése esetén nyilvánítandó egy szolgáltató jelentős piaci erővel rendelkezőnek (ezek esetében fogják ugyanis a hatóságok az ágazat-specifikus versenyszabályokat alkalmazni). A feltétel: legalább 25 %-os piaci részesedés a hatálya alá vont szolgáltatások érintett (releváns) piacán. A hatóság eltekinthet a 25 %-tól akkor, ha a szolgáltató nem képes a piac befolyásolására pénzügyi forrásai, a rendelkezésre álló szakértelmen, ill. az előfizetői kapcsolatokon keresztül. Ennek az ellenkezője is igaz: ennél kisebb piaci

részesedés is elegendő lehet a jelentős piaci erővel rendelkező szolgáltatóként történő kijelöléshez, ha az adott szolgáltató képes a piac befolyásolására egyéb képességei révén.

Az irányelv szinte teljes egészében a tisztességes üzletmenetre, a fogyasztók megtévesztésének megakadályozására vonatkozó rendelkezéseket tartalmazza. Ezek a szolgáltatás-specifikus rendelkezések rögzítik a fogyasztók tájékoztatására, az egyoldalúan előnyös szerződéses feltételek elkerülésére, a minőségre és annak betartására, a tisztességes tarifákra, az előfizetői panaszok kezelésére, valamint az árukapcsolás (bundling) tiltására vonatkozó kötelezettségeket. A rendelkezésekben tisztán felismerhetők a versenyszabályok és a fogyasztóvédelmi szabályok ágazat-specifikus kategóriái, amelynek érvényesítésében a hatóságnak is szerepe van. A hatóság a szerepét – az irányelvben rögzítettek szerint – jogszabályban előírt esetekben vagy a saját, vagy a fogyasztói érdekképviseletek, vagy az érintett felek kezdeményezésére gyakorolja.

A 24. cikkely előírja, hogy az állami feladatok során nemzeti szinten kialakított eljárásokon keresztül (!) ki kell kérni minden érintett fél – fogyasztók, szolgáltatók, gyártók – véleményét a hatálya alá vont szolgáltatások kötelező szolgáltatás-készletével, megfizethetőségével, minőségével kapcsolatban.

A fogyasztók és szolgáltatók közötti szerződéssel kapcsolatos vitákra vonatkozóan a hatóság előírja valamely hatóság vagy független testület (!) igénybevételi lehetőségét. E testület eljárásával szemben az a követelmény, hogy legyen tisztességes (ami az európai szóhasználatban azt jelenti, hogy minden érdekelt fél jogos érdekeit figyelembe veszi), átlátható (ami azt jelenti, hogy az eljárást előzetesen rögzítik és mindenki által elérhetően közzéteszik), olcsó és könnyen hozzáférhető, gyors.



2. ábra. A telefon-hálózat szintjei

A telefon-irányelv a szolgáltatói együttműködésekéről is szól abban az esetben, ha a felhasználó nem végfelhasználó, hanem tovább-szolgáltató a 2. ábrán bemutatott valamely szolgáltatási rétegben. Erre az esetre az összekap-

csolási irányelvnel a szolgáltató együttműködések között térünk ki, mert logikájuk az összekapcsolásokéval azonos.

3.3. Az összekapcsolási irányelv

Rövid általános ismertetés

A 97/33 sz. irányelv az összekapcsolás specifikus szabályozása, amelynek célja és egyben területe egyes szolgáltatások összekapcsolhatóságának, azaz együttműködő képességének biztosítása. (Ide kapcsolódik még két ajánlás⁷ is. A 98/195 és az ezt módosító 98/511 számú Bizottsági ajánlás az összekapcsolásoknál alkalmazott árakról szól. A tagországokban ezeket kell alkalmazni szabályozott árként, ettől eltérni csak akkor lehet, ha a szolgáltató bebizonyította, hogy az ő költségei ennél magasabbak. Az ajánlás gyakorlatilag irányárakat tartalmaz a jelentős piaci erővel rendelkező szolgáltató esetében a távolsági hívások végződtésére a helyi, ill. a tandem hálózatokban. Az irányárak legalacsonyabb és legmagasabb limitárakat tartalmaznak. A 98/322 számú Bizottsági ajánlás az alkalmazandó számviteli eljárásokról szól. Igen részletes szabályokat ad a költségek felosztására és nyilvántartására, továbbá az árakban alkalmazható „indokolt” profit megállapítására is.)

A szolgáltatói együttműködésekre vonatkozóan két európai irányelvben találunk szabályozást: az összekapcsolási irányelv az összekapcsolási eseteket szabályozza, a telefon-irányelv pedig azokat a rákapcsolási eseteket, amikor tovább-szolgáltatók veszik igénybe a hordozó szolgáltatásokat. A két szabályozás megközelítési módja és filozófiája a szolgáltatói együttműködések szempontjából azonos.

Az együttműködések szabályozása *aszimmetrikus*. Ez azt jelenti, hogy miközben bizonyos szolgáltatási és szolgáltatói körben szerződéskötési kötelezettségek vannak életben, addig más szolgáltatási és szolgáltatói körnek nincsenek ilyen kötelezettségei, vannak viszont bizonyos jogaik az összekapcsoláshoz és a rákapcsoláshoz.

Szerződéskötési kötelezettség áll fenn az alábbi *szolgáltatások* esetében:

- telefon (helyhez kötött távbeszélő) szolgáltatás,
- bérelt vonali szolgáltatás,
- közcélú mobil távbeszélő szolgáltatás,
- a nemzetközi gateway rendelkezésre bocsátása.

E szolgáltatások azonban csak bizonyos *szolgáltatói kör* esetében állnak szabályozás alatt, mégpedig:

- szolgáltatási kötelezettségek esetén,
- jelentős piaci erő fennállása esetén.

A szabályozás általánosságban és konkrét esetekben is kezeli azokat az eseteket, amikor az egyik szolgáltató egy olyan, szűk keresztmetszetet képező erőforrás birtokában van, amely más szolgáltatók piacra lépéséhez szükséges. Ilyen esetekben tiltott a hozzáférés indokolatlan megtagadása más szolgáltatótól.

Nincs tehát pozitív együttműködési szabályozás azokra

a szolgáltatókra vonatkozóan, akik nem a fenti körbe tartozó szolgáltatást nyújtják, illetve azokat nyújtják, de nincs szolgáltatási kötelezettségük vagy nem rendelkeznek jelentős piaci erővel.

Az együttműködések szabályozása más szempontból is aszimmetrikus: a szabályozás előíró és kényszerítő ereje nem mindig egyforma. A fontosabb szolgáltatások esetében (ezek a már említett kötelezően nyújtandó szolgáltatások) kötelező előírások léteznek a szerződések műszaki, kereskedelmi és gazdasági feltételeire. Más esetekben a szabályozás „csak” a piaci önszabályozó mechanizmusokra (szabványokra és kereskedelmi szokványokra) vagy a szolgáltató egyoldalú vállalásaira hagyatkozik. A legkevésbé elterjedt szolgáltatások esetében a szerződések tartalmára vonatkozóan semmiféle kikötést nem tesz a szabályozó. Fennmarad azonban a hatóságnak minden esetben az a joga, hogy a szerződések tartalmának egyes elemeit megállapítsa, amennyiben azt valamelyik fél vagy saját maga – a törvényben rögzített közérdek alapján – szükségesnek látja.

Az európai távközlés-szabályozásban a szolgáltatói együttműködések szabályozása igen differenciált, hiszen 4-5 tényezőt múlik egy adott esetben a szabályozás mékintje. A részletek ismertetése itt felesleges, de a szabályozási eseteket a 4. táblázatban foglaljuk össze (minden más esetben a szabályozás nem pozitív, azaz nem tartalmaz együttműködési kötelezettséget). A „+” jelentése az, hogy az adott kérdésre létezik szabályozás, a „-” jel jelentése pedig az, hogy nincs.

A versenyszabályozási feladatok ismertetése

Az összekapcsolási irányelvben szintén könnyedén felismerhetők az általános versenyszabályok alkalmazásai, ami nem véletlen, mert a 3. cikkely kimondja, hogy a jelentős piaci erővel és szolgáltatási kötelezettséggel rendelkező szolgáltatók szerződéses viszonyaira ezen irányelv és a versenyszabályok alkalmazandók. Az erőfölényes helyzetek ellensúlyozását célzó főbb rendelkezések a következők:

- az összekapcsolási szolgáltatások műszaki, gazdasági feltételeinek (Reference Interconnection Offer, RIO) előzetes megalkotása, hatósági jóváhagyása és közzététele,
- szolgáltatási kötelezettségek teljesítésére fordított költségek kimutatása érdekében a költségfelosztási módszerek és eredmények közzététele,
- a keresztfinanszírozás megakadályozása érdekében a kapcsolt vállalkozásba szerveződő vertikális integrációk feltételeinek meghatározása,
- a verseny-szférába tartozó szolgáltatások számviteli szétválasztása a bevételek és a költségek teljes, tételes szétválasztásának előírása (tehát a befektetések keresztmozgását nem akadályozza!) vagy kapcsolt vállalkozásba kényszerítése/szervezeti leválasztása,
- az összekapcsolási szolgáltatásokat számvitelileg le kell választani a bevételek és a költségek tételes és teljes szétválasztásával,
- az összekapcsolást kérő fél számára ugyanazokat a szolgáltatási feltételeket kell biztosítani, mint saját maguk vagy kapcsolt vállalkozásuk számára,
- az együttműködő partner számára minden szükséges saját információt fel kell tárni, ideértve a 6 hónapos tervezési együttműködést is,

⁷ Commission Recommendation 98/195/EC of 8 January 1998 in interconnection in a liberalized telecommunications market Part 1 – Interconnection pricing. Commission Recommendation 98/511/EC of 29 July 1998 amending Commission Recommendation 98/195/EC of 8 January 1998 in interconnection in a liberalized telecommunications market Part 1 – Interconnection pricing (98/195/EC). Commission Recommendation 98/322/EC of 8 April 1998 in interconnection in a liberalized telecommunications market. Part 2 – Accounting separation and cost accounting.

- az együttműködés során a partnertől kapott információkat nem szabad másra és máshol felhasználni, még a saját szervezet más részlegének sem szabad átadni,
 - az információ-adási kötelezettség mindenféle üzleti titok védelmére vonatkozó egyéb kikötésekkel jár együtt.
- E kötelezettségek betartásában a hatóságnak kulcs-

szerpe van. A kötelezettségek érvényesítésének legfontosabb eszköze a nyilvánosság, amelynek differenciált szabályait (közlöny vagy betekintés) a 14. cikkely tartalmazza. Az üzleti stratégiára vonatkozó információk viszont szigorúan védettek, ezek az általános versenyeljárások szabályaival megegyezően szolgáltatati titkot képeznek.

4. táblázat.

A szabályozás tárgya	I. jog és köteleesség	II. szokásosra kötelezettség		III. ésszerűre kötelezettség	
	kötelező	szabványos rákapcsolás	a szolgáltató által meghirdetett	speciális műszaki igények	speciális helyű igények
Szabályozott szolgáltatások					
helyhez kötött telefon	+	+	+ jelentős piaci erő esetén	+	+ jelentős piaci erő esetén
bérelt vonal	+		+ jelentős piaci erő esetén		+ jelentős piaci erő esetén
közcélú mobil telefon	+		+ jelentős piaci erő esetén		+ jelentős piaci erő esetén
nemzetközi gateway	+				
A szabályozó szerepe					
műszaki feltételeket meghatároz	irányelvekben	szabványban, szolgáltató közzetteszi	szolgáltató meghirdeti, hatóság jóváhagyja	megegyezés szerint, hatóság közbeléphet	megegyezés szerint, hatóság közbeléphet
kereskedelmi feltételeket meghatároz	irányelvekben	szabványban, szolgáltató közzetteszi	szolgáltató meghirdeti, hatóság jóváhagyja	megegyezés szerint, hatóság közbeléphet	megegyezés szerint, hatóság közbeléphet

A felek közötti megegyezés – miközben már a szolgáltatási kötelezettséggel rendelkező, erőfölényes helyzetben lévő szolgáltatót az összes fenti kötelezettség is köti – a felek felelőssége. Arra az esetre, ha mégsem tudnának megegyezni, vagy ha a közérdek vagy a fogyasztók általános érdeke veszélyben van, az irányelv a hatóságra ruházza a kötelezettség érvényesítését, és megalkotta ennek eljárásait is.

A hatóságnak elsősorban – első fokon??? – az a feladata, hogy bizonyos vitás szerződéses pontok tekintetében elősegítse az egyezséget, és ha ez nem sikerül, döntse el az adott kérdést. Az eljárást az irányelv a nemzeti szintű jogszabályokba utalja azzal az elvárással, hogy figyelembe kell venni mindkét fél jogos érdekeit, a 11 tételben meghatározott, ún. lényeges vagy alapvető követelményeket, a határozatot indokolni kell, a 6 hónapos határidőt be kell tartani.

A hatóságnak hasonlóképpen joga van a szerződés teljesítését és további sorsát is felülvizsgálni. A közös eszközhasználatra vonatkozó kötelezést is ezen eljárás keretében kell meghozni.

A számkiosztás eljárása is ebben az irányelvben van szabályozva: ennek előre rögzítettnek, egyenlő eljárást biztosítóknak, gyorsnak, objektív kritériumokon alapulónak kell lennie.

Az irányelv konkrétan nem írja elő, hogy a mediátori⁸, az arbitrátori⁹ vagy a bírói eljárást kell alkalmaznia a hatóságnak. A szövegezésből azonban egyértelműen kiviláglik, hogy

- a hatóság a mediátori szereppel próbálkozik kezdetben,
- ha ez nem vezet sikerre, akkor az arbitrátori szerepet kapja,
- a hatósági ill. versenyhatósági általános szabályok körébe vonás arra utal, hogy a fellebbviteli lehetőséget a nemzeti általános jogszabályi környezet határozza meg.

4. A VERSENYSZABÁLYOZÁS ÁLTALÁNOS ÉS ÁGAZATI ALKALMAZÁSÁNAK KÖZÖS RÉSZEI, EGYÜTTMŰKÖDÉSE

A versenyszabályok általános és ágazat-specifikus alkalmazásának nemcsak a gyökerei közösek, de – mint ahogyan azt a Bizottság 97/C 313/03 sz. közleménye (Notice) is kifejti – a végeredményének is kompatibilisnek kell lennie. Ez a józan ész alapján is belátható: ha valakinek a jogát nem korlátozzák – márpedig nem korlátozhatják –

⁸ A mediátor nem vesz részt az ügy érdemi eldöntésében, hanem csak közvetít a felek között.

⁹ Az arbitrátor a felek megbízásából és nevében az ügyet el is dönti.

abban, hogy a versenyhatósághoz forduljon, akkor mindent meg kell tenni annak érdekében, hogy a két hatóságnál lefolytatott eljárás kimenetele egyenértékű legyen. Így lehet megakadályozni azt is, hogy az eljárást duplikálni kelljen.

Mivel – mint láttuk – a gyökerek, alapelvek közösek, az eljárások azok, amelyek felelősek a konzisztenciáért. A hivatkozott közlemény is kimondja, hogy a távközlési hatósági eljárás kialakítása – ellentétben a versenyhatóságéval – nemzeti hatáskörben van, azaz nem kell betű szerint alkalmazni az úniós eljárási szabályokat (nevezetesen a vállalatok fúziójának engedélyezési eljárását meghatározó 17/62 sz. rendeletet – Regulation). Szigorú követelmény azonban, hogy az alkalmazott eljárásnak úgy kell működnie, hogy egyenértékű „végeredményt” produkáljon.

A döntés egyenértékűségének eljárásbeli alapfeltételei:

- az érdekelt felek bevonására, információ-szolgáltatására és bizonyítási terhére alapuló eljárás,
- az érintett piac meghatározása,
- a versenyhelyzet értékelésének módszere,
- az eljárás garanciális szabályainak alkalmazása (nyíltság, titokvédelem, indoklás stb.).

A speciális eljárás kialakítása során javasolt megvizsgálni a 17/62 sz. rendelet által teljesített funkciókat.

5. NÉHÁNY FONTOS VERSENYBÍRÓSÁGI DÖNTÉS ÉS KÖZLEMÉNY FIGYELEMREMÉLTÓ EREDMÉNYEI

5.1. A nélkülözhetetlen eszközök doktrínája

- 94/19/EC bizottsági Határozat (Commission Decision) a Sea Containers v. Stena Sealink – Interim Measures esetre vonatkozóan.
- 94/119/EC Bizottsági határozat a Rydby (Denmark) kikötő eszközeihez való hozzáférés visszautasításának ügyében.

(Itt kell megjegyezni, hogy az OECD is dokumentumot adott ki a nélkülözhetetlen eszközök doktrínájáról, jogintézményéről.)

A fenti dokumentumokból megállapíthatóak azok a körülmények, amelyek alapján a távközlési szolgáltató kötelezhető arra, hogy a társ-szolgáltatókkal megossza eszközeinek használatát.

A „lényeges eszközök” doktrínát a Bizottság versenybírósi gyakorlata alkotta meg a Római Szerződés 86. cikkelye alapján, a fentiekben megjelölt 94/19/EC Bizottsági határozattal (verseny körülmények között), illetőleg a 94/119/EC Bizottsági határozattal (kizárólagos jog körülményei között). A fogalom először a közlekedés területén (kikötők, légi közlekedés) született, de tovább általánosítható olyan esetekre, amelyek során *egy vállalkozás rendelkezik olyan eszközzel, amely nélkül a versenytárs képtelen szolgáltatást nyújtani fogyasztói számára, és ez a vállalkozás domináns helyzetével visszaélve, kellő ok nélkül nem engedi meg számára a hozzáférést ehhez az eszközhöz.*

A lényeges eszközzel való rendelkezés jogi kellekei tehát:

- a releváns piacon domináns helyzetben lévő szolgáltató, aki
- a fogyasztás kárára korlátozza a kínálatot (termelést, műszaki színvonalat vagy más),

- visszaél a helyzetével úgy, hogy tisztességtelen feltételeket köt ki.

A meghatározás szempontjából kulcskérdések:

Mi a releváns piac?

A releváns piac mindig egy adott fogyasztási szükséglet kielégítésére értelmezhető. Egy adott terméknek vagy szolgáltatásnak a releváns piacát adják azok a termékek/szolgáltatások, amelyek a fogyasztók számára egy-egy más értelmese (gazdaságosan) helyettesíthető és fizikailag megvalósítható választási lehetőséget adnak.

(Példa: a televízió nézés releváns piaca egy nagyobb területen a kábelen, műhold vevővel és földfelszíni vétellel vehető műsorok összességével lehet egyenlő. Ha valamelyik vételi lehetőség egy adott körzetben hiányzik vagy gazdaságtalanul lenne csak kiépíthető, akkor a releváns piacba ez a vételi lehetőség nem számít bele. Közlekedési példa: valamely közlekedési útvonal releváns piacába csak azok a közlekedési eszközök és útvonalak számítanak bele, amelyek fizikailag és gazdaságilag értelmes alternatívát jelentenek a fogyasztó számára, tehát a drágább kerülő út vagy autó helyett helikopter nem jöhet számításba.)

Mikor van egy szolgáltató domináns helyzetben?

Akkor, ha a releváns piacon a részesedése eléri azt a mértéket, hogy tevékenységével befolyásolhatja a piac működését.

Mikor korlátozza a fogyasztás kárára a kínálatot?

Ha tevékenysége eredményeképpen a fogyasztók kevesebb, drágább, vagy gyengébb minőségű szolgáltatáshoz jutnak.

Mikor tisztességtelen a kiszabott feltétel?

Akkor, ha (i) hátrányos a partner részére kereskedelmi értelemben, (ii) az adott helyzetben szükségtelen vagy indokolatlan, (iii) diszkriminatív, vagyis hátrányosabb, mint amit mások – vagy saját érdekkörbe tartozók – számára nyújtanak.

Alkalmazandó eljárás

A fenti esetekben versenyjogi eljárásnak van helye.

5.2. WorldCom/MCI eset, 1999 (a Bizottság IV/M.1069 sz. esete)

A versenybírósi (bizottsági) döntés két globális szolgáltató – a WorldCom és az MCI fúziójára vonatkozik. A 35 közlöny-oldalt kitevő határozat és indoklása legérdekesebb eredménye az, hogy önálló érintett piacként határozzuk meg az Internet összekapcsolási, majd pedig a hozzáférési szolgáltatások piacát. Ezzel tulajdonképpen az Internet világában is definiálják a hierarchikus távközlő hálózatot, ahol a „hierarchikus” nem műszaki fogalom, hanem a tárgyalási pozíció és piac-befolyásolási képesség hierarchiája. Itt vertikális intergációnak számít az átviteli utak nyújtása (carrier services) – az összekapcsolási lehetőségek biztosítása (peering) – a hozzáférési lehetőségek nyújtása (access).

A Bizottság e vertikális integrációnak egyetlen szervezetbe kerülését károsnak tartotta, ezért a fúziót az alábbi feltételekkel hagyta jóvá.

- 1) Az összefonódó vállalatok Internet hozzáférési szolgáltatásait egyetlen kapcsolt vállalkozásba kell összefogni és el kell adni. A határozat részletesen taglalja az eszközök, az IP címek, a domain nevek, az előfizetők és felhasználók, a dolgozók (tehát az erőforrások és a felhasználók) átadásának szabályait.
- 2) A feltételek végrehajtásának ellenőrzéséhez a Bizottságnak joga van – a vállalkozások költségére és velük történő egyeztetést követően – ellenőrt alkalmazni, akinek joga van minden információhoz hozzájutni, és kötelessége havi rendszerességgel írásos jelentést adni a Bizottság számára.

5.3. Az Atlas esetének nyilvános vitára bocsátása, 1995 (Case No IV.35.337, Notice)

Az Atlas 3 – elkülönült földrajzi érdekeltégű – kapcsolt vállalkozással létrejött, pán-európai gerinchálózatot működtető vállalkozás, amit a Deutsche Telekom és a France Telecom hozott létre.

Ez a közlemény – amely az Official Journal-ban jelent meg azzal a céllal, hogy bármely érintett fél hozzászólását kikérje – nagyon jól definiálja a nagyvállalati felhasználók (corporate user) érintett piacát. Ez azért érdekes, mert ez az egyébként önállóan tekintett szolgáltatások (bérelt vonal, kapcsolt adatátvitel, kapcsolt forgalom) szintézise.

A közlemény azért is érdekes, mert a nemzeti és a globális hálózat-részt is önálló érintett piacnak tekinti, amelyeket vertikális integrációként kezel.

A közös vállalkozás jóváhagyása érdekében a felek beadványukban számos vállalat tettek. Ezek lényege, hogy a korábban különböző szervezetekben és kapcsolt vállalkozásokban végzett tevékenységeket átrendezik, az azonos érintett piacot kitevő tevékenységeket azonos szervezetbe teszik. Ezeket a – vertikálisan vagy horizontálisan – kapcsolódó vállalkozásokat a vertikális integrációnak megfelelő módon kezelik, azaz vállalják a keresztfinanszírozások kiküszöbölését és az ügyvezetés elkülönítését, a harmadik feleknek a saját kapcsolt vállalkozással vagy szervezeti egységgel azonos szerződéses kezelését és a kizárólagos üzleti kapcsolatok elkerülését.

5.4. A Unisource esete, 1997 (a Bizottság Case No. IV/35.830 határozata)

A Unisource különböző – elsősorban skandináv – nemzeti távközlési szolgáltatók globális közös vállalkozása. A közös vállalkozás engedélyezési feltételei – az Atlashoz hasonlóan – itt is a különböző tevékenységek önálló vállalkozásokba tömörítése, és ezek önálló ügyvezetésének biztosítása. Külön rendelkezések szólnak ezek részleteiről is, így

- a vevőkről kapott információkat a vállalkozások egymás között nem adhatják át,
- tiltott a keresztfinanszírozás,
- egyes szolgáltatások igénybevételét nem lehet más szolgáltatás igénybevételéhez kötni.

A feltételek ellenőrzési módja a megfelelő nyilvántartások vezetésének kötelezettsége és a Bizottság joga a helyszíni ellenőrzéshez.

