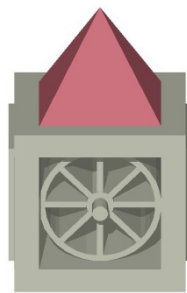


# VILLAMOSSÁGTAN



# VILLAMOSSÁGTAN

Bartha István



TERC Kft. • Budapest, 2013

© Bartha István, 2013

Kézirat lezárva: 2013. január 21.

ISBN 978-963-9968-73-8

Kiadja a TERC Kereskedelmi és Szolgáltató Kft. Szakkönyvkiadó Üzletága, az 1795-ben alapított Magyar Könyvkiadók és Könyvterjesztők Egyesülésének a tagja

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség  
www.ujszecsenyiterv.gov.hu  
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kiadásért felel: a kft. igazgatója  
Felelős szerkesztő: Lévai-Kanyó Judit  
Műszaki szerkesztő: TERC Kft.  
Terjedelem: 8,5 szerzői ív

# TARTALOMJEGYZÉK

<b>1</b>	<b>AZ ELEKTRODINAMIKA ALAPTÖRVÉNYEI</b>	<b>11</b>
1.1	AZ ELEKTROMOS TÖLTÉS	11
1.2	AZ ELEKTROMOS TÉRERŐSSÉG	11
1.3	MAXWELL-EGYENLETEK [2]	13
1.3.1	A Maxwell-egyenletek kvalitatív ismertetése	13
1.3.2	A lokális, globális és verbális Maxwell-egyenletek	15
1.3.3	Az elektrodinamika felosztása	17
1.4	A VILLAMOS TERET JELLEMZŐ FIZIKAI MENNYISÉGEK	17
1.5	VILLÁMVÉDELEM	20
1.5.1	A túlfeszültség fogalma	20
1.5.2	Belső eredetű túlfeszültségek	21
1.5.3	Külső, légköri eredetű túlfeszültségek	21
1.5.4	A villám- és túlfeszültségvédelem jelentősége	22
1.5.5	Külső villámvédelem	22
1.5.6	Belső villámvédelem és túlfeszültség-védelem	23
1.6	LPZ (LIGHTNING PROTECTING ZONE) VILLÁMVÉDELMI ZÓNÁK	24
1.6.1	Miért kell három fokozatú védelmet beépíteni?	24
1.7	TÚLFESZÜLTÉG VÉDELMI KÉSZÜLÉKEK ÉS ESZKÖZÖK [4]	26
1.7.1	Szikraköz	27
1.7.2	Nemesgáztöltésű túlfeszültség-levezető	28
1.7.3	Félvezető alapú túlfeszültségvédelmi eszközök	28
1.7.4	Túlfeszültségvédelmi kombináció	29
1.8	AZ ÉPÜLETEK VILLÁMVÉDELMI CSOPORTOSÍTÁSA [5]	30
1.8.1	Rendeltetés szerinti csoportok	31
<b>2</b>	<b>STATIKUS ÉS STACIONÁRIUS TEREK</b>	<b>33</b>
2.1	STATIKUS ELEKTROMOS TÉR	33
2.1.1	Coulomb-törvény	33
2.1.2	Kapacitás, kondenzátorok	34
2.1.3	Sorosan és párhuzamosan kötött kondenzátorok	38
2.2	A POTENCIÁL ÉS A FESZÜLTÉG	40
2.2.1	Villamos dipólus	42
2.2.2	Vezető anyagok	44
<b>3</b>	<b>ALAPEGYENLETEK</b>	<b>46</b>
3.1	OHM-TÖRVÉNY	46
3.1.1	Integrális Ohm törvény	46
3.1.2	Differenciális Ohm törvény	48
3.1.3	Kontinuitási egyenlet	49
3.1.4	Kirchhoff I. törvénye	49
3.1.5	Kirchhoff II. törvénye	51
<b>4</b>	<b>EGYENÁRAMÚ HÁLÓZATOK</b>	<b>52</b>
4.1	FESZÜLTÉGOSZTÓ	52
4.2	WHEATSTONE-HÍD	53
4.3	ÁRAMOSZTÓ	54
4.4	SZUPERPOZÍCIÓ TÉTELE	55

<b>5</b>	<b>ÖSSZETETT HÁLÓZATOK.....</b>	<b>57</b>
5.1	TEKERCS VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ VISELKEDÉSE (INDUKTIVITÁS) .....	57
5.2	KONDEZÁTOR VÁLTAKOZÓ ÁRAMÚ VISELKEDÉSE.....	58
5.3	ELLENÁLLÁS, TEKERCS, KONDEZÁTOR SOROS KAPCSOLÁSA .....	59
5.4	ELLENÁLLÁS, TEKERCS, KONDEZÁTOR PÁRHUZAMOS KAPCSOLÁSA .....	62
<b>6</b>	<b>HÁLÓZATI EGYENLETEK [16] .....</b>	<b>65</b>
6.1	HÁLÓZATOK HIBAMENTES ÜZEMÁLLAPOTÁNAK JELLEMZŐI.....	65
6.1.1	<i>Villamos hálózatok helyettesítése, hálózatszámítások.....</i>	65
6.1.2	<i>A vezetéken történő teljesítményáramlás számítása.....</i>	66
6.1.3	<i>A fogyasztó felvétele impedanciaként.....</i>	67
6.1.4	<i>A fogyasztó állandó árammal való leképzése.....</i>	69
6.2	TELJESÍTMÉNYÁTVITEL SZABADVEZETÉKEN .....	69
6.2.1	<i>A szabadvezeték természetes teljesítménye.....</i>	70
6.2.2	<i>A természetes teljesítménytől eltérő teljesítmény-átvitel jellemzése.....</i>	72
6.3	HÁLÓZATOK VILLAMOS MÉRETEZÉSE.....	74
6.3.1	<i>A vezeték méretezés általános szempontjai .....</i>	74
6.4	TÁVVEZETÉK AZ ENERGIARENDSZERBEN .....	76
6.4.1	<i>Szabadvezetékek szerkezeti elemei .....</i>	76
6.4.2	<i>Szigetelt szabadvezeték.....</i>	84
6.5	KÁBELEK ALKALMAZÁSA .....	84
6.5.1	<i>A kábeltípusok fejlődésének története.....</i>	85
6.6	VEZETÉKEK ÉS VÉDŐCSÖVEK .....	86
6.6.1	<i>Csupasz vezetékek.....</i>	87
6.6.2	<i>Szigetelt és kábelszerű vezetékek .....</i>	88
6.6.3	<i>Védőcsövek és szerelésük .....</i>	90
6.7	ACÉL VÉDŐCSÖVEK .....	91
6.7.1	<i>Acélpáncél védőcső .....</i>	91
6.8	SZIGETELT ÉS KÁBELSZERŰ VEZETÉKEK SZERELÉSE .....	92
6.8.1	<i>Szerelési módok .....</i>	92
6.9	HÁLÓZATOK HIBAÁLLAPOTAI.....	93
6.9.1	<i>A hibák fajtái, okai, gyakorisága .....</i>	93
<b>7</b>	<b>STACIONÁRIUS MÁGNESES TÉR SZÁMÍTÁSA.....</b>	<b>98</b>
7.1	A MÁGNESES TÉR JELENLÉTE .....	98
7.1.1	<i>A mágneses dipólus .....</i>	98
7.1.2	<i>A mágneses indukció.....</i>	98
7.1.3	<i>Mozgó töltésre ható mágneses erő .....</i>	99
7.1.4	<i>Áramvezetőre ható mágneses erő .....</i>	100
7.2	A MÁGNESES TÉR INTENZITÁSA ÉS GERJESZTETTSÉGE .....	101
7.2.1	<i>A mágneses fluxus.....</i>	101
7.2.2	<i>A mágneses indukció forrásmentessége .....</i>	102
7.2.3	<i>A gerjesztési törvény.....</i>	102
7.2.4	<i>A gerjesztési törvény alkalmazása.....</i>	103
7.3	AZ ÖN- ÉS KÖLCSÖNÖS INDUKTIVITÁS .....	104
7.3.1	<i>Vezető hurok önindukció együtthatója .....</i>	104
7.4	MÁGNESES TÉR ÉS ANYAG KÖLCSÖNHATÁSA.....	104
7.4.1	<i>A mágnesezettség vektora és a permeabilitás .....</i>	104
<b>8</b>	<b>ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK [8].....</b>	<b>105</b>

8.1	RÁDIÓHULLÁMOK .....	106
8.2	INFRAVÖRÖS SUGARAK.....	107
8.3	LÁTHATÓ FÉNY .....	107
8.4	ULTRAIBOLYA SUGARAK .....	107
8.5	RÖNTGENSUGARAK .....	108
8.6	GAMMASUGARAK.....	108
8.7	KOZMIKUS SUGARAK .....	108
8.8	AZ ELEKTROMÁGNESES ÖSSZEFÉRHETŐSÉG ALAPJAI (EMC) [12].....	108
8.8.1	<i>Az elektromágneses összeférhetőség meghatározása .....</i>	<i>109</i>
8.8.2	<i>Az elektromágneses összeférhetőség meghatározása .....</i>	<i>110</i>
8.8.3	<i>Reverzibilis és irreverzibilis zavarás .....</i>	<i>110</i>
8.8.4	<i>Az elektromágneses zavarás csatolásának elemi modellje .....</i>	<i>110</i>
8.8.5	<i>Jellemző zavarforrások .....</i>	<i>115</i>
<b>9</b>	<b>ELEKTROMÁGNESES TEREK SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREI.....</b>	<b>116</b>
9.1	ENERGIAFORRÁSOK.....	116
9.1.1	<i>Az alapenergia választás szempontjai .....</i>	<i>117</i>
9.1.2	<i>Megújuló energia .....</i>	<i>118</i>
9.2	VILLAMOS ENERGIA.....	118
9.2.1	<i>Szállítás .....</i>	<i>119</i>
9.2.2	<i>A villamosenergia-rendszer üzeme .....</i>	<i>123</i>
<b>10</b>	<b>TÁVVEZETÉKEK.....</b>	<b>125</b>
10.1	TÁPVONALAK TÍPUSAI ÉS JELLEMZŐI .....	125
10.1.1	<i>Csőtápvonalak .....</i>	<i>129</i>
10.2	A TÁVÍRÓ EGYENLETEK MEGOLDÁSA SZINUSZOS GERJESZTÉS ESETÉN .....	132
<b>11</b>	<b>IRODALOMJEGYZÉK.....</b>	<b>134</b>

## ALKALMAZOTT JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

<i>Az elektromágnesesség SI mértékegységei</i>			
Mennyiség neve	Mértékegység neve	Jele	Mértékegység
Áram	amper	<i>A</i>	A
Elektromos töltés	coulomb	<i>C</i>	A·s
Potenciál különbség	volt	<i>V</i>	J/C = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-1</sup>
Ellenállás, Impedancia, Reaktancia	ohm	$\Omega$	V/A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-2</sup>
Fajlagos ellenállás	ohm méter	$\Omega \cdot m$	kg·m <sup>3</sup> ·s <sup>-3</sup> ·A <sup>-2</sup>
Elektromos teljesítmény	watt	<i>W</i>	V·A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-3</sup>
Kapacitás	farad	<i>F</i>	C/V = kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup>
Dielektromos állandó	farad / méter	<i>F/m</i>	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> ·A <sup>2</sup> ·s <sup>4</sup>
Elektromos vezetőképesség	siemens	<i>S</i>	$\Omega^{-1}$ = kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup>
Fajlagos vezetőképesség	siemens/méter	<i>S/m</i>	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-3</sup> ·s <sup>3</sup> ·A <sup>2</sup>
Mágneses fluxus	weber	<i>Wb</i>	V·s = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-1</sup>
Mágneses mezősűrűség	tesla	<i>T</i>	Wb/m <sup>2</sup> = kg·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-1</sup>
Mágneses indukció	amper/méter	<i>A/m</i>	A·m <sup>-1</sup>
Mágneses ellenállás	amper (tekercs) / weber	<i>A/Wb</i>	kg <sup>-1</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>2</sup> ·A <sup>2</sup>
Induktancia	henry	<i>H</i>	Wb/A = V·s/A = kg·m <sup>2</sup> ·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-2</sup>
Fajlagos áteresztőképesség	henry/méter	<i>H/m</i>	kg·m·s <sup>-2</sup> ·A <sup>-2</sup>
Mágneses érzékenység	(mértékegység nélkül)	$\chi$	-

## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1.1 táblázat: Egyes épületek villámvédelmi besorolása rendeltetés szerint.....	32
6.1 táblázat: Fogyasztók minőségi viselkedése névlegestől eltérő üzemi feszültségen...	75
6.2 táblázat: Megengedett feszültségesés .....	75
6.3 táblázat: Sodronyszerkezetet alkotó huzalanyagok fizikai jellemzői .....	78
6.4 táblázat: Ötvözött alumínium vezetéksodronyok (AASC).....	81
6.5 táblázat: Alumínium vezetéksodronyok acélhuzal erősítéssel (ACSR).....	82
6.6 táblázat: Szabványos acélalumínium sodronyok jellemző adatai .....	83
6.7 táblázat: Szigetelt szabadvezeték szerkezete és megengedett legnagyobb terhelőárama.....	84
6.8 táblázat: Sínek anyagjellemzői .....	87
6.9 táblázat: Átívelési távolság, mm .....	88
6.10 táblázat: Védőcsövek méretei .....	90
6.11 táblázat: Kemény PVC csövek méretei .....	92
8.1 táblázat: A teljes elektromágneses spektrum .....	106
8.2 táblázat: A különböző villamos berendezések tönkretételéhez szükséges energia .	110
8.3 táblázat: A különböző csatolási módok alapvető tulajdonságai.....	111
9.1 táblázat: Energiaforrások csoportosítása .....	116
9.2 táblázat: Alapenergiák hatásai.....	117



## ÁBRÁK JEGYZÉKE

1.1 ábra: Egymagában álló, pozitív töltés ( $Q$ ) által létrehozott villamos tér szemléltetése villamos térerősségvonalakkal ( $\mathbf{E}$ ) .....	12
1.2 ábra: Időben változó mágneses tér által létrehozott villamos tér szemléltetése .....	13
1.3 ábra: Villamos tér az ionoszféra és a föld között .....	19
1.4 ábra: Statikus villamos tér a töltéssel rendelkező felhő és a föld között .....	19
1.5 ábra: Csatlakozószekrényben elhelyezett villámvédelmi eszközök .....	25
1.6 ábra: Nyomásvezérelt, zárt kúszószikraköz.....	27
1.7 ábra: Radiálisan és axiálisan öblített villamos ívtér .....	27
1.8 ábra: Túlfeszültség-levezető MOV varisztor.....	28
1.9 ábra: Túlfeszültség-levezető elnyomódióda.....	28
1.10 ábra: Túlfeszültség-levezető kombináció.....	29
2.1 ábra: Két pontszerű töltés közötti erőhatás.....	34
2.2 ábra: Potenciálkülönbség .....	35
2.3 ábra: Síkkondenzátor .....	36
2.4 ábra: Nagyfeszültségű, háromfázisú kábel vezetőerei, illetve a vezetők és a páncélozás közötti kapacitások.....	37
2.5 ábra: Kondenzátorok villamos rajzjelei.....	38
2.6 ábra: Kondenzátorok sorba kapcsolása .....	39
2.7 ábra: Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása .....	40
2.8 ábra: A $Q$ villamos töltés potenciális energiája a 0 potenciálúnak választott helyhez képest $U$ potenciállal rendelkező pontban.....	41
2.9 ábra: Villamos dipólus .....	42
2.10 ábra: Influenziagép .....	43
3.1 ábra: Az Ohm törvény levezetéséhez .....	47
3.2 ábra: Ellenállások párhuzamos kapcsolása.....	50
3.3 ábra: Ellenállások soros kapcsolása .....	51
4.1 ábra: Feszültségosztó kapcsolás.....	52
4.2 ábra: Áramosztó kapcsolás.....	54
4.3 ábra: Feszültség és áramgenerátor helyettesítése.....	55
5.1 ábra: Induktivitás .....	57
5.2 ábra: Az induktivitás feszültség-áram időfüggvénye .....	58
5.3 ábra: Kapacitás .....	58
5.4 ábra: RLC soros kapcsolása .....	59
5.5 ábra: Soros RLC vektorábra .....	60
5.6 ábra: Soros RLC impedancia karakterisztika.....	61
5.7 ábra: RLC párhuzamos kapcsolása .....	62
5.8 ábra: Párhuzamos RLC vektorábra .....	62
5.9 ábra: Párhuzamos RLC impedancia karakterisztika.....	63
6.1 ábra: Háromfázisú hálózat egyfázisú helyettesítése hálózatszámításhoz.....	66
6.2 ábra: Teljesítményáramlás számítása .....	67
6.3 ábra: A villamosenergia-átvitel üzemi jellemzői .....	69
6.4 ábra: Távvezeték helyettesítő vázlata: (a) egyszerűsített, (b) ideális.....	70
6.5 ábra: A vezetéken átvitt (természetes) teljesítmény .....	71
6.6 ábra: Ferranti-jelenség .....	73
6.7 ábra: A természetestől eltérő teljesítmény-átvitel.....	73
6.8 ábra: Burkolt szabadvezeték sodrony felépítése .....	80
6.9 ábra: Zárlatfajták szimbolikus jelölése .....	95

7.1 ábra: Mágneses dipólus .....	98
7.2 ábra: A mágneses dipólusra jutó forgatónyomaték .....	99
7.3 ábra: Mozgó töltésre ható erő.....	99
7.4 ábra: Az áramvezetésekre ható erő mágneses térben .....	100
7.5 ábra: Két áramvezető között fellépő erő.....	101
7.6 ábra: A fluxus, és a mágneses tér forrásmentességének értelmezése .....	102
7.7 ábra: A gerjesztési törvény értelmezése.....	103
7.8 ábra: Egyenes vezető mágneses erővonalai .....	103
8.1 ábra: Galvanikus csatolás .....	112
8.2 ábra: Induktív csatolás a) erőter modell, b) helyettesítő áramkör .....	112
8.3 ábra: Lassú és gyors, trapéz alakú áramok által létrehozott indukált áramok.....	113
8.4 ábra: Rövidrezárt hurok árnyékolásának hatékonysága az $R_2$ hurokellenállás különböző értékei esetén.....	115
9.1 ábra: A villamosenergia-rendszer .....	119
9.2 ábra: A hazai VER és irányításának hierarchiája .....	120
9.3 ábra: Sugaras hálózat .....	121
9.4 ábra: Hurkolt hálózat .....	121
9.5 ábra: Gyűrűs hálózat.....	122
9.6 ábra: Íves hálózat.....	122
9.7 ábra Körvezeték .....	123
9.8 ábra: a) egyoldalú; b) kétoldalú táplálás .....	123
10.1 ábra: Lecher és koaxiális távvezeték.....	125
10.2 ábra: A távvezetékszakasz modellje.....	126
10.3 ábra: A koaxiális távvezeték keresztmetszete és hullámimpedanciája .....	127
10.4 ábra: Mikroszalagvonal keresztmetszete.....	128
10.5 ábra: A távvezetékek gyakorlati jellemzése.....	128
10.6 ábra: A csőtápvonal módusainak helyettesítő távvezetékei.....	130
10.7 ábra: Négyszögletes és kör keresztmetszetű tápvonal .....	130
10.8 ábra: Kör keresztmetszetű csőtápvonal két gyakori módusának erővonalképe....	131
10.9 ábra: Négyszög keresztmetszetű csőtápvonal $TE_{10}$ módusának erővonalképe ....	132

# 1 AZ ELEKTRODINAMIKA ALAPTÖRVÉNYEI

## 1.1 Az elektromos töltés

Az elektromágneses jelenségek oka végső soron az, hogy egyes elemi részecskéknek (elektromos) töltésük van. Ez ugyanolyan alapvető más fogalmakra nem visszavezethető tulajdonságuk, mint pl. az, hogy tömegük van. Azt a tényt, hogy egyes elemi részecskéknek töltésük van, a töltött részecskék vagy testek egymásra gyakorolt hatásából állapíthatjuk meg. Kétfajta töltés van: a protonok töltését pozitívnak, az elektronokét negatívnak tekintjük (sok szempontból a fordított elnevezés szerencsésebb lett volna). Az egynemű töltések taszítják, a különeműek vonzzák egymást.

A töltés SI egysége a coulomb, jele C (Charles Augustin de Coulomb francia fizikus tiszteletére), amely az elemi töltés 6,241018-szorosa. A coulomb a definíciója szerint az egy amper áram esetén egy másodperc alatt a vezető keresztmetszetén átáramló töltésmennyiség. Kifejezései: As (amperszekundum) és az Ah (amperóra).

Átszámítása:  $1 \text{ A} \cdot \text{h} = 3600 \text{ C}$ .

Az elemi töltés megegyezik a proton elektromos töltésével. Jele  $e$ . Fizikai állandó, értéke:  $e = 1,60217487(40) \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

A töltés jele  $Q$ , a Nemzetközi Mértékegység-rendszerben (SI), egysége a coulomb (rövidítve: C), amit így jelölünk:

$$[Q] = 1 \text{ coulomb} = 1 \text{ C}. \quad (1.1)$$

## 1.2 Az elektromos térerősség

A nyugvó töltések egymásra erőhatást fejtenek ki. Ezt az (sztatikus) elektromos tér leírásával célszerű megismerni. Helyezzünk töltött testek közelébe egy kisméretű,  $Q$  töltésű testet. E testre erő hat, amelyet az  $F$  erővektorral írunk le. A tapasztalat szerint az  $F$  erő arányos a  $Q$  töltéssel; pl. a negatív töltésre ható erő ellenkező irányú, mint a pozitív töltésre ható.

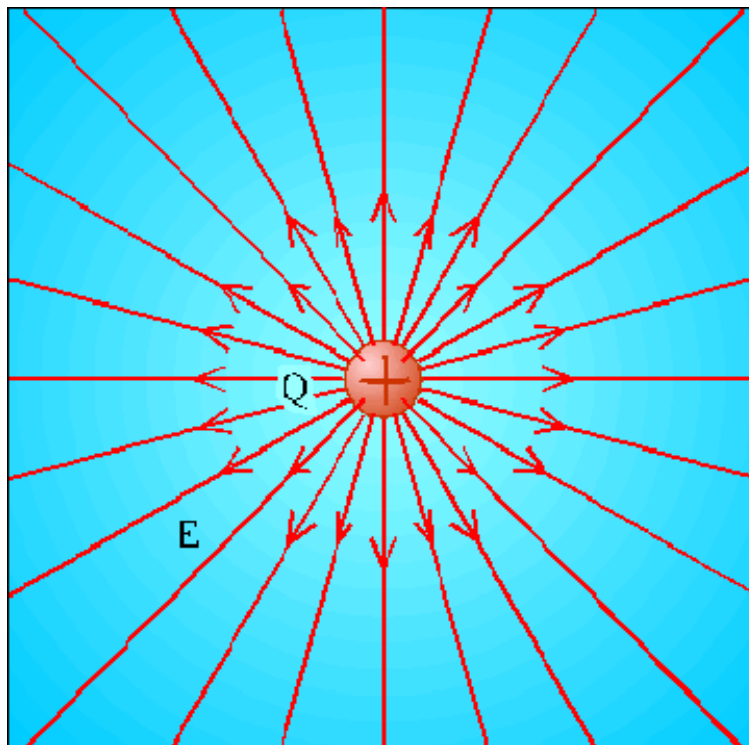
A töltésre ható erőt tehát az alábbi alakban adhatjuk meg:

$$F = QE. \quad (1.2)$$

Ez az összefüggés az elektromos térerősség  $E$  vektorát definiálja. A töltésre ható erő közvetlen oka eszerint az az elektromos tér, amelyet a többi töltés a  $Q$  próbatöltés helyén létrehoz. Az  $E$  teret kvantitatíven az elektromos térerősség vektora jellemzi nagyság és irány szerint. A térerősség általában minden pontban más. Az (1.2) összefüggés az erő nagysága és a térerősség nagysága közötti kapcsolatot fejezi ki, ahol a töltés mértékegysége  $[Q] = 1 \text{ C}$ , az erő mértékegysége  $[F] = 1 \text{ N}$ . Ez utóbbit kifejezhetjük  $1 \text{ N} = 1 \text{ J/m} = 1 \text{ VAs/m}$  alakban is, ezekből az elektromos térerősség egysége:

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{1\text{N}}{1\text{C}} = 1 \frac{\text{V}}{\text{m}}. \quad (1.3)$$

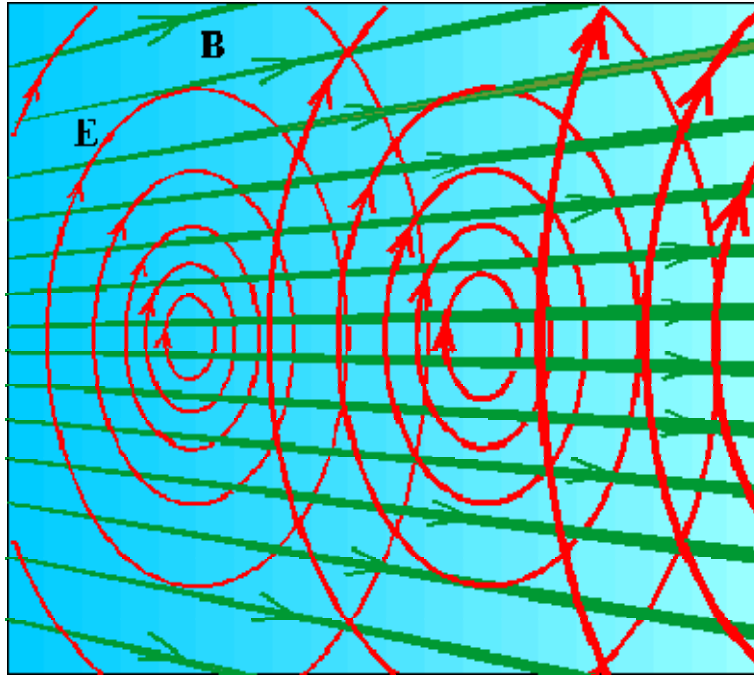
A villamos tér az elektromágneses tér egyik összetevője, ezért ahhoz hasonlóan az anyag villamos töltéssel rendelkező tulajdonsága következtében a világon jelen lévő fizikai jelenség. A villamos tér a mechanikai jelenségekre vissza nem vezethető, objektív, fizikai realitás, az anyag egyik formája. Időben változó villamos tér nem létezik mágneses tér jelenléte nélkül. A villamos tér önmagában (1.1 ábra), a mágneses tér jelenléte nélkül, csak akkor létezik, ha az őt létrehozó villamos töltés(ek) nyugalomban van(nak), illetve ha a villamos tér időben nem változik. Ekkor időben állandó, statikus villamos térről beszélünk.



1.1 ábra: Egymagában álló, pozitív töltés ( $Q$ ) által létrehozott villamos tér szemléltetése villamos térerősségvonalakkal ( $E$ )

Forrás: [1]

A villamos tér vektorterek segítségével írható le, a villamos tér fizikai tulajdonságait az elektromágneses tér részeként a Maxwell-egyenletek írják le.



1.2 ábra: Időben változó mágneses tér által létrehozott villamos tér szemléltetése (a növekvő mágneses teret a zöld színű indukcióvonalak (**B**), az általa létrehozott villamos teret a piros színű villamos erővonal-gyűrűk (**E**) szemléltetik

Forrás: [1]

### 1.3 Maxwell-egyenletek [2]

Az elektrodinamika axiómái a nevezetes Maxwell-egyenletek, amelyek az elektromágneses térmennyiségek között állapítanak meg összefüggéseket. Az elektrodinamika legegyszerűbb, rövid tárgyalására akkor nyílna mód, ha ezeket a Maxwell-egyenleteket már valahonnan jól ismernénk, és ezekből mint axiómákból kiindulva magyaráznánk meg a különféle elektromágneses jelenségeket. Mivel azonban ez nincs így, ezért az a feladatunk, hogy először megismerkedjünk a Maxwell-egyenletekkel, és megmutassuk, hogy ezek a már ismert elektromágneses törvényekből kikövetkeztethetők.

#### 1.3.1 A Maxwell-egyenletek kvalitatív ismertetése

A cél, hogy a közismert elektromos és mágneses kísérleti megfigyelésekből és törvényszerűségekből a Maxwell-egyenleteket mintegy „leszámazzassuk”. Az e közben alkalmazott megfontolások azonban minden bizonnyal érthetőbbek lesznek, ha nagyjából már előre ismerjük a kitűzött célt. Írjuk fel tehát a Maxwell-egyenleteket először csak anélkül, hogy mélyebb megértésükre törekednénk, mondhatni mintegy „ismerkedés-képpen”. A szűkebb értelemben vett Maxwell-egyenleteken az alábbi négy összefüggést szokták érteni:

$$\begin{aligned}
 \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}} & (I) \\
 \text{rot } \mathbf{E} &= -\dot{\mathbf{B}} & (II) \\
 \text{div } \mathbf{B} &= 0 & (III) \\
 \text{div } \mathbf{D} &= \rho & (IV)
 \end{aligned}
 \tag{1.4}$$

Ehhez járulnak még a következő definíciók:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (1.5)$$

és az anyagi egyenletek:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{E}) \quad \mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}, \quad (1.6)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}(\mathbf{H}) \quad \mathbf{M} = \mu_0 \chi_m \mathbf{H}, \quad (1.7)$$

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}(\mathbf{E}, \mathbf{E}^i) \quad \mathbf{j} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{E}^i), \quad (1.8)$$

valamint az elektromágneses tér erőhatását megadó, a mechanikával kapcsolatot létesítő egyenletek ( $\mathbf{f}$  az erőssűrűség,  $\mathbf{p}$  a teljesítménysűrűség):

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{E} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} \quad \mathbf{p} = \mathbf{j} \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{E}^i). \quad (1.9)$$

Először tekintsük csak a szűkebb értelemben vett négy Maxwell-egyenletet. Ezen egyenletekben  $\mathbf{H}$  a mágneses,  $\mathbf{E}$  pedig az elektromos térerősség vektora,  $\mathbf{B}$  a mágneses indukciót,  $\mathbf{D}$  az elektromos eltolást jelöli (mely utóbbit szokás elektromos megosztásnak és dielektromos indukciónak is nevezni),  $\mathbf{j}$  az elektromos áramsűrűség vektora, végül  $\rho$  az elektromos töltéssűrűség. Mielőtt részletesebb magyarázatba bocsátkoznánk, igen fontos kiemelni, hogy valamennyi változó térmennyiség. Ez azt jelenti, hogy nagyságuk és vektorok esetén az irányuk is egy adott időpontban attól függ, hogy a tér melyik pontjában tekintjük őket. E helyfüggés hangsúlyozására az alábbi jelölést használhatnánk:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{D}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}), \quad \mathbf{j}(\mathbf{r}), \quad \rho(\mathbf{r}). \quad (1.10)$$

Ezt a Maxwell-egyenletekben a rövidség kedvéért nem szoktuk alkalmazni. Ennek ellenére soha nem szabad elfeledkeznünk arról, hogy az elektrodinamika térelmélet, amely vektor- és skalárterekkel foglalkozik. Erre a Maxwell-egyenletekben szereplő vektoranalitikai operátorok (*rot* és *div*) is figyelmeztetnek, hiszen csak helytől függő vektortereknek lehet örvénye, vagy forrása. (Értelmetlen dolog lenne például egy gépkocsi, vagy egy anyagi pont sebességének a rotációját, avagy a divergenciáját kutatni, hiszen az nem térfüggvény. A Maxwell-egyenletek természetesen csak úgy nyernek fizikai értelmet, ha a benne szereplő mennyiségekre vonatkozó precíz mérési utasításokat is megadjuk. Ezeket a későbbiekben részletesen tárgyalni fogjuk, most csak annyit jegyzünk meg, hogy lehet ilyen mérési utasításokat megadni.

Az egyenletekben szereplő mennyiségeket tanulmányozva a következő gyakori kérdés, hogy miért van szükség az elektromos és a mágneses tér leírásához egy-egy vektortér helyett kettő-kettőre. A válasz erre az, hogy az anyag jelenléte befolyásolja a tereket és ezt a  $\mathbf{P}$  és az  $\mathbf{M}$  írja le, és a  $\mathbf{D}$  illetve a  $\mathbf{B}$  ezeket is magában foglalja. Az is fontos,

amint azt majd a későbbiekben látni fogjuk, hogy  $\mathbf{D}$  és  $\mathbf{B}$  közvetlenül mérhető mennyiségek. Ha azonban anyagi közeg nincs jelen, akkor a vákuumra érvényes összefüggések igen egyszerűek:

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} \quad \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad \mathbf{j} = \mathbf{0} \quad \rho = 0, \quad (1.11)$$

Az  $\varepsilon_0$  és,  $\mu_0$  a vákuum permittivitása és permeabilitása, jól ismert univerzális állandók ( $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  As/Vm,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am). Ezért a vákuumra vonatkozó Maxwell-egyenleteket az alábbi formában lehet felírni.

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{H} &= \varepsilon_0 \dot{\mathbf{E}} & \text{(I)} \\ \text{rot} \mathbf{E} &= -\mu_0 \dot{\mathbf{H}} & \text{(II)} \\ \text{div} \mathbf{H} &= 0 & \text{(III)} \\ \text{div} \mathbf{E} &= 0 & \text{(IV)} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Itt tényleg csak  $\mathbf{E}$  és  $\mathbf{H}$  szerepel, mint az elektromos és mágneses teret jellemző mennyiség.

Itt gyakran felvetnek egy kérdést, ami tulajdonképpen csak egy szemléletbeli probléma, és amit valahogy így szokás megfogalmazni: az elektromos és mágneses teret jellemző két-két mennyiség közül melyik az „igazi”: az  $\mathbf{E}$  vagy a  $\mathbf{D}$ , illetve a  $\mathbf{H}$  vagy a  $\mathbf{B}$ . Mint láttuk, vákuumban ezek között a mennyiségek között szigorú arányosság áll fenn, tehát az elektromágneses tér jellemzésére vákuumban elegendő egy elektromos térjellemező (az  $\mathbf{E}$  vagy a  $\mathbf{D}$ ) és egy mágneses térjellemező (a  $\mathbf{H}$  avagy a  $\mathbf{B}$ ) megadása. De melyikeket válasszuk? Nos, ilyen esetben az  $\mathbf{E}$  és a  $\mathbf{B}$  kiválasztása a célszerű, mert ezek a vektorterek szerepelnek az erőt megadó formulákban. Szokás ezért a  $\mathbf{D}$ -t és a  $\mathbf{H}$ -t ún. „segédmennyiségeknek” is tekinteni; ez azonban nem túl szerencsés szemlélet, mivel egy kicsit azt sugallja, hogy a segédmennyiségek nem olyan fontosak, nem olyan „igaziak”. A négy vektortérre egymástól független elvi mérési módszer áll rendelkezésünkre, és amikor az anyag kontinuum modelljét alkalmazzuk, az elektromágneses tér leírásához mind a négy térjellemezőre szükségünk van. E négy vektortérrel a Maxwell-egyenletek úgy írhatók fel, hogy az mind vákuumban, mind anyagi közegben érvényes. Tehát mind a négy teljes jogú „igazi” mennyiség, és érdemes így tekinteni rájuk.

### 1.3.2 A lokális, globális és verbális Maxwell-egyenletek

Az első négy Maxwell-egyenlet kétféle alakban fogalmazható meg. Amit felírtunk, az a tér egy tetszés szerinti pontjára vonatkozó, tehát helyi vagy lokális alak. Felületi, térfogati, illetve görbe menti integrálok, valamint a vektoranalízisből ismert Stokes- és Gauss-tételek felhasználásával írható fel ezen egyenletcsoport ún. globális alakja:

$$\begin{aligned}
\int_A \text{rot} \mathbf{H} \cdot d\mathbf{A} &= \int_A (\mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}}) \cdot d\mathbf{A} \xrightarrow{\text{Stokes}} \oint_G \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = I + I^{\text{elt.}} & \text{(I)} \\
\int_A \text{rot} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} &= -\int_A \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{A} \xrightarrow{\text{Stokes}} \oint_G \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r} = U^{\text{ind.}} = -\dot{\Phi}_B & \text{(II)} \\
\int_V \text{div} \mathbf{B} \, dV &= \int_V 0 \, dV \xrightarrow{\text{Gauss}} \oint_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 & \text{(III)} \\
\int_V \text{div} \mathbf{D} \, dV &= \int_V \rho \, dV \xrightarrow{\text{Gauss}} \oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A} = Q & \text{(IV)}
\end{aligned} \tag{1.13}$$

A lokális alakot szokás még a Maxwell-egyenletek differenciális, a globálisat pedig a Maxwell-egyenletek integrális formájának nevezni. Az egyenletek jelentését szavakban, azaz verbálisan is megfogalmazhatjuk, ez megértésük mellett a megjegyzésüket is segíti. **(I)** Az első egyenletet röviden „jobbkez-szabályként” jegyezhetjük meg, ha az áramtól átfolyt vezető mágneses terére gondolunk. Ebben az esetben amennyiben jobb kezünk hüvelykujja mutatja az áramirányt, akkor a vezetőt örvényszerűen körülölelő mágneses erővonalak irányát jobb kezünk további négy ujjja fogja mutatni. A differenciális alak precíz verbális megfogalmazása:

„A mágneses térerősség örvénytere ( $\text{rot} \mathbf{H}$ ) a tér egy pontjában egyenlő az ottani elektromos áramsűrűség ( $\mathbf{j}$ ) és eltolási áramsűrűség ( $\dot{\mathbf{D}}$ ) összegével”.

Az integrális alak pedig úgy fogalmazható meg, hogy „A mágneses térnek egy zárt  $G$  görbére vett cirkulációja ( $\oint_G \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r}$ ) egyenlő a  $G$  görbe által határolt  $A$  felületen átfolyó

elektromos ( $I = \int_A \mathbf{j} \cdot d\mathbf{A}$ ) és eltolási ( $I^{\text{elt.}} = \int_A \dot{\mathbf{D}} \cdot d\mathbf{A}$ ) áramerősségnek az összegével”.

**(II)** A második egyenletet szemléletesen „balkéz-szabálynak” is nevezhetjük. Ha ugyanis bal kezünk hüvelykujja mutatja a tér egy pontjában a mágneses indukció változásának az irányát, akkor bal kezünk további négy ujjja az örvényszerűen záródó elektromos erővonalak irányába mutat. A lokális alak szavakban: „Az elektromos térerősség örvénytere ( $\text{rot} \mathbf{E}$ ) a tér egy pontjában ellentétes előjellel egyenlő a mágneses indukció változási sebességével ( $\dot{\mathbf{B}}$ ) ugyanezen pontban mérve”.

A globális alak pedig a következő: „Az elektromos térerősségnek egy zárt görbére vett cirkulációja ( $\oint_G \mathbf{E} \cdot d\mathbf{r}$ ) ellentétes előjellel egyenlő a mágneses indukciónak a  $G$  görbe által

határolt  $A$  felületre vett fluxusának a változási sebességével ( $\dot{\Phi}_B = \int_A \dot{\mathbf{B}} \cdot d\mathbf{A}$ ).”

Kísérlet: mágnes mozgatása vezető illetve tekercs közelében.

**(III)** A harmadik egyenlet röviden azt jelenti, hogy valódi mágneses töltés nem létezik. Lokálisan: „A mágneses indukciótér forrassűrűsége ( $\text{div} \mathbf{B}$ ) a tér minden pontjában nulla.” Globálisan: „A mágneses indukció fluxusa bármely zárt felületre nézve ( $\Phi_B = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A}$ ) eltűnik.” Kísérlet: vaspap kirajzolja az egyenes vezető mágneses

erővonalait. Az erővonalak záródnak, tehát nincs forrásuk.

**(IV)** Végül a negyedik Maxwell-egyenlet szerint az elektromos eltolás forrása az elektromos töltés. Differenciális megfogalmazásban: „A dielektromos eltolás forrassűrűsége a tér bármely pontjában ( $\text{div} \mathbf{D}$ ) egyenlő az ott mérhető elektromos töltéssűrűséggel ( $\rho$ ).” Ugyanez integrális formában: „A dielektromos eltolás terének



bármely zárt A felületre vett fluxusa ( $\oint_A \mathbf{D} \cdot d\mathbf{A}$ ) egyenlő a zárt felület belsejében található töltések összegével ( $Q = \int_V \rho dV$ ).” Kísérlet: gríz ricinusolajban. Erővonalak a pozitív töltéstől indulnak ki és a negatív töltésekben végződnek.

### 1.3.3 Az elektrodinamika felosztása

Az elektrodinamika jelenségeit leíró összefüggéseket tehát a Maxwell-egyenletekből kiindulva vezethetjük le. Bizonyos speciális esetekben azonban a Maxwell-egyenletek jelentősen egyszerűsödhetnek. Erre az nyújt módot, hogy a jelenségek időbeli lefutására egyes esetekben egyszerűsítő feltételekkel élhetünk. Az elektrodinamika fejezeteit ezen egyszerűsítő feltételek szerint szokás osztályozni.

Ha időben állandó jelenségeket vizsgálunk, és elektromos áram sincs, akkor sztatikáról beszélünk. A Maxwell-egyenletekben ekkor valamennyi időderivált és az elektromos áramsűrűség is zérussal tehető egyenlővé. Ez a Maxwell-egyenletek jelentős egyszerűsödésén túl még azt is eredményezi, hogy ekkor az elektromos és mágneses térjellelmzők közötti kapcsolat megszűnik (hiszen ez a kapcsolat e térjellelmzők változási sebességén keresztül jön létre). Vagyis az elektrodinamika sztatika fejezete két egymástól látszólag független alfejezetre bomlik: az elektrosztatikára és a magnetosztatikára.

Ha fenntartjuk a térjellelmzők időbeni állandóságára vonatkozó kikötésünket, de megengedjük az időben állandó (stacionárius) elektromos áramot, akkor a stacionárius terek és az egyenáramok elméletéhez jutunk.

Újabb, gyakorlatilag fontos eset, amikor a mágneses indukció időben változik, de az elektromos eltolás változási sebessége (az eltolási áram sűrűsége) elhanyagolható az elektromos áramsűrűség mellett. Ekkor a kvázistacionárius terek egyenleteihez jutunk, amelyek a váltakozó áramok leírásában nyernek fontos gyakorlati alkalmazást.

Végül a gyorsan változó terek elmélete a Maxwell-egyenletek teljes rendszerével dolgozik, bár bizonyos egyszerűsítések természetesen itt is előfordulhatnak. (Például az elektromágneses hullámok tárgyalásánál jelentős könnyebbséget jelent, ha vákuumbeli terjedést kívánunk leírni.)

Az elektrodinamika szokásos felosztása tehát:

$$\text{Elektrosztatika: } \mathbf{j} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{0}. \quad (1.14)$$

$$\text{Magnetosztatika: } \mathbf{j} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{0}. \quad (1.15)$$

$$\text{Stacionárius terek és egyenáramok: } \mathbf{j} \neq \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{B}} = \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{0}. \quad (1.16)$$

$$\text{Kvázistacionárius terek és váltóáramok: } \mathbf{j} \neq \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{B}} \neq \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{D}} = \mathbf{0}. \quad (1.17)$$

$$\text{Gyorsan változó terek és elektromágneses hullámok: } \mathbf{j} \neq \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{B}} \neq \mathbf{0}, \quad \dot{\mathbf{D}} \neq \mathbf{0}. \quad (1.18)$$

## 1.4 A villamos teret jellemző fizikai mennyiségek

A villamos teret az elektromágneses teret is jellemző mennyiségek egy része jellemzi. Ezek a következők:

- a villamos térerősség vektor (jele:  $\mathbf{E}$ ), amely a villamos teret annak a villamos töltésekre kifejtett erőhatása alapján jellemzi a tér pontjaiban;

- a villamos eltolási vektor, más néven villamos indukció (jele:  $\mathbf{D}$ ), amely a töltésszétválasztó képessége alapján jellemzi a villamos teret annak minden pontjában.

A villamos tér a fenti két térjellemező vonalaival, a villamos térerősségvonalakkal (vagy erővonalakkal) és a villamos eltolási vonalakkal szemléltethető.

A térjellemezőkből származtatott mennyiségek:

- a villamos térerősségfluxus ( $\Phi_E$ );
- a villamos eltolási fluxus ( $\Phi_D$ );
- a potenciál és a feszültség ( $U$ );
- az energiasűrűség ( $w_e$ );
- a kapacitás ( $C$ ).

Az anyagnak (közegnek) a villamos teret előidéző, illetve annak jellemzőit befolyásoló tulajdonságaira vonatkozó mennyiségek:

- a villamos töltés ( $Q$ );
- a villamos permittivitás vagy dielektromos térállandó ( $\epsilon$ );
- villamos szuszceptibilitás ( $\kappa$  vagy  $\chi$ ).

A villamos tér számos fizikai és kémiai jelenség okozója. Ilyen kémiai jelenség például az atomok ionkötése, amely során az egyik atom egy vagy több elektronja a másik atom elektronállományába kerül át, és az így kialakult, eredő villamos töltéssel rendelkező ionok között azok vonzó hatása hozza létre a kötést.

Mindennapjaink során gyakran tapasztaljuk a villamos tér jelenlétét. Találkozunk például annak villamos töltésekre kifejtett erőhatásával. A műszálat tartalmazó pulóvert vagy más ruhadarabot magunkról levéve, az hozzátapad arra a ruhára, amelyről lehúztuk; a televízió vagy a számítógép képernyője magához vonz kisebb papírdarabokat és az előzőeken kívül számos, más példát is említhetnénk még.

Életünk villamos térben zajlik, mivel a légkör felső rétegében elhelyezkedő, pozitív töltéseket tartalmazó ionoszféra és a föld között állandó villamos tér van jelen. Az ennek következtében a környezetünkben jelen lévő statikus villamos tér a föld felszínén 100–200 V/m körüli térerősségű.

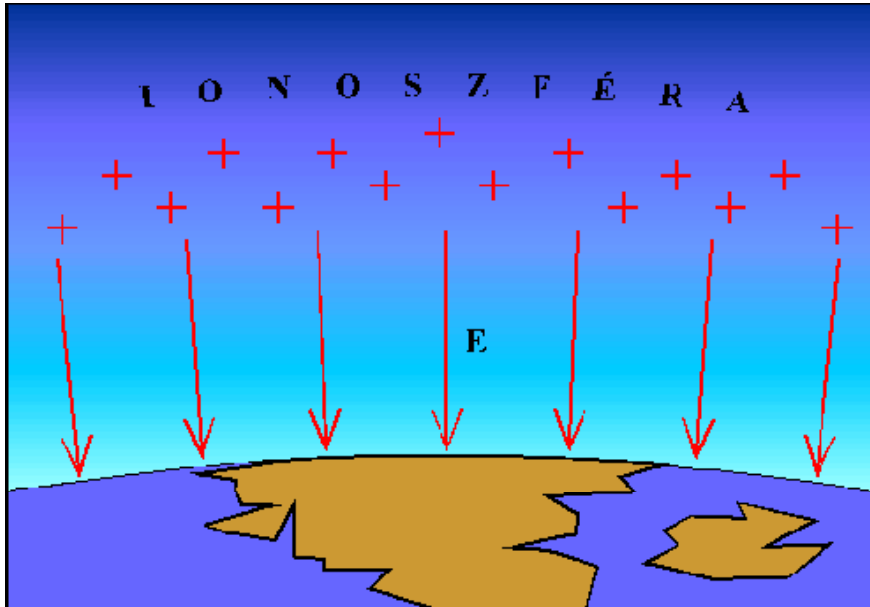
A villamos térrel gyakrabban találkozunk olyan esetekben, amikor a töltések szétválása egyes szigetelő anyagú tárgyakon olyan mértékű, hogy azok egymáshoz közelítésekor bizonyos távolságban a levegő a nagy villamos térerősség miatt vezetővé válik. Ekkor következik be az átütés, a levegő – amely szigetelőanyag – szigetelőképességének letörése. A folyamat rövid idő alatt zajlik le, és bekövetkezésével annak okozója, a korábban létrejött statikus villamos tér (vagy annak egy része) meg is szűnik. A levegő átütése során a töltések természetesen mozgásban vannak, tehát mágneses tér is jelen van, létrejöttét azonban a statikus villamos tér idézte elő, ezért érdemel ez a jelenség említést ebben a fejezetben.

Villamos szikrát előidéző statikus villamos tér alakul ki például, ha szigetelő anyagú padlón gyalogolunk, vagy műszálas ruhát dörzsölünk. Ez a folyamat az elektrosztatikus feltöltődés. Az átütés előtt a két egymáshoz közelítő tárgy között több ezer voltos feszültség is lehet.

A töltések szétválása a legnagyobb mennyiségben a légkörben zajlik le bizonyos körülmények között, amelynek következménye az általunk tapasztalható legnagyobb szikra, a villám. A száz méteres nagyságrendbe eső villámszakaszok létrejöttéhez sok millió volt feszültség szükséges. Zivatar esetén a föld felszíne közelében is néhány 10 000 V/m lehet a villamos térerősség.

