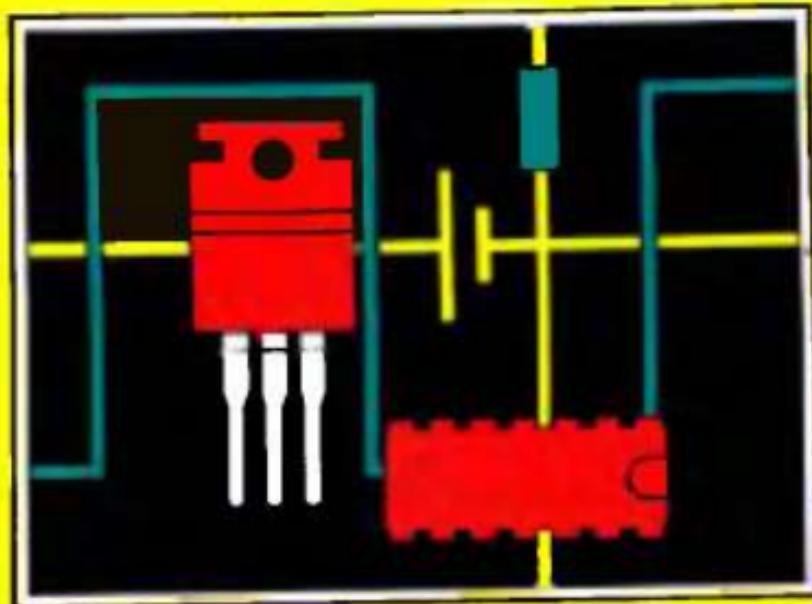


KLAUS BEUTH – OLAF BEUTH

AZ ELEKTRONIKA ALAPJAI



I. VILLAMOSSÁGTAN

MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ

KLAUS BEUTH – OLAF BEUTH

AZ ELEKTRONIKA
ALAPJAI

I.

KLAUS BEUTH – OLAF BEUTH

**AZ ELEKTRONIKA
ALAPJAI**

I. VILLAMOSSÁGTAN

**MŰSZAKI KÖNYVKIADÓ
BUDAPEST, 1990**

Az eredeti mű:

Beuth, K. — Beuth, O.: Elementare Elektronik by Vogel-Verlag, Würzburg
Copyright 1987 by Vogel-Verlag, Würzburg (BRD)

Lektorálta: Keresztély József okl. mérnök

© Hungarian translation Maklárné Fülöp Judit, 1990.

ETO: 621.31

ISBN 963 10 9622 4 (összkiadás)

ISBN 963 10 9623 2

Kiadja a Műszaki Könyvkiadó
Felelős kiadó: Szűcs Péter igazgató



90/4370 Franklin Nyomda, Budapest

Felelős vezető: Mátyás Miklós igazgató

Felelős szerkesztő: Molnár Ervin

Műszaki vezető: Bereczki Gábor

Műszaki szerkesztő: Bán Ferenc

A borítót tervezte: Székely Edit

A könyv ábráit rajzolta: Csermely Józsefné

A könyv formátuma: B/5

Ívterjedelme: 12,125 (A5)

Azonossági szám: 61601

MÜ: 4439-i-9093

Készült az MSZ 5601 és 5602 szerint

A kézirat lezárva 1989. december

Tartalom

Előszó	8
1. Elektromos alapmennyiségek	10
1.1. Elektromos töltés	10
1.2. Elektromos feszültség	11
1.3. Elektromos áram	14
1.4. Elektromos ellenállás	16
1.5. Elektromos vezetés	17
1.6. Vezető és szigetelő	18
1.6.1. Tajlagos ellenállás	18
1.6.2. Tajlagos vezetés	19
1.7. Ellenállás és hőmérséklet	19
2. Elektromos áramkörök	21
2.1. Ohm törvénye	21
2.2. Elágazás nélküli áramkörök, soros kapcsolás	22
2.3. Elágazó áramkörök, párhuzamos kapcsolás	24
2.4. Ellenállás-hálózatok	26
2.5. Előtét-ellenállások	27
2.6. Feszültségesztő	27
2.6.1. Terheletlen feszültségesztő	27
2.6.2. Terhelt feszültségesztő	28
2.7. Hídkapcsolás	29
3. Egyenáramú munka és teljesítmény	32
3.1. Elektromos munka	32
3.2. Elektromos teljesítmény	32
3.3. Hatásfok	34
4. Áramforrások	35
4.1. Az üresjárási feszültség és a belső ellenállás	35
4.2. Helyettesítő áramforrás	36
4.3. Áramforrások soros kapcsolása	37
4.4. Áramforrások párhuzamos kapcsolása	39
5. Elektromos tér	41
5.1. Alapfogalmak	41
5.2. Kapacitás, töltés és energia	43
5.3. Egyenfeszültségre kapcsolt kondenzátorok	45

6. Mágneses tér	49
6.1. Alapfogalmak	49
6.2. Állandómágnesesség	50
6.3. Mágneses körök	51
6.4. A mágneses tér erőhatása	53
6.5. Indukció és önindukció	54
6.6. A mágneses terek árnyékolása	57
6.7. Egyenfeszültségre kapcsolt tekercsek	58
7. Váltakozó feszültség és váltakozó áram	61
7.1. Szinuszos váltakozó feszültségek	61
7.2. Szinuszos váltakozó áramok	64
7.3. Vonaldiagram és fázistolás	65
7.4. Vektordiagramok	65
7.5. Nem szinuszosan váltakozó mennyiségek	67
8. Látszólagos ellenállás és vezetés	70
8.1. Induktív ellenállás és vezetés	70
8.2. Kapacitív ellenállás és vezetés	71
8.3. Impedancia és látszólagos vezetés	74
9. A váltakozó áram teljesítménye és munkája	76
9.1. Elektromos teljesítmény	76
9.2. Elektromos munka	78
10. Többfázisú váltakozó áram	80
10.1. Forgóáramú rendszerek	80
10.2. Alkalmazások	81
10.3. Csillagkapcsolás	81
10.4. Háromszögkapcsolás	82
10.5. A forgóáram teljesítménye és munkája	83
11. Lineáris és nemlineáris ellenállások	86
11.1. Általános tulajdonságok	86
11.2. Állandó ellenállások	88
11.2.1. Állandó ellenállások tulajdonságai	88
11.2.2. Az állandó ellenállások kivitele	91
11.3. Változtatható ellenállások	94
11.4. Melegen vezető (NTK) ellenállások	97
11.5. Hidegen vezető (PTK) ellenállások	99
11.6. Feszültségfüggő ellenállások	101
12. Kondenzátorok és tekercsek	106
12.1. Kondenzátorok	106
12.1.1. A kondenzátorok tulajdonságai	106
12.1.2. A kondenzátorok kiviteli formái	109
12.2. Tekercsek	115
12.2.1. A tekercsek tulajdonságai	115
12.2.2. A tekercsek kiviteli formái	117

13. Frekvenciafüggő két- és négypólusok	119
13.1. Általános ismeretek	119
13.2. Soros <i>RC</i> -kör	119
13.3. Soros <i>RL</i> -kör	120
13.4. <i>RC</i> -tag	121
13.5. <i>CR</i> -tag	123
13.6. <i>RL</i> -tag	125
13.7. <i>LR</i> -tag	127
13.8. <i>RC</i> -tag mint integrálóelem	128
13.8.1. Működésmód	128
13.8.2. Integrálás	129
13.9. A <i>CR</i> -tag mint differenciálóelem	130
13.9.1. Működésmód	130
13.9.2. Differenciálás	131

Előszó

Az elektronika az elektrotechnika részterületeként fejlődött ki, és a kezdeti időszakban főként az elektrotechnikával foglalkozók használták majd fejlesztették tovább. Az elektronika alkalmazásával bámulatos dolgok válhattak valósággá. A különféle elektromos vezérlések lényegesen nagyobb teljesítőképességgűek, kisebb méretűek, ráadásul olcsóbbak lettek; igen bonyolult kapcsolásokat olyan kis méretben és annyira olcsón lehet előállítani, amire korábban nem is gondolhattak, a mechanikus alkatrészek jó része elhagyhatóvá vált.

A digitális technika megszületésével az elektronika további lehetőségekkel bővült. A digitális jeleket csupán két állapot, a 0 és az 1 segítségével, meghatározott kódok szerint ábrázolják. A kapcsolások digitálisan, bináris logika alapján működnek. A számítógépes technika elemei egyre mélyebben behatolnak olyan szakterületekre is, ahol tulajdonképpen nincs is mit kiszámítani. A vezérlő mikroszámítógép, a mesterséges intelligencia sok gépen hatékonyan működik. A robotok a gyártás során részfeladatokat vesznek át, a gépjárműveket központi vezérlőegységként fedélzeti számítógéppel szerelik fel. A szerzámogépeket, híradástechnikai készülékeket és háztartási gépeket digitális vezérléssel látják el és nagyrészt automatikusan működnek.

Azon szakmák művelői, akiktől az elektronika és az elektrotechnika igen távol állt – pl. a géptervezők és gépjárműtechnikusok –, most elektronikai alkatrészekkel és kapcsolásokkal találkoznak. Nemcsak ismerniük kell az ilyen kapcsolásokat, hanem szerelniük, üzembe helyezniük, karbantartaniuk, ill. lehetőség szerint javítaniuk is. Mindeネkeltől elvárható tőlük, hogy a hibákat behatórolják és értékeljék. Mindehhez azonban megalapozott tudás szükséges. A vezetők tudásának pedig elegendőnek kell lenni ahhoz, hogy áttekintésük legyen a problémákról, és a döntéshozatalhoz megfelelő információval kell rendelkezniük. Leszögezhetjük tehát, hogy az alapismeretek, alapfogalmak ismerete semmiképp sem nélkülözhető.

A szerzők arra vállalkoztak, hogy könyükben az elektronika valamennyi fontos részterületét könnyen érhető, világosan tagolt formában és gazdag ismeretanyaggal tárgyalják. Céljuk az volt, hogy a lényeget emeljék ki és magyarázzák meg. Emellett azt is figyelembe vették, hogy az elektronikai alkatrészek és kapcsolások megértéséhez feltétlenül szükségesek az elektrotechnikai alapismeretek. A könyvnek

akár alcíme is lehetne a következő: „Az elektromos áramtól, feszültségtől és ellenállástól a mikroszámítógép-kapcsolásokig”.

A szerzők mindeneket a tapasztalatokat felhasználták, amelyeket az évek óta sikeres elektronikai szakkönyvek átdolgozása során szereztek. Az anyag szemléletessé tételekor a gyakorlati és a sokrétű oktatói tevékenység során szerzett ismeretekre támaszkodtak. A fontos összefüggéseket bekereteztük, ezáltal könnyen megtalálhatók.

A könyv felépítése segíti az önképzést.

A szerzők eredményes munkát kívánnak a könyv felhasználóinak, a javító szándékú javaslatokat, ötleteket pedig szívesen fogadják.

*Klaus Beuth
Olaf Beuth*

1. Elektromos alapmennyiségek

1.1. Elektromos töltés

Az atomok bizonyos építőelemei elektromos részecskék. Kétféle elektromos részecske ismerünk, az egyik pozitív, a másik negatív elektromos töltésű.

Az atom minden egyes elektronja negatív elektromos részecske, amelyet *negatív elemi töltésnek* is neveznek.

Az atom minden egyes protonja pozitív elektromos részecske, amelyet *pozitív elemi töltésnek* is neveznek.

A testekben általában egyenlő számú elektron és proton van, vagyis minden elektromos töltés egyenlő. Mindig egy pozitív és egy negatív elektromos részecske az, amely egymást külön hatásában közömbösi. Az ilyen test elektromosan semleges, azt mondjuk, hogy töltés nélküli.

Ha valamely test több pozitív töltésű elektromos részecskét tartalmaz, mint negatívat, akkor pozitív töltésű.

Ha valamely test több negatív töltésű elektromos részecskét tartalmaz, mint pozitívat, akkor negatív töltésű.

A meglevő elektromos töltésű részecskék többletmennyisége az *elektromos töltés*.

A képletek egyszerű felírása céljából az elektromos töltés jelölésére – nemzetközi megállapodás szerint – a Q betűt használják. A töltés nagyságának megállapításához valamilyen mértékegység szükséges. Ezt a mértékegységet coulombnak nevezik, rövidítése C. Egy coulomb nagyon nagy számú elektromos részecskét jelent.

1 coulomb = $6,24 \cdot 10^{18}$ elemi elektromos töltés.

A töltés pozitív, ill. negatív lehet. Nagysága is eltérhet. (A coulomb – mint töltésegység – helyett használják az amperekundum mértékegységet is, 1 C = 1 As.)

1.2. Elektromos feszültség

Két különböző töltésű test között elektromos feszültség van.

Tekintsünk két, szigetelten alátámasztott, pl. rézből készült fémgolyót (1.1. ábra)! A golyók kezdetben elektromosan semlegesek, azaz egyenlő számban tartalmaznak pozitív és negatív elektromos részecskeket. Mivel minden egyes pozitív részecske biztosan egy protonnak felel meg, és minden egyes negatív részecske egy elektronnak, mondhatjuk azt is, hogy a golyók egyenlő számú protont és elektron-tartalmaznak. A fémekben az elektronok mozogni képesek, a protonok nem.



1.1. ábra. Töltés nélküli (elektromosan semleges) fémgolyók

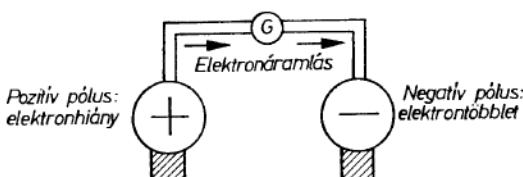
Most egy készülékkel, amelyet később részletesebben ismertetünk, a bal oldali golyóból elektronokat viszünk át a jobb oldali golyóra. A jobb oldali golyó ezáltal elektron többlethez jut. A bal oldali golyónál elektronhiány lesz (1.2. ábra). A pozitív és negatív töltéshordozókat különválasztjuk, ehhez munkára van szükség. Az elektron többlettel rendelkező jobb oldali golyó negatív töltésű. Ez képezi a negatív pólust. A bal oldali golyó pozitív töltésű. Itt hiányoznak elektronok, a pozitív protonok vannak túlsúlyban. Ezt a pólust pozitív pólusnak nevezzük.

Negatív pólus: elektron többlettel rendelkező pólus.
Pozitív pólus: elektronhiányt mutató pólus.

Elektromos feszültség (röviden csak feszültség) csak két pólus között állhat fenn. Egyetlen pólusnak nem lehet feszültsége. Azt a berendezést, amelynek segítségével az elektronokat a pozitív pólusról a negatív pólusra visszük, *feszültségforrásnak* vagy *generátornak* nevezzük.

Az elektromos feszültség a pozitív és a negatív töltéshordozók szétválasztása útján keletkezik.

Feszültségforrásként nagyon eltérő generátorokat alkalmazhatunk.



1.2. ábra. Pozitív és negatív töltésű fémgolyók

Generátorfajta	A töltésszétválasztás módja
elektrokémiai elemek (elemek, akkumulátorok)	kémiai reakciók
fotoelemek	fényhatás
piezoelemek	nyomásváltozás hatása
termoelemek	hőhatás
szalaggenerátor	súrlódási erő
indukciós generátorok	mágneses tér

Az elektromos feszültség jelölésére nemzetközileg az U betűt alkalmazzák.

A feszültség egysége a volt (V).

A volt kisebb és nagyobb egységei a következők:

$$1 \text{ } \mu\text{V} \text{ (mikrovolt)} = \frac{1}{1 \text{ 000 000}} \text{ V} = 10^{-6} \text{ V},$$

$$1 \text{ mV} \text{ (millivolt)} = \frac{1}{1000} \text{ V} = 10^{-3} \text{ V},$$

$$1 \text{ kV} \text{ (kilovolt)} = 1000 \text{ V} = 10^3 \text{ V},$$

$$1 \text{ MV} \text{ (megavolt)} = 1 \text{ 000 000 V} = 10^6 \text{ V}.$$

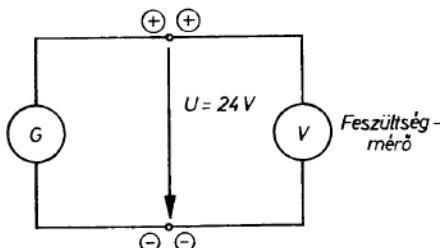
Néhány, a gyakorlatban előforduló feszültség

a rádióvevő-antenna feszültsége	0,1 μV ...3 mV,
a telefonos hangátvitel feszültsége	1 mV...1 V,
a szén-cink elem egy cellájának feszültsége	1,5 V,
az emberi szervezetre veszélyte-	
len legnagyobb feszültségérték	50...65 V,
hálózati feszültség	200...380 V,
a távvezetékek feszültsége	6...380 kV,
nagyfeszültségű technika, villám	néhány MV.

A feszültség mérése

A feszültség méréséhez feszültségmérőt (ún. voltmérőt) használunk. Különféle feszültségmérő típusok léteznek, és vannak köztük változtatható méréshatárú műszerek is. Ismeretlen feszültség mérésekor először nagyobb méréshatárt választunk, pl. 250 V-ig terjedőt. Ha ekkor a műszer sokkal kisebb feszültséget jelez, akkor a mérés pontossítása céljából kisebb méréshatárra váltunk át.

Feszültségméréskor a műszer sarkait a feszültségforrás pólusaival kötjük össze.



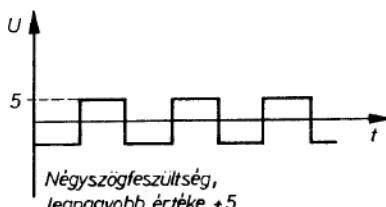
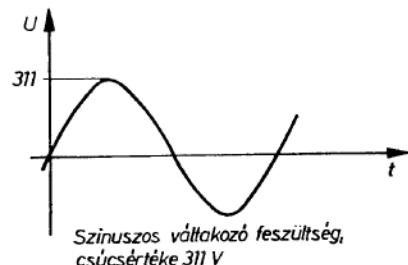
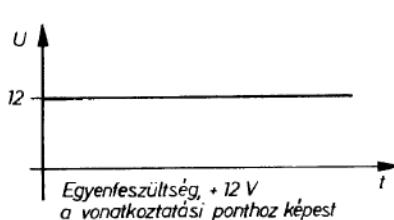
1.3. ábra. A feszültség és mérése

Ügyeljünk a sarkok helyes megválasztására (1.3. ábra)! Figyelem! Ne terheljük túl a műszert azzal, hogy túl alacsony méréshatárt választunk!

Feszültségefajták

A feszültség lehet időben állandó, ill. adott időtartam alatt meghatározott módon változhat.

Az egyenfeszültség olyan feszültség, amely hosszabb időtartam alatt állandó értékű.



1.4. ábra. Feszültségefajták

A hálózati feszültség szinuszosan váltakozó feszültség (1.4. ábra). Itt a feszültségértékeknek meghatározott időbeli lefolyásuk van, a szinuszalak. Az 1.4. ábrán bemutatott négyszögfeszültség ugyancsak váltakozó feszültség. A feszültség értéke négyszögfüggvény szerint változik. Sok más alakú váltakozó feszültség létezik, pl. háromszög, lépcős és fűrészfog alakú.

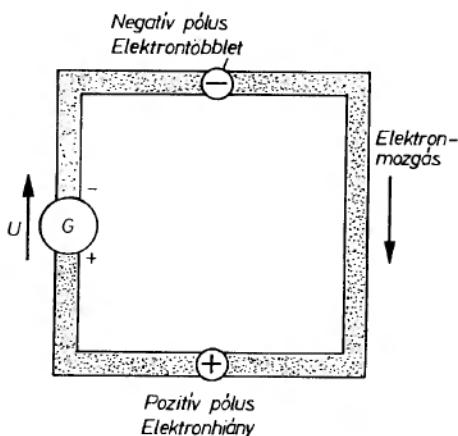
A váltakozó feszültség esetében a feszültségérték és a feszültség iránya meghatározott törvényszerűség szerint változik.

A forgófeszültség sem különleges feszültségefajta, legtöbbször három, néha több szinuszos váltakozó feszültség eredőjéről van szó.

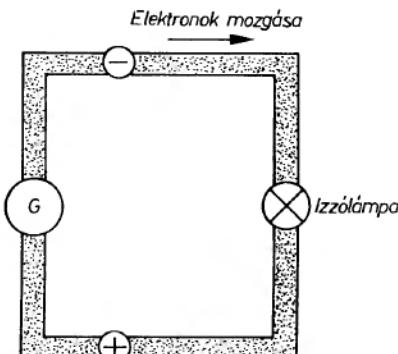
1.3. Elektromos áram

Az áram a töltéshordozók rendezett irányú mozgása.

Ha egy feszültségforrás (generátor) negatív és pozitív sarkát vezetékkel összekötjük, az elektronok a negatív saraktól a pozitív sarok felé fognak fogni (1.5. ábra) – áram keletkezik. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a feszültségforrást rövidre zártuk. Nem minden feszültségforrás viseli el a rövidre zárást, ezért legyünk óvatosak!



1.5. ábra. Rövidre zárt feszültségforrás



1.6. ábra. Áramkör izzólámpával

Jobb az összeköttetést lámpa közbeiktatásával létrehozni. Az áram átfolyik az izzón és az világítani fog (1.6. ábra). Az elektronok a negatív saraktól a pozitív sarok felé áramlanak, ez az elektronáramlás iránya. Az áram irányaként mégis a pozitívtól a negatív sarok felé vezető irányt (ún. technikai áramirány) rögzítették. Ez a megállapodás a folyadékok áramlásával van összefüggésben. Általánosan érvényes:

Az elektromos áram a feszültségforrás pozitív sarkáról a negatív sarok felé folyik.

Az elektromos áram jelölésére az I betűt használják.

Az áramerősség egysége az amper (A).

Az áramerősség 1 A, ha a vezető keresztmetszetén minden másodpercben $6,24 \cdot 10^{18}$ elektron (1 C töltés) áramlik át.

Az amper törtrészei és többszörösei a következők:

$$1 \text{ nA (nanoamper)} = \frac{1}{1\,000\,000\,000} \text{ A} = 10^{-9} \text{ A},$$

$$1 \mu\text{A (mikroamper)} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ A} = 10^{-6} \text{ A},$$

$$1 \text{ mA (milliamper)} = \frac{1}{1000} \text{ A} = 10^{-3} \text{ A},$$

$$1 \text{ kA (kiloamper)} = 1000 \text{ A} = 10^3 \text{ A},$$

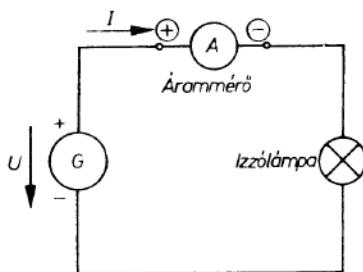
$$1 \text{ MA (megaamper)} = 1\,000\,000 \text{ A} = 10^6 \text{ A}.$$

Az elektromos áram mérése

Az elektromos áramot árammérővel (ampermérővel) méri. Ezen eszközök között is vannak változtatható méréshatárúak. A mérés során a biztonság kedvéért először nagyobb méréshatárt (pl. 10 A) választunk, azután szükség szerint kisebbet. Ne terheljük túl az ampermérőt!

Az áramerősség mérésekor meg kell szakítani az áramkört, és a műszert az áramkörbe kell kapcsolni.

Ügyeljünk a sarkok helyes bekötésére (1.7. ábra)! Létezik olyan árammérő, amelynél nem kell a polaritásra ügyelni.



1.7. ábra. Áramkör árammérővel

Szokásos áramerősségek

elektronika, távközléstechnika	1 nA... 10 A,
háztartási gépek, szerszámok	100 mA... 50 A,
autóvillamosság	100 mA...200 A,
energiaátvitel	100 A...100 kA,
elektrokémia	10 kA... 1 MA.
villámcsapás	kb. 200 kA,
nukleáris technika	kb. 100 MA-ig.

Áramfajták

A gyakorlatban egyenáramot és váltakozó áramot különböztetünk meg.

Egyenáramnak nevezzük azt az áramot, amely hosszabb időtartam alatt állandó. Az elektronok mindenkor egy irányban áramlanak.

A váltakozó áram nagysága és iránya a váltakozó feszültséghez hasonlóan, meghatározott törvényszerűség szerint változik.

Van szinusz, négyszög és sok egyéb alakú váltakozó áram.

Terjedési sebesség

Az elektromos áram a vezetékekben majdnem fénysebességgel terjed. A töltéshordozók (elektronok) azonban lényegesen lassabban mozognak. Sebességük a vezető anyagától, a vezető keresztmetszetétől, az áramerősségtől, valamint a hőmérséklettől függ, és néhány mm/s értékű.

1.4. Elektromos ellenállás

Az elektronoknak a vezetékben fématomok között kell áthaladniuk. Ez az áramlás akadályba ütközik. A vezeték anyaga a töltésárammal szemben ellenállást fejt ki (1.8. ábra). Ezt az ellenálló hatást nevezzük elektromos ellenállásnak. Az elektromos ellenállás rajzjelét az 1.9. ábra mutatja. Az ellenállás jelölésére az R betűt alkalmazzuk.

Az ellenállás egysége az ohm (Ω).

Az ohm törtrészei és többszörösei:

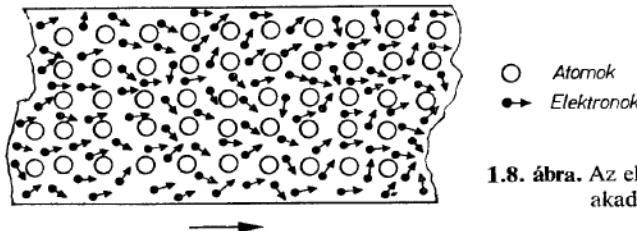
$$1 \mu\Omega \text{ (mikroohm)} = \frac{1}{1\,000\,000} \Omega = 10^{-6} \Omega,$$

$$1 \text{ m}\Omega \text{ (milliohm)} = \frac{1}{1\,000} \Omega = 10^{-3} \Omega,$$

$$1 \text{ k}\Omega \text{ (kiloohm)} = 1\,000 \Omega = 10^3 \Omega,$$

$$1 \text{ M}\Omega \text{ (megaohm)} = 1\,000\,000 \Omega = 10^6 \Omega,$$

$$1 \text{ G}\Omega \text{ (gigaohm)} = 1\,000\,000\,000 \Omega = 10^9 \Omega.$$



1.8. ábra. Az elektronáramlást akadályozó ellenállás



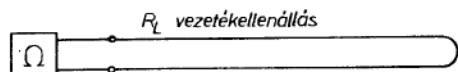
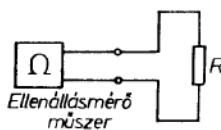
1.9. ábra. Az elektromos ellenállás rajzjele

Szokásos ellenállások

rövid vezeték	$0,1 \mu\Omega \dots 100 \text{ m}\Omega$
háztartásban használt vezetékek	$0,1 \dots 10 \Omega$
gépjárművek kábelezése	$1 \text{ m}\Omega \dots 1 \Omega$
izzók, háztartási gépek	$10 \Omega \dots 1 \text{ k}\Omega$
elektronikában használt ellenállások	$0,1 \Omega \dots 100 \text{ M}\Omega$
szigetelő-ellenállások	$50 \text{ M}\Omega \dots 1000 \text{ G}\Omega$

Az ellenállás mérése

Mindenekelőtt különbséget teszünk a vezetékek ellenállása, a készülékek ellenállása és az ellenállás mint alkatrész között. Mindegyiküknek meghatározott ellenállásérteke van a két csatlakozópontja között. Ezt ellenállásmérő műszerrel mérik úgy, hogy az ellenállás kivezetéseit a mérőműszer csatlakozópontjaival köti össze (1.10. ábra). Az ellenállás értéke a helyes méréshatár beállítása után a skálán közvetlen számértékként olvasható le.



1.10. ábra. Ellenállásmérés

1.5. Elektromos vezetés

Az R ellenállás helyett a G vezetést is szokták használni.

$$G = \frac{1}{R},$$

A vezetés az ellenállás reciprok értéke.

A vezetés egysége az $\frac{1}{\Omega} = \text{siemens (S)}$.

$$1 \text{ S} = 1 \frac{\text{A}}{\text{V}}.$$

1.6. Vezető és szigetelő

Az anyagokat vezetőkre és szigetelőkre szokták felosztani. Vezetők azok az anyagok, amelyek az elektromos áramot jól vezetik. A szigetelők az áramot rosszul vagy egyáltalán nem vezetik. Vannak azonban olyan anyagok is, amelyeket sem a vezetők, sem a szigetelők közé nem lehet besorolni, ilyenek pl. a félvezető anyagok.

A vezetőkben sok szabadon elmozdítható elektron van, amelyek elektromos áramot hoznak létre.

A leggyakrabban használt vezetőanyagok a réz, az alumínium, az ezüst, az arany és a vas.

A szigetelőkben szinte alig van szabadon elmozdítható elektron. Bennük csak kicsiny, legtöbb esetben elhanyagolható áram képződik. Az áramot gyakorlatilag nem vezetik.

A leggyakoribb szigetelőanyagok a gumi, a legtöbb műanyag, az üveg, a kerámia, és a csillám.

1.6.1. Fajlagos ellenállás

Minden egyes vezetőanyagnak meghatározták a fajlagos ellenállását.

A fajlagos ellenállás a vezető anyagából készült 1 m hosszú, 1 m² keresztmetszetű tömb 20 °C-on mért ellenállása.

A fontosabb vezetőanyagok fajlagos ellenállását mutatja az 1.11. ábra. A fajlagos ellenállás jelölésére a ρ (rhó) betűt használják. A fajlagos ellenállás egysége az Ωm , de a gyakorlatban az $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$ egységet is használják.

A vezetékek ellenállását a következő képlettel számítják:

$$R = \frac{\rho l}{A},$$

ahol R az ellenállás, Ω ; l a vezeték hossza, m; A a vezető keresztmetszete, mm² és ρ a fajlagos ellenállás, Ωm .

Fémek fajlagos ellenállása:

Anyag	ρ	$\frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$	(20 °C-on)
Réz	0,0178		
Alumínium	0,028		
Vas	0,12		
Ezüst	0,016		
Arany	0,023		



A vezető és hőmérséklet adatai, amelyre a fajlagos ellenállást vonatkoztatják

1.11. ábra. A fontosabb vezetőanyagok fajlagos ellenállása

Példa

Mekkora egy 50 m hosszú, 1,5 mm² keresztmetszetű rézhuzal ellenállása?

$$R = \frac{\rho l}{A}, \quad R = \frac{0,01786 \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 50 \text{ m}}{1,5 \text{ mm}^2}.$$

$$R = \frac{0,01786 \cdot 50 \Omega}{1,5}, \quad R = 0,595 \Omega.$$

1.6.2. Fajlagos vezetés

A fajlagos vezetés képletbeli jelölésére a π betűt alkalmazzák.

A π fajlagos vezetés a ρ fajlagos ellenállás reciproka.

$$\pi = \frac{1}{\rho}.$$

A fajlagos vezetés egysége az $1/\Omega \text{m}$, ill. a gyakorlatban a $\frac{\text{m}}{\Omega \text{mm}}$.

A vezetékek ellenállása a π fajlagos vezetés segítségével is kiszámítható.

$$R = \frac{l}{\pi A}.$$

1.7. Ellenállás és hőmérséklet

A ρ fajlagos ellenállást és a π fajlagos vezetést 20°C hőmérsékletre adják meg.

Az ezekkel kiszámított ellenállásértékek ugyancsak 20°C -ra érvényesek. A hőmérséklet növelésével vagy csökkentésével az ellenállás értékei változnak. Az ellenállás hőmérséklet-függését az α hőmérséklet-tényezővel adjuk meg.

Anyag	α hőfoktervező, $1/K$
Aluminium	$3,77 \cdot 10^{-3}$
Ólom	$4,2 \cdot 10^{-3}$
Vas	$4,5 - 6,2 \cdot 10^{-3}$
Arany	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Réz	$3,93 \cdot 10^{-3}$
Ezüst	$3,8 \cdot 10^{-3}$
Wolfrám	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Szén	$-0,8 \cdot 10^{-3}$

1.12. ábra. A fémek fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggése

Az α hőmérséklet-tényező 1Ω ellenállásának 1 K hőmérséklet-emelkedés hatására bekövetkező változását adja meg.

1 kelvin (K) hőmérséklet-emelkedés $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérséklet-emelkedésnek felel meg. Az 1.12 ábrán a fontosabb anyagok hőmérséklet-tényezőit adjuk meg.

$$\Delta R = R_0 \alpha \Delta \vartheta,$$

$$R = R_0 + \Delta R.$$

$$R = R_0 + R_0 \alpha \Delta \vartheta,$$

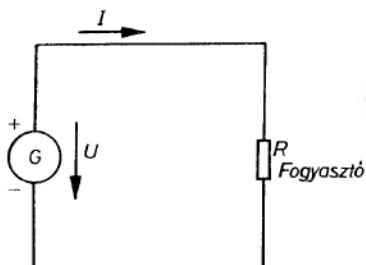
$$R = R_0(1 + \alpha \Delta \vartheta),$$

$$R_0 = \frac{R}{1 + \alpha \Delta},$$

ahol ΔR az ellenállás-változás, Ω ; R_0 az ellenállás $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on, Ω ; α hőmérséklet-tényező, $1/\text{K}$; $\Delta \vartheta$ a hőmérséklet-emelkedés, K ; R az ellenállás, Ω .

2. Elektromos áramkörök

A generártortól I elektromos áram folyik egy R fogyasztón (ellenálláson) keresztül, majd ismét vissza a generátorhoz. Mivel körben folyik, ezért az egész elrendezést áramkörnek nevezük (2.1. ábra).



2.1. ábra. Elektromos áramkör

Az áramerősség a 2.1. ábra szerinti áramkör minden pontján egyenlő nagyságú.

2.1. Ohm törvénye

Áramkörben az I áramerősség változatlan nagyságú R ellenállás esetén egyenesen arányos az U feszültséggel.

Ez az Ohm-törvény, amely adott áramkörben összefüggést állapít meg az áram, a feszültség és az ellenállás között.

$$I = \frac{U}{R},$$
 ahol I az áramerősség, A; U a feszültség, V; R az ellenállás, Ω .

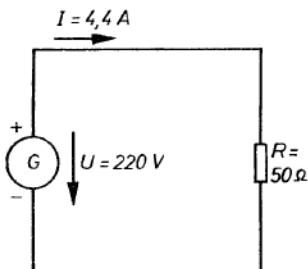
$$U = IR,$$

$$R = \frac{U}{I},$$
 Az ellenállás egységeként $\frac{V}{A} = \Omega$ adódik.

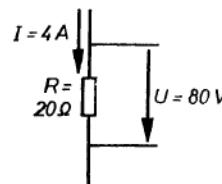
Példa

Egy $U = 220$ V feszültségű generátor kapcsaira $R = 50 \Omega$ ellenállást kapcsolunk (2.2. ábra). Mekkora az áramkörben folyó áramerősség?

$$I = \frac{U}{R} = \frac{220 \text{ V}}{50 \Omega}, \quad I = 4,4 \text{ A.}$$



2.2. ábra. Elektromos áramkör feszültség- és ellenállásadatokkal



2.3. ábra. Elágazás nélküli áramkörök

Az Ohm-törvény külön vizsgált ellenállásra is érvényes (2.3. ábra).

Ha valamely ellenálláson áram folyik át, az Ohm-törvényből adódóan a feszültség esik rajta.

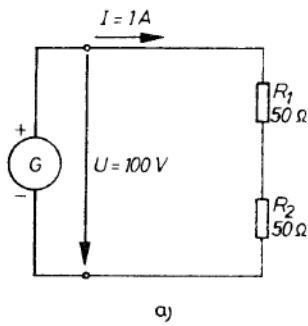
Példa

Egy 20Ω -os ellenálláson 4 A áram folyik át. Mekkora az ellenállásra eső feszültség?