5.5. Bizottsági közlemény előkészítése a fix/mobil konvergenciáról

A Bizottságban felmerült a fix és mobil szolgáltatások konvergenciájának, hálózataik integrációjának verseny-szemponitú megítélésére vonatkozó állásfoglalás kialakításának szükségessége. Erős a gyanú ugyanis, hogy ez a konvergencia újabb erőfölényes helyzeteket hozhat létre vagy régieket erősíthet meg, és gátolhatja az új piacra lépők esélyeit.

Jelenleg a nyilvános konzultáció első felvonása zajlik: a (80 oldalas) konzultációs tanulmány közreadása véleménykérés céljából és a vélemények gyűjtése.

A tanulmány úgy foglal állást, hogy a fix és a mobil telefon piacai a jövőben sem fognak teljes mértékben integrálódni, ezért két különböző érintett piacról van szó továbbra is. Ugyanakkor létezni fog a konvergált fix/mobil érintett piac is, amelyet további 2 részre kell bontani: (i) a hordozó szolgáltatások érintett piacára, ahol az általános versenytörvényi szabályozás alkalmazására célszerű hagyatkozni, (ii) a hozzáférési szolgáltatásokra, ahol meg kell vizsgálni, hogy nem keletkeznek-e „nélkülözhetetlen eszközök” vagy olyan erőfölényes helyzetek, amelyek ronthatják az új piacra lépők esélyeit, és ezért ágazat-specifikus szabályozást igényelnének. Az erőfölényes helyzetekre vonatkozó értékelés feltűnően hasonlít a kábeltelevíziós hálózatok szervezeti elkülönítési kötelezettségét kimondó 90/388 irányelv-módosításra.

6. ÖSSZEFOGLALÁS, KITEKINTÉSSEL AZ EGYSÉGES HÍRKÖZLÉSI TÖRVÉNYRE

A távközlési piac – Magyarországon csakúgy, mint a világ többi részén – még fejletlen. Az állami szabályozás egyik legfontosabb feladata a piacépítés terén eddig elért eredmények megvédése és azokra alapozva a piac továbbépülésének támogatása, az azt gátló tényezők hatástalanítása.

A távközlési piacnak még léteznek, és hosszú ideig fenn is fognak maradni azok a sajátosságai, amelyek következtében a versenyszabályozás általános intézmény-rendszere egy országban sem bizonyult elegendőnek e feladathoz. Az EU távközlés-szabályozása számos feladattal ruházta fel a nemzeti távközlési hatóságot annak érdekében, hogy az a maga ágazat-specifikus eszközeivel elősegítse az általános versenyszabályok hatékony érvényesülését a távközlés területén, továbbá hogy a piaci szereplők számára kiszámítható verseny-környezetet teremtsen és ezzel ösztönözze a befektetéseket.

Az új hírközlési törvénynek fel kell hatalmaznia a hatóságot az általános verseny-szabályozás távközlés-specifikus elmeinek elvégzésével, melyek az alábbiak.

- Az egyedi szolgáltatási engedélyek számára olyan műszaki, kereskedelmi, gazdasági és szervezeti feltételek meghatározása és felügyelete, amelyek az új piacra lépők piacralépési akadályait csökkentik, és megakadályozzák az erőfölényes helyzetek kialakulását.
- Az államilag garantált szolgáltatásokhoz való hozzáférésre vonatkozó előfizetői és hálózati szerződések esetében a domináns szolgáltatók azon műszaki, kereske-

delmi, gazdasági és szervezeti feltételeinek felügyelete (szükség esetén jóváhagyása vagy meghatározása), amelyek az új piacra lépők piacralépési akadályait csökkentik, és megakadályozzák az erőfölényes helyzetek kialakulását.

- Norma-értékű előzetes állásfoglalások kialakítása a tipikus távközlési piaci események (szerződéses feltételek, egyeztetett gyakorlatok, vállalati összefonódások, stratégiai szövetségek) verseny-szemponitú megítélésével, a támasztandó feltételekkel kapcsolatosan.

A távközlési hatóság feladata az általános versenyszabályozás távközlési érvényesüléséről való gondoskodás, így feladatai számos párhuzamosságot mutatnak a versenyhatóságéval, ezért szükség van a munkamegosztás lehető legpontosabb meghatározására a hírközlési törvényben.

Az általános versenyszabályok távközlési érvényesülése csak úgy képzelhető el, ha a versenyhatóságnál, illetve a távközlési hatóságnál alkalmazott eljárások is kompatibilisek egymással. Ezért ezen távközlési hatósági eljárásokat is meg kell alkotni.

A törvénynek meg kell határoznia a távközlési hatóság és a versenyhatóság közötti munkamegosztás és együttműködés módját is, és tekintettel kell lenni arra is, hogy a Versenyhivatal számára feladatokat csak törvény határozhat meg. (A magyar versenytörvényben találunk mintát ágazati specifikumok említésére a pénzügyi tekintetben.)

Az új hírközlési törvénynek ki kell mondania, hogy az általános versenyszabályok távközlési érvényesüléséért – a munkamegosztás mellett és keretei között – a

két hatóság közös felelőssége áll fenn az alkalmazás konzisztenciájáért. Ez bizonyos egyetértési, fellebbezési, véleményezési és illetékességéből történő áthelyezési jogból állhat.

A norma-értékű előzetes állásfoglalások kialakításakor problémát jelenthet a Gazdasági Versenyhivatal és a Hírközlési Főfelügyelet együttműködésében az, ha a két intézmény a közigazgatás rendje értelmében nem állana partneri viszonyban: partneri viszonyuk nyilvánvalóan akkor lehetséges, ha a hírközlési hatóság megfelelően magas szintű közigazgatási jogállást kap. Amennyiben ez nem lenne lehetséges, úgy a KHVM-re is delegálható ez a feladat (az EU szabályokkal ez sem állana ellentétben).

A KHVM-hez delegálás mellett szóló érv, hogy ezek az állásfoglalások az esetek többségében az egyedi és az általános engedélyek feltételeiben öltenek testet, ami a KHVM feladatkörében maradna, és így nem állna elő az az eset, hogy a HIF ír elő a KHVM részére feltételeket. A hírközlési hatóság mellett szóló érv a magas színvonalú szakmai-műszaki tartalom, valamint a piaci szereplők bevonására alapuló együttműködés. A két megoldás kombinációja is elképzelhető, amikor a hatóság készíti elő a javaslatot, és a KHVM bocsátja ki azt jogszabályban.

Végül nem szabad elfelejteni azt, hogy a versenyszabályok ágazat-specifikus alkalmazásai csak addig és olyan kiterjedtségben létezhetnek, ameddig és amilyen mértékben a távközlési piacon a verseny még nem kielégítő. A lépésről lépésre közelítendő jövő az, hogy a távközlési piacon is az általános versenyszabályozás a főszerep.

APPLICATION OF COMPETITION RULES IN TELECOMMUNICATIONS

K. HELLER

WESTEL 900 RT
TELECOM POLICY AND REGULATORY DIRECTORATE

Due to limited development of telecommunications marketplace general competition rules and institutions have not proved sufficient in any of the countries to pro-actively improve competition in telecommunication services. Telecommunications regulation of European Union empowers National Regulatory Agencies a wide range of activities in order to promote effective application of competition rules in telecommunications as well as transparent regulatory environment and secure investment policy. Due to similarities of tasks of competition and telecommunications authorities new Communication Act has to address their tasks, division of their competencies as well as compatible administrative procedures of telecommunications authority. The article presents competition-oriented tasks of telecommunications authority in detail.

Heller Krisztina közgazda (Marx Károly Közgazdaságtudományi Egyetem, 1992) és kandidátus. Pályája jelentős részét a Magyar Postán, majd a MATÁV-nál töltötte különböző kutató és elemző munkakörökben. Jelentős részt vállalt a távközlési reformok előkészítésében. 1990-ben a közlekedési, hírközlési és vízügyi miniszter személyes tanácsadójaként az új távközlési törvény szakmai előkészítő munkálatait irányította. Jelenleg a Westel 900 Rt. Távközléspolitikai és szabályozás igazgatóságán dolgozik igazgatói beosztásban.

EXPLORATORES, A NÉGYLÁBÚ LÉPEGETŐ ROBOT

MOLNÁR ANDRÁS, VÁMOSSY ZOLTÁN

KANDÓ KÁLMÁN MŰSZAKI FŐISKOLA, MATEMATIKAI ÉS SZÁMÍTÁSTECHNIKAI INTÉZET

1431 BUDAPEST 8. PF. 112.

Tel: +36 1 3684 610, Fax: +36 1 3689 632

<MOLNAR, VAMOSSY>@NOVSERVOBUDA.KANDO.HU

A Kandó Kálmán Műszaki Főiskola Matematikai és Számítástechnikai Intézetében egy demonstrációs és kutatási célú lépegető robot kifejlesztését kezdtük meg 1997-ben. A munkában Brüner Róbert, Varga Lajos hallgatók, valamint Molnár András és Vámosy Zoltán oktatók vettek részt.

Elsőként irodalomkutatást végeztünk járórobotok témakörében különös tekintettel a mechanikai és elektronikai megoldásokra, valamint a pályatervező és képfeldolgozó eljárásokra. Ezek alapján a négy lábú szerkezet alumíniumból készült, a három szabadságfokú lábakat szervók vezérik. A 12 szervónak köszönhetően a robot a legkülönbözőbb összetett mozgást is megvalósítja. A robot lokális vezérlésére helyi hálózatba kötött öt 89C51 mikrokontrollert és négy XC3020 logikai kapuáramkört használunk.

A stabil járást többféle statikus és dinamikus járási stratégiával valósítjuk meg. A robot teljesen autonóm módon és a soros porton keresztül PC-hez kötve is működhet. Az elkészített programmal tesztelhető a robot viselkedése. A PC-s programrendszer tartalmaz neurális elvű, szabály alapú, hullám-továbbterjesztéses és gráfbejáráson alapú pályatervező modult, valamint ezek a robothoz igazodó módosított változatait. A rendszer lehetőséget biztosít a különböző útkereső algoritmusok szimulációs tesztelésére és hatékonyságuk egymással történő összehasonlítására. A program tartalmaz szabályrendszer, illetve tanítóminta szerkesztő modult, valamint a neurális hálózat esetén lehetőséget biztosít a kiválasztott, vagy újonnan létrehozott tanítómintára betanítására. A szabálytábla, illetve a neurális hálózat számára elkészítendő reprezentatív minták automatikus összeállítására kifejlesztésre került egy ún. tapasztalatszerzésen alapuló algoritmus. Ez az algoritmus egy előre beállított méretű szabálytáblázatot generál, melyben a program futása során a leggyakrabban sikerrel alkalmazott szabályok szerepelnek. Ehhez a felhasználó a szimulátor felületen különböző akadályokat helyezhet el, melyet a robotnak ki kell kerülnie a cél elérésének érdekében. Minél több akadályt kerül ki a robot, annál több „tapasztalatot” szerez az egyes szituációk megoldására.

A robot a közvetlen környezetéről infra-reflexiók és CCD kamerás szenzorokkal, illetve PAL (Panoramic Annual Lens) optikával felszerelt kameramodullal gyűjt információt. Az érzékelők feladata az akadályok pontos helyének meghatározása. A kamerával történő akadálydetektálást a robot elé vetített lézercsík segítségével valósítjuk meg úgy, hogy a csík töréspontjaiból következtetünk az akadály alakjára.

A CCD kamera által szolgáltatott képet egy DSP (Digital Signal Processor) kártya segítségével dolgozzuk fel. A DSP kártya önállóan, párhuzamosan a PC-vel, illetve a PC-vel kooperatív módban képes működni. Ez utóbbi üzemmódban nagymértékű sebességnövekedést érhetünk el, mivel az időigényes algoritmusokat a PC helyett a DSP hajtja végre és a PC-nek csak az algoritmus eredményét küldi át. Ez a megoldás támogatja mind az autonóm üzemmódot, mind pedig a PC-s szemléltető üzemmódot.

1. BEVEZETÉS

Projektünk célja egy autonóm négy lábú lépegető robot megtervezése és kifejlesztése volt. A fejlesztés szempontjait az alábbiakban foglalhatjuk össze:

- az eszköz alkalmas legyen a gépi járás tanulmányozására,
- a robot az új elgondolások kipróbálása érdekében programozható legyen,
- a programozást el lehessen végezni egy PC-n futó célprogram segítségével,
- a szerkezet működése a felhasználó által választhatóan autonóm vagy PC-ről vezérelt legyen,
- az alkalmazott elektronikai megoldások lehetőséget adjanak a digitálisteknika bemutatására,
- megfelelő képzettségű hallgatók számára mind az elektronika, mind pedig a mechanika utánépíthető legyen,
- a felhasznált alkatrészek hazai relációban beszerezhetőek legyenek,
- a moduláris felépítés lehetőséget biztosítson mind a hardver, mind a szoftver további fejlesztéséhez.

2. ELŐZETES KUTATÁSOK

A fenti célokat szem előtt tartva irodalom- és Internet-kutatást végeztünk a lépegető robotok tárgykörében. Az első irodalmi adatok megismerése után újabb szempontok

fogalmazódtak meg a kutatás tekintetében. A fejlesztés irányát befolyásoló további tényezők így az alábbiak lettek:

- a lépegető robotok alkalmazási lehetőségei,
- a lábak kialakítása, száma és elrendezése,
- a mozgathoz használt erőforrások,
- az alkalmazott szenzorok fajtája, mennyisége és elrendezése.



Az EXPLORATORES első verziója – 1998 eleje

Az általunk összegyűjtött robotok főbb adatait az 1. táblázatban foglaltuk össze.

1. táblázat. Lépegető robotok áttekintése

Robot neve	Lábak száma	Erőforrás	Alkalmazási terület
3D One Leg Hopper	1	pneumatikus, hidraulikus	Laboratórium
Ariel	6	elektromos	Aknakutatás vízi
Atlas	6	elektromos	Laboratórium
Boadicea	6	pneumatikus	Laboratórium
Bob	4	elektromos	Laboratórium
Boris	6	izomhuzal	Laboratórium
Centipede	3	szervomotor	Laboratórium
Dante II	8	elektromos	Vulkánkutató
Genghis	6	szervomotor	Laboratórium
Grendel	6	elektromos	Bojgófelderítés
Hermes	6	elektromos	Térfelderítés
Hex-Walker	6	szervomotor	Laboratórium
Hexapod Walker	6	szervomotor	Hobby
Holon	4	-	Elméleti
Kaa	0	elektromos	Laboratórium
Katharina	6	elektromos	Térfelderítés
Planar Biped	2	hidraulikus, pneumatikus	Laboratórium
Quadruped	4	hidraulikus, pneumatikus	Laboratórium
Robin	2	pneumatikus	Objektumvizsgálat
Rodney 3	6	szervomotor	Laboratórium
Shadow Walker	2	pneumatikus	Laboratórium
Spring Flamingo	2	elektromos, pneumatikus	Laboratórium
Thing	4	szervomotor	Laboratórium
Uniroo	1	pneumatikus	Laboratórium
Zephirus	6	pneumatikus	Laboratórium
Mars	6	szervomotor	Hobby
Sparticus	6	szervomotor	Hobby
Prometheus	6	szervomotor	Hobby
Cockroach	6	elektromos	Laboratórium
Spider	6	szervomotor	Laboratórium
Insectobot	6	szervomotor	Laboratórium

2.1. A fejlesztés irányát befolyásoló tényezők részletes elemzése

A lépegető robotok alkalmazási lehetőségei

A kutatási eredmények alapján megállapítható, hogy a jelenleg gyártott robotokat alapvetően laboratóriumi rendeltetésre, vagy ember számára veszélyes területeken történő munkavégzés céljára készítik. E két eltérő alkalmazási területtől függően a robot megtervezése során más-más szempontok dominálnak. A laboratóriumi célokra épített robotok üzembiztonsága nem elsődleges szempont. Ugyanakkor igen fontos, hogy ezek a robotok moduláris felépítésűek legyenek, lehessen bővíteni mind szenzorokkal, mind pedig adatfeldolgozó egységekkel. Sokszor nem szükségszerű az autonóm üzemmód sem (*Flamingo*). A munkavégzési feladatokra szánt robotok esetén igen lényeges, hogy a robot ellenálló legyen a környezeti hatásokkal szemben (*Ariel*), megbízható működésű legyen és üzemzavar esetén képes legyen önállóan újra indulni. Ezeket a robotokat kevés bővítési lehetőséggel rendelkező, ún. feladatorientált áramkörökből és egyedileg tervezett gépelemekből építik fel. A munkavégzésre szánt robotok tervezési és megépítési költsége igen magas (*Dante II*).

A lábak kialakítása, száma és elrendezése

A lépegető robotoknál igen elterjedt az ún. pantográf mechanizmus alkalmazása. Ennek előnye, hogy a láb egyenes vonal mentén, általában függőleges irányban mozoghat. Mivel ilyenkor a talp nem körív mentén mozdul el, a mélyedésekből a láb könnyen kiemelhető. A megoldás hátránya, hogy sok csuklópontot tartalmaz, a láb sérülékeny és a csuklópontok kopására érzékenyek. Általában kísérleti négy (*Think*), vagy több lábú robotok esetében találkozhatunk pantográf mechanizmussal.

A nagyobb teljesítményű és könnyű motorok megjelenésének köszönhetően egyre gyakrabban találkozhatunk a lábakon járó állatok mintájára épített robotokkal [28]. A mozgatót vagy a csukló tengelyére épített motor, vagy az ínszalagokhoz hasonló elrendezésű tolórudakhoz kapcsolt motor biztosítja. Ennek a megvalósításnak az előnye, hogy kevés csuklót kell építeni, így azok lehetnek robosztus kivitelűek is a nagyobb terhelhetőség érdekében. Hátránya a megoldásnak, hogy a talp ív mentén mozog. Ez különösen a terepen történő járás megtervezésénél jelenthet problémát. Ennek ellenére a munkavégzésre szánt robotok jelentős részénél ezzel a megoldással találkozhatunk (*Robin*). A feldolgozott adatok alapján a lábak számának csökkenése figyelhető meg. Az új kutatások mindinkább a kétlábú robotok irányába tevődnek át. A munkavégzési feladatokra szánt robotok még mindig a biztonságos járást megvalósító hatlábú kivitelben készülnek (*Ariel*). Az ennél több láb alkalmazása nem váltotta be a hozzá fűzött reményeket, mert a sok gépelem miatt ezek a robotok drágábbak és sérülékenyebbek. A hatnál több láb ugyanakkor nem jelent statikailag nagyobb stabilitást sem (*Dante II*). A lábak elrendezései nagy mértékben függenek az alkalmazott lábak számától. Hatlábú robotok esetében igen gyakori a rovárszerű elrendezés (*Attila*), de találkozhatunk rákszerű megoldással is (*Ariel*). A néglábúaknál már gyakoriak a kutyák vagy lovak mintájára készült emlősszerű robotok [29], valamint a hullók felépítését és mozgását utánzó robotok [30]. Ezek robotok mind a mozgási tulajdonságaikban, mind pedig a járási sebesség tekintetében igen kedvezőek (*Quadruped*).

A mozgáshoz használt erőforrások

A robottervezés egyik legnagyobb problémáját, a megfelelő motor vagy egyéb meghajtóeszköz kiválasztása jelenti. Általában a nagy teljesítményű motorok nehezek, míg a könnyű motorok nem rendelkeznek megfelelő teljesítménnyel. A robotépítés ezen területén figyelhető meg a legdinamikusabb változás. Általában a robot mozgását valamilyen villamosmotorral valósítják meg. Ennek előnye, hogy könnyű a motor szabályozását megvalósítani és a rendszer jól illeszthető a digitális központi egységhez. További előnye a villamosmotoroknak, hogy igen gyorsak, teljesítményük széles skálán mozog és nem igényelnek különösebb gondozást. Hátrányuk a viszonylagosan nagy tömegük. Néhány robot esetében pneumatikus meghajtást alkalmaznak (*Boadicea*). A gázdugattyús teleszkópok alkalmazása, a viszonylagosan kedvező súly/teljesítmény arány ellenére, igen sok járulékos problémát vet fel. Ezeknek a rendszereknek jelentős a gázfelhasználása, amit vagy kompresszorral, vagy gáztartállyal lehet biztosítani. Mindkét esetben tekintélyes plusz tömeggel kell számolni. To-

vábbi problémát jelent a szabályozáshoz szükséges, elektromosan vezérelhető szelepek alkalmazása és a nagy gázfogyasztás folytán fellépő fagyásveszély (*Zephyrus*). Ma még ritkának mondható az emlékező fémekkel megvalósított mozgató. Ennek a megoldásnak nagy előnye a rendkívül kedvező súly/teljesítmény arány és az elektromos rendszerekhez történő viszonylag egyszerű illeszthetőség. Ugyanakkor nagy hátránya az emlékezőfémeknek a lassú reakcióidejük és a nem túl nagy terhelhetőségük (*Boris*).

Az alkalmazott szenzorok fajtája, mennyisége és elrendezése

A robotra szerelt szenzorok funkcióikat tekintve, alapvetően két csoportra bonthatók. Az egyik csoportba a robot ízületeinek pozícióját érzékelő szenzorok (belső érzékelők), a másikba pedig a robot környezetét érzékelő szenzorok tartoznak. Az ízületi pozíció érzékelésére általában optikai szögadók vagy mágneses elven működő inkrementális jeladók alkalmaznak. Ezen jeladók adataiból mind az ízület pozíciója, mind pedig az elfordulás szögsebessége megállapítható. Mindkét típus nagy előnye a kontaktusmentes működés, aminek köszönhetően a jeladók nem kopnak és nem igényelnek gondozást sem. Hátránya ezeknek a jeladóknak, hogy bekapcsolás után az ízületeket inicializálni kell. Ritkábban alkalmaznak potenciométereket is. A potenciométerek egyik hátránya a csúszóérrintkező. Mivel az ellenállás réteg folyamatosan kopik, az egyes ízületi pozíciókhoz tartozó jel értéke is változik a használat során. A másik hátrányt a potenciométerek analóg kimenete jelenti. Ezt a jelet egy erre alkalmas digitalizáló áramkörrel lehet illeszteni a robot processzorához. Előnyként említhető meg az, hogy a potenciométeres jeladóval ellátott ízületeket nem kell inicializálni, mivel bekapcsolás után a potenciométer által szolgáltatott jel azonnal arányos a hozzá kapcsolt ízület pozíciójával.

A tervezők a robot környezetének érzékelésére, különböző típusú és kivitelű szenzorokat alkalmaznak. A leggyakoribb környezetérzékelés a közvetlen tapintásos érzékelés. Ezt leggyakrabban mikrokapcsolókkal valósítják meg. Általában a robot különböző pontjaira, több érzékelőt szerelnek fel. Így a robot mozgása során, ha akadálnak ütközik, az egyik mikrokapcsoló benyomódik. A fedélzeti számítógép így megállapítja, hogy a robot mely oldalán helyezkedik el az akadály. Ennek ismeretében megkísérelheti az akadály kikerülését. Mivel ez a megoldás igen olcsó és egyszerűen megvalósítható, kedvező a robot intelligens viselkedésének alapszintű kialakításához. Természetesen a későbbi cél az, hogy a robot még ütközés előtt ismerje fel az akadályokat és kerülje ki azokat. Erre a célra gyakran infra-reflexió szenzorokat alkalmaznak. Általában ezek a szenzorok nem mérnek távolságot, csak azt érzékelik, hogy egy előre beállított tartományon belül van-e akadály, vagy nincs. Az infra-reflexió szenzorok hátránya, hogy a robotot körülvevő teljes teret nem tudják feltérképezni, csak az adott irányban és tartományban detektálják tárgyak jelenlétét. Így előfordulhat, hogy a robot nekiütközik egy keskeny, kiugró tárgynak. Ezt a problémát az ún. térérzékelő szkennerekkel lehet megoldani. Ezek a szenzorok úgy működnek, hogy a látótartományt egy modulált lézernyaláb pásztázza végig és egy megfelelő fényérzékelős fázis-összehasonlító detektálja az akadályt és annak távol-

ságát. Mivel ez a módszer nagyon megbízható, gyakran alkalmazzák önjáró targoncákon. A térérzékelő szkennerek kísérleti robotokon való alkalmazása túl magas árak és nagy tömegük miatt nem terjedt el. Környezeti akadályok felismerésére alkalmazhatók az ultrahangos távolságmérők is. Hátrányuk, hogy a visszhang detektálása bonyolult akadályrendszer esetén igen körülményes a többszörös visszaverődések keletkezése miatt. További problémát jelent ha a jeladóból kiinduló hang hullámfrontjára nem merőlegesen helyezkedik el az akadály. Ebben az esetben a visszavert jel időben „szétnyúlik” és intenzitása erősen gyengül.

