

3.1.1. Villamos jelenségek. Alapfogalmak.

Az atom szerkezete

Az anyag legkisebb olyan része, amely még az anyag tulajdonságait mutatja, a *molekula*. A molekula atomokból, az atom pedig *atommagból*, és az atommag körül keringő **elektronokból** áll. Az atommag *protonokból* és *neutronokból* tevődik össze.

A *villamos kölcsönhatás* az atomi részecskék között fellépő erőhatás. Az elektronok taszítják egymást, és ugyanígy taszítják egymást a protonok is. A protonok és az elektronok között viszont vonzóerő lép fel. *Villamos töltésnek* az atom részecskéinek erre a vonzó- illetve taszítóerőre való képességét nevezzük, és pedig az atommag protonjainak töltését *pozitívnak* (+), az elektron töltését meg *negatívnak* (-). A protonnak ugyanakkora pozitív töltése van, mint amekkora az elektron negatív töltése. A neutronoknak nincs töltésük: elektromosan semlegesek.

(A negatív töltésű elektronok azért nem „zuhannak” a protonok pozitív töltésével őket vonzó atommagba, mert a különmemű töltések közti vonzóerőt ellensúlyozza az elektronok keringéséből adódó centrifugális erő.)

Az atommag protonjainak a száma megegyezik az atomhoz tartozó elektronok számával, így az atommag pozitív töltése megegyezik az elektronok negatív töltésével, azaz az atom „kifelé” elektromosan semleges, töltései kiegyenlítik egymást.

Az atomban az elektronok „elektronhéjakon” helyezkednek el. A külsőbb héjra csak akkor kerülhet elektron, ha a belsőbbek már telítettek (a legbelső héjra 2, a másodikra és harmadikra 8, a negyedikre és ötödikre 18 elektron fér).

Ha valamilyen okból a külső héjról elektron távozik, az atom negatív töltéseinek száma csökken, miközben az atommag pozitív töltése változatlan marad; így az atom „kifelé” mutatott semlegessége megszűnik, és összességében pozitív töltésű lesz. Az ilyen, pozitív töltéssel bíró atomot **pozitív ionnak** nevezik.

Ha a külső héjra további elektron érkezik, az atom negatív töltéseinek száma nő, (miközben pozitív töltése változatlan), így az atom kifelé negatív töltést mutat, **negatív ionná** válik.

Villamos áram

Az elektronok és az ionok villamos töltéssel bírnak, ha elmozdulnak, villamos töltéseket mozgatnak, ezért **töltéshordozónak** nevezik őket.

A töltéshordozók rendezett, azonos irányú mozgása, vándorlása a *villamos áram*.

Vezetők, szigetelők

Jó villamos **vezetők** azok az anyagok, amelyekben a töltéshordozók könnyen tudnak vándorolni. A jó **szigetelőkben** a töltéshordozók nem (vagy alig) képesek elmozdulni.

Villamos áram fémekben

A fémek kristályos szerkezetűek. Ez azt jelenti, hogy az atomok nem rendezetlenül helyezkednek el az anyag belsejében, hanem egy (az adott fémre jellemző) „rácsszerkezetet” alkotnak. Az atomok a rácsszerkezetben elfoglalt helyük körül hőmozgást végeznek, eközben a külső elektronhéjról elektronok szakadhatnak le. Így az atom pozitív ionná válik, a leszakadt, ún. **szabad elektronok** pedig az atomok közötti térben maguk is rendezetlen hőmozgást végeznek. Ha ezekre a szabad elektronokra valamilyen irányú erő hat, akkor az erő hatására egyirányú gyorsulásba kezdenek. Az útjukba eső atomokba ütközve, mozgási energiájuk csökken, majd a következő ütközésig ismét gyorsulnak. **A fémekben a szabad elektronok egyirányú áramlása jelenti a villamos áramot.** (Az ilyen vezetőket *elsőrendű vezetőknek* nevezik.) A fémek jó vezetők. Az elektronok egyirányú mozgásának átlagsebessége csak kb. 0,1mm/s, viszont az áramlás a fém egész hosszában szinte egyidejűleg indul meg, ezért a villamos áram terjedési sebessége a fémben a fény sebességét közelíti. (A jelenséget úgy képzelhetjük el, mint ha egy cső teljes hosszában golyók sorakoznának. Ha a cső egyik végén egy golyót benyomunk, a golyók egymást egy-egy hellyel arrébb nyomják, ezért szinte ugyanabban a pillanatban kigördül a cső távoli végén egy golyó, noha egy-egy golyó a csőben csak alig mozdult el.)