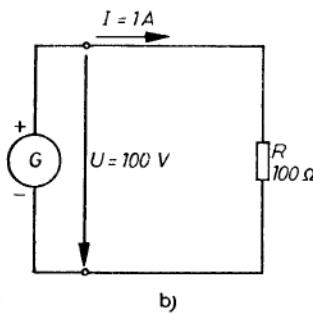
$$U = IR, \quad U = 4 \text{ A} \cdot 20 \Omega, \quad U = 80 \text{ V.}$$

2.2. Elágazás nélküli áramkörök, soros kapcsolás

A 2.4. ábrán bemutatott áramkörök elágazás nélküli áramkörök. Az a) ábrán látható áramkörben az I áram először az R_1 ellenálláson, azután az R_2 ellenálláson folyik át. Azt mondjuk, hogy az ellenállások sorosan kapcsolódnak.



a)



b)

2.4. ábra. Az ellenálláson átfolyó áram

Az ellenállások kapcsolása akkor soros, ha ugyanaz az áram folyik át rajtuk.

Elágazás nélküli áramkörben az áramerősség mindenütt egyenlő nagyságú.

Sorosan kapcsolt ellenállások mindegyikére meghatározott feszültséghányad esik. A 2.5. ábra erre mutat be példát.

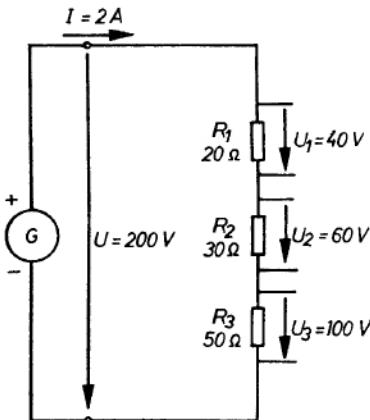
Példa

$$U_1 = IR_1 = 2 \text{ A} \cdot 20 \Omega = 40 \text{ V}$$

$$U_2 = IR_2 = 2 \text{ A} \cdot 30 \Omega = 60 \text{ V}$$

$$U_3 = IR_3 = 2 \text{ A} \cdot 50 \Omega = 100 \text{ V}$$

$$\underline{U_1 + U_2 + U_3 = 200 \text{ V} = U}$$



2.5. ábra. Áramkör sorba kapcsolt ellenállásokkal

Az U_1 , U_2 , és U_3 az egyes fogyasztókra jutó feszültség. A generátor U feszültsége az áramforrás feszültsége.

Minden esetben érvényes:

Elágazásmentes áramkörben a fogyasztók feszültségeinek összege egyenlő az áramforrás feszültségével.

Ez Kirchhoff második törvénye.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

Krichhoff második törvénye alapján az ellenállások soros kapcsolásának képlete levezethető:

$$U = U_1 + U_2 + U_3,$$

$$IR_e = IR_1 + IR_2 + IR_3,$$

$$IR_e = I(R_1 + R_2 + R_3)$$

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3.$$

Tetszőleges számú sorba kapcsolt ellenállásra érvényes:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots,$$

vagyis az egyes ellenállások az összegüknek megfelelő ellenállással helyettesíthetők (l. a 2.4.b ábrát).

Ellenállások soros kapcsolása esetén az eredő ellenállás egyenlő az egyes ellenállások összegével. A feszültség-összetevők az ellenállásértékekhez hasonlóan alakulnak.

Két ellenállásra érvényes:

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

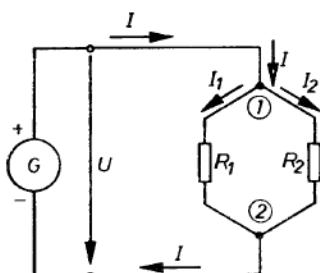
2.3. Elágazó áramkörök, párhuzamos kapcsolás

A 2.6. ábra elágazó áramkört mutat be.

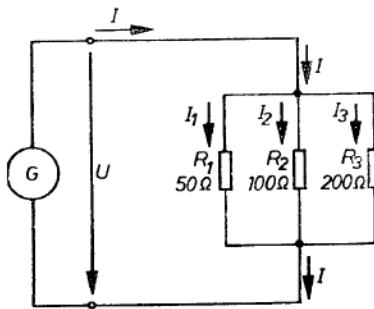
Az I áram az I pontban I_1 és I_2 áramösszetevőre bomlik. A 2 pontban az áramok újból I árammá összegződnek. Az R_1 és az R_2 ellenállás párhuzamos kapcsolású.

Ellenállások kapcsolása párhuzamos, ha ugyanarra a feszültségre kapcsolódnak.

Az I csomópontban az elektronok nem tudnak „várakozni”. Ami addig odaérkezett, annak tovább is kell haladnia. Kirchhoff első törvénye lép életbe.



2.6. ábra. Elágazó áramkör



2.7. ábra. Elágazó áramkör három, párhuzamosan kapcsolt ellenállással

A csomópontba folyó áramok összege egyenlő a csomópontból elfolyó áramok összegével.

A 2.7. ábra szerinti kapcsolás esetén Kirchhoff első törvénye a következőképp néz ki:

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Párhuzamosan kapcsolt ellenállások eredőjének kiszámítására alkalmas képlet Kirchhoff első törvénye alapján vezethető le:

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

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

$$U \frac{1}{R_e} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right).$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

$$G_e = G_1 + G_2 + G_3 + \dots$$

Ellenállások párhuzamos kapcsolása esetén az eredő vezetés egyenlő az egyes vezetések összegével.

Két párhuzamosan kapcsolt ellenállásra érvényes:

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Példa

Számítsuk ki a 2.7. ábra szerinti kapcsolás eredő ellenállását:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3},$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{50 \Omega} + \frac{1}{100 \Omega} + \frac{1}{200 \Omega} = \frac{7}{200 \Omega},$$

$$R_e = \frac{200 \Omega}{7} = 28,57 \Omega.$$

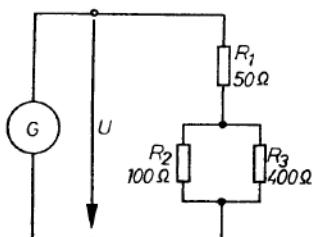
Párhuzamos kapcsolásra érvényes:

Két egyenlő nagyságú ellenállás eredője az egyik ellenállás felét teszi ki, három egyenlő ellenállás esetén pedig egyharmadát, és így tovább.

2.4. Ellenállás-hálózatok

Az áramkörök sorosan és párhuzamosan kapcsolt ellenállásokat egyaránt tartalmazhatnak.

A 2.8. ábra R_2 és R_3 ellenállása párhuzamosan van kapcsolva. Ugyanaz a feszültség kapcsolódik rájuk. Az R_2 -ből és R_3 -ból a következő R_{23} helyettesítő ellenállás adódik:



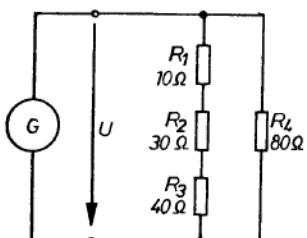
2.8. ábra. Ellenállás-hálózat

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{100 \Omega \cdot 400 \Omega}{100 \Omega + 400 \Omega}, \quad R_{23} = 80 \Omega.$$

Az R_{23} ellenállás az R_1 -gel sorosan kapcsolódik. Az R_e eredő ellenállás:

$$R_e = R_1 + R_{23}, \quad R_e = 50 \Omega + 80 \Omega, \quad R_e = 130 \Omega.$$

A 2.9. ábrán az R_1 , R_2 és R_3 ellenállás sorba van kötve. Ezzel a soros kapcsolással van párhuzamosan kötve az R_4 ellenállás.



2.9. ábra. Ellenállás-hálózat

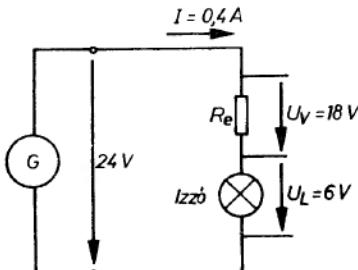
$$R_{123} = R_1 + R_2 + R_3,$$

$$R_{123} = 10 \Omega + 30 \Omega + 40 \Omega = 80 \Omega,$$

$$R_e = \frac{R_{123} R_4}{R_{123} + R_4} = \frac{80 \Omega \cdot 80 \Omega}{80 \Omega + 80 \Omega} = 40 \Omega.$$

2.5. Előtét-ellenállások

Előtét-ellenállások segítségével a feszültségek a fogyasztók igényei szerint lecsökkenthetők. Soros kapcsolás esetén az egyes ellenállásokra eső feszültségek úgy aránybanak egymáshoz, mint az ellenállásértékek. Legyen mondjuk egy 24 V-os feszültségforrássunk! A fogyasztó feszültség- és áramerősségiénye pl. 6 V és 0,4 A (2.10. ábra).



2.10. ábra. 24 V feszültség felosztása 18 V-ra és 6 V-ra előtét-ellenállással

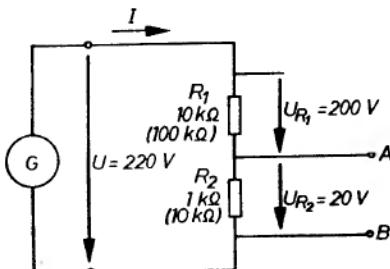
Az R_V előtét-ellenállás úgy kell megválasztani, hogy 0,4 A-es áram mellett 18 V feszültség essék rá.

$$R_V = \frac{U_V}{I} = \frac{18 \text{ V}}{0,4 \text{ A}} = 45 \Omega.$$

2.6. Feszültségesztő

2.6.1. Terheletlen feszültségesztő

A feszültség sorba kapcsolt ellenállások segítségével megosztható. Pl. 220 V feszültséget kell 200 V és 20 V feszültségre felosztani (2.11. ábra). A feszültségek aránya 10:1, tehát az ellenállások értékének is 10:1 arányban kell állniuk. Mekkora ellenállásokat válasszunk?



2.11. ábra. Terheletlen feszültségesztő

A 2.11. ábrán $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ és $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ ellenállást választottunk. Lehetett volna azonban $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ és $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ ellenállást is választani. Mivel az ellenállások 10:1 arányt kell, hogy mutassanak, végtelen sok kombináció lehetséges, pl. $R_1 = 10 \Omega$ és $R_2 = 1 \Omega$ is megfelel. Ebben a változatban azonban a kapcsoláson keresztül a következő nagyságú áram folyik:

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220 \text{ V}}{10 \Omega + 1 \Omega} = \frac{220 \text{ V}}{11 \Omega} = 20 \text{ A.}$$

Ez energia pazarlás. A feszültségesztő ellenállásait nagy értékűre kell beállítani, pl. $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$.

Ekkor

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220 \text{ V}}{11 \text{ k}\Omega} = \frac{220 \text{ V}}{11000 \Omega} = 0,02 \text{ A} = 20 \text{ mA}$$

áram folyik.

$R_1 = 100 \text{ k}\Omega$ és $R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ alkalmazása esetén az áram nagysága 2 mA. Ezek az ellenállásértékek is használhatók. A feszültségesztő itt persze nem adhat terhelőáramot, vagyis csak akkor használható, ha az R_2 A és B kivezetése között olyan kapcsolás van, amely gyakorlatilag nem igényel áramot. A feszültségesztő terheletlen. Az elektronikában léteznek kapcsolások, amelyeket csak feszültség vezérel. Ilyen helyeken alkalmazzák a terheletlen feszültségesztőt.

2.6.2. Terhelt feszültségesztő

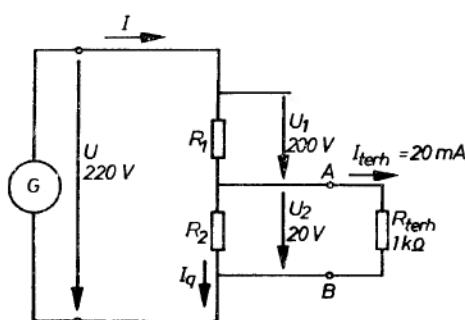
A 2.12. ábra terhelt feszültségesztőt mutat. Az A és B kapcsok között az egy $1 \text{ k}\Omega$ -os R_{terh} ellenállás helyezkedik el. A 220 V feszültséget egy $U_1 = 200 \text{ V}$ és egy $U_2 = 20 \text{ V}$ részre kell felosztani.

Figyelembe kell vennünk az I_{terh} terhelőáramot (2.12. ábra). Ha a 20 V feszültségre 1 $\text{k}\Omega$ terhelő-ellenállás van kötve, 20 mA terhelőáram folyik, mivel

$$I_{\text{terh}} = \frac{U_2}{R_{\text{terh}}} = \frac{20 \text{ V}}{1 \text{ k}\Omega} = \frac{200}{1000 \Omega} = 0,02 \text{ A} = 20 \text{ mA.}$$

Az I_q keresztáramot meg kell választani.

Minél nagyobbra vesszük fel, annál kisebb ellenállású lesz a feszültségesztő. Ennek akkor van jelentősége, ha a terhelő-ellenállás nem marad állandó, vagyis a terhelő-



2.12. ábra. Terhelt feszültségesztő

áram változik. Ha a terhelő-ellenállás értéke csökken, a terhelőáram is csökken, és ezzel az A és B pont közötti feszültség is.

A terhelt feszültségesztő kimeneti feszültsége csökkenő terhelőáram mellett annál kevésbé változik, minél kisebb ellenállású a feszültségesztő.

Minél kisebb ellenállású azonban a feszültségesztő, annál nagyobb áramerősség szükséges. Kompromisszumos megoldást kell találni.

Az elektronikában használt terhelt feszültségesztők keresztáramát a terhelőáram 2...10-szeresére választják.

Az I_q/I_{terh} viszonyt keresztáram-tényezőnek nevezik, jelölése: m .

$$m = \frac{I_q}{I_{terh}}, \quad \text{szokásos érték: } m = 2 \dots 10.$$

A 2.12. ábra szerinti példánál $m = 4$ keresztáram-tényezőt célszerű választani. Ezzel az $I_q = 80$ mA. Most az áramok meghatározhatók.

$$I_{terh} = 20 \text{ mA},$$

$$I_q = 80 \text{ mA},$$

$$I = I_{terh} + I_q = 100 \text{ mA}.$$

Mivel az U_1 és U_2 feszültség szintén ismert, az R_1 és R_2 ellenállás kiszámítható:

$$R_1 = \frac{U_1}{I} = \frac{200 \text{ V}}{0,1 \text{ A}} = 2000 \Omega = 2 \text{ k}\Omega.$$

$$R_2 = \frac{U_2}{I_q} = \frac{20 \text{ V}}{80 \text{ mA}} = \frac{20 \text{ V}}{0,08 \text{ A}} = 250 \Omega.$$

A 2.12. ábrán bemutatott terhelt feszültségesztő most megfelelően van méretezve.

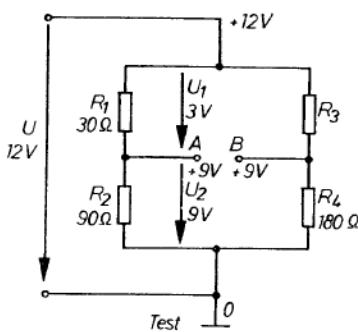
2.7. Hídkapcsolás

A hídkapcsolás két feszültségesztőból áll (2.13. ábra). Az első feszültségesztő az R_1 és R_2 ellenállásból, a második az R_3 és R_4 ellenállásból épül fel.

A hídkapcsolást a legtöbb esetben ún. kiegyenlített állapotban alkalmazzuk.

A hídkapcsolást akkor mondjuk kiegyenlítettnek, ha a hídágak A és B pontja között nem lép fel feszültség.

Ez azt jelenti, hogy a két feszültségesztónak az U feszültséget egyenlő arányban kell megosztania. A bal oldali feszültségesztő az A ponton +9 V feszültséget hoz létre a 0 V-os vonatkozási ponthoz (test) képest.



2.13. ábra. Hídkapcsolás

Azért, hogy az A és a B között ne keletkezzen feszültség, a B ponton ugyancsak +9 V-nak kell mutatkoznia a testhez képest. A jobb oldali feszültségesztőnek tehát szintén 3 V és 9 V feszültséghányadokat kell előállítania. Az R_4 ellenállás 180 Ω. Milyen értékűnek kell az R_3 -nak lennie?

A feszültségesztők a feszültséget az ellenállások arányában osztják meg. Érvényes tehát, hogy

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{3 \text{ V}}{9 \text{ V}}, \quad \text{ebből} \quad R_3 = \frac{3 \text{ V}}{9 \text{ V}} R_4 = \frac{1}{3} R_4 = \frac{1}{3} \cdot 180 \Omega = 60 \Omega.$$

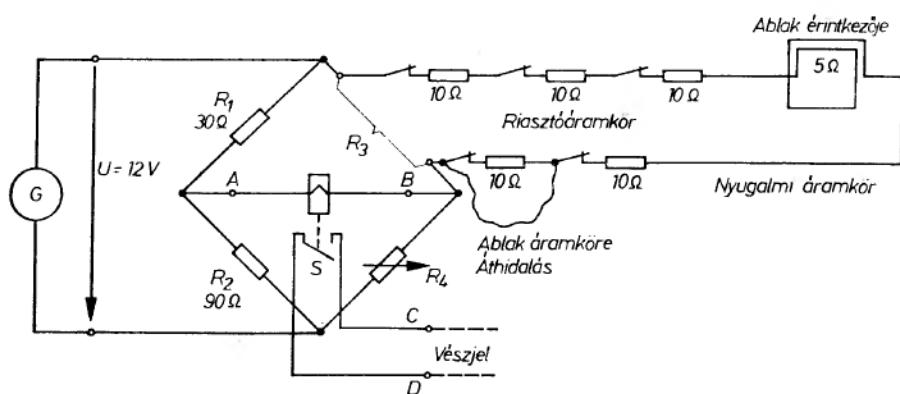
Az R_1 és R_2 ellenállás aránya 1:3, az R_3 és R_4 ellenállásé szintén. Ezzel az R_1/R_2 arány pontosan ugyanakkora, mint az R_3/R_4 arány.

Kiegynélített hídra fennáll az

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

összefüggés.

A hídkapcsolások normális esetben ki vannak egyenlítve. Külső hatás következtében a híd egyensúlya megbomlik. Ekkor feszültség keletkezik az A és B pont között. Ezzel az U_{AB} feszültséggel további kapcsolási folyamat váltható ki. Ráadhatjuk pl. egy jelfogóra, vagyis mágneses elven működő kapcsolóra, vagy pl. egy riasztóna.



2.14. ábra. Hídkapcsolású riasztóáramkör

Példa

A 2.14. ábra hídkapcsoláshoz illesztett riasztóáramkört mutat. A riasztóáramkör egy szoba belsejében van, és különféle ablak- és ajtóérintkezőket tartalmaz a szükséges ellenállásokkal, valamint egy ablaküvegen levő vezetéket foglal magában. A riasztóáramkör eredő ellenállása $R_3 = 55 \Omega$. Az R_4 változtatható ellenállás.

Mekkora értékre kell ez utóbbit beállítani ahhoz, hogy a híd kiegyenlített legyen?

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}, \quad R_4 = R_3 \cdot \frac{R_2}{R_1} = 55 \cdot \frac{90 \Omega}{30 \Omega} = 165 \Omega.$$

Ha most a betörő a riasztóáramkört valahol megszakítja, R_3 végtelen nagy lesz. A híd egyensúlya felborul, az X jelfogó behúz, és a riasztó jeladó áramkörét zárja az S kapcsoló. Előfordulhat, hogy a betörő felfedezi a riasztóáramkört és sikerül neki az egyik ablakra szerelt érintkezőt áthidalnia. Az érintkezőbe 10Ω -os ellenállás van beépítve. Ezt vezetékkel áthidalva a híd egyensúlya ugyancsak megbomlik. Az R_3 most csak 45Ω . Az áthidalásnak szintén vészjelzés lesz az eredménye.

3. Egyenáramú munka és teljesítmény

3.1. Elektromos munka

Ha az U feszültség Q töltést hajt valamely vezetőn keresztül, munkavégzés történik. A W elektromos munka egyrészt az U feszültséggel, másrészt a vezetéken átvitt Q elektromos töltéssel arányos:

$$W = UQ.$$

A Q elektromos töltés az áramerősség és az idő szorzata:

$$Q = It,$$

$$W = \frac{QU}{It} = UIt, \quad W = UIt.$$

Az elektromos munka egysége a VAs. 1 VAs = 1 J. A villamosságtanban alkalmazott szokásos teljesítményegység a volt és az amper szorzata, a watt, amelynek rövidítése W . A VAs helyett a Ws-ot (wattszekundum) is alkalmazzuk.

$$1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ Ws.}$$

$$3600 \text{ Ws} = 1 \text{ Wh (wattóra),}$$

$$1000 \text{ Wh} = 1 \text{ kWh (kilowattóra).}$$

A kilowattóra (kWh) az a munkaegység, amelyben pl. az elektromosenergia-fogyasztást számlázzák.

Példa

Egy forrasztópáka 220 V feszültségen üzemel. A fűtőszál ellenállásán 0,5 A áram folyik. Egy kWh energia ára 1,25 Ft.

Mekkorák az energiaköltségek, ha havi 24 munkanappal és napi 8 órás üzemeltetéssel számolunk?

$$W = UIt,$$

$$W = 220 \text{ V} \cdot 0,5 \text{ A} \cdot (24 \cdot 8) \text{ h} = 21\,120 \text{ Wh} = 21,12 \text{ kWh.}$$

Az energiaköltség: $21,12 \text{ kWh} \cdot 1,25 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}} = 26,40 \text{ Ft/hó.}$

3.2. Elektromos teljesítmény

A teljesítmény adott idő alatt elvégzett meghatározott mennyiségű munka.

A teljesítményt tehát úgy kapjuk meg, hogy a munkát elosztjuk az idővel. A teljesítmény jelölésére a P betűt használjuk.

$$P = \frac{\text{munka}}{\text{idő}},$$

$$\boxed{P = \frac{W}{t}.}$$

$W = UIt$ behelyettesítésével adódik, hogy

$$P = \frac{UIt}{t},$$

$$\boxed{P = UI.}$$

A P elektromos teljesítmény a feszültség és az áramerősség szorzata.

Az elektromos teljesítmény egysége a watt (W).

A használatos kisebb és nagyobb egységek a következők:

$$1 \mu\text{W} \text{ (mikrowatt)} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ W} = 10^{-6} \text{ W},$$

$$1 \text{ mW} \text{ (milliwatt)} = \frac{1}{1\,000} \text{ W} = 10^{-3} \text{ W},$$

$$1 \text{ kW} \text{ (kilowatt)} = 1000 \text{ W} = 10^3 \text{ W},$$

$$1 \text{ MW} \text{ (megawatt)} = 1\,000\,000 \text{ W} = 10^6 \text{ W}.$$

Példa

Egy autó fényszórójának teljesítménye 55 W.

Mekkora áramot vesz fel a 12 V-os akkumulátorból?

$$P = UI, \quad I = \frac{P}{U} = \frac{55 \text{ W}}{12 \text{ V}}, \quad I = 4,583 \text{ A}.$$

Valamely ellenállás által felvett teljesítmény az áramerősség és az ellenállás értékének ismeretében is kiszámítható:

$$P = UI.$$

U helyébe Ohm-törvénye alapján IR -t beírva:

$$P = IRI,$$

$$\boxed{P = I^2R.}$$

A teljesítmény az ellenállás értékéből és a rákapcsolt feszültségből szintén kiszámítható:

$$P = UI.$$

I helyébe az Ohm-törvény alapján $\frac{U}{R}$ -et írva:

$$P = U \frac{U}{R},$$

$$\boxed{P = \frac{U^2}{R}.}$$

3.3. Hatásfok

Ha mechanikai munkát elektromos munkává alakítunk, vagy megfordítva, akkor a munka egy része főként hő alakjában elvész.

A hatásfok a leadott hasznos munka és a bevezetett összes munka arányát adja meg.

A hatásfok jele az η (éta).

$$\eta = \frac{W_h}{W_{be}}.$$

A hatásfok százalékosan is megadható:

$$\eta = \frac{W_h}{W_{be}} 100 \text{ \%}.$$

Az η hatásfok lehet teljesítményhatásfok is:

$$\eta = \frac{W_h}{W_{be}} = \frac{P_h t}{P_{be} t} = \frac{P_h}{P_{be}}. \quad \boxed{\eta = \frac{P_h}{P_{be}}}.$$

Ha százalékos formában akarjuk kifejezni a teljesítményhatásfokot, akkor a következő képlet érvényes:

$$\eta = \frac{P_h}{P_{be}} 100 \text{ \%}.$$

Példa

Egy motor 2,5 kW teljesítményt vesz fel és 1,8 kW mechanikai teljesítményt ad le. Mekkora a hatásfoka?

$$\eta = \frac{P_h}{P_{be}} = \frac{1,8 \text{ kW}}{2,5 \text{ kW}}.$$

$$\eta = 0,72, \quad \text{ill. } 72 \text{ \%},$$

tehát a bevezetett teljesítmény 72 % hasznosul.

4. Áramforrások

4.1. Az üresjárási feszültség és a belső ellenállás

A feszültségforrások (generátorok) jellemző tulajdonsága, hogy az elektromos töltéshordozók szétválasztására képesek. Ezt a képességet korábban elektromotoros erőnek (EME) nevezték. Ma ezt a sajátságot a feszültségforrás üresjárási (belső) feszültségének nevezzük.

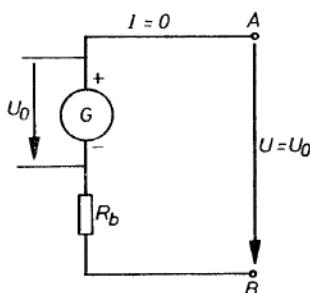
Minden áramforrásnak van üresjárási feszültsége. Ez az a feszültség, amely a töltéshordozók szétválasztása révén keletkezik.

Az üresjárási feszültséget a képletekben U_0 jelöli. minden áramforrás belsejében felépnek veszteségek. Az elektronoknak pl. vezetékeken kell átáramolniuk, amelyeknek ellenállásuk van. Akkumulátorok esetén az áramnak folyadék belsejében kell tovaterjednie. A folyadékok szintén ellenállást fejtenek ki az árammal szemben.

Az áramforrás belsejében keletkező eredő veszteségi ellenállást belső ellenállásnak nevezzük.

A belső ellenállás jele R_b .

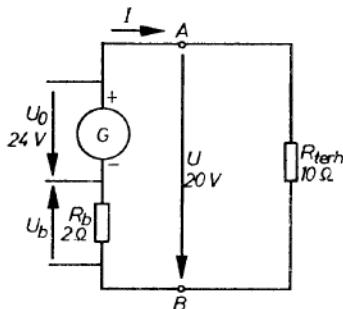
Ha a belső ellenállás hatásának jelentősége van, akkor az áramforrást belső ellenállásával együtt ábrázoljuk (4.1. ábra). Ha az áramforrásról nem veszünk le áramot, akkor az A és B kapcsok között az üresjárási feszültség mérhető. Az áramforrás ekkor üresjárásban működik.



4.1. ábra. Áramforrás helyettesítő kapcsolása

Az áramforrás feszültsége egyenlő az üresjárási feszültséggel.

4.2. ábra. Fogyasztóval terhelt áramforrás



A 4.2. ábrán egy áramforrást az R_{terh} terhelő-ellenállással együtt mutatunk be. Az áramforrásról most I áramot veszünk le. Az áramforrás kapcsain mérhető feszültség, az ún. U kapocsfeszültség U_0 -nál kisebb. Értéke az Ohm-törvényből adódik:

$$I = \frac{U_0}{R_e} = \frac{U_0}{R_b + R_{terh}}.$$

Az R_b belső ellenállásra U_b feszültség esik:

$$U_b = IR_b.$$

Az áramkörben két feszültség van, nevezetesen az U és U_b , továbbá az U_0 üresjárási feszültség.

Kirchhoff második törvénye alapján fennáll, hogy

$$U_0 = U + U_b.$$

Ebből a kapocsfeszültségre az alábbi egyenlet adódik:

$$U = U_0 - U_b, \quad U_b = IR_b, \quad U = U_0 - IR_b.$$

A 4.2. ábra szerinti kapcsolásra érvényes, hogy

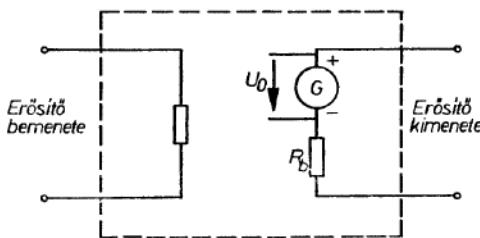
$$I = \frac{U_0}{R_b + R_{terh}} = \frac{24 \text{ V}}{2 \Omega + 10 \Omega} = 2 \text{ A},$$

$$U_b = IR_b = 2 \text{ A} \cdot 2 \Omega = 4 \text{ V},$$

$$U = U_0 - U_b = 24 \text{ V} - 4 \text{ V} = 20 \text{ V}.$$

4.2. Helyettesítő áramforrás

Általánosságban minden olyan berendezés lehet feszültségforrás, amelynek üresjárási feszültsége van és áramot képes leadni. Az erősítők pl. szintén felfoghatók U_0 és R_b belső ellenállású áramforrásként. Ennek helyettesítő kapcsolását helyettesítő áramforrásnak hívják (4.3. ábra).

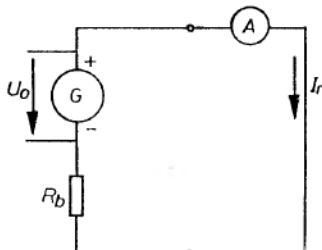


4.3. ábra. Erősítő helyettesítő áramforrása

Ha ismeretlen áramforrás helyettesítő áramforrását kell meghatározni, a következőképpen járunk el:

1. Megmérjük az U_0 üresjárási feszültséget. A feszültségmérő maga nem vehet le áramot az áramforrásról.
2. Megmérjük az I_r rövidzárási áramerősséget (4.4. ábra).

$$I_r = \frac{U_0}{R_b}, \quad R_b = \frac{U_0}{I_r}.$$



4.4. ábra. Az I_r rövidzárási áram mérése

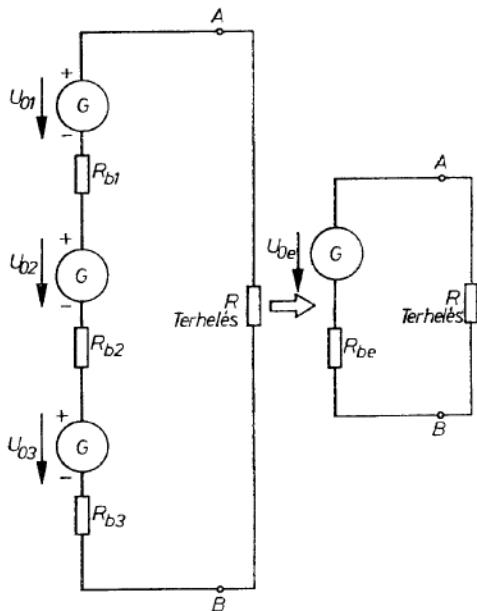
Sok áramforrásnál az I_r rövidzárási áram nem mérhető anélkül, hogy az árammérő vagy a vizsgált készülék ne károsodna. Ebben az esetben két mérést kell végrehajtani különböző nagyságú terhelő-ellenállásokkal.

$$R_b = \frac{\text{a két kapocsfeszültség különbsége}}{\text{a két áramerősség különbsége}}, \quad \text{azaz} \quad R_b = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

4.3. Áramforrások soros kapcsolása

Áramforrások soros kapcsolása esetén az eredő üresjárási feszültség egyenlő az egyes üresjárási feszültségek összegével.

$$U_{0e} = U_{01} + U_{02} + U_{03} + \dots$$



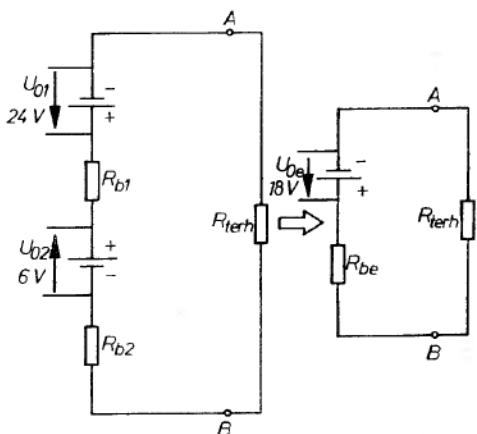
4.5. ábra. Három áramforrás soros kapcsolása

Feltételeztük, hogy a 4.5. ábra szerint minden egyes üresjárási feszültség azonos irányú. Ha az irányuk nem azonos, előjelesen kell összegezni. A 4.6. ábrán az üresjárási feszültségek irása nem azonos. Ezek egymás ellen hatnak. Az eredő üresjárási feszültség a két feszültség különbsége. Az áram abban az irányban folyik, amerre a kettő közül a nagyobbik feszültség kényszeríti.

$$U_{0e} = U_{01} + U_{02},$$

$$U_{0e} = 24 \text{ V} - 6 \text{ V} = 18 \text{ V}.$$

Az áramnak valamennyi sorosan kapcsolt belső ellenálláson át kell folynia.



4.6. ábra. Egymás ellen ható áramforrások (áramforrásként telepet rajzoltunk)

Áramforrások soros kapcsolása esetén az eredő belső ellenállás az egyes belső ellenállások összegével egyenlő.

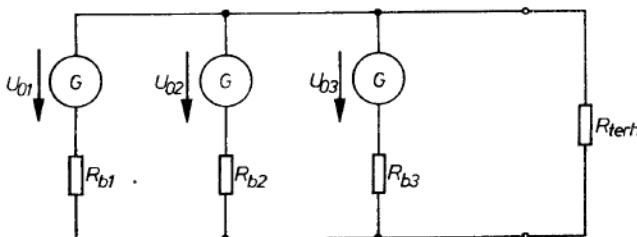
$$R_{eb} = R_{b1} + R_{b2} + R_{b3} + \dots$$

Az áramforrások soros kapcsolásának célja az eredő üresjárási feszültség növelése. Ezzel egyidejűleg számításba kell venni az eredő belső ellenállás növekedését.

4.4. Áramforrások párhuzamos kapcsolása

Csak egyenlő üresjárási feszültségű és belső ellenállású áramforrásokat szabad párhuzamosan kapcsolni (4.7. ábra).

Egyenlő üresjárási feszültséggel és belső ellenállással rendelkező áramforrások párhuzamos kapcsolásakor az eredő üresjárási feszültség egyenlő az egyes áramforrások üresjárási feszültségével.



4.7. ábra. Áramforrások párhuzamos kapcsolása

$$U_{0e} = U_{01} = U_{02} = U_{03}.$$

Az eredő belső ellenállás az ellenállások párhuzamos kapcsolására vonatkozó képletből adódik:

n darab egyenlő belső ellenállású áramforrás párhuzamos kapcsolása esetén az eredő belső ellenállás egyenlő egyetlen áramforrás belső ellenállásának n -ed részével.

$$R_{eb} = \frac{R_b}{n}.$$

Az áramforrások párhuzamos kapcsolásával az a célunk, hogy csökkentsük a belső ellenállást, és így több áramot tudjunk levenni az áramkörről.

Ha eltérő üresjárási feszültségű és belső ellenállású áramforrásokat kötünk párhuzamosan, akkor a terhelőáramon kívül az áramforrások között kiegyenlítőáramok is keletkeznek. Az ilyen kiegyenlítőáramok energiaveszteséget jelentenek, éppen ezért nem kívánatosak.