A CCD képérzékelők és a gyors processzorok megjelenése lehetővé tette, az olcsó és kis méretű kamerák roboton való alkalmazását. A kamerák előnye, hogy látómezőjükön belül minden akadályt érzékelnek. Hátrányuk az, hogy a képtérben található igen nagy mennyiségű adatból, nagy bonyolultságú és számításgényes algoritmusok alkalmazásával kell kiválasztani a hasznos információt: az akadályok pozícióját. Erre a feladatra igen gyors processzorokat kell használni, hogy az akadály felismerése a robot mozgását ne lassítsa le.

A kutatás összegzéseként megállapítható, hogy igen sok amerikai és nyugat-európai felsőfokú műszaki oktatási intézmény foglalkozik a gépi járás, illetve az önjáró, lépegető robotok kutatásával. Ennek oka az, hogy a technikai fejlettség elérte azt a szintet, amivel reális lehetőség nyílik az ilyen komplex rendszerek megépítésére.

Az ilyen robotok alkalmazási lehetőségeit áttekinthető megállapítható, hogy a gépi járás technikája még kutatási stádiumban van. Ezt alátámasztja az a tény, hogy a feldolgozott 31 robotból 24 kimondottan laboratóriumi körülmények között tud működni, és a projekt célja egyértelműen a gépi járás kutatására irányult.

A lábak számainak vizsgálata meglepő eredményt adott. A robotok közül 18 hatlábú volt. Ennek oka, hogy a hat láb esetén egyszerűen megvalósítható a statikus stabilitás [31]. A fennmaradó robotok között körülbelül azonos arányban találtunk egy, kettő, három, négy és nyolc lábút. Az újabb tudományos konferencia anyagokban azonban a kétlábú szerkezetek bemutatása kezd dominálni [19]. A kétlábú típusoknál komoly stabilitási problémák merülnek fel, amit statikus úton már nem lehet megoldani [32], [33]. Ezért a kétlábú robotok csak akkor kerülhetnek előtérbe amikor megjelentek a kellően kis méretű, ugyanakkor nagy teljesítményű és gyors számítógépek, valamint a különféle intelligens, a fizikai változásokra gyorsan reagáló szenzorok. Ezek segítségével realizálható a robot jó hatásfokú dinamikus stabilitása.

A néglábú robotok esetében a következő járastechnikákat ismertük meg [12]: galopp, amikor az első és a hátsó lábak együtt mozognak, járás mikor az azonos oldalon lévő lábak mozognak együtt és ügetés mikor az átlóban lévő lábak mozognak együtt.

Kutatási tapasztalataink alapján — figyelembe véve anyagi lehetőségeinket is — robotunk vázát alumínium idomokból készítettük el; a lábainak elrendezését és a test szerkezetét a néglábú emlőállatok mintájára terveztük meg; erőforrásként a modellezésben használt szervómotorokat alkalmaztunk; az elektronikát ATMEL típusú mikrokontrollerekkel és hozzájuk kapcsolt XILINX típusú programozható logikai kapuáramkörökkel építettük meg; a

környezet érzékelése érdekében a robotot 6 darab infra-szenzorral, (összesen 8 szenzor felszerelésére van lehetőség) egy hagyományos CCD kamerával, valamint egy PAL optikával felszerelt kamerával [41] láttuk el; a PC-vel való kapcsolattartást RS-232 soros vonalon keresztül valósítottuk meg.

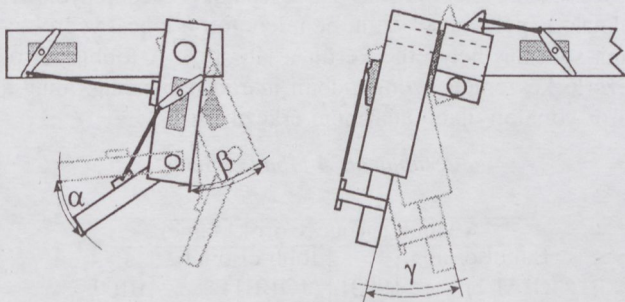
3. A ROBOT TERVE ÉS MEGVALÓSÍTÁSA

A robot alumínium vázát a súlycsökkentés érdekében furatokkal könnyítettük. A csuklópontok kizárólag forgómozgást végeznek, amihez az energiát különböző teljesítményű szervómotorok biztosítják. Minden láb mozgását egy-egy mikrovezérlő (ATMEL 89C51 vagy ATMEL 89C52) irányítja [7]. Ezen mikrovezérlők központi irányítását soros porton csatlakoztatott PC végzi. Ezáltal lehetőség nyílik a robot közvetlen irányítására a PC-ről kiadott parancsokon keresztül. A lábakon elhelyezett mikrovezérlők – a bennük futó program révén – hajtják végre a különböző irányba történő lépéseket. Az áramkör tervezése során a későbbi fejlesztések érdekében lehetőséget biztosítottunk különböző szenzorok felszerelésére is. Ezeknek a lábra felszerelt szenzoroknak a jeleit a mikrokontrollerben lévő program feldolgozhatja és a láb közvetlen környezetének megfelelően a központi processzortól kapott parancsot módosíthatja, illetve megghiúsíthatja. Ebben az esetben a lábprocesszor üzenetet küldhet a központi processzornak, így az módosított parancsot küldhet a megfelelő láb-nak.

3.1. A gép vázlatja és mechanikai felépítése

Minden láb mozgását három szervómotor biztosítja. A talppont így térbeli mozgást tud végezni. Ez lehetővé teszi, hogy a robot előre, hátra és oldalazva is tudjon haladni.

Az 1. ábra egy láb mozgási lehetőségeit szemlélteti. Jól látható, hogy a talp X, Y és Z irányú mozgásra képes. Az elmozdulások mértéke irányonként változó.

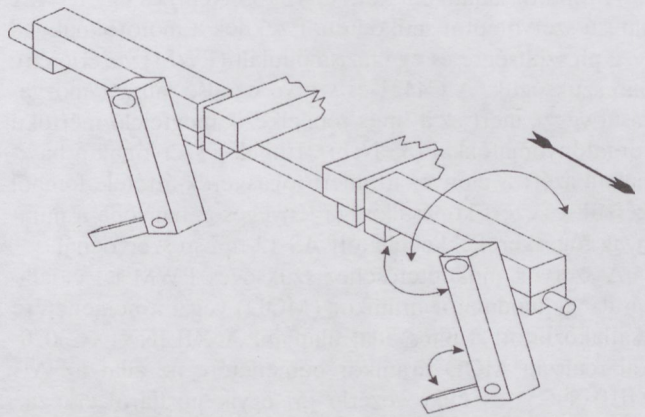


1. ábra. A láb mozgáslehetőségei

A fő haladási irányban a láb $\beta = 35^\circ$ -os szögben tud mozogni, ami kinyújtott alsólábszár esetén 13 cm elmozdulást jelet. Az alsó lábszárát a robot $\alpha = 15^\circ$ -os szögben képes mozgatni, ami a láb pozíciójától függően 3,2–4,7 cm eltávolodást eredményez a sík talajtól. A teljes láb oldalirányú mozgatása $\gamma = 23^\circ$ -os szögben lehetséges. Ez a talppont 8 cm-es elmozdulását jelenti. Mivel az egyes oldalra lépések alkalmával csak $\gamma/2$, azaz $11,5^\circ$ -kal mozdulnak el a lábak, a robot lépésként mindössze 4 cm-t tesz meg. A fenti paraméterek erősen függenek az alkalmazott szervók teljesítményétől. Erősebb szervók esetén lehetőség

van a szervót a lábbal összekötő tolórudak rögzítési pontjának megváltoztatására úgy, hogy a 90° -ban elforduló szervókarika hatására a láb elmozdulása nagyobb legyen. Ez úgy érhető el, hogy vagy a láb forgáspontjához közelebb, vagy a szervó forgástengelyétől távolabb rögzítjük a tolórudat. (Gyengébb szervók alkalmazása esetén a tolórudakat a szervó tengelyéhez közelebb, a láb forgáspontjától pedig távolabb kell rögzíteni.) Természetesen ez utóbbi, a lépéshosszak rövidülésével, illetve a járás sebességének csökkenésével jár.

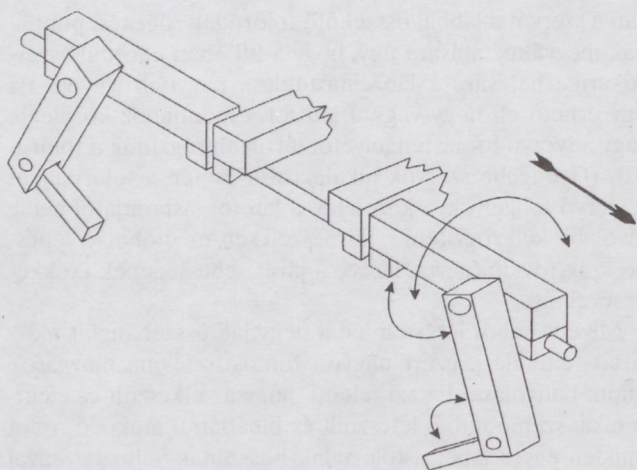
Mivel a robot járása mind a négy láb összehangolt mozgását feltételezi, ezért nagyon fontos az elemi mozgások finom hangolása. Ez azt jelenti, hogy az elkészült és elektronikai szempontból letesztelt és hibátlanul működő robot minden egyes lábát a tolórudak hosszának változtatásával be kell állítani. A hangolást addig végezzük, míg mind a négy láb az egyes irányokba egyforma mértékű mozgást nem végez. A nem pontosan beállított lábak a robot mechanikai sérüléséhez, illetve a szervók leégéséhez vezethetnek.



2. ábra. A robot fél oldalának vázlatrajza kísérleti lábelrendezéssel

A vázlatrajz (2. ábra) a robot fél oldalát ábrázolja. Az íves nyílak az egyes tagok mozgási lehetőségét, a vastag nyíl a haladás irányát szemlélteti. A járási kísérletek alkalmával bebizonyosodott, hogy a fenti lábelrendezés kevésbé alkalmas a statikusan stabil, önálló járás megvalósítására. Ez a tapasztalat egybeesik [29] eredményeivel is. Az elrendezés annyira aszimmetrikus, hogy a robot súlypontja igen nagy mértékben eltért a geometriai középponttól. Esetleges megoldást a ballansúly alkalmazása jelenthetett volna [34], amit viszont a szervómotorok nem voltak képesek megemelni a járás során. Ezért olyan lábelrendezést kerestünk, ami a szimmetria révén megfelel a céljainknak (3. ábra). Ez a megoldás a fenti problémákkal már nem rendelkezik. Hátránya, hogy mind a négy láb vezérlőprogramja némiképp eltérő, ezért a fejlesztés során alkalmazott módosításokat mind a négy programba be kell írni és külön-külön tárolni.

További súlycsökkentés érdekében az alumínium idomokat kisebb-nagyobb ovális nyílások bemarásával „kikönnyítettük”. Ennek eredményeképp a robot mechanikai szilárdságát, tulajdonságait megtartotta, ugyanakkor a váz tömege közel 0,5 kg-mal csökkent. Ez a tömegcsökkenés lehetőséget nyújtott arra, hogy a robotot további szenzorokkal láthassuk el (kamera, célkereső stb.).

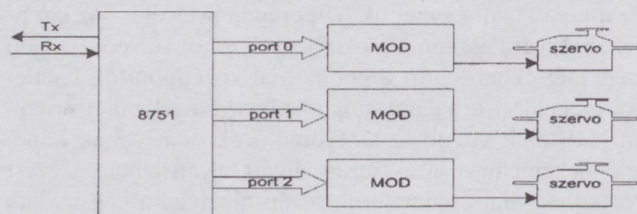


3. ábra. A robot fél oldalának vázlatrajza

3.2. Vezérlés

A robotot lábanként két AS-12 (35 Ncm) és egy C 4421 típusú szervómotor működteti. Ezeknek a motoroknak 4,8 V tápfeszültségre és egy fázismodulált (PWM) vezérlőjelre van szükségük. A C4421-es szervó az alsó lábszár mozgását végzi, mert ez a típus rendelkezik megfelelő mértékű forgatónyomatékkal (85 Ncm). Ennek a szervónak a használata azért is előnyös itt, mert fogaskerék-átvétele fémből készült és ezért kopásállósága lényegesen nagyobb a műanyag fogaskerekekkel ellátott AS-12 típusú szervóénál.

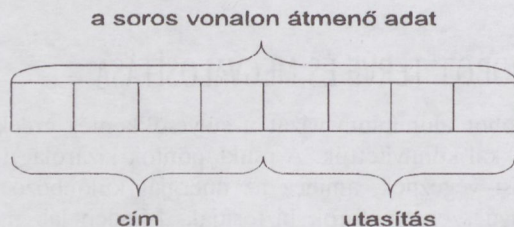
A szervók működtetéséhez szükséges PWM jel előállítását egy modulátor áramkör (MOD) végzi a bemenetére csatlakoztatott 8 bites adat alapján. A XILINX XC3020-kal realizált MOD áramkör bemenetére az adat az AT-MEL 89C51-es mikrovezérlő [5] egyik portjáról érkezik. Ez a mikrovezérlő négy független porttal rendelkezik, melyek különféle üzemmódban működhetnek. A 0., az 1. és a 2. port kimenetként funkcionál. Ezek szolgáltatják a lábankénti három szervó számára az adatokat. A portokon lévő adatok tárolására nem kell gondot fordítani, mert az adat mindaddig rendelkezésre áll, míg a mikrovezérlő egy új értéket ki nem ír oda (4. ábra).



4. ábra. Egy láb vezérlésének blokkvázlata

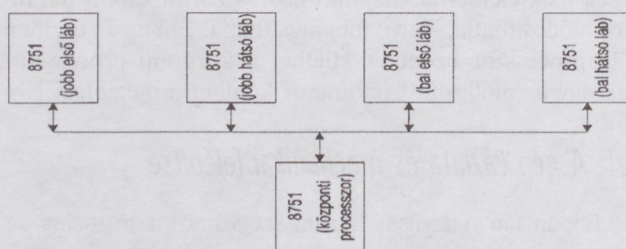
A 3. port nyolc adatvezetéke más-más feladat ellátására van programozva. Ebből a legfontosabbak az RX és a TX jelű vonalak. Ezek teszik lehetővé, hogy a mikrovezérlők kommunikálhassanak egymással, illetve a működésüket összehangoló központi mikrovezérlővel. Ez az RX-TX vezetékpár egy soros, 8 bites kommunikációs csatornát valósít meg. Az egyes mikrovezérlők megcímezésére 4 bit áll rendelkezésre. Elméletileg így 16 mikrovezérlő címezhető meg. Mi ebből öt lehetőséget használunk ki. A szabadon maradt címek további fejlesztést tesznek lehetővé. A mikrovezérlőknek átadandó utasításra szintén 4 bit áll

rendelkezésre, ami 16 különböző utasítást jelent (5. ábra). Mivel a további fejlesztések során ez a 16 utasítás kevésnek bizonyult, bevezettünk egy ún. prefix bájtot. Ez a bájtot jelzi a mikrovezérlők számára, hogy a következő bájtot egy kibővített utasítást tartalmaz.



5. ábra. Cím és utasítás formátum

A soros vonalon keresztül a mikrovezérlők egy időben kapják meg a küldő processzor 8 bites adatát (6. ábra). Ekkor minden mikrovezérlő megvizsgálja a 4 címbitet és megállapítja, hogy az utasítás neki szól-e. Az a mikrovezérlő, amelyik azonosította a neki szóló címet (2. táblázat) értelmezi a 4 biten kódolt utasítást, és annak megfelelően végrehajtja azt. Amennyiben a vett bájtot prefix volt, úgy a mikrovezérlők további adatot várnak a soros vonalon, amit a kibővített utasításkészletnek megfelelően értelmeznek.



6. ábra. Az öt processzoros rendszer blokkvázlata

A megcímezett mikrovezérlő az utasítás végrehajtása után a soros vonalon keresztül választ küld a központi processzor részére. A válasz a végrehajtás eredményét tartalmazza (például: sikerült, nem lehetett a lépést végrehajtani, speciális helyzetbe került a láb stb.). A többi mikrovezérlő készenléti üzemmódban marad mindaddig, amíg a soros vonalon újabb adat nem érkezik.

2. táblázat. A lábak címei

A lábak (processzorok) címei		
Bal első láb (BAL1)	0001	Jobb első láb (JOB1)
Bal hátsó láb (BAL2)	1000	Jobb hátsó láb (JOB2)
		0100
		0010

Az alkalmazott alapszintű parancsok megnevezései és kódjai:

INIT: 0000

Alapállapotba helyezi a megcímezett lábat. Bekapcsolás után ezt az utasítást minden lábnak ki kell küldeni miközben a robotot felemeljük, hogy a lábak szabadon mozgathassanak.

ELŐRE: 0001

A megcímezett lábat a robot felemeli, maximálisan előre mozgatja, majd visszateszi a talajra.

HÁTRA: 0010

A központi vezérlő ezt a parancsot egyidejűleg mind a

négy lábnak kiadja, aminek hatására a lábak hátra, a robot teste pedig előre mozdul.

ROGY: 0011

A robot a lépés végrehajtásának megkönnyítése érdekében a lépést végző lábbal átlósan elhelyezkedő lábat „megrogyasztja”.

EMEL: 0100

A robot a „megrogyasztott” lábat „kinyújtja”.

TOLAT: 0101

A központi vezérlő ezt a parancsot egyidejűleg mind a négy lábnak kiadja, aminek hatására a lábak előre, a robot teste pedig hátra mozdul.

VISSZA: 0110

A megcímzett lábat a robot felemeli, maximálisan hátra mozgatja, majd visszateszi a talajra.

BALKI: 0111

A robot a megcímzett lábat felemeli, balra maximálisan kimozdítja és leteszi.

BVISZ: 1000

Ezt a parancsot mind a négy láb egyidejűleg megkapva a robot a lábakat a közép pozíció eléréséig jobbra mozgatja, miközben a test balra mozdul.

JOBBKI: 1001

Megegyezik a BALKI paranccsal, annyi különbséggel, hogy a láb jobbra mozdul el.

JVISZ: 1010

Megegyezik a B VISZ paranccsal, annyi különbséggel, hogy a test jobbra mozdul el.

F_J_KI: 1011

A lábat egy körív mentén kimozdítja úgy, hogy a robot felkészülhessen a jobbra fordulásra.

F_J_VISZ: 1100

A robot mind a négy lába egyszerre hajtja végre ezt az utasítást, és ezáltal a test jobbra elfordul.

F_B_KI: 1101

A lábat egy körív mentén kimozdítja úgy, hogy a robot felkészülhessen a balra fordulásra.

F_B_VISZ: 1110

A robot mind a négy lába egyszerre hajtja végre ezt az utasítást, és ezáltal a test balra elfordul.

Magasabb szintű parancsok kódjai és rövid leírásuk (ezeket az utasításokat a robot a PC-től kapja):

INICIALIZÁLÁS: 11110000

A robot mind a négy lába alapállapotba kerül. A parancs kiadása előtt biztosítani kell mind a négy láb szabad elmozdulását, például a robot felemelésével.

ELŐREMENET: 11110001

A robot végrehajt egy előrelépési ciklust.

HÁTRAMENET: 11110010

A robot végrehajt egy hátralépési ciklust.

BALRALÉPÉS: 11110011

A robot végrehajt egy balralépési ciklust.

JOBBRALÉPÉS: 11110100

A robot végrehajt egy jobbralépési ciklust.

JOBBRAFORDULÁS: 11110101

A robot a súlypontja körül jobbra fordul.

BALRAFORDULÁS: 11110110

A robot a súlypontja körül balra fordul.

A kibővített utasítások kódjai és rövid leírásuk:

PREFIX: 11111111

Ez a kód jelzi a központi processzor számára, hogy kétbájos utasítás érkezik.

DINAMIKA1: 11111111 + 00000001

Ezt a parancsot mind a négy láb egyszerre kapja meg, de a végrehajtás lábanként eltérő. A BAL1. láb felemelkedik és félig előre lép. A mozgás végeztével a robot nem teszi le a talajra ezt a lábat. A JOBB2. lábat a robot megrogyasztja és közben teljesen hátra mozgatja. A BAL2. és a JOBB1. lábak hátra mozognak.

DINAMIKA2: 11111111 + 00000010

Ezt a parancsot a JOBB2. és a BAL1. láb egyidejűleg hajtja végre úgy, hogy a JOBB2. láb teljesen előre mozdul, miközben a BAL1. láb kiegyenesedik.

DINAMIKA3: 11111111 + 00000011

Ezt a parancsot mind a négy láb egyszerre kapja meg, de a végrehajtás lábanként eltérő. A JOBB1. láb felemelkedik és teljesen előre mozdul. Ezt a lábat a robot a mozgás végeztével nem egyenesíti ki. A BAL2. láb megrogy és közben teljesen hátra mozdul, a BAL1. és a JOBB2. lábak teljesen hátra mozdulnak.

DINAMIKA4: 11111111 + 00000100

Ezt a parancsot a JOBB1. és a BAL2. láb egyidejűleg hajtja végre úgy, hogy a BAL2. láb teljesen előre mozdul, miközben a JOBB1. láb kiegyenesedik.

Egyéb utasítások kódjai és rövid leírásuk:

AUTONOM_MÓD: 11111000

A robot önállóan keresi a célhoz vezető utat a központi mikrovezérlőjébe égetett szabálytábla (5.1. fejezet) alapján.

PC_MÓD: 11111001

A robot visszaáll alap üzemmódba és csak a PC parancsainak megfelelően viselkedik.

RENDBEN_PC: 01-XXXX

Ezt az üzenetet a robot küldi a PC-nek jelezve, hogy az „xxxx” parancs sikeresen végrehajtott. Az „xxxx” bitsorozat megegyezik a magas szintű parancsok utolsó négy bitjével. A „-” bitek nincsenek értelmezve.

HIBA_PC: 10-1111

Ezt az üzenetet a robot küldi a PC-nek jelezve, hogy az utolsó parancs végrehajtása meghiúsult.

SZENZOROK: 00XXXXXX

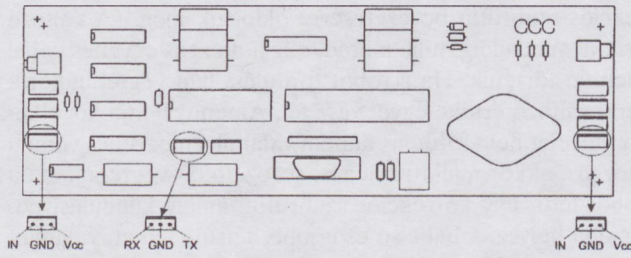
Ezt az üzenetet a robot küldi a PC-nek jelezve a roboton elhelyezett infra-reflexiós szenzorok állapotát.

A központi mikrovezérlő feladata, hogy illessze a PC felől érkező utasításokat a lábakon elhelyezett mikrovezérlők számára, illetve a lábaktól és a szenzoroktól érkező adatokat továbbítsa a PC-nek.

A központi panelen három (piros, sárga, zöld) monitor-funkciót ellátó LED található.