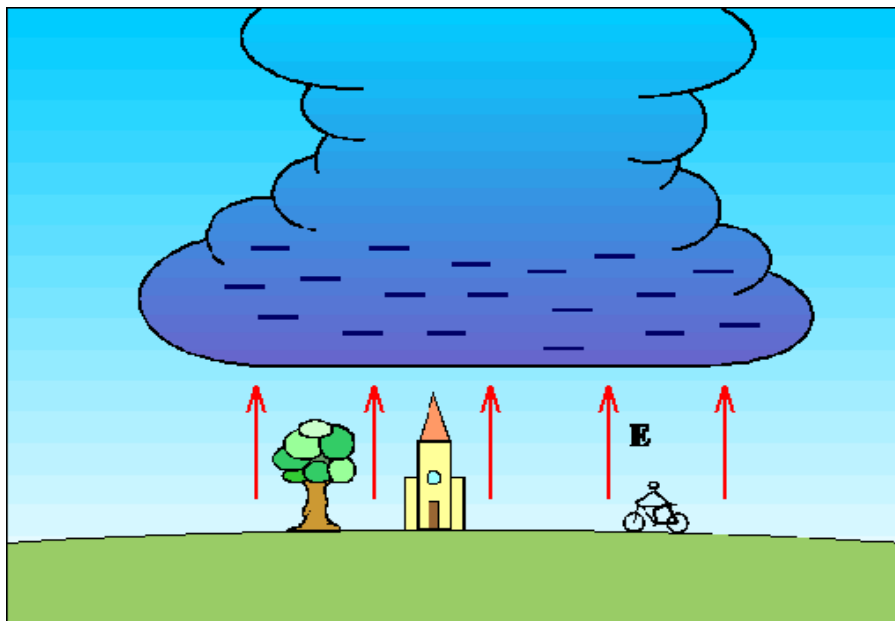
Szintén a statikus villamos tér okozza a részleges kisüléseket is, amelyek akkor jönnek létre, ha valamely, töltéssel rendelkező tárgy közelében a nagy térerősség miatt a levegő vezetővé válik, de a távolban elhelyezkedő vezető tárgyak felé a térerősség már kisebb és így azokig nem alakul ki vezető csatorna.

Ilyen részleges kisülés például a tengerészek által ismert szent Elmo tüze, ami a hajók árbócának csúcsánál alakul ki. Gyakrabban tapasztaljuk a jelenséget nagyfeszültségű távvezetékek alatt elhaladva, ahol, különösen párás időben, a periodikusan fellépő koronakisülés hanghatását, zúgását tapasztalhatjuk. A koronakisülés a feszültség abszolút csúcértékéhez közeli időpontokban lép fel. A hangjelenség alapharmónikus frekvenciája, 100 Hz.



1.3 ábra: Villamos tér az ionoszféra és a föld között

Forrás: [1]



1.4 ábra: Statikus villamos tér a töltéssel rendelkező felhő és a föld között

Forrás: [1]

A villamos tér átütést okozó hatása a hétköznapi életben, a legtöbb esetben káros. A lehúzott pulóver vagy a kilincs és a bőrünk között létrejövő szikra csupán kellemetlen, de ha ez például egy benzinkútnál következik be a kanna és az abba benzint betöltő pisztoly között, annak súlyos következményei lehetnek. Az elektrosztatikus feltöltődések szikra létrejötte nélkül is tönkretelhetnek az érzékeny elektronikai áramköröket.

## 1.5 Villámvédelem

Magyarországon a villámcsapások száma átlagosan négyzetkilométerenként évente legalább kettő. Az épületeket és vagyontárgyakat ért villámcsapások a hazai biztosítótársaságok adatai szerint a nem megfelelő villámvédelem, vagy a villámvédelem hiánya miatt évente több száz millió forint villámkárt okoznak! Ennél sokkal jelentősebbek azonban azok a pótolhatatlan károk, melyeket a másodlagos villámhatások okoznak. A másodlagos hatás abból adódik, hogy a villám elektromágneses erőtere és ennek időbeni gyors változása feszültséget indukál pl. a villámhárító szerkezet levezetőjének közelében húzódó elektromos vezetékben, így a lefutó villámáram egy indukciós hurokban akkora feszültséget indukál, amely tönkretelheti az erre érzékeny elektromos készülékeket (pl. televízió, számítógép, telefon stb.). Szerencsétlenebb esetekben ezek a készülékek tüzet is okozhatnak. Másodlagos hatások több százszoros gyakorisággal jelentkeznek, mint a közvetlen villámcsapások, mert a villámtalppont (a villámcsapás helye) köré rajzolható több kilométeres hatósugarú kör felületével arányosan megnő a romboló hatás gyakorisága! Ezért csak olyan túlfeszültségvédelem képes megvédeni az épületen belül üzemelő elektronikus berendezéseket az elektromágneses villámimpulzus hatásokkal szemben, amely közvetlen villámcsapás esetén is az EMC szabványban előírt határértékek alá korlátozza az elektronikákra jutó túlfeszültség igénybevételeket (MSZ EN 62305-1:2011 „Villámvédelem. 1. rész: Általános alapelvek” és MSZ EN 62305-4:2011 „Villámvédelem 4. rész: Villamos és elektronikus rendszerek építményekben”).

### 1.5.1 A túlfeszültség fogalma

Túlfeszültség a villamos elosztóhálózatokban illetve berendezésekben fellépő, a legnagyobb megengedett üzemi feszültség csúcsértékét meghaladó feszültség, amely nagyságától, jel alakjától vagy hullámformájától, frekvenciájától és fennállásának időtartamától függően igénybe veszi a berendezés szigetelését. Az igénybevételek megítélésénél célszerű a hálózat legnagyobb feszültségéhez tartozó fázis feszültségéből

$(\frac{U_{vonali}}{3})$ , illetve az ehhez tartozó csúcsértékből  $(\frac{\sqrt{2}U_{vonali}}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}}U_{vonali})$  kiindulni.

Az üzemi feszültségből származó igénybevételnél az a követelmény, hogy a belső szigetelésnek az üzemi feszültség hatására nem szabad számottevő szigetelésromlást (öregedést) mutatnia. A külső szigetelések méretezésénél az elérendő cél pedig az, hogy az üzemi feszültséget a külső környezet (légköri hatások, szennyeződés) hatása alatt is el kell viselniük a szigeteléseknek. További feszültség igénybevételek már túlfeszültség formájában jelentkeznek. A túlfeszültségek keletkezési módjuk és időtartamuk szerint három csoportra oszthatók: belső eredetű túlfeszültségek, külső ún. légköri eredetű túlfeszültségek és elektrosztatikus feltöltődésből eredő túlfeszültségek, amelyeket a villamosenergia-elosztó rendszerhez viszonyítva szintén a külső eredetű csoportba lehet sorolni [4].

### 1.5.2 Belső eredetű túlfeszültségek

A belső eredetű vagy belső túlfeszültségeket a villamos hálózatokban bekövetkező hibák vagy a különböző célú kapcsolási folyamatok okozzák. Az MSZ EN 50160:2011 „A közcélú elosztóhálózatokon szolgáltatott villamos energia feszültségjellemzői” című szabvány szerint az átmeneti, hálózati frekvenciájú túlfeszültség az, amely a hálózat egy adott helyén viszonylag hosszú ideig fennáll. Az átmeneti túlfeszültségek általában kapcsolási műveletek vagy hibák következtében keletkeznek, azaz normál üzemviteli körülmények során is felléphetnek. Hasonló módon tartós túlfeszültségnek nevezzük a kapcsolat vagy hiba folytán fellépő, rendszerint alig vagy egyáltalán nem csillapodó periodikus túlfeszültséget. Ezeket a hosszabb időtartamú túlfeszültségeket nagyságuk, frekvenciájuk (amely az üzemi vagy annak valamely harmonikusuk lehet), időtartamuk és csillapodásuk paraméterei jellemzik.

Tartós túlfeszültségek fellépését elsősorban a következők válthatják ki:

- aszimmetrikus földzárlatok,
- hirtelen terhelésváltozások (hatásos és meddő teljesítmények egyaránt),
- rezonancia és ferrezonancia.

A szigeteléseket igénybe vevő túlfeszültségek következő csoportját a kapcsolási túlfeszültségek alkotják. Nagy frekvenciájú (néhány kHz) tranziens túlfeszültségek lépnek fel egyes esetekben az üzemi áram hirtelen megszűnésekor. Az MSZ EN 50160:2011 szerint ez az ún. tranziens túlfeszültség rövid idejű, periodikus vagy nem periodikus, általában erősen csillapított túlfeszültség, néhány ms vagy annál kisebb időtartammal.

Ilyen gyors áram megszűnést követő ún. kapcsolási túlfeszültségek várhatók:

- távvezetékek (kábelek) bekapcsolása, valamint visszakapcsolása zárlatvédelmi működést követően,
- zárlatok keletkezésekor és zárlatok megszüntetésekor,
- terhelés ledobásakor,
- kapacitív áramok megszakításakor,
- kicsi vagy mérsékelt nagyságú induktív áramok megszakításakor,
- olvadóbiztosítók kioldásakor [4].

### 1.5.3 Külső, légköri eredetű túlfeszültségek

A légköri eredetű túlfeszültségek a kialakulásukat tekintve a hálózattól független körülmények között jönnek létre, amely körülmény lényeges különbséget jelent a korábban tárgyalt belső túlfeszültségekhez képest. A légköri eredetű túlfeszültségeket kiváltó villámáramok nagysága a hálózati feszültségtől függetlenül alakulnak ki. Közvetlenül elsősorban a szabadvezetéseket és a légkábeleket veszélyeztetik. Így az állomások berendezéseit, a kapcsolókészülékeket is a szabadvezetésekről beérkező túlfeszültség hullámok veszélyeztetik. Továbbterjedő nagyságukat azonban a szabadvezetési szigetelések bizonyos mértékig behatárolják.

Légköri eredetű túlfeszültségek a következők szerint alakulhatnak ki:

- közvetlen villámcsapás a fázisvezetőbe,
- villámvédelmi árnyékolás céljából kialakított és leföldelt szerkezeteket (villámvédelmi felfogó rudak, védővezetők) érő villámcsapások levezetési árama hatására a földelési ellenálláson fellépő feszültségemelkedés a fázisvezető átütéséhez vezethet (ez az ún. visszacsapás),

- a szabadvezeték közelében becsapó villám illetve a levezetett villámáram hatására a vezetékben indukált feszültség alakul ki;
- elsősorban a közép- és kiefeszültségű hálózatokban jelent veszélyes mértékű túlfeszültség kialakulást [4].

#### **1.5.4 A villám- és túlfeszültségvédelem jelentősége**

Az informatika és a mikroelektronika gyors fejlődésének vívmányai sokkal könnyebbé és kényelmesebbé teszik életünket. A legkülönbözőbb ipari, gazdasági tevékenységek automatizálása, szervezése és a hatékony munkavégzés területén viszont nélkülözhetetlenek. Mindezen előnyök mellett azonban az elektronikus rendszerek üzembiztonsága és megbízhatósága szempontjából új függőségek és veszélyeztetések is kialakultak. Ez a villamos hálózatokkal átszótt világ a növekvő információátvitelével együtt a zavarokra és működéséhez szükséges adatátviteli, illetve távközlési hálózatok meghibásodásaira, üzemkieséseire igen érzékeny. Hosszabb ideig tartó meghibásodásuk akár katasztrófhelyzetet is előidézhet. Ahhoz, hogy ennek a súlyát és szükségességét fel tudjuk mérni, gondolatban 1-2 napra, vagy 1-2 hétre kapcsoljuk le az épület főkapcsolóját, vagy kapcsoljuk ki elektronikus eszközeinket. Képzeljük bele magunkat abba a helyzetbe, hogy az összes „elektronika”, még a szórakoztató elektronika is, másodlagos villámhatás miatt tönkrementek, és a számítógépeinkben tárolt adatbázis is elveszett. Az épület fűtése és vészvilágítása, telefon és biztonsági rendszere is működésképtelenné vált. Gyakorlati tapasztalatok szerint egy közeli villámcsapás is már sokkal gyakrabban tönkreteszi az elektronikus berendezéseket mérő és szabályozó rendszereket, számítógépeket, televíziókat, mintsem gondolnák. Ezen a helyzeten csak úgy lehet segíteni, ha szabványos, korszerű és hézagmentes külső és belső villámvédelmet, megfelelő többlépcsős túlfeszültségvédelmet létesítenek mind a villamosenergia-ellátó, mind a jelvezetési hálózatokon, és azokat rendszeresen, a szabványban előírt gyakorisággal ellenőrzik [3]!

#### **1.5.5 Külső villámvédelem**

Tűzvédelem szempontjából a külső villámvédelem nélkülözhetetlen! Ha nincsen villámhárító felszerelve az épületre, akkor a gyúlékony, tűzveszélyes anyagokból készített szerkezeteket egy közvetlen villámcsapás magas talpponti hőmérséklete, és a szétfröccsenő izzó anyagszemcsék tűzgyújtó hatása meggyújthatja és ennek következtében az épület leéghet. Ez azt jelenti, hogy kiefogyasztókra, családi házakra külső villámvédelmet csak abban az esetben nem kell felszerelni, ha az idevonatkozó szabvány megítélése szerint az épület kedvező természetes villámvédelmi adottságaira tekintettel azt nem írja elő. A környezet jelentős mértékben befolyásolja, hogy az épület milyen valószínűséggel kaphat közvetlen villámcsapást. A zárt beépítésű környezet, ahol az épületeket több oldalról is hasonló jellegű épületek veszik körül, egy-egy épület szempontjából a közvetlen villámcsapás veszélyét csökkenti. Az építési magasságok nem különböznek jelentősen, és nincs olyan, az átlagmagasságból kiemelkedő tereptárgy (pl. templomtorony) sem, amely növeli a közvetlen villámcsapás valószínűségét. A zárt beépítésnek az is előnye, hogy ilyenkor az (akár erősáramú, akár távközlési jellegű) hálózatra sok közeli fogyasztó csatlakozik, és így a villámáram közvetlen villámcsapás esetén is gyorsan megoszlik a csatlakozási pontok között. Ezeknél a házaknál elfogadható a túlfeszültség-védelmet 30-40 kA-es villámimpulzus levezetésére tervezni. A másodlagos villámhatásokkal szemben azonban ekkor is célszerű védeni az elektronikus berendezéseket. A külső villámvédelem feladata az, hogy közvetlen

villámcsapás esetén a villámbeccsapási talppontot károkozás mentesen a villámhárító felfogóján (a villámhárító csúcsa) képezze és a villámáramot, megfelelő keresztmetszetű és villamosan jól vezető áramúton (felfogó >>> levezető >>> földelő) biztonságosan levezesse a földbe. A levezető a villámhárítónak az a része, amelyik a felfogót megfelelő vezető keresztmetszettel összeköti a villámhárító földelővel. A villámhárító földelő-berendezés a villámhárítónak az a része, amely vagy közvetlenül, vagy betonba ágyazott vezetőként érintkezik a talajjal és a villámáramot levezeti a földbe. A villámvédelmi földelőt és az érintésvédelmi földelőt szabvány szerint az EPH (EgyenPotenciálra Hozó) főcsomópontban össze kell kötni egymással, ha a földelő 20 m-nél közelebb van. A földelő ellenállásának rendszeres ellenőrző mérése céljából külön mérő-csatlakozó helyeket kell kialakítani. A levezetett töltések azonban nem tudnak akadálytalanul szétáramlani a földben, mert a föld ellenállásába ütköznek. Ezt az ellenállást a villámvédelem a „földelő szétterjedési ellenállásának” vagy egyszerűen csak földelő ellenállásnak nevezi [3].

*Védővezető szerepe:*

A nagyfeszültségű távvezetéseket a teljes hosszukban védő vezetővel (védővezetőkkel) látják el. A közepfeszültségű távvezetőknek rendszerint csak az állomáshoz csatlakozó 800 – 1000 m-es részén van védővezető, hogy ezzel a túlfeszültséget a távvezeték szigetelési szintjének megfelelő értékre hozzák. A védővezetőt az állomásba általában bevezetik és ott hozzákötik az állomás földeléséhez. Ha a visszacsapás veszélye fennáll, akkor a védő vezetőt nem vezetik be az állomásba, csak az utolsó oszlopig, vagy a berendezéssel azonos feszültségre szigetelik.

*Visszacsapás problémája:*

Ha a villámcsapás a védővezetőt vagy a távvezeték oszlopot éri, a fázisvezetők szigetelőjét

$$U = 2U_f + I_v R_{fl} \quad (1.19)$$

feszültség veszi igénybe, ahol  $U_f$  a fázisfeszültség,  $R_{fl}$  a földelés lökőhullámú ellenállása és  $I_v$  a villámáram. A visszacsapás elkerüléséhez a szigetelő átívelő feszültségét ennél nagyobbra kell választani.

### **1.5.6 Belső villámvédelem és túlfeszültség-védelem**

Ismeretes, hogy a villámimpulzus mint elektromágneses zavarforrás olyan jelenség, amelynek során több MegaJoule energia szabadul fel. Ez a nagy energiájú elektromágneses impulzus a szabványelőírásoknak megfelelően megépített külső villámvédelem dacára az általa védett térrészekben belül üzemelő érzékeny elektronikus berendezések számára belső villámvédelem és túlfeszültség-védelem hiányában nem nyújt megfelelő védelmet, mert a villámkisülés különböző csatlások útján működési zavarokat és túlfeszültség-meghibásodásokat okozhat az elektronikus berendezésekben. Így időszzerűvé vált a közelmúltban a belső villámvédelem műszaki követelményeinek egységesítése, ezzel együtt az is, hogy a hálózatra kapcsolás feltételei az általános európai villamos biztonságtechnikai szabványoknak megfelelően, az elektromágneses összeférhetőség (EMC) követelményeinek megfelelő villám- és túlfeszültségvédelem új, megváltozott követelményeivel egészüljenek ki, azokkal összhangban legyenek. Az elektromágneses villámimpulzus elleni védelem szükségességével új épület tervezésekor, ill. meglévő épületbe telepítendő új információs rendszer tervezési szakaszában foglalkozni kell. A villámvédelem tervezésének koordinálása általában az épület

tervezőinek a felelőssége, együttműködve a villámvédelmi szakértőkkel. A belső villámvédelem az LPZ (Lightning Protecting Zone) 0/1 zónahatáron létesített villámáram-levezetőképes potenciálkiegyenlítő összecsatolások hézagmentes rendszere. Feladata a villámáram behatolásának megakadályozása a külső villámvédelem által védett térrészekbe. A külső villámvédelem, belső villámvédelem, az elektromágneses árnyékolás, a villámvédelmi egyen potenciálra hozás, és a túlfeszültségvédelem többlépcsős hézagmentes rendszere az LPZ villámvédelmi zónarendszerbe egyesítve alkotják az elektromágneses összeférhetőség (EMC) követelményeinek megfelelő villám- és túlfeszültségvédelem rendszerét [3].

## 1.6 LPZ (Lightning Protecting Zone) villámvédelmi zónák

Az elektromágneses villámimpulzus ellen védendő teret védelmi zónákra (LPZ) kell osztani, amelyekben meg kell határozni a különböző elektromágneses hatásoknak kitett térrészeket és az LPZ zónahatárokon ki kell jelölni a kapcsolódó védelmi pontokat. A zónákra az jellemző, hogy a zónahatárokon az elektromágneses jellemzőkben jelentős változás következik be. Az LPZ villámvédelmi zónák veszélyeztetettségét le lehet vezetni azokból a követelményekből, amelyeket az egyes elektromágneses összeférhetőségi (EMC) szabványok írnak elő.

**LPZ 0<sub>A</sub>** Az a védőzóna, amelyben direkt villámcsapások bárhol lehetségesek, ahol a berendezések közvetlen villámcsapásnak vannak kitéve, és ezért a teljes villámáramot kell vezetniük. Ebben a zónában az elektromágneses erőter csillapítatlanul létrejön.

**LPZ 0<sub>B</sub>** az a zóna, ahol a berendezések nincsenek közvetlen villámcsapásnak kitéve, de az elektromágneses erőter csillapítatlanul létrejön.

**LPZ 1** az a zóna, ahol a berendezések nincsenek közvetlen villámcsapásnak kitéve és a zónán belül az áram minden vezetőszerkezetben korlátozva van az 0<sub>A</sub> és a 0<sub>B</sub> zónához képest, továbbá az árnyékolástól függően az elektromágneses erőter is csillapított lehet.

**LPZ 2** és további magasabb rendű zónák. Ha még kisebb vezetési áramot és/vagy elektromágneses erőteret kell/lehet megengedni, további zónákat kell bevezetni. Az ezekkel szemben támasztott követelményeket a védendő rendszerre megengedett elektromágneses mikrokörnyezeti jellemzők határozzák meg. Általában, minél nagyobb a zóna sorszám, annál kisebbek az elektromágneses környezeti jellemzők határértékei. Családi házaknál a ház fala jelenti a 0/1 villámvédelmi zónahatárt és általában itt van elhelyezve a fogyasztásmérő és a földelő-szonda is. Villámvédelem szempontjából ez a legkedvezőbb eset, mert közvetlenül a 0/1 zónahatáron, a méretlen szakaszon ki lehet alakítani az EPH csomópontot és ide lehet csatlakoztatni a B fokozatú túlfeszültség levezetőt, amely a nagy energiájú túlfeszültség impulzusok levezetésére szolgál. Az, hogy ezek a berendezések a 0/1 zónahatáron vannak, emeli a védelem határfokát. Emellett a zónahatáron lehetnek még ezen kívül különböző szerelvények (pl. parabolaantenna, villamos és távközlési tetőtartó, biztonsági kamera stb.) amelyek a kábelezésükön keresztül az 1-es zónába, azaz a ház belsejébe vezethetik a villámáramot. A külső villámvédelem szakszerű kiépítésével javíthatunk a helyzeten, ha a szerkezet ezáltal védett térbe kerül. Csak ezek után lehet a védettséget megfelelő levezetők beépítésével növelni.

### 1.6.1 Miért kell három fokozatú védelmet beépíteni?

A kérdésre igen egyszerű a magyarázat: Villámcsapás esetén csak az első két védelmi fokozat („1” és „2”) beépítése nem elegendő, mert igaz, hogy a villámáramot képesek együttesen károsodás nélkül levezetni, de a második „2” osztályú védelem feszültség



határolási szintje még nem nyújt megfelelő védelmet az elektronikus tápegységek számára, így azok tönkremennének. Ezért szükség van harmadik fokozatként a „3” osztályú finomvédelemre. Tehát védelmet az energiaelosztó hálózaton is csak a szabványos, összehangolt, teljes körű, hézagmentes és bevizsgált háromlépcsős villám- és túlfeszültségvédelem biztosíthat. Ez természetesen érvényes az összes jelvezeteki és adatátviteli hálózatra is. (Kábeltelevízió, tv- és rádióantenna, telefon, fax, internet, riasztók stb.) Fontos a villámcsapáskor fellépő villámhatások elleni „villámvédelmi potenciálkiegyenlítés” létesítése a méretlen fővezeteki hálózaton a fogyasztásmérő előtt (EPH csomópont kialakítása), hiszen ez a túlfeszültségérzékeny elektronikus berendezések biztonságos védelmének nélkülözhetetlen feltétele. Mind az áramszolgáltatóknak, mind a fogyasztóknak ugyanis közös érdeke a túlfeszültségérzékeny berendezések biztonságos üzemeltetési feltételeinek a megteremtése és egy megkerülő villámáram út kiépítése. A hálózat hossza mentén, kívülről befele haladva az LPZ villámvédelmi zónahatárok átlépési pontjain potenciálkiegyenlítéseket kell létesíteni. Az első készülék az épület EPH főcsomópontján a fogyasztásmérő előtt beépített „1” osztályú (10/350  $\mu$ s) villámáram levezető fokozat. A második túlfeszültségvédő fokozat készülékei „2” osztályú 15 kA (8/20  $\mu$ s) varisztor kell legyenek. A „2” osztályú levezetőket mindig a fogyasztásmérő után lévő elosztószekrényekbe célszerű beépíteni (1.5 ábra). A védelem hatásfokát azonban jelentős részben a „3” fokozatú finomvédelmek és a gyengeáramú védelmi eszközök beépítése határozza meg, mely azonban komoly költségtöbblettel járhat. Ezért fontos annak eldöntése, hogy mely fogyasztókat mennyire kell védeni, és a védelmi rendszert költség és hatékonyság tekintetében hogyan lehet optimalizálni. A harmadik „3” osztályú, úgynevezett „finom” túlfeszültségvédelmi fokozatot az épületen belül mindig a védendő készülékek (tv, HI-FI torony, számítógép, fax stb.) közvetlen bemenetén kell beépíteni (SF Protector , DATA Protector, Fax Protector stb). Ezeket a védőkészülékeket mindenki saját maga egyszerű összedugaszolással beépítheti.



1.5 ábra: Csatlakozószekrényben elhelyezett villámvédelmi eszközök

Forrás: <http://villamvedelem.eu/>

*Fontos:*

Finomvédelmi eszköz működéséhez elengedhetetlen a védőföldelés, ezért csak földelt konnektorba kell csatlakoztatni.

Ahhoz, hogy a durva és a finom védelem megfelelően együtt tudjon működni, a „2” és „3” fokozat között legalább 10-12 m vezeték összekötésnek kell lenni. Kisebb távolság esetében a finom védelem könnyen tönkremehet, mert nem gyűjt be az előtte lévő védelmi fokozat. Ugyanez érvényes a „1” és a „2” fokozat közötti vezeték összekötésre. Ha az említett vezeték hossz nem biztosítható, akkor ún. műimpedanciát kell beépíteni a védelmi egységek közé.

Ahhoz, hogy a finomvédelem megfelelően hatásos legyen, közvetlenül a védendő berendezés elé kell beépíteni. A kettő között 2-3 m-nél nagyobb vezeték hossz nem lehet. Ellenkező esetben ezen a már nem védett vezetékszakszon a készülék tönkretételéhez is elegendően nagy feszültség indukálódhat a villámcsapás másodlagos hatásaként.

A telefon-, adatkommunikációs, és tv-kábelhálózatokat gyengeáramú védelemmel kell ellátni. Amely működésének feltétele az EPH hálózatra csatlakoztatás, ami a gyakorlatban elég nehezen kivitelezhető. Vannak azonban olyan erősáramú levezetők, melyek házába beépítik a gyengeáramút is, amely így a dugaszolóaljzat védőérintkezőjét használhatja. A vezeték épületbe történő belépési pontjánál telepítik a durvavédelmet, közvetlenül a készülék előtt pedig a finomvédelmet. Ezek a többlépcsős védelmek mindig fordított sorrendben működnek. Először mindig a legkisebb védelmi szintet biztosító „3” finomvédelem szólal meg, ezután a közepes „2” osztályú varisztor, majd végül a „1” osztályú villámáram levezető is, miközben a kapcsolás a „3” finomvédelem kimenetén a teljes működési idő alatt az EMC határérték alá korlátozza a feszültséget. Ez a működési mód igaz mind az energiaellátó hálózatra, mind a különböző jelvezeteki hálózatok többlépcsős rendszereire is. A villám- és túlfeszültségvédelem „A” fokozata az áramszolgáltató szabadvezetékén található, így szigorúan véve nem része a fogyasztó villámvédelmi rendszerének [3].

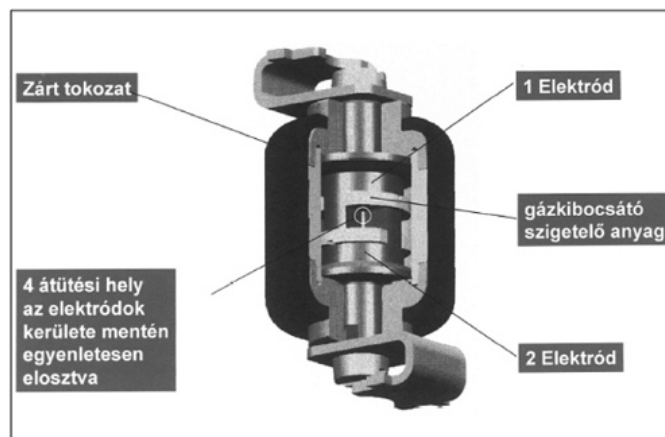
Az új OTSZ norma szerinti (MSZ EN 62305-1...4 szabvány szerinti) és normán kívüli (MSZ 274-1...4 szabvány szerinti) villámvédelmet különböztet meg. Az új norma szerinti villámvédelem kockázat számítását viszont kötelező jelleggel előírja.

## **1.7 Túlfeszültség védelmi készülékek és eszközök [4]**

A villamos kapcsolókészülékek nagy többségét alkotó szűkebb értelemben vett kapcsoló eszközök mellett megkülönböztetjük a túlfeszültség védelmi vagy túlfeszültség-korlátozó készülékeket. Ezek a túlfeszültség védelmi berendezések elsősorban feladatukban térnek el a többi készülékektől. Feladatuk, hogy rendellenesen nagy feszültségek, túlfeszültségek felléptekor alkalmasan kialakított szerkezetükkel működésbe lépjenek, és a túlfeszültségeket a berendezés többi része a szigetelésének védelme érdekében korlátozzák. A hálózaton fellépő feszültség igénybevételek és a hálózat, illetve egyes elemeinek szigetelés kiválasztása, méretezése és vizsgálata a szigeteléskoordinálás elvein nyugszanak. A szigeteléskoordinálás nyújt alapot ahhoz, hogy a készülékek számára a névleges feszültségből kiindulóan a hálózatban betöltött szerepüknek és beépítési helyüknek megfelelően előírjuk a szükséges próbafeszültségeket (ipari frekvenciájú próbafeszültség, lökő próbafeszültség, kapcsolási hullámú próbafeszültség).

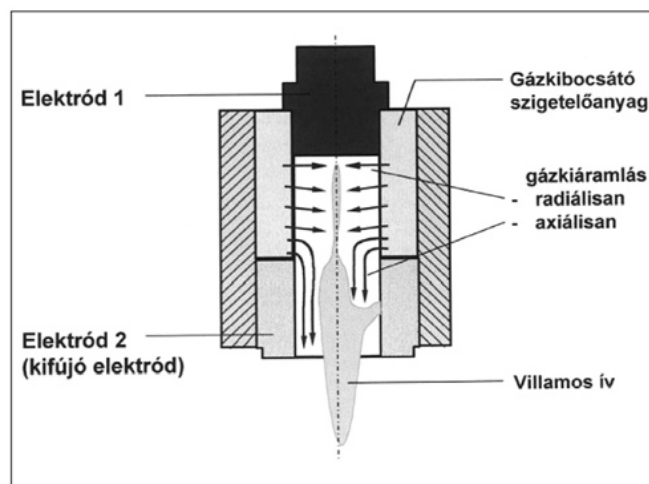
### 1.7.1 Szikraköz

A szikraköz a legegyszerűbb túlfeszültség védelmi eszköz. A hálózat és a föld közé kapcsolva léghözét úgy állítják be, hogy csak a hálózat névleges feszültségét jóval meghaladó túlfeszültség hatására üssön át. A szikraköz átütésével megszűnik a túlfeszültség (a föld felé levezetődik a túlfeszültséget létrehozó energia), de ezt követően a szikraközön földzárlati áram folyik tovább, amelyet a hálózat feszültségforrása táplál. Ívöltő szerkezet hiányában ez az áram csak akkor szűnik meg magától, ha nagysága legfeljebb néhány A értékű (pl. kompenzált hálózat egyfázisú földzárlati árama). Ilyen kicsi értékű áram előfordulási valószínűsége erősen korlátozott, mivel a középfeszültségű hálózatokban (ahol a földzárlati áramot kompenzációval csökkentik) általában több fázisban egyidejűleg lép fel túlfeszültség, és ütnek át a védelműl szolgáló szikraközök. A szikraköz ugyan hatásosan megszünteti a túlfeszültséget, de az átütésnél fellépő nagy meredekségű feszültségváltozás veszélyezteti a tekercselések (transzformátor, fojtótekercs, mérőváltók) szigetelését, mivel egyenlőtlen feszültségeloszlást okoz rajtuk, ezenkívül a kialakuló zárlati áram termikus és dinamikus hatása sem kívánatos. A megszólalási feszültség nagy szórása miatt közép- és nagyfeszültségen tartalék védelemként vagy mint koordináló szikraközként alkalmazzák (1.6 ábra).



1.6 ábra: Nyomásvezérelt, zárt kúszószikraköz

Forrás: <http://www.muszeroldal.hu/MMK/nr65/feher.html>



1.7 ábra: Radiálisan és axiálisan öblített villamos ívtér

Forrás: <http://www.muszeroldal.hu/MMK/nr65/feher.html>

### 1.7.2 Nemesgáztöltésű túlfeszültség-levezető

A nemesgáz (pl. argon, neon) töltésű túlfeszültség levezetők, valójában szikraközök a gázkisülés elvét használják ki. A gyújtó feszültség értékének túllépésekor (ez típustól függően 70...15 000 V) a hermetikusan lezárt kisülési térben ellenőrzött ív alakul ki néhány ns-on belül, amely a folyamatot beindító túlfeszültséget rövidre zárja. A kicsi ívfeszültség kivételesen nagy levezető képességet biztosít (max. 60 kA). A kisülés után a túlfeszültség-levezető kiolt és ellenállása a zavar nélküli üzemállapotra jellemző nagy értéket ( $> 10 \text{ G}\Omega$ ) veszi fel. A túlfeszültség levezető illetve szikraköz elvi felépítését a 1.7 ábra mutatja. A hermetikusan zárt, nemesgázzal (argon, neon) töltött kisülési teret egy üreges henger alakú szigetelő alkotja, amelynek két végén, egymással szemben helyezkednek el az elektródok. Az 1 mm-nél kisebb távolságra elhelyezett elektród felületeket emissziót elősegítő bevonattal látják el. Ez az aktiváló anyag lényegesen csökkenti az elektronok kilépési munkáját. A gyakorlatban döntő jelentőségű kérdés, hogy a túlfeszültség-levezetővel gyorsan növekvő feszültség (kb. 1 V/ms) esetén milyen védelmi szint érhető el. A túlfeszültség hatásos korlátozása miatt gyors megszólalás az igény, ezért a hengeres szigetelő belső felületére gyújtássegítőt hordanak fel.



1.8 ábra: Túlfeszültség-levezető MOV varisztor

Forrás: <http://kapcsolok-konnektor.hu/letoltesek/Elektronika-T%FAIfesz%FCIts%E9gv%E9delem%20bevezet%F5.pdf>



1.9 ábra: Túlfeszültség-levezető elnyomódióda

Forrás: <http://kapcsolok-konnektor.hu/letoltesek/Elektronika-T%FAIfesz%FCIts%E9gv%E9delem%20bevezet%F5.pdf>

### 1.7.3 Félvezető alapú túlfeszültségvédelmi eszközök

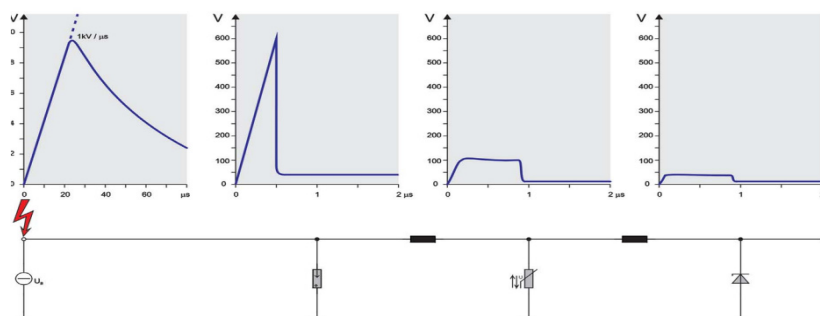
A túlfeszültségvédelembe beépíthető varisztorok (1.8 ábra) (MOV – Metal Oxid Varistor) feszültségfüggő ellenállások, fénoxidból (cinkoxid) készül tárcsa alakban. Valamivel a

névleges feszültségük fölött az ellenállásuk oly mértékben lecsökken, hogy áteresztőkké válnak. A túlfeszültség korlátozása megtörténik, amennyiben a varisztoron keresztül áram folyik. A varisztorok levezetési képessége a közepestől a magas szintig terjed. 40 kA – 8 kA nagyságrendű. A megszólalási idő 5 ns alatt van. A maradékfeszültség egy-értelműen alacsonyabb, mint a szikraközöknél. Az alacsonyabb védelmi szint következtében javított túlfeszültségvédelmet érhetünk el, és a táphálózatból járulékos áramkivétel nem történik. De a varisztorok sincsenek minden hátrány nélkül. Az öregedési jelenséget, azaz az ún. „hőmegfutást”, illetve védelmi karakterisztika változását és a viszonylag magas kapacitást is figyelembe kell venni ezen építőelemeknél. A varisztorok nagy kapacitása az áramkörökben nagy frekvenciákon zavaró lehet. Kb. 100 kHz-es frekvenciáknál a jelek csillapításával kell számolnunk. Ezért az adatátviteli berendezésekben történő alkalmazás nem javasolt.

Az elnyomódiódák (1.9 ábra) a zenerdiódákhoz hasonlóan működnek. Létezik egyirányú, és kétirányú kivitel. Az egyenáramú körökben gyakran „egyirányú” elnyomódiódákat alkalmaznak. Az elnyomódiódák azonban a hagyományos zenerdiódákkal szemben magas áramterhelhetőséggel rendelkeznek és jelentősen gyorsabbak. Az áramterhelhetőségük nem minden esetben olyan nagy. Ez az érték kisebb, mint 1800 W/ms. A szupresszordiódák rendkívül gyors megszólalási idővel rendelkeznek, amely a pikoszekundumos tartományban helyezkednek el. Az elnyomódiódák alacsony védelmi szintje is előnyös. Sajnos, az elnyomódiódák nem elhanyagolható saját kapacitással rendelkeznek. Emiatt a beépítésük során, a varisztorokhoz hasonlóan, magas frekvenciákon a csillapítási hatásukat figyelembe kell venni.

#### 1.7.4 Túlfeszültségvédelmi kombináció

Az egyes komponensek sorrendjéből adódik a kimenet irányában történő növekvő megszólalási érzékenység pl. az 1 kV/μs meredekségű, és 10 kV csúcs-értékű zavarfeszültséget a bemeneten egy gáztöltésű túlfeszültség-levezetővel kb. 600 – 700 V-ra lehet korlátozni. A második fokozat, amelynek az elsőtől való közvetlen csatolását egy induktivitás segítségével megszüntették, ezt az értéket kb. 100 V-ra csökkenti. Ezt a feszültségimpulzust aztán az elnyomódióda kb. 35 V-ra csökkenti (egy 24-V-os védőkombináció esetén). Az ezután következő elektronikának tehát csak egy kb. 1,5 x UB feszültség impulzust kell elviselnie (1.10 ábra).



1.10 ábra: Túlfeszültség-levezető kombináció

Forrás: <http://kapcsolok-konnektor.hu/letoltesek/Elektronika-T%FAlfesz%FClts%E9gv%E9delem%20bevezet%F5.pdf>

Az 1.10 ábrán látható ún. három lépcsős túlfeszültségvédelmi rendszert alkalmazzák a kisfeszültségű villamosenergia ellátásban. A rendszer elemei a betáplálás felől nézve sorrendben a következő: szikraköz, varisztor és szupresszor- vagy lavinadióda, amelyek a szabvány szerint a következőkkel jellemezhetők:

- Tip. 1 („B” fokozat, durva védelmi fokozat, villámáram-levezető) főbb műszaki adatai: üzemi feszültség 255/440 V, védelmi szint (1,2/50  $\mu$ s): <3,5 ... 4 kV, levezetőképesség (10/350  $\mu$ s): 60 ... 100 kA, megszólalási idő:  $\leq 100$  ns.
- Tip. 2 („C” fokozat, közepes túlfeszültségvédelmi fokozat) főbb műszaki adatai: üzemi feszültség 230/400 V, védelmi szint (8/20  $\mu$ s, 15 kA): <1,5 ... 2,5 kV, levezetőképesség (8/20  $\mu$ s): 15 ... 20 kA, megszólalási idő:  $\cong 25$  ns.
- Tip. 3 („D” fokozat, finom túlfeszültségvédelmi fokozat) főbb műszaki adatai: üzemi feszültség 230/400 V, védelmi szint (8/20  $\mu$ s, 5 kA): <1 ... 1,5 kV, levezetőképesség (8/20  $\mu$ s): 5 kA, megszólalási idő általában:  $1 \text{ ns} < t_{\text{meg}} < 25 \text{ ns}$ .

*Megjegyzés:* A leggyorsabb védelmi elemeknél akár  $t_{\text{meg}} = 10 \text{ ps} = 0,01 \text{ ns}$  is lehet.

*A védelem működése:*

- A fénysebességgel haladó túlfeszültség hullám a végétől – tehát visszafelé – indítja a megszólalási ideje.
- Ettől az elemtől kell átvenni a vezetést az előtte lévő védelmi elemnek. Ez akkor lehetséges, ha  $u_{\text{var.}} < u_{\text{szup.}} + iZ_{\text{vez.1}}$ . Itt  $Z_{\text{vez.1}}$  a korábban említett 10-12 m vezeték hossz impedanciája, vagy a beépített műimpedancia a varisztor és a dióda között.
- A szikraköz begyújtása hasonlóan történik, azaz  $u_{\text{szik.}} < u_{\text{var.}} + iZ_{\text{vez.2}}$ . Itt  $Z_{\text{vez.2}}$  a korábban említett 10-12 m vezeték hossz impedanciája, vagy a beépített műimpedancia a szikraköz és a varisztor között.

Amennyiben a működés során a nagyobb energia levezető elem nem tudja átvenni a vezetési funkciót az előző elemtől, akkor ez az elem a termikus túlterhelődés miatt leég, megsemmisülhet.

*Megjegyzés:* Az 1.10 ábrán jelölve ugyan nincs, de a túlfeszültségvédelmi fokozatok elem meghibásodásakor a hálózatba beépített zárlatvédelmi elemeknek kell működésbe lépni. Ez a főelosztónál a betápláló megszakító vagy biztosító, a szinti elosztónál szintén az elosztó betápláló megszakító vagy biztosító, míg a fogyasztói finom védelemnél az áramköri leágazás kismegszakítója vagy biztosítója.

## 1.8 Az épületek villámvédelmi csoportosítása [5]

A villámvédelem szükséges fokozatának meghatározása az épület besorolásán alapul, mert ez fejezi ki a villámcsapás által okozott veszély nagyságát. A villámvédelmi csoportok helyes megállapítása ezért döntő jelentőségű. Az épületben villámcsapás következtében keletkező kár és veszély különböző tényezőktől függ, mint pl. az épület belsejében levő anyagok tűzveszélyessége, vagy a veszélybe kerülő emberek száma, ill. az épület tetejének és falainak a tűzveszélyessége. Ezt a magyar villámvédelmi előírások úgy veszik figyelembe, hogy az épületeket különböző szempontok szerint villámvédelmi csoportokba sorolják. A csoportosítás szempontját a veszélyesség forrása és jellege határozza meg, ezen belül pedig a veszélyesség mértékének fokozódása határozza meg a növekvő sorrendet.

A csoportosítás egyik legfontosabb szempontja az épület rendeltetése, mert a veszélyesség annál nagyobb, minél nagyobb az épületben veszélyeztetett érték, ill. minél több ember kerülhet veszélyes helyzetbe. A rendeltetés szerinti csoportosításban a veszélyességet fokozó tényező az épület belső tűz- vagy robbanásveszélyessége. Az

épületet érő villámcsapások gyakorisága erősen függ a magasságtól és a környezettől, amit az ebből a szempontból kialakított villámvédelmi csoportok vesznek figyelembe.

### **1.8.1 Rendeltetés szerinti csoportok**

Az épület rendeltetés szerinti csoportjait **R** betűjel és a veszélyesség fokozódásának sorrendjében **1**-től **5**-ig növekvő szám jelöli. Mindegyik csoport meghatározása tartalmazza azt a kitételeket, hogy az oda besorolt épület nem tartozik valamely magasabb sorszámú csoportba (1.1 táblázat).

#### **R1 csoport. Közöséges épület, ill. építmény.**

Az idesorolt épületek nem lehetnek tűz- és robbanásveszélyesek, nem képezhetnek különleges értéket és nem kell azzal számolni, hogy bennük nagyszámú ember kerül veszélybe. Ebbe a csoportba tartoznak általában a lakóépületek, irodaházak, üzleti és üzemi épületek, a mezőgazdasági épületek, kisebb szállodák, turistaházak, vendéglátási épületek, kilátók, víztartályok víztornyok, ha az előbb említett tényezők nem fokozzák a villámcsapás veszélyességét.

#### **R2 csoport. Kiemelt épület, ill. építmény.**

Idetartozik minden nagyforgalmú épület, amelynek átlagos napi személyforgalma az 1000 főt, csúcsporgalomban óránként a 300 főt meghaladja, valamint amelynél a rendeltetés szerű használat folyamán a forgalom 5 percen belül az 50 főt eléri; a tömegtartózkodásra szolgáló közösségi épület az, amelyben egy tűzszakasz befogadóképessége 500 főnél nagyobb; tudományos, történelmi és művészeti értékű épület, ill. építmény; föld feletti közműépítmény; nagyüzemi állattartási épület.

Amint ebből a meghatározásból látható a magyar szabvány először azokat az épületeket sorolja ide, amelyekben a villámcsapás nagyobb számú embert veszélyeztet.

#### **R3 csoport. Tűzveszélyes épület, ill. építmény.**

Idetartozik az az épület, ill. építmény, amit a belügyminiszter 28/2011. (IX. 6.) BM rendelet a benne előforduló anyagok alapján **C** tűzveszélyességi osztályúnak minősít.

Az idézett rendelet szerint *tűzveszélyes (C jelű)* tűzveszélyességi osztályba tartozik az a helyiség és szabadtér, ahol olyan szilárd anyagot, amelynek gyulladási hőmérséklete legfeljebb 300 °C vagy olyan folyadékot, amelynek nyílttéri lobbanáspontja 55 °C-nál nagyobb és 150 °C-nál kisebb, előállítanak, feldolgoznak, használnak, tárolnak vagy forgalomba hoznak.

Ha az épület helyiségeinek csak egy része tartozik a **C** tűzveszélyességi osztályba, akkor a rendelet részletesen szabályozza a minősítés feltételeit. Ezeket röviden abban lehet összefoglalni, hogy az a tűzveszélyességi osztály mértékadó az egész épületre, amelybe az összesített alapterület (a szinteket külön is számításba véve) legalább 40%-át elfoglaló helyiségek tartoznak.

#### **R4 csoport. Tűz-és robbanásveszélyes épület, ill. építmény.**

Idetartozik az az épület, illetve építmény, amit az **R3** csoportnál idézett rendelet **B** tűzveszélyességi osztályúnak minősít.

Az idézett rendelet szerint tűz- és robbanásveszélyes (**B** jelű) tűzveszélyességi osztályba tartozik az a helyiség, szabadtér és veszélyességi övezet, ahol olyan port, amely levegővel robbanásveszélyes keveréket képezhet, továbbá olyan anyagot (folyadékot), amelynek zárttéri lobbanáspontja 20 °C-nál nagyobb, nyílttéri lobbanáspontja pedig legfeljebb 50 °C, vagy olyan anyagot (gázt), amelynek alsó éghetőségi (robbanási) határértéke a levegő térfogatához viszonyítva 10%-nál nagyobb, előállítanak, feldolgoznak, használnak, tárolnak vagy forgalomba hoznak, és e tevékenység közben ezek az anyagok olyan mennyiségben fordulnak elő, hogy belőlük robbanásveszélyes keverék, elegy vagy vegyület keletkezhet.

**R5 csoport. Fokozottan tűz- és robbanásveszélyes épület, ill. építmény.**

Idetartozik az az épület, ill. építmény, amit az **R3** csoportnál idézett rendelet **A** tűzveszélyességi osztályúnak minősít.

Az idézett rendelet szerint fokozottan tűz- és robbanásveszélyes, (**A** jelű) tűzveszélyességi osztályba tartozik az a helyiség, szabadter, veszélyességi övezet, ahol olyan anyagot, amelynek heves égése, robbanása, indító (iniciáló) gyújtásra, ill. más fizikai, kémiai hatásra bekövetkezhethet, vagy amelynek zárttéri lobbaspontja legfeljebb 20 °C, továbbá amelynek alsó éghetőségi (robbanási) határértéke a levegő térfogatához viszonyítva legfeljebb 10 °C, előállítanak, feldolgoznak, használnak, tárolnak vagy forgalomba hoznak, és e tevékenység közben ezek az anyagok olyan mennyiségben fordulnak elő, hogy belőlük tűz- és robbanásveszélyes keverék, elegy, vegyület keletkezhethet.