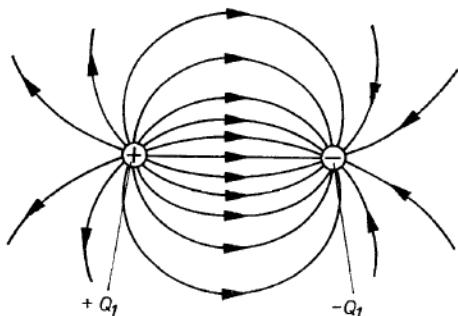
5. Elektromos tér

5.1. Alapfogalmak

Az 5.1. ábrán látható bal oldali golyónak $+Q_1$ nagyságú pozitív töltése van, a jobb oldalinak pedig azonos nagyságú $-Q_1$ negatív töltése.

A két golyó között elektromos erőtér keletkezik, amelyet erővonalakkal ábrázolunk.

Elektromosan töltött testek környezetében minden jelen van az elektromos erőtér, amely a tér különleges állapota.



5.1. ábra. Két elektromosan töltött test közötti elektromos erőtér

Elektromos töltéssel rendelkező testek erőhatást gyakorolnak egymásra.

A különnemű töltéssel rendelkező testek vonzzák egymást.

Az egynemű töltéssel rendelkező testek tasztják egymást.

Ez a következő összefüggéssel írható le:

$$F = K \frac{Q_1 Q_2}{l^2} .$$

ahol F az erő, N; Q_1, Q_2 a testek töltése, C; l a testek közötti távolság, m; K fizikai állandó, értéke:

$$K = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{(\text{As})^2} .$$

Az elektromos erőtér erővonalakkal való ábrázolása egy fizikai modellezés eredménye. Az erővonalak a tér energiaállapotát szemléltetik. Az erővonalak arra törekszenek,

hogy hosszukat megrövidítsék, szomszédos erővonalaktól mért távolságukat pedig megnöveljék. Elektromosan vezető testeknél az erővonalak a test felületére merőlegesen lépnek ki és be.

Az elektromos erővonalak a pozitív töltésnél kezdődnek és a negatív töltésnél végződnek. (Az erővonalak iránya a pozitív felől a negatív felé mutat.)

Az elektromos erőtérbe kerülő töltéshordozókra erő hat.

A pozitív töltéshordozók az erővonalak irányában gyorsulnak.

A negatív töltéshordozók az erővonalakkal ellentétes irányban gyorsulnak.

Az erőhatás az elektromos erőtér térerősségből adódik:

$$F = EQ, \quad \text{ahol } F \text{ az erő, N; } E \text{ a térerősség, V/m; } Q \text{ a töltés, As.}$$

A térerősség egysége:

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{As}}.$$

Példa

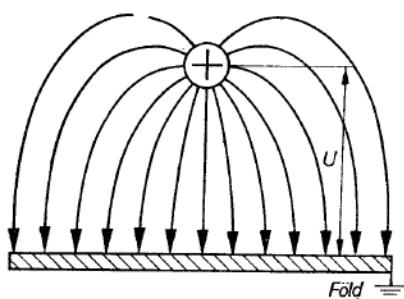
Egy elektromos erőtér térerőssége 20 kV/m. Mekkora erő hat a $0,2 \cdot 10^{-3}$ As töltésre?

$$F = EQ, \quad F = 20000 \frac{\text{V}}{\text{m}} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ As},$$

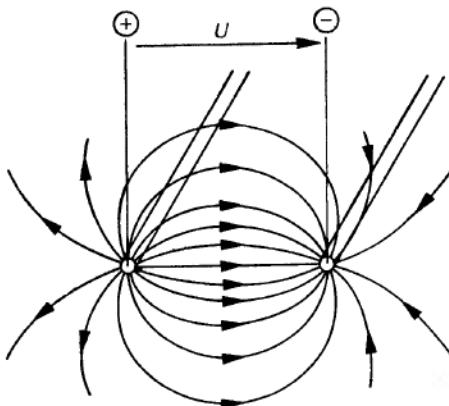
$$F = 20000 \frac{\text{N}}{\text{As}} \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ As}, \quad F = 4 \text{ N.}$$

Ha két pólus között feszültség van, akkor közöttük szintén elektromos erőtér keletkezik. Az 5.2. ábra egy vezeték elektromos erőterét ábrázolja a földhöz képest.

Az 5.3. ábra két párhuzamos vezeték közötti erőteret mutatja.



5.2. ábra. A földhöz képest pozitív feszültségű vezeték elektromos erőtere



5.3. ábra. Két párhuzamos vezeték közötti elektromos erőtér

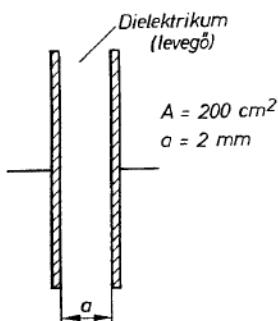
Feszültség alatt álló vezeték elektromos erőtere a szomszédos vezetéken szétválasztja a töltéshordozókat, tehát feszültséget gerjeszt. Ezt a jelenséget megosztásnak nevezik.

A megosztás az elektromos erőtér által okozott feszültségkeltési folyamat.

A megosztás útján gyakran zavarófeszültségek keletkeznek.

5.2. Kapacitás, töltés és energia

Az egymáshoz közeli, de egymástól elszigetelt elektromosan vezető testek feszültséghatására elektromos töltés tárolására képesek. Azt mondjuk, hogy ezeknek a testeknek kapacitásuk (befogadóképességeük, tárolóképességeük) van. A kapacitás nagysága a test méreteitől, a testek távolságától és a közöttük levő szigetelőanyag fajtájától függ. Ezt a szigetelőanyagot dielektrikumnak nevezik. Az 5.4. ábrán bemutatott, egymással szemben, párhuzamosan elhelyezett lemezek kapacitása viszonylag könnyen számítható:



5.4. ábra. Két szemben levő lemezből álló rendszer

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d},$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}},$$

ahol C a kapacitás, F; A egy lemez felülete, m²; d a lemezek távolsága, m; ϵ_0 a légüres tér dielektrikus állandója; ϵ_r a relatív dielektrikus állandó.

A légüres tér ϵ_0 dielektrikus állandója a tér elektromos erőtérre gyakorolt hatását veszi figyelembe. Az ϵ_r relatív dielektrikus állandó azt adja meg, hogy hányszor jobban „vezeti” a dielektrikum az elektromos teret mint a légüres tér (vagy levegő).

Az 5.4. ábra szerinti elrendezésre adódik, hogy

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}, \quad C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ As} \cdot 0,02 \text{ m}^2}{\text{Vm} \cdot 0,002 \text{ m}},$$

$$C = 88,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{V}}, \quad C = 88,5 \cdot 10^{-12} \text{ farad} (= 88,5 \text{ pF}).$$

A kapacitás mértékegsége a farad (F).

$$1 \text{ F} = 1 \frac{\text{As}}{\text{V}}.$$

1 F annak a rendszernek a kapacitása, amely 1 V feszültség hatására 1 As töltést vesz fel.

A farad viszonylag nagy egység, ezért a következő kisebb egységeket szokás használni:

$$1 \text{ mF} \text{ (millifarad)} = \frac{1}{1000} \text{ F} = 10^{-3} \text{ F},$$

$$1 \text{ } \mu\text{F} \text{ (mikrofarad)} = \frac{1}{1000000} \text{ F} = 10^{-6} \text{ F},$$

$$1 \text{ nF} \text{ (nanofarad)} = \frac{1}{1000000000} \text{ F} = 10^{-9} \text{ F},$$

$$1 \text{ pF} \text{ (pikofarad)} = \frac{1}{1000000000000} \text{ F} = 10^{-12} \text{ F}.$$

A tárolt töltésre érvényes, hogy

$$Q = CU.$$

A rendszerben tárolt töltés a kapacitás és a rendszerre kapcsolt feszültség szorzataként adódik.

Az 5.4. ábra szerinti rendszerre 1000 V feszültséget kapcsolva a következő nagyságú töltés tárolódik:

$$Q = CU, \quad Q = 88,5 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 1000 \text{ V}, \quad Q = 88,5 \cdot 10^{-9} \text{ As}.$$

A két lemez közötti elektromos erőtér energiája vagy munkája:

$$W = \frac{1}{2} CU^2.$$

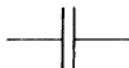
5.3. Egyenfeszültségre kapcsolt kondenzátorok

Az elektronikában különböző nagyságú kapacitásokra van szükség. Ezeket vagy az 5.4. ábra szerint elrendezett párhuzamos lemezek formájában, vagy egymástól elszigetelt fémfólia szalagok feltekercselésével állítják elő. Az ilyen alkatrészeket kondenzátoroknak nevezzük, és az 5.5. ábrán látható módon jelöljük.

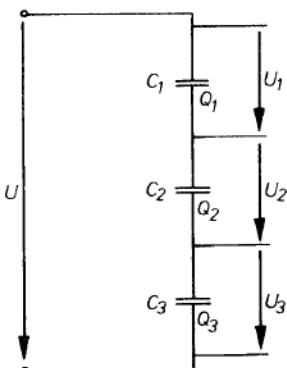
A kondenzátorok meghatározott kapacitással rendelkező alkatrészek.

Soros kapcsolás

Tekintsük az 5.6. ábrán látható három kondenzátor soros kapcsolását!



5.5. ábra. A kondenzátor rajzjele



5.6. ábra. A kondenzátorok soros kapcsolása

A soros kapcsolású kondenzátorok töltése mindenkorban egyenlő.

A feszültséget töltéssel és kapacitással kifejezve kapjuk a kondenzátorok soros kapcsolásának képletét:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q, \quad U_1 = \frac{Q}{C_1}, \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad U_3 = \frac{Q}{C_3},$$

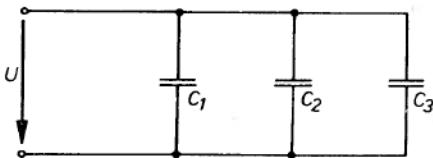
$$U = U_1 + U_2 + U_3, \quad \frac{Q}{C_e} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3},$$

$$Q \frac{1}{C_e} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right), \quad \frac{1}{C_e} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}.$$

Kondenzátorok soros kapcsolása esetén az eredő kapacitás mindenkorban kisebb, mint az egyes kapacitások közül a legkisebb.

Párhuzamos kapcsolás

Az 5.7. ábra kondenzátorok párhuzamos kapcsolását mutatja. Mindegyik kondenzátor ugyanazon a feszültségen van.



5.7. ábra. A kondenzátorok párhuzamos kapcsolása

Az eredő töltés:

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

A töltést a feszültséggel és kapacitással kifejezve:

$$Q_1 = UC_1, \quad Q_2 = UC_2, \quad Q_3 = UC_3, \quad Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3,$$

$$UC_e = UC_1 + UC_2 + UC_3, \quad UC_e = U(C_1 + C_2 + C_3).$$

$$C_e = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

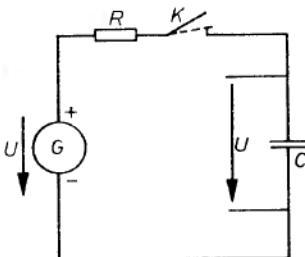
Párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok eredő kapacitása az egyes kapacitások összegével egyenlő.

Kondenzátorok feltöltése

A kondenzátorok feltöltéséhez bizonyos idő szükséges. Ez az idő annál nagyobb, minél nagyobb az áramkörben lévő R ellenállás. Hasonlóképp az idő annál nagyobb, minél nagyobb a kondenzátor C kapacitása. A kondenzátorok feltöltési idejének mértéke a τ időállandó.

A kondenzátor feltöltését az 5.8. ábra mutatja.

$$\tau = RC.$$



5.8. ábra. A kondenzátor feltöltése

A kondenzátorok feltöltése az időállandó ötszörösének megfelelő idő alatt zajlik le.

A feltöltött kondenzátor W energiát tárol, amit hasznosítani lehet (pl. villamos készülékekben).

$$W = \frac{1}{2} CU^2.$$

Kondenzátorok kisütése

A kondenzátorok kisüléséhez meghatározott időre van szükség. Ez az idő szintén az áramkörben levő hatásos R ellenállástól és a C kapacitástól függ. Az időállandónak itt is szerepe van.

$$\tau = RC.$$

A kondenzátorok kisüléséhez az időállandó ötszörösének megfelelő idő szükséges.

Példa

Egy kondenzátor kapacitása $100 \mu\text{F}$. Az alkalmazott töltőfeszültség 600 V .

- a) Mekkora a kondenzátorban tárolt elektromos energia?
- b) Mennyi ideig tart a kisütés, ha az áramkörben $100 \text{ k}\Omega$ ellenállás van?

$$a) W = \frac{1}{2} CU^2, \quad W = \frac{1}{2} \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ F} \cdot 600 \text{ V}^2,$$

$$W = 50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{As}}{\text{V}} \cdot 360\,000 \text{ V}^2, \quad W = 50 \cdot 0,36 \text{ Ws}, \quad W = 18 \text{ Ws}.$$

$$b) \tau = RC = 100\,000 \cdot 100 \cdot 10^{-6} \text{ F}, \quad \tau = 10 \cdot \frac{\text{As}}{\text{V}} = 10 \text{ s}.$$

A kisütési idő: $5\tau = 50 \text{ s}$.

Szigorúan véve, a kondenzátor az időállandó ötszörösének megfelelő idő alatt még nem sül ki teljesen, de elhanyagolhatóan kicsiny töltés marad benne. A kondenzátorok feszültségforrásként használhatók, ott ahol az áramigény kicsi, ami az elektronikában gyakran előfordul). Ilyen esetben egy nagyobb kondenzátor órákra vagy napokra is átveheti a tápegység szerepét. Ezáltal egy esetleges áramkimaradással szemben nyerhetünk védelmet.

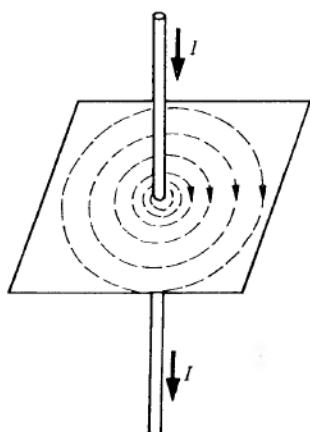
6. Mágneses tér

6.1. Alapfogalmak

A mozgó töltéshordozók a környezetünkben lévő teret különleges, energiával feltöltött állapotba hozzák. A tének ezt az állapotát mágneses erőtének nevezik.

Minden elektromos áram a környezetében mágneses teret hoz létre.

A mágneses teret erővonalakkal ábrázoljuk. Az erővonalaknak irányuk van, ami az áram irányától függ (6.1. ábra).



6.1. ábra. Árammal átjárt vezető körül kialakuló mágneses tér

A vezetőben folyó áram irányából nézve az erővonalak az óramutató járásával megegyező irányban mutatnak.

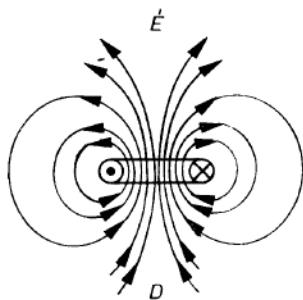
A áramirány és az erővonalak irányának ábrázolási módját a 6.2. ábra mutatja. A mágneses tér erőssége annál nagyobb, minél sűrűbbek az erővonalak. A mágneses erővonalak önmagukban záródó vonalak. Sem nem keresztezhetik, sem nem érint-

Az áram a rajz síkja felé folyik

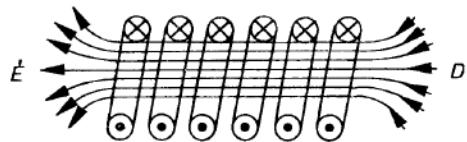
Az áram a rajz síkja felől folyik



6.2. ábra. Az áramirány ábrázolása



6.3. ábra. Körvezető mágneses tere



6.4. ábra. Tekercs mágneses tere

hetik egymást. Több vezető körül kialakult mágneses terek átfedik egymást és eredő mágneses teret hoznak létre. A 6.3. ábra egy körvezető mágneses terét mutatja. A 6.4. ábrán egy tekercs mágneses tere látható. A tekercs több körvezetőből áll.

A mágneses erővonalak a tekercs elején erővonalkötégeként lépnek ki és ott van az északi pólus. A másik tekercsvégen lépnek be és ott van a déli pólus. Az északi (É) és déli (D) pólust mágneses pólusnak hívják.

A mágneses erővonalak az északi pólusnál lépnek ki és a déli pólusnál lépnek be.

6.2. Állandómágnesesség

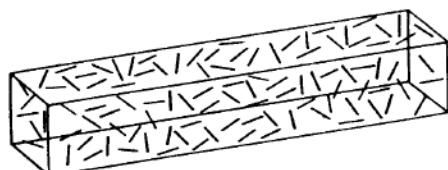
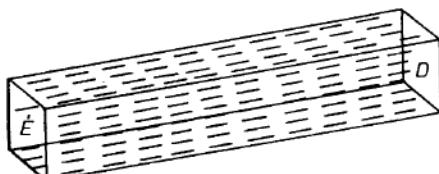
A vas, ill. néhány más fém, valamint bizonyos ötvözletek és oxidok mágnesessé válhatnak, azaz környezetükben mágneses teret hozhatnak létre. Ezeket az anyagokat ferromágneses anyagoknak nevezik.

A ferromágneses anyagok belsőjében mozgásképes töltéshordozók vannak, amelyeknek mágneses erőterük van, és kicsiny elemi mágneses részecskéket képeznek.

A ferromágneses testek elemi mágnesei külső mágneses erőtér hatására rendeződhetnek, és így a test mágnesessé válik.

A 6.5. ábra rendezett és rendezetlen elemi mágnesek modelljét mutatja. A valódi elemi mágnesek rendkívül kicsik és nem láthatók.

A ferromágneses anyagok kemény- vagy lágymágneses anyagok lehetnek.



6.5. ábra. Rendezett és rendezetlen elemi mágnesek modellje

A keménymágneses anyagok a külső mágneses tér hatásának megszűnté után is megőrzik mágnesességüket.

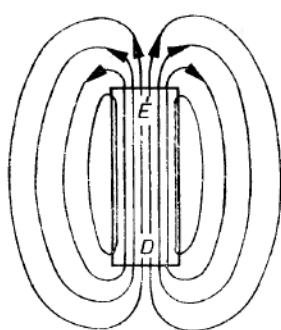
Az állandómágneseket ezekből a keménymágneses anyagokból készítik.

A lágymágneses tulajdonságot mutató anyagok a külső mágneses hatás megszűnésével mágnesességük túlnyomó részét elvesztik.

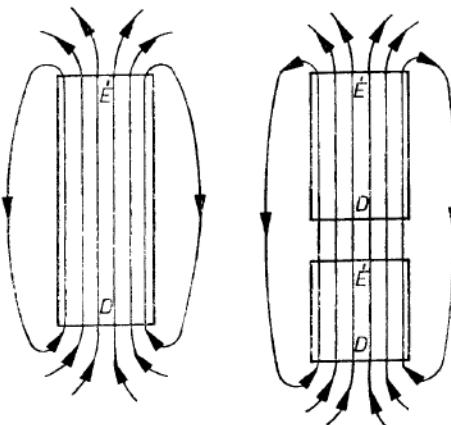
Csupán egy csekély mágnesesség marad vissza, amit remanens mágnesességnak nevezünk.

Lágymágneses anyagokból készítik a tekercsek vasmagját, a transzformátor lemezeit, motorok lemezeit és hasonlókat. Ezen anyagok mágnesezettsgének iránya gyakran megváltoztatható.

A 6.6. ábra egy mágnesrúd erővonalait és pólusait ábrázolja. A mágnesrúd kettévágásával újabb póluspár keletkezik (6.7. ábra).



6.6. ábra. Mágnesrúd erővonalképe



6.7. ábra. Mágnesrúd kettévágásakor keletkező második póluspár

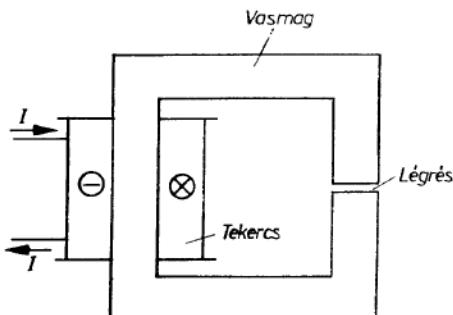
6.3. Mágneses körök

A ferromágneses anyagok a mágneses erővonalakat nagyon jól „vezetik”. Ha a mágneses térbé ún. vasmagot helyezünk, akkor majdnem mindeneket erővonal ezen a vasmagon halad keresztül. A 6.8. ábra ún. mágneses kört ábrázol. A mágneses teret tekercs gerjeszti. A gerjesztést az I áramerősség és a tekercs N menetszáma szorzata adja. Jelölése: Θ .

$$\Theta = IN,$$

ahol Q a gerjesztés, A ; I az áramerősség, A ; N a menetszám (egész szám.)

A vasmag és a légrés két, egymással párhuzamosan kapcsolt mágneses ellenállást képez.



6.8. ábra. Mágneses kör

Mágneses ellenállásokra érvényes, hogy

$$R_m = \frac{I_m}{\mu_0 \mu_r A}, \quad \text{ahol } R_m \text{ a mágneses ellenállás; } I \text{ a közepes erővonal-}$$

hossz;

A a vasmag keresztmetszete, m^2 ; μ_0 a légiüres tér mágneses permeabilitása; μ_r a relatív permeabilitás (permeabilitás: áteresztképesség).

A légiüres tér μ_0 mágneses permeabilitása a tér mágneses erőtérre gyakorolt hatását adja meg.

$$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}.$$

A μ_r relatív permeabilitás azt adja meg, hogy valamely anyag hányszor jobban „vezeti” a mágneses erővonalakat, mint a légiüres tér.

A légrések vagy más, levegőben haladó mágneses utak nagy mágneses ellenállást képviselnek.

A tekercs által gerjesztett összes erővonal képezi a mágneses fluxust. A mágneses fluxus jelölésére a Φ betűt alkalmazzák. Mértékegysége a weber (Wb).

Egy weber egy voltszekundumnak (Vs) felel meg.

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs.}$$

A mágneses körök bizonyos hasonlóságot mutatnak az elektromos áramkörökkel:

Θ megfelel az U -nak, Φ megfelel az I -nek, R_m megfelel az R -nek.

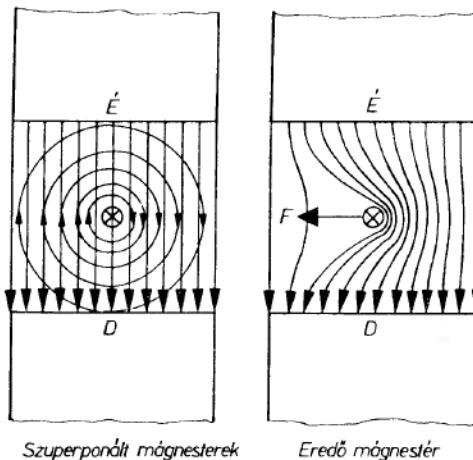
E hasonlóság alapján a mágnesességre érvényes Ohm-törvény adható meg:

$$\Theta = \Phi R_m$$

A gyakorlati számításokhoz ez a törvény nem alkalmas, mivel a mágneses ellenállás nem állandó.

6.4. A mágneses tér erőhatása

Mágneses térbe helyezett áramjárta vezetőre erő hat.



6.9. ábra. Árammal átjárt vezető mágneses térben

A vezetőnek saját mágneses tere van. Ez kölcsönhatásba lép a külső mágneses térrrel (6.9. ábra). Egyik felén mágneses erővonalakban sűrűbb, másik felén ritkább tér keletkezik.

A mágneses erővonalak hosszuk csökkentésére törekszenek.

Az árammal átjárt vezetőre a tér erővonalakban ritkább oldala irányába mutató erő hat.

Az erőhatás szempontjából döntő a mágneses fluxus sűrűsége (másnéven a mágneses indukció), amely egyenletes, ún. homogén mágneses térben:

$$B = \frac{\Phi}{A}, \quad \text{ahol } \Phi \text{ a mágneses fluxus, Vs; } A \text{ a keresztmetszet területe, m}^2; \\ B \text{ a mágneses indukció, } \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}.$$

A Vs/m² egységet teslának (T) nevezik.

$$1 \text{ T} = 1 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2}.$$

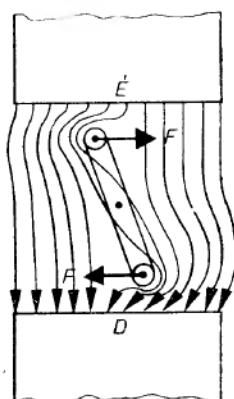
Homogén mágneses térben a vezetőre ható erő a következő egyenletből adódik:

$$F = BIl.$$

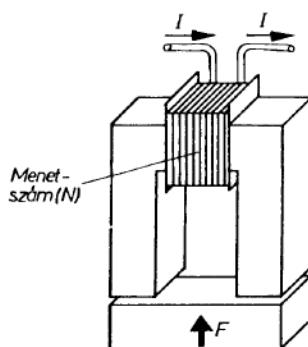
Az F erő Ws/m-ben adódik. Ez az egység a newtonnak (N) felel meg.

$$1 \text{ N} = 1 \frac{\text{Ws}}{\text{m}}.$$

A 6.10. ábrán mágneses térben levő, árammal átjárt tekercset ábrázoltunk. A tekercset elforgathatóan függesztettük fel. A vezetőre erők hatnak, és a tekercs elfordul. Ha most a tekercsben folyó áram irányát megváltoztatjuk, a tekercs tovább forog. Ez az elektromos motorok alapmodellje.



6.10. ábra. Árammal átjárt tekercs mágneses térben



6.11. ábra. Elektromágnes

A ferromágneses testeket a mágnes vonzza. Vannak állandómágnesek és elektromágnesek (6.11. ábra).

A ferromágneses testekre ható erő annál nagyobb, minél nagyobb a B fluxussűrűség, és minél nagyobb az az A felület, amelyen a mágneses fluxus merőlegesen áthalad.

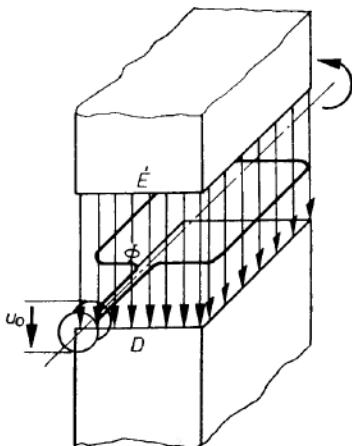
$$F = \frac{B^2}{2\mu_0} A,$$

ahol B a fluxussűrűség, Vs/m²; μ_0 a vákuum permeabilitása; A a keresztmetszet területe, m²; F az erő, N.

6.5. Indukció és önindukció

Mágneses térrrel elektromosan töltött részecskékre erőhatást gyakorolhatunk, amelynek során a töltéshordozók szétválnak és feszültség keletkezik. Ezt a jelenséget indukciónak nevezzük.

Váltakozó mágneses térbe helyezett vezetőkeretben feszültség indukálódik.



6.12. ábra. Forgatható elrendezésű vezetőkeret a generátor működési elvének bemutatására

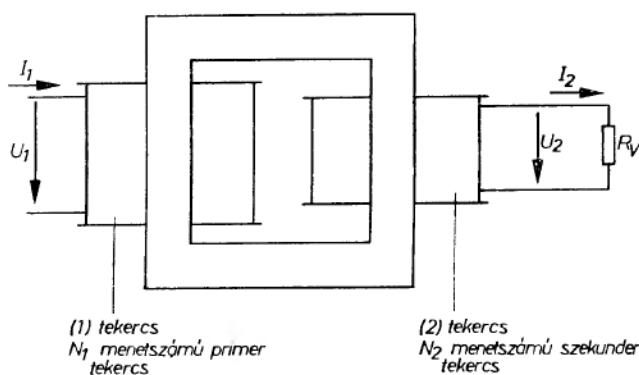
Az indukciótörvény általánosságban a következő:

$$u_0 = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

ahol $\Delta\Phi$ a mágneses fluxusváltozás; t az idő, amely alatt a változás végbemegy; N a menetszám; u_0 az indukált feszültség (üresjárási feszültség). A negatív előjel a feszültség irányát fejezi ki.

Mágneses fluxus növekedése esetén az indukált feszültség negatív, a mágneses fluxus csökkenéskor pedig pozitív.

Ha a 6.12. ábra szerint a mágneses térbe forgatható vezetőkeretet helyezünk el, akkor a keret forgásakor a kereten áthaladó fluxus állandóan változik, és így feszültség keletkezik. Ez a generátorok elvi felépítése. A transzformátor elvét a 6.13. ábra mutatja. Az 1. tekercsen változó áram, pl. váltakozó áram folyik, ami megfelelő mágneses teret hoz létre a vasmagban. Ez a változó mágneses tér áthalad a 2. tekercsen és benne U_2 feszültséget indukál.



6.13. ábra. Transzformátor

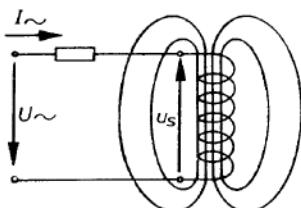
Az U_1 és U_2 feszültség úgy aránylik egymáshoz, mint az N_1 és N_2 menetszám. A menetszámok alkalmas megválasztásával különböző U_2 feszültségeket lehet előállítani.

A transzformátor feszültségátalakító berendezés.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

ahol U_1 az 1 tekercs feszültsége; U_2 a 2 tekercs feszültsége; N_1 az 1 tekercs menetszáma (primer tekercs); N_2 a 2 tekercs menetszáma (szekunder tekercs).

Ha egy tekercsben időben változó áram folyik, akkor a környezetében időben változó mágneses tér alakul ki (6.14. ábra). A tekercs erre a saját mágneses mezőre ugyanúgy reagál, mint valamely idegen mágneses térré, és belsejében feszültség indukálódik. Ezt a jelenséget önindukciónak nevezzük, és az így keletkezett feszültséget önindukciós feszültségnak.



6.14. ábra. Tekercs változó mágneses térben

Az önindukciós feszültség minden gyengíteni igyekszik az őt létesítő hatást.

Ha a tekercsben folyó áram nő, akkor az önindukciós feszültség fékező hatású — az árammal szemben hat. Ha a tekercsben az áram csökken, akkor az önindukciós feszültség megváltoztatja az irányát és az áram fenntartására törekszik. Az önindukciós feszültség tehát minden az áramváltozás ellen hat. Az önindukciós feszültség nagyságát a következő egyenlettel számíthatjuk ki:

$$u_L = -L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

ahol ΔI az áramváltozás, Δt a változáshoz szükséges idő; L az induktivitás; u_L az önindukciós feszültség.

Az L induktivitás, adott önindukciós feszültség előállítására alkalmas tekercs jellemzőitől függő tényező.

Az induktivitás magában foglalja a menetszámnak, vasmagnak, a vasmag anyagának és a légrésnek a hatását, és érvényes rá a következő egyenlet:

$$L = \frac{N^2}{R_m},$$

$$L = N^2 A_L.$$

A mágneses ellenállás reciprok értékét tekercsállandónak (A_L) nevezzük.

$$A_L = \frac{1}{R_m}.$$

A tekercsállandó a kereskedelemben kapható vasmagok mágneses tulajdonságait adja meg és a menetszámmal együtt a tekercs induktivitását határozza meg.

Az induktivitás egysége a henry (H). A henry az Ωs egyenértékű jelölése.

$$1 \text{ H} = 1 \frac{\text{V}}{\text{A}} \text{s} = 1 \Omega\text{s}.$$

1 henry annak a tekercsnek az induktivitása, amelyben 1 s alatt 1 A egyenletes áram-erősség-változás 1 V feszültséget indukál.

A gyakorlatban főleg kisebb mértékegységeit használják:

$$1 \text{ nH (nanohenry)} = \frac{1}{1\,000\,000\,000} \text{ H} = 10^{-9} \text{ H},$$

$$1 \mu\text{H (mikrohenry)} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ H} = 10^{-6} \text{ H},$$

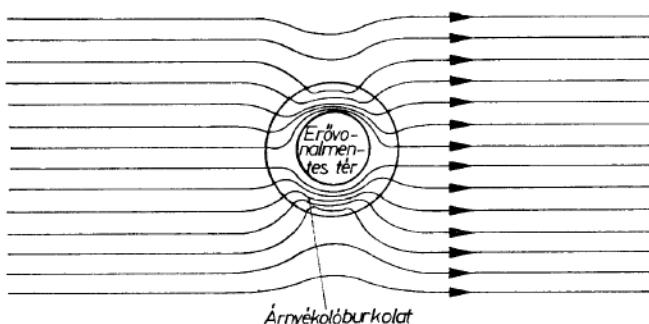
$$1 \text{ mH (millihenry)} = \frac{1}{1000} \text{ H} = 10^{-3} \text{ H},$$

$$1 \text{ kH (kilohenry)} = 1000 \text{ H} = 10^3 \text{ H}.$$

6.6. A mágneses terek árnyékolása

Elektromos vezetékek környezetében minden felépnek mágneses terek, amelyek más vezetékekben feszültséget indukálnak, ami a legtöbb esetben nem kívánatos. Az érzékeny vezetékeket és alkatrészeket védeni kell a mágneses terek hatásától.

A mágneses terek árnyékolóburkolattal árnyékolhatók.



6.15. ábra. A mágneses tér árnyékolása

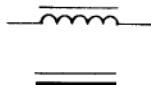
Az árnyékolóburkolatokat jó mágneses vezetési tulajdonságú anyagokból készítik. Minél nagyobb az anyag μ_r mágneses permeabilitása, annál nagyobb az árnyékolóhatás. A mágneses erővonalak az árnyékolóburkolaton „átvezetődnek” (6.15. ábra). A belső tér gyakorlatilag mentes a mágneses tértől.

6.7. Egyenfeszültségre kapcsolt tekercsek

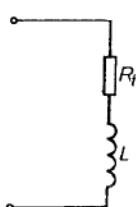
A 6.16. és 6.17. ábrán bemutatott rajzjelek elsősorban az induktivitást jelölik. A tekercs minden jelenlevő ellenállása nincs külön feltüntetve, de az esetek többségében ez az ohmos ellenállás nagyon kicsi.



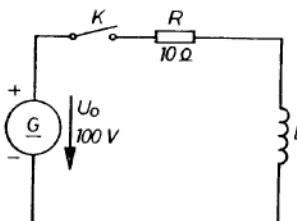
6.16. ábra. A tekercs általános rajzjelei



6.17. ábra. A vasmagos tekercs rajzjele



6.18. ábra. A tekercs helyettesítő képe



6.19. ábra. Az időállandó értelmezése

Vékony huzalból készült, nagy menetszámú tekercsek esetén azonban a tekercselés R_t ellenállása már nem elhanyagolható, és ilyenkor a 6.18. ábra szerinti helyettesítő kapcsolást alkalmazzuk. A 6.19. ábrán az R ellenállás az áramkör eredő ellenállását ábrázolja. Ha az S kapcsolót zárjuk, akkor az I áram lassan emelkedik, mert a tekercs öníndukciós feszültsége fékezi az áramot.

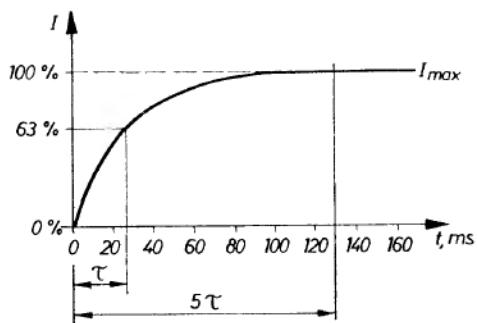
A feszültség ráadása után a tekercs miatt az áram annál lassabban nő, minél nagyobb az L induktivitás és minél kisebb az R ellenállás.