- A sárga LED színének változása (világít, nem világít) jelzi, hogy a modul az RS232-es vonalon adatot vett.
- A piros LED akkor gyullad ki, ha a vett adat nem értelmezhető, azaz olyan bitsorozat, amit a központi processzor nem ismer. Ha egy nem értelmezhető utasítást egy értelmezhető követ, akkor a piros LED elalszik. Hibátlan működés során ez a LED nem gyullad ki.

elő az RS232 szabványnak megfelelő (12 V-os jelszinteket). A központi panel (11. ábra) képes 8 PNP kimenetű infra-reflexió szenzor jeleinek fogadására is, amivel lehetővé válik a robot tájékozódása.



11. ábra. A központi panel

A 11. ábra a robot központi áramköri lapját szemlélteti. A panel jobb és bal oldalán található 4-4, egyenként 3 érintkező tűskével ellátott aljzatok segítségével lehet a robothoz szenzorokat csatlakoztatni. Mivel a bemenetek közvetlenül csatlakoznak a mikrokontroller P1-es portjának egyes kivezetéseihez, az alkalmazott szenzoroknak bináris kimenettel kell rendelkeznie. Tekintve arra, hogy szintillesztő áramkört nem alkalmazunk, a szenzorjelnek illeszkednie kell a szabványos TTL szinthez. Amennyiben az alkalmazott szenzor kimeneti értékei ennek nem felelnek meg, úgy vagy feszültségosztó ellenállásokat, vagy egyéb szintillesztő áramkört kell alkalmazni. A +5 V-nál magasabb, illetve a 0 V-nál alacsonyabb szintű jelek a mikrokontrollert tönkre teszik.

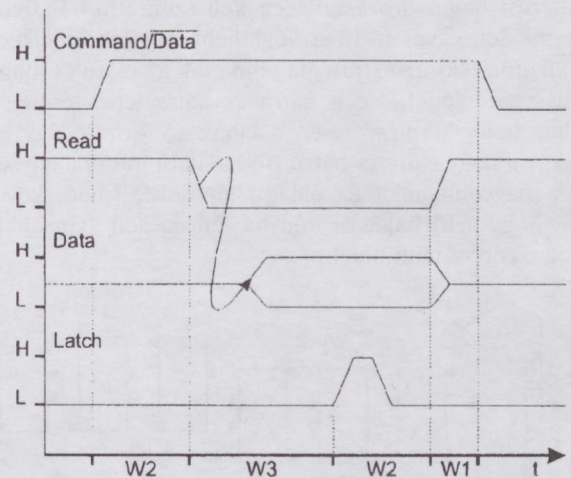
Az áramköri lap közepétől kissé balra található két darab három érintkezős csatlakozó a robot belső, soros kommunikációs vonalának kivezetése. A két csatlakozó egymással párhuzamosan van kötve. Ezen csatlakozók segítségével lehet a robot egyéb moduljait összekötni úgy, hogy a központi panel RX pontját a másik modul TX pontjához, a központi panel TX pontját pedig a másik panel RX pontjához kell kapcsolni.

Az áramkör +12 V $\pm 10\%$ nem stabilizált táplálást igényel. A szenzorok tápfeszültsége nem a központi panel 5 V-os stabilizátorára van kötve, hanem közvetlenül a panel +12 V-os tápfeszültségére. Ezt az alkalmazott szenzoroknál figyelembe kell venni.

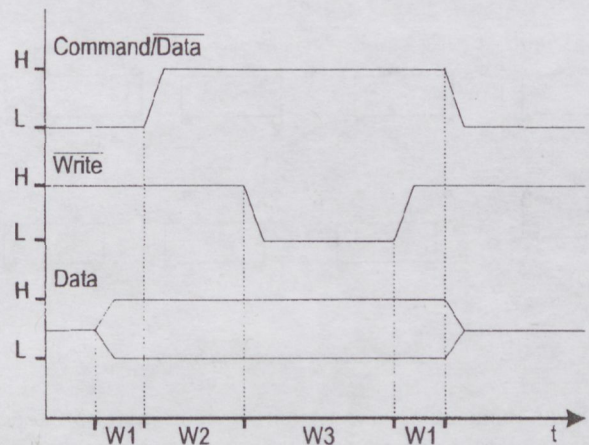
Az INTEL 8251 USART illesztése

Az INTEL cég a 8251 LSI integrált áramkört a MCS-80-as rendszerhez fejlesztette ki. Az ATMEL 89C51-es mikrokontrollerhez való csatlakozás azonban nehézségekbe ütközik. Mivel mind a két chip +5 V-os tápfeszültségről működik, a logikai szintek azonosak és az NMOS technológiával gyártott 8251 és a CMOS technológiájú 89C51 illesztőáramkör nélkül is összeköthető. A problémát azonban a két áramkör működési sebességének jelentős különbsége okozza. A mikrokontroller maximális órajele elérheti a 20 MHz-et, míg az USART az MC-80-as rendszer maximálisan 2 MHz-es órajeléhez illeszthető akadálymentesen. Ebből következik, hogy a mikrokontroller kimenetében a jelszintek lényegesen hamarabb jelennek meg mint az USART kimenetein. Ezt a problémát a mikrokontrollerben elhelyezett időzítőrutinok segítségével lehet megol-

dani. A 12. és 13. ábra az USART parancsregiszterének írását, illetve olvasását lehetővé tevő időzítési diagramot mutatja (12. és 13. ábra). A w_1 , w_2 és w_3 időtartamokat egy-egy késleltető szubrutin valósítja meg. Ebből következik, hogy ha megváltoztatjuk a mikrokontrollerek órajelét – például nagyobb frekvenciájú kristályt alkalmazva –, akkor ennek megfelelően a késleltető szubrutinok hosszát meg kell növelnünk. Az USART adatregiszterének írása és olvasása teljesen megegyezik a parancsregiszterével. Az eltérés csak annyi, hogy a *Command / Data* jel szintje a műveletek során végig alacsony marad.



12. ábra. A 8251-es parancsregiszterének olvasása



13. ábra. A 8251-es parancsregiszterének írása

3.4. A járási stratégiák

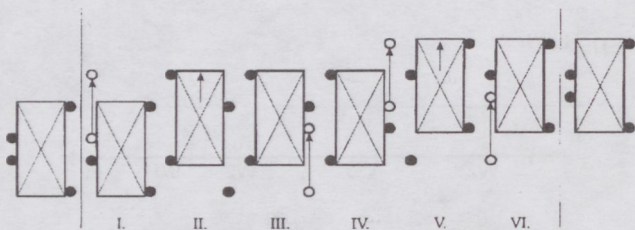
A robot biztonságos mozgatása érdekében többféle járási stratégiát dolgoztunk ki. Ezeknél a stratégiáknál alapvető követelmény volt, hogy megfelelő terepviszonyok között, robotunk a felborulás veszélye nélkül tudjon haladni.

3.4.1. A statikus járás

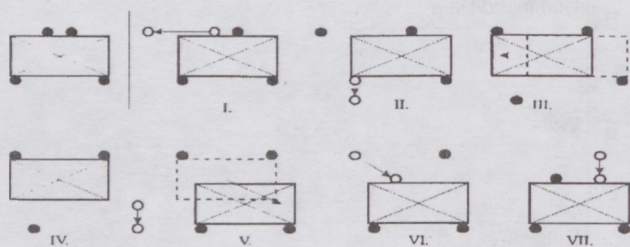
Statikus járás során a robot egy-egy lábát elemeli a talajról, így a test három ponton van alátámasztva. Ahhoz, hogy a robot ne boruljon fel, a test súlypontjának az alátámasztási pontok által bezárt háromszögön belül kell

lennie [35]. Az alábbi két ábra olyan járási stratégiát mutat be, melyek minden fázisban biztosítja a robot stabilitását (14. és 15. ábra). Ezek a stratégiák stabil járást biztosítanak minden egyes pillanatban, de ennek ára az, hogy maga a haladás rendkívül lassú, hiszen látható, hogy egyetlen előre lépés hat fázisból áll.

A fekete körök azokat a lábakat jelképezik, amelyek éppen érintkeznek a talajjal, tehát alátámasztási pontok, a fehér körök pedig a felemelt lábakat ábrázolják. A nyilak a lábak, illetve a test mozgását jelölik. A testen belül jelzett átlók metszéspontja a robot testének elméleti súlypontját jelöli. (Az elkészült robot súlypontja ettől eltérhet, de ezt az eltérést balanszírozással meg kell szüntetni.) Látható, hogy minden egyes fázisban legfeljebb egy láb emelkedik el a talajtól. Hasonló stratégia nem csak az előre és jobbra haladást szemlélteti, de a hátra és balra lépés esetén is alkalmazható. Természetesen a lábak szerkezete úgy lett kialakítva, hogy előre és hátra (fő haladási irány) a lépések hossza nagyobb, mint az oldalra lépéseké. Ebből következik, hogy a fő haladási irányba lényegesen gyorsabban mozog a robot, mint oldalra.



14. ábra. Előre lépés stratégiája

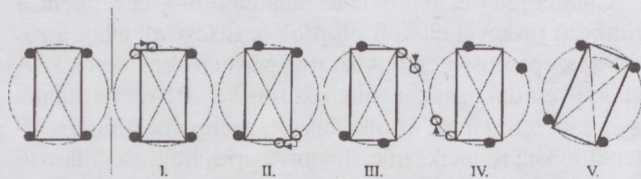


15. ábra. Jobbra lépés stratégiája

Ugyan elméletileg a fent leírt módon a robot képes lenne az előrehaladásra, de a kísérletek során azonban azt tapasztaltuk, hogy a váz nem teljesen merev. Amikor az egyik láb felemelkedik, az egész vázszerkezet a felemelt láb irányába meghajlik. A körülbelül 0,5–1 cm deformáció miatt a láb nem tud megfelelő mértékben eltávolodni a talajtól és a mozgás során sokszor elakad. Ezt a problémát a járási stratégia módosításával oldottuk meg. A módosítás lényege az, hogy mielőtt felemeljük az egyik lábat, a vele átlósan elhelyezkedő lábat „megrogyasztjuk” ezáltal kompenzáljuk a váz deformációját.

A robot fordulása (16. ábra) érdekében a lábakat egy képzeletbeli körív mentén kell elmozgatni. Az ábrán jól látható, hogy a fordulás kiindulási állapota nem egyezik meg az előre, illetve oldalra haladások kiindulási állapotával. Ez a kísérletek során akkor okozott problémát, amikor

fordulás után előre vagy oldalra lépés következett. Ekkor ugyanis a „rossz” helyeken álló bal első illetve jobb hátsó lábak nem a járási stratégiának megfelelően mozogtak és így a robot felbukását eredményezték. A problémát egy, a központi processzorban elhelyezett változó és egy korrekciós szubrutin bevezetésével oldottuk meg. (A változó értéke mindaddig nulla marad, míg a mozgás egyenes vonalmentén történik. Ha a robot fordulást hajt végre, akkor a fenti változó értéke egyet vesz fel. Amennyiben a következő művelet nem fordulás hanem valamilyen egyenes vonalú mozgás, akkor mielőtt a lépési sorozatokat végrehajtaná a robot lefut egy korrekciós szubrutin, amely kiindulási pozícióba helyezi a bal első és a jobb hátsó lábakat, valamint lenullázza a fordulást jelző változót.) Így ha egymás után többször hajt végre a robot fordulást, nem kell a fordulási stratégia szempontjából felesleges mozgásokat végrehajtani (az említett két láb alaphelyzetbe állítása).

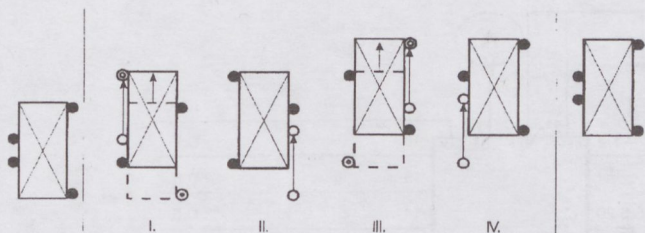


16. ábra. Jobbra fordulás stratégiája

3.4.2. A dinamikus járás

Mivel a robot lassú haladása a statikus járásból adódik, a motorok gyorsabb mozgatása nem jelent a járás szempontjából minőségbeli gyorsulást. Hatékony gyorsítási módszer a lépési fázisok csökkentése. Ez azonban a lábak mozgása során statikus szempontból, több ízben is instabil állapotot eredményez. Ezekben az állapotokban csak akkor juthat át a robot, ha feltételezzük, hogy a kérdéses pillanatokban a robot rendelkezik megfelelő irányú és mértékű sebességgel. A megfelelő nagyságú lendület biztosítja azt, hogy a kritikus instabil állapotok pillanatában a robot a haladási iránynak megfelelően tovább billenjen.

A 17. ábra az általunk kifejlesztett dinamikus járás fázisait szemlélteti. A korábbiakhoz hasonlóan a fekete karikák azokat a lábakat ábrázolják, amelyek a mozgás teljes ideje alatt a talajon vannak, míg a fehér karikák azokat a lábakat jelölik, amelyek a mozgás során nem érintkeznek a talajjal. A két fekete gyűrűvel rajzolt karikák olyan lábakat jelölnek, amelyek a mozgás kezdetekor még nem érintkeznek a talajjal, de a mozgás végeztével már igen. A fekete közepű fehér karikák azokat a lábakat jelölik, amelyek a mozgás kezdetekor érintkeznek a talajjal, de a mozgás végeztével már nem. Bizonyos pillanatokban a mozgás sebességét nem a lábak sebessége, hanem a test billenésének sebessége határozza meg. Ez a billenési sebesség a haladási sebességből, illetve a súlypont földközépponthez való közeledése következtében fellépő gyorsulásból tevődik össze. Ez azt jelenti, hogy a dinamikus járás alkalmazása során nagyobb haladási sebességre számíthatunk, mint amit a mozgási fázisok csökkenése alapján várnánk. A roboton végrehajtott kísérletek valóban alátámasztották a fenti gondolatmenetet.



17. ábra. A dinamikus előre lépés stratégiája

A sebességek könnyebb összehasonlíthatósága érdekében a 3. táblázatba foglaltuk az előrehaladás idejét, sebességét és a lépések hosszát.

3. táblázat, A dinamikus és statikus mozgás összehasonlítása

járás módja	lépés ideje	lépés hossza	lépés sebessége
statikus	19 sec	13 cm	410 mm/perc
terheletlenül			
statikus járás	19 sec	14 cm	442 mm/perc
dinamikus járás	5 sec	15 cm	1800 mm/perc

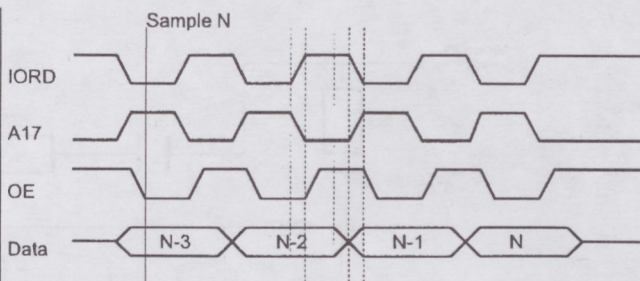
A nagyobb sebesség következtében megnő a lábakra ható erő is és így a motorok által leadott teljesítmény és áramfelvétel. A robot teljes áramfelvételének mérése során azt tapasztaltuk, hogy az áramigény időnként eléri a 3 A-t, míg a statikus járás során 2 A-nál többet sosem mértünk. Ez akkumulátoros táplálás esetén nem okoz nehézséget, mert a NiCd akkumulátorok impulzusszerűen lényegesen nagyobb áram leadására is képesek. Labortápegység használata esetén azonban ügyelni kell arra, hogy a kiválasztott tápegység képes legyen a megfelelő mennyiségű áram leadására.

3.5. Képdigitalizálás DSP-vel

A robot környezetéről egy CCD kameramodul szolgáltat képet. Ez a modul szabványos, kompozit videokimenettel rendelkezik. A DSP-nek megfelelően gyorsnak kell lennie ahhoz, hogy a képet valós idő alatt rögzíteni tudja. Mi a HYPERSTONE cég által gyártott EX-32 típusú DSP-re épülő, fejlesztőpaneljét választottuk erre a célra. Ez a panel elegendő méretű memóriával rendelkezik a digitalizált kép tárolásához és a processzora, a RISC utasításkészletének köszönhetően megfelelő sebességet biztosít. Mivel a panel nem tartalmaz AD átalakítót, ezt a modult nekünk kellett csatlakoztatni a DSP-hez.

A videojel digitalizálását a Bt 218 jelű flash AD konverterrel valósítottuk meg. Ez az IC 8 biten, 20 millió konverziót képes elvégezni másodpercenként. További előnye, hogy működtetéséhez elegendő +5 V. Hátránya, hogy a konverziós órajelhez képest 3 ciklussal késve jelenik meg az adat a kimenetén. Ezt a pipeline-hatást a DSP programozása során figyelembe kell venni.

A digitalizáló IC órajelét közvetlenül a DSP IORD jele szolgáltatja. Ennek a jelnek minden ütemére megtörténik egy-egy mintavételezés és digitalizálás. Az adat kiolvasása az IC-ből az OE jel alacsony szintjénél lehetséges. Ez a jel a DSP IORD jel negáltja és az A17 címvezeték ÉS kapcsolatából keletkezik (18. ábra).



18. ábra. Az IORD, az A17 és az OE jelek fázisviszonyai

A Bt 218-as IC tartalmaz egy belső referenciaforrást, aminek értéke 1,2 V. Ezt a feszültséget egy potenciométeren keresztül az IC feszültségosztó ellenállásorának pozitív (REF+) kivezetéséhez vezettük. Ugyanennek az ellenállásorának a negatív kivezetését leföldeltük. Így a videojel maximális amplitúdója 1,2 V lehet. A potenciométerrel a digitalizált kép világosságát lehet beállítani. A beállítást célszerű egy teljesen fekete képpel kezdeni (például az optikára fel kell helyezni a porvédő sapkát). Az így digitalizált kép minden pixelének értéke 0 kell, legyen. Ezt követően egy fényesen fehér képet kell bedigitalizálni. Ebben az esetben a keletkezett kép minden pixelének értéke 255 kell, hogy legyen.

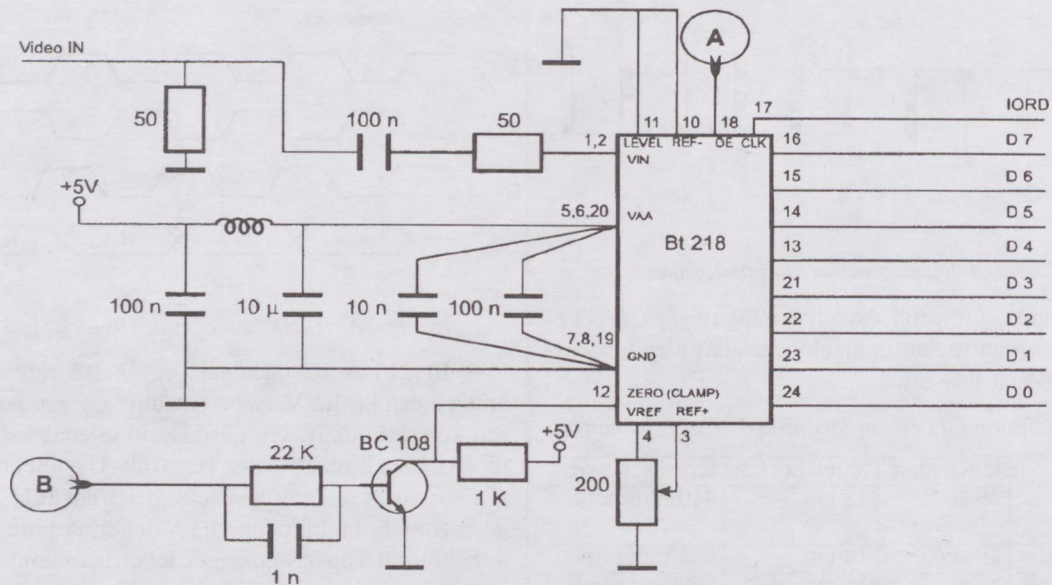
A Bt 218 IC rendelkezik egy jelszintrögzítő (clamp) áramkörrel is. Ennek feladata, hogy a videojelet állandó szinten tartsa. Mivel mi nem alkalmazunk vágó áramkört a szinkronjelek eltávolítására, a videojel fekete szintjét rögzítettük 0 V-nak. Ehhez a clamp bemenetére kötöttük a BURST impulzus negált jelét. Mivel a kamera fekete-fehér képet ad, a videojel nem tartalmaz BURST jelet. A BURST ideje alatt a videojel fekete szintnek megfelelő értékű. Az IC LE VEL bemenetét földre kötve elértük azt, hogy minden BURST impulzusnál (minden képsor elején) a digitalizáló IC rögzíti a 0 V-os szintet és a konverzió során csak az ennél magasabb szintű jelek jelennek meg a képen.

Mivel az összetett videojel a képi információn kívül számos szinkronjelet és segédinformációt tartalmaz, közvetlenül nem alkalmas a kép digitalizálására. Ahhoz, hogy a digitalizálást a kép elején kezdhessük és a sorokat helyesen tárolhassuk, le kell választanunk a szinkronjeleket.

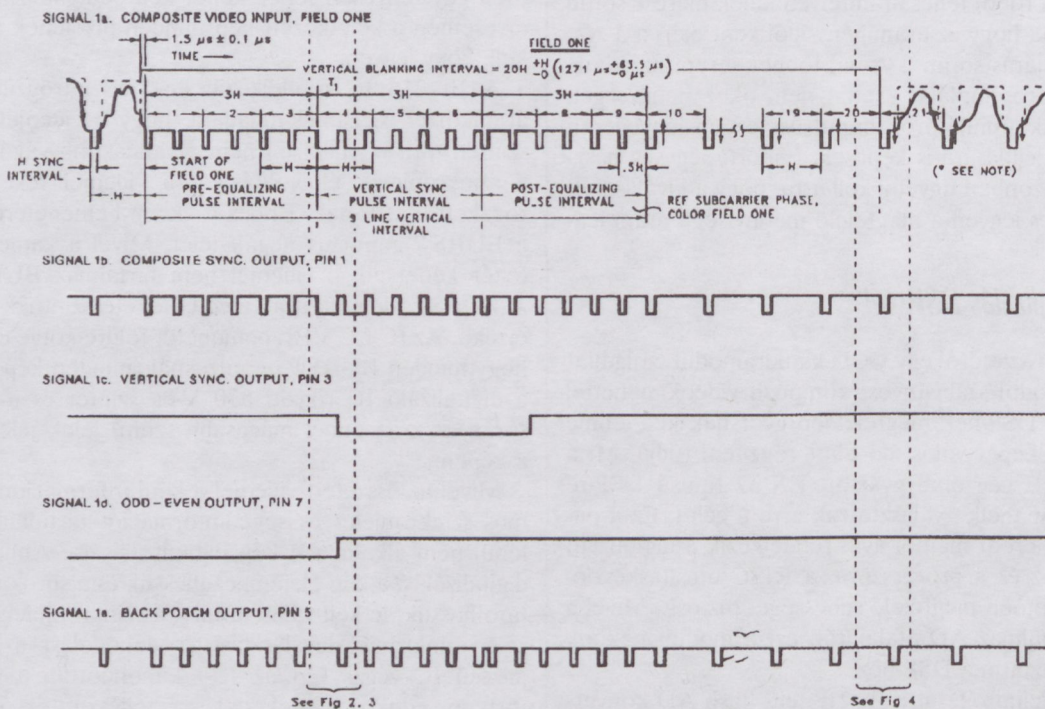
A szinkronjel leválasztást és dekódolást az EL 1881 jelzésű IC végzi. Ezt az IC-t kimondottan a videojelből történő szinkronjel-dekódolásra fejlesztették ki. Az IC a bemenetére kapcsolt kompozit videojelből előállítja a kompozit szinkronjelet, a burst jelet, a képszinkronjelet és a páros/páratlan kép jelet (20. ábra).

A DSP először a képszinkron jel felfutó élét detektálja. Ez után 26 BURST impulzust vár, majd elkezd a kép digitalizálását.