1.1 táblázat: Egyes épületek villámvédelmi besorolása rendeltetés szerint

<b>R1</b>	<b>R2</b>	<b>R2</b>	<b>R2</b>	<b>R3</b>	<b>R4</b>	<b>R5</b>
Állattartási épület, kisüzemi	Autóbusz-állomás	Irodaház 50 fő felett	Sportpálya nézőtérrel	Kazal	Malom	Benzinkút
Bolt	Áruház	Iskola	Szanatórium	Könyvtár	Raktár, B	Benzinraktár
Cukrászda	Bábszínház	Kemping-épületek	Szálloda 50 fő felett	Magtár	Gázcsere-telep	Gázgyár
Étterem	Bank	Kórház	Színház	Raktár, C		Gázüzem
Istálló, kisüzemi	Bolt 50 fő felett	Közmű épület	Szociális otthon	Termény-tároló		Lőszerraktár
Lakóépület	Cirkusz	Kultúrház	Templom			Raktár, A
Mésztelep	Cukrászda 50 fő felett	Metró-állomás	TÜZÉP telep			Robbanó-anyag gyár v. raktár
Orvosi rendelő, kisforgalmú	Emlékmű	Mozi	Üdülő 50 fő felett			
Panzió	Étterem 50 fő felett	Múzeum	Üzlethelyiség 50 fő felett			
Raktár, D	Filmszínház	Műemlék				
Sátortábor	Hang-verseny-terem épülete	Művelődési ház				



## 2 STATIKUS ÉS STACIONÁRIUS TEREK

### 2.1 Statikus elektromos tér

A nyugvó töltések időben állandó elektromos teret keltenek, amelyet statikus elektromos térnek, az elektromágneses térmodellt elektrosztatikus térnek nevezünk. Az elektrosztatikus tér jelenlétét a töltésekre gyakorolt hatásán, a Coulomb-erőn keresztül lehet kimutatni. Az elektromos teret forrásennyiségekkel és térjellelmezőkkel lehet jellemezni. Villamos tér önmagában, a mágneses tér jelenléte nélkül csak akkor létezik, ha időben nem változik. Nyugvó villamos töltések által létrehozott villamos tért statikus térnek nevezünk. A statikus villamos tér időben nem változó villamos tér. A statikus villamos tér örvénymentes, potenciálos, konzervatív erőter. A statikus villamos teret a villamos tér térjellelmezői, a villamos térerősség és a villamos eltolási vektorok jellemzik. Munkavégző képessége szempontjából a statikus villamos tér (és csak az) viszonylagos módon jellemezhető még a potenciál segítségével is.

A statikus villamos tér csakúgy, mint a villamos tér egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy erőhatást gyakorol a benne elhelyezkedő villamos töltésekre. A villamos tér  $\mathbf{E}$  villamos térerősség vektorral jellemzett pontjába helyezett  $Q$  töltésre ható  $\mathbf{F}$  erő:

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{E}. \quad (2.1)$$

#### 2.1.1 Coulomb-törvény

Két pontszerűnek tekinthető,  $Q_1$  és  $Q_2$  elektromos töltésű test között fellépő erő a tapasztalati Coulomb-törvénnyel fejezhető ki. A Coulomb-törvény szerint az erőhatás nagysága, amely a  $Q_1$  és  $Q_2$  töltésű, a két töltés közötti  $r$  távolsághoz képest kis méretű töltött test között fellép, arányos a két töltés szorzatával és fordítottan arányos a két töltés közötti  $r$  távolság négyzetével és a teret kitöltő homogén, izotróp közeg  $\varepsilon$  anyagjellemzőjével.

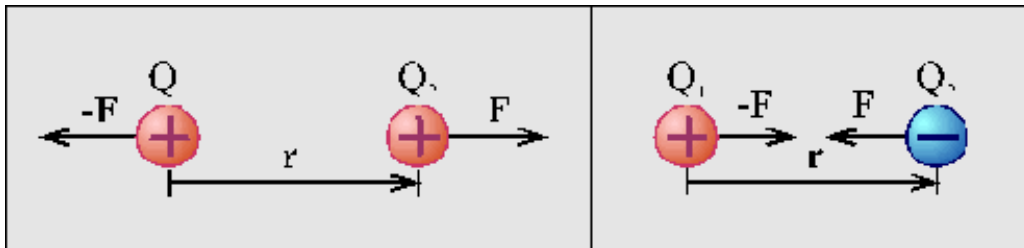
$$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon r^2}. \quad (2.2)$$

Coulomb törvénye felírható vektorosan oly módon, hogy a két pontszerű töltés közötti távolságot például az 1. jelű töltéstől a 2. jelűig húzott  $r$  vektorként vesszük figyelembe. Pozitív erő a távolságot növelni, negatív erő pedig csökkenteni igyekszik. Ekkor a villamos töltéseket előjelesen kell behelyettesíteni.

Két, egymástól  $r$  távolságra elhelyezkedő,  $Q_1$  és  $Q_2$  pontszerű töltés között a  $Q_2$  töltésre ható erővektor:

$$\mathbf{F} = \frac{Q_1 Q_2 \mathbf{r}_e}{4\pi\epsilon r^2}, \quad (2.3)$$

ahol:  $\mathbf{r}_e$  az  $\mathbf{r}$  irányba mutató egységvektor.



2.1 ábra: Két pontszerű töltés közötti erőhatás

Forrás: [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_5.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_5.htm)

Coulomb törvényének alakja a tömegvonzás törvényének alakjával egyezik meg, amennyiben az a távolság négyzetével fordítottan arányos. A jobb oldal nevezőjében szereplő  $4\pi r^2$  tekinthető a két ponttöltés távolságával, mint sugárral felrajzolt gömb felületének. Az erő tehát ezen gömb felületével fordítottan arányos. Több pontszerű töltés terében elhelyezkedő töltésre ható erő meghatározható a szuperpozíció elve segítségével, amelynek értelmében az egyes töltések által a vizsgált töltésre ható erőösszetevőket meghatározva, azok vektoros eredője a keresett erővektort adja meg. Coulomb törvényének eredeti alakja, amely csak vákuumban illetve levegőben érvényes. E szerint két, egymástól  $r$  távolságra elhelyezkedő,  $Q_1$  és  $Q_2$  pontszerű töltés között ható erő:

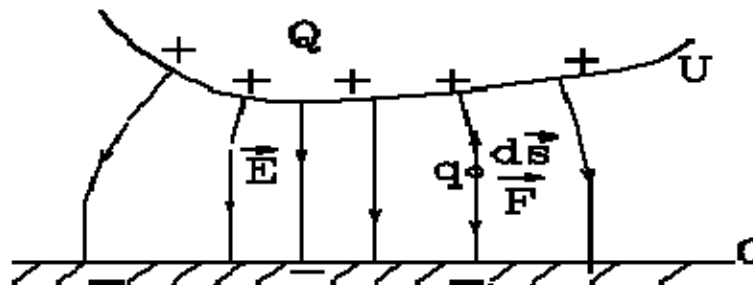
$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (2.4)$$

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{Vm}{As} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}. \quad (2.5)$$

### 2.1.2 Kapacitás, kondenzátorok

Ha egy vezető testre már felvittünk valamennyi (mondjuk +)  $Q$  töltésmennyiséget, akkor a rá következő  $+q$  töltésadag felvitelénél már le kell küzdenünk az eredetileg fennlevő töltések kifejtette elektrosztatikus taszító erőt, azaz valamennyi munkát kell végeznünk a taszító erők ellenében. A sztatikus elektromos mezők konzervatív tulajdonsága következtében e munkavégzés a kiinduló, önkényesen zéruspotenciálú

pontnak választott, hely és a töltött vezető felszínére (és teljes térfogatára) jellemző  $U$  potenciál különbségével, azaz az  $U$  feszültséggel a következőképpen fejezhető ki:  $W = qU$ .



2.2 ábra: Potenciálkülönbség

Forrás: [http://www.uni-miskolc.hu/~www\\_fiz/fiz2b/node8.html](http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/fiz2b/node8.html)

Könnyen belátható, hogy ha több  $Q$  töltést vittünk fel a vezető testre, akkor a nagyobb taszítóerő következtében több munkát kell végeznünk ugyanazon  $q$  töltés felvitelekor. E munkavégzés a  $qU$  formában számítható. Számunkra itt az a következtetés érdekes, hogy hamar felvittünk egy vezető testre valamennyi  $Q$  töltést, akkor azon a testen valamilyen, a felvitt töltéssel arányos  $U$  potenciál alakul ki. Már a Coulomb-törvénynél is észleltük, hogy ugyanazon töltésseloszlás (a töltések és a geometria rögzített) elemei között fellépő erőhatás valahányad részére lecsökken pl. olajban, a levegőben mért erőhatáshoz viszonyítva. A csökkenés mértékét az olaj relatív dielektromos állandója adja meg. Ez persze azt jelenti a munkavégzés lecsökkenése folytán, hogy ugyanazon töltésmennyiség és geometria esetén a töltött test potenciálja is kisebb lesz, ha a 0-potenciálú hely és a töltött test közötti térrészt egy  $\epsilon_r > 1$  dielektromos állandójú közeggel töltjük ki. A felvitt  $Q$  töltés, és a kialakuló  $U$  potenciálkülönbség (feszültség)

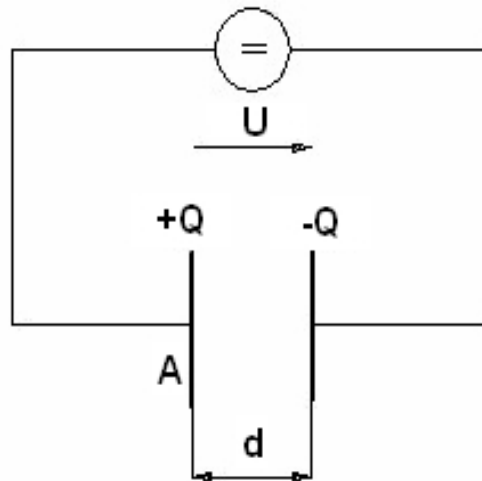
arányossága a következőképpen fejezhető ki:  $U = \frac{Q}{C}$ . Ennek átrendezett formája a

$Q = CU$  valamivel szemléletesebb fizikai értelmezést enged meg. Kiolvasható ugyanis, hogy az  $U$  potenciálkülönbség mellett a tárolt  $Q$  töltés annál nagyobb, minél nagyobb a  $C$  értéke, azaz  $C$  az elrendezés töltéstároló képességét, töltéstároló kapacitását jellemzi. A  $C$  kapacitás egységnyi, ha 1 Volt feszültség mellett 1 As-nyi töltést képes tárolni az eszközünk. Ezt az egységet **Faraday** után *1 Farad* vagy  $1F = 1 \frac{As}{V}$ . Kondenzáto-

roknak nevezzük azokat az eszközöket, amelyeket kimondottan kapacitásuk miatt használunk áramkörökben. Ezek rendszerint két, egymástól elszigetelt, egymással szemben álló fémfelületből állnak. Ezeket a fémfelületeket fegyverzeteknek nevezzük. Ha a fegyverzetek között potenciálkülönbség van, akkor a fegyverzetek egymás felé levő felületein felületi töltésseloszlás formájában töltések jelennek meg. Ezek a töltések a fegyverzetekhez vezető kivezetéseken keresztül áramlanak, tehát amikor a kondenzátorokat feltöltjük, akkor áram folyik a kondenzátorok kivezetésein, de a kondenzátor fegyverzetek között nem lépnek át töltések. A kondenzátor össztöltése rendszerint nulla, vagyis az egyik fegyverzeten ugyanannyi negatív töltés van, amennyi pozitív a másikon. Ezért amikor azt halljuk, hogy a kondenzátor töltése ennyi, meg annyi,

akkor tudnunk kell, hogy ez az egyik fegyverzet töltését jelenti. A kondenzátorok jellemzője a kapacitása és a megengedett maximális feszültség.

A legegyszerűbb geometriájú kondenzátor két párhuzamos fémlemezről áll. A szemben álló felületek nagysága  $A$ , a lemezek távolsága  $d$ , a közöttük levő térrészt  $\epsilon_r$  relatív dielektromos állandójú közeg tölti ki (2.3 ábra).



2.3 ábra: Síkkondenzátor

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}. \quad (2.6)$$

Ha a kondenzátoron  $Q'$  töltés van, akkor a feszültsége  $U = \frac{Q'}{C}$ , az újabb  $dQ$  töltés felviteléhez szükséges munka  $dW = \frac{Q'}{Cd} dQ$ . Ennek integrálja adja meg azt a munkát, amelyet egy kezdetben töltetlen kondenzátor feltöltése során végeznünk kell.

$$W = \frac{1}{C} \int_0^Q Q' dQ' = \frac{Q^2}{2C}. \quad (2.7)$$

A kondenzátor töltésének  $Q = CU$  alakjának alkalmazása több egyenértékű kifejezéshez vezet:

$$W = \frac{1}{2} QU = \frac{1}{2} CU^2. \quad (2.8)$$

Ez a munkavégzés során betáplált energia a kondenzátorban tárolódik, és alkalmas körülmények között vissza tudjuk nyerni. Kondenzátorok ezen töltés és energiátároló képességeit számos technikai eszköz hasznosítja.

Az energiát nem a fegyverzeteken kigyűlt töltések, hanem az elektródák közötti elektromos mező tárolja. Ezen mező energiasűrűségét megkaphatjuk, ha a teljes tárolt energiát osztjuk a tárolási térfogattal, amely ebben az esetben  $V = A \cdot d$ .

Az elektromos mező  $\rho_{we}$  energiasűrűsége tehát:

$$\rho_{we} = W / Ad = \frac{1}{2} CU^2 / Ad = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} (Ed)^2 / Ad = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r E^2. \quad (2.9)$$

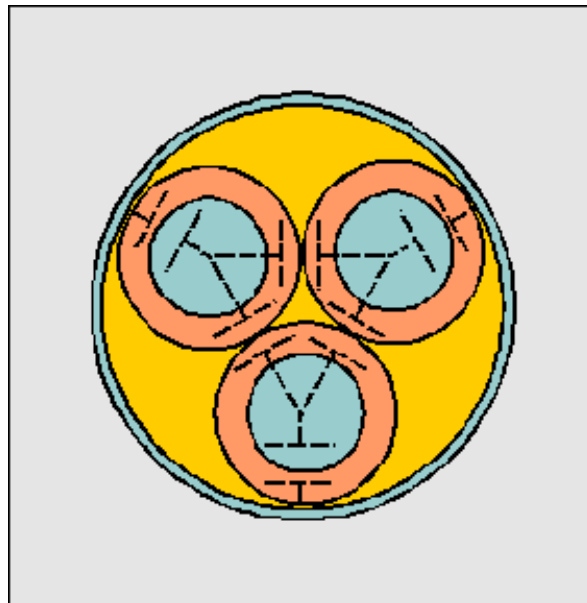
Itt kihasználtuk, hogy a fegyverzetek közötti homogén elektromos mezőben az elektromos mező térerőssége, és a feszültség között egy egyszerű kapcsolat áll fenn:

$$U = \int \vec{E} d\vec{s} = Ad. \quad (2.10)$$

Az a tény, hogy az elektromos mező kiépítéséhez munkát kell végezni, és ez a végzett munka az elektromos mező energiájában tárolódik, nem kizárólag az elektromos mező sajátja. Mágneses mező, gravitációs mező is ugyanezen tulajdonságokat mutatja.

A kondenzátor két kivezetéssel (csatlakozással) rendelkező passzív, energiatároló jellegű áramköri elem. A kondenzátor a rákapcsolt feszültség hatására fegyverzetein szétváló (felhalmozódó) villamos töltések által az elektródok közötti teret kitöltő szigetelőanyagban létrehozott villamos tér energiája révén tárol energiát.

Kondenzátort alkotnak a nem kondenzátor céljára készült, de felépítésük folytán kapacitással rendelkező berendezések, illetve azok részei is. Ilyen például a koaxiális kábel, amelynek külső fémköpenye árnyékolás céljára szolgál, a belső vezetőérrel azonban vezető elektródapárként kapacitással rendelkezik, így kondenzátort képez. Jelentős kapacitással rendelkező kondenzátorokat alkotnak az erősáramú kábelek is, úgy vezető ereik között, mint vezetőerük és a fémpancélozás között (2.4 ábra). Hasonlóképpen kondenzátort képeznek a villamos távvezetékek egymás mellett haladó vezetői, de a vezetőből és a földből álló vezető elektródapár is rendelkezik kapacitással. Bizonyos esetekben még az integrált áramkörök kivezetései közötti,  $pF$  nagyságrendű kapacitást is figyelembe kell venni.



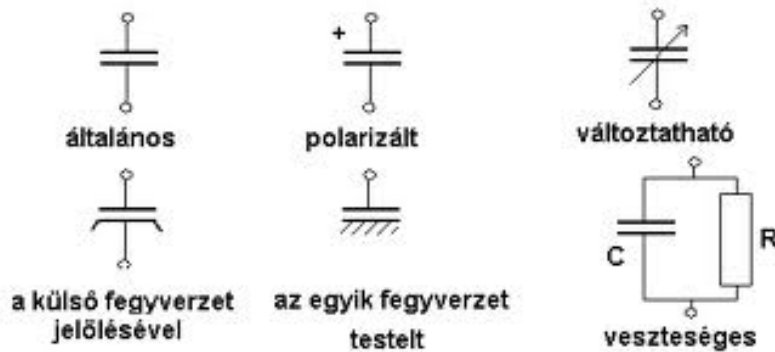
2.4 ábra: Nagyfeszültségű, háromfázisú kábel vezetőerei, illetve a vezetők és a pancélozás közötti kapacitások

Forrás: [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_16.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_16.htm)

A műszaki gyakorlatban sokféle kondenzátortípust alkalmaznak. A kondenzátor-készülékek csoportosíthatók kapacitásértékük állandósága alapján (állandó vagy változó értékű kondenzátorok), valamint az elektródok és a dielektrikum anyaga szerint.

A kondenzátorok fegyverzete közötti szigetelőanyag lehet levegő, papír, műanyag, csillám, üveg, kerámia stb. Levegő a szigetelőanyag például a rádiótechnikában alkalmazott forgókondenzátorokban (változó értékű kondenzátor). A tömbkondenzátorok gyakori típusa az összetekercselt alumíniumfóliából és a fóliák közötti szigetelőcsíkból áll. Ezzel az elrendezéssel kis méretek mellett igen nagy kapacitás érhető el.

Még jobb a helykihasználása az elektrolitkondenzátoroknak, amelyekben az egyik elektródot alumínium vagy tantál alkotja és az azon képződő oxidréteg képezi a szigetelő réteget, végül a másik elektród elektrolit, például bórsav oldat. Az elektrolit, lévén folyékony, tökéletesen követi a szemközti elektród alakját, biztosítva így az oxidréteg által meghatározott  $0,1 \mu\text{m}$  nagyságrendű szigetelési távolságot. Az elektrolitkondenzátor fém anyagú elektródját érdesítve annak felülete megnövelhető, és mivel a síkkondenzátor kapacitása az elektródok felületével arányos, így a kapacitás is megnő (2.6).



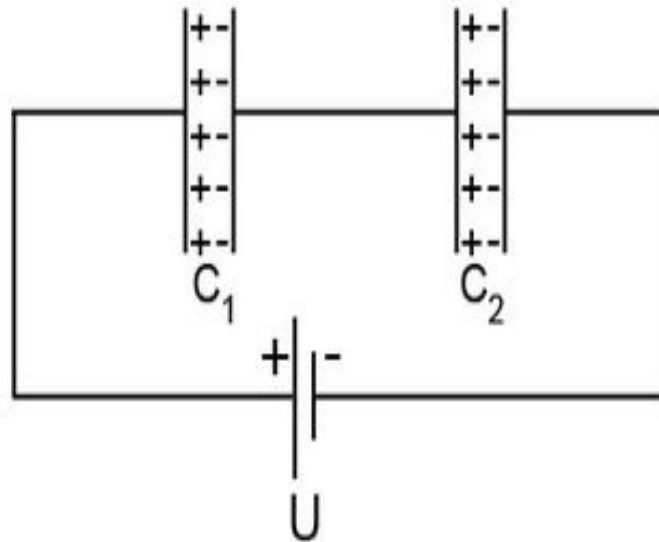
2.5 ábra: Kondenzátorok villamos rajzjelei

A fém elektródon létrehozott oxidréteggel biztosítható az igen kis vastagságú szigetelő réteg, a folyékony, másik elektród pedig követi az érdesített, fém elektród felületét. Az elektrolitkondenzátorokra csak meghatározott polaritással kapcsolható egyenfeszültség, mert a fém elektródot katódként (negatív polaritásra) kapcsolva, a szigetelőréteg megszűnik és a kondenzátor áramot vezet. Az áram hatására felmelegedő elektrolit felforrva felrobbanthatja a kondenzátort. Az elektrolitkondenzátorok alkalmazási köre emiatt behatárolt, főleg az áram simítására használják egyenirányítóban illetve egyenfeszültségű körében. A kondenzátorokban levő, adott vastagságú szigetelőréteg miatt csak meghatározott, legnagyobb feszültségen használhatók, ezért kapacitásuk után az üzemi feszültségük a rájuk jellemző, legfontosabb adat. A véges feszültségtűrést különösképpen figyelembe kell venni az elektrolitkondenzátorok esetén, amelyek egyik előnye éppen a jó helykihasználás, ami részben az igen vékony szigetelő oxidrétegnek köszönhető. Nagyfeszültségen végzett, központi fázisjavítás céljára nagyfeszültségű (10–20 kV-os) kondenzátorok is készülnek, de a 120 kV-os vezetéseken folytatott távközléshez szükséges szűrők 120 kV-os vonali feszültségszintű kondenzátorokat is tartalmaznak.

### 2.1.3 Sorosan és párhuzamosan kötött kondenzátorok

Egy kondenzátorban energiát lehet raktározni. Ha több kondenzátort összekapcsolunk, akkor természetesen több energiát vagy töltést lehet esetenként elraktározni. Vizsgáljuk meg, hogy egy kondenzátorokból összeállított kapcsolást hogyan lehet (ha egyáltalán lehet) helyettesíteni egyetlen kondenzátorral, amely elektromosan ugyanúgy viselkedik,

azaz ugyanakkora feszültséget rákapcsolva ugyanakkora töltés jelenik meg rajta és ugyanannyi energiát raktároz el. A 2.6 ábrán is látható egyszerű elrendezés, amelyben két kondenzátor van sorosan összekötve és a kondenzátorok szabad végeit vezető huzalokkal egy feszültségforráshoz (egy elemhez vagy egy akkumulátorhoz) kapcsoljuk. Egy vezetőkör vagy az áramkör részének tekinthető vezetéken – minthogy statikus térről van szó – mindenhol ugyanakkora az elektromos potenciál értéke.



2.6 ábra: Kondenzátorok sorba kapcsolása

A  $C_1$  kapacitású kondenzátor fegyverzetein  $+Q_1$  ill.  $-Q_1$  töltés jelenik meg, míg a  $C_2$  kapacitás lemezein  $-Q_2$  és  $+Q_2$  töltés. Az elrendezés középső részén, azaz a két kondenzátor összekapcsolt fegyverzetein a töltésmegosztással megjelenő töltések összege zérus, hiszen ez a rész nem áll semmilyen elektromos kapcsolatban a feszültségforrással, ezért arról elektromos töltés nem is vándorolhatott oda. Ebből következik, hogy  $Q_1$  megegyezik  $Q_2$ -vel, tehát mindkét kondenzátor fegyverzetein ugyanakkora pozitív és negatív töltés található; jelöljük ezt ezután  $Q$ -val. Az elektrosztatikus erőter konzervatív, ebből következik, hogy a feszültségforrás két sarkán mérhető feszültség értéke megegyezik a két kondenzátoron eső feszültségérték összegével:  $U = U_1 + U_2$ . A kapacitás definíciójából viszont azonnal adódik, hogy  $U = \frac{Q}{C}$ ,

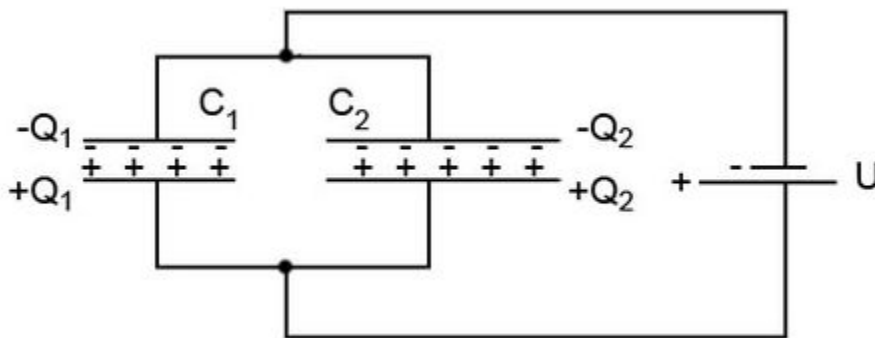
tehát  $\frac{Q}{C_E} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}$ , azaz

$$\frac{1}{C_E} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.11)$$

Ahol  $C_E$ -vel jelöltük az eredő kapacitást. Amennyiben kettőnél több kondenzátor van sorba kötve, akkor ugyanezzel a gondolatmenettel könnyen belátható, hogy az eredő kapacitás:

$$\frac{1}{C_E} = \sum_i \frac{1}{C_i}. \quad (2.12)$$

Mint ahogy töltések nem mozognak (eltekintünk az egyensúly beállásáig tartó, általában igen rövid ideig tartó folyamatoktól), ezért a feszültségforrás jobb ill. bal oldalán a feszültségérték a vezető huzalokon ill. a fegyverzeteken állandó. Ebből viszont az következik, hogy mindkét kondenzátorra ugyanakkora  $U$  feszültség esik. Ha a  $C_1$  és  $C_2$  kapacitású kondenzátorokon megjelenő töltés  $Q_1$  ill.  $Q_2$ , akkor az elrendezés által tárolt össztöltés természetesen  $Q = Q_1 + Q_2$ , minthogy az elrendezés egyik oldalán  $-(Q_1 + Q_2)$  töltés, míg a másikon  $(Q_1 + Q_2)$  töltés van (2.7 ábra).



2.7 ábra: Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása

Az eredő kapacitásnak természetesen ugyanannyi töltéssel kell rendelkeznie, ha  $U$  feszültségforráshoz kapcsoljuk, azaz  $Q = Q_1 + Q_2$ ,  $UC_E = UC_1 + UC_2$  és

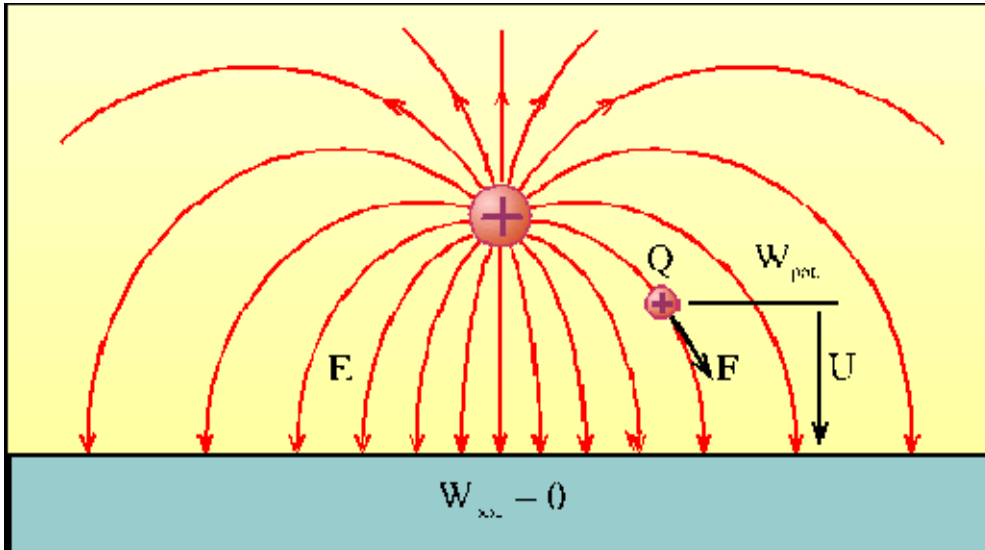
$$C_E = C_1 + C_2. \quad (2.13)$$

## 2.2 A potenciál és a feszültség

A villamos tér valamely pontjának potenciálja az a munkamennyiség, amellyel a tér az egységnyi pozitív töltést abból a pontból a nulla potenciálúnak választott pontba képes mozgatni.

A villamos tér két pontja közötti villamos feszültség az a munkamennyiség, amellyel a tér az egységnyi pozitív töltést a nagyobb potenciálú pontból a kisebb potenciálú pontba képes mozgatni.





2.8 ábra: A  $Q$  villamos töltés potenciális energiája a 0 potenciálúnak választott helyhez képest  $U$  potenciállal rendelkező pontban

Forrás: [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_13.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_13.htm)

A villamos tér két pontja közötti feszültség a két pont potenciáljának különbsége. Valamely pont potenciálja megegyezik az illető pont és a nulla potenciálúnak választott hely közötti feszültséggel.

A potenciál és a feszültség előjeles skalármennyiségek.

A potenciál és a feszültség jele:  $U$ .

Mértékegysége:  $[U] = 1 \text{ V} = 1 \text{ kgm}^2/\text{As}^3$

A potenciál szokásos jelölései továbbá:  $p$ ;  $\varphi$ .

$U_{AB}$  a villamos tér  $A$  és  $B$  pontja közötti feszültség, ami megegyezik az  $A$  pont  $U_A$  potenciáljának és a  $B$  pont  $U_B$  potenciáljának különbségével. A villamos tér  $A$  pontjának  $B$  pontjához képesti feszültsége tehát az a munkamennyiség, amellyel a tér az egységnyi pozitív töltést az  $A$  pontból a  $B$  pontba juttatja. A végzett munka egyenlő a tér által a töltésnek az útvonalon végzett mozgatása során rá kifejtett erőnek az  $A$  és  $B$  pontok közötti tetszőlegesen felvett,  $l$  hosszúságú szakaszra vonatkoztatott integráljával. Az útvonal pontjaiban az elemi hosszúság vektorok és a pontban kifejtett erő vektor skaláris szorzatait kell képezni:

$$W_{AB} = \int_A^B F dl = \int_A^B Q E dl = Q \int_A^B E dl = QU_{AB}. \quad (2.14)$$

A töltésre a villamos tér által kifejtett erő helyébe behelyettesítve a (2.1) összefüggést, majd a  $Q$  töltést kiemelve az integrálás elé – hiszen a töltés az útvonaltól függetlenül állandó érték – a két pont közötti feszültség számítására az alábbi összefüggést kapjuk:

$$U_{AB} = \int_A^B E dl. \quad (2.15)$$

A villamos tér  $A$  és  $B$  pontja közötti feszültség az  $E$  villamos térerősség vektornak az  $A$  és  $B$  pont között tetszőlegesen felvett  $l$  útvonalra vonatkoztatott integráljával egyenlő. Az útvonal minden pontjában a villamos térerősség vektor és az elemi útvonal vektor skaláris szorzatait kell képezni.

#### A feszültség iránya

A feszültség rendelkezik megállapodás szerinti iránnyal.

A feszültség iránya a magasabb potenciálú pontból az alacsonyabb potenciálú felé mutat, tehát a pozitívabb hely felől a negatívabb felé a feszültség iránya ezért a két pont között a tér által mozgatott pozitív töltés haladásának irányával esik egybe differenciális méretű szakaszokon a feszültség iránya tehát megegyezik a térerősség irányával. Statikus villamos térben zárt úton végzett munka zérus. A statikus villamos tér konzervatív, örvénymentes, potenciálos erőter, amelyben a zárt útvonalon végzett munka zérus:

$$W_{AA} = Q \int_A^B E dl + Q \int_A^B E dl = Q \left( \int_A^B E dl - \int_A^B E dl \right) = 0. \quad (2.16)$$

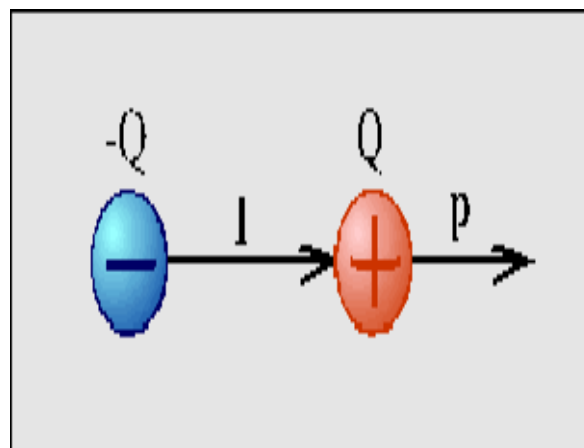
#### Elektrosztatikus potenciál

A végtelen távoli ponthoz viszonyított feszültség. Az elektromos mező azonos potenciálú pontjai energiaszinteket jelölnek. Ezeket ekvipotenciális felületeknek nevezzük.

$$U_r = \frac{Q}{4\pi r \epsilon_0}. \quad (2.17)$$

### 2.2.1 Villamos dipólus

Villamos dipólust alkot két, egymás közelében, állandó távolságra elhelyezkedő, azonos nagyságú, ellentétes nemű pontszerű töltésből álló rendszer. Jele:  $\mathbf{p}$ , mértékegysége:  $[p] = 1 \text{ cm} = 1 \text{ Asm}$ .



2.9 ábra: Villamos dipólus

Forrás: [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_19.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_19.htm)

A dipólusnyomaték:

$$\mathbf{p} = Q\mathbf{l}, \quad (2.18)$$

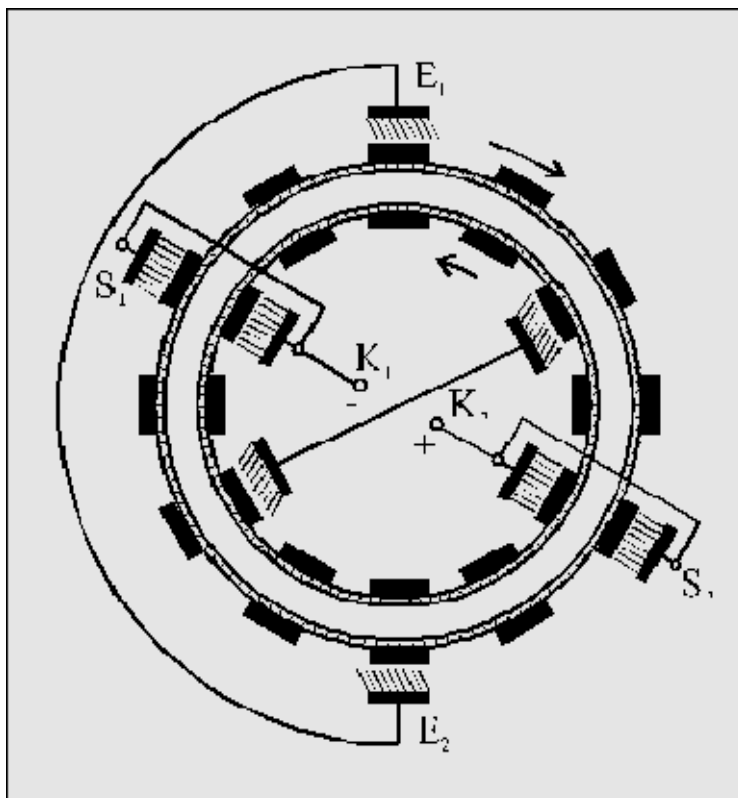
ahol  $Q$  a dipólust alkotó pontszerű töltések nagysága,  $l$  pedig a közöttük lévő távolságvektor. Villamos dipólust homogén villamos térbe helyezve, arra a dipólusnyomaték vektor és a villamos térerősség vektor vektoriális szorzatával megegyező forgatónyomaték hat.

Villamos térbe helyezett dipólusra ható forgatónyomaték

$$M = pE \sin \alpha, \quad (2.19)$$

$$\mathbf{M} = \mathbf{p} \times \mathbf{E}. \quad (2.20)$$

Homogén villamos térbe helyezett villamos dipólusra csak forgatónyomaték hat. Inhomogén villamos térben azonban a forgatónyomaték mellett a villamos dipólusra eredő erő is hat. Ha a dipólus szabadon mozoghat, akkor általában forogva halad a nagyobb térerősségű hely felé. A villamos térbe helyezett vezető test a töltésmegosztás influencia révén villamos dipólussá alakul. Az eredetileg villamos töltés szempontjából semleges vezető test mindig olyan dipólussá alakul, amelynek tere ellentétes az őt létrehozó térrel. Az így kialakult dipólus inhomogén térben mindig a nagyobb térerősségű hely felé halad. Pontszerű töltés terébe helyezve a semleges vezető testet, arra mindig a töltés felé irányuló erő hat, tehát az vonzza a vezető anyagú testet.



2.10 ábra: Influenciagép

Forrás: [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_2.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_2.htm)

Az influenciagép a töltésmegosztás elvén működik. Az influenciagép egyik változatában két ebonitkorong forog egymással ellentétes irányban. Mindkettőnek külső oldalára fémszalagok vannak szektoros elrendezésben felragasztva. A fémszalagokhoz fémrúddal összekötött fémcsetek (E) dörzsölődnek. Mindkét koronggal érintkezésben van továbbá két szívószerkezet (S), amelyek konduktorokkal (K) vannak összeköttetésben. A szektor a fémcsethez dörzsölődve pozitív villamos töltést nyer, ami, tovább forogva, a másik tárcsa vele szemközti szektorába negatív töltést vonz, és a fémes összeköttetés révén a másik tárcsa ellentétes oldalán levő szektorában pozitív töltés halmozódik fel. A negatív töltéssel rendelkező szektor az előbbi tárcsával ellentétes irányba forogva annak szektorain újabb negatív töltések szétválását eredményezi, ismét pozitív töltést halmozva fel ezen tárcsa ellentétes oldali szektorában. A szívók ennek következtében egyre nagyobb pozitív illetve negatív töltést halmoznak fel a konduktorokon.

### 2.2.2 Vezető anyagok

Villamosan vezető anyagok azok a szilárd, folyékony vagy gáznemű anyagok, amelyek fajlagos ellenállása  $10^{-7} \Omega\text{m}$ -nél kisebb. Vezető anyagokban nagyszámú szabad elmozdulásra képes töltéshordozó van jelen. Vezető anyagú testekben villamos tér hatására töltésmegosztás következik be. Valamely anyag annál jobb villamos vezető, minél több és minél könnyebben mozgó töltéshordozót tartalmaz. A szilárd testek közül a fémek nagy számban rendelkeznek szabad, vagy más néven vezetési elektronokkal, amelyek igen könnyen mozdulnak el nagy távolságra az anyagon belül. A legjobban vezető fémekben, az ezüstben és a rézben gyakorlatilag annyi szabad elektron van, amennyi atom. Jó vezető ezenkívül a szén, az emberi test, az elektrolitok és a magas hőmérsékletű gázok, a láng és természetesen a plazma. Vezető anyagú testet villamos térbe helyezve, abban töltésmegosztás, vagy más néven influenza következik be. Az influenza során az anyag töltései a külső villamos térnek megfelelően rendeződnek, amely a pozitív töltéseket a térerősség irányába, a negatív töltéseket azzal ellentétes irányba taszítja. A vezető anyagon belül pontosan annyi töltés mozdul el a test felületére, hogy az ily módon szétvált töltések tere éppen nullára kompenzálja a külső villamos teret a vezető anyag belsejében. Ez azért van így, mert ha a vezető testen belül villamos tér maradna fenn, az továbbra is erővel hatna a testben levő töltésekre, azokat addig mozgatva a megfelelő felületre, amíg a testen belül a villamos tér meg nem szűnik.

A vezető test felületét a villamos erővonalak merőlegesen érik, hiszen ha lenne a térerősségnek érintő irányú összetevője, az erővel hatna az ott jelen lévő töltésekre, amelyek ennek hatására elmozdulnának.

Mivel a vezető anyagú test belsejében villamos tér nincs jelen, maga test villamos töltés szempontjából kifelé semleges, ezért egyetlen dipólusnak lehet tekinteni, a külső teret csak torzítja, tágabb környezetében annak értékét nem változtatja meg. Az elektrosztatika Gauss-tételét a teret kitöltő anyagtól függő térjellemezővel, a villamos térerősséggel felírva és a térerősséget ( $E$ ) kifejezve látható, hogy a teret létrehozó véges értékű töltés ( $Q$ ) és véges felület esetén az csak a permittivitás ( $\epsilon$ ) végtelen értéke mellett lehet nulla:

$$\oint_A E dA = \frac{Q}{\epsilon} \rightarrow E = \frac{Q}{\epsilon A} = 0 \rightarrow \epsilon_0 \epsilon_y = 0 \rightarrow \epsilon_y = \infty \quad (2.21)$$

A vezető anyagok tehát végtelen nagy relatív dielektromos állandóval rendelkeznek tekinthetők. Statikus villamos térben a vezető anyagok minden pontja egyenpotenciálú,

ezért ekvipotenciális felületek helyére vezető anyag felületét helyezve az nem befolyásolja az eredeti villamos teret.

## Feladatok

Egy fémvezetőben  $Q = 2C$  töltés áramlik, és közben  $W = 200J$  munkát végez. Mekkora a feszültség a vezető két végpontja között?

$$U = \frac{W}{Q} = \frac{200J}{2C} = 100V .$$

Mekkora munkát végez  $Q = 10C$  töltés, ha  $U = 220V$  feszültségű pontok között áramlik?

$$W = QU = 10C \cdot 220V = 2200J .$$

Mekkora töltés végez  $W = 3800J$  munkát  $U = 190V$  feszültségű pontok között?

$$Q = \frac{W}{U} = \frac{3800J}{190V} = 20C .$$

## 3 ALAPEGYENLETEK

### 3.1 Ohm-törvény

Egy vezető két vége közt mérhető potenciálkülönbség és vezetőben folyó áram hányadosa állandó. Ez az állandó a vezető ellenállása, azaz

$$U = IR, \quad (3.1)$$

ahol  $U$  a potenciálkülönbség voltban kifejezve,  $I$  az áram amperben mérve és  $R$  az ellenállás ohmokban. A törvényt George Ohm fedezte fel 1827-ben. Ez az egyszerű lineáris törvény a legtöbb anyagra nem érvényes. Azokat az ellenállásokat, amelyekre fennáll, ohmikus ellenállásnak nevezik, de a törvény csak addig érvényes, amíg a fizikai feltételek, mint például a hőmérséklet állandó marad. Legpontosabban a fémek követik az Ohm-törvényt.

#### 3.1.1 Integrális Ohm törvény

$$\operatorname{rot}\mathbf{E} = \mathbf{0}, \quad (3.2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{J} = \mathbf{0}, \quad (3.3)$$

$$\mathbf{J} = \gamma(\mathbf{E} + \mathbf{E}_b) = \gamma\mathbf{E} + \mathbf{J}_b, \quad (3.4)$$

ahol az  $\mathbf{E}_b$  beiktatott térerőséggel jelöljük a nem elektromos hatásokat,  $\gamma$  az anyag fajlagos vezetőképessége.

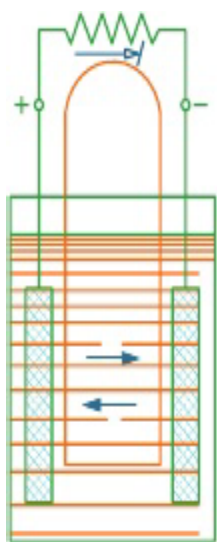
Vizsgáljuk meg a 3.1 ábrán látható egyszerű áramkört: telep (akkumulátor vagy galván-elem) és pólusaira kapcsolt ellenállás. Az elrendezésben  $E_b$  fizikai tartalma nyilvánvaló.

A telep elektródái között nyugalmi helyzetben  $E$  elektromos térerősség lép fel, amit a fegyverzeteken felhalmozódott töltések hoznak létre. Ennek ellenére a véges  $\gamma$  fajlagos

vezetőképességű elektrolitban nem folyik áram. Ez csak úgy lehetséges, hogy az elrendezésben fellép egy olyan hatás, amely (3.5) értelmében kioltja a térerősség hatását:

$$\oint_l E dl + \oint_l E_b dl = \oint_l \frac{J}{\gamma} dl, \quad (3.5)$$

ahol az első integrál a (3.2) miatt zérus. A második integrál csak a telep belsejében vett úton értelmezett, és az ún. üresjárású feszültséget (elektromotoros erőt) definiálja. A jobb oldali integrál két szakaszon történő integrálásra bontható: integrálás a telep belsejében, ill. azon kívül, a kapcsok közé helyezett ellenálláson. Miután az áram a változó keresztmetszet ellenére az egész körben azonos (3.3) értelmében, a fenti egyenlet végül:  $U_b = IR_k + IR_b$  alakba írható, ahol  $R_b$  a telep belső ellenállását,  $R_k$  pedig a kapcsok közé helyezett külső ellenállás.



3.1 ábra: Az Ohm törvény levezetéséhez

Forrás: <http://www.scribd.com/doc/91193228/16/MAXWELL-EGYENLETEK-%E2%80%93-KIRCHHOFF-EGYENLETEK>

Véges hosszúságú  $A$  keresztmetszetű vezeték esetén az  $U = \int_l \frac{J}{\gamma} dl = \int_l \frac{dl}{A\gamma} = IR$

összefüggéshez jutunk, amelyet integrális Ohm törvényének nevezünk. Egyúttal az ellenállás definícióját is megkapjuk.

### 3.1.2 Differenciális Ohm törvény

Legyen a vezető  $A$  keresztmetszetű,  $l$  hosszúságú és anyaga  $\gamma$  fajlagos vezetőképességű. Ekkor az ellenállása

$$R = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{A} = \rho \frac{l}{A}, \quad (3.6)$$

ahol  $\rho$  a fajlagos ellenállás. Figyelembe véve a (3.2)-t és behelyettesítve az  $R$  értékét a (3.6)-be, kapjuk

$$\rho \frac{l}{A} = \frac{U}{I}. \quad (3.7)$$

Figyelembe véve, hogy a vezetőben a villamos tér hatására mozdulnak el a töltések és hogy a kialakult áramlási tér homogén:

$$\rho \frac{l}{A} = \frac{El}{JA}, \quad (3.8)$$

$$J = \frac{E}{\rho} = \gamma E. \quad (3.9)$$

A (3.8) egyenlet az Ohm-törvény differenciális alakja.

Egy vezető (fém)  $\gamma$  fajlagos vezetőképessége kifejezhető az alábbi összefüggéssel

$$\mathbf{J} = q_e \mu n \mathbf{E}, \quad (3.10)$$

ahol  $q_e$  elektronok töltése,  $\mu = \frac{v}{E}$  mozgékonyága (elektronok  $v$  sebessége egységnyi  $E$  elektromos térben),  $n$  koncentrációja.

A kapott összefüggés az ún. vezetési vagy konduktív áram értékét adja meg

$$I = JA = q_e \mu n E A. \quad (3.11)$$

A szigetelőanyagokban folyó áramok megkülönböztetésére szolgál a konvektív és az eltolási áram elnevezés. A konvektív áram ( $\mathbf{J} = \rho \mathbf{v}$ ) is töltéshordozók elmozdulásához kötődik, de nagyszámú, térbeli töltéselmozdulással leírható töltés esetén. Ilyen áram folyik például a gázok vezetésekor. Az eltolási áram keletkezése az időben változó villamos térhez kötődik. Eltolási áramként foghatjuk fel a kondenzátorok áramát váltakozó áramú körökben. Az eltolási ( $\mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ ) áram fiktív áram, fizikailag nincs szó

töltésáramlásról. A különféle áramfajták nem zárják ki egymást. Akár egy ugyanazon áramkörben – különböző elemeken – egyidejűleg folyhat mindhárom áram. Ha pl. egy ellenállás és egy kondenzátor soros kapcsolását valósítjuk meg váltakozó áramú körben, az áramuk megegyezik. Tehát az ellenállás vezetési árama megegyezik a kondenzátor



eltolási áramával. Ebből arra lehet következtetni, hogy a különböző áramfajták képesek egymásba átalakulni.

A differenciális Ohm-törvény teljes alakja

$$\mathbf{J}_{teljes} = \mathbf{J}_{konvektív} + \mathbf{J}_{eltolási} = \gamma \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \rho \mathbf{v} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}. \quad (3.12)$$

Azokra az elemekre, melyekben a konvektív áram illetve az eltolási áram folyik gyakran nem igaz – vagy csak igen szűk határok között – az Ohm-törvény. Ezeknek az elemeknek ugyanis a feszültsége és árama között nem lineáris a kapcsolat.

### 3.1.3 Kontinuitási egyenlet

Az anyag-, ill. tömegmegmaradásból következik, hogy ha egy csőben stacionárius módon áramlik a folyadék, akkor a cső bármely keresztmetszetén másodpercenként ugyanannyi tömegű folyadék áramlik át. Tegyük fel, hogy a cső vékony, azaz egy adott keresztmetszetenél a sebesség minden pontban ugyanakkora. Az első keresztmetszet legyen  $A_1$ , a második  $A_2$ , a megfelelő sűrűségek, ill. sebességek  $\rho_1$  és  $\rho_2$ , ill.  $v_1$  és  $v_2$ . Egy kis  $\Delta t$  idő alatt a folyadékrészecskék  $v\Delta t$  utat tesznek meg, így az átáramlott folyadék térfogata  $A v \Delta t$ , a tömege  $\rho A v \Delta t$ . A két keresztmetszeten egységnyi idő alatt átáramlott tömeg (stacionárius esetben) egyenlő, tehát

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2. \quad (3.13)$$

Ezt úgy hívják, hogy kontinuitási egyenlet vékony áramcsőre. Ha azt is feltesszük, hogy a folyadék összenyomhatatlan, akkor  $\rho_1 = \rho_2$  vagyis

$$A_1 v_1 = A_2 v_2. \quad (3.14)$$

Ezt általánosíthatjuk tetszőleges térfogatra. A térfogatban található folyadék tömege  $\int_V \rho dV$ .