Az áramnövekedés sebességét a τ időállandó írja le.

$$\boxed{\tau = \frac{L}{R}}.$$

A τ időállandó azt az időt adja meg, amely alatt az áram a bekapcsolás után 0-ról a maximális értékének 63%-áig felfut (6.20. ábra).

Ötszörös időállandónyi idő után az áram gyakorlatilag eléri az I_{\max} értéket. A 6.19. ábra szerinti kapcsolásnál az $I_{\max} = 10$ A. Az ötszörös időállandónak megfelelő időt t_{be} bekapcsolási időnek nevezik.



6.20. ábra. Az áram felfutása a tekercs bekapcsolásakor

A tekercsnek most a rákapcsolt feszültség mellett energiája van.

$$W = \frac{1}{2} LI^2.$$

Példa

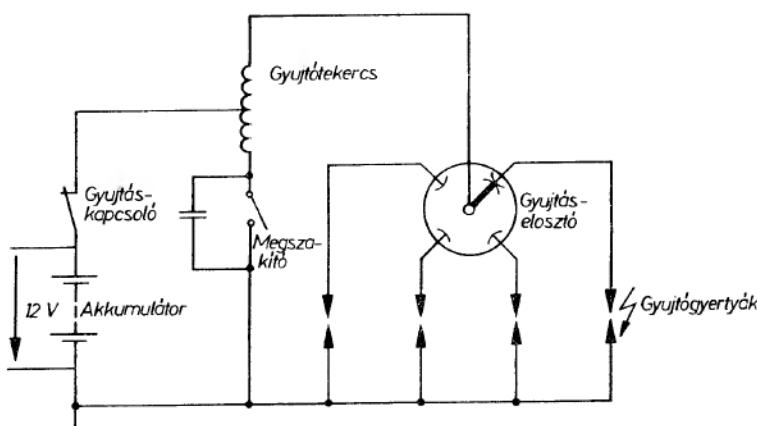
Mekkora a tekercsben tárolt energia, ha az induktivitása 5 H és 10 A arám folyik át rajta?

$$W = \frac{1}{2} LI^2,$$

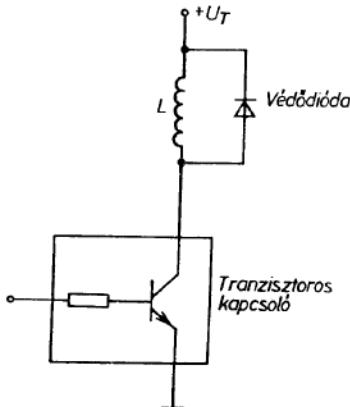
$$W = \frac{1}{2} \cdot 5 \text{ H} \cdot 10 \text{ A}^2 = 2,5 \frac{\text{Vs}}{\text{A}} \cdot 100 \text{ A}^2.$$

$$W = 250 \text{ Ws.}$$

A tekercsben tárolt energia sokféléképpen hasznosítható. Ha a tekercsen átfolyó áramot hirtelen megszakítjuk, akkor a tekercs – induktivitása miatt – igyekszik az áramot fenntartani. A tekercs kapcsain igen nagy feszültség léphet fel, és a megszakítás helyét legtöbbször szikra, kicsiny villamos ív íveli át.



6.21. ábra. Akkumulátoros gyújtás



6.22. ábra. Tekercs védődiódával

A 6.21. ábra a tekercsben tárolt energia felhasználásának egy fontos példáját, a gépjárművek ún. akkumulátoros gyújtását mutatja be. Az elektronikai alkatrészeket, pl. tranzisztorokat tartalmazó kapcsolásokra a tekercsek veszélyt jelentenek. Ha a 6.22. ábra tekercsében az áramot tranzisztoros kapcsolóval megszakítjuk, a tekercs kivezetésein akkora feszültség jöhet létre, hogy tönkreteszzi a tranzisztorot. A nagy feszültség létrejöttét védődióda gátolja meg. A védődiódán áram fog keresztülfolyani, és ennek hatására a tekercs energiája megszűnik. Ami a tekercsre érvényes, igaz a jelfogók tekercselésére is.

Elektronikai kapcsolásokban a tekercseket és a jelfogókat védődiódával kell áthidalni.

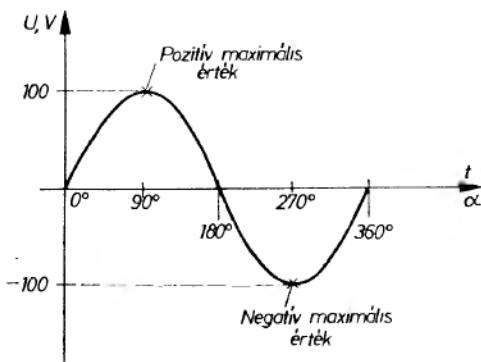
7. Váltakozó feszültség és váltakozó áram

7.1. Szinuszos váltakozó feszültségek

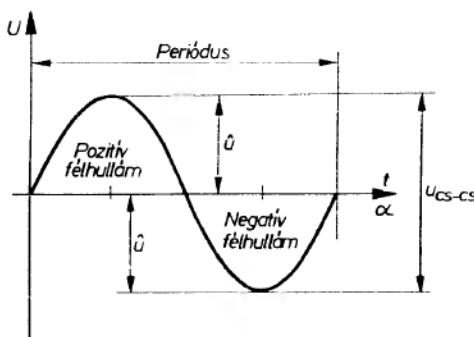
Ha vezetőkeretet homogén mágneses térben forgatunk, akkor benne feszültség indukálódik. Ez a feszültség szinuszos (7.1. ábra).

A feszültség pillanatnyi értéke először 0, aztán a maximális értékig nő, majd ismét 0-ra csökken. Most pólusváltás következik. A feszültség 0 V-tól a legnagyobb negatív értékig (pl. -100 V) csökken, majd újból 0 V lesz. A szinuszos feszültséggörbe ábrázolásakor a vízszintes tengelyen a tekercs α elfordulási szöge vagy az idő tűntethető fel. A 7.2. ábrán néhány, a váltakozó feszültséggel kapcsolatos fogalmat ismertetünk. Megkülönböztetünk pozitív és negatív félhullámot, periódust és periódusidőt.

A szinuszos váltakozó feszültség periódusa egy pozitív és egy negatív félhullámból áll.



7.1. ábra. Szinuszos feszültség



7.2. ábra. A szinuszos váltakozó feszültségi adatok

A legnagyobb pozitív és negatív értéket csúcsértéknek nevezük és a \hat{u} jellet jelöljük (pl. \hat{u}). A két csúcsérték együtt képezi a feszültség „csúcstól csúcsig értékét”, jele: $u_{\text{cs-cs}}$.

$$u_{\text{cs-cs}} = 2\hat{u}.$$

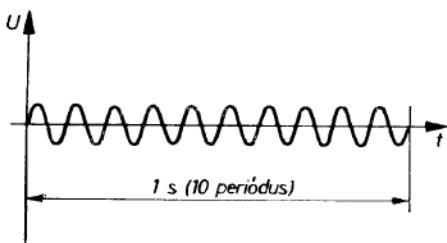
A csúcsértéket amplitúdónak is nevezik.

A periódusidő az az idő, amely alatt egy periódus eltelik. A képletbeli jelölése: T . Fontos jellemző a másodpercenkénti periódusszám. Ezt az adatot frekvenciának nevezik.

A frekvencia a másodpercenkénti periódusszámot adja meg.

A frekvencia jele az f , egysége a hertz (Hz) vagy $\frac{1}{s}$. $1 \text{ Hz} = 1 \frac{1}{s}$.

A 7.3. ábra 10 Hz-es szinuszos váltakozó feszültséget ábrázol. Egy periódus alatt $360^\circ = 2\pi$ szögelfordulás van, f frekvencia esetén a másodpercenkénti eredő szögelfordulás $2\pi f$.



7.3. ábra. A 10 Hz-es szinuszos váltakozó feszültség görbéje

Az egy másodperc alatt megtett eredő szögelfordulást körfrekvenciának nevezik.

$$\omega = 2\pi f.$$

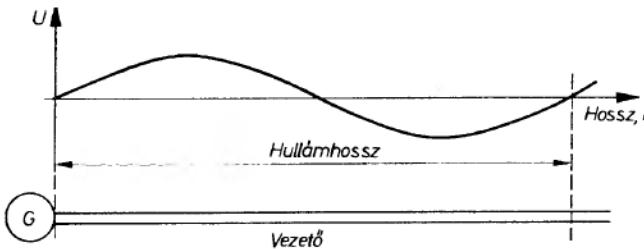
A körfrekvencia jelölésére az ω betűt használják.

$$1 \text{ mHz (millihertz)} = \frac{1}{1000} \text{ Hz} = 10^{-3} \text{ Hz},$$

$$1 \text{ kHz (kilohertz)} = 1000 \text{ Hz} = 10^3 \text{ Hz},$$

$$1 \text{ MHz (megahertz)} = 1 \ 000 \ 000 \text{ Hz} = 10^6 \text{ Hz},$$

$$1 \text{ GHz (gigahertz)} = 1 \ 000 \ 000 \ 000 \text{ Hz} = 10^9 \text{ Hz}.$$



7.4. ábra. A hullámhossz értelmezése

Az európai országokban a hálózati váltakozó feszültség frekvenciája 50 Hz. Észak-Amerikában 60 Hz-es frekvenciát használnak. 50 Hz-nél a periódusidő 20 ms. A periódusidő és a frekvencia között a következő összefüggés áll fenn:

$$f = \frac{1}{T}, \quad T = \frac{1}{f}.$$

A hangfrekvenciás feszültségek frekvenciája kb. 20 Hz és 20 000 Hz közé esik. Rádió- és tévéadóknál kb. 150 kHz...900 MHz frekvenciájú feszültségeket alkalmaznak. minden szinuszos váltakozó feszültségeknek meghatározott hullámhossza van. A feszültségi állapotok a vezetők mentén a fénysebességhez közelí sebességgel terjednek. Ha a vezetőt váltakozó áramú generátorról tápláljuk, akkor a betáplált feszültségállapotok v_0 terjedési sebességgel haladnak a vezeték mentén. Ha a vezeték elegendően hosszú, akkor a feszültséghullám egy vagy több szinuszos lengést alakít ki rajta (7.4. ábra). A szinuszos lengést szinuszhullámnak is nevezik. Egy szinusz-hullám hossza a vezetéken a hullámhossz. Jelölése: λ .

A λ hullámhossz a vezetőnek az a hossza, amelyen egy szinuszhullám alakul ki.

$$\lambda = \frac{v_0}{f},$$

Példa

Mekkora a hullámhossza egy 50 Hz-es és egy 500 MHz-es váltakozó feszültségnek? A terjedési sebesség legyen 280 000 km/s.

$$\lambda = \frac{v_0}{f}.$$

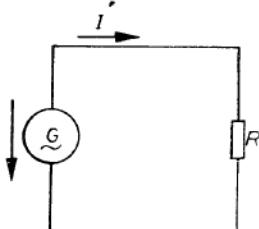
$$50 \text{ Hz esetén: } \lambda = \frac{280\,000\,000 \text{ m}}{50 \frac{1}{\text{s}} \cdot \text{s}} = 5,6 \text{ km},$$

$$500 \text{ MHz esetén: } \lambda = \frac{280\,000\,000 \text{ m}}{500\,000\,000 \frac{1}{\text{s}} \cdot \text{s}} = 0,56 \text{ m} = 56 \text{ cm}.$$

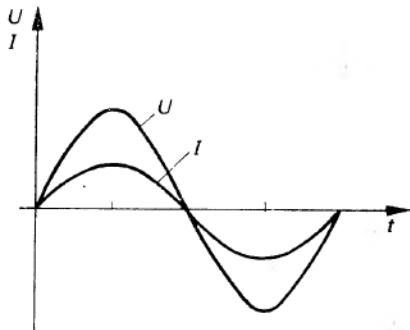
7.2. Szinuszos váltakozó áramok

Ha a váltakozó feszültségű generátort R ellenállással terheljük, akkor váltakozó áramú áramkör jön létre (7.5. ábra). A generátor áramának irányát csakúgy, mint a feszültségirányát tetszőleges pillanatban adjuk meg.

A váltakozó áram időbeli alakulása a váltakozó feszültséghoz hasonló.



7.5. ábra. Váltakozó áramú áramkör



7.6. ábra. Fázisban levő váltakozó áram és feszültség időbeni lefolyása

Azt mondjuk, hogy a váltakozó feszültség és a váltakozó áram fázisban van (7.6. ábra).

A szinuszos váltakozó áramok nagysága és iránya színusfüggvény szerint változik.

Az áramló elektronok oda és vissza vándorolnak a vezetőben és a váltakozó áram frekvenciájával rezegnek. Váltakozó áramú áramkörre ugyancsak érvényes az Ohm-törvény, csak az a kérdés, vajon a feszültség és az áram mely értékét kell behelyettesíteni? A pillanatnyi értékek állandóan változnak. Vehetjük a csúcsértékeket, ami állandó.

Így

$$\hat{i} = \frac{\hat{u}}{R}.$$

Legtöbbször mégis az effektív értéket használják. Az effektív értékek a teljesítmény szempontjából hatásos értékek. Pl. 2 A effektív értékű váltakozó áram valamely ellenálláson ugyanazt a teljesítményt adja le, mint a 2 A erősségű egyenáram (l. még a 9. fejezetet).

Szinuszos váltakozó áramra a csúcsérték és az effektív érték között a következő összefüggés áll fenn:

$$I_{\text{eff}} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} = I.$$

Ennek megfelelően adódik a szinuszos váltakozó feszültség effektív értéke is:

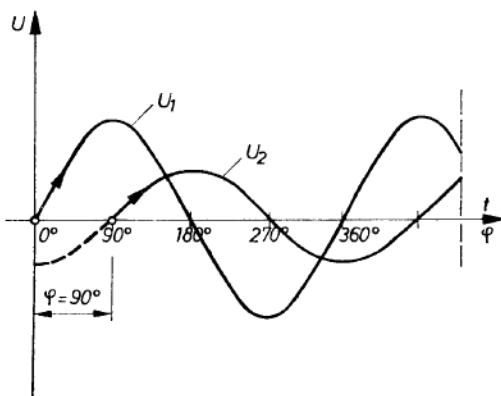
$$U_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} = U.$$

Az eff indexet a gyakorlatban többnyire elhagyják. A pillanatnyi értékeket kisbetűkkel jelölik (i_1 , i_2 , u_1 , u_2). Az \hat{i} , \hat{u} csúcsértékek speciális pillanatnyi értékek. Nagybetsíkkal az effektív értékekre hivatkozunk. Váltakozó áramú körre érvényes, hogy

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

7.3. Vonaldiagram és fázistolás

A váltakozó áramok és feszültségek szinuszrezgései különböző időpillanatokban kezdődhettek. Szinuszgörbék ezért egymáshoz képest időben (és így szögben) eltolódhathat. Az ilyen eltolódást nevezzük fázistolásnak.



7.7. ábra. Fázisban egymáshoz képest 90°-kal eltolt U_1 és U_2 váltakozó feszültségek vonaldiagramja

A 7.7 ábrán a két váltakozó feszültség között 90°-os fáziseltolódás van. Az U_1 feszültség előresiet, azaz a legnagyobb értékét korábban éri el, mint az U_2 feszültség. Azt mondjuk, hogy az U_1 feszültség az U_2 -höz képest 90°-kal siet, vagy az U_2 az U_1 -hez képest 90°-ot késik. Váltakozó áramok és váltakozó feszültségek között gyakran fellép fázistolás. Vonaldiagramok segítségével ez a fázistolás szemléletesen ábrázolható.

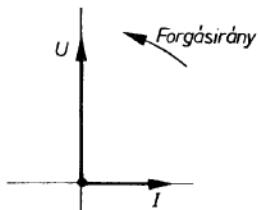
7.4. Vektordiagramok

Ha több szinuszos váltakozó feszültséget kell ábrázolni és összegezni, a vonaldiagram alkalmazása kissé körülményes. Ót, egymáshoz képest fázisban eltolt feszültséggörbe pl. igazán áttekinthetetlen ábrát ad. Ilyenkor alkalmazzuk a vektor-diagramokat.

A szinuszosan változó feszültséget vektorként ábrázoljuk. A feszültségvektort forgó vektorként vesszük fel. Pl. 50 Hz esetén másodpercenként 50-szer fordul körbe a vektor.

Két vektor közötti szög a közöttük lévő fázistolást ábrázolja. A vektor hossza a feszültségek csúcsértékeivel arányos. A szinuszos váltakozó áramok ugyanilyen módon, áramvektorok segítségével ábrázolhatók.

Vektordiagramon csak azonos frekvenciájú mennyiségeket szabad fel tüntetni.



7.8. ábra. Vektordiagram

A 7.8. ábrán látható vektordiagramon egy feszültség- és egy áramvektort ábrázoltunk. A feszültség az áramhoz képest 90° -kal siet. A forgást nem tudjuk ábrázolni, csak jelöljük a forgásirányt.

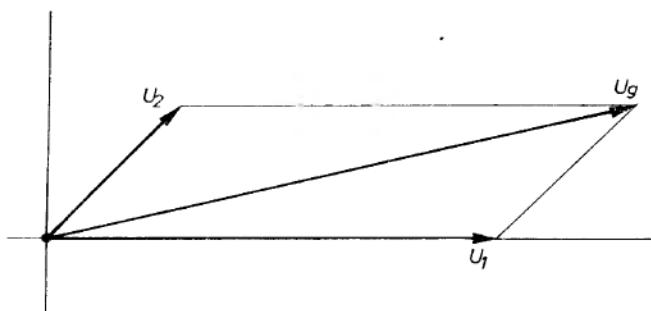
A vektordiagramok mindenkor a vektorok egy pillanatnyi helyzetét ábrázolják.

Példa

Két egyenlő frekvenciájú (pl. 50 Hz-es) váltakozó feszültséget kell vektordiagramon összeadni. A fázistolás a φ szöggel adott.

$$\hat{u}_1 = 12 \text{ V}, \quad \varphi = 0^\circ,$$

$$\hat{u}_2 = 5 \text{ V}, \quad \varphi = 45^\circ.$$



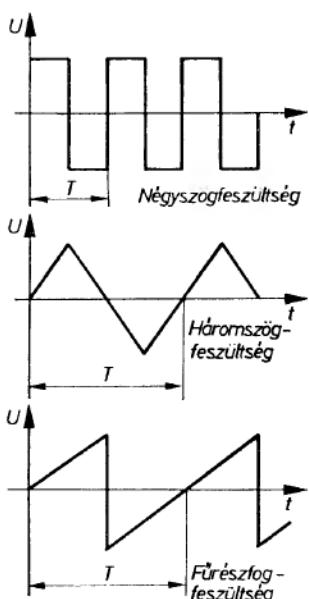
7.9. ábra. Vektordiagram, két feszültség összegzése

A vektort méretarányosan megfelelő φ szögben rajzoljuk fel (7.9. ábra). A két vektort a paralelogrammaszabály figyelembevételével geometriailag összegezzük. Az eredő feszültséget az U_e vektor ábrázolja. A diagramból a csúcsérték és a fázisszög leolvasható.

7.5. Nem szinuszosan váltakozó mennyiségek

Váltakozó mennyiségeken általában váltakozó feszültségeket és áramokat értünk. A nem szinuszosan váltakozó mennyiségeknek más alakjuk, tehát a szinuszostól eltérő időbeli lefutásuk van. Végtelen sokféle időfüggvény van, ill. lehetséges. A 7.10. ábrán a műszaki szempontból fontos időfüggvényeket láthatjuk. A feszültségekre bemutatott időfüggvények éppúgy érvényesek az áramerősségekre is. Előállíthatunk négyzet, háromszög és fűrészfog alakú áramfüggvényeket is.

A vízszintes tengely (időtengely) és a feszültséggörbe között meghatározott területek vannak. Csak akkor beszélünk váltakozó feszültségről, ha a vízszintes tengely alatti és feletti területek egyenlők. Ha ezek a területek nem egyenlők, akkor a feszültséget „vegyes” feszültségnek mondjuk.

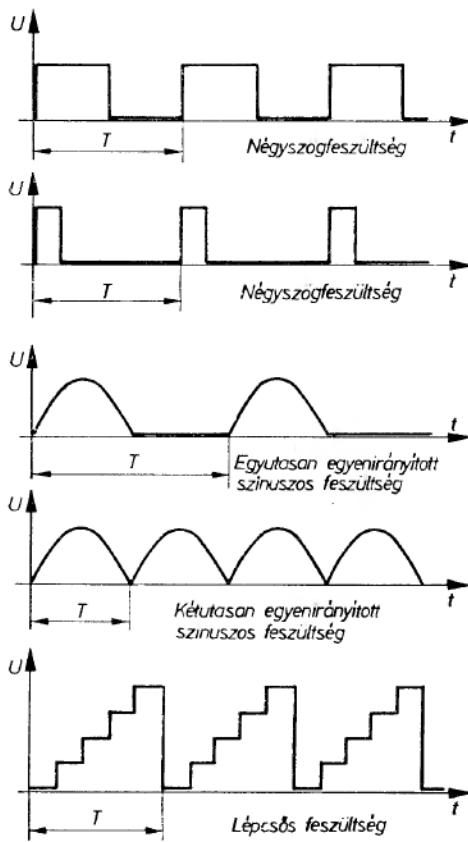


7.10. ábra. Nem szinuszos váltakozó feszültségek

A vegyes feszültség egyenfeszültségre ráültetett váltakozó feszültségből áll.

A 7.11. ábrán bemutatott feszültségek vegyes feszültségek.

A feszültségre érvényes megállapítások az áramerősségekre is érvényesek. Vannak váltakozó áramok és vegyes áramok.



7.11. ábra. Vegyes feszültségek

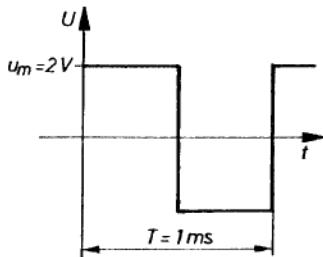
A nem szinuszos váltakozó mennyiségeknek adott T periódusidejük van. Ebből adódik az f_a alapfrekvencia (ismétlődési frekvencia):

$$f_a = \frac{1}{T}.$$

Fourier vizsgálatai szerint minden egyes nem szinuszos mennyiség az alapfrekvencián kívül további frekvenciákat is magában foglal. A pontos számítás a Fourier-analízis segítségével végezhető el.

Minden nem szinuszos feszültség előállítható több, eltérő frekvenciájú és amplitúdójú szinuszos feszültség eredőjeként. Az alkotók között fázistolás lehetséges.

A 0 Hz frekvencia szintúgy előfordulhat, azaz a nem szinuszos feszültségek lehet egyenfeszültségű összetevője is. Ezen állítás helyességének egyik bizonyítékául szolgál a hanglemez. Egyetlen nem szinuszos barázda a hangszedőben gyakorlatilag egyenletes feszültséget állít elő. Ebben a nem szinuszos feszültségben nagyon sok frekvencia van, amelyek a különféle hangszerek, ill. énekszólalomok legkülönbözőbb hangjaitól származnak.



7.12. ábra. Négyszögfeszültség ($u_m = 2$ V, $T = 1$ ms)

A 7.12. ábra szerinti négyszögfeszültség legnagyobb értéke $u_m = 2$ V, periódusa $T = 1$ ms, amiből az 1 kHz-es alapfrekvencia adódik. Ez a négyszögfeszültség Fourier alapján a következő szinuszos feszültségeket foglalja magába:

$$\text{alaprezgés: } f_1 = 1 \text{ kHz}, \quad \hat{u}_1 = \frac{4}{\pi} u_m = \frac{4}{\pi} \cdot 2 \text{ V} = 2,55 \text{ V}, \quad \varphi = 0;$$

$$3. \text{ felharmonikus: } f_3 = 3 \text{ kHz}, \quad \hat{u}_3 = \frac{1}{3} \cdot 2,55 \text{ V} = 0,850 \text{ V}, \quad \varphi = 0;$$

$$5. \text{ felharmonikus: } f_5 = 5 \text{ kHz}, \quad \hat{u}_5 = \frac{1}{5} \cdot 2,55 \text{ V} = 0,510 \text{ V}, \quad \varphi = 0;$$

$$7. \text{ felharmonikus: } f_7 = 7 \text{ kHz}, \quad \hat{u}_7 = \frac{1}{7} \cdot 2,55 \text{ V} = 0,364 \text{ V}, \quad \varphi = 0;$$

$$9. \text{ felharmonikus: } f_9 = 9 \text{ kHz}, \quad \hat{u}_9 = \frac{1}{9} \cdot 2,55 \text{ V} = 0,283 \text{ V}, \quad \varphi = 0;$$

Ha ezeket a feszültségeket összegezzük, közelítőleg négyszög alakú feszültséggörbét kapunk. A négyszögalak közelítése annál jobb, minél tovább folytatjuk az előző sorozatot, minél több felharmonikust veszünk számításba.

Az ideális négyszögfeszültséget akkor kapjuk, ha minden páratlan fokszámú felharmonikust összegezünk 0-tól végig. A $\varphi = 0$ adat azt jelenti, hogy minden szinuszos feszültség $\varphi = 0$ fázisszöggel kezdődik, a fázistolások értéke tehát nulla.

8. Látszólagos ellenállás és vezetés

8.1. Induktív ellenállás és vezetés

Ha tekercsen váltakozó áram folyik kereszti, benne önindukciós feszültség keletkezik. Ez fékezőleg hat az áramkörben folyó áramra. Itt egy másfajta ellenállásról van szó. Az ellenállás oka a keletkező ellenfeszültség. Az elektromos teljesítmény nem alakul át hőteljesítménnyé. Ezt az ellenállást ezért reaktív ellenállásnak, reaktanciának is szokták nevezni. Mivel az ellenállás tekercstől, azaz induktivitástól származik, ezért induktív ellenállásnak nevezzük, és jelölése X_L .

Minden tekercsnek, amelyen váltakozó áram folyik át, van X_L induktív ellenállása.

Szinuszos váltakozó áramra érvényes, hogy

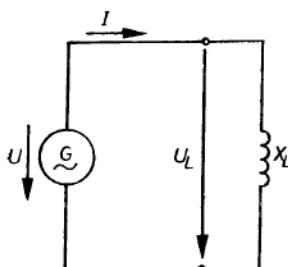
$$X_L = 2\pi fL \quad X_L = \omega L,$$

ahol ω a körfrekvencia, 1/s; L az induktivitás, H; X_L az induktív ellenállás, Ω . Az induktív ellenállás egysége az ohm (Ω).

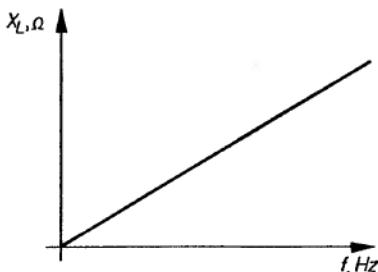
Az induktív ellenállás a frekvencia növekedésével nő.

Az összefüggés lineáris. A 8.1. ábrán látható áramkörben a kétszeres frekvencia kétszeres ellenállásértéket ad (8.2. ábra). Az Ohm-törvény induktív ellenállást tartalmazó áramkörökre is érvényes. Az áramerősségi és a feszültség helyébe az effektív értékeket kell beírni (l. a 8.1. ábrát). Az X_L induktív ellenállású veszteségmentes tekercsekre:

$$I = \frac{U_L}{X_L}.$$



8.1. ábra. Tekercs váltakozó áramú körben



8.2. ábra. Az X_L induktív ellenállás frekvenciafüggése

Az áram és a feszültség között fázistolás van. Az áramerősség 90° -kal késik a feszültséghez képest.

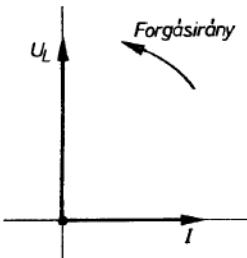
Megjegyzés

Az induktivitás az áramerősséget késlelteti. Vagy másnéven kifejezve:

Szinuszos váltakozó áram esetén az U feszültség veszteségmentes tekercsen az I áramerősséghez képest 90° -kal siet.

Ezt szemlélteti a 8.3. ábra vektordiagramja is.

Az X_L induktív ellenálláson kívül használják az induktív vezetés (B_L) fogalmát is.



8.3. ábra. Veszteségmentes tekercs $U_L - I$ vektordiagramja

$$B_L = \frac{1}{X_L}.$$

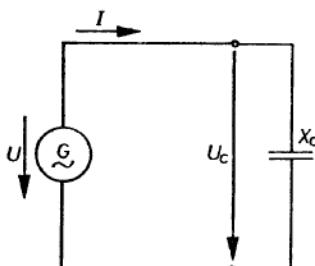
A B_L induktív vezetés az X_L induktív ellenállás reciproka.

Az induktív vezetés egysége a siemens (S).

8.2. Kapacitív ellenállás és vezetés

Váltakozó áramú körbe kondenzátort kapcsolva áram folyik (8.4. ábra).

A kondenzátor a váltakozó áramot átengedi.



8.4. ábra. Kondenzátor váltakozó áramú körben

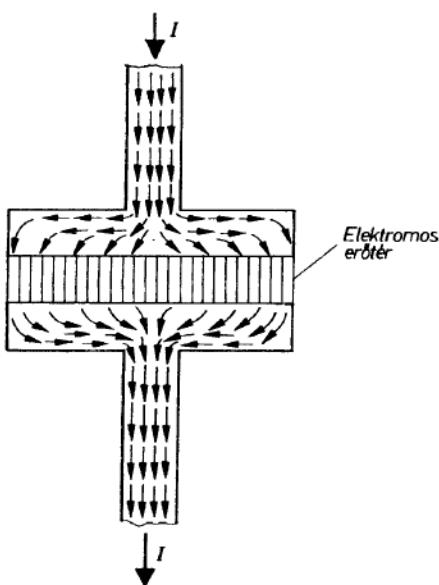
Ez első hallásra meglepő, hiszen a kondenzátor dielektrikuma szigetelő. Váltakozó áramnál az elektronok a vezető belsejében rezgőmozgást végeznek. Ha most a vezetés útjában kondenzátor van, akkor az elektronok a rezgés során felkerülnek a lemezekre, majd ismét vissza (8.5. ábra). A rezgés a keletkező elektromos tér közvetítésével átterjed a kondenzátor másik lemezére. Pontosabban fogalmazva:

A váltakozó áramú rezgés a kondenzátoron keresztül tovaterjed.

A kondenzátor azonban fékező hatás nélkül nem engedi át a váltakozó áramú rezgéseket. A kondenzátor feltöltődik, majd ismét kisül. Az a feszültség, amelyre a kondenzátor feltöltődött, ellenfeszültséggént hat. Az ellenfeszültség miatt itt is fellép egy ellenállás jellegű hatás.

Az ellenfeszültség okozta ellenállást itt is reaktív ellenállásnak szokták nevezni. Mivel ez az ellenállás kondenzátorról, vagyis kapacitástól származik, kapacitív ellenállásról beszélünk, amit X_C -vel jelölünk. A kapacitív ellenállás nem fogyaszt energiát.

Váltakozó feszültségre kapcsolt kondenzátornak kapacitív ellenállása (X_C) van.



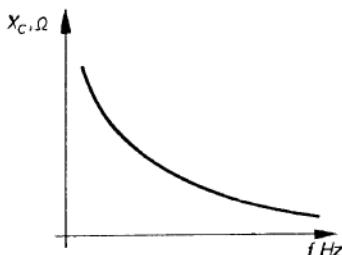
8.5. ábra. A váltakozó áramú rezgés tovaterjedése kondenzátoron keresztül

Szinuszos váltakozó áramra a következő képlet érvényes:

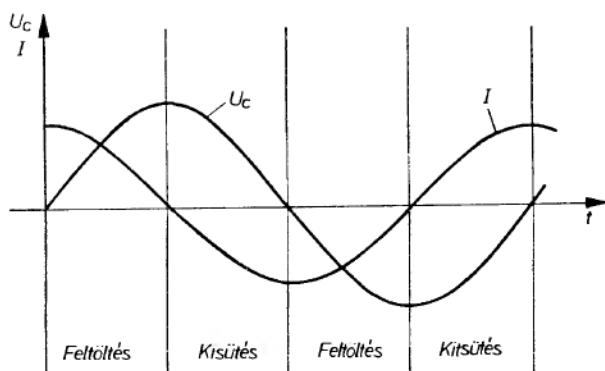
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad \text{vagy} \quad X_C = \frac{1}{\omega C},$$

ahol ω a körfrekvencia, 1/s; C a kapacitás, F; X_C a kapacitív ellenállás, Ω .

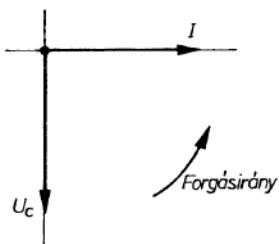
A kapacitív ellenállás a frekvencia növekedésével csökken.



8.6. ábra. A kapacitív ellenállás változása a frekvencia függvényében



8.7. ábra. A kondenzátor U_c feszültségének és I áramának időbeni lefolyása



8.8. ábra. Veszeségmentes kondenzátor $U_c - I$ vektordiagramja

A nagyobb frekvenciájú áramok könnyebben átjuthatnak a kondenzátorokon, mint a kisebb frekvenciájúak. Az X_C frekvenciafüggvényét a 8.6. ábra mutatja. A kondenzátor U_c feszültsége és az I áramerősség között fázistolás lép fel. Veszeségmentes kondenzátorok esetén az áram az U_c -hez képest 90°-kal siet. Ez érthető, ha megmondjuk, hogy a kondenzátoron előbb áramnak kell folynia ahhoz, hogy annak kive-

zetésein feszültség léphessen fel (8.7. ábra). A viszonyokat szemléltető vektorábrát a 8.8. ábra mutatja.

Szinuszos váltakozó feszültség esetén, veszteségmentes kondenzátort feltételezve, az I áram a kondenzátor U_C feszültségéhez képest 90° -kal siet.

Példa

Egy kondenzátor kapacitása $10 \mu\text{F}$. Mekkora az X_C kapacitív ellenállás 50 Hz és 5 kHz esetén?

50 kHz -nél:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \frac{1}{\text{s}} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = \frac{1\ 000\ 000}{6,28 \cdot 500 \frac{\text{As}}{\text{sV}}} = 318,47 \Omega.$$

5 kHz esetén:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{6,28 \cdot 5000 \frac{1}{\text{s}} \cdot 10 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = \frac{1\ 000\ 000}{6,28 \cdot 50\ 000 \frac{\text{As}}{\text{sV}}} = 3,1847 \Omega.$$

Az X_C kapacitív ellenálláson kívül, főleg a számítások egyszerűsítésére használják a kapacitív vezetés (B_C) fogalmát is.

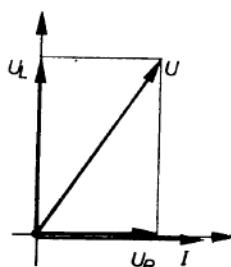
$$B_C = \frac{1}{X_C}.$$

A B_C kapacitív vezetés a kapacitív ellenállás reciproka.

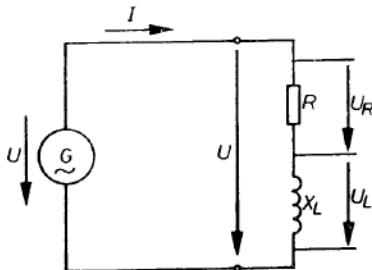
A kapacitív vezetés egysége a siemens (S).

8.3. Impedancia és látszólagos vezetés

A váltakozó áramú körben fellépő eredő ellenállást látszólagos ellenállásnak (impedanciának) nevezzük. Az elnevezés nem túl szerencsés, mert a látszólagos ellenállás valóságos, és nem csak látszólag van jelen. A látszólagos ellenállás jele Z .