Tekintettel arra, hogy a képfeldolgozó eljárásunk 256 * 256 pixeles képet használ, a digitalizálást 256 pixel után megszüntetjük és várunk a következő BURST impulzusra. A BURST impulzus detektálása után egy késleltetést indítunk, mert a képinformáció az impulzus után körülbelül 2 µs-mal kezdődik. Ezt követően újra kezdjük a digitalizálást. A fenti eljárást 256-szor megismételve befejezzük a kép rögzítését.



19. ábra. A digitalizáló egység elvi rajza



20. ábra. A videojel és a szinkronjelek diagrammjai

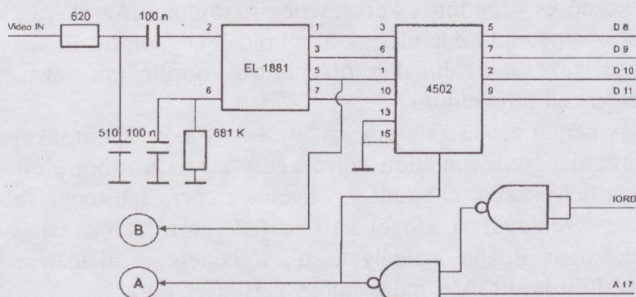
Az általunk alkalmazott kameramodul 625 pixel * 380 sor felbontású és az objektív látószöge 92°. Mivel mi ennél a felbontásnál kisebb képpel dolgozunk, lehetőségünk van a digitalizált kép pozíciójának megváltoztatására a valós képen belül. Ez úgy is tekinthető, mintha a digitalizált kép egy virtuális ablakban lenne. Amennyiben ezt az ablakot a valós képen lefele akarjuk eltolni, úgy a képszinkronjel detektálása után több mint 26 sort várunk. A maximális érték 26+124 sor lehet. A virtuális ablak jobbra mozgatása a BURST jelek detektálását követő késleltetések idejének növelésével lehetséges. Ezt az értéket úgy kell meghatározni, hogy a kamera látómezőjének középvonalába helyezett

tárgy a digitalizált kép közepére kerüljön. Az impulzusok detektálása közvetlen perifériaolvasással történik.

A digitalizálás során szükség van egy lézermódul ki és bekapcsolására. Ennek érdekében egy 8 bites regisztert alkalmaztunk, melynek 1. bitje, egy tranzisztor segítségével kapcsolja be, illetve ki a lézermódult (21. ábra).

Annak érdekében, hogy a DSP modult csatlakoztatni lehessen a már meglévő rendszerünkhöz úgy, hogy azon semmiféle változtatást ne kelljen eszközölni, terveztünk egy soros kommunikációs csatornát. Ily módon a robot a DSP-t „PC-nek” látja. A PC-s vezérlőprogram RS232-es vonalon keresztül küldhet a DSP-nek utasításokat. A DSP

a kapott kódból megállapítja, hogy a parancs a robotnak vagy neki szól. Amennyiben a parancs a robotnak szól, a DSP kiküldi az utasítást az általunk kiépített soros vonalra, ami által az utasítás eljut a robothoz.



21. ábra. A szinkronjel leválasztó fokozat elvi rajza

4. KÉPFELDOLGOZÁSI ALAPOK

Kutatásaink során számos olyan robotot találtunk, amelyek kamerával voltak felszerelve. Kétféle alkalmazási mód létezik. Az egyik, amikor a vett képet, információfeldolgozás nélkül egy központba továbbítják. Ezt főleg kutatórobotoknál alkalmazzák, az eszköz környezetéről gyűjtenek ezzel adatokat. A másik mód, amikor a kamera képét különböző eljárásokkal feldolgozzák és ez alapján határozzák meg a robot mozgását. Itt a kamera egyfajta szenzorként funkcionál, mivel a környező akadályokról ad információt a robot számára. E két alkalmazási terület lényegesen eltérő követelményeket támaszt a képfeldolgozó eljárásokkal szemben. Az egyszerű képtovábbítás esetén nincs szükség szűrésre mert azt egy nagyteljesítményű, laboratóriumban elhelyezett számítógép végzi el. Ugyanakkor nagy hangsúlyt kell fektetni a kép tömörítésére a minél gyorsabb adattovábbítás érdekében. Mikor a kamerát szenzorként alkalmazzák, akkor a fedélzeti számítógép feladata a megfelelő információk kinyerése.

Rendszerünkben a képfeldolgozó eljárások célja, hogy a robot egy lépésének befejezése után a CCD kameráról vett képből információt nyerjünk a környezeti akadályokra vonatkozóan. Így a robot előtt elhelyezkedő akadályok ismeretében meg tudjuk határozni a következő lépést. Az akadály-felismerés egy kivetített lézercsík segítségével történik hasonlóan az irodalomban találtakhoz [21, 16]. Ezt a csíkot kell a felvett képeken detektálni és a töréspontjait meghatározni. Erre a célra alkalmazhatunk hagyományos CCD kamerát, vagy a NASA-díjas Greguss Pál találmányával, a PAL optikával [41], [42] ellátott kameramodult. Ez utóbbi esetben a robot teljes környezetét (körkörös) egy időpillanatban tudjuk rögzíteni és így egyszerre tudjuk azt feldolgozni. Nagy előnye ennek a módszernek, hogy igen gyors akadályfelismerést tudunk elérni, mivel nincs szükség a hagyományos kamera forgatására és több kép rögzítésére, illetve feldolgozására.

A feldolgozás során elsőként a digitalizált képet szűrjük, hogy a konvertálás során fellépő zajokat megszüntessük. Ezután egy binarizáló eljárást használva megkapjuk a lézercsík képét. Mivel általában a szűrőalgoritmusok időigényes eljárások nagyon sok múlik a legmegfelelőbb módszer kiválasztásán. A képjavító eljárásokat a javítandó hibák szerint csoportosíthatjuk. Így megkülönböztethetünk

kontrasztfokozó, zajelnyomó és élkimelő eljárásokat [15]. Mivel a digitalizált képen keletkezett zajokat szeretnénk eltüntetni, elsődleges célunk optimalizált zajelnyomó eljárás megtalálása. Tekintve, hogy a lehető legrövidebb időn belül szeretnénk egy viszonylag jó minőségű, számunkra már használható képhez jutni, csakis a gyors szűrések jöhetnek számításba. A fentiek értelmében megvizsgáltunk néhány szűrőalgoritmust, mind sebesség, mind pedig szűrés minőség szempontjából.

A képjavítás történhet a frekvenciatartományban vagy a képtartományban. A frekvenciatartományban végzett képjavítás azon alapul, hogy a függvények bizonyos feltételek esetén egyértelműen és invertálható módon sorbafejtethetők. A bonyolult és analitikusan nem leírható függvények egyszerű és jól kezelhető bázisfüggvényekkel adhatók meg, és ezen bázisfüggvények súlyát a leírandó függvényre jellemző együtthatók határozzák meg. [15] Egy képfüggvény nagy homogén foltjainak és a lassú átmenetek leírásában alacsony frekvenciájú, a gyakori és gyors változások leírásában a nagy frekvenciájú hullámfüggvények kapnak domináló szerepet. A nem kívánt frekvenciát tartalmazó bázisfüggvények együtthatóit nullának választjuk, így módosíthatjuk a kép tartalmát az igényeink szerint. A frekvenciatartományban történő képjavítás akkor a leghatékonyabb, amikor jól meghatározható frekvenciájú periodikus zajt szeretnénk kiszűrni. Általános célú zajszűrésnél a magasabb frekvenciájú bázisfüggvényeket kell figyelmen kívül hagynunk. Ennél a zajelnyomásnál a hirtelen átmeneteket szüntetjük meg, de ezzel az éleket is elmoszuk, így az egész kép homályosabbá válik. A képfeldolgozásban a bázisfüggvények diszkrét közelítését alkalmazzák.

A képtartományban történő képjavítás a világszűrőkkel végzett számításokra épül. A leggyakrabban alkalmazott módszer a konvolúciós szűrő, melynél minden pixelértéket helyettesítünk a képpont környezetétől és a szűrőtől függő értékkel [17]. A konvolúciós szűrő egy olyan mátrix, amely meghatározza a képpont általunk figyelembe vett környezetét. Ezzel az eljárással minden pixelnek egy új értéket határozunk meg, az eredeti értéke és a környezeti pixelértékek átlagolásával. A környezet egy $n * n$ -es méretű mátrix, ahol n páratlan szám. Ez egy igen gyors eljárás a zajok eltüntetésére, és igen könnyen tovább gyorsítható egy kis optimalizálással. Minél nagyobb n értéket használunk, annál jobb lesz a zajcsökkentés mértéke, viszont az algoritmus futási ideje is ezzel arányosan növekszik. Az eljárás hátránya, hogy nagymértékben rontja a kép élességét, mivel „elkeni” a hirtelen fényesség változásokat. Ezt némileg ki tudjuk küszöbölni annak a módosításnak a bevezetésével, hogy csak akkor változtatjuk meg a pixel értékét, ha az egy bizonyos küszöbön felül tér el az eredetitől. Hátránya még ennek a szűrésnek, hogy a zajhatás is csak szétszóródik az $n * n$ -es környezetre és nem szűnik meg.

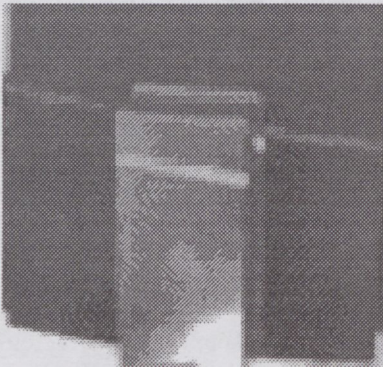
A rank szűrők [15], [17] használatával szinte teljesen el tudjuk tüntetni a zajokat. Itt minden pixel meghatározott környezetének segítségével számoljuk ki az új eredményt. Az aktuális pixel valamint a környezetének intenzitás értékeit növekvő sorba rendezzük. Ebből a sorból kiválasztva a k -dik elemet, megkapjuk a képpont új értékét.

A medián szűrés a rank szűrők azon változata, amikor a sorbarendezett értékek közül a középső elemet választjuk ki. A szűrés utáni kép minősége igen jó, de a sorbarende-

zés miatt jóval több időt vesz igénybe, mint egy egyszerű lineáris szűrés. A konvolúciós típusú zajszűrés és a rank típusú zajszűrés közti lényeges különbség az, hogy míg a lineáris szűrés szétkeni a zajt, addig a medián szűrés gyakorlatilag kiszűri azt és változatlanul hagyja a homogén képrészleteket.

4.1. Az alkalmazott képfeldolgozó eljárások

A fejlesztés során több algoritmust kipróbálva, azt tapasztaltuk, hogy a lézercsík detektálásának sikeressége erősen függött a környezet fényességétől. Ezt a problémát két kép vételével küszöböltük ki oly módon, hogy ugyanarról a területről először lézercsík nélkül, majd közvetlen utána lézercsíkkal vettünk képet (1. kép). E két képet egymásból kivonva kizártuk a környezeti fényesség hatását. A módszer nagy hátránya, hogy rendkívül érzékeny a változásokra. Ennek megfelelően a képek rögzítése csak a robot álló helyzetében történhet és törekedni kell arra, hogy a két képvétel között minimális idő teljen el. A kivont kép szűrését egy optimalizált 3×3 -as lineáris szűrőalgoritmussal valósítottuk meg. Azért választottuk a 3×3 -as ablakot, mert itt tapasztaltuk a legkedvezőbb képminőség/futási idő arányt.



1. kép. Az akadályra vetített lézercsík képe

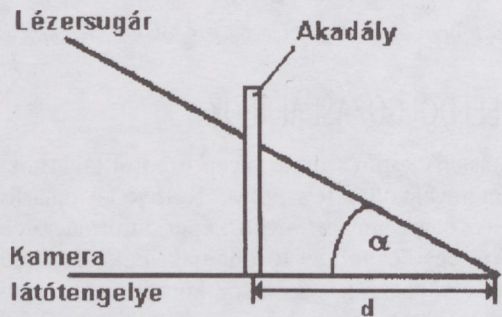
Mivel célunk egy fényes csík detektálása volt, ezért a szűrés után binarizálást alkalmaztunk, mely segítségével eltüntettük a képből a számunkra értéktelen információkat. A binarizálás küszöbértékét kísérleti úton (25) állapítottuk meg. Így elértük, hogy a binarizálás eredményeként a kép csak a fénycsíkot tartalmazta.

4.2. A lézercsíkos akadálydetektálás elve

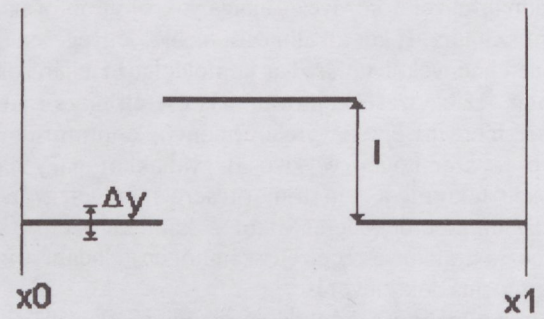
Az akadályok detektálása érdekében a kapott fénycsíkon kell a töréspontokat megtalálni. Első lépésben meghatározzuk a csík két végpontját oly módon, hogy vertikális irányban a háttértől különböző színű pixeleket keressünk, a kép két szélétől folyamatosan a kép közepe felé haladva. Mivel egy-egy diszkrét eltérő színű pixel detektálása a kép zajossága miatt hibás eredményhez vezethet, a lézercsík kezdő- és végpontját akkor kapjuk meg amikor először találunk a háttértől eltérő színű pixelcsoportot. A végpontok koordinátáit eltároljuk és a töréspontokat a két x koordináta által bezárt területen belül keressük tovább. A jobb oldali végpontból kiindulva, oszloponként haladva balra, minden oszlopban megvizsgáljuk a lézercsík jelenlétét. Ezt a vizsgálatot egy Δy tartományon belül végezzük el. Töréspontnak az tekinthető, amikor ezen a tartomá-

nyon belül nincsenek a háttértől eltérő színű képpontok. A Δy tartománnyal a lézercsík digitalizálásból eredő hibáit tudjuk kiküszöbölni. Az így kapott töréspont koordinátáját eltároljuk. Ezt követően újra megkeressük a lézercsíkot, a kezdő és végpontok kereséséhez hasonlóan. Az eljárást addig ismétljük míg elérjük a bal oldali végpontot. Ekkor rendelkezésünkre állnak a töréspontok koordinátái, melyeket ki kell értékelnünk.

A képen a lézercsík egy $x_0, y_0 - x_1, y_1$ végpontokkal leírható egyenes mentén helyezkedik el, ha a robot előtt nem helyezkedik el akadály. Mivel a kamera látótengelye és a lézercsík α szöget zár be (22. ábra), ezért ha a lézercsík útjába akadály kerül, a képen az akadályra kivetített lézercsík is magasabbra kerül (23. ábra).



22. ábra. A lézer és a kamera látótengelyének vázlata



23. ábra. A kamera képen látható lézercsík

A magasságváltozás a robot és az akadály közötti távolság valamint a bezárt α szög függvénye. Mivel az α szög állandó az „ l ” magasság egyenesen arányos a „ d ” távolsággal. Így ebből az adatból az észlelt akadály távolsága is kiszámítható.

Tekintve, hogy mind a kamera mind a lézermódul a robotra lett felszerelve, a kivetített lézercsík elhelyezkedése a robot előtt megváltozhat. Annak érdekében, hogy pontos méréseket végezhesünk a két képet a robot álló helyzetében kell venni.

4.3. A PAL kép transzformációjának elve

Annak érdekében, hogy a PAL optikával alkotott képet a szemlélő könnyebben értelmezhesse, a gyűrű alakú képet ki kell egyenesíteni. A kiegyenesítés feltétele, hogy a gyűrű középpontját minél pontosabban határozzuk meg. Ennek eredményeként a hagyományos kamera képéhez hasonló képet kapunk.

A digitalizált gyűrű formájú képen először egy lineáris szűrést hajtottunk végre, hogy az utána következő bina-

rizálás után ne maradjanak zavaró pixelek. Ezeket a pixeleket a középpontkeresés miatt szükségszerű eltüntetni, mivel jelenlétük komoly pontatlanságokat okozott.

A binarizálás után először egy képzeletbeli vonalat húztunk vízszintesen a legfelső sortól kezdve lefele. Mikor a vonal áthaladt N darab olyan pixelen, amelynek a palettaszáma nem egyezik meg a vonal első pixelének palettaszámával, eltávolítottuk a pixel koordinátáit. Az eljárás végén az első és az utolsó pixel koordinátáit átlagolva kaptunk egy pixelt, melynek x_1 koordinátája megközelítően a gyűrű origójának x koordinátája.



2. kép. PAL optikával [41], [42] rögzített kép

Az eljárást megismételtük alulról felfelé is. Az így kapott x_2 koordinátát átlagoltuk x_1 koordinátával. Az eredmény jól megközelítette az origó x koordinátáját. Ezt a lépéssort végrehajtva függőleges vonalakkal, először balról jobbra haladva, majd jobbról balra haladva, megkaptuk az y koordinátát is.

A feltételezett középpontot megtalálva, a gyűrű sugarát kell kiszámolni. Ha a feltételezett origó $O(x, y)$ és a négy megtalált pont sorban $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$, $P_4(x_4, y_4)$, akkor a sugár:

$$r = (abs(x - x_1) + abs(x - x_2) + abs(y - y_3) + abs(y - y_4)) / 4.$$

Itt P_1 és P_2 a vízszintes közelítő vonalak által adott, míg P_3 és P_4 a függőleges közelítő vonalak által számolt pontok.

Ezek után a gyűrű alakú kép átranzformálása hagyományos formátumúvá úgy lehetséges, hogy ismételten képzeletbeli vonalakat használtunk az $O(x, y)$ pont és a $P((\sin(i) * r) + x, (\cos(i) * r) + y)$ pontok közt. A vonal mentén végighaladva eltávolításra kerültek a pixelek palettaértékei. A P pont változtatásával leírva egy egész kört és a vonal által szolgáltatott pixeleket „függőlegesen” egymás mellé helyezve, megkaptuk az egyenes képet.

Az így kapott kép azonban még nem torzításmentes. Függőleges vagy vízszintes irányban a sugár nagysága pixelekben azonos (pl. ha $r = 100$, az ezekben az irányokban 100 pixelt is jelent), de minél inkább eltérve ettől az iránytól a sugár egyre kevesebb pixelt tartalmaz. A legkevesebb pixelt a 45 fokos irányok esetén kaptuk (kb. a vízszintes

sorok 60 %-át). Ezért a kevesebb pixelt tartalmazó oszlopokat fel kellett nagyítani úgy, hogy pixelszámuk megegyezzen a vízszintes sorok pixeleinek számával.

A nagyítás úgy végeztük, hogy kiszámoltuk a hiányzó pixelek számát. Ezt a számot elosztva a teljes oszlop pixelszámával megkaptuk, hogy az adott oszlopon belül hányadik pixeleket kell megdupláznunk. Ezt végrehajtva megfelelő minőségű képhez jutottunk.

5. PÁLYATERVEZŐ MÓDSZEREK

Az alábbiakban az általunk megvalósított pályatervezési és pályabejárési algoritmusokat mutatjuk be. A szabálytábla és a neurális hálózat alapú módszerek ismeretlen környezetre vonatkozó egy lépéses technikák. Ezen algoritmusok hatékonyságának növeléséhez, illetve a neurális hálózat eredményes betanításához nyújt segítséget az általunk kifejlesztett tapasztalatgyűjtő (öntanuló) módszer. Ismert környezet esetén alkalmazható a gráfbejárás alapú (GVD jellemzőket felhasználó) módszer és a hullámtovábbterjesztéses algoritmus. Ez utóbbit azonban úgy módosítottuk a szenzorjelekből felépített térkép ciklikus módosításával, hogy az ismeretlen, vagy részben ismert környezet esetén is működjön. Az algoritmusok hatékonyságát az általunk kifejlesztett grafikus pályatesztelő szimulátorban vizsgáltuk az eredmények összehasonlításával. A szabályalapú és a neurális elvű módszert valós környezetben is teszteltük.

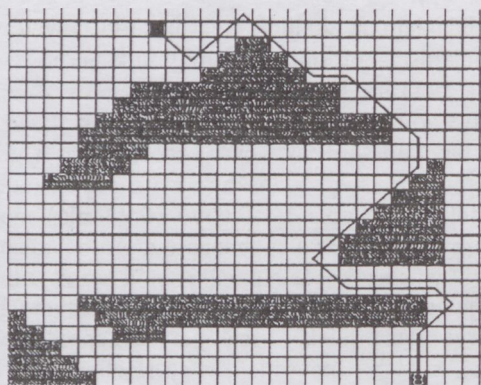
5.1. Szabálytábla szerinti pályabejárás

A szabálytábla szerinti pályabejárás alapja, hogy előredefiniált szabályok biztosítják a vezérlőjeleket a cél megközelítéséhez. A táblázat minden lehetséges szenzorjel és célirány kombinációhoz egy mozgásutasítást rendel. A futtatás során a program lekérdezi az aktuális szenzoradatokat és a cél irányát, majd ezen adatokat felhasználva a táblázatból kikeresi az adott szituációhoz tartozó cselekvést. Az eljárás előnye az, hogy minden esetben jól meghatározott mozgást kapunk eredményként. Hátrányként említhetjük meg, hogy az akadályok bizonyos elhelyezkedése esetén a robot végtelen ciklusba kerülhet (például zsákutca), vagy nem képes célba érni. Az eredményességet jelentősen javítják azok a később bemutatandó módosítások, amikor az utolsó lépést virtuális akadályként tároljuk, illetve a korábbi mozgások eredményességét, mint tapasztalatot tároljuk.

A szabálytábla egy rekordja tehát három jól elkülönülő részre osztható: a szenzorjelek a robotra rögzített érzékelők által szolgáltatott jelekből állnak össze úgy, hogy azokat egy bájt tartalmazza. Mivel a robot hat infra-szenzorral érzékeli a külvilágot, az adatok az alsó hat biten helyezkednek el. Ez a hat bit kerül be a szabálytáblázat első hat oszlopába. Például ha a bájt tartalma 00111111, ekkor minden szenzor akadályt jelez. A cél robothoz képesti iránya nyolc lehetséges értéket vehet fel, így egy bájtban tároljuk azt. Ez nyolc lehetséges irányt (elől, hátul, jobb, bal és az átlós irányok) jelent, amit a szabályrendszer következő nyolc oszlopa tartalmaz. A robot által végrehajtandó mozgásutasítás az adott szituációhoz kapcsolt cselekvés. Hat lehetséges állapota van, amit a szabálytáblázat utolsó hat oszlopa tartalmaz. (Előre, hátra, vagy valamelyik oldalra lépés, illetve fordulások.)

A szabálytáblázat összeállítása különböző prioritásokat tartalmazhat. Így olyan szabályrendszert is készítettünk, ami a lehető legkevesebb elfordulást tartalmazza, hiszen e mozgások ideje a leghosszabb. Egy másik táblázat a lehető legrövidebb út bejárását célozta meg.

A felhasználó saját maga is szerkesztheti, illetve módosíthatja az általa elképzelt szabályrendszert. A teljes körű teszteléshez a grafikus pályaszimulátor biztosít lehetőséget (24. ábra), de egy kapcsoló állításával (AKTÍV/PASSZÍV gomb) a program közvetlen robotvezérlésre is alkalmas.



24. ábra A szabálytábla alapú módszer által generált pálya

Az utolsó lépés eltárolása

A program az utolsó lépést eltárolhatja. Ennek a segítségével olyan feladatokat is képes megoldani a robot, amelyek csak a szabálytábla használatával nem lehetségesek. Ilyen például az az eset, amikor a kiindulási pont és a célt összekötő egyenesre merőlegesen akadályt állítunk. Ekkor a robot végtelen ciklusba kerülhet, mert megpróbálja kikerülni az akadályt, esetünkben például egy jobbra lépéssel, de így a cél relatív helyzete megváltozik a robothoz képest, minek következtében a robot visszalép balra, az előző pozíciójába. Ha eltároljuk a robot utolsó lépését, oly módon, hogy annak előző helyére egy virtuális akadályt helyezünk, akkor meggátoljuk abban, hogy oda vissza tudjon lépni. (Mivel az akadályt nem helyezhetjük el a munkakörnyezetbe, az csak virtuális lehet, így a szenzorjelek mesterséges megváltoztatásával képezzük ezt a feltételt.) Ez az egyszerű módosítás sok esetben sikeres akadályelkerülést eredményez.