Ezzel a kontinuitási egyenlet általános alakja:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = \int_A \rho \mathbf{v} d\mathbf{A}. \quad (3.15)$$

### 3.1.4 Kirchhoff I. törvénye

Mint mindenhol, itt is igaz a töltésmegmaradás törvénye. Mivel az elektromos töltés éppúgy megmaradó mennyiség, mint a tömeg, ezért a töltésmegmaradás törvényét formailag ugyanolyan (kontinuitási) egyenlet írja le, mint a tömegmegmaradásét:

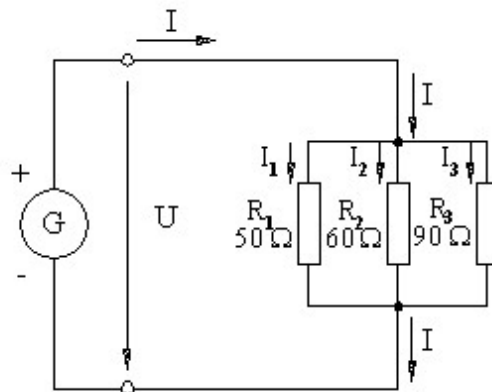
$$\frac{d}{dt} \int_V \rho_t dV = - \oint_F \mathbf{j} d\mathbf{A}.$$

Itt  $F$  a rögzített  $V$  térfogat zárt burkolófelülete,  $\rho_i$  a töltéssűrűség,  $\mathbf{j}$  az áramsűrűség. A konvenció szerint a felület normálvektora és így  $\Delta\mathbf{A}$  is kifelé mutat. Az előjeleket úgy választjuk meg, hogy  $I > 0$ , ha  $\mathbf{j}\Delta\mathbf{A} > \mathbf{0}$  (kifelé megy az áram) és  $I < 0$ , ha  $\mathbf{j}\Delta\mathbf{A} < \mathbf{0}$  (befelé megy az áram). A jobb oldali felületi integrál tehát akkor pozitív, ha kiáramlás van, ekkor viszont a térfogatban található töltés csökken, a baloldali derivált tehát negatív. Ezért kell a mínusz előjel a jobb oldalra. Stacionárius áramlás esetén a bal oldali kifejezés zérust ad, hiszen a  $V$  térfogatban a töltés nem változhat (ugyanis ekkor a töltések által keltett térerősség is változna). Időben állandósult állapotban a változási gyorsaság nyilvánvalóan zérus. Ebből az következik, hogy bármilyen zárt felületen ugyanannyi töltés áramlik ki, mint be: „Ami befolyik, az rögtön kifolyik” (Beatrice: „8 óra munka” dalszövegéből). Alkalmazzuk ezt a törvényt vékony vonalas hálózat esetén egy csomópontba befutó vezetésekre.

### Csomóponti törvény állítása

A csomópontban töltés nem halmozódhat fel, tehát a zárt felületen átfolyó áram zérus. Egy csomópontba befolyó és onnan kifolyó áramok algebrai (előjeles) összege zérus. Miután az áramok most csak a vezetékben folynak, az egyenlet egyszerűen

$$\sum_k I_k = 0. \quad (3.16)$$



3.2 ábra: Ellenállások párhuzamos kapcsolása

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots, \quad (3.17)$$

$$\frac{U}{R_e} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \dots. \quad (3.18)$$

Ebből a párhuzamosan kapcsolt ellenállások eredőjének reciproka

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots. \quad (3.19)$$

Ellenállások párhuzamosan kapcsolása esetén az eredő vezetőképesség ( $G_e = \frac{1}{R_e}$ ) egyenlő az egyes vezetőképességek összegével.

$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 + \dots \quad (3.20)$$

Két párhuzamosan kapcsolt ellenállásra az eredő ellenállást az alábbi képlet alapján számolhatjuk ki:

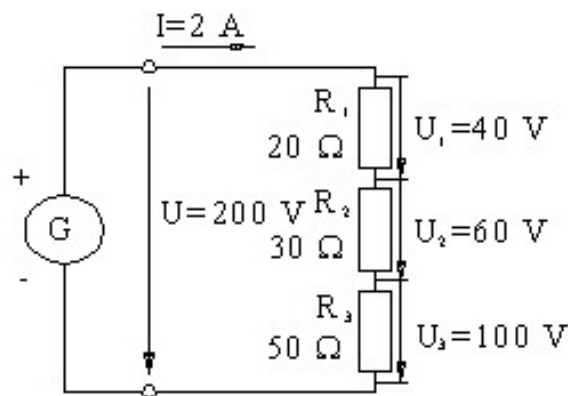
$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.21)$$

### 3.1.5 Kirchhoff II. törvénye

Huroktörvény egyenáramú, koncentrált paraméterű hálózatra. A törvény állítása: bármely zárt hurok körüljárása esetén a feszültségek összege, tehát a körülhaladó töltésen végzett összes munka zérus.

A stacionárius elektromos mező konzervatív mező. A stacionárius mezőben fennáll ugyanaz az alapvető törvény, ami az elektrosztatikus mező esetén:

$$\oint_g \mathbf{E} d\mathbf{r} = 0 \quad (3.22)$$



3.3 ábra: Ellenállások soros kapcsolása

$$IR_e = I(R_1 + R_2 + R_3 + \dots) \quad (3.23)$$

Sorosan kapcsolt ellenállások eredő ellenállása egyenlő az ellenállások összegével:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + \dots \quad (3.24)$$

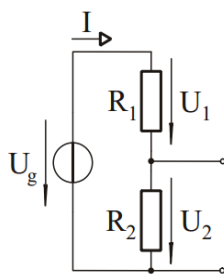
## 4 EGYENÁRAMÚ HÁLÓZATOK

### 4.1 Feszültségosztó

Két ellenállás soros kapcsolása feszültségosztót képez (4.1 ábra). Kirchhoff huroktörvénye alapján:

$$U_g = U_1 + U_2 .$$

A tápláló feszültség megoszlik az  $R_1$  és az  $R_2$  ellenállás között. Ebből származik a feszültségosztó elnevezés. Egyenáramú hálózatban a rendelkezésre álló feszültségnél nagyobb feszültség nem állítható elő. Mind  $U_1$ , mind  $U_2$  legfeljebb  $U_g$  értékével lehet egyenlő akkor, ha a másiknak az értéke nulla.



4.1 ábra: Feszültségosztó kapcsolás

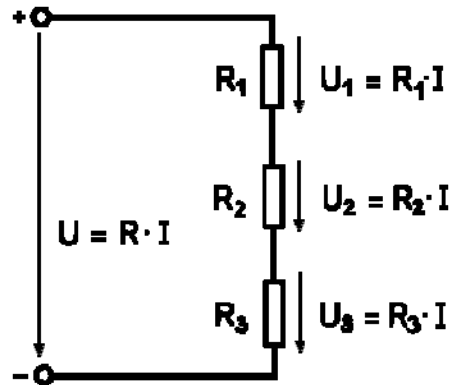
$$U_1 = IR_1 , \tag{4.1}$$

$$U_2 = IR_2 , \tag{4.2}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{IR_1}{IR_2} , \tag{4.3}$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} . \tag{4.4}$$

Feszültségosztó mintapélda:



$$U = RI, U = U_1 + U_2 + U_3, RI = R_1I + R_2I + R_3I,$$

$$U_1 = U \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3},$$

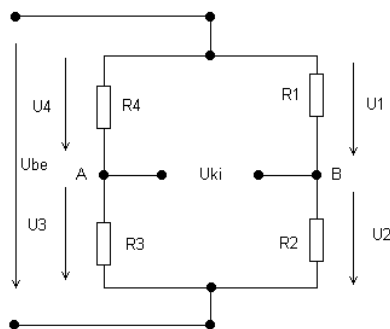
$$U_2 = U \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3},$$

$$U_3 = U \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

## 4.2 Wheatstone-híd

A híd két egymással szembe fordított feszültségosztó. Ha a két feszültségosztó osztásaránya megegyezik, akkor a kimeneti feszültség nulla, a híd ki van egyenlítve:  $U_{ki} = 0$ , azaz  $U_A = U_B$ .

$$U_{be} \frac{R_3}{R_3 + R_4} = U_{be} \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$



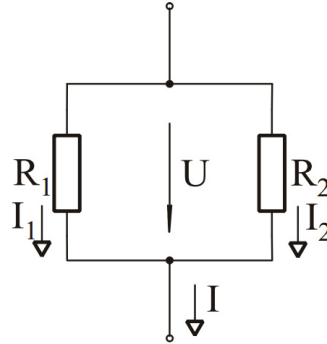
$$R_3(R_1 + R_2) = R_2(R_3 + R_4),$$

$$R_1R_3 = R_2R_4.$$

A híd kiegyenlített, ha az egymással szemben lévő hídágak ellenállásainak szorzata azonos.

### 4.3 Áramosztó

Két ellenállás párhuzamos kapcsolása áramosztót képez (4.2 ábra).



4.2 ábra: Áramosztó kapcsolás

Kirchhoff csomóponti törvénye alapján:

$$I = I_1 + I_2.$$

A közös áram megoszlik  $R_1$  és  $R_2$  ellenállás között. Ebből származik az áramosztó elnevezés. Az áramokra is érvényes, hogy sem  $I_1$ , sem  $I_2$  nem lehet nagyobb a közös  $I$  áramnál.

$$I = \frac{U}{R_1}, \quad (4.5)$$

$$I = \frac{U}{R_2}, \quad (4.6)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_1}}{\frac{U}{R_2}}. \quad (4.7)$$

Tétel: Áramosztóban az áram az ellenállásokkal fordított arányban oszlik meg,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}. \quad (4.8)$$

Határozzuk meg most az áramosztó egyik ellenállásán, például  $R_2$ -n az áram értékét a közös áram és az ellenállások értékének ismeretében!

$$I_2 = \frac{U}{R_2}. \quad (4.9)$$

Az ellenállásokon eső feszültséget felírhatjuk a közös áram és a két párhuzamosan kapcsolt ellenállás eredője segítségével.

$$U = IR_e = I(R_1 \times R_2) = I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (4.10)$$

Behelyettesítve (4.9)-be

$$I_2 = \frac{1}{R_2} I \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \rightarrow I_2 = I \frac{R_1}{R_1 + R_2}. \quad (4.11)$$

Ez az áramosztó képlet. Felépítésére hasonlít a feszültségosztó képlethez azzal a lényeges különbséggel, hogy itt a tört számlálójában szereplő ellenállás és a keresett áram indexe nem azonos, hanem éppen ellentétes. Összetett kapcsolásainkat is gyakran célszerű két ellenállás párhuzamos kapcsolására visszavezetni és az áramosztó összefüggéseit alkalmazni.

#### 4.4 Szuperpozíció tétele

Ha a hálózatunk több generátort tartalmaz, akkor használhatjuk a keresett feszültségek és áramok kiszámítására a szuperpozíció tételt. A hálózatban található generátorokat külön-külön, egyenként vesszük figyelembe és ezáltal részeredményeket kapunk. Valamely keresett feszültség vagy áram értékét úgy számítjuk ki, hogy a részeredmények előjelhelyes összegét képezzük. Ez utóbbi lépés a tulajdonképpeni szuperpozíció. Ahhoz, hogy egy generátor hatását külön tudjuk számítani, az összes többi generátort helyettesíteni, szakkifejezéssel dezaktivizálni kell. Szélső esetben egy rövidzár tekinthető egy nulla voltos feszültséggenerátornak és egy szakadás egy nulla amperes áramgenerátornak. Ez a dezaktivizálás alapja (4.3 ábra). Természetesen speciális esetben az előbbtől eltérhetünk, ha két vagy három generátor hatása együtt is könnyen számítható. A fontos csak az, hogy a hálózatban található valamennyi generátort egyszer és csakis egyszer vegyük figyelembe.



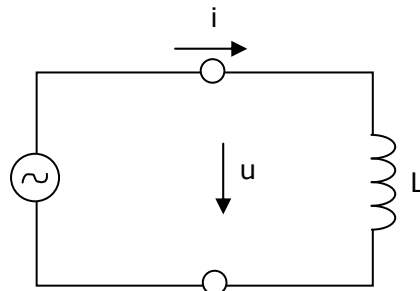
4.3 ábra: Feszültség és áramgenerátor helyettesítése

A szuperpozíció tétel csak akkor alkalmazható, ha a hálózatunk lineáris. Ez egyenáramú hálózatban akkor teljesül, ha a benne található valamennyi passzív elem Ohm törvényének eleget tesz, tehát lineáris, ohmos az ellenállás. A szuperpozíció alkalmazása inkább a bonyolultabb hálózatok esetén előnyös.



## 5 ÖSSZETETT HÁLÓZATOK

### 5.1 Tekercs váltakozó áramú viselkedése (induktivitás)



5.1 ábra: Induktivitás

**Frekvencia:** változás sebessége

$$\left. \begin{aligned} u &= L \frac{\Delta i}{\Delta t} \\ i &= I_{\max} \sin(\omega t - 90^\circ) = -I_{\max} \cos \omega t \end{aligned} \right\} u = -L \underbrace{\frac{dI_{\max} \cos \omega t}{dt}}_{\substack{\text{deriválás (t)} \\ \text{idő szerint}}} = LI_{\max} \omega \sin \omega t \quad (5.1)$$

$$u = I_{\max} \underbrace{\omega L}_{\substack{\text{ellenállás} \\ \text{jellegű} \\ \text{mennyiség}}} \sin \omega t = U_{\max} \sin \omega t \rightarrow U_{\max} = I_{\max} \omega L \rightarrow X_L = \omega L$$

Ennek a tekercsnek az induktív reaktanciája (induktív ellenállása)  $X_L$ :

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (5.2)$$

Feszültségek között igaz az Ohm-törvény:

$$i = \frac{u}{X_L} \quad (5.3)$$

A feszültség az áramhoz képest 90 fokot siet, vagy a feszültséghez képest az áram 90 fokot késik.

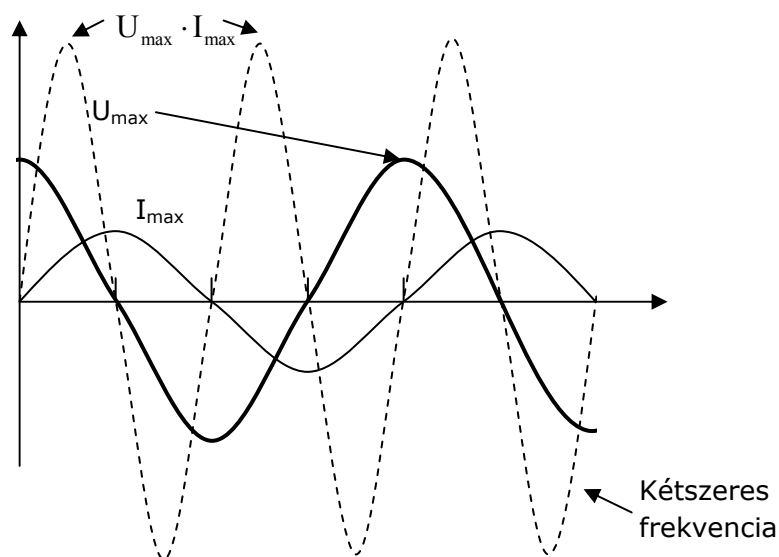
Az 5.2 ábrán látható az induktivitás feszültség-áram időfüggvénye. Szaggatott vonallal van jelölve a pillanatnyi feszültség és áramerősség szorzatának grafikonja (a pillanatnyi teljesítménygörbe). Így a végzett munka előjele is egyes időintervallumokban pozitív, másokban negatív.

Amikor a feszültség és az áram egymásra merőleges, akkor ún. meddő teljesítmény ( $Q$ ) jön létre. Átlagértéke 0. Nincs munkavégzés (haszontalan áram). Csak a mágneses teret alakítja ki.

A meddő teljesítménynek a hasznos teljesítménytől eltérő a mértékegysége:

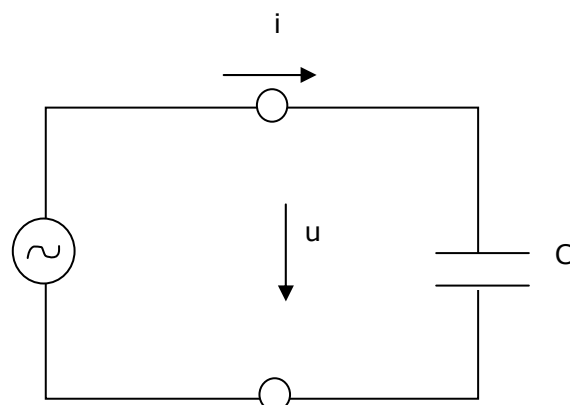
$$[Q] = 1 \text{ Volt-Amper-reaktív} = 1 \text{ VAr.}$$

A meddő teljesítményre szükség van a motorok működtetéséhez.



5.2 ábra: Az induktivitás feszültség-áram időfüggvénye

## 5.2 Kondenzátor váltakozó áramú viselkedése



5.3 ábra: Kapacitás

$$i = \frac{dQ}{dt} \left( \frac{\text{töltés}}{\text{idő}} \right) \left. \vphantom{\frac{dQ}{dt}} \right\} i = C \frac{du}{dt},$$

$$Q = CU$$

Ha a feszültség szinuszosan változó, akkor:

$$i = C \frac{dU_{\max} \sin \omega t}{dt} = U_{\max} \omega C \cos \omega t = i_{\max} \sin(\omega t + 90^\circ),$$

$$I_{\max} = U_{\max} \omega C.$$

A fenti összefüggésekből látható, hogy a feszültség az áramhoz képest 90 fokot késik, vagy a feszültséghez képest az áram 90 fokot siet.

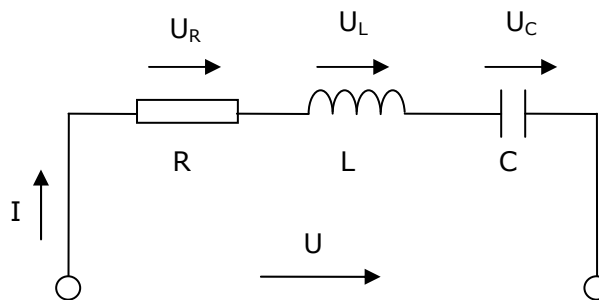
A kondenzátor kapacitív reaktanciája (kapacitív ellenállása)  $X_C$  :

$$X_C = \frac{U_{\max}}{I_{\max}} = \frac{1}{\omega C}. \quad (5.4)$$

Az  $X_C$  értéke fordítva arányos a frekvenciával.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad i = \frac{u}{X_C}. \quad (5.5)$$

### 5.3 Ellenállás, tekercs, kondenzátor soros kapcsolása



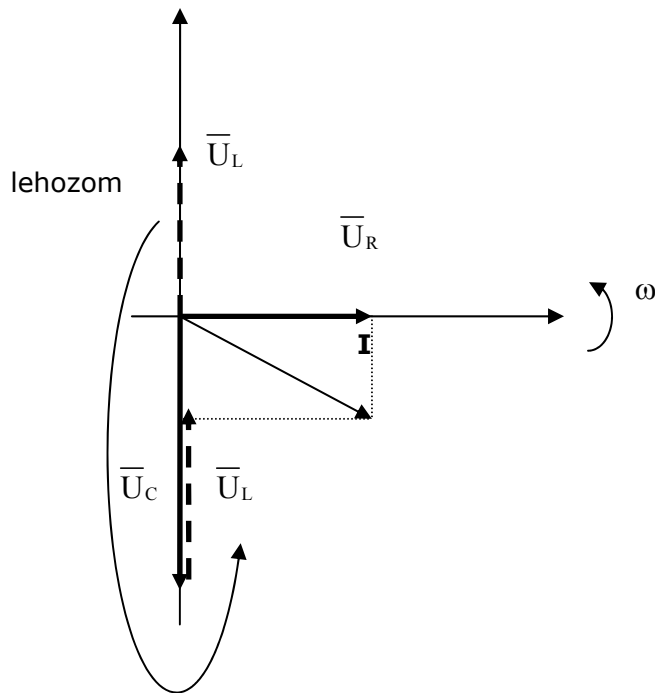
5.4 ábra: RLC soros kapcsolása

**Közös az áramerősség (I). Soros áramkör esetén ugyanaz az áram folyik keresztül.**

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C$$

$$u = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} \quad \text{Pitagorasz-tétel} \quad (5.6)$$

Lásd az 5.5 ábrát.



5.5 ábra: Soros RLC vektorábra

Ha a feszültségeket ( $u$ ) osztom az áramerősséggel ( $i$ ), akkor:

$$\frac{U_R}{I} = R \quad \frac{U_C}{I} = X_C \quad \frac{U_L}{I} = X_L \quad (5.7)$$

**Impedancia:** eredő ellenállás ( $Z$ )

$$Z = \frac{U}{I}$$

$$u = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Csak az ellenálláson keletkezik hasznos teljesítmény ( $R$ ), a tekercsen és a kondenzátoron csak meddő teljesítmény.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5.8)$$

$$U_R \cdot I = P$$

$$(U_L - U_C) \cdot I = Q$$

$$U \cdot I = S \quad \text{látszólagos teljesítmény}$$

**Látszólagos teljesítmény(S)=Hasznos teljesítmény(P)+meddő teljesítmény(Q).**

A látszólagos teljesítményre méretezik a villamos berendezéseket.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (5.9)$$

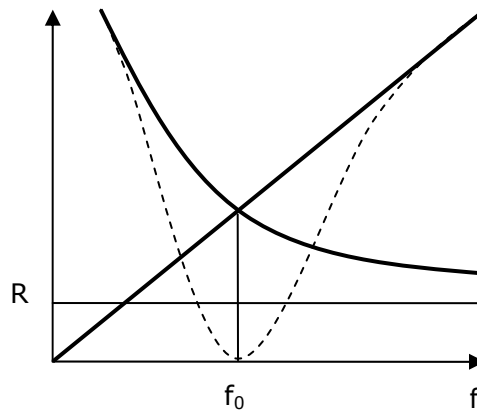
**Mértékegysége:** (S) = VA .

$$\cos \varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{P}{S} = \frac{R}{Z}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

$$I = \frac{U}{Z}$$

Egy villamos berendezés annál jobb, minél több látszólagos teljesítményből tud hasznos teljesítményt létrehozni.



5.6 ábra: Soros RLC impedancia karakterisztika

$$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Van egy  $f_0$  frekvencia, ahol  $f = f_0$ .

Rezonancia frekvencia  $f_0$ .

$$\begin{aligned} X_L &= X_C \\ 2\pi \cdot f \cdot L &= \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \\ f &= \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot \sqrt{L \cdot C}} \end{aligned} \quad (5.10)$$

Az áramkörnek ezen a frekvencián lesz a legkisebb eredő impedanciája.

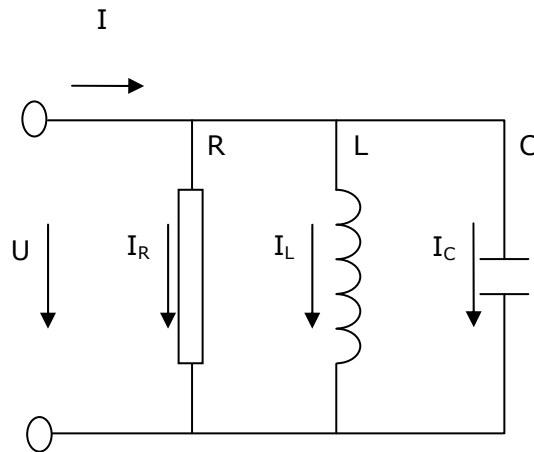
$$Z = Z_{\min} = R$$

$$I = I_{\max} = \frac{U}{R}$$

$$\cos \varphi = 1 \quad \text{nincs meddő teljesítmény}$$

$U_L$  és  $U_C$  többszöröse is lehet az  $U_R$ -nek, ezért átütés jöhet létre.

## 5.4 Ellenállás, tekercs, kondenzátor párhuzamos kapcsolása

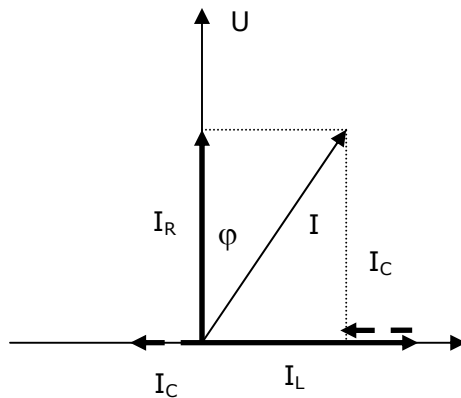


5.7 ábra: RLC párhuzamos kapcsolása

**Közös a feszültség (U). Párhuzamos kapcsolás esetén ugyanaz a feszültség keletkezik az áramkör elemein.**

Tekercs ( $L$ ):  $I_L$  késik 90 fokot.

Kondenzátor ( $C$ ):  $I_C$  siet 90 fokot.



5.8 ábra: Párhuzamos RLC vektorábra

$I_C$ -t kivonom  $I_L$ -ből

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \bar{I}_R + \bar{I}_L + \bar{I}_C \\ \bar{I} &= \sqrt{\bar{I}_R^2 + (\bar{I}_L - \bar{I}_C)^2} \end{aligned} \quad (5.11)$$

Ha az áramokat ( $I$ ) elosztjuk a közös feszültséggel ( $U$ ):

$$\frac{I_R}{U} = \frac{1}{R} = G \quad \text{vezetőképesség}$$

$$(G) = \frac{1}{\Omega} = S \quad (\text{Siemens})$$

$$\frac{I_L}{U} = \frac{1}{X_L} = B_L \quad \text{induktív vezetőképesség, induktív szuszceptancia}$$

$$(B_L) = S \quad (\text{Siemens})$$

$$\frac{I_C}{U} = \frac{1}{X_C} = B_C \quad \text{kapacitív vezetőképesség}$$

$$\frac{I}{U} = Y \quad \text{Vezetőképesség, eredő admittancia}$$

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$$

**Párhuzamos kapcsolás esetén eredő admittanciát számolhatunk (ellenállásokét).**

1. Áramokat kiszámoljuk.

2. Áramokat összegzünk ( $I$ ):  $Z = \frac{U}{I}$ .

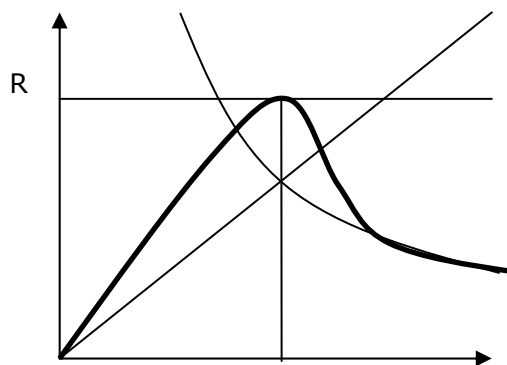
$$R \cdot X_L \cdot X_C$$

$$I_R + I_L + I_C \rightarrow I$$

Az áramerősségeket ( $I$ ) osztjuk  $U$ -val:

$$I_R \cdot U = P \quad I \cdot U = S$$

$$(I_L - I_C) \cdot U = Q$$



5.9 ábra: Párhuzamos RLC impedancia karakterisztika

Párhuzamos kapcsolás esetén:

$$Z = Z_{\max} = R.$$

Eredő impedancia kisebb

$$I = I_{\min} = \frac{U}{R}.$$

Rezonancia frekvencián minimuma van.



## 6 HÁLÓZATI EGYENLETEK [16]

### 6.1 Hálózatok hibamentes üzemállapotának jellemzői

Ha már meglévő hálózat, akár megtervezett, akár megvalósított esetében kívánjuk meghatározni az ismeretlen jellemzőket, akkor hálózatszámításról beszélünk, ami tehát nem más, mint egy hálózat villamos szempontból való vizsgálata.

Állandósult, hibamentes üzemállapotot tételezünk fel, azaz ilyen állapotban levő hálózat feszültség-, áram- és teljesítmény-eloszlási vizsgálatát végezzük.

Lineáris hálózatokat vizsgálunk, amelyekben a feszültség- és árameloszlás számítására lineáris egyenletrendszerek szolgálnak.

Ahhoz, hogy a hálózatszámítást el tudjuk végezni, előbb ismerni kell:

- a hálózati elemek egyfázisú helyettesítő vázlatát,
- a hálózat helyettesítési módját.

#### 6.1.1 Villamos hálózatok helyettesítése, hálózatszámítások

A hálózat árameloszlási, feszültség-eloszlási problémáinak megoldásában a Kirchhoff-egyenletekből indulunk ki. A két Kirchhoff-törvénynek megfelelően a megoldás kétféleképpen közelíthető meg.

Ha Kirchhoff I. törvénye alapján számítunk, (csomóponti módszer), akkor az energiaforrást áramforrásként, a fogyasztót áramfelvevőként (negatív áramforrás) kezeljük. A másik lehetőség Kirchhoff II. törvényének felhasználása (hurok módszer), amikor is az energiaforrást feszültségforrásnak tekintjük, a terheléseket pedig egyenértékű impedanciákkal helyettesítjük.

Ebben a fejezetben a **csomóponti módszert** ismertetjük. A betáplálásokat (generátorokat) az egyfázisú helyettesítő vázlatban a nullasín és az erőművi csomópontok közé kapcsolt **ideális áramgenerátorokkal** helyettesítjük (a párhuzamos admittanciát elhanyagoljuk), azaz csomópontba befolyó áramok lesznek. Az elmondottaknak megfelelően a terheléseket a csomópontokból kifolyó áramokkal, azaz szintén csomóponti áramokkal vesszük figyelembe.

A távvezetéseket, transzformátorokat impedanciával képezzük le.

A sok csomóponttal rendelkező hurkolt hálózatok jellemzésére és számítására egységes rendszer; és számítógépre vitelhez mátrix ábrázolásmód szükséges. Ezért a gyakorlatban az összes csomópontot azonos irányítással, azaz minden ágáramot a csomópontból

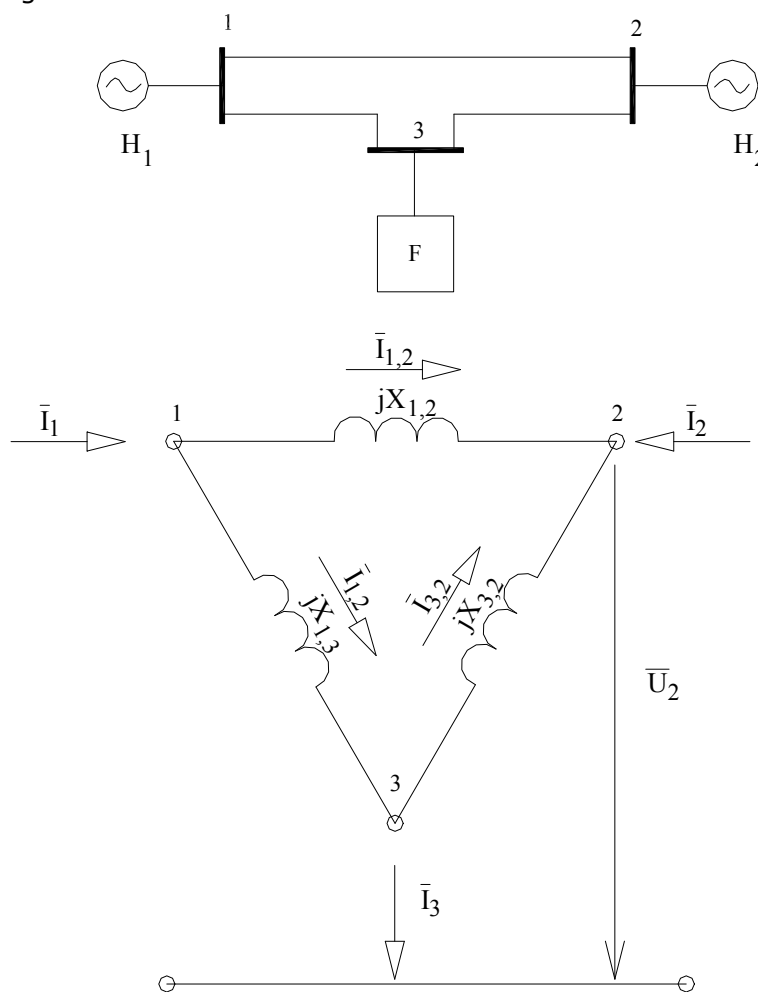
kifolyó iránnyal vesszük fel. (Természetesen így az erőművi generátorokat jellemző áramértékek negatív számértékkel helyettesítendőek.)

Egy hálózat elmondottak szerinti helyettesítését a 6.1 ábra alapján mutatjuk be.

Legyen egy háromfázisú szimmetrikus hálózat a 6.1 szerinti. Az ábrán 4 csomópontot (1, 2, 3, és föld) és 6 ágat találunk. A feszültségek viszonyítási pontja, az ún. referenciapont a „0” (nulla sín).

Helyettesítsük tehát az 1, 2 csomópontok generátorát árambetáplálással  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$ , a 3.

csomóponti fogyasztót pedig áramterheléssel  $\bar{I}_3$ . A 6.1/b ábrán látható, hogy ebben az esetben a „0” csomópont elszigetelt pont lesz, és így a hálózatszámításban nincs szerepe. Új referenciapontot kell választani, amelyik tetszőleges lehet. Ekkor a többi csomópontnak az új referenciapontra vonatkozó feszültségét kell új feszültségértékeként bevezetni és ezzel a hálózat az már tanult áramköri számítási módszerekkel megoldható.

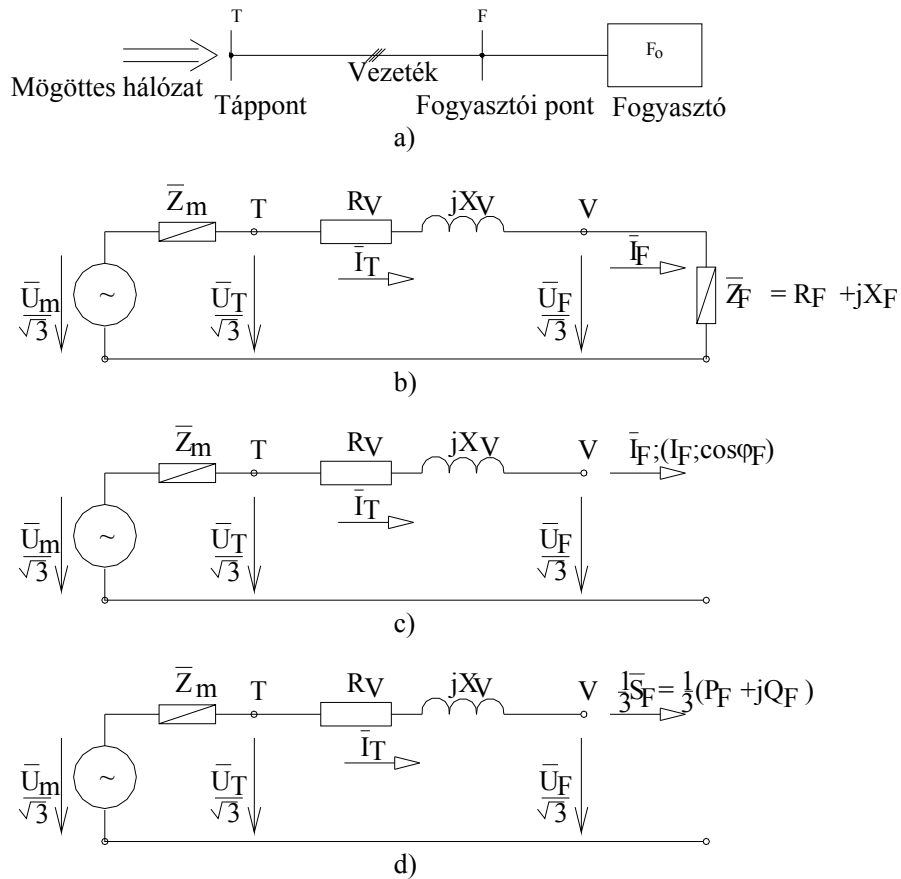


6.1 ábra: Háromfázisú hálózat egyfázisú helyettesítése hálózatszámításhoz  
a) A háromfázisú hurkolt hálózat; b) A helyettesítő vázlat csomóponti módszerhez

### 6.1.2 A vezetéken történő teljesítményáramlás számítása

A legegyszerűbb tápellátás esetére – amikor is egy táppontból egyetlen vezetéken egyetlen fogyasztót látunk el – megvizsgáljuk, hogy hogyan számítható a fogyasztói teljesítmény és a hálózati veszteség, ha a fogyasztó különböző villamos paramétereit tekintjük függetlennek és állandónak. Természetesen állandósult üzemállapotot

vizsgálunk, és feltételezzük, hogy a hálózat, a táplálás és a fogyasztó szimmetrikus. A mintahálózat a 6.2 ábrán látható.



6.2 ábra: Teljesítményáramlás számítása

a) mintahálózat; b) fogyasztó, mint impedancia;

c) fogyasztó mint áramterhelés; d) fogyasztó, mint állandó teljesítményfelvétel

### 6.1.3 A fogyasztó felvétele impedanciaként

Az egyfázisú helyettesítő vázlat készítésekor a mögöttes hálózatot mint valóságos generátort, a vezetéket mint rövid távvezetékét vettük figyelembe. Így a vizsgálandó hálózatunkra a 6.2/b ábra helyettesítő vázlata rajzolható fel. Ha – és ez a gyakorlatnak megfelel – a generátorok korszerű feszültségszabályozókkal vannak ellátva, abban az esetben a betáplálási ponton a feszültség állandó, így a hibamentes állandósult állapotban ideális generátorral helyettesíthetjük, jelen esetben  $U_f =$  állandó.

Az 6.2/b ábrán látható, hogy a fogyasztót állandó impedanciával

$$\bar{Z}_F = R_F + jX_F \quad (6.1)$$

képeztük le. Ez azt jelenti, hogy a fogyasztó felvett teljesítménye a fogyasztói pont feszültségének  $U_{Ff}^2$  négyzetétől függ, a feszültség változására négyzetesen reagál.

A hálózatra Kirchhoff II. huroktörvényét felírva:

$$\bar{U}_{Tf} = \bar{I}_T(R_v + jX_v) + \bar{U}_{Ff} = \bar{I}_T \bar{Z}_v + \bar{U}_{Ff} , \quad (6.2)$$

mely összefüggésben

$$\bar{U}_{Ff} = \bar{I}_F(R_F + jX_F) = \bar{I}_F \bar{Z}_F , \quad (6.3)$$

ill.

$$\bar{I}_F = \bar{I}_T , \quad (6.4)$$

mert egyetlen soros áramkör van.

A vezeték csatlakozási pontján a szállított háromfázisú teljesítmény:

$$\bar{S}_T = 3\bar{U}_{Tf} \bar{I}_T^* = 3U_{Tf} I_T (\cos \varphi_T + j \sin \varphi_T) , \quad (6.5)$$

míg a fogyasztói ponton; a vezeték végén:

$$\bar{S}_F = 3\bar{U}_{Ff} \bar{I}_F^* = 3U_{Ff} I_F (\cos \varphi_F + j \sin \varphi_F) . \quad (6.6)$$

A feladat tehát ezen teljesítményfüggések megadott paraméterekkel való kifejezése.

Fejessük ki (6.1) és (6.2) egyenletek segítségével a fogyasztói áramot és a fogyasztó fázisfeszültségét:

$$\bar{I}_F = \bar{U}_{Tf} \frac{1}{\bar{Z}_v + \bar{Z}_F} , \quad (6.7)$$

$$\bar{U}_{Ff} = \bar{U}_{Tf} \frac{\bar{Z}_F}{\bar{Z}_v + \bar{Z}_F} . \quad (6.8)$$

Ha a fogyasztói teljesítményt  $\bar{S}_F$ -et a fogyasztói feszültségtől függően akarjuk meghatározni, célszerű a teljesítmény komplex konjugáltját először kifejezni.

$$\bar{S}_F^* = 3\bar{U}_{Ff}^* \bar{I}_F . \quad (6.9)$$

(6.6)-at és (6.7)-et helyettesítsük (6.9)-ba, akkor

$$\bar{S}_F^* = 3\bar{U}_{Ff}^* \frac{\bar{U}_{Tf}}{\bar{Z}_v + \bar{Z}_F} = 3\bar{U}_{Ff}^* \frac{1}{\bar{Z}_v + \bar{Z}_F} \bar{U}_{Tf} \frac{\bar{Z}_v + \bar{Z}_F}{\bar{Z}_F} .$$

azaz

$$\bar{S}_F^* = 3 \frac{U_{Ff}^2}{\bar{Z}_F} . \quad (6.10)$$

A  $\bar{Z}_F = Z_F(\cos \varphi_F + j \sin \varphi_F)$  impedanciát behelyettesítve (6.10) konjugáltjába:

$$\bar{S}_F = 3 \frac{U_{Ff}^2}{\bar{Z}_F^*} = 3 \frac{U_{Ff}^2}{Z_F} (\cos \varphi_F + j \sin \varphi_F) . \quad (6.11)$$

A hatásos- és a meddő teljesítmény kifejezés  $Z_F$ -el bővítve a törtet:

$$P_F = 3 \frac{U_{Ff}^2}{Z_F} \cos \varphi_F = 3 \frac{U_{Ff}^2 R_{Ff}}{Z_F^2} , \quad (6.12)$$

$$Q_F = 3 \frac{U_{Ff}^2}{Z_F} \sin \varphi_F = 3 \frac{U_{Ff}^2 X_{Ff}}{Z_F^2} , \quad (6.13)$$

A tápponti és a fogyasztói komplex teljesítmény különbsége a távvezetéken keletkező komplex teljesítmény veszteség:

$$\bar{S}_V = \bar{S}_T - \bar{S}_F = 3(\bar{U}_{Tf} - \bar{U}_{Ff})\bar{I}_T^* \quad (6.14)$$

$$\bar{S}_V = 3(R_V + jX_V)\bar{I}_T\bar{I}_T^* = 3R_V I_T^2 + j3X_V I_T^2. \quad (6.15)$$

azaz

$$P_V = 3I_T^2 R_V; \quad Q_V = 3I_T^2 X_V \quad (6.16)$$

### 6.1.4 A fogyasztó állandó árammal való leképzése

Legyen táphálózatunk megint a 6.2/a ábra szerinti! A fogyasztó csatlakozási pontján legyen ismert az áram nagysága  $I_F$  és a teljesítménytényező ( $\cos \varphi_F$ ), ahol  $\varphi_F$  az  $\bar{U}_{Ff}$  és  $\bar{I}_F$  közötti szög (6.2/c ábra). Ilyen feltételezések mellett az  $\bar{U}_{Ff}$  fogyasztói feszültség számítására a (6.1) képletből indulhatunk ki:

$$\bar{U}_{Ff} = \bar{U}_{Tf} - \bar{I}_F(R_L + jX_L). \quad (6.17)$$

Ha  $\bar{I}_F$  és  $\cos \varphi_F$  ismert, akkor (6.17) így írható:

$$\bar{U}_{Ff} = \bar{U}_{Tf} - I_F(\cos \varphi_F - j \sin \varphi_F)(R_V + jX_V). \quad (6.18)$$

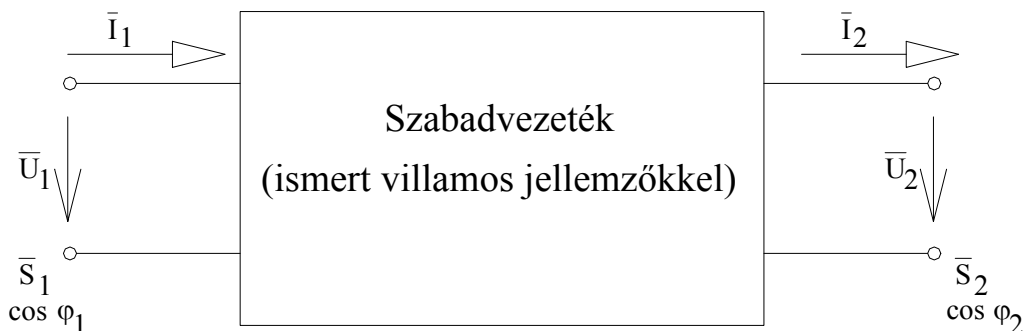
Legyen a fogyasztó teljesítményadata ( $P_F$  és  $Q_F$ ) adott, ebből kell  $\bar{I}_F$  értékét meghatározni, anélkül, hogy  $\bar{U}_{Ff}$  tényleges értékét ismernénk. Így csak egy durva közelítéssel élhetünk, miszerint  $U_{Ff}$  helyett a névleges fázisfeszültséget helyettesítjük be ( $U_{Fn} / \sqrt{3}$ ):

$$\bar{U}_{Ff} \approx \bar{U}_{Tf} - \left( \frac{P_F}{\sqrt{3}U_{nF}} + j \frac{Q_F}{\sqrt{3}U_{nF}} \right) (R_L + jX_L). \quad (6.19)$$

Az így adódó (6.19) számítási összefüggés csupán közelítő összefüggésként alkalmazható.

## 6.2 Teljesítményátvitel szabadvezetéken

Általában az üzemi viszonyok tárgyalásánál a 6.3 ábrán vázolt jellemzők nagyságát ill. változását vizsgáljuk.



6.3 ábra: A villamosenergia-átvitel üzemi jellemzői

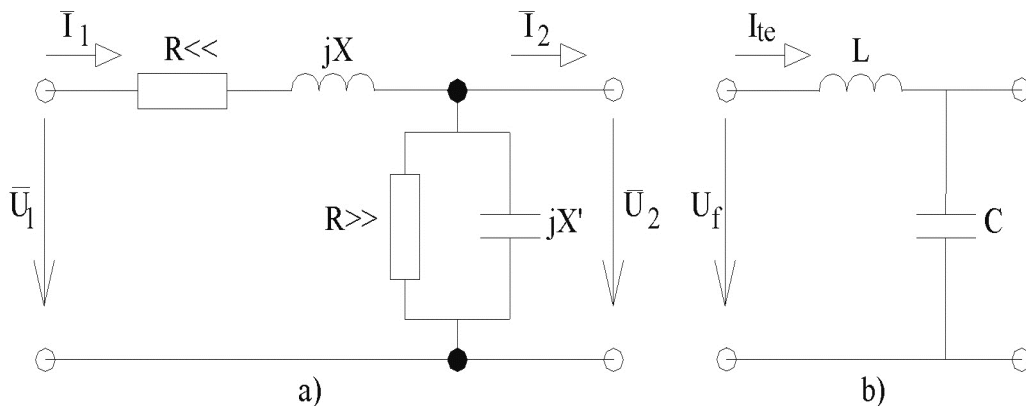
### 6.2.1 A szabadvezeték természetes teljesítménye

A természetes teljesítmény egy adott szabadvezeték igen fontos jellemzője és a szabadvezeték üzemi viszonyaival van szoros kapcsolatban.

Az **üzemi viszonyok** között speciális helyzetet foglal el az az állapot, amikor azt kívánjuk elérni, hogy a vezeték csak a hasznos teljesítmény terhelje, csak wattos teljesítményt kelljen átvinni.

**A törekvés oka** a gazdaságosság, ugyanis a vezeték a látszólagos áram terheli, így vagy kisebb keresztmetszet kell, vagy meglévő keresztmetszetben nagyobb teljesítmény vihető át, ha csak wattos komponens van.

E cél elérése érdekében olyan viszonyokat kell létesíteni, amelyek között a vezeték ( $Q_L$ ) induktív meddőteljesítmény igényét a kapacitív teljesítmény ( $Q_C$ ) kiegyenlíti. Ekkor energiaegyensúly is van, azaz  $W_L = W_C$ .



6.4 ábra: Távvezeték helyettesítő vázlat: (a) egyszerűsített, (b) ideális

Vagyis:

$$\frac{1}{2} L I_{te}^2 = \frac{1}{2} C U_f^2, \quad (6.20)$$

ahol  $I_{te}$  az az áram, amely ezen egyenlőséghez tartozik.

A fenti egyenletből:

$$\frac{U_f^2}{I_{te}^2} = \frac{L}{C} \rightarrow \frac{U_f}{I_{te}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = Z = \sqrt{X \cdot X'}, \quad (6.21)$$

ahol  $jX = j\omega \cdot L$  és  $-jX' = \frac{1}{j\omega \cdot C}$ .

Ez azt jelenti, hogy adott feszültség és terhelés esetén a vezeték impedanciájának, avagy **adott impedanciájú vezeték esetén a feszültség és az áram viszonyának meghatározott értékűnek kell lennie.**

Ugyanez az eredmény adódik, természetesen, a meddőteljesítmények egyenlőségéből is:

$$Q_L = Q_C. \quad (6.22)$$

Vagyis:

$$3I_{te}^2 X_L = \sqrt{3} I_c U = U^2 \omega \cdot C = \frac{3U_f^2}{X_c}. \quad (6.23)$$

$$3I_{te}^2 \omega \cdot L = U^2 \omega \cdot C = 3U_f^2 \omega \cdot C. \quad (6.24)$$

ebből:

$$\frac{U_f^2}{I_{te}^2} = \frac{L}{C} \rightarrow \frac{U_f}{I_{te}} = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad (6.25)$$

ahol  $\sqrt{\frac{L}{C}}$  egy **fázisfeszültség és fázisáram** viszonya, tehát ellenállás jellegű jellemző.