8.9. ábra. Az R ellenállásból és X_L induktív ellenállásból álló áramkör és vektordiagramja



8.10. ábra. Az R és X_L látszólagos ellenállás váltakozó áramú körben és a vonatkozó vektordiagram

A 8.9. ábrán az impedancia összetevői R és X_L . A feszültségekre és a Z impedanciára a következő összefüggések érvényesek:

$$U_R = IR, \quad U_L = IX_L, \quad U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2},$$

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

A 8.10. ábra szerinti kapcsolásra értelemszerűen érvényes:

$$U_R = IR, \quad U_C = IX_C, \quad U_C = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}, \quad Z = \sqrt{R^2 + X_C^2},$$

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

Az impedancia tetszőlegesen sok párhuzamosan és sorosan kapcsolt R , X_L és X_C ellenállásból épülhet fel. Nagyon sokféle kapcsolás lehetséges.

Az impedancia mellett a látszólagos vezetést is használják és jele Y .

Az Y látszólagos vezetés a Z látszólagos ellenállás (impedancia) reciproka.

$$Y = \frac{1}{Z}.$$

Mint minden vezetésnek, a látszólagos vezetésnek is siemens (S) a mértékegysége.

9. A váltakozó áram teljesítménye és munkája

9.1. Elektromos teljesítmény

Az egyenáram teljesítménye az áramerősség és a feszültség szorzataként adódik, (l. a 3. fejezetet). Váltakozó áramra alapjában véve ugyanez érvényes. A teljesítmény szintén az áram és feszültség szorzataként adódik, csak a pillanatnyi értékeket kell bchelyettesíteni:

$$p = ui,$$

ahol n a feszültség pillanatnyi értéke, i az áramerősség pillanatnyi értéke.

A váltakozó áram teljesítménye 0 és egy maximális érték között ingadozik, és frekvenciája az áram (vagy feszültség) frekvenciájának kétszerese (9.1. ábra). A gyakorlatban a váltakozó áram P_m közepes (átlagos) teljesítménye érdekes, amelyet P -vel is jelölnek. Ez a váltakozó áram és feszültség effektív értékének szorzatából adódik, ha nincs fáziseltolódás.

$$P = UI,$$

ahol U a feszültség effektív értéke, I az áramerősség effektív értéke.

Az effektív értékek a teljesítmény szempontjából hatásos értékek.

A teljesítmény szempontjából hatásos értékek nagysága a váltakozó áram és a váltakozó feszültség alakjától függ.

Szinuszos alakra a következő összefüggések érvényesek:

$$I = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}},$$

$$U = \frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}.$$

Az effektív értékek alkalmazásával az egyenáramra vonatkozó valamennyi képlet érvényes mindenkor, amíg az U és I között nincs fáziseltolódás.

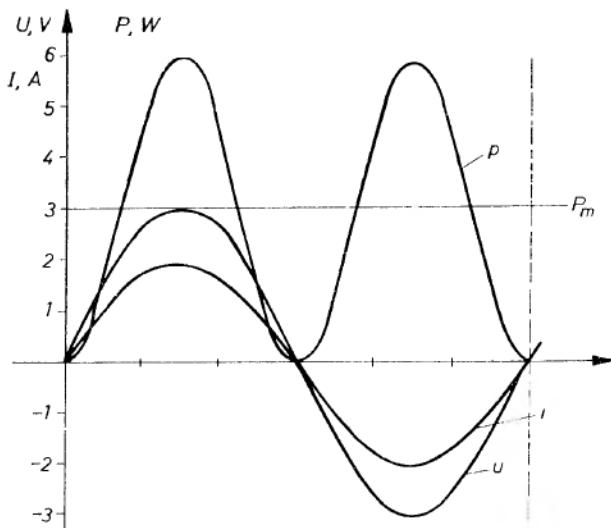
$$P = UI,$$

$$P = \frac{U^2}{R},$$

$$P = I^2 R.$$

A P teljesítmény a hatásos teljesítmény.

Ha a váltakozó áram és a váltakozó feszültség közötti fáziseltolódás 90° , akkor a fogyasztón nincs leadott teljesítmény.

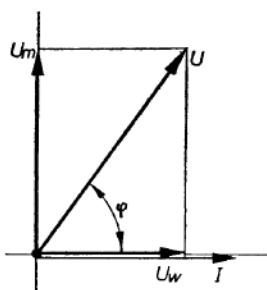


9.1. ábra. A váltakozó áramú teljesítmény időbeli lefolyása

Ez az eset fordul elő a veszteségmentes tekercsekben. Az áram és a feszültség effektív értékének szorzatából képzett mennyiséget meddő teljesítménynek (jele: Q) nevezzük.

$$Q = U_L I = U_C I,$$

ahol U_L a veszteségmentes tekercsen levő feszültség,
 U_C a veszteségmentes kondenzátoron levő feszültség,
 I az áramerősség.



9.2. ábra. Az U feszültség felbontása U_w és U_m összetevőkre

A meddő teljesítmény egysége a watt (W). Watt helyett használják a voltamper reaktív (VAr) elvenezést is. Az áram és a feszültség közötti fáziseltolódás a legtöbb esetben 0° és 90° közé esik (9.2. ábra). Ilyen esetben az U feszültség részfeszültségekre (összetevőkre) bontható fel. Az U_w az az összetevő, amellyel az I áram fázisban van. Az U_w I -vel való szorzata a hatásos teljesítményt adja:

$$P = U_w I.$$

Az U_m feszültség-összetevőnek az áramhoz képest 90° -os a fáziseltolódása. Az U_m -nek az I árammal való szorzata a Q meddő teljesítményt adja:

$$Q = U_m I,$$

A koszinusz- és szinuszszögfüggvényekkel az U_w és U_m más képp is kifejezhető:

$$\cos \varphi = \frac{U_w}{U}, \quad U_w = U \cos \varphi,$$

$$\sin \varphi = \frac{U_m}{U}, \quad U_m = U \sin \varphi.$$

Ezzel a következő fontos teljesítményképletek adódnak:

$$P = UI \cos \varphi,$$

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Számitási célokra az eddigeken kívül az ún. látszólagos teljesítményt alkalmazzák. A képletbeli jelölése: S .

$$S = UI.$$

A látszólagos teljesítménnyel az előző képletek még rövidebben írhatók fel:

$$P = S \cos \varphi,$$

$$Q = S \sin \varphi.$$

A látszólagos teljesítmény egysége szintén a watt. Az 1 W helyett VA is írható.

9.2. Elektromos munka

Az egyenáramhoz hasonlóan a munka váltakozó áram esetén is a teljesítmény és az idő szorzata.

Csak a hatásos teljesítmény végez munkát.

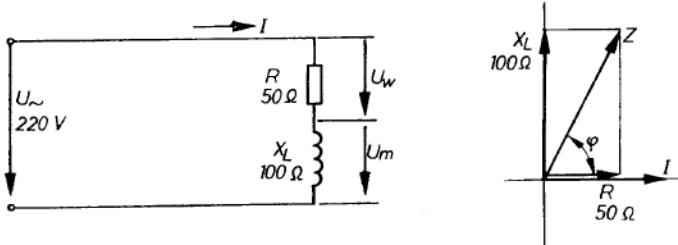
$$W = Pt, \quad \text{ahol } P \text{ a hatásos teljesítmény , W; } t \text{ az idő, s.}$$

A wattszekundum (Ws), más néven joule (J). A Ws-on kívül a 3. fejezetben megadott munkaegységek is szokásosak, különösen a kilowattóra (kWh).

Példa

A 9.3. ábra szerinti fogyasztót váltakozó áramú (220 V-os) hálózatra kapcsoljuk. Mekkora a fogyasztó által felvett látszólagos, hatásos és meddő teljesítmény? Számítsuk ki az U_w és U_m feszültségeket!

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{(50 \Omega)^2 + (100 \Omega)^2} = \sqrt{2500 + 10\,000} \Omega,$$



9.3. ábra. A váltakozó áramú áramkör és vektordiagramja

$$Z = \sqrt{12\,500 \Omega} = 111,8 \Omega,$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220 \text{ V}}{111,8 \Omega} = 1,968 \text{ A},$$

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{50 \Omega}{111,8 \Omega} = 0,4472,$$

$$\varphi = 63,43^\circ,$$

$$\sin \varphi = \sin 63,43^\circ = 0,8944,$$

$$S = UI = 220 \text{ V} \cdot 1,968 \text{ A} = 432,96 \text{ W},$$

$$P = S \cos \varphi = 432,96 \text{ W} \cdot 0,4472 = 193,62 \text{ W},$$

$$Q = S \sin \varphi = 432,96 \text{ W} \cdot 0,8944 = 387,23 \text{ W},$$

$$U_w = IR = 1,968 \text{ A} \cdot 50 \Omega = 98,4 \text{ V},$$

$$U_m = IX_L = 1,968 \text{ A} \cdot 100 \Omega = 196,8 \text{ V}.$$

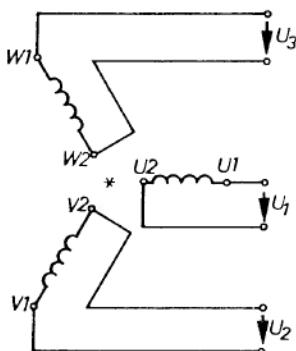
10. Többfázisú váltakozó áram

10.1. Forgóáramú rendszerek

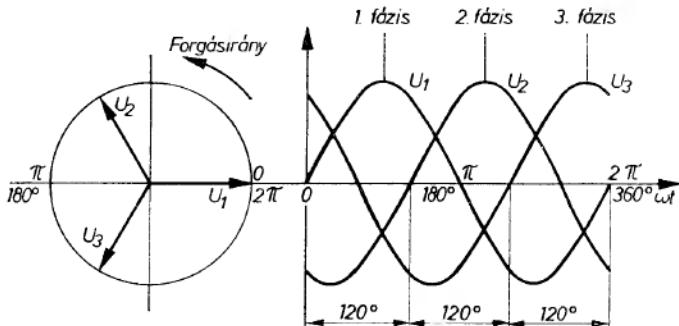
A forgóáram nem különleges áramfajta, hanem különböző fázishelyzetű szinuszos váltakozó áramok eredőjeként jön létre. A 10.1. ábrán látható háromfázisú generátornak három, egymástól különválasztott, egyforma tekercse van. Mindegyik tekercsben szinuszos feszültség indukálódik. A tekercsek térbeli elrendezése olyan, hogy a keletkező feszültségek között 120° -os fáziseltolódás van (10.2. ábra).

Mindegyik feszültség egy fázist jelent. A fázisok együttesen háromfázisú rendszert képeznek. A háromfázisú rendszereket az energiaszolgáltatásban és a gépjárművekben alkalmazzák.

A háromnál több fázisú, forgóáramú rendszereket ritkán használják, de a vezérlés- és szabályozástechnikában találhatunk hatfázisú és kilencfázisú rendszereket is. Az elektronikus hajtásokban tetszőleges fázisszámú forgóáramú rendszerek fordulhatnak elő. Műszakilag legfontosabb forgóáramú rendszer a háromfázisú rendszer. Legtalálóbb ezekre a háromfázisú váltakozóáram-rendszer kifejezés.



10.1. ábra. Háromfázisú generátor



10.2. ábra. A háromfázisú rendszer feszültségei

10.2. Alkalmazások

Az elektromos energia átvitele forgóáramú rendszerekkel igen gazdaságos. A közép-európai energiaátviteli hálózatokat háromfázisú váltakozó áramú rendszerként építik fel. Normális váltakozó árámmal, tehát egyfázisú váltakozó áramú rendszerrel a hálózat kiépítéséhez lényegesen nagyobb vezeték-keresztmetszetei lennének szükségesek, ill. a vezetőkben nagyobb energiaveszteség keletkezne.

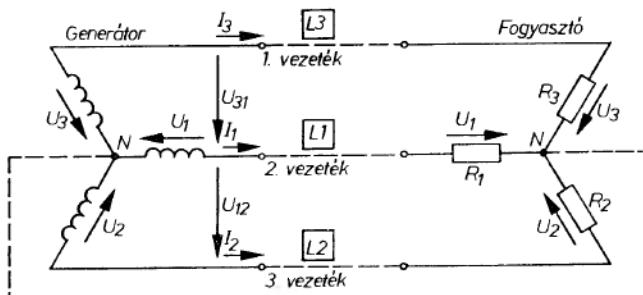
A forgóáramú rendszerek az elektromos energia gazdaságos szállítását és elosztását teszik lehetővé.

A forgóáramú rendszerekkel forgó mágneses teret hozhatunk létre. A forgó mágneses teret forgómezőnek nevezzük. Forgásirányára lehet jobb vagy bal. A forgó mágneses térbe helyezett mágnetstű együttes forog a mezővel. Forgathatóan felfüggesztett, elektromosan vezető testek szintén forgásba jönnek. A forgó mágneses mező ezen tulajdonsága egyszerű motorok előállítását teszi lehetővé. A forgóáramú generátorok is aránylag egyszerűen gyárthatók. A gépjárművek elektromos rendszerét ma többnyire forgóáramú generátorok látják el energiával.

A forgóáramú motorok és generátorok egyszerű felépítésük miatt gazdaságosak.

10.3. Csillagkapcsolás

A 10.1. ábra szerinti háromfázisú generátor U_1 , U_2 , valamint U_3 feszültségeit hat vezetékkel lehetne elvezetni. A tekercsek összekapcsolásával viszont vezetékeket lehet megtakarítani. 10.3. ábrán látható kapcsolást csillagkapcsolásnak nevezzük.



10.3. ábra. Generátor és fogyasztó csillagkapcsolása

Az U_1 , U_2 és U_3 a csillagfeszültség vagy fázisfeszültség. Az $L1$, $L2$ és $L3$ külső vezetékek között pedig az U_{12} , U_{23} , és U_{31} vonalfeszültség mérhető. Az I_1 , I_2 és I_3 áramerősségeket vonaláramoknak hívjuk. A fogyasztó az R_1 , R_2 és R_3 ellenállásokból áll, amelyek szintén csillagkapcsolásúak. A vonalfeszültség minden két fázisfeszültség eredőjeként jön létre.

Csillagkapcsolás esetén a vonalfeszültség $\sqrt{3}$ -szorosát fázisfeszültségnak, és a $\sqrt{3}$ értéket kapcsolási tényezőnek nevezzük.

A fázisáram egyenlő a vonalárammal.

Példa

A fázisfeszültség 220 V (effektív érték). Mekkorák a vonalfeszültségek effektív értékei?

$$U_{12} = \sqrt{3} U_1;$$

$$U_{12} = 1,732 \cdot 220 \text{ V},$$

$$U_{12} = 381 \text{ V} \approx 380 \text{ V}.$$

Az R_1 , R_2 és R_3 terhelő-ellenállások rendesen egyenlő nagyok. Ilyenkor szimmetrikus forgóáramú rendszerről beszélünk.

Szimmetrikus forgóáramú rendszerben az áramerősségek pillanatnyi értékeitőknek összege mindenig nulla.

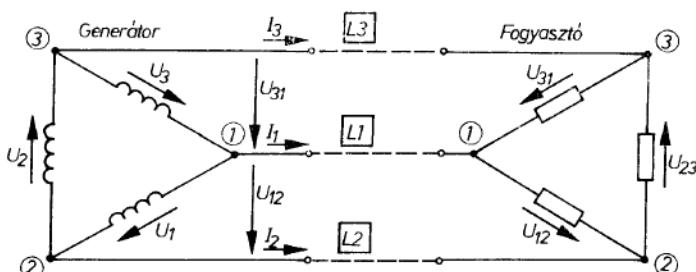
Ez könnyen belátható, mivel az áramoknak egymáshoz képest minden 120° -os fáziseltolódása van. Az N csillagpontról tehát nem szükséges áramot visszavezetni a generátor csillagpontjára. Ha az R_1 , R_2 és R_3 ellenállások nem egyenlő nagyságúak, akkor aszimmetrikus forgóáramú rendszerrel van dolgunk. Az I_1 , I_2 és I_3 összege nem zérus. Az I_0 maradékáramot a fogyasztó N pontjához vissza kell vezetni. A visszavezetés a 10.3. ábrán szaggatott vonallal van feltüntetve.

10.4. Háromszögkapcsolás

A háromfázisú generátor U_1 , U_2 és U_3 feszültsége és a fogyasztó háromszögkapcsolással is összeköthető (10.4. ábra).

A generátor egy tekercsének feszültségét fázisfeszültségnek nevezzük.

A háromszögkapcsolásban két kivezetés közötti vonalfeszültség egyenlő a fázisfeszültséggel.



10.4. ábra. Generátor és fogyasztó háromszögkapcsolása

Az áramok most láncszerűen vannak kapcsolva.

Háromszögkapcsolásban a vonaláram a fázisáram $\sqrt{3}$ -szorosa.

10.5. A forgóáram teljesítménye és munkája

A teljesítmény és a munka számításakor a háromfázisú, szimmetrikus, forgóáramú rendszerből indulunk ki. A terhelő-ellenállások lehetnek hatásos és meddő ellenállások (tekercsek, kondenzátorok). Általánosságban Z látszólagos ellenállásokkal számolunk, és feltételezzük, hogy a Z_1 , Z_2 és Z_3 impedancia egyenlő. A terhelés tehát szimmetrikus.

A 10.5. ábra szerinti csillagkapcsolású fogyasztónál az egyes fázisok látszólagos teljesítménye:

$$S = U_1 I_1, \quad S = U_2 I_2, \quad S = U_3 I_3.$$

A csillagkapcsolás S_Y eredő látszólagos teljesítménye az egyes fázisok látszólagos teljesítményének összege:

$$S_Y = 3S = 3U_1 I_1.$$

Az U_1 fázisfeszültség helyébe az U_{12} vonalfeszültséget írva:

$$U_1 = \frac{U_{12}}{\sqrt{3}}, \quad S_Y = 3 \frac{U_{12}}{\sqrt{3}} I_1.$$

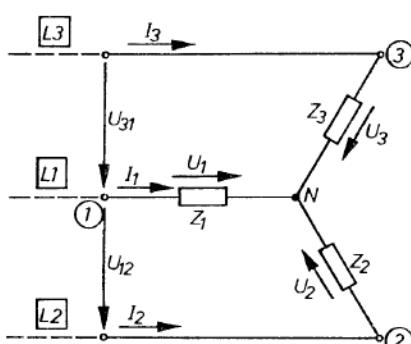
$$S_Y = \sqrt{3} U_{12} I_1 \quad \text{ahol } U_{12} \text{ a vonalfeszültség, V; } I_1 \text{ az áramerősség, A.}$$

A P_Y hatásos teljesítmény és a Q_Y meddő teljesítmény az U_{12} és I_1 közötti φ , fáziseltolódástól függ. A fáziseltolódás a Z impedanciától ered. Tiszta hatásos terhelésnél $\varphi = 0$, tiszta induktív meddő terhelésnél a $\varphi = 90^\circ$. P_Y és Q_Y számítására a következő egyenletek érvényesek:

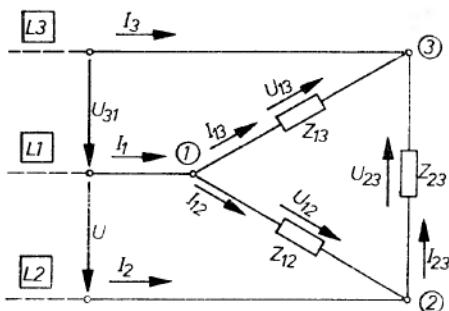
$$P_Y = S_Y \cos \varphi,$$

$$Q_Y = S_Y \sin \varphi,$$

ahol $P_Y = \sqrt{3} U_{12} I_1 \cos \varphi$ és $Q = \sqrt{3} U_{12} I_1 \sin \varphi$.



10.5. ábra. Csillagkapcsolású fogyasztó



10.6. ábra. Háromszögkapcsolású fogyasztó

A 10.6. ábra szerinti háromszögkapcsolásnál a fogyasztói oldalon értelemszerűen a következő érvényes:

$$S_{\Delta} = 3S = 3U_{12}I_{12}.$$

Az I_{12} helyett behelyettesíthetjük az I_1 vonaláramot:

$$I_1 = \frac{I_{12}}{\sqrt{3}}; \quad S_{\Delta} = 3U_{12} \frac{I_{12}}{\sqrt{3}}.$$

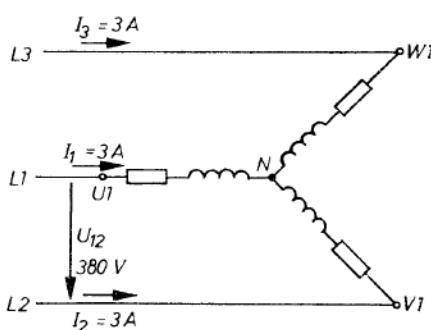
$$S_{\Delta} = \sqrt{3}U_{12}I_{12}, \quad \text{ahol } U_{12} \text{ a vonalfeszültség, V; } I_{12} \text{ a vonaláram, A.}$$

A P_{Δ} hatásos teljesítmény és a Q_{Δ} meddő teljesítmény a φ fáziseltolódás figyelembe-vételével adódik:

$$P_{\Delta} = S_{\Delta} \cos \varphi, \quad P_{\Delta} = \sqrt{3}U_{12}I_{12} \cos \varphi,$$

$$Q_{\Delta} = S_{\Delta} \sin \varphi, \quad Q_{\Delta} = \sqrt{3}U_{12}I_{12} \sin \varphi.$$

A W elektromos munkát az egyfázisú váltakozó áramhoz hasonlóan a hatásos teljesítmény és az idő szorzataként számíthatjuk:



10.7. ábra. Csillagkapcsolású háromfázisú motor helyettesítő kapcsolása

$$W = Pt.$$

A P teljesítmény lehet mind P_Y , mind a P_Δ . A munka egysége a wattszekundum (Ws), ill. a kilowattóra (kWh).

A 10.7. ábrán látható háromfázisú motor 380/220 V-os hálózatról csillagkapcsolásban üzemel. Mindegyik vezetéken 3 A áram folyik. A motor teljesítménytényezője $\cos \varphi = 0,7$.

Mekkora a motor által felvett hatásos teljesítmény? Mekkora a W elektromos munka, tizórás üzemet feltételezve?

Mekkorák az energiaköltségek, ha 1 kWh 1,25 Ft-ba kerül?

$$S_Y = \sqrt{3}U_{12}I_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ V} \cdot 3 \text{ A},$$

$$S_Y = 1974,5 \text{ W}.$$

$$P_Y = S \cos \varphi = 1974,5 \cdot 0,7,$$

$$P_Y = 1382,2 \text{ W}.$$

$$W = P_Y t = 1382,2 \text{ W} \cdot 10 \text{ h} = 13822 \text{ Wh},$$

$$W = 13,822 \text{ kWh}.$$

Tizórás üzem alatt a motor a hálózatból 13,822 kWh energiát vesz fel. A költségek:

$$K = W \cdot 1,25 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}} = 13,822 \text{ kWh} \cdot 1,25 \frac{\text{Ft}}{\text{kWh}},$$

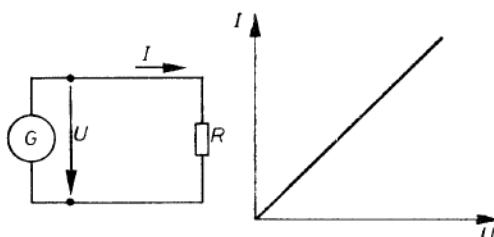
$$K = 17,27 \text{ Ft}.$$

11. Lineáris és nemlineáris ellenállások

11.1. Általános tulajdonságok

Az ellenállások kívánt rezisztenciával rendelkező alkatrészek, amelyek az elektron-áramlással szemben ellenállást fejtenek ki.

Áramkörön belüli viselkedésük alapján lineáris és nemlineáris ellenállásokat különböztetünk meg (a lineáris ellenállás viselkedése a 11.1. ábrán látható).

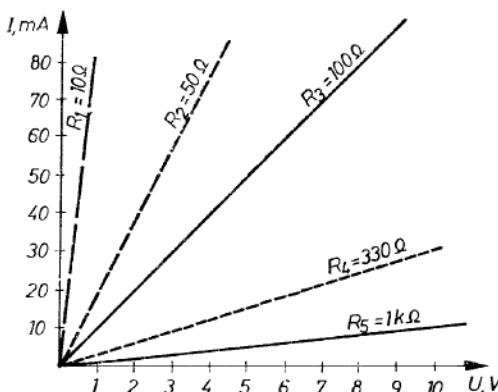


11.1. ábra. Lineáris ellenállás $I-U$ jelleggörbéje

A lineáris $I-U$ jelleggörbével rendelkező ellenállások lineáris ellenállások.

Az áram és a feszültség között meghatározott arányosság áll fenn és az érvényes Ohm-törvény:

$$I = \frac{U}{R}, \quad R = \frac{U}{I}.$$

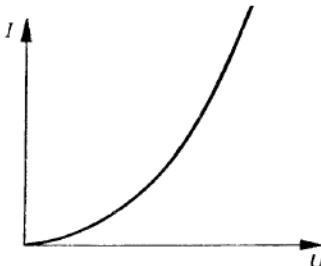


11.2. ábra. Különböző lineáris ellenállások $I-U$ jelleggörbék

Néhány lineáris ellenállás $I-U$ jelleggörbéjét a 11.2. ábra szemlélteti. A lineáris ellenállásokat ohmos ellenállásoknak is nevezik, mivel érvényes rájuk az Ohm-törvény.

A nemlineáris ellenállások $I-U$ jelleggörbéje nemlineáris.

Itt az áram és a feszültség között nincs egyenes arányosság (11.3. ábra), az Ohm-törvény a szokásos formában nem használható.



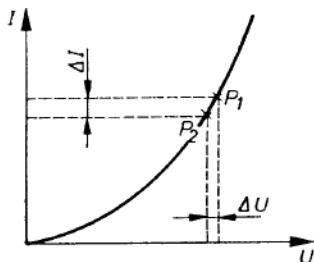
11.3. ábra. Nemlineáris ellenállás $I-U$ jelleggörbéje

Ha a jelleggörbénak csupán egy kis szakaszát tekintjük (11.4. ábra), megállapíthatjuk, hogy az összefüggés közelítőleg lineáris, mivel a jelleggörbe a kicsiny tartományban majdnem egyenes. Meredeksége a ΔU és ΔI segítségével megadható, s ezáltal az ún. r differenciális ellenállást kapjuk:

$$r = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Az r differenciális ellenállás segítségével a vizsgált jelleggörbén I és U kicsi változásait számíthatjuk.

Ha általában ellenállásokról beszélünk, akkor ohmos, azaz lineáris ellenállásra gondolunk. A nemlineáris ellenállások különleges ellenállások. Nem könnyű a nemlineáris ellenállások fogalmát behatárolni. Sokféle alkatrész létezik, amely nemlineáris ellenállásként viselkedik. Nemlineáris tulajdonságokat mutató alkatrészek pl. a félvezető diódák, a tranzisztorok, az elektroncsövek és a tirisztorok. Ezekről majd persze



11.4. ábra. Nemlineáris ellenállás $I-U$ jelleggörbéje
A P_1 és P_2 közti szakaszon a jelleggörbe majdnem lineáris

nem mint nemlineáris ellenállásokról teszünk említést. A valódi nemlineáris ellenállások pl. a VDR ellenállások, ill. az NTK és PTK ellenállások. Az NTK és PTK ellenállások is csak akkor tekinthetők nemlineáris ellenállásoknak, ha a hőmérsékletük az áram változása esetén nem marad állandó.

11.2. Állandó ellenállások

11.2.1. Állandó ellenállások tulajdonságai

Az állandó ellenállások állandó, azaz nem szabályozható értékű ohmos ellenállások. Jellemző adataik :

- névleges ellenállás,
- terhelhetőség,
- tűrés,
- minőségi osztály.

A névleges ellenállások értéke meghatározott szabványsorozatok szerint változik. Az effajta sorozatkialakításoknak gazdaságossági alapjai vannak. Az összes szükséges ellenállásértékre nem állíthatunk elő állandó ellenállásokat. Ha a szabványsorozatban nem található meghatározott ellenállásértékre van szükség, akkor szabályozható ellenállást használhatunk és ezen a kívánt értéket beállíthatjuk.

Az állandó ellenállásokat ma majdnem kizárolag a nemzetközi érvényű IEC szabványsorozatok alapján állítják elő (11.5. ábra).

E 6 ($\pm 20\%$)	1,0		1,5		2,2		3,3		4,7		6,8													
E 12 ($\pm 10\%$)	1,0	1,2	1,5	1,8	2,2	2,7	3,3	3,9	4,7	5,6	6,8	8,2												
E 24 ($\pm 5\%$)	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

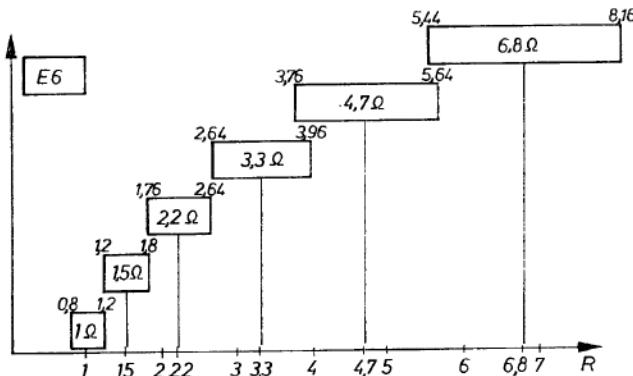
11.5. ábra. E6, E12 és E24 jelű IEC szabvány szerinti ellenállás-sorozatok

Az E6-os szabványsorozat $\pm 20\%$ tűrésű ellenállásokra érvényes. Az E6-os sorozatban a következő névleges ellenállások lehetségesek:

1 Ω ;	1,5 Ω ;	2,2 Ω ;	3,3 Ω ;	4,7 Ω ;	6,8 Ω
10 Ω ;	15 Ω ;	22 Ω ;	33 Ω ;	47 Ω ;	68 Ω
100 Ω ;	150 Ω ;	220 Ω ;	330 Ω ;	470 Ω ;	680 Ω
1 k Ω ;	1,5 k Ω ;	2,2 k Ω ;	3,3 k Ω ;	4,7 k Ω ;	6,8 k Ω
10 k Ω ;	15 k Ω ;	22 k Ω ;	33 k Ω ;	47 k Ω ;	68 k Ω
stb.					

Az E6, E12 és E24 szabványsorozatba tartozó ellenállásokat igen gyakran használják. Ezeken kívül a következő szabványsorozatok vannak még:

E 48 ($\pm 2,5\%$ -os tűréshatár),
E 96 ($\pm 1,0\%$ -os tűréshatár), E192 ($\pm 0,5\%$ -os tűréshatár).



11.6. ábra. Az E6 jelű szabványsorozat egyes névleges ellenállásértékeihez tartozó tűrésmezők

A szabványos sorozatokat úgy határozták meg, hogy az egyes névleges ellenállások tűrésmezői egymást érintsek, ill. kismérvű átfedés legyen közöttük (11.6. ábra). Így sok ellenállás közül tetszőleges ellenállásérték kiválasztható. Az ellenállások jelölésére nemzetközi színkódokat alkalmazunk. A névleges ellenállás és a tűrés értékét mérőszámmal és mértékegységgel is kifejezhettük. Ez a jelölésmód ma főként a nagyobb ellenállásoknál és a nagyobb terhelhetőség esetében szokásos. Az ellenállások terhel-

11.1. táblázat. Az ellenállások négygyűrűs nemzetközi jelölésmódja

Színjelölés	az 1. gyűrű az 1. számérték	a 2. gyűrű a 2. szám- érték	a 3. gyűrű a szorzó	a 4. gyűrű a tűréshatár
Színtelen	—	—	—	±20%
Ezüst	—	—	$10^{-2} \Omega$	±10%
Arany	—	—	$10^{-1} \Omega$	± 5%
Fekete	0	0	$10^0 \Omega$	
Barna	1	1	$10^1 \Omega$	± 1%
Vörös	2	2	$10^2 \Omega$	± 2%
Narancs	3	3	$10^3 \Omega$	
Sárga	4	4	$10^4 \Omega$	
Zöld	5	5	$10^5 \Omega$	
Kék	6	6	$10^6 \Omega$	±0,5%
Ibolya	7	7	$10^7 \Omega$	
Szürke	8	8	$10^8 \Omega$	
Fehér	9	9	$10^9 \Omega$	

Példák

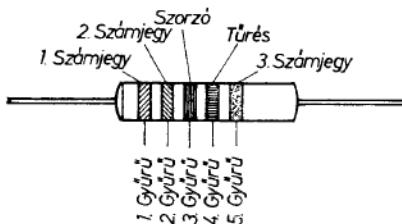
sárga 4	ibolya 7	vörös $\cdot 10^2$	arany $\pm 5\% = 4700 \Omega \pm 5\%$,
kék 6	szürke 8	kék $\cdot 10^6$	— $\pm 20\% = 68 M\Omega \pm 20\%$,
barna 1	zöld 5	narancs $\cdot 10^3$	ezüst $\pm 10\% = 15 k\Omega \pm 10\%$.

11.2. táblázat. Az ellenállások ötgyűrűs nemzetközi jelölésmódja

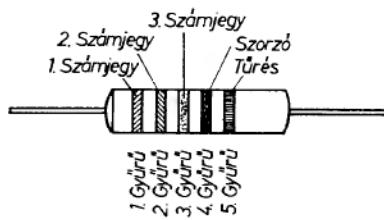
Szín-jelölés	az 1. gyűrű a 1. szám-érték	a 2. gyűrű a 2. szám-érték	a 3. gyűrű a 3. szám-érték	a 4. gyűrű szorzó	az 5. gyűrű a tűrés-határ
Színtelen	—	—	—	—	± 20%
Ezüst	—	—	—	$10^{-2} \Omega$	± 10%
Arany	—	—	—	$10^{-1} \Omega$	± 5%
Fekete	—	—	—	$10^0 \Omega$	
Barna	1	1	1	$10^1 \Omega$	± 1%
Vörös	2	2	2	$10^2 \Omega$	± 2%
Narancs	3	3	3	$10^3 \Omega$	
Sárga	4	4	4	$10^4 \Omega$	
Zöld	5	5	5	$10^5 \Omega$	
Kék	6	6	6	$10^6 \Omega$	± 0,5%
Ibolya	7	7	7	$10^7 \Omega$	
Szürke	8	8	8	$10^8 \Omega$	
Fehér	9	9	9	$10^9 \Omega$	

Példák

barna	szürke	ibolya	narancs	vörös
1	8	7	$\cdot 10^3$	$2\% = 187 \text{ k}\Omega \pm 2\%$
narancs	kék	narancs	arany	barna
3	6	3	$\cdot 10^{-1}$	$1\% = 36,3 \Omega \pm 1\%$
fehér	ibolya	kék	ezüst	zöld
9	7	6	$\cdot 10^{-2}$	$0,5\% = 9,76 \Omega \pm 0,5\%$



11.7. ábra. A nemzetközi színkódok elhelyezkedése négygyűrűs jelölésmód esetén



11.8. ábra. A nemzetközi színkódok elhelyezkedése ötgyűrűs jelölésmód esetén

hetősége szintén osztályokba van sorolva. A névleges terhelési sorozat a következő értékeket tartalmazza:

0,05 W; 0,1 W; 0,25 W; 0,5 W; 1 W; 2 W; 3 W; 6 W; 10 W; 20 W.

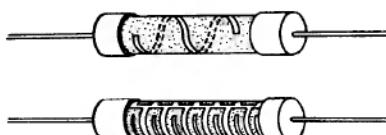
A gyártó által megadott terhelhetőség minden meghatározott környezeti hőmérsékletre (pl. 50 °C) érvényes. E hőmérséklet felett a megengedett terhelhetőség kisebb. A nemzetközi színkódokon belül a négygyűrűs és az ötgyűrűs kódrendszer különböztetjük meg. Az E6, E12 és E24 sorozatba tartozó ellenállásokat négygyűrűs kódossal jelölnek. Az ötgyűrűs jelölésmódot az E48, E96 és E192 szabványsorozatok esetén használják. Az utóbbi az ellenállásérték három értékes jegyre való megadását teszi lehetővé. Az egyes jelölések kódolása a 11.1. és 11.2. táblázatban, gyakorlati alkalmazása a 11.7. és 11.8. ábrán látható.