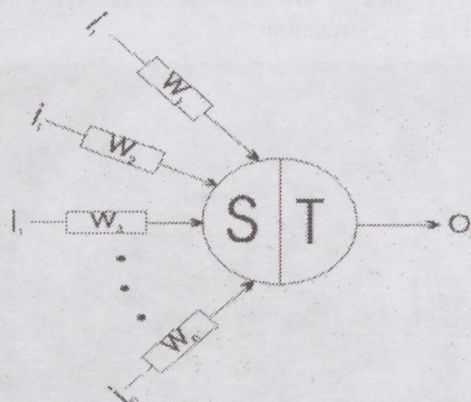
5.2. Neurális hálózaton [2], [3] alapuló pályatervezés

A szabálytáblázat esetében minden lehetséges szituációhoz hozzárendeltünk egy meghatározott cselekvést. Figyelembe véve a hat lehetséges szenzorjelet, valamint a nyolc célirányt, 512 szituációt és a hozzájuk rögzített cselekvést kell leírunk, eltárolnunk. A táblázat megfelelő összeállítása rendkívül lassú, nehézkes folyamat. A futtatás során pedig a táblázatban történő keresés lassú a nagy méretek miatt.

A neurális hálózat segítségével e problémára találunk megoldást oly módon, hogy kihasználjuk a hálózat interpolációs képességét. Ez azt jelenti, hogy nem szükséges az összes esetet leíró táblázatot létrehozni, hanem elegendő a munkateret reprezentáló mintákat összegyűjteni. Ezekre a mintákra betanítva a hálózatot, az képes lesz olyan szituációkra is eredményt (cselekvést) adni, amelyek nem

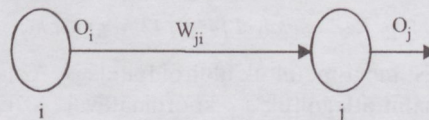
szerepeltek a tanítómintában.

A neurális hálózat egy többprocesszoros, párhuzamos adatfeldolgozású számítógép [3]. Az egyes processzorokat nevezzük neuronoknak (vagy sejtprocesszoroknak), melyek feladata a teljes rendszer feldolgozó képességéhez viszonyítva egy nagyon egyszerű átviteli függvény megvalósítása. Ezek a neuronok különféle módon kapcsolódhatnak egymáshoz, és ezek a kapcsolatok határozzák meg a topológiát.



25. ábra. Egy processzorelem vázlatos képe. I_n az n -dik bemeneti processzorra bejövő jel, W_n az n -dik súlytényező, O_n az n -dik processzor kimeneti jele, az S a bejövő jelek összegzése, T pedig a processzor átviteli függvénye.

A hálózatnak három fő jellemzője van [2]: a processzorok, a topológia és a tanítási módszer.



26. ábra. Processzorok kapcsolata. W_{ji} súlytényező i -dik és j -dik processzor összekötésének súlytényezője.

A processzorok a bemenetükre érkező jeleket súlyozotlan összegzik és egy átviteli függvény segítségével képezik kimenetüket. Átviteli függvényeként leggyakrabban ugrás, korlátozott lineáris, vagy szigmoid függvényt alkalmaznak.

A topológia a processzorelemek egymással alkotott kapcsolatának rendszerét jelenti, ami a legegyszerűbb esetben lehet ún. előrecsatolt, vagy visszacsatolt, illetve a kető kombinációja. Az előrecsatolt hálózat jellemzője, hogy benne a jelek a bemenet felől mindig a kimenet felé haladnak, míg a visszacsatolt hálózatok esetében több-kevesebb esetben a jel haladhat visszafelé is.

- A tanítási módszer főbb típusai a felügyeletes tanítás és a felügyelet nélküli tanítás. A tanítási szabályként leggyakrabban az ún. Hebb szabályt (1), vagy a Delta szabályt (2) alkalmazzák.
- Hebb szabály:

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \alpha O_i O_j \quad (1)$$

ahol

α tanulási tényező és értéke 0 és 1 közé esik, $W_{ji}(t+1)$ a módosított súlytényező, $W_{ji}(t)$ a régi súlytényező, O_i és O_j az i -ik és j -dik processzorok kimeneti értékei.

- Delta szabály:

$$W_{ji}(t+1) = W_{ji}(t) + \alpha O_i (T_j O_j) \quad (2)$$

ahol T_j a j -ik kimeneti processzor kimenetén várt érték. Minden egyes processzor bemenetéhez hozzá van rendelve tehát egy súlytényező, melynek finom módosításával tudjuk tanítani a neurális hálózatot. A tanítási folyamat első lépése, hogy a k -dik tanítóminta bemeneti vektora alapján kiszámolunk minden kimeneti processzorhoz egy aktivációt.

$$O_i = I_i \quad (3)$$

A következő lépés az aktivációs függvény alapján a processzorok kimenet értékek meghatározása:

$$O_k = f(S_k) \quad f(S_k) = \frac{1}{1 + e^{-s}} \quad (4)$$

ahol $f(S_k)$ a k -dik processzor átviteli függvénye.

A kimeneti hibát (5) szerint kalkuláljuk:

$$E = \frac{1}{2} \sum_k (T_k - O_k)^2 \quad (5)$$

ahol k a kimeneti processzorok száma.

A hibát a teljes a tanítómintára is kiszámolhatjuk:

$$E = \frac{1}{2} \sum_p \sum_k (T_k - O_k)^2 \quad (6)$$

ahol p az összes tanítóminta száma, k a kimeneti processzorok száma, O_k a kimeneti processzor kimeneti értéke, T_k a kimeneti processzor elvárt kimeneti értéke, E a hálózat hibája.

Azt, hogy milyen szerepet játszik a W_{kj} súly a hibában úgy tudjuk megkapni, hogy vesszük a hiba függvényt és parciálisan deriváljuk W_{kj} szerint. Ezt lánc-szabály segítségével tudjuk kiszámítani:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{kj}} = \frac{\partial E}{\partial O_k} * \frac{\partial O_k}{\partial S_k} * \frac{\partial S_k}{\partial W_{kj}} \quad (7)$$

Az általunk alkalmazott átviteli függvény esetében az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\frac{\partial E}{\partial W_{kj}} = -(T_k - O_k) * \frac{1}{1 + e^{-sk}} * \frac{e^{-sk}}{1 + e^{-sk}} * O_j \quad (8)$$

Ha

$$f'(S_k) = \frac{1}{(1 + e^{-sk})} * \frac{e^{-sk}}{1 + e^{-sk}} \quad (9)$$

akkor a súlytényező változtatása a kimeneti rétegben:

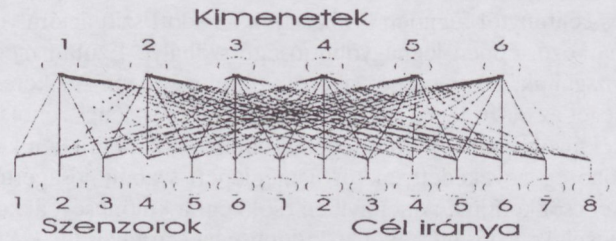
$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \alpha O_j f(S_k)(1 - f(S_k))(T_k - O_k) \quad (10)$$

Amennyiben a hálózat által szolgáltatott kimeneti értékek és az elvárt kimeneti értékek eltéréséből származó hiba meghaladja az általunk előre beállított hiba mértékét, végrehajtjuk a súlytényező módosítását a fent leírt módon. Ezután újra számítjuk a kimeneteket és ismételtel megnézzük a hibát. Ha most a hiba mértéke kisebb mint az általunk beállított, akkor a tanítást befejezettnek tekintjük. Ellenkező esetben a tanítási ciklust mindaddig folytatjuk amíg a hiba el nem éri, vagy kisebb nem lesz a beállított értéknél.

Ahhoz, hogy jobb eredményt érjünk el tanításban „lágyítást” alkalmazunk. Lágyítás akkor történik, ha meghatározott ideig nem változik a hiba értéke. Ilyenkor a súlymátrixot megszorozzuk egy véletlen számokkal feltöltött

mátrix-szal, ahol a mátrix értékei nulla és egy közöttiek és a lágyítás mértékétől függően változnak.

Az általunk megvalósított neurális hálózat egy tanítható rétegű, 14 bemenettel (hat szenzorjel és nyolc lehetséges célirány) és 6 kimenettel (a lehetséges mozgásutasítások) rendelkezik (27. ábra). Mivel az egységugrás átviteli függvény nem a kívánt tanítási eredményt hozta, ezért végül szigmoid függvényt alkalmaztunk. Tanítási módszerként a felügyeletes tanítást választottuk.



27. ábra. Neurális hálózatunk topológiája

Mivel esetünkben a hat kimeneti érték közül csak egy kimenet lehet aktív, de egynek mindenképp annak kell lennie, a processzorok kimeneti értékei közül a legnagyobb értékűt választjuk ki.

Ha betanítottuk a hálózatot, akkor a program gyors tesztelési lehetőséget biztosít a felhasználónak. A teljes körű tesztelést a pályaszimulátor segítségével végezhetjük el. A felhasználó itt úgy vizsgálhatja meg a robot viselkedését az akadályok között, mintha a neurális hálózat közvetlenül a robotot irányítaná. Mivel a neurális hálózat esetén nem tudjuk biztosan, hogy a tanítás kellő hatásfokú volt-e, a hálózat által egy-egy szituációra kiszámított cselekvés lehet olyan jellegű, ami a robotot fizikailag is károsíthatja (például nekiütközhet egy akadálnak). A szimulátor ebben az esetben ezeknek a hibáknak a feltárására is alkalmas.

A program lehetőséget nyújt arra is, hogy a hálózat által kiszámított cselekvéseket közvetlenül végrehajtsuk a robottal (AKTÍV/PASSZÍV gomb). A robot közvetlen vezérlését azonban csak a betanítás után tudjuk végrehajtani. A szerkeszthető tanítómintákat és a súlytényezőket fájlokban tároljuk.

A neurális hálózat alkalmazása esetében is lehetőség van az utolsó lépés eltávolására, úgy mint a szabályrendszer esetében és hatása is hasonló ahhoz.

5.3. Tapasztalatgyűjtő algoritmus

A tapasztalatgyűjtő eljárás célja, hogy automatikusan hozzunk létre optimalizált szabálytáblát, illetve reprezentatív mintahalmazt a neurális hálózat tanításához. Az algoritmus hatékonyságát a program többszöri futtatása során szerzett és elraktározott tapasztalatok eredményezik (önfejlesztő rendszer).

Az algoritmus „teljes” szabálytáblával dolgozik. Ez a táblázat minden lehetséges célirány és szenzorjel kombinációhoz egyidejűleg tartalmazza a 6 lehetséges lépést, ami azt jelenti, hogy a táblázat $6 * 512$ rekordból áll. A teljes szabálytáblában ezen kívül minden szabályhoz rendelünk egy jószágértéket és egy öregségi mutatót. A jószágérték határozza meg, hogy az adott szenzorjel és cél irány esetén a robot melyik lépést használja a hat lehetséges alternatíva

közül. Az öregségi mutató azt mutatja meg, hogy egy szabályt hányszor alkalmazott a robot.

A tapasztalatgyűjtést a grafikus pályaszimulátorban valósítjuk meg. Inicializáláskor a jóságértéket és az öregségi mutatót minden szabályrekordnál nulla kezdőértékre állítjuk. Mivel nincs hátsó szenzor a roboton, ezért a hátralépések jóságértékét a legkisebb értékkel inicializáljuk. Így a hátralépést bekövetkezésének valószínűségét a minimálisra csökkentettük.

Az algoritmus elindítása után az aktuális szenzorjelektől és céliránytól függően kiválasztjuk az adott szituációra vonatkozó, éppen legnagyobb jóságú szabályt. Ezután megvizsgáljuk, hogy a lépés sikeres volt-e vagy sem. A sikerességet az előző lépés robot – cél és az aktuális lépés robot – cél távolságának különbségéből határozzuk meg. Ha a különbség növekedett, akkor a meglépett szabály jóságértékét csökkentjük. Amennyiben csökkent a különbség, akkor növeljük a jóságértéket a különbséggel arányosan. Ha a különbség változatlan maradt, akkor a robot fordulást hajt végre. Mivel ez lehet helyes, vagy helytelen lépés is ezért nem szabad azonnal csökkenteni, vagy növelni a jóságértéket. Módosítani csak a hetedik fordulás (egy körbefordulás) után szabad.

Az algoritmus eltávolítja az utolsó n darab lépést (ajánlott az $n = 5$ érték). Minél közelebb történt időben a lépés, annál nagyobb mértékben változtatjuk a lépés jóságát. Így lehetőségünk van az előző lépések jóságának módosítására is. A fejlesztés első szakaszában a jóságérték növelését és csökkentését azonos mértékben határoztuk meg. Ebben az esetben előfordultak olyan szituációk, amikor a robot oda-vissza lépkedett az utolsó két helyzete között. Ebből a patthelyzetből nem tudott tovább lépni, mert összértékben a szabályok jóságértékei nem változtak. Amennyiben az utolsó lépés sikeres volt, akkor az előtte lévő hibás lépéseket is jutalmaztuk. Ha az utolsó lépés sikertelen volt, akkor az előtte végrehajtott sikeres lépéseket is büntettük. Később, amikor a büntetés mértékét csökkentettük a jutalmazással szemben, azt tapasztaltuk, hogy ezeket a patthelyzeteket sikerült kiküszöbölni. Ezzel a módszerrel sikerült a céltól távolodó lépés jóságértékét lecsökkenteni a közeledő lépéssel szemben.

A szabály végrehajtása után az öregségi mutatót eggyel növeljük. Így ennek segítségével kapunk információt a tanítóminta állapotáról. Minél magasabb az öregségi érték, annál több ismeretet gyűjtött már az algoritmus.

A tanítást több elkülönített fázisra érdemes felosztani. Az első fázisban üres akadálypályán, a célt és a robot kiindulási pozícióját változtatva tanítottuk. Az első futtatás után már jó eredményt értünk el, de a további futtatások után tovább javult a cél elérésének útvonala. A második fázisban egyszerű akadályokat helyeztünk fel az akadálypályára és itt is változtattuk a robot kiindulási és a cél pozícióját. Az akadályok betanítása után megfigyelhető volt, hogy a robot nem rontotta el az akadály nélküli betanítások eredményét. A harmadik fázisban összetettebb akadályokra próbáltuk betanítani a rendszert. Ekkor több esetben előfordult, hogy elrontotta ez előtte betanult pályákat. Ilyenkor az első fázisra léptünk vissza, ahol már jóval gyorsabb volt a betanulás, mint korábban.

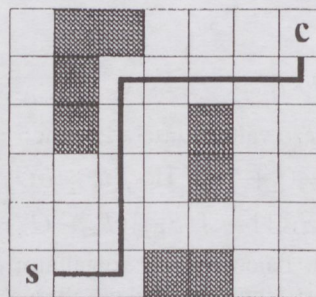
5.4. A hullám-továbbterjesztés algoritmus

Ennek az algoritmusnak [25] a segítségével adott környezetben meghatározhatjuk két pont között a legrövidebb útvonalat, feltéve, ha az létezik. A környezetet esetünkben $n * m$ kiterjedésű rácsrendszerrel modellezzük, amit egy mátrix reprezentál. Az algoritmus indítása előtt a cellarendszerben megjelöljük az akadályok helyét, majd a startpontot és végül a célpontot 1 értéket rendelünk.

A hullámfront terjesztése során tekintjük a célpont négyes szomszédait és ha azok nem akadályok, akkor a célpontnál 1-gyel nagyobb értéket (2-t) rendelünk hozzájuk. Ezután tekintjük a 2-vel megjelölt cellák négyes szomszédait és ha azokat még nem jelöltük meg, akkor 3-at írunk a cellába. Ezt az eljárást mindaddig ismételjük míg a startpontot jelölő cella értéket nem kap. Abban az esetben, mikor a start- és a célpont között nem létezik útvonal, a kiindulópont soha nem kap értéket. Amennyiben a cél elérhető a startból, megkapjuk a legrövidebb útvonalat.

5.5. A módosított hullám-továbbterjesztés algoritmus

Mivel az átlós iránnyal nem számolunk, ezért ez az út kissé „szögletes” lesz (28. ábra), ami jelentős távolságnövekedést is okozhat. Az ábrán látható útvonal kiszámítása során a minimális fordulások számát is figyelembe vettük. Emellett a 90° -os elfordulásokat különben is rendkívül lassan hajtja végre a robot, ezért három irányba is továbbfejlesztettük az eredeti algoritmust. Az irodalomban talált módszerhez hasonlóan [13], a négyszomszedság helyett a nyolcas szomszédokkal is kalkulálunk, amely az átlós irányokat is figyelembe veszi. Ezáltal némileg lerövidítjük a megteendő út hosszát és az eddigiek helyett, csak 45° -os szögben fordulunk a legtöbbször. További időmegtakarítást értünk el és az útvonal is kedvezőbben alakult (kevesebb töréspontot tartalmazott), ha a fordulásoknak valamilyen többletértéket adtunk. Így a megfelelő súly alkalmazásával az útvonal a lehető legkevesebb fordulást tartalmazta. A leglényegesebb változás azonban a környezet folyamatos felderítése.

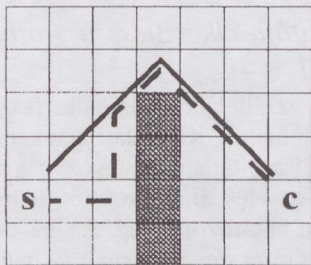


28. ábra. A hullámterjesztés algoritmus által kiszámított útvonal

A munkatér menet közbeni felderítését a robot szenzorairól érkező jelek segítségével tudjuk elvégezni. Ha valamely szenzor olyan akadályt jelez, amely még nem szerepelt a térképben, akkor az adott cellát megjelöljük és a módosított környezetre újra lefuttatjuk a hullám-továbbterjesztés algoritmust. Az újbóli végrehajtás után az útvonalterv már figyelembe veszi az imént érzékelt akadályt. Ezeket a tevékenységeket sorban végrehajtva a robot mindenképpen eljut a célig, ha létezik út oda és menet

közben felépíti az útvonal közvetlen környezetét leíró „térképet”. Az eredeti eljárás azonban elveszíti azon előnyét, hogy a legrövidebb útvonalon közelíti meg a célpontot, de ezt a környezet ismeretlensége miatt el sem várhatjuk.

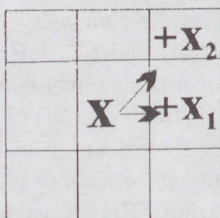
A 29. ábrán jól követhető a két algoritmus közötti különbség. Az eredeti módszer, amely ismeri a terepet, előre úgy tervezi meg az útvonalat, hogy a közbeeső akadályt kikerüli. Az algoritmus módosított változata, a környezetet nem ismerve, csak akkor veszi figyelembe a terepen elhelyezkedő akadályt, mikor annak a közvetlen közelébe ért.



29. ábra. Az eredeti (folytonos) és a módosított algoritmus (szaggatott) által kiszámított útvonal

Az eredeti algoritmus második módosítása, hogy az átlósan elhelyezkedő mezőket is figyelembe vesszük [13]. Mivel az útvonal hossza jelentősen lerövidül, így a robot sokkal gyorsabban bejárhatja az útvonalat. A számítási sebesség növelése érdekében a két szomszédos cella egymáshoz viszonyított távolságának meghatározásához nem használjuk az Euklideszi rendszert.

Ha egy mező nyolcas szomszédainak értékét növeljük (30. ábra), olyan értékpárt (x_1, x_2) kell találnunk, amely a lehető legkisebb hibát hozza be a távolság meghatározásakor. Ha $x_1 = 1$, akkor az átlósirányban elhelyezkedő szomszédos mező távolsága (x_2) . Ezt az arányt kell minél jobban megközelíteni egész számokkal, mivel a valós számok használata jelentősen megnöveli az algoritmus futási idejét, ami a módosított verziónál óriási hátrányokat okoz, hiszen ciklikusan többször is le kell futtatni az algoritmust. A közelítés pontosságát a 4. táblázatban foglaltuk össze. Megfelelően kis hibát az $x_1 = 29, x_2 = 41$ értékpár használatakor kapunk.



30. ábra. A szomszédos mezők értékeinek kiszámítása

Az útvonalat még ideálisabbá úgy tehetjük, ha a fordulást is valamilyen súllyal figyelembe vesszük, hiszen sokszor előfordulhat, hogy egy mezőből egyszerre két mezőbe is léphetünk, mivel tartalmuk egyforma. Mivel robotunk kanyarodási sebessége igen kicsi, mindenképpen a lehető legkevesebb elfordulással szeretnénk eljutni a célig. Ezt azzal érhetjük el, ha a szomszédos mezők értékeinek számításakor, a vizsgálat idejére egy kis értéket hozzáadunk a tartal-

mukhoz, kivéve az eddigi irányba eső mezőt. Megfelelően kis érték választásakor nem „zavarodik” meg az algoritmus és a lehető leghosszabb egyenes szakaszokkal közelíthetjük meg a kijelölt célhelyzetet.

4. táblázat. Az X_2 kerekítése által okozott százalékos hiba

X_1	X_2	Hiba (%)
1	1	29,28
1	2	41,42
2	3	6,06
3	4	5,72
5	7	1,00
12	17	0,17
29	41	0,03
100	141	0,29

5.6. Gráfbejáráson alapuló pályatervezés

A GVD (Generalized Voronoi Diagram) algoritmus célja, hogy a robotot a legbiztonságosabb útvonalon tudjuk eljuttatni a kiindulási ponttól a célig. A megvalósított GVD-n alapuló algoritmus értelmében a robot egy olyan pályát jár be, mely minden pontjában egyenlő távolságra helyezkedik el a robotot körülvevő akadályoktól. Mi ezt a feladatot 5 elkülöníthető fázisra bontottuk:

- potenciálmező meghatározása,
- a lokális maximumok megkeresése a potenciálmezőben,
- a lokális maximumokat összekötő gráf meghatározása,
- súlyozott feszítőfa elkészítése a gráfból,
- optimális pálya meghatározás a robot számára.

Potenciálmező meghatározása

Az előre ismert terepet felosztottuk $n * m$ -es négyzet-hálóra, ahol az n és m értéke a terepasztal méretétől függ. Minden cellának adtunk egy kezdőértéket, mely kezdőérték akadály esetén 255, egyébként 0. A kezdőértékek meghatározása után az $n * m$ -es négyzethálót feltöltöttük értékekkel oly módon, hogy az akadályokkal szomszédos cellákba 1-et írtunk. (Az $n * m$ -es négyzetháló széléit is akadályknak tekintettük.) Ezután a következő, még üres szomszédos cellák értékének meghatározásához mindig az előző lépésben kiszámított cella értékét eggyel növeljük (31. ábra). Az eljárás akkor tekinthető befejezettnek, ha minden cella értéke nagyobb, mint nulla. A potenciálértékek cellához rendelésével egy olyan mátrixot kaptunk, ami-ben a legnagyobb értékű elemek biztos, hogy a környező akadályoktól legtávolabb elhelyezkedő cellákat reprezentálják.