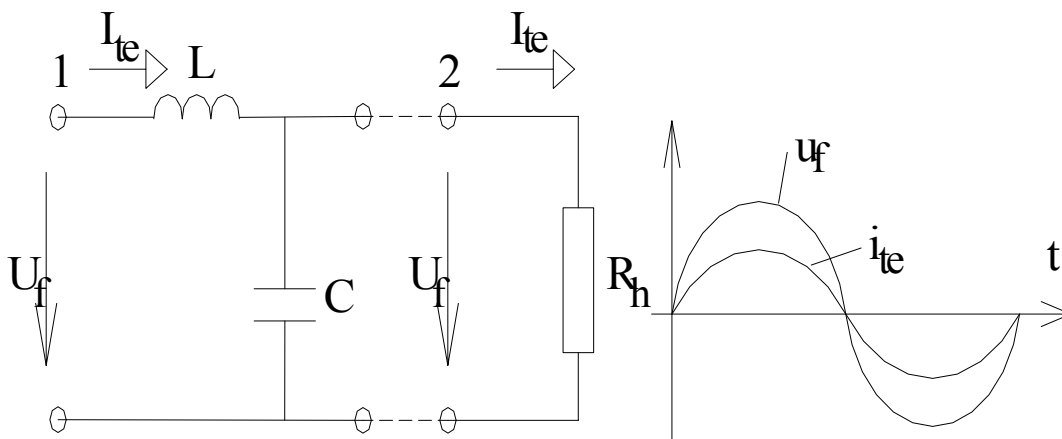
Ha  $[L] = \text{H}$  ill.  $\text{H/km}$ , és  $[C] = \text{F}$  vagy  $\text{F/km}$ ; akkor:

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = R_h, \quad (6.26)$$

ahol  $[R_h] = \Omega$  a vezeték hullámellenállása.

Tisztán wattos vezetéki áram esetén az  $R_h$  értéke a vezeték **minden pontjában** ugyanakkora – hiszen hosszegységre eső  $L$  – és  $C$ -re is ugyanakkora a hányados, mint akár milyen hosszra (6.31) – vagyis a feszültség és az áram egymással fázisban van a vezeték minden pontján, így a tápponti és a végponti helyen is (6.5 ábra).

$$\sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{n \cdot L}{n \cdot C}}. \quad (6.27)$$



6.5 ábra: A vezetéken átvitt (természetes) teljesítmény

Az ilyen vezetéken átvitt teljesítmény a **természetes teljesítmény**:

$$P_t = \sqrt{3}U_v I_{te} = 3U_f I_{te} = 3U_f \frac{U_f}{R_h} = \frac{U_v^2}{R_h}, \quad (6.28)$$

ahol  $[P_t] = \text{MW}$ , a természetes teljesítmény;  $[U_v] = \text{kV}$ , vonali feszültség;

$[R_h] = \Omega$ , vezeték hullám ellenállása,

$$I_{te} = \frac{U_f}{\sqrt{\frac{L}{C}}} = \frac{U_f}{R_h}. \quad (6.29)$$

Nevét onnan kapta, hogy ekkor a feszültség és áram viszonyok a vezeték minden pontján a legegyszerűbbek:

- $u_1 = u_2$ ,
- $I_2 = I_1 = I_w = I_{te}$  a természetes teljesítményhez tartozó áram,
- $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_1$ . (6.30)
- veszteség nincs a vezetéken (veszteségmentes vezeték),
- az induktív és kapacitív teljesítmény egymást mindenütt kiegyenlíti.

### 6.2.2 A természetes teljesítménytől eltérő teljesítmény-átvitel jellemzése

**a)** Ha az átvitt teljesítmény nagyobb, mint a természetes teljesítmény  $P > P_t$ :

$$\sqrt{3}UI > \sqrt{3}UI_{te}, \rightarrow I > I_{te} \quad (6.31)$$

$$Q_{\text{lényeges}} > Q_L = Q_C, \quad (6.32)$$

mivel:

$$I > I_{te}, \text{ így } \frac{U_f}{I} < R_h. \quad (6.33)$$

akkor a vezetéken feszültségesés lép fel, van az áramoknak wattos és meddő összetevője  $I_w$  és  $I_m$ :

$$U_H = I_w R + I_m X, \quad (6.34)$$

ha  $R = 0$ , akkor is  $U_H \neq 0$ ;  $U_h = I_m X$ .

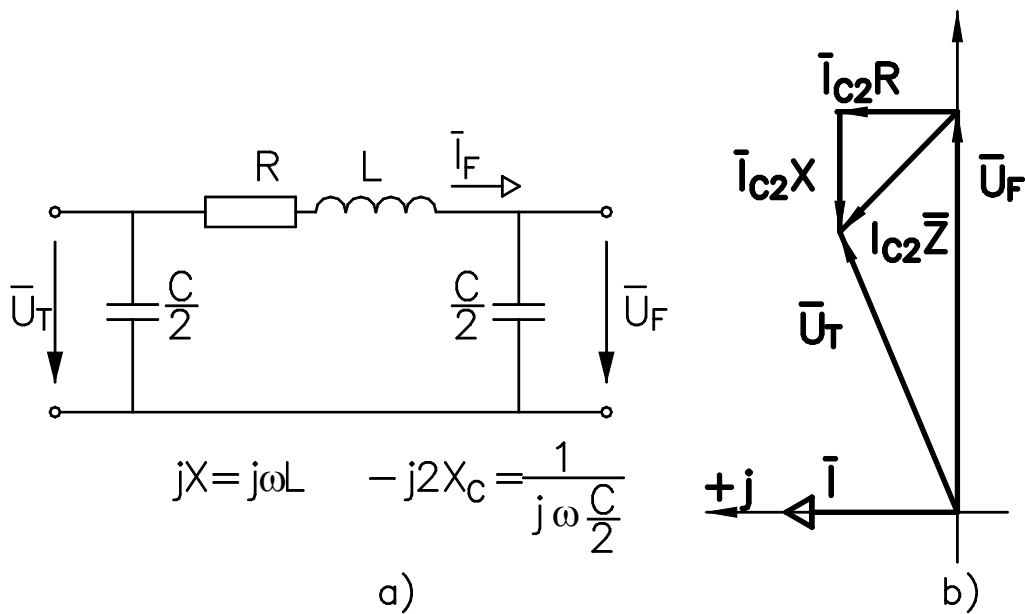
**b)** Ha az átvitt teljesítmény kisebb, mint a természetes teljesítmény  $P < P_t$ :

$$I < I_{te}, \text{ így } \frac{U_f}{I} > R_h. \quad (6.35)$$

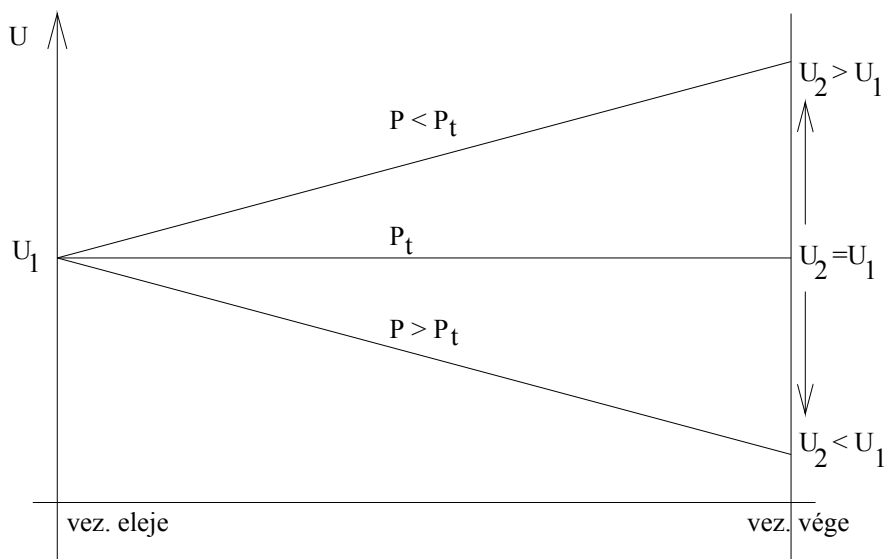
vagyis a fogyasztónál ill. a vezetéken feszültségemelkedés lép fel.

$P = 0$  vagyis üresjárásnál a generátortól a fogyasztóig feszültségemelkedés lép fel. (Ferranti-jelenség!)





6.6 ábra: Ferranti-jelenség  
a) helyettesítő vázlat; b) fázorábra



6.7 ábra: A természetestől eltérő teljesítmény-átvitel

Természetesen  $P \neq P_t$  átvitel esetén is biztosítani lehet a természetes üzemet, ha  $R_h$  értékét mesterségesen megváltoztatjuk  $L$  ill.  $C$  változtatásával!

$$\left( R_h = \sqrt{\frac{L}{C}} \right).$$

Legyen:  $P_{\text{ávitt}} < P_t$   
 $P_{\text{ávitt}} = P_t^{\prime} < P_t$  úgy érjük el, hogy  $R_h$ -t megnöveljük.  
 $P_t^{\prime} = \frac{U_v^2}{R_h^{\prime}}$ , ahol  $R_h^{\prime} > R_h$

$R_h$  növelhető:  $L$  növelésével,  $C$  csökkentésével (ez a gyakorlati eset, mégpedig ún. söntfojtó tekerccsel).

Legyen  $P_{\text{ávitt}} > P_t$   
 $P_{\text{ávitt}} = P_t^{\prime\prime} > P_t$  ehhez  $R_h$ -t csökkenteni kell.  
 $P_t^{\prime\prime} = \frac{U_v^2}{R_h^{\prime\prime}} > \frac{U_v^2}{R_h}$ , ahol  $R_h^{\prime\prime} < R_h \rightarrow P_t^{\prime\prime} > P_t$

$R_h$  értéke csökkenthető:  $L$  csökkentésével,  $C$  növelésével.

### 6.3 Hálózatok villamos méretezése

A méretezés feladatára akkor kerül sor, ha:

- meglévő hálózat bővítését vagy teljes felújítását kell elvégezni, vagy
- új hálózatot, ill. hálózatrészt kívánunk létrehozni.

A létesítés első részfeladata a tervezés, amely során a választott vezetéktípus **megfelelő keresztmetszetének** meghatározása a vezetékméretezés.

#### 6.3.1 A vezetékméretezés általános szempontjai

A vezetékméretezés során is, mint minden műszaki berendezés tervezésénél a négy alapszempont:

- műszaki,
- emberi (személyi biztonság),
- gazdaságossági,
- szakmai jogi szempont a figyelembe veendő.

A műszaki szempontból való megfelelés a konkrét esetben:

a) a villamosenergia-szolgáltatás minőségi jellemzőinek (feszültség, frekvencia) biztosítása a fogyasztói pontokon;

b) a folyamatos energiaellátás biztosítása mind villamos, mind melegedési, mind szilárdsági szempontoknak megfeleléssel.

c) az ember védelmének biztosítása a létesítési és az érintésvédelmi előírások betartásával.

A gazdaságosság követelményének kielégítése a beruházási és üzemeltetési költségek együttes minimumára, rövid létesítési időre és hosszú élettartamra való törekvéssel. A törvényes előírások (szabványok), rendeletek betartása és betartatása teszi lehetővé az esetleges vitás kérdések jogi elbírálását.

Ebben a fejezetben azzal foglalkozunk, hogyan kell a vezetéket úgy méretezni, hogy a fogyasztói feszültség a szabványos tűréshatáron belül maradjon. Ez minden fogyasztó alapvető igénye, aminek fő indoka az, hogy a fogyasztói berendezéseket, az ún. névleges feszültséggel való üzemeltetésre tervezték, és a tűréshatáron kívüli feszültséggel való üzemeltetéskor üzemük nem optimális, esetleg üzemképtelenné válhatnak, netán meg is hibásodhatnak.

6.1 táblázat: Fogyasztók minőségi viselkedése névlegestől eltérő üzemi feszültségen

Fogyasztó	$U_{üz} < U_n$	$U_{üz} > U_n$
Volfrámszálas izzólámpa	élettartam nő fényáram csökken	élettartam csökken fényáram nő
Fénycső	gyújtási zavarok ( $0,85 U_n$ ) élettartam csökken	
Villamos fűtőtest	a kívánt hőmérséklet lassabban áll be	veszélyes túlmelegedés
Rádió- és tv készülékek	kevésbé élvezhető kép	élettartam csökken
Aszinkron motor	billenő nyomaték csökken, fordulatszám csökken, felvett áram nő, tekerccs túlmelegedik	mágnesező áram nő, vastest túlmelegszik

Visszatérve a vezeték méretezés és a feszültségesés kapcsolatára, nekünk egy vezeték keresztmetszetét kell kiszámítani, azaz az egy vezetéken eső feszültség értékére van szükség, a különböző típusú ellátási esetekre a következőképpen számítható:

a) *Egyfázisú váltakozó áramú*, valamint *egyenáramú* táplálás esetén mivel az oda- és visszavezetést azonosnak feltételezzük, a feszültségesés az egy vezetékszálon eső feszültség kétszerese:

$$e = 2e', \quad (6.36)$$

ahol  $e'$  az ún. *mértékadó feszültségesés* azaz a feszültségesés egy vezetékszálon vonatkoztatott értéke az alábbiak szerint számítható:

$$e' = \frac{\varepsilon}{100} \frac{U_n}{2} \text{ V}, \quad (6.37)$$

ahol  $[U_n] = \text{V}$  a hálózat névleges feszültsége.

*Háromfázisú váltakozó áramú* rendszer szimmetrikus háromfázisú terhelése esetén – mivel a nullavezetőben áram nem folyik – csak a fázisvezetőn keletkezik feszültségesés. Így teljes szimmetria esetén a mértékadó feszültségesés értéke:

$$e' = \frac{\varepsilon}{100} \frac{U_n}{\sqrt{3}} \text{ V}. \quad (6.38)$$

A megengedett százalékos feszültségesés kisfeszültségű hálózatrészre szokásos értékeit a 6.2 táblázat tartalmazza.

6.2 táblázat: Megengedett feszültségesés

Hálózatrész	Lakóházakban megengedett, üzemekben szokásos legnagyobb feszültségesés, %	
Csatlakozóvezetéken és betápláló fővezetéken együttesen	1	
Felszálló és leágazó fővezetéken együttesen	1	
Fogyasztásmérő utáni hálózaton:	általában	1,5
	ha csak motorikus fogyasztót lát el	3

Háromfázisú váltakozó áramú rendszer vegyes terhelése esetén (amely szimmetrikus háromfázisú fogyasztókon kívül, a különböző fázisokra kapcsolt egyfázisú fogyasztók ellátását jelenti) mind az egyes fázisvezetéseken, mind a nullavezetőn különböző a feszültségesés értéke. A vezetékmeretezés ez esetben bonyolult, részletes tárgyalása meghaladja a tantárgy kereteit.

Ahol a terhelés szimmetriája konkrétan nem értékelhető, csak statisztikailag becsülhető, megengedhető a következő közelítő összefüggés használata:

$$e' = 0,75 \frac{\varepsilon U_n}{100 \sqrt{3}} \text{ V}, \quad (6.39)$$

ahol  $[U_n] = V$  a háromfázisú váltakozó áramú rendszer névleges, azaz vonali feszültsége.

## 6.4 Távvezetékek az energiarendszerben

A villamos energia előállítás a felhasználás helyétől általában távol történik. Az energiarendszer ilyen kiépítését sok tényező befolyásolta, elsősorban az, hogy a primer energiahordozók lelőhelyei a fogyasztás helyétől távol esnek, és a nagyobb teljesítményű termelőegység (pl. generátor) gazdaságosabb, mert a létesítési költsége fajlagosan kisebb. A nagy hálózatrendszerek kialakulásához vezetett az is, hogy a fogyasztók időben változó mennyiségű energiát igényelnek, és a fogyasztótípusonként felhasznált energia mennyisége is igen különböző, termelni pedig nagy energiamennyiséget időben állandóan gazdaságos. Ezért célszerű volt olyan nagy fogyasztói területeket kialakítani, amelyeknél az egyedi fogyasztásváltozások már sokkal kevésbé változó igényben összegződnek.

E feladatok megoldására építették a távvezetéseket, vagy röviden vezetéseket, amelyek az erőművek, transzformátorállomások és a fogyasztók között létesítenek összeköttetést. A távvezeték kiviteli szempontból kétféle lehet: szabadvezeték vagy kábel.

A szabadvezeték olyan csupasz (burkolt, esetleg szigetelt) vezeték, amely a földtől elszigetelten a véletlen érintés megszabta magasságban tartószerkezeten van elhelyezve.

A kábel olyan – többnyire földbe fektetett – szigetelt vezeték, amely nedvességbehatolás, mechanikai és vegyi sérülés ellen védőburkolattal van ellátva. A különböző feladatokra készített szerkezetek, szerkezeti elemek részletes ismertetése, és a mérnöki feladatokhoz nélkülözhetetlen, a méretezéshez szükséges.

### 6.4.1 Szabadvezetékek szerkezeti elemei

#### 6.4.1.1 Szabadvezetési vezetőanyagok

A szabadvezetési vezetőanyagokkal szemben támasztott követelmények összetettek. Elsődleges a mechanikai biztonság, azaz a leszakadás és a különböző vezetéklenyágások, rezgések elkerülése. A gazdaságos létesítésre nemcsak a vezetékanyag ára, hanem a szerelvények és a szerelésnek a vezetékanyag minőségétől függő költsége, valamint az oszlopok szerkezete és méretei is hatnak. Az olcsó üzemeltetést az üzemben levő vezetékben keletkező veszteségek, valamint a karbantartás és a felújítás költségei határozzák meg.

Ezeknek megfelelően jó villamos vezetőképességű, nagy mechanikai szilárdságú, a korrózióval szemben jó ellenálló képességű vezetékanyagot alkalmaztak, illetve több különböző anyagból készített vezeték szerkezeteket fejlesztettek ki.

A távvezetékek vezetékanyaga eleinte kizárólag a réz volt, amit később a nagyobb oszlopközű távvezetéseken a bronz, ill. a kadmiumbronz váltott fel. A mai távvezetékek

nemcsak nálunk, hanem világszerte alumínium, ötvözött alumínium, ill. acélalumínium sodronyszerkezetekkel (acél szálak köré sodort alumínium vezetékek) épülnek. Az ötvözött alumínium és acélalumínium vezetőjű távvezetékek előretörését az magyarázza, hogy e vezetők felelnek meg legjobban a korszerű távvezetékekkel szemben támasztott követelményeknek.

A szabadvezetékek céljára általánosságban csupasz sodronyokat alkalmaznak, de egyes természetvédelmi területeken a burkolt, illetve kifestültségű hálózatokon a szigetelt sodrony is kezd elterjedni, utóbbi szigetelt szabadvezeték néven.

A sodrony túlnyomórészt egynemű anyagú és azonos átmérőjű elemi szálakból készül. Használhatnak két különemű anyagból készült sodronyt is, mint az acélalumíniumot, amelynek belső része horganyzott acél, külső része alumínium. A jobb térkitöltés elérése érdekében esetenként az egyes rétegekben eltérő átmérőjű elemi szálakat is alkalmaznak.

A sodronyszerkezet előnye, hogy biztonságosabb, mert a vékony elemi szálak homogén minősége jobban biztosítható, mint a vastagoké; és egy-két elemi szál meghibásodása, szakadása esetén a sodrony nem válik használhatatlanná.

A sodrony a szélrengés okozta kifáradás ellen is nagyobb biztonságú, mert az elemi szálak jobban hajlíthatók, és egymáson súrlódásuk energiát emészt fel. A sok elemi szál folytán a sodrony hajlékonyabb.

A csupasz vezetéksodrony huzalanyag szerinti típusai:

- alumínium vezetéksodrony, jele: ASC;
- ötvözött alumínium vezetéksodrony, jele: AASC;
- alumínium vezetéksodrony acél erősítéssel, jele: ACSR;
- ötvözött alumínium vezetéksodrony acél erősítéssel, jele: AACSR.

Az azonos átmérőjű elemi szálakból sodort sodrony felépítése 6-os rendszer szerint történik. Ez azt jelenti, hogy minden réteg az előző rétegnél 6 elemi szállal többet tartalmaz. Ha az elemi szálak átmérője változik, a 6-os felépítés, az átmenetet kivéve teljesül. A többretegű sodrony egymást követő rétegeinek sodrásiránya ellentétes, de a külső sodrat mindig jobbmenetű. Indokolt esetben az ötvözött alumínium és az acél erősítésű ötvözött alumínium vezetéksodrony külső rétegének sodrásiránya balmenetű lehet.

A szabvány szerinti alumínium vagy nemesített alumínium sodronyt alkotó huzalokat csak hegesztéssel lehet toldani. A sodronyszerkezetben a toldási távolság elemi szálaban 500 m-nél, egy rétegben 20 m-nél, különböző rétegekben 5 m-nél nem lehet kisebb. A toldás helye a sodrony legkülső rétegén gyárilag maradandóan jelölt.

A sodronyszerkezet következménye az is, hogy a sodrony szakítószilárdsága és rugalmassági tényezője mindig kisebb a sodronyt alkotó huzalokénál.

A sodronyszerkezetet alkotó huzalanyagok fizikai tulajdonságait a 6.3 táblázat tartalmazza 20 °C hőmérsékletre vonatkoztatva.

6.3 táblázat: Sodronyszerkezetet alkotó huzalanyagok fizikai jellemzői

Fizikai jellemzők	Al 99,5E (k) jelű alumínium huzal	AlMgSiE (n) jelű ötvözött alumínium huzal	AV4 jelű acélhuzal
Sűrűség $[\rho] = \text{g/cm}^3$	2,703	2,700	7,800
Rugalmassági tényező $[E] = \text{N/mm}^2$	60 000	70 000	200 000
Lineáris hőtágulási együttható $[\alpha] = 1/^\circ\text{C}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$23 \cdot 10^{-6}$	$11 \cdot 10^{-6}$
Fajlagos egyenáramú ellenállás $[\rho_{20}] = \Omega\text{mm}^2/\text{m}$	0,0283	0,033	0,220
A villamos ellenállás hőmérsékleti együtthatója (10–30 °C intervallumban)	0,004 030	0,003 600	0,001

#### Alumínium Al 99,5 E (k)

A vezetéksodrony jele ASC. A villamos kemencéből kikerült 99,8%-os, rendkívül lágy és kis szilárdságú alumíniumot közvetlen vezeték céljára felhasználni nem lehet. Az 1%-nál nagyobb szennyeződés esetén viszont a levegőn gyorsan oxidálódik és fehér porrá, timfölddé alakul át.

Vezetőanyagként csak 99,5% tisztaságú alumínium használható. A huzalok szilárdságát hidegen húzással növelik, így a felületén egy kemény réteg keletkezik.

Az alumínium szabadvezeték csak ilyen keményre húzott huzalokból készült sodronyszerkezet lehet.

Az alumínium huzalok felületén keletkező oxidréteg vegyi hatásokkal szemben rendes körülmények között kellően megvédi a vezető anyagát. Meg kell azonban jegyezni, hogy klórral, kénnel, alkáliákkal, humuszsavval szemben igen érzékeny tehát ilyen jellegű szennyezett levegőben nem használható. Nagyon gondosan kell ügyelni arra, hogy szállítás vagy szerelés közben ilyenekkel ne érintkezzen (a földre fektetés kerülendő!). Nedvesség jelenlétében más fémekkel érintkezve rohamosan korrodál, különösen ha rézzel érintkezik. Így nagy körültekintést kíván a szerelvények anyagának megválasztása és azok kialakítása. A szabványos alumínium vezetéksodronyok jellemző adatait a 6.3 táblázata tartalmazza.

A 6.3 táblázat alapján az alumínium vezetéksodrony szakítószilárdsága 140...180 N/mm<sup>2</sup>, ezért csak kisméretű hálózatokon alkalmazzák. Itt kicsik az oszlopközök (20...40 m), így nincs szükség nagy húzó igénybevételre és gazdaságossági szempontból előnyös a kis vezetékvesztés azaz a jó vezetőképesség.

#### Ötvözött alumínium Al Mg Si E

A vezetéksodrony jele AASC. A szakirodalomban elterjedten használják a nemesített alumínium, ill. az aludur elnevezést. Az alumínium szilárdsága ötvözéssel növelhető. A 99,5% tisztaságú alumíniumot főleg magnéziummal, szilíciummal és kevés vassal ötvözik. Az ötvözött tömbből 10...15 mm átmérőjű huzalt készítenek, ezt edzik, majd több napig pihentetik és végleges átmérőre húzzák, végül megeresztik (edzés, pihentetés, lágyítás). Az így előállított nemesített alumínium szakítószilárdsága 300 N/mm<sup>2</sup>.

Mivel a kemény alumíniumnál lényegesen nagyobb szilárdságú, nagyobb húzóerővel feszíthető, így az oszlopközök nagyobbak lehetnek. E tulajdonsága folytán hazai közepesfeszültségű távvezetéseinket úgyszólván kizárólag nemesített alumínium

sodronnyal szerelik. Vegyi tulajdonságai az alumíniuméval azonosak. A szabványos ötvözött alumínium vezetéksodronyok jellemző adatait a 6.3 táblázat mutatja.

#### *Acélalumínium (ACSR)*

A szakmai nyelvben sokszor ACAL rövidítéssel emlegetik. A sodrony szilárdságának növelése céljából az alumínium vagy nemesített alumínium elemi szálakat acélhuzalbélre vagy acél sodronybélre sodorják. A sodronyt az acél és az alumínium keresztmetszetének arányával jelöljük.

Ez az arány változik aszerint, hogy mennyire kell megnövelni a sodrony szilárdságát. Hazai viszonyok között általánosságban 1:6 arányú sodronyt alkalmazunk. Nehéz hegyi terepen vagy zúzmarás vidéken az 1:5 vagy az 1:3 arányt, nagy folyam- ill. völgyátfeszítésekhez pedig 1:1 arányt is alkalmaznak. A szabványos acélalumínium sodronyok jellemző adatait a 6.4 táblázat tartalmazza. Az acélbél huzalainak tűzben horganyzott anyaga AV4 jelű, az alumínium sodrat elemi szálai keményre húzottak.

Az acélalumínium sodronyokban két olyan fémet foglalnak egységes szerkezetbe, amelynek rugalmassági tényezője és hőtágulási együtthatója számottevően különböző. A szilárdsági számításoknál feltételezzük, hogy az alumíniumburkot olyan szorosan sodorták az acélbétetre, hogy a súrlódás kölcsönös elmozdulást nem enged meg, s így a két fém egynemű anyagként kezelhető. A húzóerő felvételében mind az acél, mind az alumínium részt vesz, míg a villamos ellenállás szempontjából csak az alumíniumburok keresztmetszetét vesszük figyelembe.

Ha a szilárdsági követelmények nem oldhatók meg az acélbél keresztmetszetének növelésével, akkor az alumínium sodrat helyett nemesített alumíniumból (aludurból) sodort köpenyt alkalmaznak.

Az ötvözött alumínium vezetéksodrony acélerősítéssel (AACSR) jellemző adatait 6.3 táblázat adja meg. A sodronyok eredő rugalmassági tényezőit és lineáris hőtágulási együtthatóit a 6.3 táblázat tartalmazza.

#### *Acél*

Az acél kedvező mechanikai tulajdonságai és olcsósága ellenére sem jöhet szóba távvezetékanyagként, mert villamos tulajdonságai ezt nem teszik lehetővé.

Az acél ellenállása nagy, a váltakozó áramú ellenállást a szkinhatás fellépése teszi igen kedvezőtlené. A nem mágnesezhető fémekből készült vezetőkhez képest az acélvezetők induktivitása ugyancsak nagyobb a nagyobb permeabilitás miatt, amely az acél minőségétől, a vezetők szerkezetétől és az áramerősségtől függ, és annak változásával természetesen állandóan változik is.

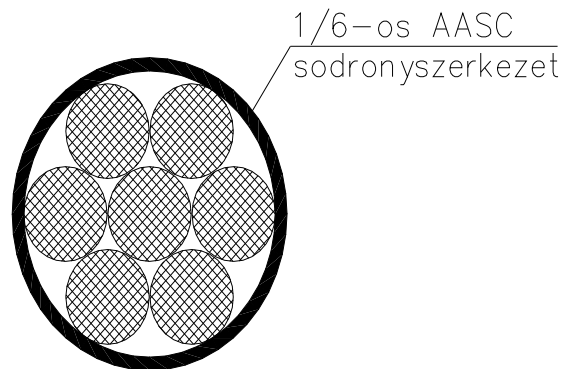
Az acélvezetőket rozsdásodás ellen horganyzással védeni kell. A horganyzás épségére a szerelésnél nagyon kell vigyázni.

A szabadvezetőket légköri túlfeszültség ellen védő ún. védővezeték anyaga régen kizárólag acélsodrony volt. Ma már a védővezetők is acélalumíniumból készülnek.

#### *A burkolt szabadvezeték (BSZV)*

Ezt a középvezetésen alkalmazott szabadvezeték típust (6.1 ábra) az jellemzi, hogy olyan műanyag burkolattal rendelkezik, amely az adott feszültségszintre ugyan nem teljes értékű szigetelés, de alkalmazása csökkenti az üzemzavarok számát, mert a fázisvezetők összeérése vagy a vezetékre rádólt fa nem okoz földzárlatot, és kisebb helyigényű, mert csökkenthető a fázistávolság ill. a szükséges szabad terület. Erdős területen a BSZV létesítési költsége 10–20%-kal kisebb, mint a csupasz vezetéké, hiszen a biztonsági távolság csökkenésével jelentősen csökken a gallyazási feladat és a kivágandó erdőnyiladék szélessége (2,5–2,5 m), belterületi létesítéskor pedig a

nyomvonal közelebb helyezhető az egyes mesterséges, illetve természetes eredetű objektumokhoz.



6.8 ábra: Burkolt szabadvezeték sodrony felépítése

Az üzemzavari statisztikai adatok alapján a meghibásodások jelentős részét a szél, a hó, a jég, a só és egyéb szennyleakódások teszik ki, illetve a madarak és egyéb állatok, valamint a vezetékek körüli növényzet, a fák és ágaik okozzák. Skandináviában a BSZV rendszer bevezetésével ezen jelenségek által okozott meghibásodások száma jelentősen csökkent, sőt a BSZV vonal védelmi elemei járulékos módon védik a hálózat egyéb elemeit is (pl. transzformátorok). Így a külső összetevőkből származó meghibásodási gyakoriság ezen rendszer alkalmazásával csökkenthető.



6.4 táblázat: Ötvözött alumínium vezetéksodronyok (AASC)

Névleges keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	Szerkezet		Számított keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	Külső átmérő legfeljebb, mm	Fajlagos tömeg legfeljebb, kg/km	Számított szakítóerő legfeljebb, N	Egyenáramú ellenállás 20°C-on, legfeljebb, Ohm/km	Gyártási hossz, m
	Huzalszám, db	Huzalátmérő, mm						
16		1,70	15,89	5,10	43,01	2900	1,788	7300
25	1+6=7	2,10	24,24	6,30	65,70	4240	1,172	4700
35		2,50	34,35	7,50	93,20	5870	0,8265	3300
50		3,00	49,47	9,00	134,20	8080	0,5740	2300
70		2,10	65,79	10,50	182,3	11500	0,4408	4600
95	1+6+12=19	2,50	93,25	12,50	258,3	15940	0,3111	3300
120		2,80	117,0	14,00	324,1	19100	0,2480	2600
150		3,15	148,0	15,75	410,2	23700	0,1960	2000
185		2,50	181,6	17,50	507,4	31050	0,1611	3200
240	1+6+12+ +18=37	2,89	242,7	20,23	678,0	39650	0,1206	2400
300		3,21	299,4	22,47	836,5	48060	0,09773	1900
400	1+6+12+ +18+24=61	2,89	400,1	26,01	1122	61900	0,07338	2400
500		3,23	499,7	29,07	1401	76000	0,05874	1900
640	1+6+12+ +18+24+ +30=91	3,00	643,3	33,00	1809	99500	0,04576	2300
800		3,35	801,9	36,85	2254	120500	0,03671	1800
1000		3,74	999,5	41,14	2810	148400	0,02945	1400

6.5 táblázat: Alumínium vezetékcsodronyok acélhuzal erősítéssel (ACSR)

Névleges keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	Szerkezet		Számított keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	Külső átmérő legfeljebb, mm	Fajlagos tömeg legfeljebb, kg/km	Számított szakítóerő legálább, N	Egyenáramú ellenállás 20°C-on, legfeljebb, Ohm/km	Gyártási hossz, m
	huzalszám, db	huzalátmérő, mm						
16		1,70	15,89	5,10	43,0	4520	2,085	7300
25	1+6=7	2,10	24,24	6,30	65,7	6900	1,366	4700
35		2,50	34,35	7,50	93,1	8340	0,9640	3300
50		3,00	49,47	9,00	134,0	12020	0,6693	2300
70		2,10	65,79	10,50	182,1	18750	0,5140	4600
95	1+6+12=19	2,50	93,25	12,50	258,1	22650	0,3627	3300
120		2,80	117,0	14,00	323,7	28420	0,2893	2600
150		3,15	148,0	15,75	409,7	34350	0,2285	2000
185		2,50	181,6	17,50	506,8	44120	0,1880	3200
240	1+6+12+ +18=37	2,89	242,7	20,23	677,3	58960	0,1406	2400
300		3,21	299,4	22,47	835,6	72750	0,1140	1900
400	1+6+12+ +18+24=61	2,89	400,1	26,01	1121	97210	0,08556	2400
500		3,23	499,7	29,07	1400	121430	0,06850	1900
640	1+6+12+ +18+24+ +30=91	3,00	643,3	33,00	1807	152100	0,05336	2300
800		3,35	801,9	36,85	2255	194800	0,04280	1800
1000		3,74	999,5	41,14	2807	242800	0,03434	1400

6.6 táblázat: Szabványos acélalumínium sodronyok jellemző adatai

Névéges keresztmetszet, mm <sup>2</sup> /km <sup>2</sup>	Szerkezet		Az acél mag			A vezető réteg(ek)		Keresztmetszet viszony A <sub>w</sub> /A <sub>w</sub>	A vezetőek sodrony				Gyártási hossz, m
	acélhuzalok		számított keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	fajlagos tömegt, legfeljebb, kg/km	átmérője, legfeljebb, mm	számított keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	fajlagos tömegt, legfeljebb, kg/km		külső átmérője, legfeljebb, mm	fajlagos tömegt, legfeljebb, kg/km	számított szakítóerője, legfeljebb, N	egyenáramú ellenállás 20°C-on legfeljebb, Ω/km	
	száma	átmérője, mm						Száma					átmérője, mm
16/2,5	1	1,80	2,54	20	1,80	15,26	42	6	62	5920	1,862	6300	
25/4		2,25	3,97	31	2,25	23,85	65		96	9000	1,192	4000	
35/6		2,7	5,72	45	2,70	34,35	94		139	12680	0,8270	2800	
50/8		3,20	8,04	63	3,20	48,25	131		194	17480	0,5887	1900	
70/12	1+6=7	1,44	11,40	89	4,32	69,89	196	6,16	285	27700	0,4209	6200	
95/15		1,67	15,33	120	5,01	94,37	266		386	35750	0,3119	4500	
120/20		1,90	19,85	156	5,70	122,5	345		501	45850	0,2402	3500	
150/25		2,10	24,24	190	6,30	148,8	418		608	55250	0,1978	2900	
183/30		2,33	29,83	234	6,99	183,7	517		751	66200	0,1602	2300	
240/40		2,68	38,59	301	8,04	243,0	682		983	85340	0,1211	1800	
250/40		2,80	43,10	337	8,40	250,1	702		1039	84000	0,1173	1600	
300/50		3,00	49,48	386	9,00	304,2	854		1240	106980	0,0967	1400	
50/7	1+6=7	1,10	6,65	53	3,30	51,31	144	7,7	197	17800	0,5696	7400	
70/9		1,28	9,01	71	3,84	70,20	197		268	25000	0,4163	5400	
95/12		1,50	12,37	97	4,50	96,25	270		367	32150	0,3036	4000	
120/16		1,68	15,52	122	5,04	120,6	338		460	39800	0,2423	3200	
150/20		1,90	19,85	156	5,70	154,1	432		588	50900	0,1896	2400	
183/24		2,10	24,24	190	6,30	188,2	527		717	61450	0,1553	2000	
240/32		2,40	31,67	248	7,20	246,6	688		936	77700	0,1190	1500	
300/40	1+6=7	2,68	38,59	302	8,04	297,7	838	7,71	1140	98370	0,0968	2700	
400/53		3,10	52,83	414	9,30	407,5	1148		1562	131300	0,0725	2000	
500/66		3,45	65,44	513	10,35	504,7	1422		1935	157500	0,0585	1600	
625/82		3,84	81,07	635	11,52	625,2	1761		2396	192700	0,0473	1300	
25/15	1+6=7	1,65	14,97	118	4,95	25,65	72	1,71	190	22870	1,145	7600	
35/20		1,93	20,48	161	5,79	35,10	99		260	31150	0,8366	5600	
50/30		2,33	29,85	234	6,99	51,16	144		378	43830	0,5740	3400	
70/40		2,70	40,08	314	8,10	68,70	193		507	58570	0,4275	2700	
95/56		3,20	56,30	441	9,60	96,51	271		712	81550	0,3043	2000	
120/70		3,60	71,25	558	10,80	122,2	343		901	199950	0,2405	1500	
150/85		3,92	84,48	662	11,76	144,8	407		1069	118100	0,2028	1300	

## 6.4.2 Szigetelt szabadvezeték

Egyszerű szigetelt szabványos keresztmetszetű sodrony, amelyet kifestültségen alkalmaznak. Névleges feszültsége 1 kV. A 99,5% tisztaságú lágyított alumínium szakítószilárdsága 70...110 N/mm<sup>2</sup> a keresztmetszet nagyságától függően. Szigetelése vastagított, hideg- (-30 °C) és kopásálló, 1% koromtartalmú műanyag (PVC), amely a nap sugárzásának kiválóan ellenáll. A szigetelt szabadvezeték ereit az esetleges külső mechanikai sérülések ellen külön védelemmel ellátni nem kell. A szükséges számú szigetelt eret a csupasz nullavezetővel összesodorják, és külső műanyag szálak körbetekerésével rögzítik. A felfüggesztés mechanikai terheit a csupasz nullavezető viseli. Szerkezeti adatait és legnagyobb terhelőáramát a 6.7 táblázat mutatja.

6.7 táblázat: Szigetelt szabadvezeték szerkezete és megengedett legnagyobb terhelőárama

A névleges keresztmetszet, mm <sup>2</sup>	A vezető huzalainak száma	Az ér külső átmérője, mm		Legnagyobb megengedett terhelőárama, A	
		min.	max.	tartósodrony-ra szerelve	védőcsőbe szerelve
10	1	6,2	7,2	53	38
10	7	7,1	7,7	53	38
16	7	8,1	8,9	70	53
25	7	9,8	10,8	87	70
35	19	11,1	12,2	110	88
50	19	13,0	14,3	140	110
70	19	14,6	16,2	178	140
95	19	16,8	18,6	220	170
120	37	18,4	20,5	265	205
150	37	20,5	22,8	310	260
185	37	22,6	25,2	340	270
240	61	25,6	28,4	410	320
300	61	28,4	31,6	455	-

## 6.5 Kábelek alkalmazása

Erősáramú kábel az a villamos energia átvitelére használt termék, amelyet a rá vonatkozó termékszabvány közvetlenül földbe fektetésre is alkalmasnak nyilvánít, és a vezetőjét névleges keresztmetszet, szigetelését névleges feszültség megadásával jellemzi, alapterhelhetősége szabványosítva van. A kábel lehet árnyékolt, vagy árnyékolás nélküli.

A kábelek két fajtájának meghatározása a következő:

Árnyékolt kábel az az erősáramú kábel, amelynek erenként vagy – több ér esetén – közös fém árnyékoló szerkezete vagy koncentrikus vezetője, és/vagy fém páncélzata, vízzáró fémköpenye, továbbá vízzáró burkolata van.

Árnyékolás nélküli kábel az az erősáramú kábel, amelynek nincs sem fém árnyékoló szerkezete, sem koncentrikus vezetője, sem fém páncélzata, sem fémköpenye, de a termékszabvány földbe fektetésre alkalmasnak minősíti.

Az előző fejezetben ismertetett szabadvezetékek elhelyezésére feszültség szinttől függő nagyságú szabad területre van szükség. Ez nagyvárosok vagy ipartelepek sűrűn beépített

részein nem áll rendelkezésre. Ma már épületen belül is vannak olyan nagy teljesítményű fogyasztók, amelyek kisműködésről nem üzemeltethetők. E feladatok ellátásában segítenek a kábelek, amelyek nagy teljesítmények nagy távolságra történő átvitelére is alkalmasak. Használatuk számos előnnyel jár. Azáltal, hogy a földben vannak elhelyezve, a környezetre nem jelentenek zavaró hatást (pl. városkép) és kevesebb az üzemzavaruk (légtér behatás nincs). Előnyösen alkalmazhatók ott is, ahol erős vegyi hatásnak vannak kitéve. Számos helyen a villamos energia szállítása csak speciális kábelekkel oldható meg (tenger, bányák stb.). Árnyékolás nélküli energiaátviteli kábelt talajban közcélú hálózatokban csak az illetékes áramszolgáltató feltételei szerint szabad alkalmazni. Nem közcélú hálózatokban talajban az árnyékolás nélküli energiaátviteli kábelt az esetben szabad alkalmazni, ha a kábelt védőcsőben helyezik el, vagy a kábel felett szilárd burkolat van, vagy a kábelvonal betáplálási helyén áramvédő kapcsolást alkalmaznak. Korszerű közép- és nagyfeszültségű kábelek tervezésénél az alábbi, ma már alapvetőnek mondható szempontokat kell figyelembe venni:

a) A vizet a kábelből élettartama minden szakaszában – gyártáskor, fektetéskor, majd az üzemi állapotában – ki kell zárni.

b) Ha a kábelbe valamilyen külső behatás vagy egyéb üzemviteli rendellenesség miatt mégis víz kerül, annak a kábelben való hosszirányú tovaterjedését meg kell gátolni.

c) A kábel érszigetelésében és annak határrétegeiben a télerősség extrém növekedését el kell kerülni, azaz a szigetelésnek tisztának, a határrétegnek kellően simának kell lennie.

Igen fontos a kábelek névleges feszültségének kiválasztása a hálózat földzárlati viszonyai alapján. Az IEC és a VDE szabvány szerint a hálózatok földzárlati viszonyok alapján három kategóriába sorolhatók:

- A kategóriába kell sorolni azokat a hálózatokat, amelyeknél az egyszakos földzárlat leghosszabb időtartama 1 perc. (Idetartoznak a hatásosan földelt hálózatok, valamint a földzárlatvédelemmel rendelkező, nem hatásosan földelt hálózatok.)
- B kategóriába kell sorolni azokat a hálózatokat, amelyeknél az egyszakos földzárlat időtartama esetenként legfeljebb 8 óra. (Idetartoznak általában a nem hatásosan földelt, kompenzált hálózatok, amelyeknél a földzárlat időtartama nem nagyobb az említettnél.)
- C kategóriába kell sorolni az A és B kategóriába nem sorolható hálózatokat. (Idetartoznak a szigetelt hálózatok és azok a kompenzált hálózatok, amelyeknél a földzárlat időtartama meghaladhatja az esetenkénti 8 órát és évente a 125 órát.)

Az A és B kategóriák esetében a kábel névleges feszültsége megfelel a hálózat névleges feszültségének, tehát pl. 20 kV-os hálózatra 12/20 kV; 35 kV-os hálózatra 20/35 kV névleges feszültségű kábelt kell kiválasztani. C kategóriájú hálózatokra egy lépcsővel nagyobb névleges feszültségű kábelt kell alkalmazni, tehát pl. 20 kV-os hálózatra 18/30 kV, 35 kV-os hálózatra pedig 40/69 kV (esetleg a nem szabványos 26/45 kV) névleges feszültségűt. Mivel a magyar elosztóhálózatokon a jelenlegi üzemviteli előírások mellett már csak elvétve fordul elő C kategóriájú hálózat, ezért – ritka kivételtől eltekintve – teljesen felesleges a hálózatnál nagyobb névleges feszültségű kábelt alkalmazni!

A kábelek széles körű alkalmazását – számos előnyük ellenére – az ugyanolyan teljesítőképességű szabadvezetékkel szembeni többszörös létesítési költség akadályozza.

### **6.5.1 A kábeltípusok fejlődésének története**

Az első kábelek gyengeáramú kábelek voltak, amelyek közül az első tenger alatti, guttaperchával szigetelt távírókábel (1857) jelentett komoly lépést a fejlődés terén. Ha a kábel fogalom alatt az előbb említett egy-, vagy többvezetős egymástól elszigetelt és

közös vízzáró burkolattal ellátott áramvezetőt értjük, és elvárjuk, hogy dobra feltekeríselhető, tehát hajlékony legyen, akkor az ilyen kábelek iparszerű előállításának legfontosabb feltétele a svájci F. Borel által 1875-ben konstruált első hidraulikus ólomsajtoló volt.

Az erősáramú, de legfőképp a közép- és a nagyfeszültségű kábelek eredményes kifejlesztésének második alapvető feltétele a Ferranti által először alkalmazott itatott papírszigetelés volt (1888). A papírt szalag formájában egy vagy több rétegben tekercselték a vezetőre, majd olajgyanta keverékkel itatták át. Ez az eljárás az alapja a még napjainkban is széleskörűen alkalmazott „masszával töltött” kábelnek. Az ilyen szigetelésű háromfázisú kábelek 60 kV-ot is meghaladó feszültségre történő előállítását Martin Höchstädter szabadalma tette lehetővé.

A három ér szigetelését külső felületén fémbevonattal látta el, így a kör keresztmetszetű erek körül a szigetelésben a térerősség egyenletes eloszlású lett, és kiküszöbölődött a szigetelés kedvezőtlen tangenciális igénybevétele.

A nagyfeszültségű kábeltechnikában a fejlesztés terén még nagyobb előrehaladást jelentett Luigi Emanuellinek (Pirelli cég) a szabadalma, aki a hőmérséklet hatására radiális irányban elvándorló, és maga mögött kisülésre hajlamos üregeket hagyó kábelmasszát hígán folyó olajjal helyettesítette. Az olajhőmérséklet növekedés miatti térfogatváltozását kiegyenlítő tartályok tették lehetővé, az üregképződést az olaj kismértékű túlnyomás alatt tartása nem engedte meg. Olajkábelrel 1950-ben már 400 kV-os kábelszakaszt sikerült üzembe helyezni. A szigetelőanyag nyomás alá helyezése sokféle kábelkonstrukció kialakítására vezetett, amelyek három csoportba sorolhatók:

- nagynyomású olajkábelek,
- gáznyomásos kábelek,
- gáz-túlnyomású kábelek.

A konstrukciós kísérleteken kívül már a század közepe előtt is folytak a kísérletek az új fizikai tulajdonságú szigetelőanyagok használatára. A szilárd műanyagok, elsősorban a PVC kisméretű kábelek szigetelőanyagaként már a 40-es években jelentkezett. A fő cél először a fémmegtakarítás volt, mert a nem higroszkópos műanyag szigeteléseknek nincs szükségük fémköpenyre. A PVC nagyobb feszültségre történő alkalmazásának dielektromos veszteségi tényezőjének ( $tg\delta$ ) és permittivitásának viszonylag nagy, és gyakorlatilag tovább már nem csökkenthető értékei szabnak határt (70 °C megengedett üzemi hőmérsékleten  $tg\delta = 0,05$  és  $\epsilon = 6$ ). Ma 10 kV-on felül már nem használják. A nagyobb feszültségekre történő alkalmazást a hőre lágyuló polietilén szigetelőanyagként való felhasználása segítette elő. A polietilén (PE) szigetelésű kábelek már 200 kV-nál nagyobb feszültségen is megbízhatóan üzemelnek, de hőállóságuk viszonylag csekély, tartós üzemi hőmérsékletük nem haladhatja meg a 75 °C-ot.

Ez a hátrány a PE térhálósításával küszöbölhető ki. Európában a hatvanas évek közepén kezdődött a térhálósított PE kábelipari felhasználása és ma már a térhálósításra vonatkozóan különféle eljárások is ismertek. Számos előnyös tulajdonsága folytán a műanyag-szigetelésű kábelek elterjedése igen dinamikusan nő.

## 6.6 Vezetékek és védőcsövek

A villamos hálózat galvanikus összeköttetéseit létesítő vezetékek lehetnek:

- csupasz vezetékek,
- kábelek,
- szigetelt vezetékek, ill. kábelszerű vezetékek.

A csupasz vezetékek közül a sodronyokat a Szabadvezetési vezetőanyagok című fejezet tárgyalta részletesen, míg a kábeleket a Kábelek szerkezete, kábeltípusok című.

A megfelelő vezetékfajta kiválasztása a helyi viszonyok, az átvitendő teljesítmény és a távolság szerinti mérlegelés alapján történik.