11.2.2. Az állandó ellenállások kivitele

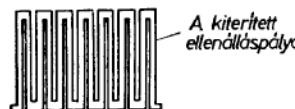
Rétegellenállások

Hengeres kerámia- vagy porcelántestre merítéssel, szórással vagy vákuumpárologtatással vékony vezetőréteget visznek fel. A rétegvastagság 0,001 µm és 20 µm közötti. A réteg anyaga szén, fém (nemesfém is) és fémoxid lehet. A kívánt névlegesellenállásértéket közelítőleg a rétegvastagság, ill. a felvitel idejének megválasztásával érik el. A korszerű gőzöléses technológia utólagos korrekciók nélkül is biztosítja az ellenállások $\pm 10\%$ tűrésen belüli előállítását.

Nagyobb pontossági követelmények esetén az ellenállás értékét a rétegbe való belecsiszolással (köszörüléssel) helyesbítik (11.9. ábra). Spirál alakú becsiszolás esetén a szigetelőtesten körbefutó, szalag alakú ellenálláspálya keletkezik, ami sajnos növeli az ellenállás induktivitását. A hossz- és keresztkirányú beközörlés (meandercsiszolat) előnyösebb (11.10. ábra).

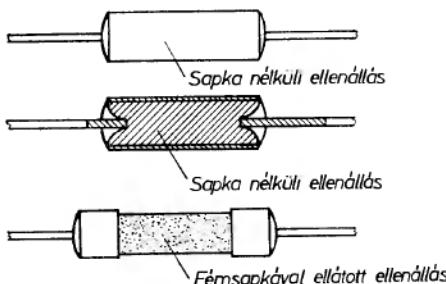


11.9. ábra. Spirális beközörlés



11.10. ábra. Állandó ellenállás meanderköszörüléssel

Az ellenállástestet csatlakozásokkal látják el. Igen kívályó a csatlakozásapkás megoldás. Az ellenálléstest minden két végére (leggyakrabban sárgarézből készült) fémsapkát sajtolnak, amelyre előzőleg csatlakozóhuzalt forrasztanak. Sapka nélküli csatlakozások esetén az ellenálléstest homlokoldalai fémbevonatúak, és a csatlakozóhuzalokat a szigetelőtesten előzetesen kialakított kb. 2 mm mély bemélyedésbe nyomják, majd a fémes bevonattal vezető módon összekötik (11.11. ábra).

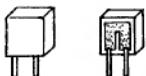


11.11. ábra. A rétegellenállások kiviteli formái

Az ellenállástestet (beleértve az esetleges sapkákat is) lakk- vagy műgyanta bevonattal látják el. Szokásos megoldás az ellenállástest műanyagba préselése is. Ezzel az ellenállás a nedvesség, az agresszív környezet és a mechanikai károsodás ellen védetté válik. A hosszirányú csatlakozók az áramköri lapokra való felszerelés szempontjából nem kedvezőek. A csatlakozókat a beszerelés előtt a helyes hossz figyelembevételével le kell hajlítani és méretre végni (11.12. ábra). Az ellenállások hossza viszonylag nagy rászterosztású nyomtatott áramköri lapot igényel.

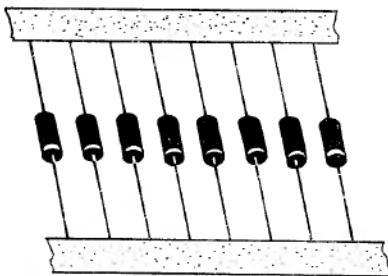


11.12. ábra. Ellenállás beépítési méretre hajlított és levágott csatlakozóhuzalokkal



11.13. ábra. Egyoldalas kivezetőkkel ellátott ellenállás

Az utóbbi időkben a gyártók az ellenállásokat egyre inkább egyoldalas kivezetésekkel kínálják (11.13. ábra). Szigetelőtestként hengeres kerámiatest helyett kerámialapocskákat alkalmaznak. Ezekre a lapocskákra az ellenállásréteget az előzőekben leírt módon viszik fel és becsiszolással helyesbítik. Gyanítható, hogy ez a kivitel lesz a jövő ellenállásformája.



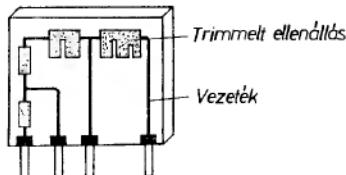
11.14. ábra. Műanyag szalaggal összefogott ellenállások

Ma az ellenállásokat műanyag csíkokkal egybefogva (szalag formájában) szállítják (11.14. ábra). Ezáltal lehetővé válik az áramköri lapok gépi szerelése.

Ellenállások a mikromodultechnikában

A mikromodultechnikában az ellenállásokból, diódákból, tranzisztorokból és kis kapacitású kondenzátorokból készült kapcsolást műanyagba ágyazzák. Az ilyenfajta egységet áramköri modulnak nevezik. Kétféle technológiát különböztetünk meg: a vékony- és a vastagréteg-technikát.

A vastagréteg-technikában az ellenállások előállítására fémpasztákat használnak. A pasztát szípanyomásos eljárással hordják fel a szigetelőestre. Erre a célla alumínium-oxid lapocskákat használnak. A pasztát a felhordás után beégetik. Csiszolással lehetőség van az utólagos helyesbítésre. A vékonyréteg-technika a vákuumban történő rágőzöttetéses eljárást alkalmazza. Kerámia- vagy keményüveg lemezre „ablakkal”

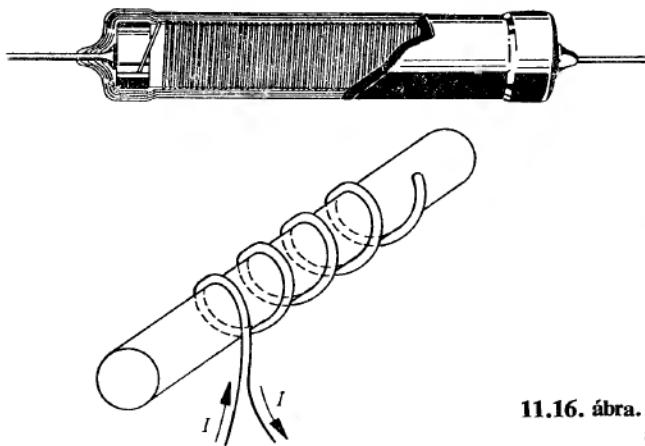


11.15. ábra. Jellegzetes mikromodul

rendelkező maszkot helyeznek fel (11.15. ábra). Ott, ahol ablakok vannak, ellenállásrétegek keletkeznek. Az ellenállásrétegek köszörüléssel is korrigálhatók, de lézersugárral nagyon pontos bemetszések készíthetők. Az ellenállás értéke ezen a módon $\pm 0,1\%$ hibával beállítható.

Huzalellenállások

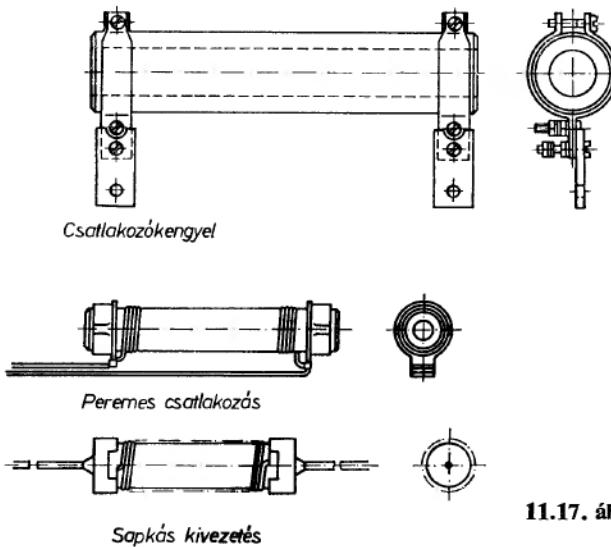
A huzalellenállás úgy készül, hogy hőálló kerámiatestre ellenálláshuzalt tekercselnek. A huzalanyag speciális ellenállás-ötvözeti. A huzalellenállások viszonylag nagy induktivitással rendelkezhetnek. Normális tekercselés esetén pontosan olyan felépítésűek, mint a tekercsek. Azért, hogy lehetőleg kicsi legyen az induktivitás, bifiláris tekercselést alkalmaznak: az ellenálláshuzalt hosszában félbehajtják és duplán tekercselik fel (11.16. ábra). Két egymás mellett fekvő menetben ekkor az áram ellenétes irányban folyik, ezért a körülöttük kialakuló mágneses terek majdnem kioltják egymást. Ennek ellenére is nem elhanyagolható mértékű induktivitás keletkezik. Az induktivitásszegény huzalellenállások is csak kb. 20 kHz-ig alkalmazhatók.



11.16. ábra. A huzalellenállás felépítése és a bifiláris tekercselés elve

Szorosabb tekercselés esetén az ellenálláshuzalt szigetelni kell. Erre néha szigetelőlakkot alkalmaznak, ez azonban hőre igen érzékeny, ezért a felületi oxidréteggel való szigetelés előnyösebb. Nagy terhelhetőségű huzalellenállásoknál négysszög keresztmetszetű ellenálláshuzalt alkalmaznak a tekercselés számára rendelkezésre álló hely jobb kihasználása érdekében. A huzalellenállásokat a legtöbb esetben bilincses, sapkás vagy peremes kivezetéssel szállítják (11.17. ábra). A huzalvéges, sapka nélküli csatlakozás ugyancsak szokásos.

Az ellenállás tekercselése lehet védelem nélküli, vagy lakkal, cementálással, ill. zománcjal védett. A legjobb a zománcozás, a zománc ugyanis porcelánszerű bevonatot



11.17. ábra. Huzalellenállások kiviteli formái

alkot, ami kítűnő védelmet nyújt a nedvesség, az agresszív környezet és a mechanikai igénybevétel ellen. Mechanikai károsodásokkal szemben jó védelmet biztosít a cementálás is, de a nedvességet átereszti.

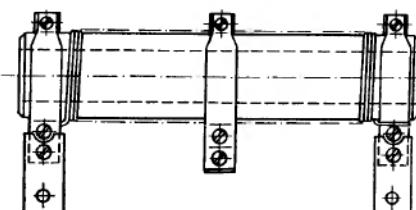
A lakkbevonat nem nyújt komoly védelmet, az ellenállás azonban mégiscsak szigetelt, és a ha a kapcsoláshoz vezetőképes alkatrészek érnek, nem keletkezik károsodás. A védelem nélküli ellenállások teljes mértékben ki vannak téve a mechanikai károsodásnak és a nedvességnak, viszont a forrasztási helyeken levő forraszanyag olvadáspontjáig felmelegíthetők. Ezáltal elég nagy mértékben terhelhetők.

11.3. Változtatható ellenállások

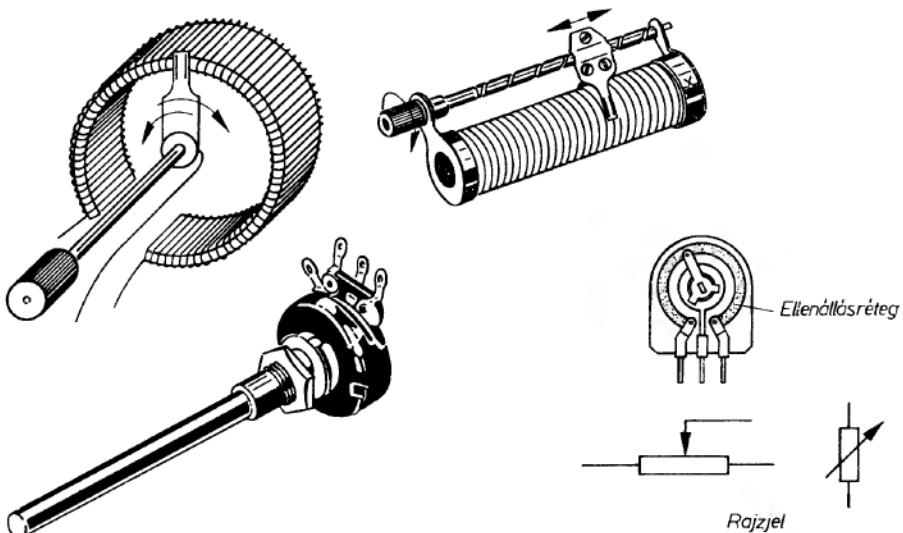
A változtatható ellenállások rezisztenciája meghatározott tartományon belül beállítható. A beállítás a kiviteltől függően forgó tengellyel, csuszkával vagy csavarhúzával végezhető.

A legegyszerűbb változtatható ellenállások védelem nélküli huzalellenállásból állnak, amelyen egy eltolható, bilincses kivitelű közbenső kivezetés van (11.18. ábra).

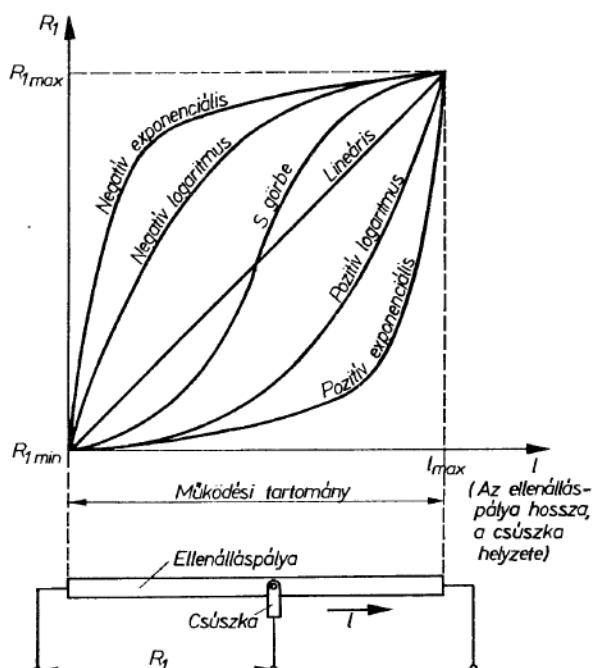
A legtöbb változtatható ellenállás esetében az ellenállás értékét csúszóérintkezővel állítják be. A csúszóérintkező az ellenálláspálya meghatározott hossza mentén mozgatható (11.19. ábra). Ezt a szakaszt működési tartománynak nevezzük. Az ellenálláspálya körgyűrű alakú vagy egyenes kialakítású lehet.



11.18. ábra. Változtatható ellenállás eltolható bilincses kivezetéssel

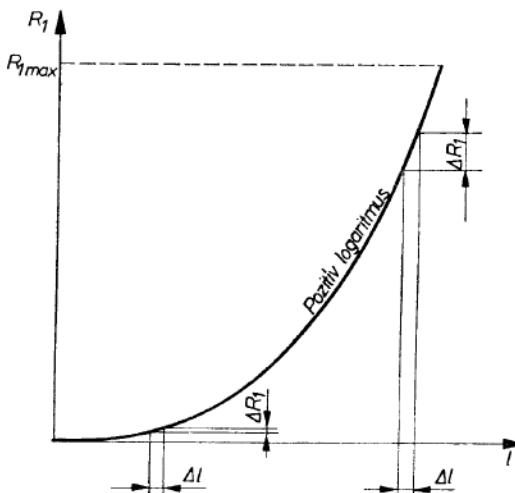


11.19. ábra. Változtatható ellenállások



11.20. ábra. Változtatható ellenállások ellenállás-jelleggörbéi

Minden egyes változtatható ellenállásnak van legkisebb és legnagyobb értéke. A legkisebb érték nulla. A legkisebb és legnagyobb érték közötti tartományban nagyon eltérő lehet az elmozdulás – ellenállás-függvénygörbe (11.20. ábra). Lineáris függvénygörbe esetén az ellenállásérték a pálya növelésével mindenkorán egyenlő mértékben nő. Ez azt jelenti, hogy ugyanakkora szögelforduláshoz mindenkorán egyenlő ellenállás-növekmény tartozik.



11.21. ábra. Az ellenálláspálya ΔI hosszegésgére eső R ellenállás változása pozitív logaritmikus függvény szerint változtatható ellenállás egyes pályaszakaszain

Pozitív logaritmikus függvény görbe esetén a pályaszakasz elején nagyon lassan nő az ellenállás értéke, a működési tartomány végén viszont nagyon meredeken emelkedik (11.21. ábra).

A pozitív logaritmikus ellenállásgörbékű, változtatható ellenállásokat főként a rádió- és tv-készülékek hangerő-szabályozóiban használják, mivel fülünk érzékenysége hasonló jelleggörbékű.

Ezáltal azonos szögelforduláshoz egyenlő hangerő-változás adódik.

A pozitív és negatív exponenciális jelleggörbékű, változtatható ellenállásokat a legkülönbözőbb fajta vezérlésekben alkalmazzák. Az analóg számítástechnikában és navigációs berendezésekben szinuszos és bizonyos S görbe alakú függvény szerint változó ellenállásokra van szükség (11.20. ábra).

A jelleggörbek pontossága a változtatható ellenállás jóságának lényeges jellemzője.

Változtatható rétegellenállások

Az ellenálláspályák hasonló anyagokból készülnek, mint az állandó rétegellenállások esetében, csak a legnagyobb kopásállóságra és a csekély csúszási zajszintre kell törekedni. A csúszási zaj az a zavarófeszültség, amely a csúszóérintkező elmozdulásakor lép fel. Azokat az ellenállásokat, amelyeknek ellenállásértéke egy tengely elforgatásával változtatható, potenciometereknek nevezzük. Az eltolással változtatható ellenállásokat tolóellenállásoknak nevezzük.

A gyártó által megadott terhelhetőség mindenkorban az ellenálláspálya teljes hosszára vonatkozik.

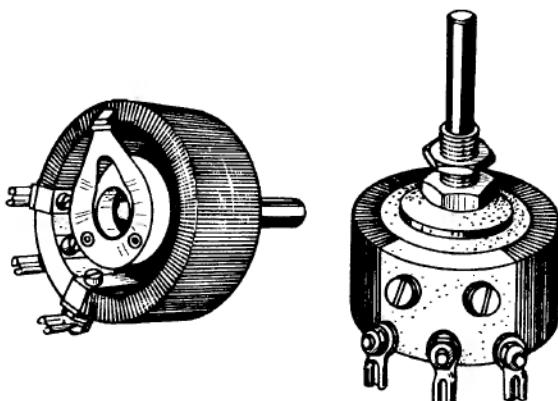
Ha az ellenálláspályának csak egy részén keresztül folyik áram, akkor a terhelhetőség ennek megfelelően kisebb. A változtatható rétegellenállások szokásos terhelhetősége 0,25 W-tól kb. 2 W-ig terjed. A változtatható rétegellenállások gyakran nagy kapacitásúak, és így nagy frekvenciákon nem alkalmazhatók.

Változtatható huzalellenállások

A változtatható huzalellenállásokat közepes és nagy terhelhetőségűre készítik (maximális terhelhetőség kb. 1 kW).

Kivitelüket tekintve tolóellenállások és potenciometerek lehetnek.

Az ellenálláshuzalt kerámiahordozóra csévélík. Az ellenállástekercset vagy védelem nélkül hagyják, vagy cement-, ill. porcelánréteggel vonják be úgy, hogy a csúszóérintkező pályája szabadon maradjon (11.22. ábra). Csúszkaként rugós érintkezőt vagy szénérintkezőt alkalmaznak.



11.22. ábra. Jellegzetes huzalpotenciométerek

A csúszópálya hossza mentén az ellenállás általában lineáris függvény szerint változik, mivel egyéb jelleggörbét nehéz előállítani.

A huzalellenállások szigorúan véve nem folyamatosan, hanem csupán lépcsőzetesen változtathatók. Az ellenállás értékének legkisebb lehetséges növekménye egyetlen menet ellenállásával egyenlő.

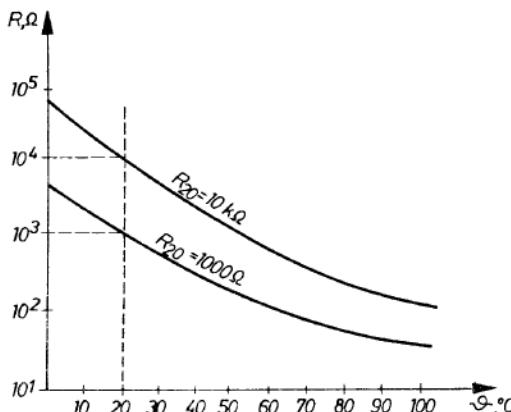
11.4. Melegen vezető (NTK) ellenállások

Működésmód

A melegen vezető ellenállások meleg állapotban igen jól vezetnek, azaz az ellenállás értéke a hőmérséklet növelésével csökken. Elég nagy negatív hőmérséklet-tényezőjük van, ezért NTK ellenállásoknak is nevezik őket (NTK – Negative Temperatur Koefficient).

Az NTK (melegen vezető) ellenállások ellenállása a hőmérséklet növelésével csökken.

A 11.23. ábrán két NTK ellenállás hőmérsékletfüggő jelleggörbékét ábrázoltuk. Az ellenállásértékek változása az adott hőmérséklet-tartományban meglehetősen nagy. A jelleggörbék görbült alakja mutatja, hogy a hőmérséklet-tényező hőmérsékletfüggő. Az α hőmérséklet-tényező nagysága az alkalmazott anyagtól és az NTK ellenállás hőmérsékletétől függ.



11.23. ábra. Az NTK (melegen vezető) ellenállások jelleggörbéi

A szokásos NTK ellenállásoknál a hőmérséklet-tényező $-2\%/\text{ }^\circ\text{C}$ és $-7\%/\text{ }^\circ\text{C}$ közé esik ($\alpha = -0,021/\text{ }^\circ\text{C} \dots 0,071/\text{ }^\circ\text{C}$). Mivel a hőmérséklet-tényező maga is hőmérsékletfüggő, ritkán számolunk vele. A meghatározott hőmérsékletekhez tartozó pontos ellenállásértékek a jelleggörbéről olvashatók le.

Az NTK ellenállások gyártásához alkalmazott anyagok a félvezetők csoportjába tartoznak. Általában vas-oxidot, nikkel-oxidot, kobalt-oxidot, titánvegyületeket és különlegesen adalékolt összetett polikristályos anyagokat alkalmaznak. Ezekben az anyagokban a növekvő hőmérséklettel egyre több elektron lép ki a kötésből és válik mozgásképessé, ezáltal az anyag egyre inkább vezető lesz.

Jellemző adatok és határértékek

A melegen vezető ellenállásokra a gyártók egy sor adatot megadnak. A felhasználó számára a következő jellemző adatok és határértékek kiváltképp fontosak:

R_{20} az ellenállás szobahőmérsékleten ($20\text{ }^\circ\text{C}$ -on); Az R_{20} helyett gyakran az R_{25} -öt vagy R_{40} -et adják meg, ($25\text{ }^\circ\text{C}$ -on, ill. $40\text{ }^\circ\text{C}$ -on az ellenállás.)
 t lehűlési idő;

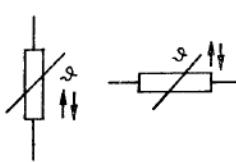
A lehűlési idő azt adja meg, hogy egy P_{\max} teljesítménnyel terhelt NTK ellenállás ellenállásértéke hány s alatt kétszeresödik meg.

T_{tol} a szobahőmérsékleten vagy más adott hőmérsékleten mért ellenállás tűrészhatára;

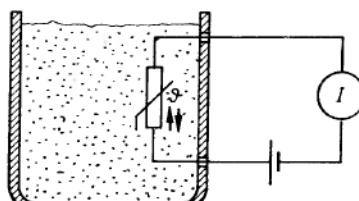
P_{\max} a legnagyobb megengedett terhelhetőség;

$\vartheta_{\max 0}$ a legnagyobb megengedett üzemi hőmérséklet nulla terhelés esetén;

$\vartheta_{\max P}$ a legnagyobb megengedett üzemi hőmérséklet P_{\max} terhelésnél.



11.24. ábra. Az NTK ellenállások rajzjele



11.25. ábra. A melegen vezető ellenállás mint hőérzékelő

A 11.24. ábra a melegen vezető ellenállás rajzjelét mutatja. A nyílak azt jelzik, hogy a hőmérséklet növelésével az ellenállás csökken.

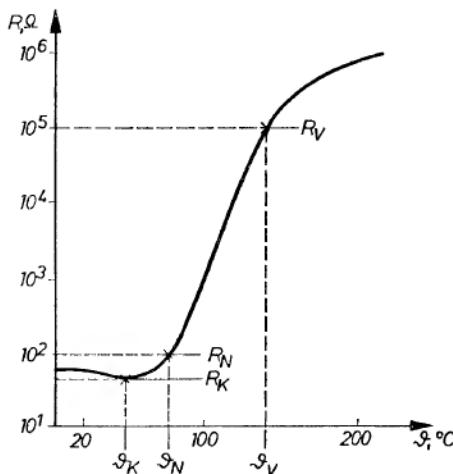
Alkalmazások

A melegen vezető ellenállásokat legtöbbször félvezetős kapcsolások hőmérséklet-stabilizálására használják fel. Áramkörökben a bekapcsolási áramok csökkentésére szolgálnak. Hőérzékelőként szintén jól alkalmazhatók (11.25. ábra).

11.5. Hidegen vezető (PTK) ellenállások

Működésmód

A hidegen vezetők hideg állapotban igen jól vezetnek, azaz az ellenállásuk növekvő hőmérséklettel növekszik. Nagy pozitív hőmérséklet-tényezőjük van, ezért PTK ellenállásoknak (PTK – Positive Temperatur Koefficient) is nevezik őket.



11.26. ábra. A PTK (hidegen vezető) ellenállás ellenállás – hőmérséklet-jelleggörbéje

A PTK (hidegen vezető) ellenállások ellenállása növekvő hőmérséklettel nő.

A 11.26. ábra egy PTK ellenállás ellenállás – hőmérséklet-jelleggörbét ábrázolja. Ha $20^\circ C$ -ról indulva növelni kezdjük a hőmérsékletet, az ellenállás értéke eleinte kissé csökken, mivel a hőmérséklet növelésével töltéshordozók szabadulnak fel, ami a vezetőképességet növeli. Az ellenállás-növekedés a ϑ_K kezdeti hőmérsékleten kezdődik. Az ellenállás-növekedés a ϑ_N hőmérsékletig erősen nemlineáris. A ϑ_N hőmérsékletet névleges hőmérsékletnek nevezzük. A ϑ_N hőmérséklettől a ϑ_V vég'hőmérsékletig bezárólag beszélünk tulajdonképpen a PTK ellenállások üzemi tartományáról. Az ellenállás ezen a szakaszon igen meredeken emelkedik – a legtöbb PTK ellenállás esetén több nagyságrendet is változhat. Az erős ellenállás-növekedés oka az, hogy az anyag kristályai között záróréteg alakul ki.

Az α hőmérséklet-tényező erősen hőmérsékletfüggő és a $20^\circ C$ -tól ϑ_K -ig terjedő tartományban negatív. ϑ_K -tól kezdve a hőmérséklet-tényező pozitív értéket vesz fel,

amely a ϑ_N és ϑ_V közötti szakaszon a legnagyobb. Az α hőmérséklet-tényező nagysága az alkalmazott anyagtól és a PTK ellenállás hőmérsékletétől függ.

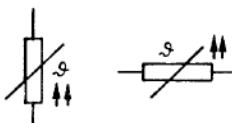
A hőmérséklet-tényező szokásos értékei $0,071/^\circ\text{C} \dots 0,71/^\circ\text{C}$ közé esnek.

A PTK ellenállásokat titanát-kerámia polikristályokból készítik. A titanát-kerámia bizonyos anyagokkal szennyezik. (Ezt az eljárást nevezik dotálásnak.)

Jellemző adatok és határértékek (l. a 11.26. ábrát)

ϑ_K	a kezdeti hőmérséklet,
R_K	a kezdeti ellenállás (ϑ_K -hoz tartozó ellenállás),
R_{25}	a $25\ ^\circ\text{C}$ -on mért ellenállás,
ϑ_N	a névleges hőmérséklet,
R_N	a névleges ellenállás (ϑ_N -hez tartozó ellenállás),
α_R	a hőmérséklet-tényező az $R - \vartheta$ jelleggörbe legmeredekebb szakaszán,
ϑ_V	a véghőmérséklet,
U_{max}	a legnagyobb megengedett üzemi feszültség,
R_v	a végellenállás (ϑ_V -hez tartozó ellenállás),
ϑ_{max}	a legnagyobb megengedett hőmérséklet.

A 11.27. ábrán a hidegen vezető ellenállás rajzjelét mutatjuk be.



11.27. ábra. A PTK ellenállások rajzjele

Alkalmazások

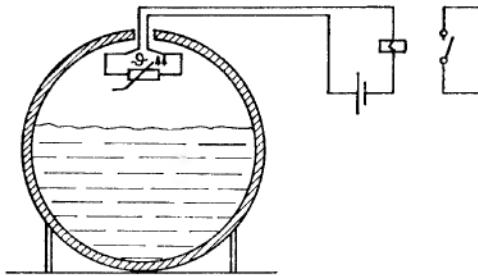
A PTK ellenállások a környezeti vagy saját hőmérséklet-emelkedésük tartományában működtethetők.

A külső hőmérséklet emelkedése

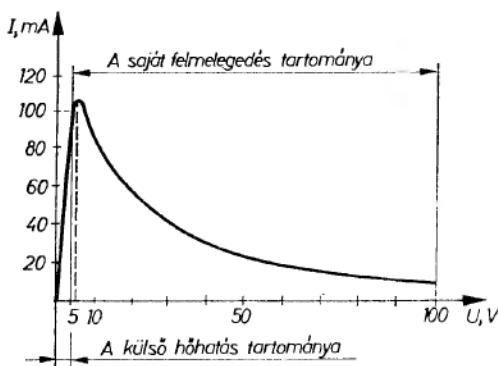
Ha a PTK ellenállásra csak kis feszültséget kapcsolunk (kb. 1 V-ot), akkor az ellenállás hőmérséklete az átfolyó áram hatására gyakorlatilag nem változik, és az ellenállás értéke közelítőleg állandó marad. A PTK ellenállás hőmérsékltét ilyenkor a környezeti hőmérséklet határozza meg. A PTK ellenállást hőmérséklet-érzékelőként alkalmazhatjuk. Beépíthetjük pl. motorok és generátorok tekercselésébe. Ha a gép belséjében a hőmérséklet túlságosan megemelkedne, akkor a beépített biztonsági kapcsoló kiold, vagy az ellenállás-növekedés korlátozza a körben folyó áramot.

Saját felmelegedés

A PTK ellenállást ebben az esetben akkora feszültség terhelí (szokásos érték 10 V és 60 V közé esik), hogy az átfolyó áram észrevehetően felmelegíti az ellenállást. A PTK ellenállás hőmérsékletének emelkedésével ellenállása is növekszik, így a rajta átfolyó áram csökken. Egyensúlyi állapot alakul ki az áram által fejlesztett és a környezetnek leadott hőmennyiség között. Ha a hűtés nem változik, ez a stabil állapot megmarad. A PTK ellenállás hőmérsékletét a rákapcsolt feszültség és a hűtés együttesen határozza meg.



11.28. ábra. A PTK ellenállás mint folyadékszint-érzékelő (pl. mint határértékjelző)



11.29. ábra. A PTK ellenállás feszültség – áram-jelleggörbéje

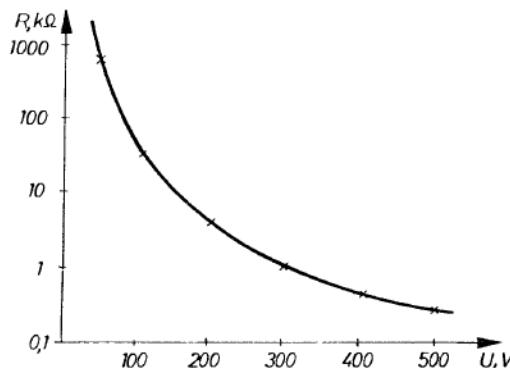
A saját felmelegedés által vezérelt PTK ellenállásokat gyakran alkalmazzák folyadékszintmérőként (11.28. ábra). Ha a folyadék a PTC ellenállást eléri, erősen lehűti, az ellenállás jelentősen megnövekszik, és a tartály töltése megszakítható. A PTK ellenállás áram – feszültség-jelleggörbéjét és működési tartományait a 11.29. ábra mutatja.

11.6. Feszültségfüggő ellenállások

Működésmód

A feszültségfüggő ellenállások ellenállásértéke a rákapcsolt feszültség függvényében változik. Ezeket az ellenállásokat VDR ellenállásoknak is nevezik (VDR – Voltage Dependent Resistor).

A VDR ellenállások előállításához meghatározott szemcsenagyságú és elektromos tulajdonságú szilícium-karbidot alkalmaznak. A szilícium-karbidot kerámia kötőanyaggal tárcsa vagy rúd alakúra sajtolják. Az így készült testet azután szinterelik. Az elektromos tulajdonságokat a szinterelés ideje és hőmérséklete határozza meg. A készre szinterelt ellenállástatestet fém érintkezőfelületekkel és csatlakozóhuzalokkal, valamint védő lakkréteggel lábják el. A szinterelt szilícium-karbid polikristályos félvezető kristályból áll. Ezek a félvezető kristályok különböző vezetőképességű félvezető zónát jelentenek. A kis félvezető zónák között a félvezető diódákéhoz hasonló zárórétegek keletkeznek. E zárórétegek irányítottsága teljesen szabálytalan.



11.30. ábra. A VDR ellenállás rezisztenciájának változása a feszültség függvényében

A feszültség bekapcsolásakor elektromos tér keletkezik, ami a zárórétegeket részben megszünteti. Minél nagyobb a rákapcsolt feszültség, annál nagyobb az elektromos térerősség és annál több záróréteg szűnik meg.

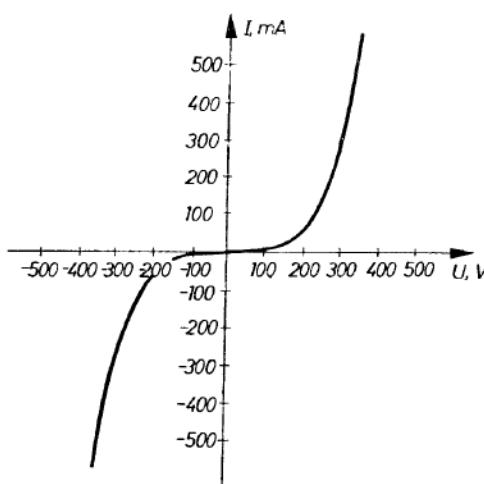
A VDR ellenállások ellenállása növekvő feszültséggel egyre csökken.
A feszültség polaritása nem játszik szerepet.

A 11.30. ábrán az ellenállás feszültségfüggését láthatjuk. A VDR ellenállások $I-U$ jelleggörbékét a 11.31. ábra szemlélteti.

Jellemző adatok és határértékek

A VDR ellenállások viselkedését lényegében az $I-U$ jelleggörbe határozza meg. A görbe a következő egyenlettel írható le:

$$U = CI^\beta,$$



11.31. ábra. A VDR ellenállás $I-U$ jelleggörbéje

$$I = \left(\frac{U}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}},$$

ahol β a szabályozási tényező; C a VDR ellenállás méreteitől függő állandó.

A C állandó azt a feszültséget határozza meg, amely esetén a VDR ellenálláson 1 A erősségű áram folyik keresztül (szokásos értéke 15...5000).