1	1	1	1	1	1
1	1	1			1
1	█	1			1
1	1	1			1
1					1
1	1	1	1	1	1

1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	2	1
1	█	1	2	2	1
1	1	1	2	2	1
1	2	2	2	2	1
1	1	1	1	1	1

1. lépés

2. lépés

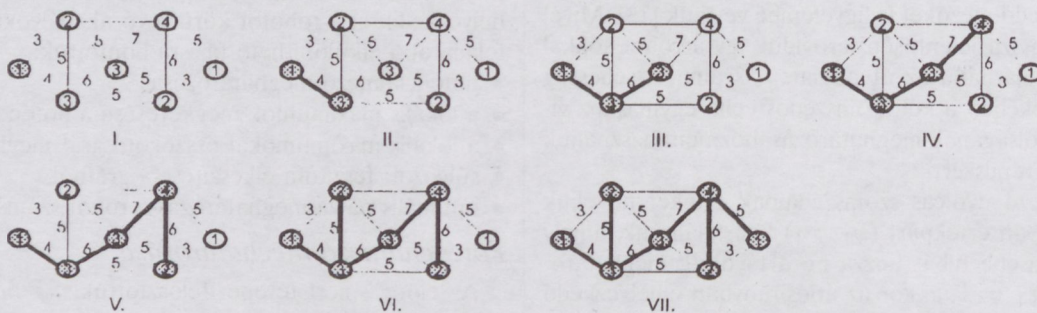
31. ábra. Potenciál mező kiterjesztése

Lokális maximumok megkeresése a potenciálmezőben

A kiszámított potenciálmezőt felosztottuk $k * k$ méretű négyzetekre (32. ábra) (ahol a k a cellák számát jelöli és $k \geq 3$). A k értékétől a végső útvonal pontossága függ. Minél kisebb a k értéke, annál pontosabban tudjuk a későbbiekben meghatározni a biztonságos útvonalat. Ugyanakkor a k értékének csökkentése nagymértékben megnöveli a számítási időt. Az így meghatározott négyzetekben megkerestük a legnagyobb értékű cellát. Ezt a lépést mindig négyzetre elvégezve megkaptuk az összes négyzet lokális maximumát.

1	1	1	1	1	1
1	1	1	2	2	1
1	1	1	2	2	1
1	1	1	2	2	1
1	2	2	2	2	1
1	1	1	1	1	1

32. ábra. Potenciál mező felosztása



33. ábra. A Prim eljárás működési elve

Kiindulási pontként vegyük a robot startpozíciójához tartozó szomszédos legnagyobb lokális maximumot. Vegyünk egy A halmazt, ami majd tartalmazni fogja a maximális feszítőfa pontjait és éleit. Az A halmaz élei mindig egy fát határoznak meg. Minden lépésben azt a legnagyobb súlyú élet vesszük az A -hoz, amelyik egy A -beli csúcsot köt össze a G -beli izolált csúccsal.

Az eljárás akkor ér véget, amikor G halmaz minden csúcsa megvizsgálásra került.

Az eljárás befejeztével az A -beli élek biztos, hogy maximális feszítőfát alkotnak. Az algoritmus hatékonysága és gyorsasága a legnagyobb súlyú él kiválasztásán múlik. Ha megtaláltuk a legnagyobb súlyú élet, akkor az A halmazhoz hozzáadjuk és G halmazból kivágjuk. Az eljárás előnye, hogy a maximális feszítőfa elkészítése után azonnal megállapítható a cél elérhetősége. Ezután kell a feszítőfán az útkeresést megvalósítani.

Optimális útvonal meghatározása a robot számára

A célunk, hogy a kiindulási pontból (robot startpozíciója) a célpontig (robot célpozíciója) a feszítőfa élein eljussunk. A feszítőfában biztos, hogy egy és csakis egy helyes

A lokális maximumokat összekötő gráf meghatározása

A gráfot a lokális maximumok összekötésével kaptuk meg. Két lokális maximum akkor köthető össze, ha azok szomszédosak és az őket tartalmazó négyzetek egymással akadálymentesen összeköthetők. (Ahhoz, hogy ezt az útvonalat meghatározzuk, a kis négyzeteken belül is alkalmaztunk hullám-továbbterjesztéses algoritmust.) Az így meghatározott gráf tartalmazza az összes lehetséges útvonalat a start és a cél között. A gráfban a csúcsok a lokális maximumok, míg az élek az ezeket összekötő egyenesek.

Súlyozott feszítőfa elkészítése a gráfból (Prim algoritmus) [14]

Ez az eljárás az általános minimális feszítőfa generáló alapeljárás alapján. Kiindulási alapként feltételezünk egy összefüggő, irányítatlan és súlyozott gráfot. A súlyok meghatározását az élek által összekötött lokális maximumok összegeként határoztuk meg. Az így kapott irányítatlan és súlyozott gráfra, továbbiakban G halmaz, alkalmazzuk a módosított Prim féle algoritmust (33. ábra). A módosítás abban nyilvánul meg, hogy nem a minimális súlyú feszítőfát keressük, hanem a maximális.

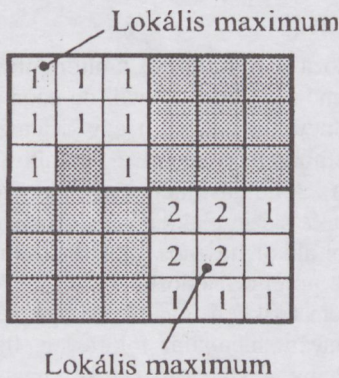
út létezik, mert a feszítőfa összefüggő, körmentes és irányítatlan gráf. Tehát, ha megtaláltuk a célpontot, akkor a keresést nem kell tovább folytatni.

A keresés első lépésében minden élet FEHÉR színűre állítunk. Ha egyszer átmegyünk egy élen, akkor SZÜRKEKÉRE állítjuk. Ha ezen az élen még egyszer átmegyünk, akkor azt SZÜRKERŐL FEKETÉRE állítjuk. Ha egy él színe FEKETE, akkor arra az éltre többet nem léphetünk. Amikor a gyökérből (kiindulási pont) elindítjuk a keresést, az első FEHÉR színű él felé kezdjük. Így eljutunk a következő csúcsba. Amennyiben ebből a csúcsból van még kiinduló él, aminek színe FEHÉR vagy SZÜRKE, akkor tovább lépünk, ha nincs, akkor visszalépünk, és az él színét FEKETÉRE állítjuk. (A FEHÉR színű éleknek mindig nagyobb prioritása van a SZÜRKEKÉVEL szemben.) Ha a feszítőfában eljutottunk a céléig, akkor a SZÜRKE útvonal határozza meg a robot számára a legbiztonságosabb útvonalat. Ez az útvonal azonban még nem felel meg a valóságos útnak, ezért szükségünk van egy pályakorrekcióra.

Pályakorrekció a robot számára

A pályakorrekció segítségével készítjük el a robot számára az egymást követő lépések sorozatát. Ehhez a fe-

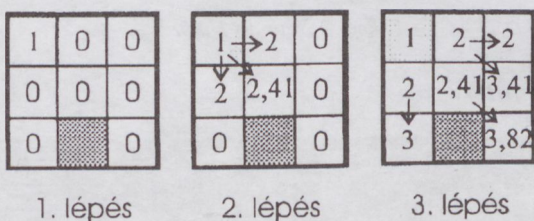
szítófából meghatározott útvonalon található lokális maximum pontokat, hullám-továbbterjesztési algoritmus segítségével kötjük össze. Ezt a folyamatot a startpozícióból indítjuk a feszítőfában meghatározott útvonal első lokális maximumáig. Következő lépésként az imént bekötött lokális maximumot kötjük össze a következő lokális maximummal. Ezt a folyamatot addig folytatjuk, amíg el nem érjük a célt.



34. ábra. Cellák összevonása

A két lokális maximum összekötését oly módon végzük, hogy első lépésben az összekötendő pontokat tartalmazó cellákat összevonjuk úgy, hogy egy nagy cellát kapjunk. Ezt úgy érhetjük el, hogy vesszük a lokális maximumokat tartalmazó cella méretének a kétszeresét (3×3 -as cellák esetén 6×6 -t). Beillesztjük az összekötendő pontok celláját – akadályokkal – az előállított nagy cellába úgy, hogy a kis cellák megtartsák az egymás közti irányultságot (34. ábra). A fennmaradó két kis cellát akadályokkal töltjük fel ezzel biztosítva, hogy az eljárás arra ne találjon utat.

Ezután lefuttatunk a nagy cellára egy hullám továbbterjesztési algoritmust. Ha elértük a robot célpozícióját akkor megkaptuk a robot számára valóságosan végigjárható útvonalat.



35. ábra. Hullám kiterjesztése a kiindulópontból

6. A PC-S PROGRAMRENDSZER

A robot vezérlését a legtöbb esetben kétféleképpen oldják meg. A helyi vezérlés általában a robot mozgásáért felelős és az általa gyűjtött információkat egy nagykapacitású számítógépen tárolják és dolgozzák fel. Az összeköttetés módja sokféle lehet, nagyban függ az alkalmazás körülményeitől, a robot által elvégzendő munkától és a fejlesztési munkára fordított anyagiaktól is. A legtöbb járó robot még csak laboratóriumi kísérletek céljából épült meg, ezeknél bőven elegendő a direkt, vezetékcsatlakozás. A kutatórobotoknál viszont más a helyzet, mert itt a környezet nagy-

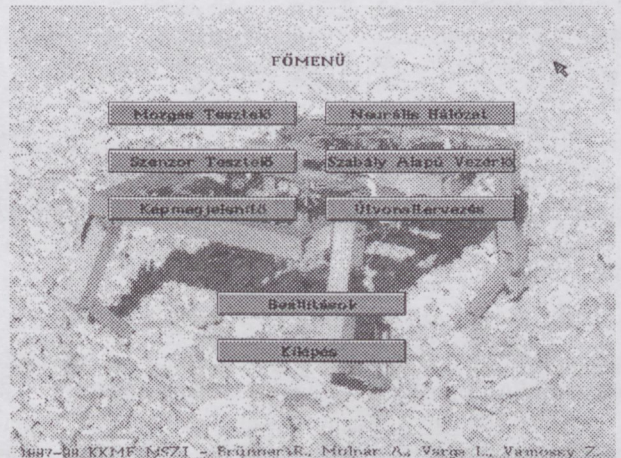
ban befolyásolja a kapcsolat felépítését a központi számítógéppel, egyes esetekben lehetetlenné téve is azt (lásd Ariel, ami teljesen önállóan működik). A vulkánkutató Dante-II műholdas kapcsolatban van a központi ponttal, mivel a direkt kapcsolat egy ilyen jellegű munkánál nem megoldható.

Mivel az EXPLORADORES-t oktatási célokra szántuk, a PC-s programnak a következő feltételeknek kell eleget tennie:

- a robot összes képességét használja ki,
- pályatervezési feladatok szimulációja, ezen belül több útkereső algoritmus összehasonlításának lehetősége,
- RS232 adatátvitel támogatása,
- moduláris felépítés a továbbfejlesztések könnyítése érdekében,
- grafikus felület, könnyű kezelhetőség.

6.1. A PC-s programrendszer funkciói

A szoftver grafikus kezelői felületet biztosít a felhasználó számára. A programot jól átlátható menürendszer jellemzi, melyen keresztül a robot összes funkciója elérhető (3. kép).

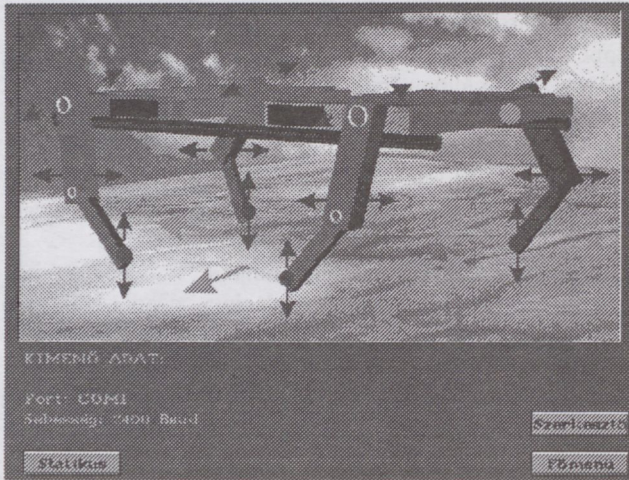


3. kép. A robot összes funkcióját bemutató menürendszer

A program által nyújtott lehetőségek a következők:

Mozgás Tesztelő

A robot ábráján (4. kép) elhelyezkedő nyilakra mutatóval a kommunikációs egység a megfelelő kód-párt (láb kódja+utasítás kódja) kiküldi a beállított soros portra. A program a robot központi processzorával kommunikál, ami a kód megkapása után eldönti, hogy milyen csoportba tartozó utasítást kapott. Ha értelmezhető byte-ot küldtünk, invertálódik a központi panelen elhelyezkedő sárga led és a robot elkezd végrehajtani a parancsot. Ha az utasítás a kommunikációs közegben meghibásodott (a programmal csak értelmezhető utasítást tudunk küldeni), a piros led jelez. A felület segítségével a robot elemi és komplex mozgásainak mindegyikét le tudjuk tesztelni (4. kép). Ez által lehetőség nyílik a robot finom mechanikai hangolására, illetve fizikai hibáinak feltárására és lokalizálására. Ebből a felületről érhető el a *Szerkesztő* modul.



4. kép. A Mozgás Tesztelő

• Szerkesztő

Ennek a programrésznek a feladata, hogy a teljesen beállított robottal komplex mozgássorozatokat tudjunk elvégeztetni és saját járási stratégiát szerkeszthessünk.

Szenzor Tesztelő

Az alkalmazott szenzoroktól függően ebből a menüpontból több tesztfelület érhető el. Ezek a következők:

• Infra-szenzor Tesztelő

A szenzorlekérdező utasítás (F7h) 90 ms-os kiküldési ismétlésével a robottól lekérdezzük a szenzorok állapotát, melyet a grafikus felületen jelenítünk meg. A programrész használatával lehetőség nyílik a szenzorok érzékelési távolságának beállítására is.

• A PAL optikás programfelület

Ennek a programmodulnak a használatával lehetőségünk van PAL optikával vett kép transzformálására.

Az „Inít” billentyű megnyomásakor a beállított képen megkeresi a program a feltételezett középpontot és a sugár nagyságát a 3.2-es pontban leírtak szerint. Ezeket az adatokat felhasználva tudjuk megjeleníteni a már transzformált képet a „Megnéz” gombbal. A kiegyenesítés vonatkozhat a gyűrű bal és jobb oldalára (Bal/Jobb). Ez a funkció csak abban az esetben használható, ha fél képet kérünk. Ha az erre vonatkozó billentyűt benyomjuk (Egész) a kiegyenesített kép az egész gyűrűre vonatkozik, de fele akkora felbontásban jelenik meg. A File használatával jelölhetünk ki újabb képábrákat (RAW formátumút). A program a PAL nevű alkönyvtárban található file-okkal dolgozik. A „Kép” gomb megnyomásával meghívódik a DSP kártya PAL optikás digitalizáló funkciója. A digitalizálás után a PC megkapja a képet és „temp000.raw” néven elmenti azt. A magasság beállításával megadhatjuk, hogy a gyűrű információ tartalommal nem rendelkező közepéből mekkora részt hagyjon figyelmen kívül a kiegyenesítés.

• A DSP tesztelő modul

Ezen a területen lehetőségünk nyílik az egyes algoritmusok tesztelésére és a különböző eljárások kombinálására. Letölthetünk a DSP-be már rendelkezésünkre álló képeket vagy digitalizálhatunk újakat. A küszöbérték paraméter segítségével állítható be a lézercsík pontos meghatározása. Ez a paraméter erősen függ a környezet megvilágításától

és a lézermódul teljesítményétől.

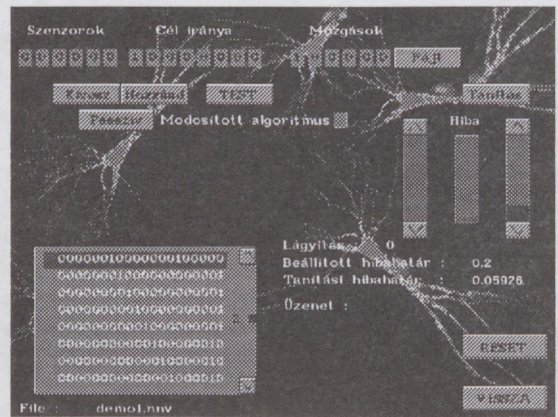
A „Horizont” határozza meg a képen a lézercsík elhelyezkedését abban az esetben, ha nincs akadály a robot előtt. Ezt a pozíciót az akadálykeresésnél használjuk majd fel.

Képmegjelenítő

Az irodalomkutatásban szereplő robotok képes anyagaik megjelenítésére szolgál.

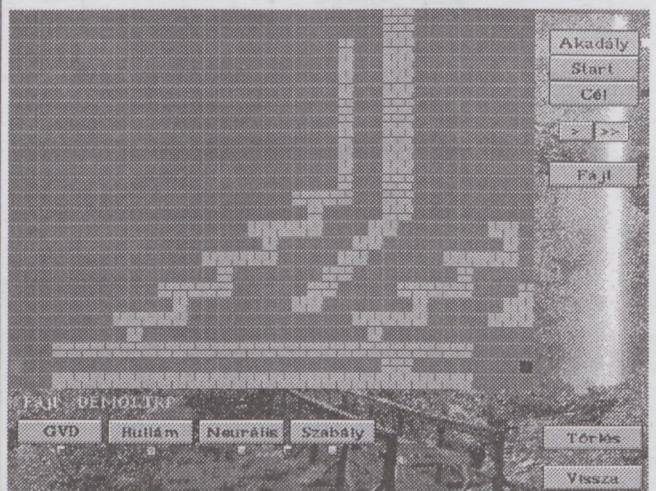
Neurális Hálózat

A neurális hálózat programrész tanítómintáinak létrehozására, illetve módosítására szolgál, de ezen menüponton belül lehet a neurális hálózatot egy kiválasztott minta feldolgozására betanítani, valamint a betanított hálózatot tesztelni is (5. kép). A tanítást megelőzően lehetőség van a tanulási hibahatár és a szimulált lágyítás mértékének beállítására. Ez utóbbi akkor hasznos, amikor a tanulás során a hálózat egy ún. potenciálgödörbe kerül. Ekkor a hálózat hibája már nem csökken tovább, de ugyanakkor ez a hiba még a megkívánt hibahatár fölött van. Ilyenkor véletlenül néhány súlytényező értékét megváltoztatva (szimulált lágyítás) a tanítási folyamat kikerülhet a lokális potenciálgödörből. A részletes leírást az 5.2. fejezet tartalmazza.



5. kép. A Neurális Hálózat

Útvonaltervezés



6. kép. Az Útvonaltervező felület

Egy tetszőleges akadályrendszer megszerkesztésére alkalmas és az általunk használt négy féle útkereső algoritmus és azok módosított változatainak tesztelésére szolgál (6. kép). A megszerkesztett akadálykörnyezet módosítható illetve eltávolítható. A hatékonyabb tesztelés érdekében a szimuláció lehet folyamatos vagy lépésenként megállítható. Ez utóbbi esetben az egy helyben történő fordulások is megfigyelhetők.

Szabály Alapú Vezérlő

Itt egy új szabálytábla létrehozására és eltávolítására, vagy egy meglévő módosítására van lehetőség. Részletes leírása az 5.1. fejezetben található.

Tapasztalat Alapú Vezérlő

Ebben a modulban egy új szabálytábla, illetve a neurális hálózat számára reprezentatív tanítóminta előállítására van lehetőség. Az útvonaltervező felület segítségével folyamatosan nyomon követhető az új szabálytáblázat állapota. Amennyiben a szimulátor alapján a robot viselkedése megfelelőnek bizonyul, lehetőség van a szabálytábla, illetve a reprezentatív minta exportálására. Részletes működési leírás az 5.4. fejezetben található.

Beállítások

Ebben a részben állítható be a soros port címe, a kommunikáció sebessége és a program feliratainak nyelve (Angol/Magyar).

6.2. A DSP-s kommunikáció

Mivel az eddigiekben a PC közvetlenül a robot központi paneljéhez csatlakozott egy RS232-es soros vonalon keresztül, meg kellett változtatni a kommunikáció módját is. A módosítást úgy végeztük el, hogy a robot vezérelhető legyen DSP-n keresztül, illetve a nélkül is. Az új átvitelnél az adatbiztonság miatt egy 5 byte-os fejléccet használunk. A fejléc felépítése a következőképpen néz ki:

0. byte: cím byte 0000 0000: robot vagy PC, 1111 1111: DSP

1–3. byte: adatbyte-ok

4. byte: checksum

Az adatbyte-ok tartalmazzák a robotnak vagy a DSP-nek szóló utasításokat. Ha a DSP egy robotnak szóló utasítást fogad, azt továbbítja a régi protokoll szerint annak irányába. Ha az 1-es vagy 2-es byte nem egyenlő nullával, akkor egy kép fog érkezni a fejléc után, aminek a méretét tartalmazzák az adatbyte-ok. A használt DSP-s utasítások a következők:

Az 1-es és a 2-es byte mindig nulla, míg a 3. byte tartalmazza az utasítás kódját:

0 Képvétel:

A DSP digitalizáljon egy 256 * 256-os képet és tárolja el azt a memóriában.

1 Feltöltés:

A DSP küldje el a PC-nek az RS232-es soros vonalon keresztül a memóriájában levő 256 * 256-os képet. Az utasítás kiadása után a DSP visszaküld egy fejléccet, ami a kép nagyságát tartalmazza byte-okban. Erre azért van szükség, mert a későbbiekben tervezzük a kép tömörítését és így nem használhatunk fix képméretet.

2 Binarizálás:

A memóriában lévő kép binarizálását végzi el a beállított küszöbértékkel. Előtte át kell adni ezt az értéket a DSP-nek a 6-os utasítás használatával.

3 Szűrés:

A memóriában levő kép szűrése 3 * 3-as Average filtering-gel.

4 Kivonás:

A memóriában eltárolt két kép megfelelő pixelértékeinek kivonása egymásból. Ezzel az eljárással érjük el azt, hogy csak a változások maradnak meg a képen. Az első kép nem tartalmazza a lézercsíkot, míg a másodikon már az is látható.

5 Tárolás:

Az aktív memóriából (ahová a digitalizálás történik) egy másik memóriaterületre helyezi át a képet.

6 Küszöbérték leküldés:

A binarizáláshoz használt küszöbérték paraméter átküldése a DSP-nek. Az utasítás kiadása után egy byte-ot (a küszöbérték) még át kell küldeni.

7 Lézer be:

A DSP-hez csatlakoztatott lézermodul bekapcsolása. Ezt a második kép vétele előtt végre kell hajtani.

8 Lézer ki:

A lézermodul kikapcsolása.

9 Vonal:

A memóriában levő képen a lézercsík töréspontjainak megkeresése. A függvény a 3.1. pontban leírtak szerint működik. A megtalált töréspontokat és a végpontokat a program átküldi a PC-s vezérlőprogramnak további kiértékelésre.

10 PAL kép digitalizálás:

512 * 512-es kép digitalizálása és elhelyezése a DSP memóriájában.

11–14 PAL kép feltöltés 1–4:

Az 512 * 512-es méretű kép feltöltése a PC-be 64 kbyte-os negyedekben. A kép ilyen módon való átküldésére azért van szükség, mert így jóval kevesebb átmeneti memória használatával tudjuk megoldani a problémát.

Ezeknek az utasításoknak a használatával igen gyorsan el tudjuk végezni a 4.1-es pontban leírt algoritmust és ezáltal detektáljuk a robot előtt elhelyezkedő akadályokat. A felhasználói felületen lehetőségünk van az algoritmus real-time vagy előzőleg vett képekkel történő kipróbálására. Az eredményt visszakaphatjuk binarizált képen vagy töréspont koordináták formájában is.

7. TAPASZTALATOK ÉS EREDMÉNYEK

A robot megépítését átfogó tesztelés követte. A tesztelés során az alábbi szempontokat tartottuk szem előtt:

- a PC-s vezérlő szoftver esetleges hibáinak feltárása,
- a PC és a robot közti adatforgalom megbízhatóságának ellenőrzése,
- a robot fedélzeti mikrokontrollereiben futó programok hibáinak feltárása,
- a járási módszerek megbízhatósága,
- a járás tesztelése eltérő terepviszonyok mellett,
- a tartós üzemeltetés során jelentkező hibák feltárása,

- a kutatásaink során megismert robotokkal történő összehasonlítás,
- a szenzorok alkalmazhatósága valós körülmények között,
- a környezet detektálás hatékonyságának vizsgálata.