## 6.6.1 Csupasz vezetékek

### 6.6.1.1 Sínek és merev áramvezetők

A sínek alumíniumból vagy rézből készült négyszög, kör vagy U alakú, merev, tömör, csupasz vezetékek, amelyeknek anyagjellemzőit a 6.8 táblázat mutatja.

Elsősorban kapcsoló- és elosztóberendezésekben használják őket. A hálózatok olyan helyein, ahol viszonylag nagyok az áramerősségek (pl. generátor és blokktranszformátora között) szintén fémsíneket alkalmaznak, többnyire tokozott kivitelben. A tokozás lehet közös vagy fázisonkénti, az anyaga általában lemez, esetenként műanyag.

Csupasz vezetőként lapos vasszalagot is használnak, de csak érintésvédelmi (pl. földelővezető) és villámvédelmi feladatokhoz.

A csupasz, üzemszerűen feszültség alatt álló síneket szigetelőkre szerelik. A szigetelőket megfelelően kell kiválasztani mechanikai szempontból.

A csupasz vezetékeket egymástól és a környezettől olyan távolságra kell szerelni, hogy átívelés ne következhesen be. Ezért üzemszerűen feszültség alatt levő vezetők között, ill. a környezethez legalább a 6.9 táblázat szerinti távolságokat kell betartani.

Réz sínek alkalmazására van szükség ott, ahol a környezet vegyileg agresszív és a korrózióveszély fokozott.

6.8 táblázat: Sínek anyagjellemzői

Anyagjellemzők	Mértékegység	E-Al 99,5	E-Cu
Fajlagos vezetőképesség,	S/m	$35 \cdot 10^6$	$56 \cdot 10^6$
20 °C-on	1/°C	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Az ellenállás hőfoktényezője,	1/°C	$24 \cdot 10^{-6}$	$17 \cdot 10^{-6}$
20 °C-on	N/mm <sup>2</sup>	$7 \cdot 10^4$	$13 \cdot 10^4$
Hőkiterjedési együttható	kg/m <sup>3</sup>	$2,7 \cdot 10^3$	$8,9 \cdot 10^3$
Rugalmassági tényező			
Sűrűség	N/mm <sup>2</sup>	40	
Megengedett mechanikai	N/mm <sup>2</sup>	60	160
feszültség	N/mm <sup>2</sup>		80
Lágy			
Félkemény			
Sajtolt			

6.9 táblázat: Átívelési távolság, mm

Névleges feszültség, kV	Légköri túlfeszültség által		Szabadtéri
	nem veszélyeztetett	veszélyeztetett	
	belsőtéri		
	berendezésben		
1	15	15	15
3	60	65	180
5...6	75	90	180
10	90	115	180
20	160	220	300
30...35*	290	340	400
60...66	470	470	580
100...120	900	1100	1100
220	-	-	2200
400	-	-	3200

\* A 25 kV-os villamosvasúti alállomásokra is a 35 kV-os adatok érvényesek.

### 6.6.2 Szigetelt és kábelszerű vezetékek

Az épületen belüli szerelést szigetelt vezetékkel kell végezni. A szigetelés anyaga ma már kizárólag gumi vagy műanyag.

A szigetelt vezeték és a kábel két fogalom, a közöttük lévő különbség az utóbbi években egyre inkább elmosódott, ezért is szükséges egyértelmű meghatározása.

A szigetelt vezetékek az olyan táp-, vezérlő- vagy mérővezetékek, amelyek helyhez kötött elhelyezésűek belsejtéren, esetleg szabadtéren, azonban földbe nem fektethetők. Alkalmask megfelelő kiképzés esetén villamos gépek és berendezések szerelvényezéséhez és változtatható helyű fogyasztók csatlakoztatásához.

A kábelek azok a táp- és vezérlővezetékek, amelyek leginkább a földbe fektetve kerülnek alkalmazásra, de különleges esetben szabadtéren is elhelyezhetők. Nem alkalmasak azonban változtatható helyű fogyasztók csatlakoztatására.

Az erősáramú szigetelt, ill. kábelszerű vezetékek vezetője tömör vagy sodrott szerkezetű alumínium, vagy lágyított réz anyagú. Keresztmetszete 400 mm<sup>2</sup>-ig szabványosítva van. Tömör kivitelben 16 mm<sup>2</sup>-ig készül.

A szigetelt vezetékek területén a gumiszigetelést ma már szinte teljesen kiszorította a műanyag érszigetelés. Az érszigetelés anyagával szemben követelmény, hogy szorosan illeszkedjék a vezetőre, de hozzá ne ragadjon, a szigetelés rendeltetésszerű használat során ne repedjen, legyen ellenálló nagy és kis hőmérséklet behatásával szemben. Kielégítő nyomásállóság és rugalmasság jellemezze.

A szigetelt vezetékek tartalmazhatnak járulékos, mechanikai védelmet nyújtó érszigetelés burkolatot. A mechanikai védelmet nyújtó burkolat lehet például textilbeszövés, amely a vezetékre szorosan illeszkedő kender, len, vagy más, ezzel egyenértékű anyagból készül. Gumiszigetelésű vezeték esetén 10 mm<sup>2</sup> keresztmetszet felett az áramvezető ereket vulkanizálás előtt még gumizott szalaggal kell betekercselni. E szalagnak is természetesen jól kell tapadnia a rákerülő gumiréteghez.

A textilbeszövést itatni lehet nedvesség behatás elleni védelem céljából, ill. a megfelelő itatóanyag megválasztásával vihar-, vagy savállóvá is tehető. Természetesen az itatásnak olyan mérvűnek kell lennie, hogy a beszövés hézagait teljesen kitöltse.

A szigetelt vezetékek egy részénél köpenyszerkezetet készítenek. A köpenyszerkezet lehet köpenyszigetelés vagy fémköpeny.



A köpenyszigetelés anyaga természetes vagy mesterséges gumi, ma már leginkább műanyag. A köpenyszigetelés követelményei (hőállóság, rugalmasság, szoros illeszkedés stb.) megegyeznek az érszigetelésével, és mindkettőre vonatkozik, hogy égést tápláló anyagot nem tartalmazhatnak.

A fémköpeny az övszigetelés felett, védelmi célokat szolgáló huzalpáncélozás, vagy huzal beszövés. Anyaga lehet lágy acél, horgany vagy alumínium szalag. Rozsda elleni védelméről gondoskodni kell (pl. lakkozás vagy műanyag bevonat).

A külső fémköpeny felett alkalmazott ezen védőburkolat korrózióálló, mechanikailag szilárd legyen, és még hőre lágyuló műanyag alkalmazása esetén se legyen gyúlékony.

A szigetelt vezetékek termékcsaládja igen széles skálát ölel fel, ezért részletesen ismertetni őket nem áll módunkban. Röviden csak fajtáik felsorolására és főbb alkalmazási területük elmondására szorítkozunk.

#### **Műanyag-, ill. gumiszigetelésű vezeték**

Alkalmazhatók rögzítetten elhelyezve, védőcsőbe húzva vagy csigákra szerelve; készülékekben vagy szerelvényekben belső huzalozásra. Közvetlenül falra fektetni, vagy védőcső nélkül vakolat alá helyezni nem szabad!

#### **Vihar- és saválló, ill. fény- és saválló vezetékek**

Az előző vezetéktípushoz hasonlóan alkalmazható, de felhasználhatók szabadtéren is.

#### **Szilikongumi szigetelésű (hőálló) vezetékek**

Különösen magas, vagy túl kicsi ( $-60\dots+300\text{ °C}$ ) hőmérsékleten, ill. időjárási viszonyoknak fokozottan kitett helyeken alkalmazhatók. Fektetési módjuk az eddig elmondottakkal azonos.

#### **Falra ragasztható műanyag-szigetelésű vezetékek**

Védőcső nélkül falra ragasztva alkalmazható.

#### **Falba helyezhető műanyag-szigetelésű vezetékek**

Védőcső nélkül falba, vakolatba vagy rögzítetten falra szerelve használható.

#### **Kábelszerű, műanyag-szigetelésű vezetékek (kiskábelek)**

Alkalmazhatók rögzítetten elhelyezve védőcső nélkül falba vagy falra szerelve; földbe fektetve (összekötő szerelvény a földbe nem kerülhet), épület csatlakozásra, és épületek egyetlen hosszal való összekötésére.

#### **Zsinórvezetékek**

Hordozható háztartási készülékek csatlakoztatására használhatók.

#### **Tömlővezetékek**

Hordozható készülékek csatlakozóvezetékéül használhatók. A mechanikai igénybevételtől függően többféle típust gyártanak.

#### **Műanyag-csillár vezetékek**

Lámpatestekben vagy védőcsőben mérési, jelzési (csengő) célra alkalmazhatók.

#### **Kisfeszültségű szigetelt szabadvezetékek**

Kisfeszültségű szabadvezetékes elosztóhálózatok, ill. épületek csatlakozóvezetékeinek fázisvezetőjeként a csupasz nullavezetőre sodorva alkalmazhatók.

#### **Közvilágítási légkábel – 1 kV**

Közvilágítási célokra, szabadban vakolat felett, ill. tartó acélsodronyra rögzítve alkalmazható.

Hegesztőelektródák csatlakozására **Hegesztővezetékek** szolgálnak.

#### **Búvárszivattyú kábelek**

Búvárszivattyú motorok csatlakozó kábelei.

#### **Gumiszigetelésű felvonókábelek**

Szabadban és beltéren egyaránt alkalmasak felvonók úszókábelei céljára.

### Daruvezetékek

Nedves és vegyi hatásoknak kitett környezetben is alkalmasak daruvezetékek céljára. Rögzítetten alkalmazhatók.

### Nagyfeszültségű szigetelt vezetékek

3,6 és 10 kV névleges feszültségre készülnek. Vakolatra fektetve is alkalmazhatók. A „neonvezeték” típus fényreklám-berendezések szekunder összekötő vezetékékként használható.

### 6.6.3 Védőcsövek és szerelésük

A szigetelt vezetékek mechanikai behatás, nedvesség, maró pára és szennyeződés elleni védelmére, valamint kábelek járulékos, főleg mechanikai védelmére védőcsöveket alkalmaznak. Az alkalmazott védőcsőfajtát a következők szerint kell megválasztani:

A műanyag védőcsöveket kell tervezéseinknél elsősorban figyelembe venni. Acél védőcső csak ott alkalmazható, ahol a műanyagcső a fellépő fokozott mechanikai igénybevételt, vagy hőhatást nem bírja el, vagy mágneses zavarástól kell tartani. A műanyag védőcsövek tűzállóság szempontjából önoltóknak minősülnek, vagyis éghetnek, de az égést nem táplálják. Előnyük, hogy a műanyag védőcsövek érintésvédelmet nem igényelnek.

A merev műanyag villamos védőcsövek PVC alapanyagból készülnek, általában barna színűek. Gyártanak vastag falú (MÜ I), vékony falú (MÜ III), könnyű (P1) és középnehéz (P2) védőcsöveket, amelyek felhasználhatók az acélpáncélcső, és az acélcső (gázcső) helyett, falon kívüli és süllyesztett szerelésnél.

### A vastag falú műanyag védőcső (MÜ I)

A vastag falú MÜ I. műanyag védőcsövek a 6.10 táblázat szerinti méretekben készülnek. Igen tág (-20...+60 °C) hőmérséklettartományban alkalmazható. Erős napsütéses, ill. csapadékos helyen használata nem ajánlott.

6.10 táblázat: Védőcsövek méretei

Névleges méret	Külső átmérő, mm		
	MÜ I	MÜ III	ApP, ill. Ap
11	18,4	12,1	18,4
13,5	20,4	14,6	20,4
16	22,5	17,2	22,5
21	28,3	24,4	28,3
29	37,0	30,8	37,0
36	47,0	38,2	47,0
42	54,0	-	-
66	75,0	-	-
80	90,0	-	-

Elhelyezhető vakolat alá: falban, földemben, aljzatbetonban; falon kívül: falra, födémre, feszítősodronyra, valamilyen tartószerkezetre szerelve.

Aljzatbetonba szerelve a mechanikai sérülés elleni védelmet a betonnak kell biztosítani. Általában is elmondható, hogy durva mechanikai sérüléssel szemben védeni kell.

Szerelés során a csövek vagy műanyag karmantyúval, vagy előmelegítés utáni feltágítással toldhatók. Iránytörés esetén alkalmazható előregyártott könyökcső, ill. előmelegítés utáni hajlítás. Elágazás külön e célra gyártott elágazódobozokkal történhet.

## **A vékony falú műanyag védőcső (MÜ III)**

A vékony falú MÜ III. védőcsövek méreteit is megtalálhatjuk a 6.10 táblázatban.

Elhelyezésére a MÜ I. védőcsőre elmondottak a mérvadók, azzal a kiegészítéssel, hogy falon kívüli szerelés esetén mechanikai behatások ellen mindenütt védeni kell.

Szerelése is a MÜ I. védőcsőhöz hasonlóan történhet, feltágításához és hajlításához előmelegítés nem mindig szükséges.

A MÜ I. és a MÜ III. védőcső helyett olyan helyeken, ahol az iránytörések száma nagy, ill. mozgatásnak kitett helyeken hajlékony műanyag gégecső alkalmazható. Ütésállósága a vastag falú csőével azonos, és a 20...30 m gyártási hossz egész csőszakaszok toldásmentes beépítését teszi lehetővé.

Ha a 6.10 táblázatban megadott névleges méretnél nagyobb névleges átmérőjű műanyagcsőre lenne szükség, akkor a P<sub>1</sub> könnyű kivitelű kemény PVC cső alkalmazható a MÜ III. védőcső helyett és a P<sub>2</sub> jelű középnehéz kemény PVC cső építhető be a MÜ I. védőcső helyett. Durva mechanikai hatás ellen ezeket a csöveket is védeni kell.

A P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> kemény PVC csövek méreteit a 6.11 táblázat tartalmazza.

A műanyag védőcsövek szerelésekor fokozottan kell ügyelni arra, hogy bennük vízszákok ne legyenek, és üzemszerű viszonyok mellett a nedvesség vagy víz ne hatolhasson beléjük.

A műanyag védőcsövek előnye még, hogy a belső felület simasága, valamint a hajlítás helyén is megmaradó eredeti keresztmetszet nagysága miatt a vezetékek behúzása sokkal kisebb erőt igényel, és így nagyobb mennyiségű vezeték húzható be, mint egyéb azonos méretű védőcsövekbe.

A műanyag védőcsövek tárgyalásának utolsó tagjaként meg kell említeni az elsősorban mérő, jelző, működtető vezetékek burkolására, védelmére szolgáló műanyag vezetékcsatornát. Az MCS jelű műanyag vezetékcsatornák egy teknő alakú alsó részből és egy rápatintható fedélből állnak. A teknő az alján készített furatok segítségével rögzíthető a hordozó vázszerkezethez. A vezetékeket a fedél levétele után helyezik a csatornába, majd a fedelet zárják.

## **6.7 Acél védőcsövek**

### **6.7.1 Acélpáncél védőcső**

Az ApP típusú acélpáncélcső papírbéléssel, az AP típusú papírbélés nélkül a 6.10 táblázat szerinti méretekben készül.

A mechanikai hatásnak kitett helyeken, továbbá nedves környezetben tömörített, csavarmentes csőkötéssel kerül felhasználásra. Padozatban, mennyezetben és falon kívül helyezhető el, de elhelyezhető tartószerkezeten is, ha azt a beépítés közben fellépő nagyobb mechanikai igénybevétel indokoltá teszi. Az itatott papírbélés megkönnyíti a vezeték behúzását és nagyobb védelmet nyújt a behúzással keletkező esetleges mechanikai sérülés ellen.

#### **Gázcső**

A gázcsövek normál falvastagságú menetes acélcsövek. Nedves, robbanásveszélyes és mechanikai behatásoknak különösen kitett helyiségekben tömítetten csavarmentes kötéssel készíthető, és csőbilincsekkel rögzíthető.

#### **Acélcső**

Az acélcsövek varrat nélküli, simavégű vezetékcsövek. Általában kábelek járulékos védelmeként alkalmazzák, különösen útatfúrások esetén.

6.11 táblázat: Kemény PVC csövek méretei

Külső átmérő, mm	Könnyű P <sub>1</sub> cső		Középnézés P <sub>2</sub> cső	
	falvastagság, mm	belső átmérő, mm	falvastagság, mm	belső átmérő, mm
21,8	-	-	-	-
27,3	-	-	-	-
34,2	-	-	-	-
42,9	-	-	-	-
48,8	-	-	-	-
50	2,0+0,40	45,2	2,4+0,45	44,3
60,8	-	-	-	-
63	2,3+0,45	57,5	3,0+0,50	56,0
75	-	-	3,6+0,55	66,7
76,6	-	-	-	-
89,5	-	-	-	-
90	2,6+0,45	83,9	4,3+0,65	80,1
102,1	-	-	-	-
110	3,0+0,50	113,0	5,3+0,75	97,9
115	-	-	-	-
125	3,6+0,55	116,7	6,0+0,80	111,4
140,8	3,6+0,55	131,7	6,7+0,85	126,6
160	4,0+0,60	150,9	7,7+0,95	142,7
166,6	-	-	-	-
Alkalmazható	MÜ III védőcsőként		MÜ I	
Gyártási hossz:	P <sub>1</sub> : 2 m		P <sub>2</sub> : 6 m	

## 6.8 Szigetelt és kábelszerű vezetékek szerelése

A szigetelt vezetékekkel kiépített hálózatrész rögzített szerelésű, csak a gépek és készülékek dugaszolóval történő csatlakoztatása esetén a csatlakozóvezeték maga tekinthető rögzítetlennek.

### 6.8.1 Szerelési módok

#### Vakolat alá helyezett védőcsöves szerelés

A védőcsöveket és a dobozokat általában az épület elkészülte után kivésett hornyokba, vagy az előregyártott fal-, födémekbe süllyeszti azok gyártása során.

#### Szabadon (vakolat felett) elhelyezett védőcsöves szerelés

Ekkor a védőcsöveket vagy feszítőszalagra szerelik, vagy a falon egyéb szerkezeti elemek térköztartóira helyezik. A vezetékeket ezen szerelési mód esetén is utólag húzzák a védőcsőbe.

#### Vezetékcsatornás szerelés

A vezetékeket nyitható fedelű vezetékcsatornába helyezik, a vezetékek elágaztatása, kivezetése a csatorna oldalán keresztül történik. A szerelés alkalmazása ott előnyös, ahol sok kereszteződés adódna a különböző helyről érkező vezetékek között.

### **Vakolat alá (vakolatba) helyezett, védőcső nélküli szerelés**

A megfelelő (kettős szigetelésű) vezetékek közvetlenül a vakolatba helyezhetők. Ez a szerelési technológia igen sok munkaóra-megtakarítást eredményez, elmarad a nehéz fizikai munkát jelentő horonyvésés. Meg kell azonban említeni, hogy a vezeték védettsége kisebb és a meghibásodás esetén cserélhetősége nehezebb.

### **Szabadon szerelt vezeték**

A falon, egymástól legalább vezetékátmérő távolságban bilinccsel vagy egyéb módon vannak rögzítve.

### **Terített szerelés**

A vezetékeket egy síkban, lehetőleg kereszteződés nélkül szerelik. A vezetékek rögzítése bilinccsel vagy vezetékuszorítóval történik.

### **Kötegelt (bund) szerelés**

A vezetékek egymást érintve, kötegelve haladnak, és a kötegeket rögzítik.

### **Takart szerelés**

Csak ott valósítható meg, ahol a vasszerkezetet ennek megfelelően alakították ki, azaz a vezetékeket fedőlemez takarja.

Az egyes szigetelt vezetékek, kábelszerű vezetékek, védőcsövek és a különböző szerelési módok alkalmazhatósága a környezet jellegétől és a tűzveszélyesség mértékétől függ. A környezeti körülmények nemcsak a vezetéktípus, védőcsőtípus és szerelési mód tekintetében meghatározók, hanem adott szerelési móddal kapcsolatosan eltérő követelményeket állíthatnak a tömítettség, korrózióvédelem, szerelési távolságok stb. tekintetében. Az alkalmazható szerelési mód függ még az építési módtól is (pl. paneles lakóépület).

## **6.9 Hálózatok hibaállapotai**

### **6.9.1 A hibák fajtái, okai, gyakorisága**

A villamos energiát szállító és elosztó hálózatok egyes elemein (távvezetékek és kábelek, transzformátorok, kapcsolókészülékek, mérőváltók stb.) bekövetkező mindazon váratlan eseményt, amelyek a hálózatok rendeltetészerű üzemállapotát megváltoztatják vagy károsan befolyásolják, üzemi hibáknak nevezzük.

A hálózatok különféle hibái a berendezések effektív károsodásán túlmenően megbonthatják a kooperációs villamosenergia-rendszer üzemét, teljesen vagy részlegesen megszüntethetik a fogyasztók villamosenergia-ellátását, adott esetben közvetlen életveszélyt jelenthetnek a berendezéseket kezelő személyzet számára.

Az élet- és vagyonbiztonság követelményeinek kielégítése, a villamosenergia-ellátás folyamatosságának biztosítása megkövetelik a hálózatok üzemi hibái elleni hatékony védekezést.

Ehhez viszont feltétlenül szükséges a hibák fajtáinak, keletkezésük okainak, a hibaállapotban fellépő hálózati viszonyoknak, a hálózat jellemző paraméterei (pl. áram, feszültség, teljesítmény stb.) változásának a részletes ismerete.

A hálózati hibáknak három fajtáját különböztetjük meg:

- sönthibák,
- soros hibák,
- szimultán hibák.

A **sönthibák** azok a hálózati hibák, amelyek söntággként kapcsolódnak a főáramkörbe. A hálózati sönthibák eszerint a hálózaton fellépő különféle zárlatok.

A **zárlat** a villamos hálózat olyan hibája, amelyet a hálózat különböző fázisvezetői közötti vagy a fázisvezető és a föld vagy a földelt nullavezető közötti szigetelés teljes letörése (átütés, átívelés, vezetők összelengése stb.), vagy a vezetők összekapcsolódása idéz elő. A különféle zárlatok hatására a zárlat keletkezésének helyén – az ún. hibahelyen – egyrészt a normál üzemi feszültség kisebb-nagyobb mértékben csökken, sőt szélső esetben nulla értékű lesz, másrészt a hibahely felé, általában az üzemi áramot többszörösen meghaladó, zárlati áram fog folyni.

A zárlatok okozta feszültségletörés gyakran igen nagy kiterjedésű hálózatrészekre érezteti hatását, megbonthatja a kooperációs hálózatra dolgozó erőművek stabil üzemét. Az üzemi áramnak gyakran 10...20-szorosát elérő zárlati áram a zárlati áramkör soros elemeiben (vezetékek, transzformátorok, készülékek) káros túlmelegedéseket okozhat, a zárlati ív termikus hatása nagymértékű pusztítást okozhat a hibahelyen, a zárlati áram dinamikus erőhatása pedig ugyancsak a zárlati áramkör elemeinek épségét veszélyezteti. A zárlatok ilyen hatásainak megakadályozása, ill. az esetleges rongálódások lehető legkisebb mértékűre való korlátozása érdekében a hálózatok zárlatait nagy biztonsággal kell érzékelni, és igen gyorsan meg kell szüntetni. (Ennek eszközei a különféle zárlatvédelmi készülékek.)

Ahhoz, hogy a zárlatok káros hatásai ellen kellőképpen védekezhessünk, részletesen ismernünk kell a zárlatok fizikai sajátosságait. Pontosán meg kell tudnunk határozni a hálózat különféle helyein, az egymástól eltérő üzemállapotokban fellépő, különféle zárlatok áram- és feszültségviszonyait.

A **zárlatok fajtáit** többféle szempont szerint lehet csoportosítani. Ha az üzemszerűen feszültség alatt álló vezetők közvetlenül, fémesen záródnak egymáshoz, akkor **fémes** vagy másképpen **merev zárlatról** beszélünk. Ellenkező esetben íves zárlat lép fel.

A háromfázisú, váltakozó áramú villamosenergia-rendszerekben a zárlat által érintett fázisok száma szerint – tehát abból a szempontból, hogy hány feszültség alatt álló fázisvezető záródik egymással vagy a földdel – a következő zárlatfajtákat különböztetjük meg:

- 3F háromfázisú rövidzárlat földérintés nélkül,
- 3FN háromfázisú földrövidzárlat,
- 2F kétfázisú rövidzárlat földérintés nélkül,
- 2FN kétfázisú földrövidzárlat,
- FN egyfázisú földrövidzárlat,
- Ff egyfázisú földzárlat.

A műszaki gyakorlatban akkor használjuk a rövidzárlat terminológiát, ha a különböző fázisvezetők egymással vagy a földdel való összezáródása oly módon jön létre, hogy egészen kis impedancián keresztül alakul ki zárt áramkör. Ellenkező esetben zárlatról beszélünk.

Tekintettel arra, hogy a vizsgálati módszer szempontjából közömbös, hogy rövidzárlati vagy zárlati jelenség problémájával állunk szemben, a következőkben – hacsak erre nincs valami különleges indokunk (pl. megkülönböztető figyelemfelhívás) – mindig a zárlat szót fogjuk használni.

Az egyes zárlatfajták szimbolikus jelölése az 6.9 ábrán látható. A felsorolt zárlatfajták közül a 3F és 3FN zárlatokat – mivel azok mindhárom fázist érintenek – **szimmetrikus zárlatnak**, míg a többi **aszimmetrikus zárlatnak** is nevezik.

A 3FN zárlatot csak elméletben különböztetjük meg a 3F zárlattól, ugyanis a földérintéssel együtt fellépő háromfázisú rövidzárlat (3FN) esetén kialakuló zárlati áram- és feszültségviszonyok gyakorlatilag teljesen azonosak a „tisztá” 3F zárlatnál kialakulókkal, így a továbbiakban a 3FN zárlattal nem is foglalkozunk.

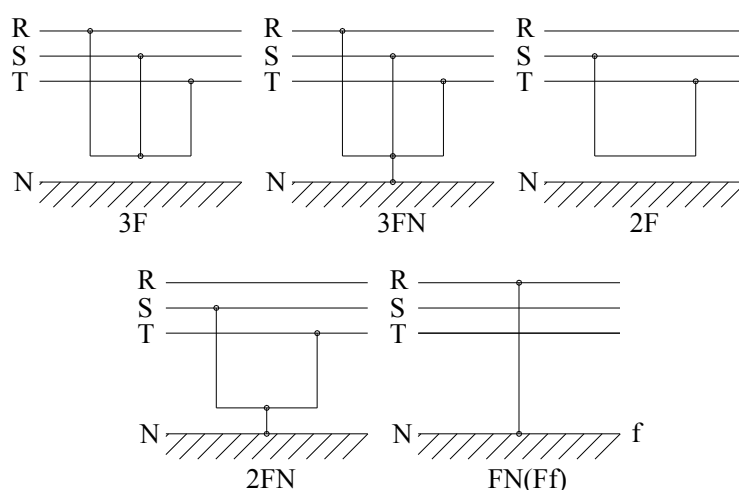
A 3F és 2F zárlatoknál kialakuló áram- és feszültségviszonyok függetlenek attól, hogy a hálózatot tápláló transzformátorok csillagpontja földelt-e, vagy sem.

Az egyes zárlatfajták jelölésében szereplő N betű a közvetlenül földelt csillagpontú hálózatok földérintéses zárlatait (földrövidzárlatok), míg az f betű a nem közvetlenül földelt vagy szigetelt csillagpontú hálózatok földérintéses zárlatait (földzárlatok) jelöli.

A 2FN és FN zárlatot tehát csak a közvetlenül földelt csillagpontú hálózatokon értelmezzük, amikor is a rövidzárlati áramkör a földön át záródik. Ezért nevezik ezeket kétfázisú, ill. egyfázisú földrövidzárlatnak. Az Ff zárlat viszont csak a nem közvetlenül földelt csillagpontú (pl. szigetelt vagy kompenzált) hálózatokon van értelmezve. Az ilyen hálózatok egy fázisának a földhöz való záródása csak kapacitást zár rövidre, így a kialakuló áram nem esik a rövidzárlati áramok nagyságrendjébe, még az üzemi áramnak is csak néhány százaléka.

A **zárlatok kiváltó okait** tekintve beszélhetünk **spontán** és **művi eredetű** zárlatokról, Az emberi beavatkozás nélkül létrejövő spontán zárlatok leggyakoribb okai: villámcsapás, vezetékszakadás, a vezetékek összelengése vagy felcsapódása, a szigetelők átívelése vagy átütése, ill. kábelhálózatokon a kábelszigetelések elöregedése, kábelszerelvények helytelen szerelése. A művi zárlatok leggyakoribb oka a téves kezelés vagy a helytelen beavatkozás – pl. kábelek „megcsákányozása”, téves szakaszolás stb. – miatti külső sérülés. A hálózatokon és a kapcsoló-berendezésekben fellépő zárlatok döntő többsége spontán zárlat.

Megjegyezzük, hogy a szabadvezetékes hálózatokon fellépő spontán zárlatok jelentős része ún. **múló jellegű zárlat**, ami azt jelenti, hogy a zárlat kikapcsolása után a hiba megszűnik, tehát a berendezés azonnal ismét üzembe vehető. (Emiatt alkalmaznak a szabadvezetékes hálózatok távvezetési zárlatainak kikapcsolása után önműködő visszakapcsolást.) Ez azért lehetséges, mert egyrészt a spontán zárlatok kiváltó oka általában igen gyorsan megszűnik (pl. villámcsapás), másrészt a korszerű zárlatvédelmek igen gyorsan érzékelik a zárlatot, és a lehető leggyorsabban kikapcsolják a zárlatos objektum megszakítóját, megakadályozva ezzel a hibahelynek az üzemfolytonosságot lehetetlenné tevő mértékű (maradó) sérülését. (Korszerű védelmi berendezés és gyors működésű megszakító esetén a teljes zárlathárítási idő 100...150 ms, vagy még ennél is kevesebb lehet.)



6.9 ábra: Zárlatfajták szimbolikus jelölése

A **zárlatok előfordulási gyakorisága** a különféle hálózatokon más és más, a hálózat kialakításától, az oszlopképtől, a földrajzi, éghajlati viszonyoktól stb. függően.

A statisztikai adatok tanúsága szerint a hazai 400 kV-os nagyfeszültségű szabadvezetékes hálózatok távvezetékein 100 km-enként átlagosan kb. 1-2 zárlat lép fel évente, a 220 kV-os távvezetékeken pedig átlagosan kb. 2-3 zárlat. A 400 és 220 kV-os hálózatok zárlatai szinte kivétel nélkül FN zárlatok.

A 120 kV-os szabadvezetékes hálózat távvezetékein az éves átlagos zárlati gyakoriság 8-10 zárlat/100 km, amelyek nagy többsége (kb. 90%-a) szintén FN zárlat.

A nagyfeszültségű szabadvezetékes hálózatok zárlati gyakorisága tehát viszonylag nem nagy, aminek elsősorban az az oka, hogy e hálózatok távvezetékei mindig villámvédő vezetővel létesülnek, vagyis a fázisvezetők a légköri túlfeszültségek (villámcsapás) behatolása ellen viszonylag hatékonyan védettek,

A zárlatfajták közül itt azért uralkodik az FN zárlat, mert e feszültségszinteken az egyes vezetők fázistávolsága viszonylag nagy (több méter), így kicsi az esély arra, hogy a fázisvezetők egymással érintkezzenek. A távvezetékek zárlati szempontból legveszélyesebb pontjai a szigetelők, amelyek átütése vagy átívelése okozza általában a fázisvezetőnek a földpotenciálon levő oszlophoz való záródását, vagyis az FN zárlatot. Az FN zárlati gyakoriság viszont korrelál a szigetelőlánc hosszával, ezt bizonyítja a 120 kV-os hálózati FN zárlatoknak pl. a 400 kV-os FN zárlatokhoz képest 5-10-szer nagyobb gyakorisága.

A hazai középfeszültségű (túlnyomórészt 20kV-os) kompenzált, szabadvezetékes elosztóhálózatok zárlati gyakorisága a statisztikák tanúsága szerint 20-30 rövidzárlat évenként 100 km-re számítva. Ezt a viszonylag nagyobb rövidzárlati gyakoriságot az magyarázza, hogy ezeknek a hálózatoknak a távvezetékei védővezető nélkül készülnek (kivéve a tápállomásokból kiinduló kezdeti rövid szakaszokat), és a fázisvezetők egymástól való távolsága is viszonylag kicsi. Ezekben a hálózatokon az egyfázisú földzárlatok (Ff) gyakorisága a rövidzárlatokét meghaladja.

A kábelhálózatok zárlati gyakorisága általában egy nagyságrenddel kisebb, mint a szabadvezetékes hálózatoké, ami érthető is, ha meggondoljuk, hogy a kábelhálózatok gyakorlatilag teljesen védettek a légköri behatásoktól. A hazai 10 kV-os kábelhálózaton pl. évente átlagosan kb. 2-3 zárlat lép fel 100 km hosszon.

**Soros hiba** a szimmetrikus háromfázisú hálózatok mindazon hibája, amelynél legalább az egyik fázisvezető soros impedanciája egy rövid szakaszon eltér a többi fázisvezető impedanciájától (vagyis például egy vagy több fázisban vezetőszakadás lép fel). A vezetékszakadás a nagyfeszültségű hálózatokon viszonylag ritka jelenség. A fázisvezető elszakadását okozhatják külső mechanikai hatások (pl. nagymennyiségű zúzmara ráfagyása) vagy hibásan kivitelezett, ill. korrodált vezeték-összekötés (ez az ún. áramkötés, ahol a vezetékszálak nem kellő érintkezése miatt megnő az átmeneti ellenállás, amelyen az átfolyó üzemi áram akkora hőmérséklet-növekedést okoz, ami a vezető anyagát kilágyítja és az kicsúszik az áramkötésből.

A nagyfeszültségű hálózatokon soros hiba lehet a hálózat soros elemei megszakítóinak ún. beragadása. A megszakítóberagadás azt jelenti, hogy adott hálózati elem megszakítójával végzett kapcsolási művelet során valamilyen (mechanikai vagy villamos) hiba miatt a megszakító egy vagy két fázisa nem hajtja végre a vezérelt ki- vagy bekapcsolási műveletet.

(Tételezzük fel például, hogy két csomóponti alállomást összekötő nagyfeszültségű távvezeték karbantartási munkák után be akarnak kapcsolni, ezzel helyreállítva a két alállomás gyűjtősínei közötti közvetlen összeköttetést.

Ennek szokásos menete az, hogy az egyik alállomási gyűjtősínről feszültség alá helyezik a távvezeték majd – az esetleg szükséges szinkronállapot-ellenőrzéssel – a másik alállomáson az adott vezetéki leágazás megszakítójára kiadják a háromfázisú bekapcsolási parancsot. Ha ez utóbbi megszakítóknak az egyik fázisa valamilyen hiba



miatt nem kapcsolódik be (beragad), akkor a két állomást összekötő távvezetéken az egyfázisú szakadásnak megfelelő soros hiba lép fel.)

Megjegyezzük, hogy a tisztán soros hiba eléggé ritkán fordult elő, ugyanis ha az elszakadt vezeték a földre esik vagy az oszlophoz, ill. a többi fázisvezetőhöz csapódik, akkor ez már zárlatot is okoz, vagyis szimultán hiba keletkezik.

(Hasonló helyzet állhat elő olyan megszakítóberagadás esetén, amely védelmi készülékek által indított zárlathárító kikapcsolási művelet során lép fel.)

**Szimultán hibának** nevezzük tehát azt a hibaállapotot, amikor a fémesen összefüggő hálózat bármely – gyakran egymástól távol levő – pontjain egyidejűleg több hiba lép fel.

A földeletlen csillagpontú és a kompenzált hálózatok gyakori és tipikusnak mondható szimultán hibája a **kettős földzárlat (2Ff)**.

Kettős földzárlatról akkor beszélünk, ha a hálózat két különböző – gyakran egymástól távol eső – pontján, két különböző fázisban egy időben egyfázisú földzárlat lép fel. A kettős földzárlatok döntő többsége egyfázisú földzárlattal indul, akkor a földeletlen csillagpontú hálózatokon az ép fázisok feszültsége megemelkedik, s ennek hatására a hálózat elszennyeződött (ezáltal leromlott szigetelési képességű), vagy sérült (pl. repedt) szigetelési közül valamelyik átüt vagy átível, ami az addig még ép fázisok valamelyikén szintén egyfázisú földzárlatot jelent, tehát kialakul a kettős földzárlat.

(A gyakorlatban úgy mondják, hogy a hálózatokon az egyfázisú földzárlat „megkeresi a párját”). A 2Ff zárlatok árama a rövidzárlati áramok nagyságrendjébe esik, tehát az üzemi áramnak általában többszöröse.

## 7 STACIONÁRIUS MÁGNESES TÉR SZÁMÍTÁSA

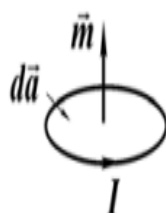
Az időben állandó sebességgel mozgó töltések keltette áram nemcsak elektromos, de mágneses teret is kelt.

### 7.1 A mágneses tér jelenléte

#### 7.1.1 A mágneses dipólus

A tapasztalat azt mutatja, hogy áramjárta vezetőre mágneses térben erő hat. Tekintsünk egy elemi köráramot, amelyben az  $I$  áramú köráram  $d\vec{a}$  felületet zár körbe (7.1 ábra). Ez az elemi köráram egy mágneses dipólust reprezentál, amely mágneses dipólus nyomatékkal, mágneses momentummal rendelkezik.

$$m = Id\vec{a} . \quad (7.1)$$



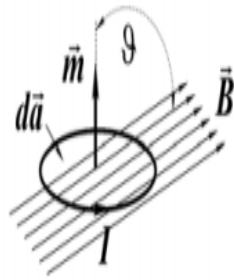
7.1 ábra: Mágneses dipólus

Forrás: [15]

A mágneses dipólus felületi normálisa a hurokban folyó elemi köráram irányával jobbszavar szabály szerint kapcsolódik.

#### 7.1.2 A mágneses indukció

Ha a fenti mágneses dipólussal rendelkező elemi köráramú vezetőt egy  $\vec{B}$  indukciójú mágneses térbe helyezünk (7.2 ábra), akkor a köráramra forgatónyomaték hat, amely hatására a köráram úgy helyezkedik el, hogy felülete merőleges legyen a mágneses indukcióra.



7.2 ábra: A mágneses dipólusra jutó forgatónyomaték

Forrás: [15]

$$\vec{T} = \vec{m} \times \vec{B} \rightarrow |\vec{T}| = m B \sin \vartheta = I da B \sin \vartheta. \quad (7.2)$$

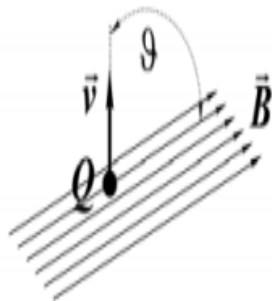
A fenti mérésből (7.2 ábra) meghatározható a  $\vec{B}$  mágneses indukció nagysága

$$B = \frac{T}{I da}, [B] = 1 \frac{Nm}{Am^2} = 1 \frac{Vs}{m^2} = 1 Tesla. \quad (7.3)$$

### 7.1.3 Mozgó töltésre ható mágneses erő

Külön meghatározhatjuk a mágneses térben mozgó töltésre ható erőt is. Ha egy  $\vec{B}$  indukciójú mágneses térbe  $v$  sebességgel egy  $Q$  töltés lép be (7.3 ábra), akkor a töltést eltérítő erő

$$\vec{F} = Q \vec{v} \times \vec{B}. \quad (7.4)$$



7.3 ábra: Mozgó töltésre ható erő

Forrás: [15]

A stacionárius mágneses tér által kifejtett erő mindig merőleges a pillanatnyi sebességre, vagyis a mozgás pályájára, így ez az erő nem végez munkát, azaz az időben állandó mágneses tér az energiaviszonyokat nem befolyásolja. Ha elektromos és mágneses tér egyidejűleg van jelen, akkor mind az elektromos térből, mind a mágneses térből származó erőhatások vektoriálisan összegződnek, ezt Lorentz erőnek nevezzük

$$\vec{F} = Q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}). \quad (7.5)$$

### 7.1.4 Áramvezetőre ható mágneses erő

Az  $I$  áramú áramvezetőre ható erő az előző pontban tárgyalt Lorentz-erőből származtatható. Ha egy elemi  $dQ$  töltésre ható  $d\vec{F}$  erőt vizsgálunk, akkor minthogy a töltésnek  $\vec{v}$  sebességgel való mozgása során a  $d\vec{l}$  útszakaszon a töltés  $\frac{dQ}{dt}$  megváltozása éppen  $I$  áramot reprezentál, azaz

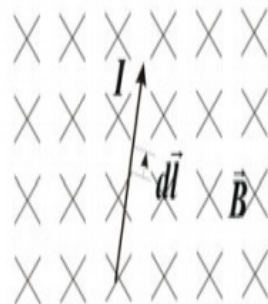
$$d\vec{F} = dQ\vec{v} \times \vec{B} = dQ \frac{d\vec{l}}{dt} \times \vec{B} = \frac{dQ}{dt} d\vec{l} \times \vec{B} = Id\vec{l} \times \vec{B}, \quad (7.6)$$

amely a  $\vec{B}$  indukciójú mágneses térben az  $I$  áramú áramvezető  $d\vec{l}$  szakaszára ható erőt eredményezi (7.4 ábra). A teljes vezető hosszára ható erő, az egyes elemi szakaszokra ható erőkomponensek vektori összege, azaz integrálja,

$$\vec{F} = \int_l d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (7.7)$$

Ha a vezető mentén a mágneses indukció értéke nem változik az integrálból egyszerű szorzás lesz,

$$\vec{F} = \vec{I} \times \vec{B}. \quad (7.8)$$



7.4 ábra: Az áramvezetékre ható erő mágneses térben

Forrás: [15]

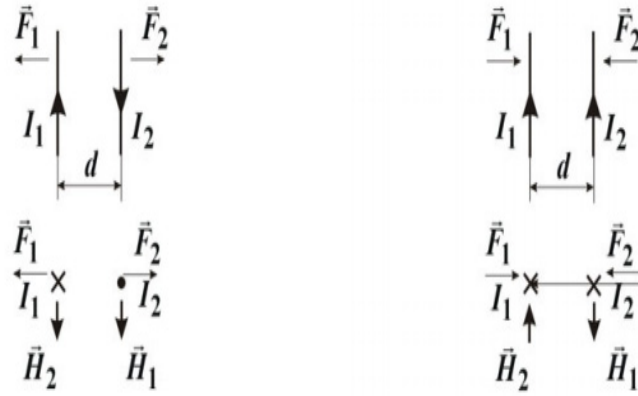
Az előző pont eredményei alapján két végtelen hosszúnak tekinthető áramvezető között erőhatás lép fel. Vizsgáljuk meg ezt az erőt. Két áramvezető, ellentétes irányú áramokkal. A 7.5 ábrán vázolt esetben a két áramvezető  $I_1$ ,  $I_2$  árama ellentétes irányú.

Az 1. vezető  $I_1$  árama  $\vec{H}_1$  mágneses teret hoz létre az  $I_2$  áramú 2. vezető helyén. Ekkor az áramú  $I_2$ . vezető  $l_2$  hosszúságú szakaszára

$$\vec{F}_2 = I_2 \vec{l}_2 \times \vec{B}_1 \quad (7.9)$$

erő hat, amely a vektori szorzatnak megfelelően a 2. vezetőt az 1. vezetőtől eltávolítani akarja. Hasonló módon a 2. vezető  $I_2$  árama  $\vec{H}_2$  mágneses teret gerjeszt az  $I_1$  áramú 1. vezetőhelyén. Ekkor az 1. áramvezető  $l_1$  hosszúságú szakaszára ható erő

$$\vec{F}_1 = I_1 \vec{l}_1 \times \vec{B}_2. \quad (7.10)$$



7.5 ábra: Két áramvezető között fellépő erő

Forrás: [15]

Ha vezetőkben az áram iránya ellentétes az előző esethez képest, így a fellépő erő is az előző esetben fellépő erőhöz képest ellenkező irányú lesz.

## 7.2 A mágneses tér intenzitása és gerjesztettsége

### 7.2.1 A mágneses fluxus

A mágneses tér intenzitására, nagyságára vonatkozó tájékoztatást a felületen áthaladó indukcióvonalak száma, a felület fluxusa ad. A 7.6 ábra  $\vec{a}$  felületének fluxusa

$$\Phi = \int_a \vec{B} d\vec{a} = \int_a B_n da, [Vs]. \quad (7.11)$$

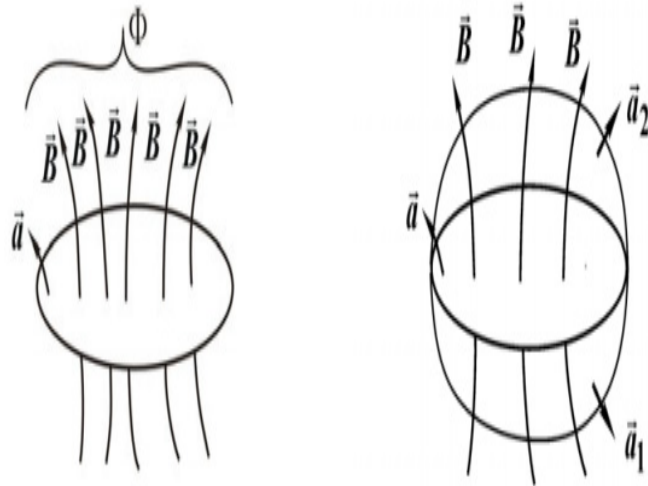
Egyszerű esetben a fluxus a felületen átmenő indukcióvonalak normális komponenseinek és a felület szorzata  $\Phi = B_n a$ .

A gyakorlatban egy vezető hurok által kifestített felület fluxusának meghatározása a feladat. A felület normálisa irányát a hurokban folyó áram irányával jobbcsvár szabály alkalmazásával hangoljuk össze. A fluxus az indukció vektor és a felület normálisának irányától függően lehet pozitív, ill. negatív mennyiség. Egy több,  $N$  menetből álló tekercs fluxusát az egyes menetek  $\Phi_k$ ,  $k = 1, 2, \dots, N$  fluxusainak összege adja

$$\Psi = \sum_{k=1}^N \Phi_k, \quad (7.12)$$

ha azonban az egyes menetek fluxusa azonos, akkor  $\Psi = N\Phi$ . A  $\Psi$  mennyiséget a tekercs fluxusának szokás nevezni.

A mágneses tér szemléltetése mágneses indukcióvonalakkal történik, ahol a mágneses indukció nagysága arányos az egységnyi felületen átmenő erővonalak sűrűségével, az indukció vektor iránya pedig az indukcióvonalak érintője irányába mutat.



7.6 ábra: A fluxus, és a mágneses tér forrásmentességének értelmezése  
 Forrás: [15]

### 7.2.2 A mágneses indukció forrásmentessége

Az indukcióvonalakra vonatkozó tapasztalati tény, hogy zárt felületen ugyanannyi indukció vonal lép be mint ki. Azaz zárt felület fluxusa zérus. Ha tekintünk egy  $\vec{l}$  görbével határolt  $\vec{a}$  síklap felületet, és meghatározzuk az  $\vec{a}$  felület fluxusát, akkor egy, ugyancsak az  $\vec{l}$  görbével határolt, ill. felületeken is ugyanannyi mágneses indukcióvonal lép át, mint az 1 felületen (7.6 ábra).

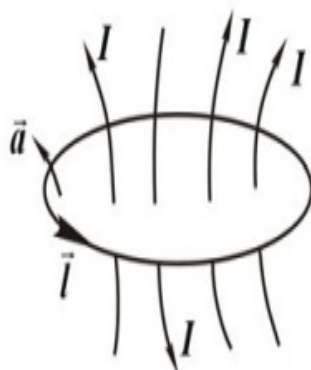
Vegyük figyelembe, hogy az  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  felületek egy zárt felület két részét alkotják, ahonnan egy oldalra rendezve azt kapjuk, hogy zárt felület fluxusa nulla, azaz a mágneses indukcióvonalak forrásmentesek, egyszerű esetekben az indukció vonalak zárt görbét alkotnak

$$\oint_a \vec{B} d\vec{a} = 0. \quad (7.13)$$

### 7.2.3 A gerjesztési törvény

A mágneses tér, ill. az azt reprezentáló mágneses indukció vektor és a teret gerjesztő áram közötti kapcsolat a kísérletek általánosításával kapható meg. Homogén anyagot feltételezve integráljuk a mágneses indukció vektort egy zárt görbe mentén (7.7 ábra). Az integrál értéke tetszőleges görbe esetén egyenlő a görbe által körülfogott áramerősségek algebrai összegével. Az összegezés során pozitív előjellel veendő figyelembe annak a vezetőnek az áramerőssége, amely a görbe körüljárási irányával a jobbszavar szabály szerint van összehangolva, és negatív előjellel azok, amelyek ellenkező irányúak.