A β szabályozási tényező a jelleggörbe meredekségének mértéke (szokásos értéke 0,15...0,40).

Az iménti értékeken kívül a gyártók az $I-U$ jelleggörbe bizonyos pontjainak értékét (mért értékek) is megadják.

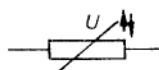
Határértékek

P_{\max} a legnagyobb megengedett terhelhetőség,

ϑ_{\max} a legnagyobb megengedett hőmérséklet.

A jellemző adatokat egyeneszültségre adják meg, és az $I-U$ jelleggörbe ugyancsak egyeneszültségre érvényes. Váltakozó feszültségű üzem esetén az értékek valamelyest eltérnek.

A VDR ellenállások rajzjelét a 11.32. ábra szemlélteti. Az egymással szemben mutató két kicsi nyíl jelzi, hogy növekvő feszültséggel az ellenállás értéke csökken.



11.32. ábra. A VDR ellenállás rajzjele

Példa

Egy VDR ellenállás gyári adatai a következők:

$$C = 100, \quad \beta = 0,2.$$

Hány Ω az ellenállása ennek a VDR ellenállásnak a következő feszültségeken?

- a) 10 V, b) 25 V, c) 50 V, d) 75 V, e) 100 V.

Először az áramerősségeket kell kiszámolni, majd az ellenállások értékeit.

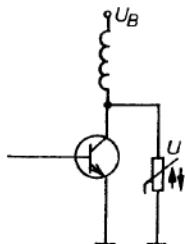
$$a) I = \left(\frac{U}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{10}{100} \right)^{\frac{1}{0,2}} \text{ A} = 0,1^5 \text{ A} = 10 \mu\text{A},$$

$$R = \frac{10 \text{ V}}{10 \mu\text{A}} = 1 \text{ M}\Omega.$$

$$b) I = \left(\frac{U}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{25}{100} \right)^{\frac{1}{0,2}} \text{ A} = 0,25^5 \text{ A} = 0,977 \text{ mA},$$

$$R = \frac{25 \text{ V}}{0,977 \text{ mA}} = 25,59 \text{ k}\Omega.$$

$$c) I = \left(\frac{U}{C} \right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{50}{100} \right)^{\frac{1}{0,2}} \text{ A} = 0,5^5 \text{ A} = 31,25 \text{ mA},$$



11.33. ábra. A VDR ellenállás alkalmazása
a kollektor-emitter-feszültség korlátozására

$$R = \frac{50 \text{ V}}{31,25 \text{ mA}} = 1,6 \text{ k}\Omega.$$

$$d) I = \left(\frac{U}{C}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{75}{100}\right)^{\frac{1}{0,2}} \text{ A} = 0,75^5 \text{ A} = 237,3 \text{ mA},$$

$$R = \frac{75 \text{ V}}{237,3 \text{ mA}} = 316 \Omega.$$

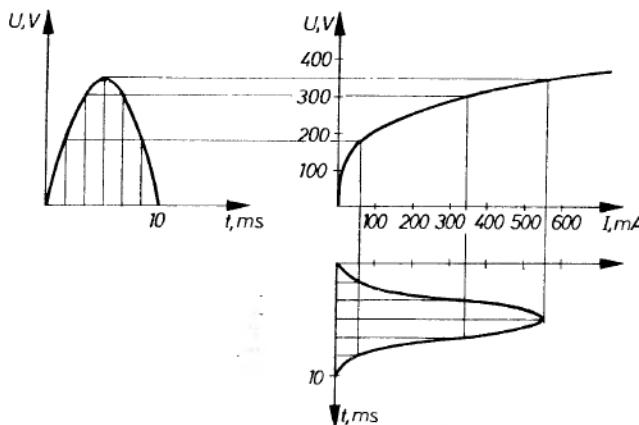
$$e) I = \left(\frac{U}{C}\right)^{\frac{1}{\beta}} = \left(\frac{100}{100}\right)^{\frac{1}{0,2}} \text{ A} = 1^5 \text{ A} = 1 \text{ A},$$

$$R = \frac{100 \text{ V}}{1 \text{ A}} = 100 \Omega.$$

A VDR ellenállások beépítésekor ügyelni kell arra, hogy a megengedett legnagyobb terhelhetőséget ne lépjük túl. A tényleges terhelés a $P = UI$ egyenletből adódik. A tényleges terhelésnek minden kisebbnek kell lennie, mint a legnagyobb megengedett terhelhetőség.

Alkalmazások

A feszültségsűrű ellenállások kiválóan alkalmassak feszültségkorlátozásra. Túlfeszültség veszélyének kitett alkatrészek védelmére, azokkal párhuzamosan kapcsolva



11.34. ábra. A VDR ellenállás árama szinuszos váltakozó feszültség esetén

védőellenállásként is használhatók (11.33. ábra). A VDR ellenállások megváltoztatják a feszültség- és áram-jelleggörbékét, mivel nemlineáris ellenállások. Ha pl. egy VDR ellenállásra szinuszos feszültséget kapcsolunk, akkor az ellenálláson nem szinuszos áram fog folyni (11.34. ábra).

Ha a VDR ellenálláson szinuszos áramot engedünk átfolyni, akkor a kivezetésein nem szinuszos feszültség keletkezik.

Ezt a tulajdonságot az impulzusteknikában, a televíziótechnikában, ill. a vezérlés- és szabályozástechnikában használják fel.

12. Kondenzátorok és tekercsek

12.1. Kondenzátorok

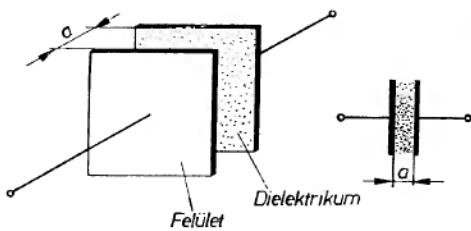
12.1.1. A kondenzátorok tulajdonságai

A kondenzátorok meghatározott nagyságú kapacitással rendelkező alkatrészek.

Ez a névleges kapacitás adott tűréstartományon belül változhat és hőmérsékletfüggő.

A két elektromosan vezető test (fegyverzet) között található szigetelőanyagot dielektrikumnak nevezük. A dielektrikumnak adott átütési szilárdsága van. Ez az átütési szilárdság határozza meg a kondenzátorra kapcsolható maximális feszültséget. A dielektrikumnak nincs végtelen nagy ellenállása, ezért a feltöltött kondenzátor önmagától kisül. A dielektrikumban az elektromos munka hővé alakul. A kondenzátornak veszteségei vannak. Ezek a szigetelés, a kivezetések, a fegyverzet és a dielektrikum veszteségeiből tevődnek össze. A dielektromos veszteségek váltakozó feszültség esetén lépnek fel. A dielektrikum tulajdonságai polaritásfüggők is lehetnek. Egyenfeszültségű és váltakozó feszültségű kondenzátorokat különböztetünk meg. Az egyenfeszültségű kondenzátorokat egyenfeszültségű üzemre tervezik. Olyan szigetelőanyagokat (dielektrikumokat) használnak, amelyeknek váltakozó feszültségű üzemben viszonylag nagy a veszteségük. Az egyenfeszültségre megadott névleges feszültséggel egyenlő csúcsfeszültségű váltakozó feszültségen nem szabad üzemeltetni őket. Különleges esetekben csak lényegesen kisebb váltakozó feszültségen működtethetők. Egyenfeszültségre szuperponált váltakozó feszültség esetén, bizonyos nagyságú váltakozó feszültségig a kondenzátor még használható. A váltakozó feszültségű kondenzátorok váltakozó feszültségű üzemre alkalmasak.

Ezeket a kondenzátorokat a váltakozó feszültségnél fellépő nagyobb veszteségekre méretezik, és így olyan egyenfeszültségre is alkalmazhatók, amelynek csúcsértéke a névleges váltakozó feszültség effektív értékét nem lépi túl.



12.1. ábra. Síkkondenzátor

Jellemző adatok és határértékek

A kondenzátorok tulajdonságai jellemző adataikkal és határértékeikkel írhatók le.

Jellemző adatok

névleges kapacitás

tűréshatár

a kapacitás hőmérséklet-függése

a kapacitás függése a páratartalomtól

az önkisülés időállandója

üzemi hőmérséklet-tartomány

élettartam

megbízhatóság

veszteségi tényező

Határértékek

névleges feszültség

tartós határfeszültség

csúcsfeszültség

megengedett váltakozó feszültség

A névleges kapacitást és tűrést vagy mérőszám és mértékegység formájában nyomtatják a kondenzátortestre, vagy gyűrűs színkódokat alkalmaznak.

A színkód megfelel az ellenállásokon alkalmazott jelölésmódnak. Az 5. gyűrű vagy pont a névleges feszültséget adja meg. A színkód a 12.1. táblázatban látható, a színkódos jelölést a 12.2. ábra mutatja. A kapacitások névleges értékét az IEC szabványsorozatok szerint állapítják meg (l. a 2. fejezetet, ellenállások). Az E6, E12 és E24 sorozatokat alkalmazzák elsősorban. Precíziós kondenzátorok az E48, E96 és E192 sorozatokból választhatók.

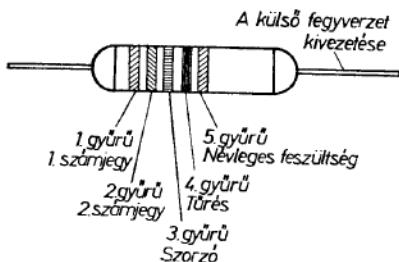
A kondenzátorok külső vezetőrétegét árnyékolásra használhatjuk, ha a testhez kapcsoljuk. Ezért fontos, hogy tudjuk, melyik az a kivezetés, amelyik a külső fegyverzethez kapcsolódik.

A gyűrűs színkódokkal ellátott kondenzátorok esetén a külső fegyverzet kivezetése azon az oldalon található, amelynek a gyűrűktől való távolsága nagyobb.

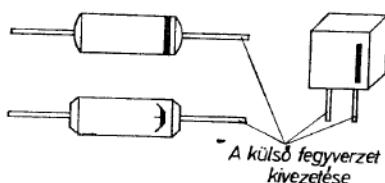
Más kondenzátorok esetében a külső fegyverzet kivezetése rovátkával, fekete gyűrűvel vagy stilizált ernyővel (12.3. ábra) van jelölve.

12.1. táblázat. A kondenzátorok ötgyűrűs nemzetközi jelölésmódja

Szín-jelölés	az 1. gyűrű az 1. szám-jegy	a 2. gyűrű a 2. szám-jegy	a 3. gyűrű a 3. szám-jegy	a 4. gyűrű a 4. szám-jegy	az 5. gyűrű az 5. szám-jegy
Színtelen	—	—	—	±20%	5000 V
Ezüst	—	—	10^{-2} pF	±10%	2000 V
Arany	—	—	10^{-1} pF	±5%	1000 V
Fekete	—	0	10^0 pF		
Barna	1	1	10^1 pF	±1%	100 V
Piros	2	2	10^2 pF	±2%	200 V
Narancs	3	3	10^3 pF		300 V
Sárga	4	4	10^4 pF		400 V
Zöld	5	5	10^5 pF	±0,5%	500 V
Kék	6	6	10^6 pF		600 V
Ibolya	7	7	10^7 pF		700 V
Szürke	8	8	10^8 pF		800 V
Fehér	9	9	10^9 pF		900 V



12.2. ábra. A kondenzátorok színgyűrűs jelölései



12.3. ábra. A kondenzátorok külső fegyverzetének jelölése

A kondenzátorok hőmérséklet-függését az α_c hőmérséklet-tényezővel adják meg a következő összefüggés alapján:

$$\Delta C = C \alpha_c \Delta \theta,$$

ahol ΔC a kapacitásváltozás, C a kapacitás 20 °C-on vagy 40 °C-on (névleges kapacitás), α_c a hőmérséklet-tényező, $\Delta \theta$ a hőmérséklet-változás.

A hőmérséklet-tényező egysége $1/^\circ\text{C}$.

A többi jellemző adatot a gyártók adatlapjain találjuk.

Néhány gyártó további adatokat, cégtájékoztatást, számkódokat és egyebeket is megad a kondenzátortesten.

Az önkisülés τ_s időállandója a szigetelőanyag R_{sz} ellenállásának és a kondenzátor kapacitásának szorzata.

$$\tau_s = RC.$$

Minél nagyobb az önkisülés időállandója, annál nagyobb értékű a kondenzátor. Szokásos értéke: $\tau_s = 1000 \dots 10\,000$ s.

Az üzemi hőmérséklet-tartomány azt a megengedett hőmérséklet-tartományt jelenti, amelyben a kondenzátort üzemeltetni szabad.

Élettartamon a kondenzátornak a gyártó által megadott élettartamát értjük. Meghatározott szünet, ill. tárolási idő figyelembevételével határozzák meg. Az élettartam a legtöbb esetben 8 és 15 év között van. Az üzemi megbízhatóság azon üzemőrák számát adja meg, amelyen belül a kondenzátorok meghatározott százaléka meghibásodik, pl. 100 000 h/3%. Ez azt jelenti, hogy 100 000 üzemórán belül a kondenzátorok 3%-ának szabad tönkremennie.

A tan δ veszeségi tényező frekvenciafüggő. Növekvő frekvenciával erősen nő és bizonyos mértékig hőmérsékletfüggő is.

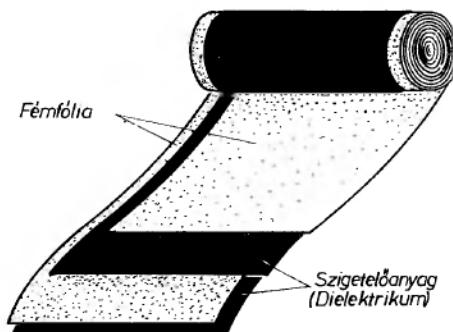
A kondenzátorokra megadott névleges feszültség legfeljebb 40 °C környezeti hőmérsékletig érvényes. A névleges feszültséget tartós üzem esetén nem szabad túllépní. 40 °C feletti környezeti hőmérsékleten a tartós határfeszültségre kell ügyelni. Ez annál alacsonyabb, minél magasabb a környezeti hőmérséklet, és 80 °C körül pl. már csak a névleges feszültség 60%-át teszi ki. A tartós határfeszültség értékét folyamatos üzemben nem szabad túllépní. A csúcsfeszültség az a maximális feszültség-érték, amelynek a kondenzátoron csak rövid ideig és ritkán szabad fellépnie. Az egyenfeszültségű kondenzátorokat vegyes feszültségre is rákapcsolhatjuk. A legnagyobb megengedett váltakozó feszültség megadja, hogy a vegyes feszültségeknek mennyora lehet a váltakozó feszültségű összetevője.

12.1.2. A kondenzátorok kiviteli formái

Papírkondenzátorok, műanyag kondenzátorok

A papírkondenzátorok két fémfoliából (leggyakrabban alumíniumfoliából) állnak, amelyeket egymástól olajjal átitatott papírlemezzel választanak el.

A fémfoliákat és a szigetelőanyagot feltekercselik (12.4. ábra).



12.4. ábra. A papír-, ill. a műanyag kondenzátor felépítése

A tekercset kivezetésekkel látják el és műanyaggal körülöntik. Szokás a feltekercselt kondenzátort műanyag, keménypapír, kerámia- vagy fémedénybe is belehelyezni és műgyantával kiönteni. Légmentes lezárásra van szükség a nedvesség behatolásának megakadályozására.

A papírnak mint dielektrikumnak sok kedvezőtlen tulajdonsága van, ezért a műanyag foliák egyre inkább kiszorítják. A műanyag kondenzátorok a papírkondenzátorokhoz hasonló felépítésűek, csak szigetelőként papír helyett műanyag foliát tartalmaznak. Műanyagként poliésztert, polietilén-terefalát és polikarbonátot használnak.

A műanyag kondenzátorok tulajdonságai általában jobbak, mint a papírkondenzátoroké, ugyanakkor a kapacitásuk és az áttütesi feszültségük kisebb.

A stiroflexkondenzátor különleges műanyag kondenzátor. Dielektrikuma hengerelt polisztirolból készül. Fegyverzetként alumínium- vagy cinkfoliát alkalmaznak. A kész tekercset hőkezelésnek vetik aiá, amelynek során a polisztirolfólia összezsugorodik. Nagy fajlagos kapacitású, igen szilárd tekercs keletkezik. A polisztirol-

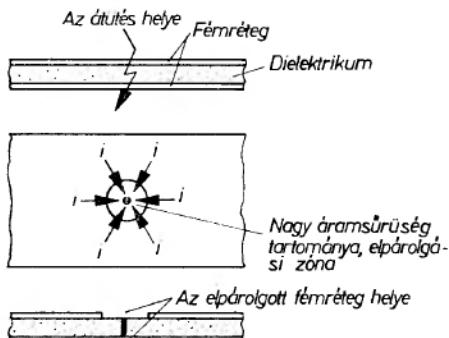
nak kicsi a dielektrikum vesztesége is, és kicsi negatív α_c hőmérséklet-tényezővel rendelkezik. Nagyfrekvenciás kondenzátorok dielektrikumaként kiválóan alkalmas. A stirolflexkondenzátorokat túlnyomóan rezgőkörökbe építve alkalmazzák.

Fém – papír kondenzátorok (MP kondenzátorok)

A fémfegyverzetek vastagsága a kondenzátorok kapacitását nem befolyásolja. Ha adott átütési feszültség elérése mellett térfogategységre vonatkoztatva nagy kapacitást akarunk elérni, akkor a fegyverzetek vastagságának a lehető legvékonyabbnak kell lennie.

A fém – papír kondenzátorok esetében a fémfegyverzeteket a dielektrikumként szolgáló papírra gőzölik fel. Kb. 0,05 μm rétegvastagságot hoznak létre; a papír szükséges vastagsága a kívánt névleges feszültségtől függ. A vékony fémrétegeknek viszonylag nagy az ohmos ellenállásuk, ami hátrányos. A tekercs minden homlokfelületére fémréteget szórnak, ezekhez erősítik a kivezetéseket. A töltéshordozók most a két homlokoldalról a fegyverzetekre áramlanak és ugyanilyen módon távoznak. A homlokfelület vezetőréteggel való ellátásával jelentősen csökkentjük a tekercs saját induktivitását is.

Ha az MP kondenzátorokon átütés keletkezik, akkor az átütési hely környezetében rövid ideig akkora áramsűrűség alakul ki, hogy a rendkívül vékony fémréteg elpárollog (12.5. ábra). A dielektrikum azonban nem károsodik, az átütési hely elszigetelődik – az átütés önmagát szünteti meg. Ez az „öngyógyulás” az MP kondenzátorok igen előnyös tulajdonsága.



12.5. ábra. A PM és az MK kondenzátorok „öngyógyulása”

A javulási folyamat kb. 10...50 μs-ig tart. Ezen idő alatt a kondenzátor feszültsége rövid időre csökken, ez elektronikus áramkörökben zavaróimpulzust okozhat. minden egyes átütés valamelyest csökkenti az MP kondenzátor kapacitását. A csökkenés mértéke azonban rendkívül kicsiny. Kb. 1000 javulási folyamat után csökken a kapacitás az eredetihez képest kb. 1%-kal.

Fém – műanyag kondenzátorok (MK kondenzátorok)

Az MK kondenzátorok alapjában véve ugyanolyan felépítésűek, mint az MP kondenzátorok, csak papír helyett műanyagot tartalmaznak dielektrikumként. Műanyag fóliára vékony fémréteget gőzölnek fel. A rétegvastagság kb. 0,02...0,05 μm. Térfogategységre vonatkoztatva nagy kapacitás érhető el. A fóliát kerek vagy lapos

alakúra tekercselik. Újabb eljárás szerint a fóliadarabokat rétegekben egymásra helyezik. A homlokoldalak fémbevonatot kapnak, amely az egy fegyverzetekhez tartozó rétegeket elektromosan vezető módon köti össze. Ezáltal csekély ohmos ellenállás és induktivitás érhető el.

Az MP kondenzátorokhoz hasonló öngyögyulás itt is lehetséges.

Az MK kondenzátorok dielektrikuma általában polietilén-tereftalát, polikarbonát, cellulózacetát vagy polisztirol.

Kerámiakondenzátorok

A kerámiakondenzátorokban dielektrikumként kerámiatestet alkalmaznak. A kerámiatestek két csoportra oszthatók:

1. csoport

Csekély relatív dielektromos állandójú ($\epsilon_r \approx 6\ldots450$) és kicsi dielektromos veszteséggel rendelkező kerámiatestek. A dielektromos állandó hőmérsékletfüggése csekély.

2. csoport

Speciális kerámiatestek, extrém nagy relatív dielektromos állandóval ($\epsilon_r \approx 700\ldots50\,000$). Sajnos ezeknek az anyagoknak a dielektromos állandója erősen hőmérsékletfüggő és a dielektromos veszteség is viszonylag nagy.

Az első csoportba tartozó kerámiatestek kiválóan alkalmasak rezgőkörök kondenzátorai számára. Ezekből olyan precíziós kondenzátorokat állítanak elő, amelyek kapacitása állandó és hőmérséklet-stabilitása nagyon jó. A dielektromos veszteségek egészen nagy frekvencián is csekélyek.

A második csoportba tartozó kerámiatestekkel viszonylag nagy kapacitású, kicsiny méretű kondenzátorok állíthatók elő, pl. borsó nagyságú $C = 10 \mu\text{F}$ és $U = 30 \text{ V}$ paraméterekkel rendelkező kondenzátor. A veszteségi tényező szintén elég nagy. Frekvenciafüggő alkatrészekként (rezgőkörök kondenzátorai) ezek a kondenzátorok nem alkalmasak. Túlnyomórészt csatoló és hidegitőkondenzátorokként építik be őket.

Elektrolitkondenzátorok

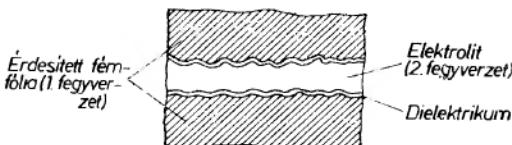
Elektrolitkondenzátoronál a kondenzátor fegyverzete vezetőképes folyadék, ún. elektrolit. Különleges kivitel esetén elektrolit helyett hasonló viselkedést mutató félvezető anyagokat alkalmaznak.

Alumínium-elektrolitkondenzátorok

Az alumíniumfóliát oxidréteggel vonják be; ez az oxidréteg képezi a dielektrikumot. Az egyik fegyverzet az alumíniumfólia, a másik az elektromosan vezető folyadék (elektrolit).

Mivel az oxidréteg átütési szilárdsága nagy, így a réteg nagyon vékony lehet. 100 V névleges feszültségű kondenzátor esetén az oxidréteg vastagsága csak kb. $0,15 \mu\text{m}$. A kondenzátor fegyverzetei közötti távolság tehát igen kicsi. A fegyverzetek felületegységére vonatkoztatott kapacitás ezáltal nagyon nagy.

Az alumíniumfólia felületének érdesítésével a felület lényegesen növelhető (12.6. ábra). A második fegyverzet – folyadék lévéni – követi a felületi egyenetlenségeket. Vannak érdesített és sima fóliás alumínium-elektrolitkondenzátorok. Az érdes fóliás kivitel egyre inkább uralkodóvá válik. A sima fóliákhoz képest nincsenek különösebb



12.6. ábra. Érdesített fegyverzetű elektrolitkondenzátor metszete

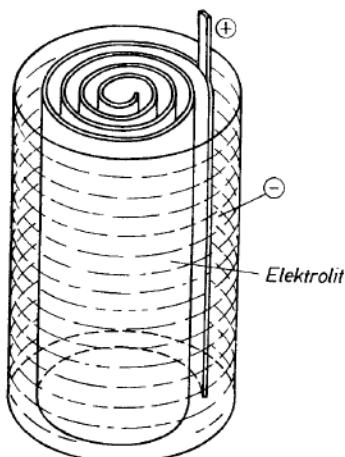
hátrányaik – a valamivel nagyobb veszteségi tényezőtől eltekintve –, viszont térfogategységre vonatkoztatva 6–8-szoros kapacitással rendelkeznek.

Az alumínium-oxid réteg ϵ_r relatív dielektromos állandója 7...8.

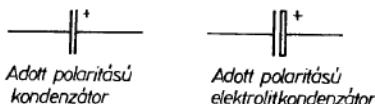
Az ismertetett kivitelű alumínium-elektrolitkondenzátorokat adott polaritással kell működtetni. Az alumíniumfólia a pozitív pólus, és az elektrolitnak, ill. kivezetésének kell a negatív saroknak lennie (12.7. ábra).

Ha 2 V-nál nagyobb feszültséget helytelen polaritással kapcsolunk az elektrolitkondenzátorra, az oxidréteg lebomlik, az elektrolit erősen felmelegszik és ez gázképződéshez vezet, a kondenzátor esetleg fel is robban. Hibás polaritás 2 V feszültséggig megengedhető. Eddig a feszültséghatárig váltakozó feszültség rákapcsolása is megengedett. Néhány elektrolitkondenzátor-típusnál egy második, oxidréteg nélküli alumíniumfóliát is alkalmaznak az áram elektrolitba való bevezetésére. Azt a fóliát, amely a negatív sarkot képezi, katódfóliának, az oxidréteget hordozó fóliát pedig anódfóliának nevezzük. A két fólia között található az elektrolit és egy papírból vagy textilből készült távtartó.

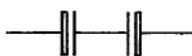
A 12.8. ábra polarizált kivitelű elektrolitkondenzátor rajzjelét mutatja be. Ha a katódfólián szintén oxidréteget hozunk létre, akkor gyakorlatilag két elektrolitkondenzá-



12.7. ábra. Az elektrolitkondenzátor felépítése



12.8. ábra. Az elektrolitkondenzátorok rajzjelei



12.9. ábra. Két adott polaritású elektrolitkondenzátorból álló, polaritás nélküli elektrolitkondenzátor



12.10. ábra. A polaritásfüggetlen elektrolitkondenzátor rajzjele

tort kapunk, amelyek a 12.9. ábra szerint vannak sorba kapcsolva. Az eredő kapacitás a felére csökken. Az ilyen kondenzátorok a polaritástól függetlenül alkalmazhatók, és a gyártó által megadott határokon belül váltakozó feszültségre is használhatók. A 12.10. ábra polaritásfüggetlen elektrolitkondenzátor rajzjelét mutatja. Az ilyen kivitelű kondenzátoroknak ugyanakkora kapacitás és feszültség mellett hozzávetőleg kétszer akkora a térfogata, mint a polaritásfüggő elektrolitkondenzátoroknak.

Tantál-elektrolitkondenzátorok

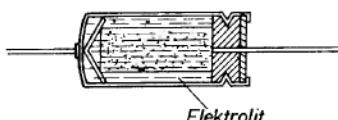
A viszonylag drága tantál kitűnően alkalmas elektrolitkondenzátorok előállítására. Dielektrikumként a nagyon nagy átütési szilárdságú tantál-pentoxid réteg szolgál, amelyet bizonyos formálási eljárással az anódfegyverzetre visznek fel. A tanál-pentoxidnak viszonylag nagy relatív dieletromos állandója ($\epsilon_r \approx 27$) van. Ezáltal térfogat-egységre számítva — ugyanakkora feszültség mellett — nagy kapacitásértékek adódnak. A tantál-pentoxid réteg hosszabb tárolás esetén sem bomlik fel, és a szivárgási áramok kicsik. A tantálkondenzátorok többnyire megfelelnek a magasabb szintű követelményeknek. Kiviteli formájuk lehet tantálfolia-elektrolitkondenzátor, ill. szinterelt anódú tantál-elektrolitkondenzátor.

Tantálfolia-elektrolitkondenzátorok

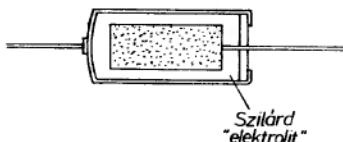
Az ilyen kondenzátorokat F kivitelű kondenzátoroknak szokták nevezni. Felépítésük az alumínium-elektrolitkondenzátorokéhoz hasonló. Anódfoliákat érdesített felületű tantálfoliát tartalmaznak. Polaritással rendelkező és polaritásfüggetlen kivitelben egyaránt készülnek.

Tantál-elektrolitkondenzátorok

A szinterelt anódú, folyékony elektrolitű tantál-elektrolitkondenzátorokban (S kivitel) a nagy felület elérése érdekében a tantálport szintereléssel egyfajta fémszivaccsá alakítják. A kondenzátor másik fegyverzetét képező elektrolit behatol a pórusokba. Dielektrikumként itt is vékony tantál-pentoxid réteget alkalmaznak, amely a szinterelt anódtest felületén képződik. Egy ilyenfajta kondenzátor szokásos felépítését mutatja a 12.11. ábra. A rendkívül nagy felületen térfogategységre vonatkoztatva igen nagy kapacitások adódnak, ami semmilyen más kondenzátortípussal nem érhető el.



12.11. ábra. A szinterelt anódos tantál-elektrolitkondenzátor (S kivitel) felépítése



12.12. ábra. A szilárd elektrolitú tantál-elektrolitkondenzátor (SF kivitel) felépítése

Szinterelt anódú, szilárd elektrolitú (SF kivitelű) tantál-elektrolitkondenzátorok

Az elektrolit — ismereteink szerint — vezetőképes folyadék. Ezek szerint nem lenne helyes szilárd elektrolitról beszélni. Az alkalmazott anyag azonban hasonlóan viselkedik, mint az elektrolit, ezért választották ezt a megnevezést.

Szilárd elektrolitként különleges szerkezetű mangán-oxid (MnO_2) szerepel. A mangán-oxid n típusú félvezető anyagként viselkedik. Anódfejgyverzetként tantál szintertestet alkalmaznak. A tantál-pentoxid réteg kialakítása után a szintertest pórusaiba mangánvegyületet sajtolnak, amit azután egy különleges eljárással mangán-oxiddá alakítanak át.

A szinteranódos, szilárd elektrolitú tantál-elektrolitkondenzátorok szerkezetét a 12.12. ábra mutatja be.

Ezek a kondenzátorok igen vaskosak. Az elektrolit nem folyhat ki, nem párologhat el, és nem dermedhet meg. Tiszta váltakozó feszültséggel a névleges feszültség 15%-ig működtethetők.

A tantál-elektrolitkondenzátorok feltöltésekor és kisütésekor be kell tartani néhány óvórendszbályt. Akkor is érzékenyek a nagy áramerősségekre, ha ezek csupán rövid ideig lépnek fel. A töltést és kisütést minden előtét-ellenállás alkalmazásával kell végezni.

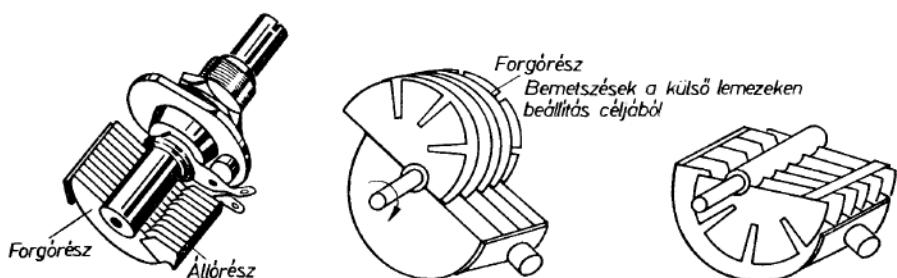
Váltóztatható kondenzátorok

Aránylag gyakran van szükség olyan kondenzátorokra, amelyeknek a kapacitása változtatható. Az ilyen kondenzátorok többnyire egymáshoz képest eltolható lemezkből vagy lemezcsomagokból állnak.

Forgókondenzátorok

A 12.13. ábra egy forgókondenzátor felépítését mutatja. A forgókondenzátor alapjában véve lemezkondenzátor, amelyben több lemez van összekapcsolva a nagyobb hatásos felület elérése érdekében (12.14. ábra).

A forgókondenzátorok általában néhány pF és kb. 500 pF közötti végkapacitással rendelkeznek. A legkisebb beállítható kapacitás a végkapacitás mintegy 10%-a.



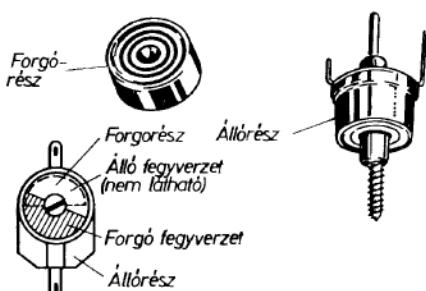
12.13. ábra. A forgókondenzátorok felépítése



12.14. ábra. A forgókondenzátor lemezeinek elhelyezkedése

Trimmerkondenzátorok

A trimmerkondenzátorok többnyire elég kicsi kapacitású tárcsakondenzátorok. Az egyik tárcsa rögzített, a másik eltolható. Finomhangolásra használják. A trimmerkondenzátorok szokásos kialakítását a 12.15. ábra szemlélteti.



12.15. ábra. A trimmerkondenzátorok szokásos kiviteli formái

12.2. Tekercsek

12.2.1. A tekercsek tulajdonságai

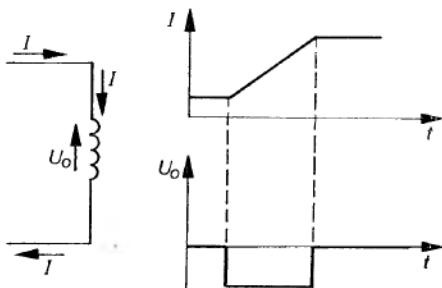
Ha egy tekercsen időben változó áram folyik keresztül, környezetében mágneses tér keletkezik.

Ez a mágneses tér a tekercsben feszültséget indukál (önindukció). Az indukált feszültsgég az indukció törvényéből adódik:

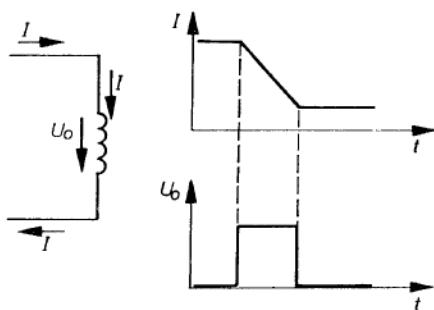
$$U_0 = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} .$$

Az indukált feszültség mindenkorban ellentétes irányú az őt létesítő változással. A mágneses teret, és ezzel az indukált feszültséget az áram hozza létre. Ha a tekercsen átfolyó áram nő, akkor olyan irányú önindukciós feszültség keletkezik, hogy az az áram növekedésére fékezőleg hat (12.16. ábra).

Ha a tekercsen átfolyó áram csökken, akkor olyan önindukciós feszültség keletkezik, amely az áram irányában hat és fékezi az áram csökkenését (12.17. ábra). Az önindukciós feszültség egyrészt a tekercs jellemző adataitól, tehát a menetszámtól, a tekercs hosszától, ill. keresztmetszetétől, a vasmag típusától és méreteitől, másrészt a tekercsen átfolyó áram változásának sebességétől függ.



12.16. ábra. A tekercs árama és az indukált feszültség időbeli lefolyása (áramnövekedés)



12.17. ábra. A tekercs árama és az indukált feszültség lefolyása (áramcsökkenés)

Ezektől a mennyiségektől függ a Φ mágneses fluxus is.

Az U_L önindukciós feszültségre a következő egyenlet érvényes:

$$U_L = L \frac{\Delta I}{\Delta t},$$

ahol ΔI az áramerősség változása, Δt az áramváltozás időtartama, L az induktivitás.

A tekercs adatainak az önindukciós feszültségre gyakorolt hatását egy együtthatóval fejezzük ki. Ezt az önindukciós együtthatót induktivitásnak nevezzük (jelölése: L). Az induktivitás egysége az Ωs , amit henrynek (H) nevezünk.

$$[L] = \frac{\text{Vs}}{\text{A}} = \Omega s = \text{H}.$$

A tekercsek induktivitásának meghatározására a következő összefüggés használható:

$$L = N^2 \frac{\mu_0 \mu_r A}{l_m},$$

ahol N a menetszám, μ_0 a mágneses permeabilitás, μ_r a relatív permeabilitás, A a tekercs keresztmetszete, l_m a közepes erővonalhossz.