A fenti szempontok kielégítése érdekében robotunkat több mint 120 órán keresztül járattuk különböző terepviszonyok között. A robot fedélzeti programjai megbízhatóan működtek. A tesztelesek során nem fordult elő hibás végrehajtás, illetve programleállás.

A PC-s robotvezérlő program könnyen kezelhetőnek bizonyult. A programot nem ismerők számára azonban szükségessé vált egy felhasználói útmutató elkészítése. Ezen útmutató segítségével gyakorlatilag nem okozott gondot a rendszert nem ismerők számára sem a robot vezérlése.

A PC és a robot közti adatforgalmat vizsgálva azt tapasztaltuk, hogy 9600 baud-os átviteli sebesség mellett gyakran jelentkezett átviteli hiba. Ezek a hibák jó minőségű, árnyékolt kábel alkalmazásával csökkentek ugyan, de teljesen nem szűntek meg. Tapasztalataink alapján az átviteli sebességet 2400 baud-ra állítottuk be. Tekintettel arra, hogy az utasítások csak egy, illetve két bájtosak, a viszonylag alacsony átviteli sebesség nem okozott lassulást a robot mozgásában. Az átviteli hibákat mind a robot központi mikrokontrollerében elhelyezett program, mind pedig a PC-s program lekezelte. Ennek következtében hibás parancs végrehajtás a tesztek során nem következett be. Így ezekről a hibákról csak a robotba beépített hibajelző LED felvillanásaiból szereztünk tudomást.

A robot lépéseit vizsgálva, mindig megbízható járást tapasztaltunk. A járás sebességét összehasonlítva más robotokkal azt tapasztaltuk, hogy robotunk hasonló sebességgel halad mint azok a robotok, amelyek szervomotorokat használnak az ízületeik mozgatásához (Think). Természetesen a gyors elektromotorokat, illetve léptetőmotorokat alkalmazó robotok mozgása lényegesen gyorsabbnak bizonyult az EXPLORADORES sebességénél (Quadruped).

Robotunk mozgási lehetősége, összevetve a hasonlóan kísérleti céllal épített robotokkal jónak mondható. Tapasztalataink szerint az olcsó hatlábú robotok mozgási lehetőségei korlátozottabbak (Hexapod Walker) mint robotunké. Természetesen terhelhetőség tekintetében a léptetőmotorokkal felszerelt robotok (Ariel) felülmúlják robotunkat, de ez a tervezés során nem is volt kiemelt szempont. A tartós igénybevétel során kiderült, hogy az alsó lábszárakat mozgató tolórudak gyengének bizonyultak. Ezeket kicseréltük erősebb rudakra.

Robotunk iránytartása a tesztelesek során megfelelőnek bizonyult. Statikus járás alkalmazása esetén, öt előre lépés megtétele után – ami 70 cm-t jelent – mindössze 5 cm volt az egyenestől való eltérés. (Az iránytartás természetesen függött a talaj anyagától.) Ezt az eltérést az oldalra lépéssel könnyen korrigálni lehetett. Dinamikus járást alkalmazva, öt előre lépés után – ez 75 cm-t jelent – az egyenestől való eltérés 8 cm volt.

A DSP-s képfeldolgozó algoritmusok mellett, a lézercsíkos töréspontdetektálást kifejlesztettük a PC-s vezérlőprogram alá is. A tesztelés során kapott eredmények azt mutatták, hogy a DSP-vel történő akadályérzékelés kb. 3-4-szer gyorsabb, mint egy Pentium 200-as PC-n.

Az akadálydetektálás pontossága erősen függ az akadály fényvisszaverő tulajdonságától. Fekete vagy érdes felületű tárgyakról a lézerefény gyengén verődik vissza, ami vékony, töredezett csíkot eredményez a képen. Üveg vagy erősen tükröző felület elvakítja a kamerát, ami túl vastag csíkot és elmosódott fényfoltokat eredményez.

A kezdeti célkitűzésünket sikerült elérni, mivel a robot előtt elhelyezkedő területet a CCD kamerával vett kép teljesen lefedi. A módszert kiterjeszthetjük a PAL optikás képre is – így a kép a teljes 360 fokos környezetet tartalmazza – de ekkor egy igen komoly problémába ütközünk. A lézercsíkot nem tudjuk kivetíteni körgyűrű alakban. Ennek megoldása további fejlesztési munkát igényel.

7.1. Az elkészült robot paraméterei

- fizikai méretek:
 - hossz: 600 mm
 - szélesség: 400 mm
 - magasság: 270 mm
 - súly: 2,5 kg
- statikus járási sebességek:
 - előre: 400 mm/perc
 - oldalra: 90 mm/perc
 - fordulás: 31°/perc
- lépés hossz:
 - előre: 140 mm
 - oldalra: 40 mm
- forduló lépés (elfordulás):
 - szöge: 8,8°
 - ideje: 17 sec
- áramfelvétel:
 - álló állapotban terheletlenül: 0,6 A
 - álló állapotban terhelve: 1,0 A
 - mozgás közben terheletlenül: 1,5 A
 - mozgás közben terhelve: 2,0 A
- tápfeszültség: 12 VDC
- motorok: PWM vezérlésű szervomotorok
 - típusok: ACOMPS AS-15 (8 db); HITEC HS-615MG (4 db)
 - forgató nyomaték: 35 Ncm (AS-15), 77 Ncm (HS-615MG)
 - méret: 41 * 20 * 40 mm (alapméret)
- szenzorok:
 - infra-reflexiós: Leuze RT404K/P-400 (6 db)
 - PNP kimenet, max. 200 mA
 - érzékelési távolság: 100-400 mm;
 - méret: 23 * 28 * 12mm
 - CCD kamera: 470 képsoros panelkamera
 - CCD kamera: 470 képsoros panelkamera PAL lencsével szerelve

A fenti adatok padlóburkolaton mért eredményekből származnak. Különböző talajfajtákon kipróbálva azt tapasztaltuk, hogy a lépéstávolságok kisebb- nagyobb mértékben csökkentek, attól függően, hogy milyen volt a felület tulajdonsága (lejtős, csúszós, laza stb.). Fűves területen a távolságok alig maradtak el az eredetitől, lényeges eltérés csak hosszabb út megtétele után látszott meg. Homokos terepviszonyok közt a lépéshossz majdnem a felére csökkent. A robotot egy 15° dőlésszögű fémlapon felfele elindítva azt tapasztaltuk, hogy a csúszás mértéke nagyban

megnőtt, mely a lépéshossz igen erős megrövidülését eredményezte.

A mérési eredmények és tapasztalataink alapján megállapítható, hogy robotunk a tervezési célkitűzéseknek meg-

felelt. EXPLORADORES már több nemzetközi és hazai bemutatón, illetve konferencián sikerrel szerepelt [37]–[40].

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] László J. (1997). Perifériák programozása, Computer Books, Budapest
- [2] Pao, Y.-H. (1989). Addaptive Pattern Recognition and Neural Networks, Addison-Wesley Publishing Company Inc.
- [3] Vörös G. (1997). Bevezetés a Neurális számítástechnikába, LSI Oktatóközpont, Budapest
- [4] László J. (1995). A VGA kártya programozása, Computer Books, Budapest
- [5] James, W. C. és William E. L. (1989). *Mikroprocesszoros rendszerek illesztési technikája*, Műszaki Könyvkiadó.
- [6] Vancsó Gy. (1984). *Mikroszámítógép-elemek a tervezéshez*, Műszaki Könyvkiadó.
- [7] (1995 október). *Microcontroller Data Book*, ATMEL Corporation.
- [8] (1996). *The programmable Logic Data Book*, XILINX, Inc.
- [9] Kónya L. (1988). *Az Intel egytokes mikroszámítógép-családjai*, Egytokes mikroszámítógépek (216-243), Műszaki Könyvkiadó.
- [10] Brünner R., Molnár A., Varga L. (1997) *Lépegető robotok*, Szakirodalom és Internet kutatások összegzése, MI hallgatói konferencia, KKMf MSZI, Budapest.
- [11] Kang, D., Lee, Y., Lee, S., Hong, Y., Bien, Z., (1997) A Study on an Adaptive Gait for a Quadruped Walking robot under External Forces, pp. 2777-2782., ICRA'97, (IEEE), Albuquerque, New Mexico.
- [12] Chevallereau, C., Formalsky, A., Perrin, B. Control of Walking Robot with Feet Following a Reference Trajectory Derived from Ballistic Motion, pp. 1094-1099., ICRA'97, (IEEE), Albuquerque, New Mexico.
- [13] Verwer, B. J. H. (1991). Distance Transforms, Metrics, Algorithms and Applications. Delft University Press, Delft, The Netherlands.
- [14] Cormen, T. H., Leiserson, C.E., Rivest, R.L. (1990), *Algoritmusok*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest.
- [15] Berke J., Hegedűs Gy., Kelemen D. Szabó J. (1996). *Digitális képfeldolgozás és alkalmazásai*, Pictron Kft., Budapest
- [16] Klafter, R. D., Chmielewski, T. A., Negin, M. (1989). *Robotic Engineering – An Integrated Approach*, Prentice Hall International, Inc.
- [17] Niemann, H. (1990). Image Analysis and Understanding, Springer Verlag.
- [18] Stuck, E. R., (1996). *Detecting and Diagnosing Mistakes in Vision-based Navigation*, Robotics and Autonomous Systems, Elsevier, Volume 17, Number 4, 259-285.
- [19] Hirai, K. (1997). *Current and Future Perspective of Honda Humanoid Robot*, International Conference on Intelligent Robot and Systems, IROS'97, Grenoble, Volume II. 500-508.
- [20] Hirose, S., Kato, K. (1998). *Quadruped Walking Robot to Perform Mine Detection and Removal Task*, First International Symposium on CLAWAR'98, Brussels, 261-266.
- [21] Schilling, R. J. (1990). *Fundamentals of Robotics: Analysis and Control*, Prentice-Hall International.
- [22] Takada, H., Facchinetti, C., Latombe J.-C., (1994). *Planning the Motions of a Mobile Robot in a Sensory Uncertainty Field*, Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Computer Society, Vol. 16, No. 10, 1002-1018.
- [23] Leppänen, I., Salmi, S. (1998). Partner Profile, Helsinki University of Technology, CLAWAR News (Ed. Randall, M.) Issue 1, Bristol.
- [24] Kello, I. (1994), Adaptive Construction of the Generalized Voronoi Diagram, Artificial Intelligence and Information Control Systems of Robots '94, Smolenice, 303-308.
- [25] Ralli, E., Hirtzinger, G. (1994). Fast Path Planning for Robot Manipulators Using Numerical Potential Fields in the Configuration Space, In: Proc. of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol. 3. pp. 1923-1929. Munich, Germany
- [26] Latombe, J. C. (1991). Robot Motion Planning, Kluwer Academic Publishers.
- [27] Stentz, A. (1994). Optimal and Efficient Path Planning for Partially-Known Environments. In: Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 4. pp. 3310-3317. San Diego, California.
- [28] Yamazaki, N., Umeda, M. (1998). Biomechanical Restoration of Walking Posture of Extinct Mammal-DESMOSTYLUS, Biomechanism, Vol. 14, 177-186.
- [29] Berns, K., Ilg, W., Eckert, M. Dillmann, R. (1998) Mechanical Construction and Computer Architecture of the Four-legged Walking Machine BISAM, First International Symposium on CLAWAR'98, Brussels, 167-172.
- [30] Arikawa, K., Hirose, S. (1996). Development of Quadruped Walking Robot TITAN- VIII. Proc. of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'96) Vol. 1. 208-214.
- [31] Inagaki, K., (1997). Gait Study for a Hexapod Walking with Disabled Leg, International Conference on Intelligent Robot and Systems, IROS'97, Grenoble, Vol. I. 408-413.
- [32] Virk, G.S., Harvey, D.R. (1998). Dynamically Stable Legged Robots, First International Symposium on CLAWAR'98, Brussels, 335-342.
- [33] Golliday, L. Hemami, H. (1997). An Approach to Analysing Biped Locomotion Dynamics and Designing Robot Locomotion Controls, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol AC-22, No. 6. 963-972.
- [34] Takeuchi, H., (1998). Development of „MEL HORSE”, , First International Symposium on CLAWAR'98, Brussels, 21-26.
- [35] Kang, D.O., Lee, Y.J., Lee, S.H., Hong, Y.S., Bien, Z. (1997). A Study on an Adaptive Gait for a Quadruped Walking Robot under External Forces, Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, Vol. 4. 2777-2782.
- [36] Vámosy, Z., Novák, A., Horváth, M., (1999). I. Henrik Wheeled Mobile Robot – Optimal Path Planning and Tracking Based on Visual Information, Proc. Of RAAD'99 (Ed. G. Schmidt), Munich (megjelenés alatt).
- [37] Brünner, R., Molnár, A., Varga, L., Vámosy, Z. (1998). Exploradores, négy lábú robot, In: X V. Centenárium Tudományos Ülésszak KKMf, Vol. Szabályozástechnika-Robottechnika, pp. 36-41. Budapest.
- [38] Brünner, R., Molnár, A., Varga, L., Vámosy, Z. (1998). Exploradores, Quadruped Robot, In: Proc. of 7th International Workshop on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region – RAAD'98 (Slovak Academy of Sciences), (K. Dobrovodsky (Ed.)), pp. 215 – 220. Bratislava, Slovakia.
- [39] Vámosy, Z., Molnár, A., Brünner, R., Varga, L., (1998). Path Planning Methods for a Quadruped Mobile Robot, In: Proc. DAAAM'98, Cluj-Napoca, Romania. (B. Katalinic (Ed.)), DAAAM International, pp. 483-484. Wien, Austria
- [40] Vámosy, Z., Molnár, A., Brünner, R., Varga, A., (1998). EXPLORADORES II., the Four-Legged Mobile Robot, In: Proc. of International Symposium on Climbing and Walking Robots – CLAWAR'98, Brussel, (Y. Baudoin (Ed.)) BS-MEE. pp. 41-45. Brussel, Belgium.
- [41] Hungarian Patent 192125, USA Patent 4566763, Japan Patent 1962784, German Patent 3402847.
- [42] Greguss, P., Alpek, F., Patko, M. (1998), Changing from Guided Robocars to Autonomous Robocars by Using Humanoid Machine Vision System, In: Proc. of 7th International Workshop on RAAD'98 (Slovak Academy of Sciences), (K. Dobrovodsky (Ed.)), pp. 127-131. Bratislava, Slovakia.

EXPLORADORES, THE QUADRUPEL WALKING ROBOT

A. MOLNÁR, Z. VÁMOSSY

KANDÓ POLYTECHNIC, INSTITUTE OF INFORMATICS
H-1431 BUDAPEST, 8. P. O. B. 11.
<MOLNAR, VAMOSSY>@NOVSERV.OBUDA.KANDO.HU

In our project we have developed a robot that walks, for demonstrational and research purposes. We studied the literature of walking robots first, looking extensively into the solutions of mechanical and electronic problems, as well as into path planning and image processing techniques. The machine was built with this information in mind. It has four legs, and is made of lightened aluminum. The legs have three degrees of freedom, and are driven by servomotors. Thanks to the 12 servos on board the robot is capable of executing a wide range of different movements. To drive the robot we used five 89C 51 microcontrollers and four XC3020 logical gate circuits.

Steady walking is achieved by employing various statical and dynamical walking strategies. The robot can function either autonomously, or via a connection to a PC, using a serial port. It is possible to test the behavior of the robot using the software we developed. The set of programs for the PC contains neural network based, rule based, wave propagation based and GVD based path planning modules, as well as other versions of these modules, that have been modified and explicitly matched to the robot. The system makes testing and comparing the efficiency of various routing algorithms possible. The program contains modules to edit the rule base and the neural network's training patterns, and also, when using neural networks, allows training using pre-made or new training sets. A so-called "learn by experience" algorithm has been developed to aid the automatic creation of the rule base, and representative patterns for the neural network. This algorithm generates a table of size predefined, which contains the most often successfully applied rules. To achieve this, the user, with the help of the simulator, can introduce various obstacles that the robot needs to avoid in order to successfully reach it's target. The more obstacles the robot manages to avoid, the more "experience" it gains about solving each situation.

The robot extracts information from it's environment by the means of retro-reflective infra and CCD sensors. It is also equipped with a camera that employs PAL optics. The objective of the sensors is to pinpoint the exact positions of the obstacles. Obstacle detection with cameras is done by the aid of a laser-ray projected in front of the robot. By considering the breakpoints in the ray it's possible to deduce the shape of obstacles. A DSP card processes images taken by the CCD camera. The DSP card can work automatically, parallel to the PC, cooperating with the computer. The latter mode can yield a huge increase in speed, since the algorithms that would take up a lot of time are run by the DSP instead of the PC. Thus, only the results of the algorithms need to be sent. This solution supports both the autonomous and the PC simulation mode.

Molnár András 1999-ben a Kandó Kálmán Műszaki Főiskola Matematikai és Számítástechnikai Intézetében végzett műszaki informatikus, valamint mérnök-tanárként. Jelenleg a Kandó Kálmán Műszaki Főiskolán dolgozik. Szakterületei: robotika, gépi járás, mesterséges intelligencia kutatás. Oktatási területe az Assembly programozás, elektronikus áramkörök CAD rendszerei, bevezetés az informatikába. Vendéghallgatóként egy szemesztert tanult a Hochschule Wilhelmshaven Finommechanika és Elektrotechnika szakán. Kutatási tevékenysége: lépegető robot fejlesztése, mozgási stratégiák vizsgálata, pályatervezés ismert és részben ismert környezetben, robotok fedélzeti elektronikájának fejlesztése, robotlátsón alapuló környezet feltérképezése, autonóm robotok fejlesztése.

Vámosy Zoltán a Budapesti Műszaki Egyetem Gépészmérnöki Kar matematikus-mérnök szakán végzett 1984-ben okleveles gépészmérnöként. A VIDEOTON Fejlesztési Intézetben szoftverfejlesztőként dolgozott a "MAID" gépészeti CAD/CAM rendszer grafikus felhasználói felületének és adatbázis-szerkezetének tervezésén és kifejlesztésén. 1989 óta a Kandó Kálmán Műszaki Főiskola, Matematikai és Számítástechnikai Intézetének dolgozója, adjunktus. Oktatási területei: robotika, robotlátsó; képfeldolgozás, objektumazonosítás; mesterséges intelligencia kutatás-fejlesztés; bevezetés az informatikába; programozás, vizuális alapú programfejlesztő eszközök (Delphi). A Hochschule Bremen Elektrotechnika szakán vendégtanárként oktat és kutat 1993-1994-ben, években. Kutatási tevékenysége: robotlátsón alapuló álló és mozgó objektumok azonosítása, mozgó objektumok követése és elkapása pályatervezés képi információ alapján lépegető robot fejlesztése, mozgási stratégiák vizsgálata, pályatervezés ismert és részben ismert környezetben. A General Electric Lighting Tungfram Rt. több képfeldolgozás alapú minőségellenőrző rendszerében tervezőként és fejlesztőként vesz részt (1996-1999).



A kezében van a helyzet megoldása

Az új Nokia TETRA professzionális mobil rádió megsokszorozza a gyorsaság, a higgadság, a döntésképeség, a csapatmunka erejét.

A Nokia TETRA rendelkezik az Európai Távközlési Szabványügyi Intézet (ETSI) által specifikált új digitális technológia minden lényeges elemével. Számos helyzetben jó szolgálatot tesz a rövid hívásfelépülési idő, a hang- és adatátviteli lehetőség, a megosztható felhasználás, a hatékony frekvencia-kihasználás, a prioritási szintek beállításának lehetősége.

A Nokia a teljes rendszerek szállítása és a rádiós berendezések területén szerzett rendkívüli tapasztalatával és nemzetközi ügyfélszolgálati hálózatával segíti az Ön munkáját.



Nokia TETRA. Megbízható technológia egy megbízható cégtől.

NOKIA
CONNECTING PEOPLE

A Nokia nagy kapacitású GSM rendszere

A GSM mobiltelefonok területén robbanásszerű fejlődés ment végbe. Mára több, mint 100 millió ember használ GSM készüléket, 2005-re pedig számuk meghaladja az 1 milliárdot.

GSM - a legelterjedtebb telefon

A szolgáltatók bevételeiket nem pusztán előfizetők számának növelésével, hanem a telefonok használatának fejlesztésével tudják növelni. A mobil készülék nélkülözhetetlen elemévé válik életünknek és az emberek egyre többet telefonálnak - utazás közben, otthon, az irodában - tehát állandóan.

Emellett megjelennek a színen az olyan vezeték nélküli adatátviteli szolgáltatások is, mint az elektronikus posta (E-mail) és a GSM-távirat (SMS). Az adatátviteli kínálatot olyan szolgáltatások bővítik, mint a HSCSD és a WAP. A GPRS technológia bevezetésével pedig egy teljességgel új korszak kezdődik a vezeték nélküli adatátviteli felhasználói szokások területén.

A szolgáltatók üzleti tevékenysége bővülni fog - feltéve, hogy szolgáltatásaikat megfizethető áron tudják kínálni és rendelkeznek az igények kielégítéséhez szükséges hálózati kapacitással. A Nokia nagy kapacitású GSM rendszer bevezetése azt jelenti, hogy a GSM kapacitása új szintre emelkedhet, miközben a szolgáltatók csökkenthetik a hálózataik üzemeltetése során felmerülő költségeket.

Tízszeres kapacitás féláron

Az új Nokia MetroSite használatával a szolgáltatók tízszeres kapacitást építhetnek ki, összehasonlítva a hagyományos makrocellás hálózatokkal. Ráadásul, mindez fele annyiba kerül, mint a versenytársat jelentő mikrocellás rendszer.

A Nokia MetroSite megoldás csökkenti a bázisállomás telepítési költségeit és időtartamát is. A megoldás részeként kínált innovatív, az 58 GHz-es frekvenciasávon működő hozzáférési átviteltechnikai rendszer teljességgel új telephely-kiépítési gyakorlatot tesz lehetővé. Az összeköttetés azonnal megteremtődhet, közvetlenül a berendezések telepítése után.

Kétszeres kapcsoló központi teljesítmény

A Nokia DX 200-as mobil központ termékcsalád legújabb tagja, a DX 200i-sorozat feldolgozási teljesítménye több, mint kétszerese a korábbi termékeknek, miközben mérete csökkent. Az MCSi akár 400 ezer előfizetőt is képes kezelni, még azt feltételezve is, hogy minden, a hálózatban létrejövő hívás intelligens hálózati szolgáltatást is igényel. A hálózati elemek számának minimálisra csökkentése révén a DX 200i sorozat jelentős megtakarításokat eredményezhet a szolgáltatóknak.

A Nokia DX 200i sorozat teljeskörűen kompatibilis a korábbi DX 200-as mobil központokkal - ezért zökkenőmentesen beilleszthetők a már meglévő hálózatokba. A szolgáltatók azonos szolgáltatásokat nyújthatnak hálózataikon belül mindenhol és maximalizálhatják a befektetéseik hasznos élettartamát.

Bizonyos hálózatok egyszerűen jobban működnek

A Nokia új, költséghatékony berendezéseinek köszönhetően a szolgáltatók tovább csökkenthetik üzemeltetési költségeiket. A hálózat gyors kiépítése és üzembe helyezése céljából a Nokia hatékonyabb telepítési és üzemeltetési folyamatokat dolgozott ki.

A tervezési szolgáltatások a legjobb mikrocellás, kapcsolóközponti és átviteltechnikai megoldásokon alapulnak. A Nokia ügyfelei rendelkezésére áll a meglévő hálózatok átalakítása és optimalizálása során is.

A Nokia által kínált integrált hálózattervezési, adattárolási, valamint távvezérelt letöltést lehetővé tevő eszközök segítik a szolgáltatókat a gyorsan fejlődő hálózat irányításában, miközben még a legösszetettebb, legnagyobb kapacitású GSM hálózatban is magasabb hatékonyságot érhetnek el.

A Nokia új, nagy kapacitású rendszere természetesen minden GSM sávban, vagyis 900 és 1800 MHz frekvencián is a szolgáltatók rendelkezésére áll.

Hozzon ki többet GSM hálózatából!

NOKIA
CONNECTING PEOPLE