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu \int_a J d\vec{a} = \sum_k I_k \quad (7.14)$$



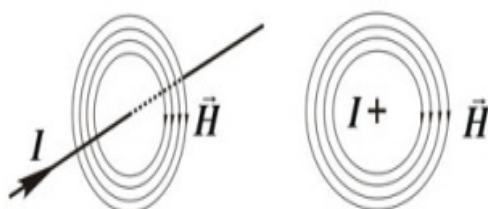
7.7 ábra: A gerjesztési törvény értelmezése  
Forrás: [15]

A tapasztalati törvény, a gerjesztési törvény a következő alakú:

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = \int_a \vec{J} d\vec{a} = \sum_k I_k. \quad (7.15)$$

#### 7.2.4 A gerjesztési törvény alkalmazása

Egyenes vezető mágneses tere. Határozzuk meg egy végtelen hosszúnak tekinthető egyenes vezető körül kialakuló mágneses télerősségnek a helyfüggését, ha a vezetőben  $I$  áram folyik. Az elrendezés hengerszimmetriájából következik, hogy a mágneses erővonalak koncentrikus körök (7.8 ábra). Az áramvezetőtől azonos távolságra a mágneses télerősség azonos nagyságú, és iránya a mágneses erővonal érintője irányába mutat.



7.8 ábra: Egyenes vezető mágneses erővonalai

Alkalmazva a gerjesztési törvényt egy mágneses erővonalra

$$\oint_l \vec{H} d\vec{l} = I$$

és figyelembe véve, hogy a mágneses erővonalhoz tartozó  $d\vec{l}$  elemi ívhossz párhuzamos a mágneses télerősség vektorral, így a két vektor skaláris szorzata két skalár szorzatává alakul. Vegyük figyelembe, továbbá azt a tényt, hogy az áramvezetőtől azonos távolságra a mágneses télerősség állandó, így az integrál elé kiemelhető, és a mágneses tér helyfüggése előállítható.

## 7.3 Az ön- és kölcsönös induktivitás

### 7.3.1 Vezető hurok önindukció együtthatója

Valamely magában álló zárt vezetőben folyó áram az áramvezető által kifeszített hurokban az áramerősséggel arányos fluxust hoz létre, ahol az arányossági tényezőt a vezető hurok önindukció együtthatójának nevezzük.

$$L = \frac{\Phi}{I} = 1 \frac{V_S}{A} = 1 \text{Henry}.$$

Az  $L$  önindukció együttható függ az áramhurok alakjától és a permeabilitástól, de nem függ sem az áramtól sem a fluxustól. Az induktivitást úgy számíthatjuk ki, hogy a vezetőben felvesszünk valamilyen  $I$  áramot, meghatározzuk az áram által létrehozott mágneses térerősséget, majd az áramvezető hurok fluxusát, és végül azt a gerjesztő árammal osztva megkapjuk a vezető önindukció együtthatóját. Meg kell azonban jegyezni, hogy ekkor csak az áramvezetőn kívüli fluxust vesszük figyelembe, ami azt jelenti, hogy ezzel a külső önindukció együtthatót határozzuk meg.

A kölcsönös indukció együtthatót a két vezető hurok kölcsönös helyzete és az anyag mágneses permeabilitása határozza meg, nem függ sem a vezetők áramától, sem a fluxustól. A kölcsönös indukció együtthatónak előjelet is tulajdonítunk, a következők szerint. Mindkét hurokban önkényesen vesszük fel az áramirányt, mindkét áramirányhoz a jobbcsavar szabály szerint rendeljük a felületi normális irányát. Ha ekkor az egyes vezető árama a másik vezetőhöz tartozó hurokban pozitív fluxust hoz létre, akkor a kölcsönös indukció együttható pozitív, ellenkező esetben negatív. Meg kell azonban jegyezni, hogy homogén, lineáris anyag esetén az egyik és a másik vezető szerepe felcserélhető. Az önindukció együttható mindig pozitív. Ha azonban mindkét áramvezetőben folyik áram, akkor az egyes áramvezetők által képzett hurokban a fluxusok a szuperpozíció elvnek megfelelően összegeződnek.

## 7.4 Mágneses tér és anyag kölcsönhatása

### 7.4.1 A mágnesezettség vektora és a permeabilitás

Mikroszkopikus modell. Az anyagok mágneses tulajdonságait az atomszerkezetre lehet visszavezetni, ui. az atommag és a körülötte keringő elektron saját tengelye körüli forgómozgásából származó mágneses tulajdonságát spinnek nevezik. Az atommag körül keringő elektron azonban már egy körárammal, mágneses dipólussal modellezhető, ahol a mágneses dipólus dipólus-nyomatékát az elemi köráram  $I$  áramerőssége és a köráram  $d\vec{a}$  felülete határozza meg.

Makroszkopikus modell. Mérnöki szempontból nem az egyes dipólusok, hanem azok sokaságának a modellezésére van szükség. Tekintsünk egy  $dV$  térfogatot, amelyben  $N$  darab mágneses dipólus helyezkedik el. Mindegyik mágneses dipólus rendelkezik egy  $\vec{m}_i$  mágneses dipólus-nyomatékkal. Az anyag statisztikai jellemzőinek meghatározása során az egyes dipólus-nyomatékokat közel azonosnak tekintjük  $\vec{m}_i \approx \vec{m}_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, N$ .

A dipólusok között fellépő kölcsönhatást egy  $\alpha$  kölcsönhatási tényezővel és a többi dipólus által keltett  $\vec{H}$  mágneses térerősséggel modellezzük. Valamely anyag mágnesezettségét az egységnyi térfogatban elhelyezkedő dipólusmomentumok sűrűsége határozza meg.



## 8 ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK [8]

Az elektromágneses rezgést párhuzamos rezgőkör segítségével állítják elő, amely egy kondenzátorból és egy vele összekapcsolt tekercsből áll. Ha a kondenzátort feltöltjük, majd kiiktatva az áramforrást zárjuk az áramkört. A feltöltött kondenzátor fegyverzetei között elektromos mező alakul ki. Amikor a tekercsen át az elektronok áramolnak, akkor a tekercsben mágneses mező jön létre. Váltakozva lesz tehát jelen az elektromos és a mágneses tér, elektromágneses rezgés alakul ki. Ez az átalakulás addig tart, míg az elektromágneses energia hő formájában szét nem szóródik a környezetben. Az így létrejött rezgést szabadrezgésnek nevezzük. Csillapított elektromágneses rezgés jön létre, mert a lezajló folyamatok növelik a rezgőkörnek és a környezetnek a belső energiáját. Ezt a rezgőkör tagjainak felmelegedése jelzi. Ha sikerül a rezgőkör energiáját folyamatosan pótolni, akkor csillapítatlan rezgéseket lehet előállítani. A csillapítatlan elektromágneses rezgést létrehozó kapcsolást oszcillátornak nevezzük.

Az oszcillátor latin eredetű szó, jelentése rezgéskeltő eszköz.

A kialakuló rezgések frekvenciája:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (8.1)$$

Ezt az összefüggést Thomson-képletnek nevezzük (William Thomson = Lord Kelvin). A kondenzátor illetve a tekercs megfelelő megválasztásával tetszőleges frekvenciájú rezgések hozhatók létre. A rezgőkörben az elektromos tér a kondenzátor fegyverzetei, a mágneses tér a tekercs belsejében koncentrálódik. Ha az ilyen zárt rezgőkör kondenzátorának lemezeit fokozatosan távolítjuk egymástól, és a tekercs meneteinek számát csökkentjük, akkor ezzel a zárt rezgőkört kiegyenesítettük, nyitott rezgőkört kapunk. Határesetben a rezgőkörből kialakul a dipólus, az antenna (árbcot jelent), mely egyetlen egyenes vezetőből áll. Ha egy ilyen antennát rezgőkör közelébe helyezünk, akkor az indukció miatt az antennában elektromágneses rezgések alakulnak ki, amelyeket a dipólus elektromágneses hullámok formájában szétsugároz. Ha az elektromágneses hullámok egy vevőantennához érnek, akkor abban feszültség indukálódik, a vezetőben elmozdulnak az elektronok. Az antennában ugyanolyan rezgésszámú váltakozó áram keletkezik, mint az adóban.

A dipólus abban különbözik a rezgőkörtől, hogy egyrészt a kapacitás és az indukció nem egy helyre koncentrálódik, másrészt a dipólus nagy mennyiségű energiát sugároz ki a környezetbe. A dipólus szó görög-latin eredetű, a di- jelentése kettő, pólus jelentése sarok. A dipólus onnan kapta a nevét, hogy a rezgések során a vezeték két vége váltakozva ellentétes töltésű. Az elektromágneses hullámok létezését Henrich Hertz

(1857–1894) német fizikus mutatta ki kísérletileg. Hertz azt is kimutatta, hogy ezek az elektromágneses hullámok, a fényvel azonos sebességgel egyenes vonalban terjednek, visszaverődnek, megtörnek, sőt interferencia, polarizáció, diffrakció, és Doppler-hatás is tapasztalható. Tehát az elektromágneses hullámok transzverzális hullámok. Bay Zoltánnak (1900–1992) 1946. február 6-án sikerült a Holdra kisugárzott és onnan visszaverődött radarhullámokat kimutatni (Radio Detection And Ranging = rádiós érzékelés és mérés). Az elektromágneses hullámok polarizáltságára utal, hogy a tv-nél az adó és a vevőantenna dipólusának párhuzamosnak kell lennie. A Magyar Rádió adásai 1924-ban indultak meg. A Rádió 1933-ban helyezte üzembe a 307 m magas lakihegyi (Csepel-sziget) adótornyot. A stúdió akusztikai tervezését Békésy György, a későbbi Nobel-díjas tudós végezte. A mobiltelefonok a mikrofon által létrehozott hangfrekvenciás elektromos rezgéseket digitális jelekké alakítják. Az így kódolt jelek a telefonba épített parányi rádióadó segítségével jutnak el a legközelebbi mobiltoronyhoz. A toronytól érkező jeleket a telefonba épített rádió veszi. A vett digitális jeleket a készülék visszaalakítja hangfrekvenciás elektromos rezgéssé, amely azután a fülhallgatóban hangot kelt. Az SMS üzenetek szintén digitális jelekké kódolva rádióhullámok segítségével jutnak a toronyhoz, illetve onnan a másik telefonhoz. a mobiltornyok egymás között mikrohullámok segítségével továbbítják a jeleket. A Magyar Televízió kísérleti adása 1955-ban indult. A rövid hullámhosszúságú elektromágneses hullámokkal a visszaverődés és a Doppler-hatás alapján működik a rendőrségi traffipax. Az elektromágneses hullámokat a hullámhosszuk vagy a frekvenciájuk alapján (8.1 táblázat) csoportosíthatjuk.

8.1 táblázat: A teljes elektromágneses spektrum

			Hullámhossz (m)	Frekvencia (Hz)
	Kisfrekvencia		10 000	
Rádióhullám	Nagyfrekvencia	Hosszúhullám	1000	100 000
		Középhullám	100	$5 \times 10^5 - 10^6$
		Rövidhullám	10	$n \cdot 10^6$
		URH	1	$n \cdot 10^6$
		Rádióhullám	0,001	$10^8$
		Mikrohullám	$10^{-6}$	$10^{11}$
Optikai színek	Nagyfrekvencia	Infravörös	$10^{-7}$	$10^{14}$
		Látható fény	$4 \cdot 10^{-7} - 8 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{14} - 8 \cdot 10^{14}$
Sugarak	Nagyfrekvencia	Ultraibolya	$10^{-7}$	$10^{15}$
		Röntgen-sugár	$10^{-9}$	$10^{17}$
		$\gamma$ -sugár	$10^{-11}$	$10^{19}$
		Kozmikus sugarak	$10^{-13}$	$10^{21}$

## 8.1 Rádióhullámok

*Hosszúhullám:* túlnyomórészt a Föld felszínén terjednek, követve a Föld görbületét. Terjedésüket gátolják a hegyek, ezért elsősorban a tengerhajózásnál használják.

*Középhullám:* részben a Föld felszínén, részben bejutnak az ionszférába és onnan visszaverődnek. Régen a rádiózásban igen elterjedt volt (Kossuth rádió, Petőfi rádió).

*Rövidhullám:* csak az ionszférából visszaverődve terjedhetnek.

*Ultrarövid hullám:* egyenes vonalban terjednek az ionszférán áthatolva. Csak magas hegyeken elhelyezett antennákkal és átjátszó adókkal lehet műsört sugározni (pl. Eger rádió).

*Mikrohullám:* a fényhez hasonlóan terjednek. Mikrohullámokat alkalmaznak a radarokban, a mikrohullámú sütőknél, a tv műholdaknál, de gyógyászati célokra is. A szövetek belső melegítése, a vérellátás fokozása jótékony hatású bizonyos mozgásszervi betegségeknel. A mikrohullámú sütőben a mikrohullámtól az élelmiszerekben lévő vízmolekulák rezgésbe jönnek és heves mozgásuk hatására az étel felmelegszik. A kialakuló hullám csomópontjaiban nincs rezgés, ezért forgótányér nélkül kb. 3 cm-enként változnak a hideg és a meleg pontok. Tilos a mikrohullámú sütőbe jó vezető anyagokat, például fémevőeszközt, alufóliát tenni, mert erős áramok, szikrakisülések jönnek létre.

## **8.2 Infravörös sugarak**

Hősugaraknak nevezzük őket, mert ugyan nem látjuk, de a bőrünkön melegként érzékeljük. Az élő test ilyen sugarak révén adja át energiájának egy részét a környezetnek. A gyógyászatban helyi gyulladások, daganatok korai felismerésére és kezelésére használják. A lakóházak hőfényképe megmutatja, hogy hol nem jó a hőszigetelés. Az éjjel látó szemüvegek érzékelik az ember vagy az állat által kibocsátott hősugarakat. A viperák képesek érzékelni a zsákmányállat hősugarait. A műholdak a földfelszín megfigyelését az infravörös tartományban végzik, mert ezt a felhőzet nem zavarja. Infravörös fényvel működik több háztartási készülék távirányítója. A tv távkapcsolója vagy a fényképezőgép és a filmfelvevő távolságmérői is infravörös sugarakat használnak. Hangtovábbításra is használják.

## **8.3 Látható fény**

A fény az emberi szem számára érzékelhető elektromágneses sugárzás, amely a szemben fényérzetet kelt, és ez által látható. A különböző hullámhosszúságú látható sugarakra szemünk érzékenysége más és más. Tehát nemcsak attól függően érzékeli a fényforrás által kibocsátott fénysűrűséget, mekkora kisugárzott teljesítménye, hanem attól függően is, hogy milyen a színösszetétele (hullámhossza).

## **8.4 Ultraibolya sugarak**

A benne az élő szervezetre hasznos sugarak is találhatóak, de ennél sokkal több káros hatása van. Közreműködnek a D vitamin keletkezésében. Az ultraibolya sugárzás roncsolja a sejteket ezért használható sterilizálásra (uszodák vize). De az erős napfény vagy a hegesztés ívfénye kötőhártya gyulladást okozhat. Az ultraibolya sugárzás fokozza a bőrben a festékképződést, de bőrgyulladást és bőrrákot is okozhat. Az ultraibolya fény hatására például a cink-szulfid anyagokon létrejövő fluoreszkálást használják bankjegyek, útlevelek és egyéb okmányok hamisításának megnehezítésére is. Az ózonpajzs megvédi a Földet ezektől a káros hatásoktól, mert abban az ultraibolya sugarak elnyelődnek. Napjainkban ezen az ózonpajzson azonban egyre kiterjedtebb lyukak keletkeznek. Ezeket a freon nevű vegyület okozza. Számos rovar, például a házi méh látja az ultraibolya fényt, és ez teszi számára lehetővé egyes virágok felismerését. A kvarc kristályos szilícium-oxid ( $\text{SiO}_2$ ), mint például a színtelen hegyikristály vagy a lilás ametiszt 1600 °C-ra hevítve, a belőle készült kvarcüveg nem nyeli el az ultraibolya fényt. A kvarclámpákban higanygőzzel töltött kisülési cső van, és a cső burája kvarcüveg. A szoláriumokban is kvarclámpákkal állítják elő az ultraibolya fényt.

## 8.5 Röntgensugarak

Néhány anyag röntgensugárzás hatására fényt bocsát ki, elektromos és mágneses mezőben nem térülnek el, ionizáló hatásuk van. A filmeket megfeketítik, tehát kémiai változást képesek létrehozni. Orvosi vizsgálatoknál használják. A röntgensugarakat a kalcium tartalmú csontok nyeleik el a legjobban. A reumatológia ízületi gyulladások kezelésére használja. Röntgen ezeknek a sugaraknak a felfedezéséért 1901-ben Nobel-díjat kapott. Ő volt az első Nobel-díjas. Konrad Röntgen (1845–1923) német fizikus 1895. november 8-án fedezte fel az X-sugarakat.

## 8.6 Gammasugarak

Nem különböznek a röntgensugaraktól, de ezek, radioaktív bomlástermékei. Az atommag mesterséges és természetes átalakulása és gerjesztett állapotának megszűnése során jönnek létre. Alkalmazása azonos a röntgensugarakéval. Ezen kívül az élelmiszeriparban konzerválásra használják. Használják még fémek átvilágítására, daganatos sejtek elpusztítására.

## 8.7 Kozmikus sugarak

A világűrben érkező sugarak. Ez is atombéli folyamatok eredménye.

## 8.8 Az elektromágneses összeférhetőség alapjai (EMC) [12]

A technika és azon belül is az elektrotechnika fejlődésével környezetünk egyre nagyobb mértékben telített a villamosság különböző megnyilvánulásaival, ami az ember által létrehozott villamos berendezések elektromágneses hatásainak köszönhető. Elektromágneses tér az ember tevékenysége nélkül is jelen van körülöttünk az ionoszféra statikus villamosterének és a föld statikus mágneses terének köszönhetően. Ezek a háttérmezők alig vannak hatással az emberi szervezetre és az ember által készített műszaki berendezésekre. Nem ez a helyzet azonban zivatar idején, amikor a természetben kialakuló elektromágneses tér komoly károkozásra képes. Az elektromágneses tér hatásainak kihasználásával működő gépek, berendezések, létesítmények, műszerek, miniatűr eszközök az emberi munkavégzés, kommunikáció, szórakozás, azaz az élet minden területén – egészen az emberi szervezet belsejéig – egyre nagyobb számban vesznek körül bennünket és természetesen egymást. Ezek az eszközök működésük közben a legszélesebb spektrumú elektromágneses teret bocsátják ki magukból, illetve használják fel azt működésükhöz. Szinte minden készülék, nem csupán műszaki berendezés, de hamarosan még a könyvek, füzetek is tartalmaznak villamossággal működő elemeket és azon belül elektronikákat, amelyek a környező elektromágneses tér egyre szélesebb frekvenciatartományában növelik annak szintjét. A nagyszámú berendezés kifogástalan, „zavartalan” működéséhez egyre körültekintőbben megvalósított, egyre bonyolultabb védelmi intézkedésekre van szükség az elektromágneses teret kibocsátó berendezéseknél, az ilyen zavarokra érzékeny berendezéseknél és azok környezetének kialakításánál. Törekedni kell rá, hogy a kibocsátott elektromágneses tér energiája minél kisebb legyen, illetve a többi berendezés közül csak azokra hasson, amelyeknek az elektromágneses térre, mint közvetítőre bízott jelet szánták. Azt is biztosítani kell, hogy a berendezések az egyre „zsúfoltabb” és nagyobb energiájú tér zavaró hatásait tűrjék, azokkal szemben legyenek immúnisak és a

nekik szánt jelet a „zajból” ki tudják választani. Ezen követelmények teljesítése egyre nehezebb feladatot jelent, aminek okai a következők: az információ továbbításához és feldolgozásához az elektronikus áramkörök egyre kisebb teljesítményeket, egyre alacsonyabb jelszinteket használnak; az erősáramú berendezések teljesítményszintje olyan magas, hogy annak kis hányada is zavarást okozhat; az időben változó villamos és mágneses terek zavarást okozhatnak az egyre sűrűbben előforduló és egyre érzékenyebb berendezésekben. Ha egy újonnan készített villamos berendezés nem veszélyezteti és nem zavarja elektromágneses terével más berendezések és az ember létét, tevékenységét, továbbá maga is ellenálló a környezet elfogadott mértékű elektromágneses hatásaival szemben, akkor a berendezés elektromágneses szempontból összeférhető. A következő fejezetek ezen kívánatos állapot megvalósításának eszközeit ismertetik.

### **8.8.1 Az elektromágneses összeférhetőség meghatározása**

Mindennapi életünk során is gyakran tapasztaljuk, hogy villamos berendezéseink működését valamilyen más berendezés be- vagy kikapcsolása, illetve üzemeltetése befolyásolja. Különösen régebben fordult elő gyakran, hogy a szomszéd porszívója szemcséssé tette televíziónk képét, a gép zúgását pedig a készülék is közvetítette számunkra. Hasonlóképpen hallhattuk a rádióban az utcán elhaladó jármű gyújtásának kattogását vagy más adók halk (esetleg hangosabb) duruzsolását az éppen hallgatni kívánt adó mellett. Manapság az elektromágneses összeférhetőséggel kapcsolatos gyakori jelenség, hogy a rádiótelefonon érkező hívást már a készülék reagálása előtt jelzi a rádiókészülék vagy más berendezés kattogása, illetve a számítógép monitorján a kép oldalirányú vibrálása. Az, hogy ma a porszívó vagy a járművek gyújtása, illetve a teljesítményelektronikai eszközök által okozott, durva zavarás már sokkal ritkábban fordul elő, annak köszönhető, hogy a villamos berendezések gyártói, üzemeltetői tudatosan töreksenek az ilyen zavaró hatások kibocsátásának megakadályozására, illetve a zavaró hatásokra való érzékenység csökkentésére. Mindezek az intézkedések az elektromágneses összeférhetőség, vagy idegen szóval elektromágneses kompatibilitás témakörébe tartoznak. Az elektromágneses összeférhetőség magyar rövidítése EMC, amely megegyezik az angol Electromagnetic Compatibility kifejezés rövidítésével. Németül az elektromagnetische Verträglichkeit kifejezés, rövidítve EMV használatos. Az elektromágneses összeférhetőség alapfogalmainak meghatározása és értelmezése az MSZ IEC 1000-1-1 szabványban szerepel. Az elektromágneses zavarás elleni tudatos törekvés ma már elkerülhetetlen, mert egyre több berendezés rendelkezik egyre több és egyre érzékenyebb villamos (elektronikus) alkatrészsel. Míg egy hagyományos, villamos motor vagy forróvíz-tároló elektromágneses zavarás útján történő tönkretételéhez közeli villámcsapásra van szükség, addig egyes integrált áramköröket elegendő kézzel megfogni és az tönkremehet. A villamos berendezések tönkretételéhez szükséges energiamennyiség az egyes berendezéstípusok esetén az 8.2 táblázatban szerepel.

8.2 táblázat: A különböző villamos berendezések tönkretételéhez szükséges energia

Villamos berendezés	Energia (Ws)
villamos motor	$10^4-10^7$
elektroncső	$10^3-10$
relé	$10^{-3}-1$
kondenzátor	$10^{-3}-10^{-4}$
dióda	$10^{-6}-10^{-3}$
tranzisztor	$10^{-7}-10^{-2}$
integrált áramkör	$10^{-7}-10^{-3}$

### 8.8.2 Az elektromágneses összeférhetőség meghatározása

Elektromágneses összeférhetőség alatt az elektromágneses energiát kibocsátó (adó) és azt elnyelő (vevő) berendezések zavarmentes, együttes működését értjük. Az elektromágneses összeférhetőség valamely berendezésnek, eszköznek vagy rendszernek az a tulajdonsága, hogy saját elektromágneses környezetében kielégítően működik anélkül, hogy más objektum számára elviselhetetlen elektromágneses zavarást idézne elő. A definícióban szerepel az elektromágneses környezet kifejezés, amely az adott helyen fennálló elektromágneses jelenségek összességét jelenti. Valamely villamos berendezés lehet összeférhető bizonyos környezetben, például az ipari üzemben, ahová tervezték, ugyanakkor más környezetben, például sebészeti műtőben ugyanaz a berendezés nem biztos, hogy összeférhető.

### 8.8.3 Reverzibilis és irreverzibilis zavarás

Az elektromágneses összeférhetőség hiánya nem feltétlenül jelenti villamos berendezések tönkremenetelét, sok esetben nagy kárt okozhat az is, ha a zavarás (interferencia) miatt csupán jelek vagy adatok változnak meg. A zavar hatása lehet reverzibilis és irreverzibilis. Reverzibilis hatás lehet a berendezés funkciócsökkenése, zavaró jelek vétele, kattogás, zúgás stb. Az előbbieket a tűrhető hatások, de vannak nem tűrhető hatások is, amikor a zavar például jelváltozást okoz a készülékben. Irreverzibilis hatás lehet például egy integrált áramkör, egy nyomtatott áramköri lap vagy az egész berendezés leégése. Az elektromágneses zavarást a legtöbbször a zavart berendezés bizonyos pontjai között keletkező, meg nem engedett mértékű (csúcsértékű) vagy egyéb jellemzőjű (pl. frekvenciájú) villamos feszültség okozza, ami a berendezés működésében zavart, hibás működést vagy a berendezés meghibásodását, tönkremenetelét esetleg megsemmisülését okozza.

### 8.8.4 Az elektromágneses zavarás csatolásának elemi modellje

Az elektromágneses zavarás tárgyalását célszerű a három fő szereplővel kezdeni. Ez tartalmazza a forrást, amely a zavarást okozza, valamilyen csatolási folyamatot vagy csatoló közeget és a zavart eszközt.

A *forrásokra* példák lehetnek, az előbbieken említettek szerint a villamos energiarendszer, a vezeték nélküli helyi hálózatok (LAN) antennái stb. A csatolás az áram útján valósul meg, ha a különböző áramkörök közös vezetői villamos, mágneses vagy elektromágneses térben haladnak. A zavar vevője bármilyen fajta készülék vagy a villamos berendezés bármely része lehet. Természetesen egy adott épületben lévő összes berendezés lehet elektromágneses zavar forrása.

*Csatolási folyamat:* Az elektromágneses zavar vevője hálózat között fellépő teljes elektromágneses kölcsönhatás ezeknek az elemi kölcsönhatásoknak a nagyon bonyolult kombinációja. Ráadásul bármely zavarvevő elektromágneses zavarforrásként is működhet, és fordítva. Új létesítéskor vagy felújítás esetén a tervezési szakaszban meg kell határozni az összes lehetséges forrást, csatolási utat és zavart objektumot tartalmazó mátrixot. Ennek a mátrixnak a segítségével kell megbecsülni a kölcsönhatások lehetséges mértékét, majd megítélni, hogy milyen fajta elektromágneses zavarok alakulhatnak ki, és ezek közül várhatóan melyek lesznek jelentősek. Csak ennek az elektromágneses zavarok kölcsönhatását tartalmazó mátrixnak az alapján lehet a védőintézkedéseket már a kezdeteknél megtervezni, lehetővé téve a gyors és költséghatékony megoldást. Négy különböző fajta elemi elektromágneses zavarást lehet megkülönböztetni:

- Galvanikus csatolás;
- Induktív csatolás;
- Kapacitív csatolás;
- Csatolás sugárzás útján.

8.3 táblázat: A különböző csatolási módok alapvető tulajdonságai

Forrás	Frekvencia-tartomány	Csatolás	Hatótávolság	Vevő
Villamos tér	Kisfrekvencia	Kapacitív	Kicsi	Kis- és Nagyfeszültségű kábelek
Mágneses tér	Kisfrekvencia	Induktív	Kicsi	Kis- és Nagyfeszültségű kábelek
Elektromágneses tér	Nagyfrekvencia	Sugárzás	Nagy	Kis- és Nagyfeszültségű kábelek

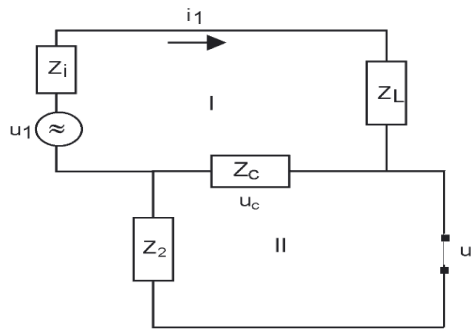
Épületekben a zavarjelenségek legnagyobb részét az induktív csatolások, kisebb részét pedig a kapacitív és a galvanikus csatolások idézik elő. A sugárzás útján történő csatolásnak mindaddig nem volt általában különösebb jelentősége, mivel a fellépő térerősségek rendszerint jóval alatta maradnak az Európai Unió EMC irányelvében előírt zavartűrési vizsgálatok során megkövetelt határértéknek. Azonban a vezeték nélküli alkalmazások terjedése a jövőben az ilyen jellegű elektromágneses zavarási jelenségek megszaporodásához vezethet.

#### 8.8.4.1 A galvanikus csatolás

Galvanikus csatolás akkor lép fel, ha különböző áramkörök közös vezetőket és/vagy csatolóimpedanciákat tartalmaznak. Ez például akkor fordulhat elő, ha különböző áramköröket azonos feszültségforrás táplál. A galvanikus csatolás alapelve a 8.2 ábrán látható áramkört. Az I. áramkör legyen például az energiaellátó hálózat része, a II. áramkör pedig egy adatátviteli hálózat. A közös  $Z_c = R_c + j\omega L_c$  csatoló impedancia miatt az  $u_2$  jelfeszültségre szuperponálódó feszültség, kis értékű  $Z_c$  ( $Z_c \ll Z_i + Z_L$ ) esetén a következő összefüggéssel számítható:

$$u_c = Z_c + I_1 \approx \frac{U_1}{Z_i + Z_L} Z_c. \quad (8.2)$$

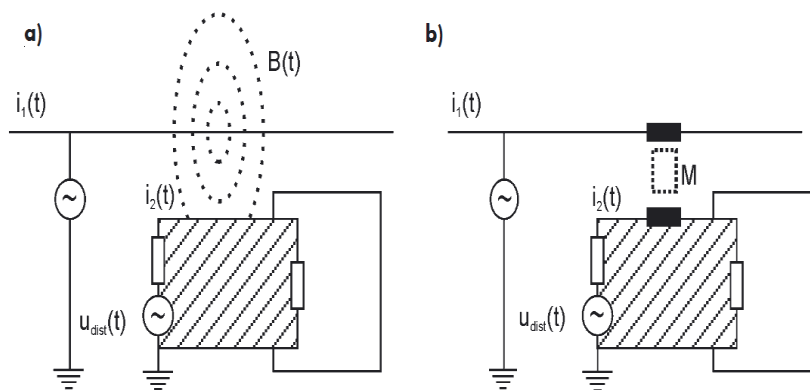
Ha az  $i_1$  áram és/vagy a  $Z_c$  csatoló impedancia elég nagy, akkor a szuperponálódó  $u_k$  feszültség az  $u_2$  jelfeszültséghez képest elég nagy lehet ahhoz, hogy megzavarja az adatátviteli áramkört.



8.1 ábra: Galvanikus csatolás

#### 8.8.4.2 Induktív csatolás

Az időben változó külső  $i_1(t)$  áram maga körül  $B(t)$  mágneses indukciót hoz létre, amely a közelben lévő áramkörben  $u_{dist}(t)$  zavarfeszültséget indukál. A jelenség leírására alkalmas áramköri modellben a csatolást az  $M$  kölcsönös induktivitás segítségével lehet figyelembe venni. Az  $u_{dist}(t)$  zavarfeszültség olyan közös módusú  $i_2(t)$  áramot indít meg az áramkörben, amely a külső teret gyengítő mágneses erőteret hoz létre. Az  $i_2(t)$  áram a zavart rendszer áramaira szuperponálódik, ami a rendszer hibás működéséhez vezethet. Különböző rendszerek mágneses erőtereinek csatolását a csatolt áramkörök közötti kölcsönös impedanciát figyelembe vevő helyettesítő áramkörrel lehet modellezni (8.2 ábra).



8.2 ábra: Induktív csatolás a) erőter modell, b) helyettesítő áramkör

A csatolás mértéke alapvetően három paramétertől függ:

- a zavaró áram nagyságától,
- a forrás és a vevő közötti távolságtól,
- a zavaró erőter frekvenciájától.



A zavarjel akkor lesz nagy és jelentős, ha:

- a külső áramkörben folyó áram nagy,
- az elmenő és visszatérő vezetőkben folyó áramok aszimmetrikusak (mint pl. a TN-C hálózatban),
- az áramkörök közel vannak egymáshoz, és nagy hurkot írnak le,
- a külső áramkörben folyó áram időben gyorsan változó, és emiatt jelentős a nagyfrekvenciás tartalma.

Az induktív csatolás ugyanakkor a zavarás mérséklése során hasznos is lehet. Ha a kábeltálcák és a koaxiális kábelek telepítése megfelelő (azaz, ha rövid vezetőkkel megbízhatóan vannak összekötve, amelyek impedanciája nagyfrekvenciákon is kicsi), akkor ez, különösen nagyobb frekvenciákon a kábelek árnyékolását biztosítja a külső mágneses erőkterekkel szemben.

Az induktív csatolás frekvencia függésének ismerete elengedhetetlenül fontos az olyan villamos hálózatok kialakítása során, amelyek a külső nagyfrekvenciás zavarokkal szemben optimális védelmet nyújtanak

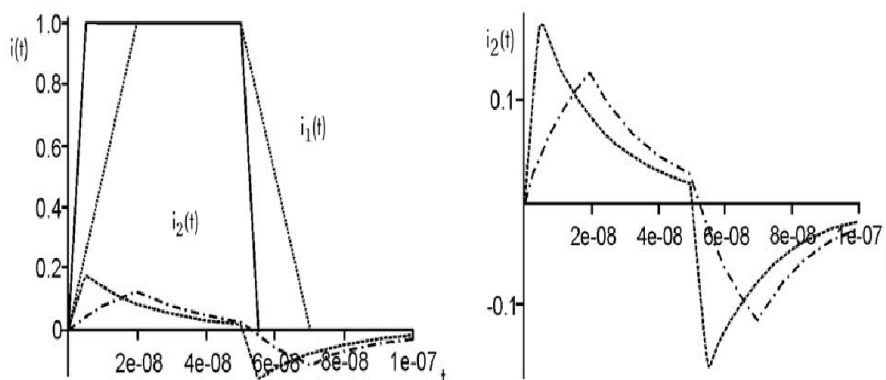
A kisméretű hurok öninduktivitása  $L_2$ , ellenállása  $R_2$ , a gerjesztést adó külsővonalban  $i_1(t)$  áram folyik és a kettő közötti kölcsönös induktivitás  $M$  (8.2 ábra).

Ha meghatározott  $\omega$  körfrekvenciájú áramokat vizsgálunk ( $i_{1,2}(t) = i_{1,2}(\omega)e^{j\omega t}$ ), akkor az egyszerű modell esetén az  $i_1(\omega)$  zavaró áramnak és az  $i_2(\omega)$  indukált áramnak pontosan ki lehet számítani az átviteli függvényét, amelyre az (8.3) egyenlet adódik

$$i_2 = \frac{sM}{R_2 + sL_2} i_1, s = j\omega, s = -1. \quad (8.3)$$

Az  $i_2$  indukált áram nő, ha az  $i_1$  zavaró áram és annak frekvenciája nő. Kisfrekvenciákon az  $\omega$ -val arányosan növekszik, míg nagyfrekvenciákon az  $i_2$  elér egy telítési értéket. Ezt a telítési értéket az  $M/L_2$  arány határozza meg. Az elektromágneses zavaró hatások csökkentése érdekében az elektromágneses összeférhetőség követelményeit kielégítő hálózatban a csatolt áramkörre vonatkozó  $M$  kölcsönös indukciónak a lehető legkisebbnek, míg az  $L_2$  önindukciónak a lehető legnagyobbnak kell lennie.

Mivel a gyors zavarok több és nagyobb nagyfrekvenciás összetevőket tartalmaznak, ezért ezek nagyobb zavarokat okoznak. Ez látható a 8.3 ábrán, ahol a digitális jelet helyettesítő trapéz formájú áram-hullám alak által létrehozott indukált áram számított értékei láthatók.



8.3 ábra: Lassú és gyors, trapéz alakú áramok által létrehozott indukált áramok

Forrás: [12]

A 8.3 ábrán látni lehet, hogy az indukált áram a lassú felfutású külső áram amplitúdójának több, mint 10%-át éri el, gyors felfutású külső áram esetén pedig annak több, mint 15%-át. Ezek a nagy értékek a digitális jelek meredek felfutásából erednek. Hasonlóan nagy értékek adódnak minden elektronikus kapcsolási folyamatból, mint pl. a fázisszög-vezérelt fényerősség szabályozókból. A fényerősség szabályozó kapcsolását trapéz alakú jellel lehet modellezni. Az 50 Hz-es jel többi része gyakorlatilag elhanyagolható.

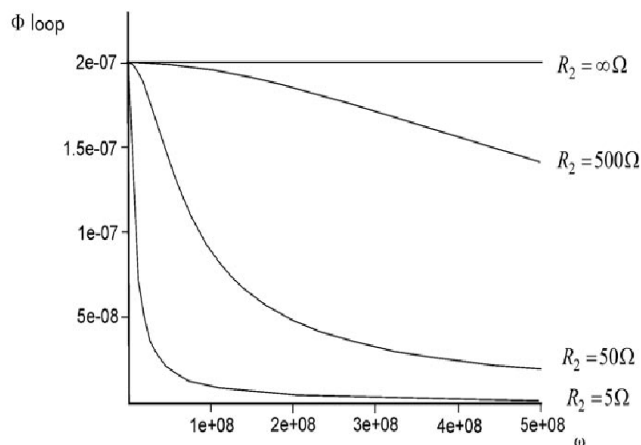
Eddig az elektromágneses zavarás vevőjeként rövidrezárt hurkot vizsgáltunk. Ebben az esetben a villamos jellemzőket kell optimalizálni annak érdekében, hogy az  $i_2(t)$  indukált áram a lehető legkisebb legyen. Az  $i_2(t)$  indukált áramnak azt a tulajdonságát, hogy az őt létrehozó külső mágneses erőteret csökkentő mágneses erőteret hoz létre, szintén fel lehet használni a burkolt, érzékeny villamos vagy elektronikus rendszerek árnyékolásában. Ebben az esetben a rövidrezárt hurok villamos paramétereit úgy kell megválasztani, hogy a mágneses erőteret csökkentő  $i_2(t)$  értéke legyen optimális, és ezáltal a hurokban fellépő mágneses fluxus a lehető legkisebb legyen. Erre a célra fel lehet használni például az árnyékolt kábelek árnyékolását, a kábeltálcákat, a kábelek kihasználatlan ereit stb. A rövidrezárt hurok modellünkben fellépő eredő mágneses fluxus értékét a következő összefüggéssel lehet számítani

$$\Phi_{loop}(i_2) = \frac{MR_2}{R_2 + sL_2} i_1 \rightarrow s = j\omega \rightarrow s^2 = -1. \quad (8.4)$$

Megfigyelhető, hogy az eredő mágneses fluxus kis  $R_2$  értékek esetén lesz a legkisebb. A rövidrezárt hurok modellünk árnyékolási tulajdonságainak alakulását különböző  $R_2$  értékek esetén a 8.4 ábrán követhetjük nyomon.

Az árnyékolás hatékonysága rohamosan nő a rövidrezárt hurok ellenállásának csökkentésével. A 8.4 ábrán az  $R_2 = \infty, 500, 50, 5 \Omega$ -hoz tartozó görbék szerepelnek.

Ezekből az eredményekből az épületekben alkalmazandó fontos létesítési szabályok következnek. Az árnyékoló szerkezetek, mint pl. a kábeltálcák, kábelcsatornák, szekrények stb. összes összekötésének nagyfrekvenciákon kis ellenállással kell rendelkezniük. A szkinhatás miatt a frekvencia növelésével minden vezető ellenállása növekszik. Ezért a vezetők geometriáját úgy kell megválasztani, hogy nagyfrekvenciákon a látszólagos ellenállás a lehető legkisebb legyen. Az optimális vezetőgeometria a lapos szalag, amely lehet tömör vagy fonott, és amelynek a felülete nagy, viszont a vastagsága kicsi. A szabványos körkeresztmetszetű vezetők nem ideálisak. Természetesen egy rövidrezárt hurok csak abban az esetben fejthet ki hatékony árnyékoló hatást, ha benne kialakulhat az indukált áram, azaz ha a rövidrezárt hurokban nincs szakadás. Az árnyékolásokat tehát mindkét végükön le kell földelni annak érdekében, hogy ne korlátozzuk az áramot.



8.4 ábra: Rövidrezárt hurok árnyékolásának hatékonysága az  $R_2$  hurokellenállás különböző értékei esetén

Forrás: [12]

### 8.8.5 Jellemző zavarforrások

A környezetünkben szaporodó villamos berendezések kibocsátott elektromágneses terükkel szennyezik a környezetet, amely szennyezésre egyúttal érzékenyek is. Angolul az ilyen jellegű környezetszennyezést spectrum pollution-nak nevezik. Használatos az elektroszmog kifejezés is. A környezetet befolyásoló elektromágneses energiát bocsátanak ki, vagyis zavarforrások lehetnek a következő berendezések (zárójelben a zavar jellemző frekvenciája szerepel):

- fénycsövek (0,1–3 MHz),
- kommutátorok (0,1–4 MHz),
- porszívó (0,1–0 MHz),
- motorok (0,1–10 MHz),
- teljesítményelektronika,
- kapcsoló üzemű tápegységek (0,1–10 MHz),
- kapcsolók érintkezői a kapcsolási ívek révén (30–300 MHz),
- megszakítók, mágneskapcsolók, relék (0,1–50 MHz),
- távközlési adóberendezések,
- nagyfrekvenciás sebészeti (0,4–5 MHz),
- számítógép-processzorok (~100 MHz),
- légköri kisülések.

#### **Tipikus zavarnyelő berendezések**

- rádió- és televíziókészülékek,
- ipari gyártó berendezések,
- automatizálási rendszerek,
- mérő, vezérlő és szabályozó készülékek,
- mobil rádiótávközlő berendezések,
- hordozható és közcélú rádió adó-vevő berendezések.

## 9 ELEKTROMÁGNESES TEREK SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREI

### 9.1 Energiaforrások

Az energiaforrások a természetben előforduló, vagy mesterségesen előállított energiát tartalmazó anyagok, az energiaforrásokat és az energiahordozókat az egyszerűség kedvéért azonos fogalomként is értelmezhetjük. A lényeg hogy valamilyen berendezésben hővé vagy mechanikai munkává alakítjuk az energiát. Megkülönböztetünk természetben előforduló energiaforrásokat, melyek lehetnek megújuló, vagy fogyó illetve mesterséges energiaforrásokat, melyeket a természetes energiaforrásokból állítunk elő. Az energiaforrásokat több szempont szerint, csoportosítják (9.1 táblázat).

9.1 táblázat: Energiaforrások csoportosítása

Megnevezés	Természetes		Mesterséges
	megújuló	fogyó	
	Energiaforrások		
	Alapenergia		Másodlagos
Növényi, állati	tűzifa, trágya stb.	faforgács	faszén
ásványi	X	szén	koksz
folyékony	X	ásványolaj	benzin
gáznemű	X	földgáz, mocsárgáz	széngázosítás, szénlepárlás
Hasadóanyagok	X	Uránium (U235, U238)	Plutónium (Pu239) – Uránium (U233)
Hőenergia	Napsugárzás	Vízgőzforrások (gejzírek)	Gőz – Meleg víz – Villamos energia
Mechanikai	Vízenergia (folyóvíz, árapály), szélenergia	X	Villamos energia-gőz, gáz, víz

Az energiagazdálkodás számára a természetes tüzelőanyag készletek és lelőhelyük ismerete fontos. Nagymértékben befolyásolják az energia-előállítás költségeit, ezért támpontot adnak az árak várható alakulásának becsléséhez.

### 9.1.1 Az alapenergia választás szempontjai

Az alapenergia felhasználás szempontjai között az ár (energia előállítás költsége) mellett az előállítás környezetre gyakorolt hatásának vizsgálata egyre nagyobb szerepet kap. A 9.2 táblázat a környezeti előnyöket és hátrányokat tünteti fel.

9.2 táblázat: Alapenergiák hatásai

<b>Energia világtrend/törekvések</b>	<b>Alkalmazásának előnye</b>	<b>Alkalmazásának hátránya</b>
<b>ATOMENERGIA</b> Alkalmazása nőni fog, de nem lesz domináns (max. 15%)	nem terheli a légkört, élővizek szennyezése ellenőrzött, rövid távon problémamentes	katasztrófaforrás lehet  nem megfelelően kidolgozott a hulladék elhelyezése hosszú távon morális problémákat vet fel
<b>FÖLDGÁZ</b> Megmarad a 20% körüli részaránya	55–60%-os hatásfokot tesz lehetővé	CO <sub>2</sub> és NO <sub>x</sub> kibocsátása nem elhanyagolható, csak kis mértékben tárolható
<b>OLAJ</b> Részaránya drasztikusan csökkenni fog (kb. 20%-ra)	jól tárolható desztillálva 55–60%-os hatásfokot tesz lehetővé, jelentős készletek állnak még rendelkezésre	szennyezőanyag kibocsátása nem elhanyagolható, desztillálás nélkül jelentős por- és fénoxid-kibocsátás
<b>SZÉN</b> Megmarad a 20–25% körüli részaránya	jól tárolható hatalmas készletek állnak még rendelkezésre, 50–55% hatásfokú rendszerek kifejlesztésére alkalmas	szennyezőanyag kibocsátása jelentős füstgáztisztítást igényel, jelentős környezetvédelmi költség

Forrás: [9]

Az atomenergia szélesebb körű felhasználásához növelni kell a társadalmi elfogadottságát, valamint az elhasznált fűtőanyag végleges és biztonságos elhelyezésének módját kell kidolgozni. A világ urán- és tóriumkészletei nagyok és széles körben eloszlának. A kis költségek mellett hozzáférhető feltételezhető uránkészlet  $4 \cdot 10^6$  t (ebből biztosan  $2,2 \cdot 10^6$  t), a tóriumkészlet  $2,2 \cdot 10^6$  t körül lehet. Ugyanakkor fűtőelemgyártás feltételeit csak kevés országban teremtették meg. Az urán fűtőanyaggal működő, vízhűtéses termikus reaktorokban lényegében a természetes uránban 0,7%-ban előforduló U-235 izotópot használják ki. Az így hasznosítható energia kb. 24 GWh/kg U235, ami az uránkészlet mellett  $6,5 \cdot 10^{14}$  kWh ( $5,5 \cdot 10^9$  toe) energiának felel meg [10].

A kőszénből a jelenleg ismert készletek sokszorosán felülmúlják az ismert szénhidrogén készleteket ebből következően sokáig meghatározó energiaforrás lesz. A jövő szempontjából rendkívül fontos új nagyhatékonyságú felhasználási módszerek kidolgozása, ezen kutatások jelenleg is folynak, de rendkívül pénzigényes így a jelenleg olcsón kinyerhető szénhidrogén vagyon háttérbe szorítja. A kutatásokat a jövőben fel kell gyorsítani mert az energia átalakítás hatékonyságának növelése önmagában csökkenti környezetre gyakorolt káros hatásokat.

### **9.1.2 Megújuló energia**

A megújuló energia jelenleg kis hányadát biztosítja energia szükségletünknek, de a jövőben elérheti a mai földgáz felhasználás által biztosított energia nagyságot. Az új technológiák alkalmazásával beléphetünk egy új energiakorszakba, mely gazdasági növekedést, új munkahelyeket, újításokat biztosít számunkra, és nem szennyezi a környezetet.