A tekercs induktivitása a menetszám négyzetével arányos.

A számítás azonban csak közelítőleg ad helyes eredményt. A vasmag relatív permeabilitását kiváltképp nehézkes meghatározni. A közepes erővonalhossz értékei is bizonytalanok.

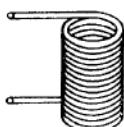
12.2.2. A tekercsek kiviteli formái

Lémgagos tekercsek

A lémgagos tekercseket különféle alakúra készítik. Gyakran használják a hengeres tekercseket (12.18. ábra). Ha körkeresztmetszet helyett négyzet keresztmetszetű tekercset választunk, a 12.19. ábra szerinti tekercs adódik.

Ezeket a tekercseket négyzet alakú tekercseknek nevezzük. Gyakran alkalmazott kialakítási forma a körgyűrű alakú tekercs, más néven toroidtekercs (12.20. ábra). A toroidtekercsnél a mágneses erővonalak majdnem teljes egészében a tekercs belsejében haladnak. A 12.21. ábra a síktekercsek felépítését mutatja. A síktekercsek spirális vagy négyzet alakúak lehetnek és áramköri lapokon, maratással könnyen kialakíthatók.

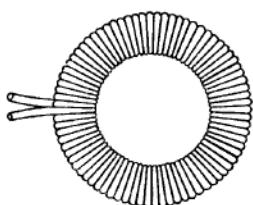
Ezen a módon azonban csak viszonylag kicsi induktivitás hozható létre.



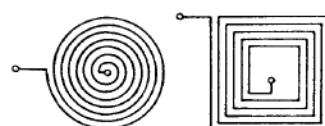
12.18. ábra. Hengeres tekercs



12.19. ábra. Négyszög keresztmetszetű tekercs



12.20. ábra. Toroidtekercs
(körgyűrűtekercs)



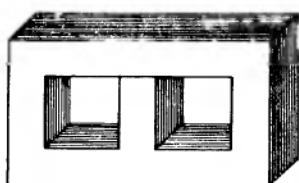
12.21. ábra. Síktekercsek

Vasmagos tekercsek

A vasmagos tekercsek tekercsből és vasmagból állnak. A vasmagot lágmágneses tulajdonságú anyagból készítik.

Lemezvasmagok

A lemezvasmagokat rétegelt lemezből állítják elő. A rétegeket szigetelik egymástól, hogy az örvényáramok okozta veszteséget alacsony szinten lehessen tartani (12.22. ábra). A lemezelt vasmagokat csak áránylag kis frekvencián – legfeljebb kb. 20 kHz-ig – lehet alkalmazni. Nagyobb frekvenciákon túl nagyok az örvényáram-veszteségek.



12.22. ábra. Lemezvasmag

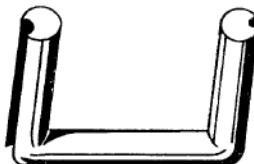
Nagyfrekvenciás wasmagok

Vaspont vagy más ferromágneses sémpont folyékony műanyaggal kevernek össze úgy, hogy minden egyes szemcsét szigetelő műanyag réteg vegyen körbe. A keveréket azután formába öntik és a műanyagot kikeményítik. Ezekben a wasmagokban csak csekély örvényáram tud képződni, mivel a fém nagyon finom részekre van osztva. A wasmagok nagyfrekvenciás tekercsekben alkalmazhatók.

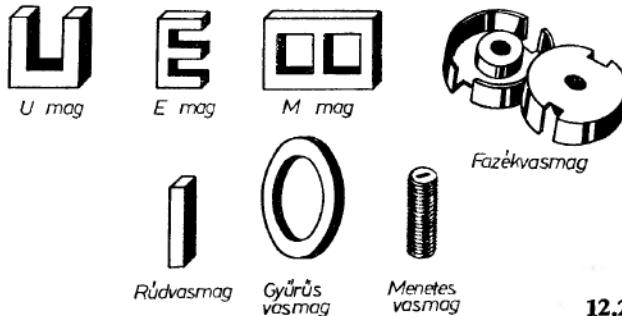
Ferritvasmagok

A ferritek elektromosan nem vezető fémxordokból készített ferromágneses anyagok. Különböző alakú, keményen, ill. lágyan mágnesezhető ferriteket (12.23. ábra) ismerünk. A lágymágneses ferritekből nagy fajlagos indukciós tényezőjű tekercsvasmagokat készítenek. A fémxordokat a kívánt alakra sajtolják és szinterelik.

A ferritvasmagok veszteségei igen kicsik. Mivel elektromosan nem vezetők, bennük gyakorlatilag nem keletkeznek örvényáramok. Nagyfrekvenciákon is alkalmazhatók. A wasmagok különböző kialakításúak lehetnek. Megkülönböztetünk pl. **U**, **E**, ill. **M** alakú wasmagot, fazékvasmagot, rúdwasmagot, gyűrűwasmagot stb. (12.24. ábra). A wasmagos tekercsek induktivitása a B mágneses fluxussűrűségtől, ill. a μ_r relatív permeabilitástól, ezáltal a tekercsen átfolyó áram erősségtől is függ.



12.23. ábra. Ferrit wasmag



12.24. ábra. Vasmagformák

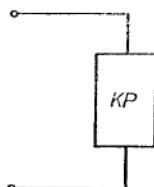
13. Frekvenciafüggők két- és négpólusok

13.1. Általános ismeretek

Kétpólus

Azt az áramkört, amelynek két kivezetése van, kétpólusnak nevezzük. A kétpólus „dobozként” ábrázolható (13.1. ábra).

A kétpólus belső áramköre nagyon sokféle lehet; a sok közül csupán néhányat vizsgálunk. Olyan kétpólusokat választottunk, amelyek ellenállásokból, tekercsek ből és kondenzátorokból épülnek fel és az elektronikában különös jelentőségük van.



13.1. ábra. Kétpólus



13.2. ábra. Négpólus

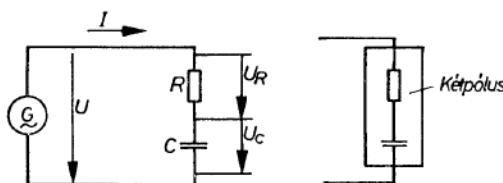
Négpólusok

A négpólusok két bemeneti és két kimeneti kapuccsal rendelkező áramkörök (13.2. ábra). A négpólus szintén „dobozként” ábrázolható.

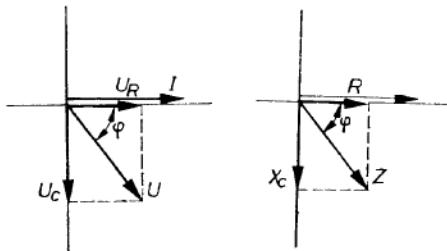
Rendkívül sokféle négpólus képzelhető el. A következőkben egyszerű négpólusokat vizsgálunk, amelyek – mint a kétpólusok – tekercsek ből, kondenzátorokból és ohmos ellenállásokból állnak. Az itt tárgyalt négpólusokat az elektronikában igen gyakran alkalmazzák.

13.2. Soros RC-kör

Sorba kapcsolt R -t és C -t váltakozó feszültségre kapcsolva a feszültség a soros kapcsoláson áramot indít (13.3. ábra). Az ellenálláson U_R feszültségesés lép fel. Ez a feszültség az I árammal fázisban van. Az U_C kondenzátor feszültsége az áramhoz képest 90° -kal késik, más szóval az áram az U_C -hez képest 90° -kal siet. A 13.4. ábrán



13.3. ábra. R és C soros kapcsolása (kétpólus)



13.4. ábra. A sorba kapcsolt R és C feszültségeinek vektordiagramja

látható vektordiagram a feszültségek fázishelyzetét mutatja. Az U eredő feszültség a következő egyenletből adódik:

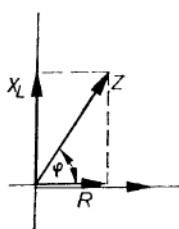
$$U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}.$$

A komplex feszültséget az I árammal elosztva komplex ellenállást kapunk:

$$\frac{U_R}{I} = R, \quad \frac{U_C}{I} = X_C, \quad \frac{U}{I} = Z.$$

A feszültségekre vonatkozó vektorábrából származtatott, ellenállásokra nyert vektordiagramot mutatja be a 13.5. ábra. Váltakozó áramú eredő ellenállásra (impedanciára, látszólagos ellenállásra) érvényes, hogy

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}.$$



13.5. ábra. A sorba kapcsolt R és C ellenállásainak vektordiagramja

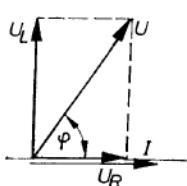
A vektorábra alapján a φ fázisszögre vonatkozó számítási összefüggés a következő:

$$\tan \varphi = \frac{U_C}{U_R} = \frac{X_C}{R}.$$

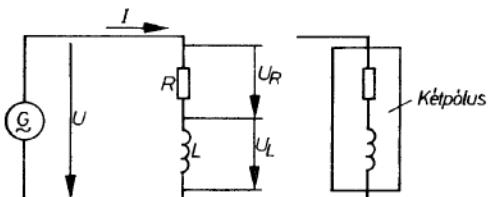
13.3. Soros RL -kör

Ha sorosan kapcsolt RL -körben váltakozó áram folyik, akkor az R -en U_R és az L -en U_L feszültségesés lép fel (13.6. ábra).

Az U_R az I -vel fázisban van, az U_L viszont az I áramhoz képest 90° -kal siet. Ezt az összefüggést a 13.7. ábra vektordiagramja szemlélteti.



13.6. ábra. R és L soros kapcsolása (kétpólus)



13.7. ábra. A sorba kapcsolt R és L feszültségeinek és ellenállásainak vektordiagramja

Az eredő feszültségre a következő egyenlet érvényes:

$$U = \sqrt{U_R^2 + X_L^2}.$$

A komplex feszültséget I -vel előszírva komplex ellenállást kapunk:

$$\frac{U_R}{I} = R, \quad \frac{U_L}{I} = X_L, \quad \frac{U}{I} = Z;$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

A φ fázisszög egyenlete a vektorábrából leolvasható:

$$\tan \varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{X_L}{R}.$$

13.4. RC-tag

Az RC -tag alapjában véve soros RC -kör, a különbség csak annyi, hogy a két kimeneti kapocs révén a kétpólusból négypólus lett, amelyben

U_1 a bemeneti feszültség,

U_2 a kimeneti feszültség.

Az RC -tag viselkedését szinuszos U_1 bemeneti feszültséggel és különböző frekvenciákon kell vizsgálni. Kis frekvencián a kondenzátor ellenállása nagy, a kimeneten majdnem a teljes bemeneti feszültség megjelenik.

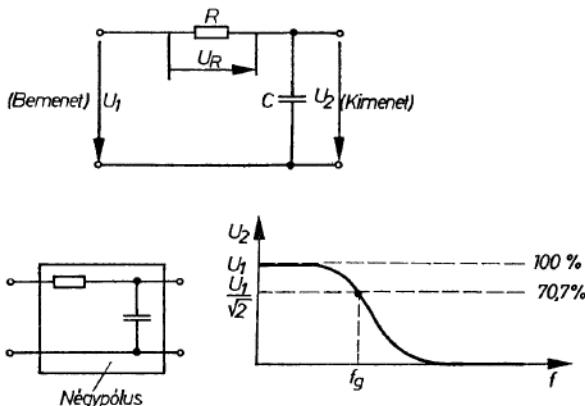
Érvényes, hogy

$$U_2 \approx U_1.$$

Nagy frekvencián a kondenzátor ellenállása nagyon kicsi (zérushoz tart). Az U_2 kimeneti feszültség tehát nagy frekvencián közelítőleg 0.

$$U_2 \approx 0.$$

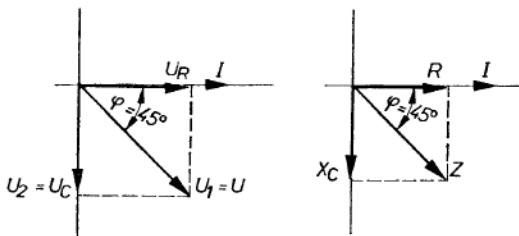
A 13.8. ábra az U_2 kimeneti feszültség változását mutatja a frekvencia függvényében. Az RC -tag a kis frekvenciájú jeleket átengedi, a nagy frekvenciájúakat viszont nagyrészt elnyeli. Mivel a kis frekvenciájú jelek át tudnak menni a tagon, ezt a kapcsolást aluláteresztő tagnak is nevezzük.



13.8. ábra. RC -tag mint négypólus, és az U_2 kimeneti feszültség változása a frekvencia függvényében

Az aluláteresztő tag olyan áramkör, amely csak a kis frekvenciájú jeleket engedi át.

Azt a frekvenciát, amelyen az U_2 feszültség az U_1 $\sqrt{2}$ -ed részére csökken, határfrekvenciának (f_h) nevezzük. Az f_h határfrekvenciánál kisebb frekvenciájú jeleket tekintjük átengedettnek.



13.9. ábra. Az RC -tag feszültségeinek és ellenállásainak határfrekvenciához tartozó vektordiagramja

A vektordiagramokból (13.9. ábra) látható, hogy

$$U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{2}} \text{ akkor áll fenn, ha az } U_R \text{ ugyanakkora, mint az } U_2, \text{ ill. az } U_C.$$

Az f_h -ra fennáll, hogy $U_R = U_C$; $U_R/I = U_C/I R = X_C$.

Az $R = X_C$ feltételből a határfrekvencia képlete levezethető:

$$R = X_C;$$

$$R = \frac{1}{2\pi f_h C},$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi R C}.$$

Az RC szorzat az RC -tag τ időállandója.

$$\tau = RC,$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

Az f_h határfrekvencián az U_1 és U_2 között 45° -os fáziseltolódás van.

Példa

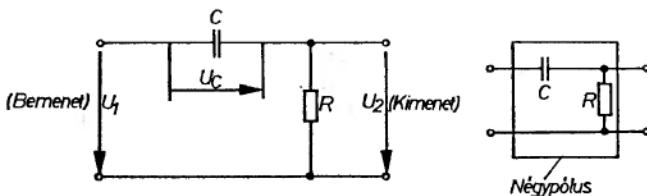
Egy RC -tag egy $R = 10 \text{ k}\Omega$ -os ellenállásból és egy $C = 100 \text{ nF}$ kapacitású kondenzátorból áll. Mekkora az RC -tag határfrekvenciája?

$$f_h = \frac{1}{2\pi R C} = \frac{1}{6,28 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot \Omega \cdot 100 \cdot 10^{-9} \text{ s}}, \quad f_h = 159 \text{ Hz.}$$

13.5. CR -tag

A CR -tag nagyon hasonló az RC -taghoz, csak az alkatrészek hossz- és keresztrányban fel vannak cserélve (13.10. ábra).

A CR -tag viselkedése különböző frekvenciájú szinuszos váltakozó feszültség esetén mégis teljesen más, mint az RC -tagé.



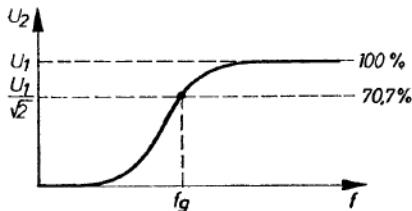
13.10. Ábra. CR -tag mint négypólus

Kis frekvencián a kondenzátor ellenállása nagyon nagy, az U_1 feszültség nagy része a C -n elvész. Az R -en létrejövő feszültségesés majdnem nulla:

$$U_2 \approx 0.$$

Nagy frekvencián a kondenzátor ellenállása közelítőleg nulla. A bemeneti feszültség majdnem teljesen megjelenik a kimeneten:

$$U_2 \approx U_1.$$



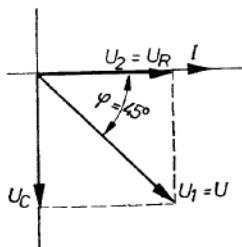
13.11. ábra. A CR-tag U_2 kimeneti feszültségének változása a frekvencia függvényében

A 13.11. ábra U_2 változását mutatja a frekvencia függvényében. A CR-tag a nagy frekvenciájú jeleket átengedi, a kis frekvenciájúakat túlnyomórészt elnyeli. A nagy frekvenciájú jelek át tudnak menni a tagon, ezért az ilyen frekvencia-jelleggörbékű áramkört felüláteresztő tagnak nevezzük.

A felüláteresztő tag olyan áramkör, amely csak a nagy frekvenciájú jeleket engedi át.

A CR-tagnak szintén van határfrekvenciája. A határfrekvencia az a frekvencia, amely-nél az U_2 és az $U_1/\sqrt{2}$ -ed része.

A 13.12. ábra a határfrekvencián érvényes vektordiagrammot mutatja.



13.12. ábra. A CR-tag határfrekvenciához tartozó feszültség-vektordiagramja

Az U_R (ill. U_2) ugyanakkora, mint az U_C . Az f_h -nál érvényes, hogy $U_R = U_C$. Ebből a feltételből a határfrekvencia kiszámítására ugyanaz a képlet adódik, mint az RC-tagra vonatkozott:

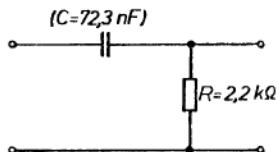
$$f_h = \frac{1}{2\pi RC},$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

Hatófrekvencián az U_1 és U_2 között 45° -os fáziseltolódás alakul ki.

Példa

A 13.13. ábra szerinti felüláteresztő tagnak 1 kHz határfrekvenciát kell elérnie. Mekkora legyen a C kondenzátor kapacitása?



13.13. ábra. 1 kHz határfrekvenciájú felüláteresztő szűrő

$$f_h = \frac{1}{2\pi RC}, \quad C = \frac{1}{2\pi R f_h},$$

$$C = \frac{1}{6,28 \cdot 2,2 \text{ k}\Omega \cdot 1000 \frac{1}{\text{s}}},$$

$$C = \frac{1}{6,28 \cdot 2,2} \cdot 10^{-6} \text{ F},$$

$$C = \frac{1000}{6,28 \cdot 2,2} \text{ nF};$$

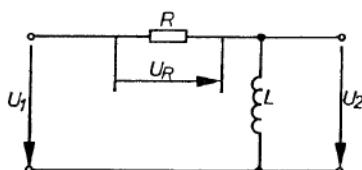
$$C = 72,3 \text{ nF}.$$

13.6. *RL*-tag

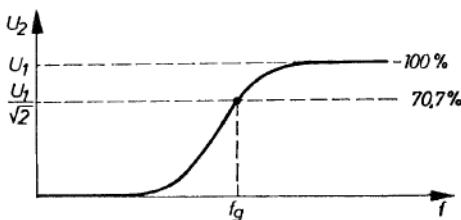
Azt az áramkört, amelyben a hosszirányú ágban ellenállás, a keresztrányú ágban pedig tekercs van, *RL*-tagnak nevezzük (13.14. ábra).

A tekercs ohmos ellenállásának elhanyagolhatóan kicsinek kell lennie. Az *RL*-tag felüláteresztő szűrőként viselkedik. Nagy frekvenciákon a tekercs X_L ellenállása nagy. Az L -re eső feszültség lényegesen nagyobb, mint az R -re eső.

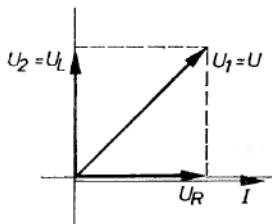
Kis frekvencián a tekercs ellenállása nagyon kicsi. Az U_2 kimeneti feszültség majdnem nulla. Az U_2 feszültség frekvenciafüggését a 13.15. ábra mutatja.



13.14. ábra. *RL*-tag



13.15. ábra. Az *RL*-tag U_2 kimeneti feszültségének változása a frekvencia függvényében



13.16. ábra. Az RL -tag határfrekvencián fellépő feszültségeinek vektordiagramja

Az RL -tag f_h határfrekvenciája $U_2 = \frac{U_1}{\sqrt{2}}$ feszültségnél van.

Ez azonban azt jelenti, hogy az U_2 -nek (ill. U_L -nek) egyenlőnek kell lennie az U_R -rel. A feszültségek vektorábráját a 13.16. ábra szemlélteti. Az $U_L = U_R$ feltételből a határfrekvencia kiszámítható.

$$U_L = U_R,$$

$$X_L = R,$$

$$2\pi f_h L = R;$$

$$f_h = \frac{R}{2\pi L}.$$

Határfrekvencián az U_1 és U_2 közötti fáziseltolódás 45° .

A τ időállandó a következő egyenletből adódik:

$$\tau = \frac{L}{R}.$$

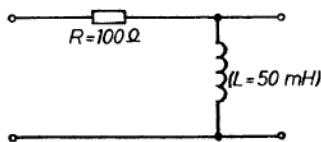
A határfrekvencia képletében az $\frac{L}{R}$ helyébe $\frac{1}{\tau}$ -t helyettesítve:

$$f_h = \frac{1}{2\pi\tau}.$$

Példa

Egy RL -tag időállandója 0,5 ms. Az R ellenállás értéke 100Ω (13.17. ábra). Mekkora az RL -tag határfrekvenciája? Mekkora a tekercs induktivitása?

$$f_h = \frac{1}{2\pi\tau},$$



13.17. ábra. A 318 Hz határfrekvenciájú RL felüláteresztő szűrő

$$f_h = \frac{1}{6,28 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}} = \frac{1000}{6,28 \cdot 0,5} \text{ Hz},$$

$$f_h = 318 \text{ Hz},$$

$$\tau = \frac{L}{R}; \quad L = \tau R,$$

$$L = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ s} \cdot 100 \Omega,$$

$$L = 50 \text{ mH}.$$

13.7. LR-tag

Ha az *RL*-tagnál a keresztirányú és hosszirányú ágban az alkatrészeket felcseréljük, *LR*-tagot kapunk (13.18. ábra).

Kis frekvencián a tekercs ellenállása nagyon kicsi, a kimeneten majdnem a teljes bemeneti feszültség megjelenik:

$$U_2 \approx U_1.$$

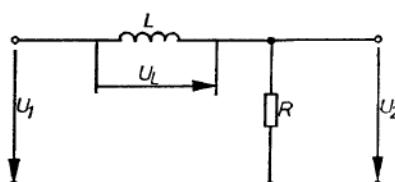
Nagy frekvencián a tekercs ellenállása nagyon nagy, az U_2 kimeneti feszültség közelítőleg nulla.

$$U_2 \approx 0.$$

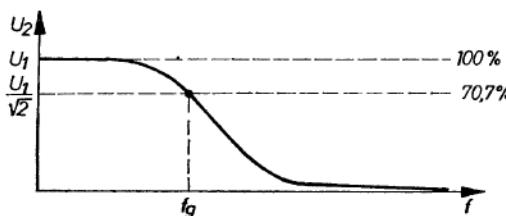
Az *LR*-tag aluláteresztő szűrőként viselkedik.

A 13.19. ábra az *LR*-tag kimeneti feszültségének a frekvenciafüggését mutatja. Ha-tárfrekvencián az U_L és az U_R egyenlő. Ebből a feltételekből a határfrekvencia meghatározására ugyanaz a képlet adódik, mint amit az *RL*-tagnál levezettünk:

$$f_h = \frac{R}{2\pi L}.$$



13.18. ábra. *LR*-tag



13.19. ábra. Az *LR*-tag U_2 kimeneti feszültségének változása a frekvencia függvényében

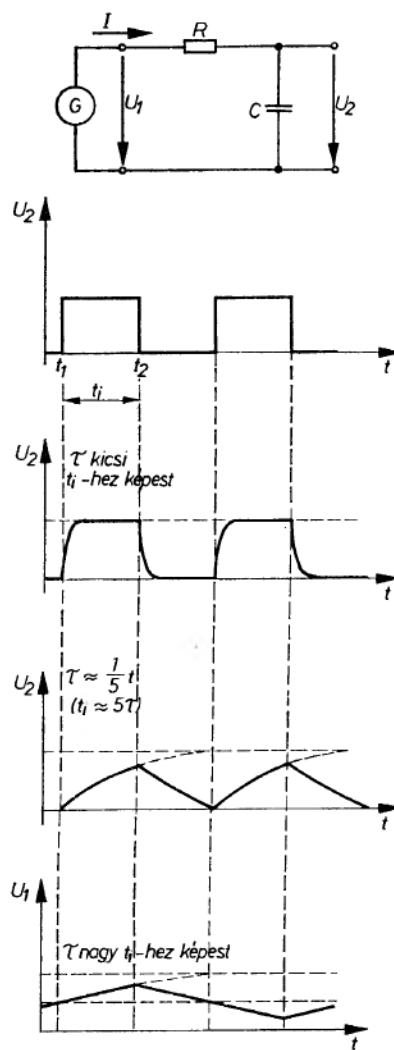
13.8. *RC*-tag mint integrálóelem

13.8.1. Működésmód

Adjunk az *RC*-tag bemenetére U_1 négyzetfeszültséget a 13.20. ábra szerint. A t_1 időpillanatban a C kondenzátorban nincs töltés. Az U_2 kimeneti feszültségnek tehát t_1 pillanatban nullának kell lennie.

A C kondenzátort most feltöljük. A kondenzátor feszültsége megfelel a kimeneti feszültségnek. A kondenzátor töltöttségi állapotának megfelelően nő a kimeneti feszültség. A kondenzátor töltési sebességét az áramkör hatásos τ időállandója határozza meg:

$$\tau = RC.$$



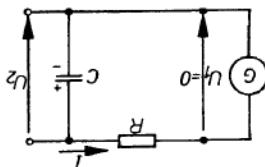
13.20. ábra. Négyzetfeszültséggel vezérelt *RC*-tag

A bemeneti és a kimeneti feszültség időfüggvényének alakulása különböző nagyságú időállandók mellett

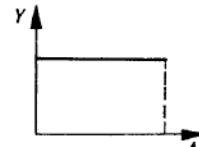
Az időállandó ötszörösének megfelelő idő elteltével a feltöltés gyakorlatilag befejeződik. Ezen idő után C – elhanyagolhatóan kis hibával – az U_1 feszültségre van feltöltve. A kimeneti feszültség növekedési sebességét tehát a τ időállandó adja meg.

A 13. 20. részábrai a kimeneti feszültség időbeni lefolyását mutatják a t_i impulzusidő-höz képest kicsi, közepes és nagy τ időállandó mellett.

A t_2 időpillanattól az U_1 feszültség nulla, a C kondenzátor kisül (13.21. ábra). A kisülés sebessége ugyancsak az áramkör τ időállandójától függ. Az időállandó ötszörösének megfelelő idő alatt a kondenzátor gyakorlatilag kisül, az U_2 kimeneti feszültség nullára tér vissza.



13.21. ábra. Áramkör a kondenzátor kisülése közben



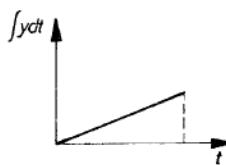
13.22. ábra. Y a vizsgált időtartam alatt nem változtatja értékét

13.8.2. Integrálás

Az integrálás függvényeken végrehajtott számítási eljárás.

Vegyük pl. egy időben változó Y mennyiséget idő szerinti integrálját!

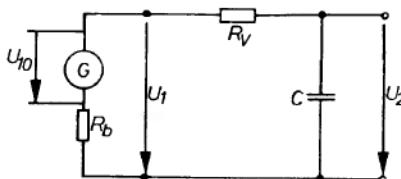
Ha az Y mennyisége a vizsgált idő alatt nem változik (időbeli lefolyása a 13.22. ábra szerinti görbénél megfelelően alakul), integrálja ezen idő függvényében lineáris növekedést mutat. Tehát Y integráljának időfüggvénye a 13.23. ábra szerinti lesz. Ha az RC -tag időállandója az impulzus időtartamához viszonyítva nagy, akkor az U_2 kimeneti feszültségre a 13.20c ábra szerinti időbeli lefolyás adódik. A feszültség lineárisan nő, majd lineárisan csökken. A kimeneti feszültség időbeni alakulása a bemeneti feszültség időfüggvényének integráljával adható meg. Az RC -tagnak tehát integrálótulajdonsága van; innen kapta az integrálótag elnevezést.



13.23. ábra. Y integrálása lineáris függvényt ad

Az RC -tag a bemeneti feszültség időfüggvényét integrálja, ha a τ időállandó az impulzus időtartamához viszonyítva nagy.

Szigorúan véve az integrálás csak közelítőleg játszódik le. Minél nagyobb azonban a τ időállandó az impulzus t_i időtartamához képest, annál jobban közelíti a tényleges feszültségmenet a matematikailag számítható integrált. Az eltérés ekkor elhanyagolhatóan kicsiny lehet.



13.24. ábra. A jelgenerátor belső ellenállása befolyásolja az időállandó nagyságát

A jelfeszültséget adó generátor hatással van az RC -tag integrálóképességére, mivel minden generátornak van belső ellenállása, és ez az R_b belső ellenállás befolyásolja a τ időállandót. A τ időállandó számításához az áramkörben fellépő eredő R hatásos ellenállást kell figyelembe venni (13.24. ábra).

$$R = R_b + R_v,$$

$$\tau = RC = (R_b + R_v) C.$$

A generátorok induktivitása vagy kapacitása szintén bizonyos szerepet játszik, ez azonban többnyire elhanyagolható.

13.9. A CR -tag mint differenciálóelem

13.9.1. Működésmód

Az U_1 feszültségnek a 13.25. ábra szerinti négyszög alakú időbeli lefolyása van.

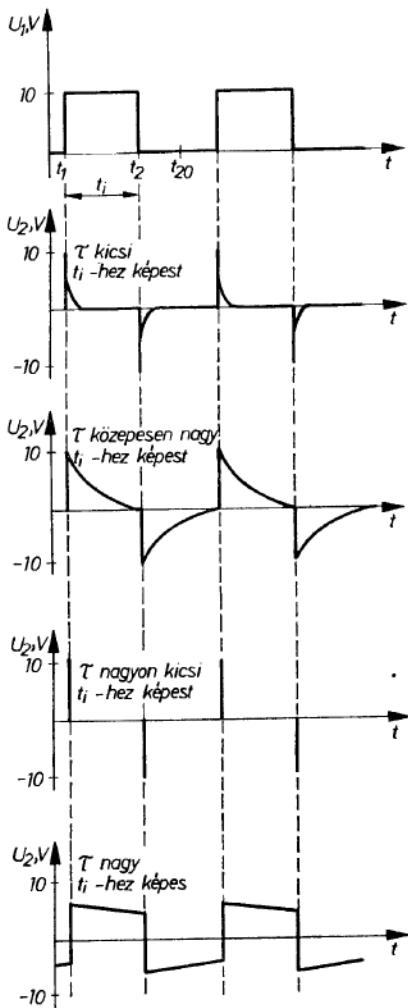
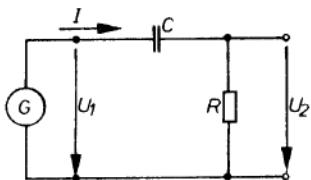
A t_1 időpontban a C feltöltetlen. A kondenzátornak az első pillanatban nincs ellenállása. A 10 V-os teljes bemeneti feszültség az R ellenállásra esik és ezzel megjelenik a kimeneten (13.25a ábra).

A kondenzátor ellenállása a töltés növekedésével egyre nagyobb lesz, egyre több feszültség esik a kondenzátorra. A kimeneti feszültség csökken. Ha a kondenzátor fel van töltve, ellenállása közel végtelen, gyakorlatilag már nem folyik áram, és a kimeneti feszültség nulla (13.26. ábra).

A kondenzátor most 10 V feszültségre van feltöltve (13.27. ábra). A t_2 időtől a bemeneti feszültség nullára esik vissza. A kondenzátor ekkor pozitívan feltöltött fegyverzetével 0 V feszültségszintre kapcsolódik, és első pillanatban töltöttségi állapotát, tehát feszültségét is megtartja. A kondenzátor feszültségforrásként viselkedik; negatív sarka 10 V-tal negatívabb, mint a pozitív. Ha a pozitív sarok feszültsége 0 V, akkor a negatív saroké -10 V, így a kimeneti feszültség a t_2 utáni első pillanatban -10 V (13.27. ábra).

Most kisütjük a kondenzátort, feszültsége visszaesik. A t_{20} időpontban a kondenzátor már kisütött állapotban van, a kimeneti feszültség 0 V-ra csökken. A feltöltési és kisütési idő az áramkör hatásos időállandójától függ. Az időállandó ötszörösének megfelelő idő alatt a kondenzátor feltöltött, ill. kisütött állapotba kerül.

A 13.25a, b, c és d ábrákon különböző τ időállandókhoz tartozó kimeneti feszültségek időfüggvényei vannak ábrázolva (τ a t_i impulzusidőhöz viszonyítva kicsi, közepes és nagy).



13.25. ábra. Négyszögfeszültséggel vezérelt CR-tag

A bemeneti és a kimeneti feszültségek alakulása különböző nagyságú időállandók esetén

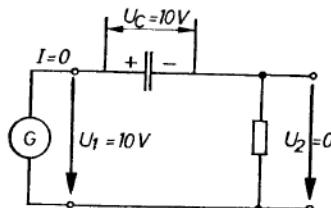
13.9.2. Differenciálás

A differenciálás függvényeken végrehajtott számítási eljárás. Valamely Z mennyiség időfüggvénye pl. differenciálható. A Z mennyiség időfüggvényét a 13.28. ábra mutatja és a 13.29. ábrán a függvény idő szerinti deriváltja (Z') látható.

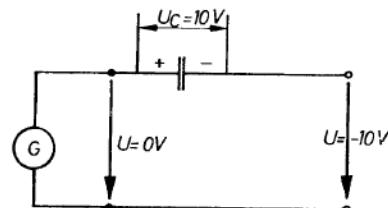
A Z' a Z változását adja meg. A Z' értéke annál nagyobb, minél gyorsabban változik a Z . Ha Z növekszik, Z' pozitív, ha Z csökken, akkor Z' negatív értékű. A CR -tag

tehát, amennyiben az időállandó elég kicsi, a bemeneti feszültség időfüggvényét képes differenciálni (13.25c ábra), ezért differenciálótagnak is nevezik.

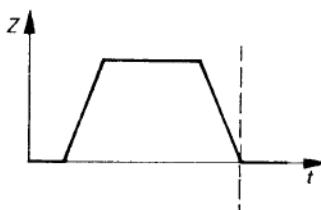
A CR-tag a bemeneti feszültség időfüggvényét differenciálja, ha az időállandója az impulzus időtartamához képest kicsi.



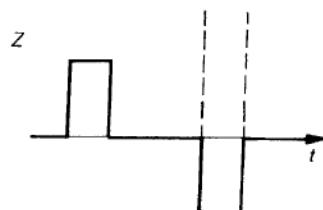
13.26. ábra. A CR-tag kondenzátora 10 V feszültségre van feltöltve



13.27. ábra. Amikor a bemeneti feszültség nullára esik vissza, a kimeneti feszültség az első pillanatban -10 V



13.28. ábra. A Z függvény időbeli lefolyása



13.29. ábra. A Z derivált függvényének, a Z'-nek az időfüggvénye

A differenciálás matematikailag nem egészen egzakt módon megvégbe. Ez csak közelítőleg differenciálás. A közelítés annál jobb, minél kisebb az impulzus időtartamához viszonyított időállandó. Az impulzusgenerátor R_b belső ellenállása, induktivitása, ill. kapacitása befolyásolja a CR-tag differenciálóképességét. Az időállandó számításakor tekintettel kell lenni az R_b belső ellenállásra. Ugyanaz érvényes itt is, mint az RC-tagnál.

A generátor induktivitását vagy kapacitását általában elhanyagolhatjuk.

148 Ft