#### **Szélerergia**

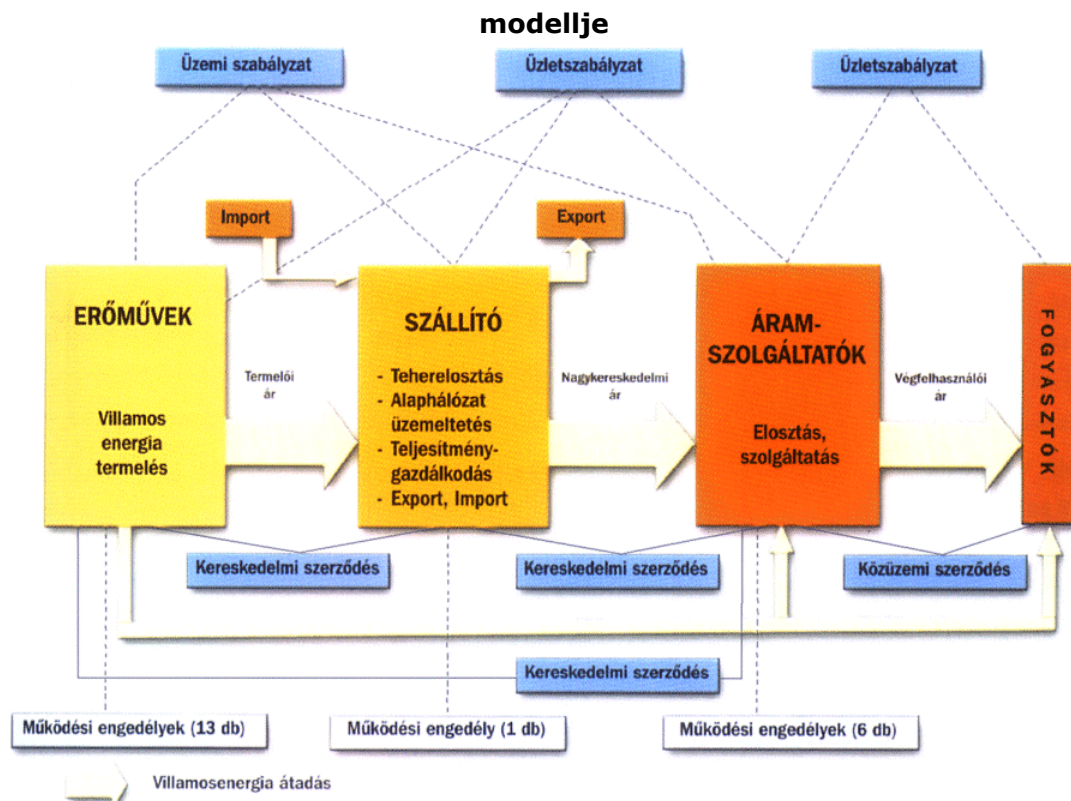
A világ leggyorsabban növekvő energiaforrásaként a szélerergia alkalmazása egy meglepően egyszerű technológiát takar. A magas, oszlopokon található forgó lapátok mögött számítógép vezérelte bonyolult elektronikai rendszerek, nagy biztonsággal alakítják át a forgómozgást villamos energiává. Bárhol telepíthető, így közvetlen felhasználásra van lehetőség, ezáltal elkerülhetjük az energia szállítása és elosztása során bekövetkező veszteségeket. A világ széltartalékai hatalmasak. A jelenlegi technológia alkalmazása mellett közel 53 000 terrawattóra energiát lesznek képesek a szél erőművek termelni, ez a világ 2020-ra előre jelzett energiaigényének a kétszerese.

#### **Napenergia**

A napenergiát már évezredek óta használjuk mint energiaforrást, a világ jelenlegi energiaszükségletének akár többszörösét is biztosítani tudná, ha megfelelően kiaknáznák. A nap energiáját közvetlenül elektromossággá alakíthatjuk, illetve fűtésre, sőt, hűtésre is használhatjuk.

## **9.2 Villamos energia**

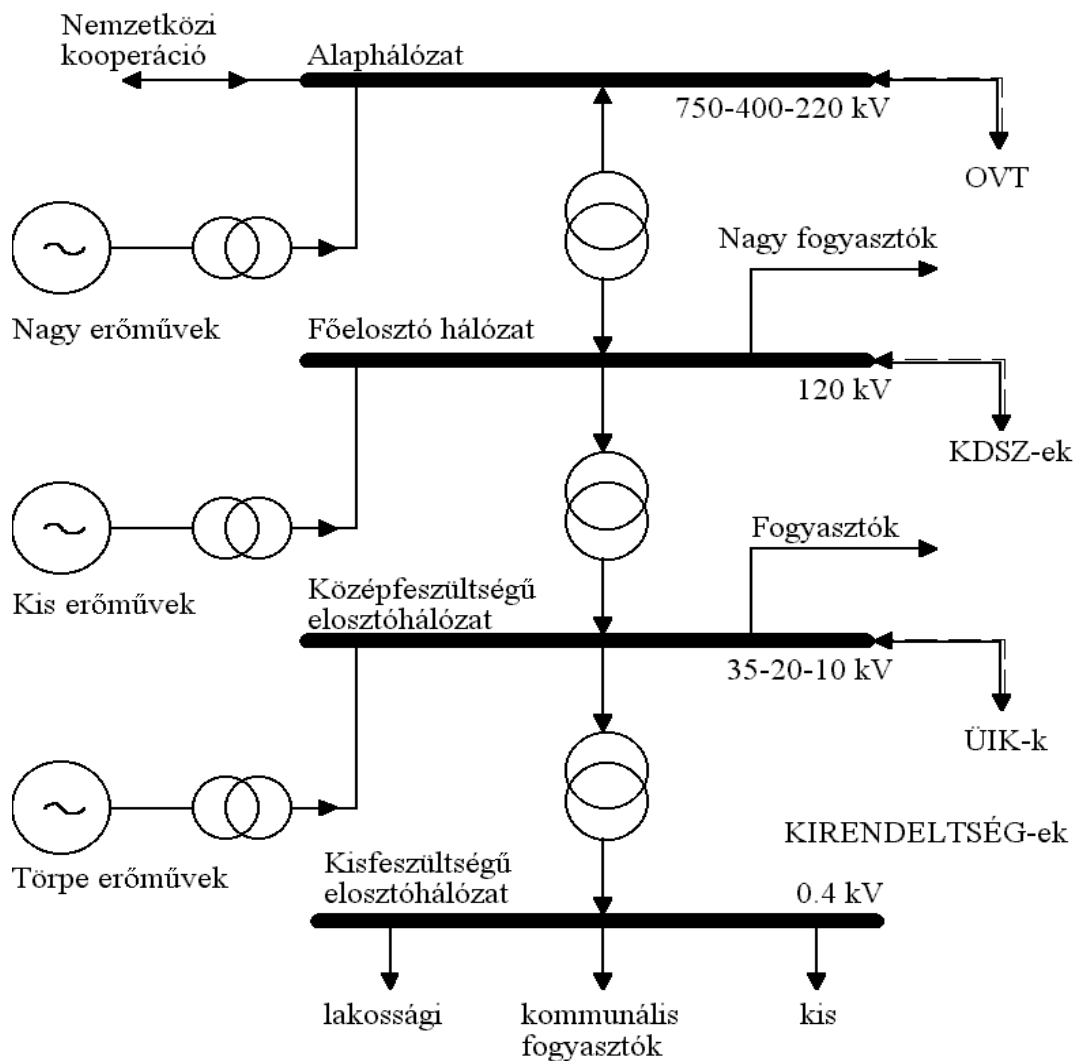
A villamos energia iparban három egymástól jól elkülöníthető iparág alakult ki, termelés, elosztás, szolgáltatás. A globalizáció természetesen a tőkekoncentrációnak köszönhetően mind három tevékenységet területi egységekre viszonyítva egy tulajdonosi kör kezében összpontosította. A magyar villamosenergia-törvény az 1994. évi XLVIII. törvény, és annak módosítása e funkciók szervezeti és elszámolási elkülönítését írja elő. Az egyes funkciókkal azonosított iparági szereplők feladatmegosztását mutatja a (9.1 ábra).



9.1 ábra: A villamosenergia-rendszer  
Forrás: [11]

### 9.2.1 Szállítás

A szállítási feladatokat a VER kooperációs alaphálózata végzi, az MVM Rt. tulajdonában lévő Országos Villamostávvezeték Rt. (OVIT) irányításával. A rendszerirányítást a függetlenített MAVIR Rt. látja el. A modern villamosenergia-rendszerek hierarchikus felépítésűek. A villamos energiának a termelőktől a fogyasztók felé továbbítását, a villamosenergia-rendszerek közötti kapcsolatot – köztük a nemzetközi energiacsere is – az átviteli hálózatok biztosítják. A villamosenergia-átviteli hálózatok együttműködő rendszere – mindenütt a világon, így hazánkban is – több különböző célú és feszültségű, hierarchikusan összekapcsolódó rendszerből áll. A feszültségszinteket transzformátorok/transzformátorállomások kötik össze (9.2 ábra).



9.2 ábra: A hazai VER és irányításának hierarchiája

Forrás: [9]

**Alaphálózat:** 750, 400, 220 kV-os feszültségű távvezetékekből és alállomásokból áll, amelynek feladata a hazai nagy erőművek kooperációjának biztosítása, kapcsolattartás a szomszédos országok villamosenergia-rendszerével és az országon belüli nagyteljesítményű villamosenergia-szállítás.

**Főelosztó hálózat:** Feszültség szintje: 120 kV. Feladata az áramszolgáltató társaságok belső együttműködésének, a szomszédos társaságokkal való kapcsolattartásának biztosítása, nagyobb fogyasztói körzetekben a villamos energia szállítása, ipari nagyfogyasztók ellátása. Nagyrészt hurkolt kialakítású, kisszámú sugaras elemből épül fel. A nagy- és középfeszültségű kábelvezetékek

**Középfeszültségű elosztóhálózat:** Feladata a villamos energia továbbítása a főelosztó hálózati alállomások mintegy 10–40 km-es körzetében 35, 20, 10 kV-os feszültség szinten a 0,4 kV-os fogyasztókat ellátó közép/kisfeszültségű transzformátorállomásokig, továbbá a nagyobb teljesítményigényű ipari és mezőgazdasági fogyasztókig. Sugarasan üzemel, egy-egy elem kiesése esetén a fogyasztók ellátása általában csak átkapcsolásokkal, üzemszünetekkel biztosítható.

**Kisfeszültségű elosztóhálózat:** Feladata a lakossági és kommunális kisfogyasztók ellátása 0,4 kV feszültség szinten. Döntő része sugaras kialakítású [9].

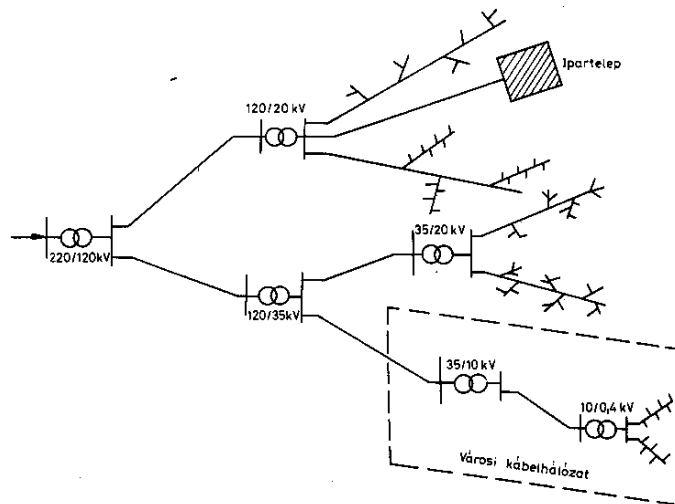


### Hálózatalakzatok:

- **Sugaras hálózat:** a sugaras hálózat az egyik végéről táplált, szétágazó, nyitott vezetékrendszer. Az erőműtől vagy állomásból kiinduló fővezetékéről ágaznak le a törzsvezetékek. Ezek elágazásai a szárnyvezetékek.

**Előnye:** könnyen áttekinthető, a hibahely könnyen felismerhető és a hiba könnyen javítható.

**Hátránya:** meghibásodáskor a hibás szakasz mögötti fogyasztók villamosenergia-ellátás nélkül maradnak.

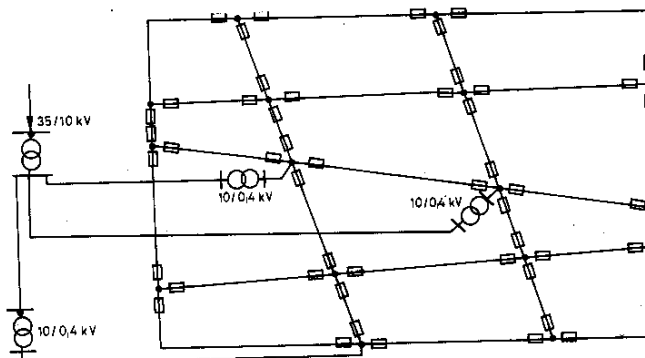


9.3 ábra: Sugaras hálózat

Forrás: [9]

- **Hurkolt hálózat:** a hurkolt hálózat a vezetékek egymással többszörösen összekapcsolt zárt rendszere. Az energiaellátása egy vagy több pontban történik, egy-egy vezetékszakaszon kétirányú energiaáramlás is előfordulhat. Ez a hálózat valósítja meg a legegyszerűsebb energiaellátást, a legnagyobb üzembiztonság mellett.

**Hátránya:** nehezen áttekinthető, üzemzavar esetén a hibahely nehezen állapítható meg, építési költsége viszonylag nagy.



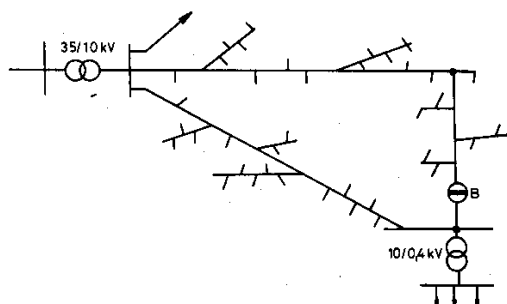
9.4 ábra: Hurkolt hálózat

Forrás: [9]

- **Gyűrűs hálózat:** a gyűrűs hálózat olyan hurkolt hálózat, amelynek egy táppontja van, s ebből indulnak ki és ide térnek vissza a vezetékek.

**Előnye:** a fogyasztók energiaellátása 2 oldalról biztosítható.

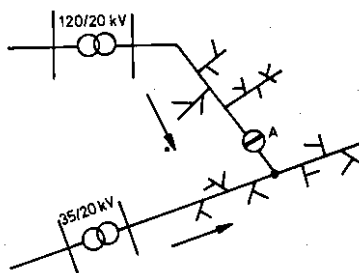
**Hátránya:** a transzformátor meghibásodásakor a fogyasztók energiaellátás nélkül maradnak, üzemzavar esetén a meghibásodott rész kiiktatása után sugarasan üzemel.



9.5 ábra: Gyűrűs hálózat

Forrás: [9]

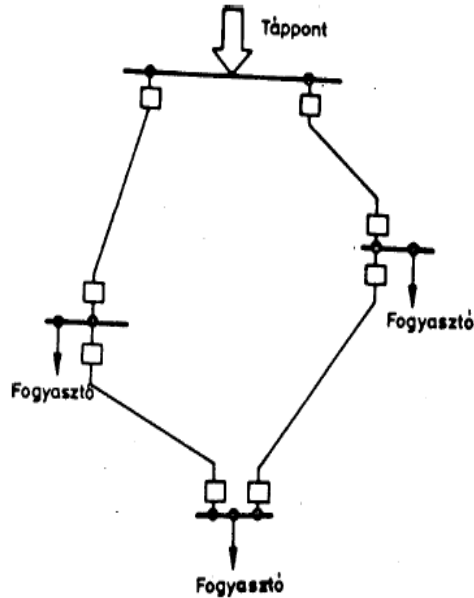
- **Íves hálózat:** két független táppontú, fővezetékéből és szárnyvezetékéből álló hálózat, amelynek hosszmenti üzemszerű bontási helye van. Az egyik táppont kiesése esetén a másiktól sugarasan üzemeltethető. Hiba esetén a hibátlan részek egymástól független táppontú sugaras hálózatként üzemelnek.



9.6 ábra: Íves hálózat

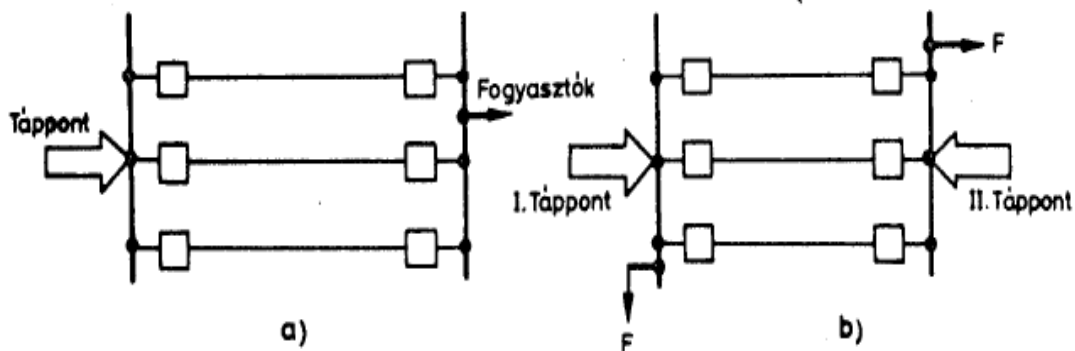
Forrás: [9]

- **Körvezeték:** Üzemszerűen zárt, azonos táppontból táplált olyan vezetékalkazat, amely a táppontból kiindulva az összes fogyasztót érintve ismételen visszatér a táppontba. Az egyes fogyasztói gyűjtősíneket összekötő vezeték szakaszokról további leágazások nincsenek. Előnye, hogy bármely fogyasztó üzemszerűen két oldalról kap táplálást, ami az ellátás minőségét és üzembiztonságát növeli, mert bármely fogyasztói csomópont meghibásodásánál.



9.7 ábra Körvezeték  
Forrás: [9]

- Párhuzamos vezeték (trónk):** A villamosenergia-szolgáltatás szempontjából fontos csomópontok összekötésére, vagy a nagyüzemi fogyasztók üzembiztos ellátására kialakult vezetékalkazat, amikor két csomópont között több vezeték-összeköttetés teremt kapcsolatot. Főleg nagy teljesítmények, üzembiztos villamos energia-ellátás esetén kialakult rendszer. Alkalmazása minden feszültség szinten szóba jöhet, mind a villamosenergia-rendszerben, mind az ipari fogyasztók külső, belső energiaellátásában. Előnye a nagyfokú üzembiztonság, hátránya a magas létesítési költség és bonyolult védelem.



9.8 ábra: a) egyoldalú; b) kétoldalú táplálás  
Forrás: [9]

### 9.2.2 A villamosenergia-rendszer üzeme

A váltakozó áramú villamosenergia-rendszer által megtermelt villamosenergia nem tárolható. A termelésnek így a pillanatnyi fogyasztáshoz kell alkalmazkodnia. A fogyasztói teljesítményigény állandóan változik. A rendszer egészére vonatkozóan a véletlenszerű ingadozások a nagyszámú fogyasztó következtében kiegyenlítődnek, így a várható fogyasztási igény előre jól becsülhető. A pillanatnyi fogyasztói igény a rendszerből

vételezett egyedi  $P_{fj}$  hatásos, illetve  $Q_{fj}$  meddő teljesítmények összegzésével adható meg:

$$P_F = \sum P_{fj} \quad Q_F = \sum Q_{fj} \cdot \quad (9.1)$$

A villamosenergia-ellátás minőségi jellemzői: a frekvencia értéke, a feszültség abszolút értéke és szinuszosága. Stacioner állapotban az energiarendszer minden pontján azonos a frekvencia, amelyre igen szigorú előírások vonatkoznak. Általában a névleges érték körül  $\pm 0,1\%$ -os tűrésmezőt írnak elő. A feszültség a frekvenciával ellentétben lokális jellemző, effektív értéke az azonos feszültségű hálózatban is pontról pontra változik az átvitelrel járó feszültségesés következményeként. A tűrésmező pl.: a 0,4 kV-os kisfeszültségű fogyasztói csatlakozási pontokon a legszűkebb,  $\pm 7,5\%$  értékkel. A feszültség effektív értékének tűrésmezőben tartása mellett lényeges, hogy ne legyenek ingadozások, és a hullámalak közelítse az ideális szinuszgörbét (pl. ne legyen felharmónikusokkal szennyezett).

**Csúcsterhelés:** ( $P_{cs}$ ) Meghatározott idő alatt (pl.: nap, év) igénybe vett legnagyobb villamos teljesítmény. Az év folyamán előforduló csúcsterhelések közül a legnagyobbat maximális csúcsterhelésnek nevezzük.

**Csúcskihasználási óraszám:** Megmutatja, hogy az adott időszakban (nap, hónap, év) a rendszer erőműveinek hány órát kellett volna üzemelnie az adott időszak alatt a rendszerben előforduló maximális csúcsterheléssel ahhoz, hogy ugyanannyi villamos energiát termeljenek, mint amennyit normál üzemben a vizsgált időszakban termeltek.

$$t_{cs} = \frac{W_t}{P_{cs \max}} \quad [h]. \quad (9.2)$$

**Rendszerperc:** Megmutatja, hogy a kiesett energiát a rendszer csúcsterheléssel hány perc alatt tudja pótolni.

$$t_{VER} = \frac{0.06 W_{KI}}{P_{cs \max}} \quad [\text{min}]. \quad (9.3)$$

**Villamosenergia-termelés hatásfoka:** Analóg adat, 3600 kJ/kWh fajlagos hőfogyasztás felel meg a 100%-os hatásfoknak

$$\eta = \frac{3600}{q} 100 \quad [\%]. \quad (9.4)$$

Egyidejűségi tényező:

$$e = c + \frac{1-c}{\sqrt{h}} \quad c=0,2, \quad (9.5)$$

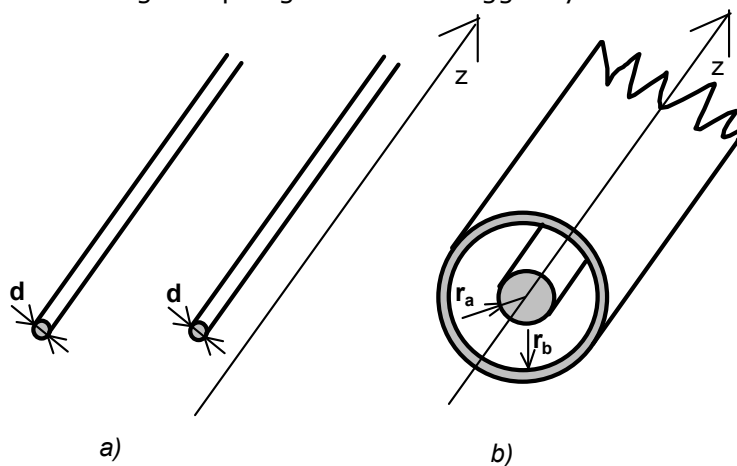
$h$  fogyasztók száma.

## 10 TÁVVEZETÉKEK

### 10.1 Távvezeték típusai és jellemzői

A távvezeték két egymással párhuzamos vezetőből áll. Így pl. távvezeték lehet két azonos átmérőjű hengeres vezetőből álló Lecher vezetópár 10.1/a ábra, vagy koaxiális kábel 10.1/b ábra. A vezetők árama, a vezetők közötti feszültség a  $z$  koordináta és  $t$  idő függvénye. Az egyik vezető árama a  $z$  helyen  $i(z,t)$ , a másiké  $-i(z,t)$ . A két vezető közötti feszültség  $u(z,t)$ .

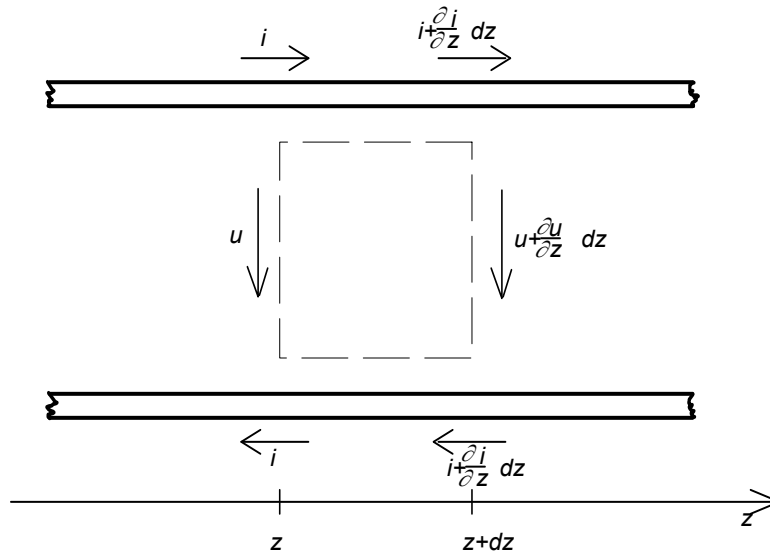
Az áram és a feszültség időfüggését a távvezetékre kapcsolt gerjesztés időbeli változása szabja meg. A vezetők árama azért függ a helytől, mert a vezetők közötti kapacitáson és átvezetésen is folyik, a helytől és időtől függő feszültség által meghatározott áram. A vezetőkön fellépő feszültségesés pedig az áramok függvénye.



10.1 ábra: Lecher és koaxiális távvezeték

Forrás: [8]

A távvezeték áramaira és feszültségeire vonatkozó összefüggéseket az 10.2 ábra jelöléseivel írhatjuk fel egyszerűen.



10.2 ábra: A távvezeték szakasz modellje  
 Forrás: [8]

A vezetők hosszegységre eső ellenállása  $R$ ,  $\Omega/\text{m}$ -ben, a vezetők hosszegységre eső induktivitása  $L$ ,  $\text{H}/\text{m}$ -ben, a vezetők közötti hosszegységre eső kapacitás  $C$ ,  $\text{F}/\text{m}$ -ben, a vezetők közötti hosszegységre eső átvezetés  $G$ ,  $\text{S}/\text{m}$ -ben. A  $dz$  hosszúságú szakasz ellenállása  $Rdz$ , az induktivitása  $Ldz$ , a vezetők közötti kapacitás  $Cdz$ , az átvezetés pedig  $Gdz$ . A Kirchhoff-egyenletek alapján kapjuk az úgynevezett *távíró egyenleteket*

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial z} &= Ri + L \frac{\partial i}{\partial t} \\ -\frac{\partial i}{\partial z} &= Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \end{aligned} \quad (10.1)$$

Szinuszos  $\omega$  körfrekvenciájú gerjesztés esetén a *távíró egyenletek* a következő komplex formában írhatók

$$\begin{aligned} -\frac{\partial U}{\partial z} &= (R + j\omega L)I \\ -\frac{\partial I}{\partial z} &= (G + j\omega C)U \end{aligned} \quad (10.2)$$

ahol  $I$  és  $U$  az áram és a feszültség komplex csúcsértékei.

(10.2) első egyenletét  $z$  szerint differenciálva, a második egyenletet felhasználva kapjuk a

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} - \gamma^2 U = 0 \quad (10.3)$$

egyenletet, ahol  $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta$  a *komplex terjedési tényező*,  $\alpha$  a *csillapítási tényező*,  $\beta$  a *fázistényező*.

(10.3) egyenlet megoldása szinuszos gerjesztés esetén

$$u(z,t) = U^+ e^{-\gamma z} e^{j\omega t} + U^- e^{\gamma z} e^{j\omega t}$$

$$i(z,t) = \frac{U^+}{Z_0} e^{-\gamma z} e^{j\omega t} - \frac{U^-}{Z_0} e^{\gamma z} e^{j\omega t} \quad (10.4)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (10.5)$$

a *távvezeték hullámimpedanciája*. (10.4) egyenletben  $U^+$  és  $U^-$  a  $z$  tengely pozitív, illetve negatív irányában terjedő hullámok amplitúdóit jelölik.

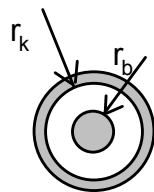
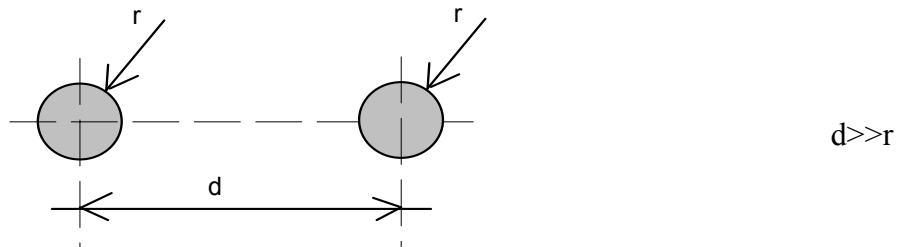
Amennyiben  $\gamma = j\beta$ , vagyis a terjedési tényező tiszta képzetes ( $R=0$  és  $G=0$ ) csillapítatlanul terjedő hullámokat kapunk és *ideális távvezeték*ről beszélünk. Így a terjedési tényező, a hullámimpedancia, a hullám fázissebessége és a hullámhossz az alábbi formában írható

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10.6)$$

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \quad \lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{v}{f}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} 120 \ln \frac{d}{r}$$

A gyakorlatban a távvezeték az (10.6)-ban szereplő paraméterek meghatározása szempontjából ideálisnak tekinthető. Néhány tipikus távvezeték hullámimpedanciája az alábbi képletekkel határozható meg:

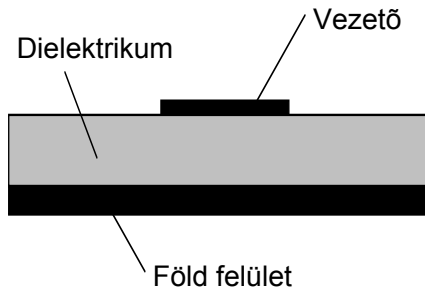


$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} 60 \ln \frac{r_k}{r_b}$$

10.3 ábra: A koaxiális távvezeték keresztmetszete és hullámimpedanciája

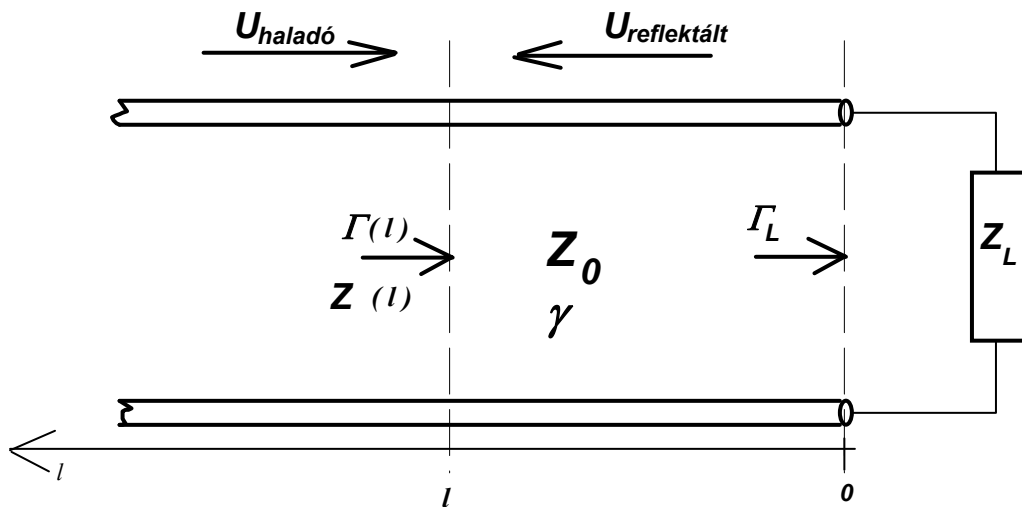
Forrás: [8]

Különböző, részben tapasztalati képletek léteznek. A gyakorlatban célszerű számítógépes szintézis és analízis programok használata.



10.4 ábra: Mikroszalagvonal keresztmetszete  
Forrás: [8]

A gyakorlatban általában az 10.5 ábra szerinti  $Z_0$  hullámimpedanciájú,  $Z_L$  terhelő impedanciával lezárt távvezetékét vizsgáljuk.



10.5 ábra: A távvezetékek gyakorlati jellemzése  
Forrás: [8]

A szinuszos időfüggést elhanyagolva a távvezeték feszültsége és árama tetszőleges  $l$  távolságra a lezárástól

$$\begin{aligned} U(l) &= U_{0\text{haladó}} e^{\gamma l} + U_{0\text{reflektált}} e^{-\gamma l} = U_{\text{haladó}} + U_{\text{reflektált}} \\ I(l)Z_0 &= U_{0\text{haladó}} e^{\gamma l} - U_{0\text{reflektált}} e^{-\gamma l} = U_{\text{haladó}} - U_{\text{reflektált}} \end{aligned} \quad (10.7)$$

A feszültség reflexiósfaktor tetszőleges  $l$  távolságra a lezárástól

$$\begin{aligned} \Gamma(l) &= \frac{U_{\text{reflektált}}(l)}{U_{\text{haladó}}(l)} = \frac{U_{0\text{reflektált}} e^{-\gamma l}}{U_{0\text{haladó}} e^{\gamma l}} = \Gamma_L e^{-2\gamma l} \\ \Gamma_L &= \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \end{aligned} \quad (10.8)$$

A bemenő impedancia tetszőleges  $l$  távolságra a lezárástól

$$Z(l) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \operatorname{th}(\gamma l)}{Z_0 + Z_L \operatorname{th}(\gamma l)} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 j \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_0 + Z_L j \operatorname{tg}(\beta l)} \quad (10.9)$$

feltétel:  $\alpha = 0$



Érdeemes megfigyelni, hogy ha  $l = \lambda/4 \Rightarrow \beta l = \pi/2 \Rightarrow \begin{cases} Z_L = 0 \Rightarrow Z(\lambda/4) = \infty \\ Z_L = \infty \Rightarrow Z(\lambda/4) = 0 \end{cases}$ , valamint

tetszőleges  $l$  esetén  $\left. \begin{array}{l} Z_1(l) = Z(l) \text{ feltéve } Z_L = 0 \\ Z_2(l) = Z(l) \text{ feltéve } Z_L = \infty \end{array} \right\} \Rightarrow Z_0 = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2}$ .

A távvezeték mentén a haladó és a reflektált hullámok állóhullámokat alakítanak ki, így egy adott elrendezésben állandó helyű feszültség maximumok ( $U_{\max}$ ) és minimumok ( $U_{\min}$ ) figyelhetők meg. Ezek alapján definiáljuk a *feszültség állóhullámarányt* ( $VSWR$ ):

$$VSWR = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

$$|\Gamma| = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (10.10)$$

1.  $\Gamma(l)$  abszolút értéke és így az állóhullámarány is ideális, veszteségmentes tápvonal hosszában állandó.

2. Az állóhullámarány egyszerű eszközökkel mérhető még igen magas frekvenciákon is ezért nagyon elterjedten használják mikrohullámú eszközök be- és kimeneti reflexiók tulajdonságainak jellemzésére.

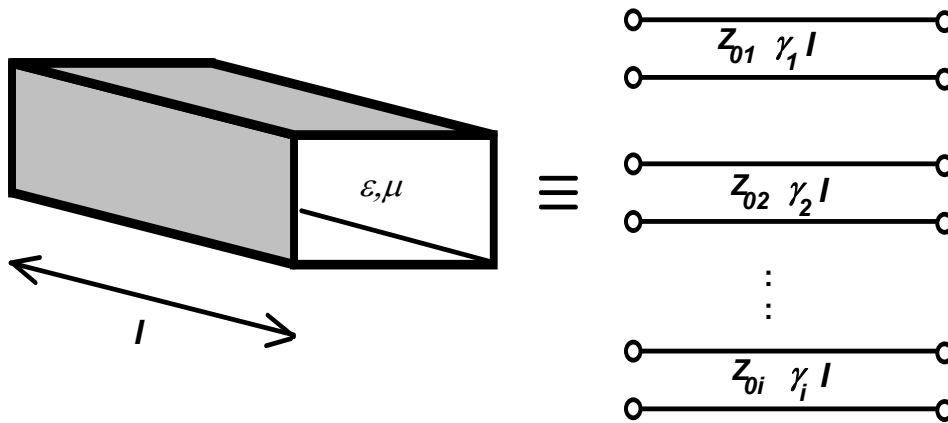
3. Használatos jellemző még a reflexiók csillapítás:  $a_{refl}^{dB} = 10 \lg \frac{1}{|\Gamma|^2}$

4. Az eddig leírtakból látható, hogy a távvezetékek elméletileg tetszőleges frekvencián, egyenáramtól bármely gyakorlati frekvenciáig használhatók, felső határt a csupán növekvő csillapítás szab.

### 10.1.1 Csőtápvonalak

A gyakorlatban alkalmazott hullámvezetők egy másik fontos csoportját alkotják a **csőtápvonalak**. A csőtápvonal zárt, ideális vezető fémfallal határolt hullámvezető, melynek keresztmetszete egyszeresen összefüggő felület. Az ideális csőtápvonal belsejét lineáris, homogén, izotróp, veszteségmentes közeg tölti ki, melynek dielektromos állandója  $\epsilon$ , mágneses permeabilitása  $\mu$ . Az elektromágneses energia a cső hossz tengelye irányában terjed. A csőtápvonalak teljes matematikai jellemzése messze meghaladja ennek az anyagnak a terjedelmét, ezért itt csupán néhány alapvető tulajdonságuk és egy kevés kvalitatív magyarázat következik.

A csőtápvonalakban az elektromágneses tér energiája transzverzális elektromos ( $TE_{mn}$ ) és transzverzális mágneses módusokban ( $TM_{mn}$ ) terjedhet. Minden egyes módus helyettesíthető egy távvezetékkel, melynek áramai és feszültségei megegyeznek a csőtápvonal módusáramaival és módusfeszültségeivel, specifikus impedanciájuk és terjedési tényezőjük az adott geometriából és a kitöltő anyag jellemzőiből meghatározható (10.6 ábra).



10.6 ábra: A csőtápvonal módusainak helyettesítő távvezetékei

Forrás: [8]

A helyettesítő távvezetékek terjedési tényezői és specifikus impedanciái a geometria és az anyagjellemzők alapján (10.13) alapján számíthatók.

$$\gamma_i = k_i \sqrt{1 - \left( \frac{\omega \sqrt{\epsilon \mu}}{k_i} \right)^2} \quad \begin{array}{l} TM Z_{0i} = \frac{\gamma_i}{j\omega\epsilon} \\ TE Z_{0i} = \frac{j\omega\mu}{\gamma_i} \end{array} \quad (10.11)$$

A  $k_i$  sajátértékek a csőtápvonal geometriai adatai és a kitöltő anyag jellemzői alapján határozhatók meg. A terjedési tényező lehet tiszta képzetes – ebben az esetben csillapítatlanul terjedő hullámot kapunk –, vagy tisztán valós – ebben az esetben a hullám csillapodik, a csőtápvonal „levágási tartományban működik (cut off)”. A két tartomány határát jelentő szabadtéri hullámhosszat határhullámhossznak nevezzük.

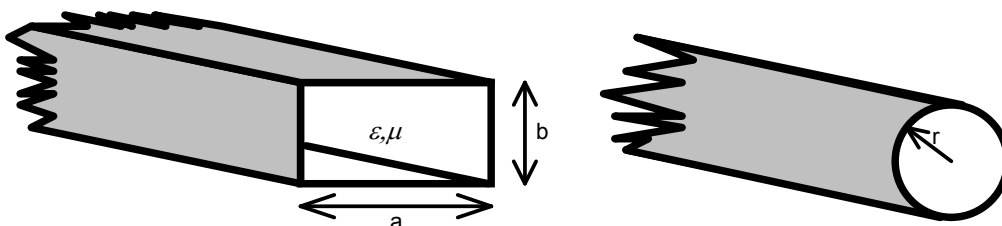
$$\lambda_{ci} = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon_r \mu_r}}{k_i} \quad (10.12)$$

A csőtápvonalon terjedő egyes módusokban mért hullámhossz az úgynevezett csőhullámhossz

$$\lambda_{gi} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_0}{\lambda_{ci}} \right)^2}} \quad (10.13)$$

Ha a csőtápvonalon terjedő hullám szabadtéri hullámhossza  $\lambda_{ci}$ -nél nagyobb a csőtápvonal a levágási, míg ellenkező esetben a terjedési tartományban működik.

A gyakorlatban legtöbbször négyszögletes és kör keresztmetszetű csőtápvonalakat alkalmaznak.



10.7 ábra: Négyszögletes és kör keresztmetszetű tápvonal

Forrás: [8]

Négyszög keresztmetszetű csőtápvonal esetén a  $k_i$  sajátértékek  $TE$  és  $TM$  módusok esetén

$$k_{m,n} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad m,n = 0,1,2,3,\dots \quad (10.14)$$

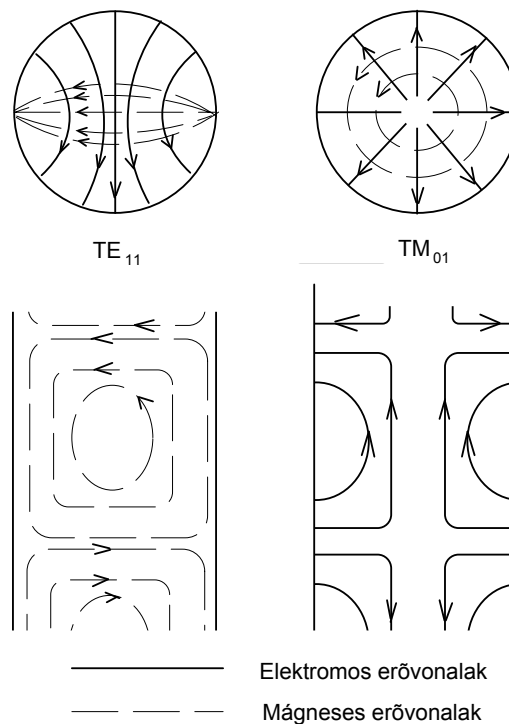
míg kör keresztmetszetű csőtápvonalnál

$$k_{m,n} = \frac{a_{mn}}{r} \quad (10.15)$$

ahol  $a_{mn}$  az  $m$ -ed rendű Bessel-függvény  $n$ -edik gyöke.

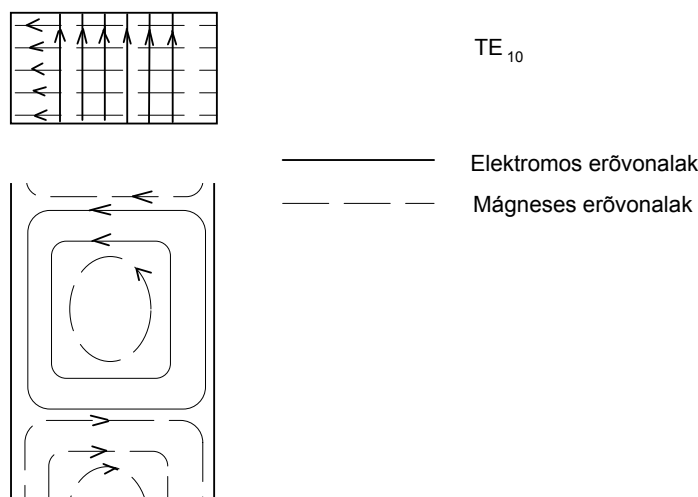
A csőtápvonalakat általában a legnagyobb határhullámhosszú, legkisebb határfrekvenciájú módusokban használják. Így a négyszög keresztmetszetű csőtápvonalakat  $TE_{10}$  módusban ( $\lambda_{cTE_{10}} = 2 \cdot a \cdot \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ), a kör keresztmetszetű csőtápvonalakat pedig  $TM_{01}$  ( $\lambda_{cTM_{01}} = 2,61 \cdot r \cdot \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ) vagy,  $TE_{11}$  ( $\lambda_{cTE_{11}} = 3,41 \cdot r \cdot \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ ) módusban használják.

A kör keresztmetszetű csőtápvonal  $TM_{01}$  és  $TE_{11}$  módusának erővonalképe az 10.8 ábrán, a négyszög keresztmetszetű csőtápvonal  $TE_{10}$  módusának erővonalképe az 10.9 ábrán látható.



10.8 ábra: Kör keresztmetszetű csőtápvonal két gyakori módusának erővonalképe

Forrás: [8]



10.9 ábra: Négyzet keresztmetszetű csőtápvonal  $TE_{10}$  módusának erővonalképe  
 Forrás: [8]

A fentiek alapján látható, hogy a csőtápvonalak adott geometria mellett csak bizonyos frekvencia fölött használhatók hullámvezetőként. Például egy 3 cm sugarú körkeresztmetszetű csőtápvonal, melynek belsejében vákuum van,  $TE_{11}$  módusának határhullámhossza 10,23 cm, vagyis határfrekvenciája 2,93 GHz. Ebből látható, hogy gyakorlati méretek mellett a csőtápvonalak csak a magasabb mikrohullámú frekvenciákon használhatóak eredményesen. Itt viszont igen kis veszteségük miatt nagyon elterjedtek.

A levágási tartományban működő csőtápvonalak elméletét alkalmazhatjuk például egy nagyfrekvenciás berendezés árnyékoló burkolatán nyitott rés csillapításának kiszámítására, vagyis megtudhatjuk mekkora csillapítással jut ki a burkolaton belüli elektromágneses tér a szabadba. A csillapítás  $\lambda_0$  hullámhossz esetén

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_c}{\lambda_0}\right)^2} \frac{\text{Neper}}{\text{méter}}. \quad (10.15)$$

## 10.2 A távíró egyenletek megoldása szinuszos gerjesztés esetén

Miután a távíróegyenletek időtartományban általában nem oldhatók meg, az általános megoldás helyett a szinuszos gerjesztés esetén kialakuló megoldást keressük, éspedig komplex számítási módszerrel. Ennek indoklása a koncentrált paraméterű hálózatok vizsgálatából ismert:

1. A szinuszos gerjesztés komplex számításmódja az időbeli deriválás műveletét egyszerű algebrai műveletbe (szorzás) transzformálja. Így koncentrált paraméterű esetben a megoldandó egyenletek a komplex amplitúdóra vonatkozó algebrai egyenletek lesznek. Esetünkben két független változós, parciális differenciálegyenletről van szó. De az idő szerinti deriváltat itt is szorzás helyettesíti. A másik változó szerint deriválva tehát közönséges differenciálegyenleteket elégít ki a komplex amplitúdó. A megoldás ebben a környezetben elérhető közelségbe kerül.

2. A gerjesztő jeleknek (áramok, feszültségek) igen általános feltételek mellett létezik Fourier-transzformáltja. Ennek általános feltétele a jel véges energiatartalma, annak minden valódi jel eleget kell, hogy tegyen. A komplex számítástechnikával kapott megoldás lehetővé teszi a gerjesztésre adott válasz Fourier-transzformáltjának meghatározását, és – ha szükséges – inverz Fourier-transzformációval a valós időfüggvények meghatározását. Ennek jelentősége a gyors Fourier-transzformációs algoritmusok széles körű elterjedésével hatalmasra nőtt. Külön kell említenünk a periodikus gerjesztéseket. Ha ezeket Fourier-sorral írjuk le, valamennyi harmonikus viselkedése a távvezetéseken külön-külön vizsgálható. Miután a harmonikusok frekvenciája adott, a vezeték bármely pontján ugyanolyan periódusidejű harmonikus válasz alakul ki, és annak Fourier-sora a szinuszos gerjesztésre adott válasz ismeretében számítható.

3. A komplex számításmód lehetővé teszi a távvezetéseken kívül más, adott esetben bonyolultabb struktúrájú elosztott paraméterű hálózatok leírását és számítását. Ezek a hálózatok olykor összetett elektromágneses jelenségek egyszerűsített modelljei.

A megoldásokat mindig

$$u(t, x) = U(x)e^{j\omega t}, \quad (10.16)$$

$$i(t, x) = I(x)e^{j\omega t} \quad (10.17)$$

alakban keressük. A valós tér-idő függvények a komplex függvények valós részei. Itt  $U(x)$  és  $I(x)$  a helytől függő komplex amplitúdók. A következőkben nem jelöljük külön a komplex mennyiségeket és ezt már  $u(t, x)$ ,  $i(t, x)$  esetében is így tettük. Jegyezzük meg: hullámjelenségek komplex leírásánál mindig komplex amplitúdóval számolunk (azaz nem a komplex effektív értékkel)!

## 11 IRODALOMJEGYZÉK

- [1] [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1.htm)
- [2] Dr. NOSZTICZIUS Z., dr. VÁN P., dr. WITTMANN M.: *Elektrodinamika*.  
[www.fke.bme.hu/oktatas/Eldin/Ea1.doc](http://www.fke.bme.hu/oktatas/Eldin/Ea1.doc)
- [3] *EMC követelményeknek megfelelő villám- és túlfeszültségvédelem*.  
[http://www.elmu.hu/download/000/371/Villam\\_es\\_tulfeszultseg\\_vedelem.pdf](http://www.elmu.hu/download/000/371/Villam_es_tulfeszultseg_vedelem.pdf)
- [4] Dr. SZANDTNER K.: *Túlfeszültség keletkezése, túlfeszültség védelem*. BME, Budapest, 2001.
- [5] Dr. HORVÁTH T.: *Villámvédelem felülvizsgálók tankönyve*. Magyar Elektrotechnikai Egyesület, Budapest, 1997.
- [6] [http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt\\_1\\_5.htm](http://vili.pmmf.hu/jegyzet/elektrom/emt_1_5.htm)
- [7] [http://www.uni-miskolc.hu/~www\\_fiz/fiz2b/node8.html](http://www.uni-miskolc.hu/~www_fiz/fiz2b/node8.html)
- [8] Dr. TASZNER I.: *Telekommunikációs rendszerek*. Jegyzet. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2000.
- [9] *Energiaforrások és készletek*. Oktatási segédanyag. E.ON, Budapest, 2003. január.
- [10] WEISSERMEL K., ARPE H. J.: *Ipari szerves kémia* (fordította: dr. Zsádon Béla). Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1995.
- [11] MEH. Villamos- energia statisztikai évkönyv 2001. Magyar Villamos Művek Zrt., Budapest, 2002.
- [12] Prof. Dr. LANGGUTH W.: *Földelés és EMC. Az elektromágneses összeférhetőség alapjai (EMC)*. Hochschule für Technik und Wirtschaft, Saarbrücken. 2006. május.
- [13] KOVÁCS E., PARIPÁS B.: *Fizika II*. Miskolci Egyetem, Miskolc, 2011.
- [14] <http://www.bgeger.hu/letolt/>
- [15] <http://e-oktat.pmmf.hu/webgui/www/uploads/images/349/Ch-4.pdf>
- [16] Dr. NOVOTHNY F.: *Villamos energiaellátás*. SZIF-Universität, Győr, 2000.