Villamos áram folyadékokban

A tiszta (desztillált) víz jó szigetelő. Savat, sót vagy lúgot oldva azonban vezetővé válik. A vízben oldott sav, só, lúg ionjaira bomlik. Ha a pozitív és negatív ionokra ellentétes irányú erő hat, a villamos áramot azok ellentétes irányú mozgása jelenti. Az ilyen tulajdonságú vezetőket *másodrendű vezetőknek* nevezik.

Villamos áramlás gázokban

A gázokban - pl. a kozmikus sugárzás hatására – mindig vannak töltött részecskék. Ha ezekre erő hat, a pozitív és negatív töltésű részecskék ellentétes irányú mozgásba kezdenek. E pozitív és negatív töltésű részecskék vonzzák egymást, ezért egymással találkozáskor semleges részecskévé egyesülnek (rekombinálódnak), és a továbbiakban a villamos áramlásban nem vesznek részt. Így összességében elenyésző áram folyik.

A töltött részecskékre ható erőt növelve azonban azok sebessége megnő, így tehetetlenségüknél fogva a vonzóerő ellenére elhaladnak egymás mellett, a rekombinációk száma csökken, és az áram nő. A mozgató erőt tovább növelve e részecskék annyira felgyorsulhatnak, hogy egy semleges molekulába ütközve azt elektronokra és pozitív ionokra robbanthatják szét (*ütközéssel ionizáció*). Az így létrejött pozitív és negatív ionok szintén nagy sebességgel ellentétes irányba haladnak, és újabb ütközések révén további ionokat hoznak létre, emiatt a gázban a villamos áram megnövekszik.

Galvánelem

Ha hígított kénsavban réz- és horganylemezt helyezünk el, a vegyi hatás következtében a rézlemezről elektronok lépnek ki a kénsavba, így a réz pozitív töltésűvé válik. A horganylemez viszont elektronokat vesz fel a kénsavból, így negatív töltést kap. A galvánelem e töltéseket szétválasztó hatása az **elektromotoros erő**. A szétválasztó különnevezett töltések vonzzák egymást, de a galvánelemen belül – az elektromotoros erő szétválasztó hatása miatt – nem tudnak kiegyenlítődni.

Ha azonban a galvánelem kapcsait egy vezetővel összekötjük, a vezetőben lévő elektronokra ill. ionokra a kapcsok töltésének megfelelően vonzó- ill. taszítóerő hat, így a *vezetőben villamos áram alakul ki*. Az áramló villamos töltések munka végzésére alkalmasak, azaz a galvánelem a benne felhalmozott vegyi energiából villamos energiát állít elő.

Energiaforrások, fogyasztók

Az elektromotoros erővel rendelkező, tehát villamos energia előállítására alkalmas berendezéseket **energiaforrásnak** nevezik. Ilyen energiaforrás a vegyi energiát átalakító galvánelem és az akkumulátor, a fény- ill. hőenergiát átalakító fénylem és hőelem, valamint a mechanikai energiát villamos energiává alakító *generátor*.

Azok a készülékek, amelyek az áramló villamos töltések energiáját más (hő-, fény-, vegyi, mechanikai) energiává alakítják át, a **fogyasztók**.

Villamos áramerősség

A villamos energiaforrás elektromotoros ereje által szétválasztott töltések az energiaforrás kapcsait összekötő vezetőben áramlanak. Fémekben az áramló töltéseket az elektronok, folyadékokban a negatív és pozitív ionok, gázokban elektronok és ionok hordozzák.

A vezető keresztmetszetén időegység alatt áthaladó töltésmennyiség a villamos áramerősség. Az áramerősség jele: I (Intenzitás = erősség), mértékegysége az A (amper).

Ha két vezetőben áram folyik, azok vonzzák, vagy taszítják egymást. Az áram erősségét e vonzó hatás alapján határozták meg: *Két – végtelen hosszúnak tekinthető – egymástól 1 m távolságra párhuzamosan elhelyezett vezetőben akkor folyik 1A erősségű áram, ha egyik vezető a másik vezető 1 m hosszú szakaszára $2 \cdot 10^{-7}$ N erővel hat.*

A mértékegységek többszörösei és törtrészei

A gyakorlatban a mennyiségek értékét sokszor nehézkes a mértékegységgel kifejezni, ezért a mértékegység törtrészeit ill. többszöröseit alkalmazzuk:

Szorzó	Jelölés	Megnevezés
10^{-12}	p	piko
10^{-9}	n	nano
10^{-6}	μ	mikro
10^{-3}	m	milli
10^3	k	kilo
10^6	M	mega

Példa: $100 \mu\text{A}$ (száz mikroamper) $= 100 \cdot 10^{-6} \text{A} = 100 \cdot 0,000001 \text{A} = 0,0001 \text{A}$
 50mA (ötven milliamper) $= 50 \cdot 10^{-3} \text{A} = 50 \cdot 0,001 \text{A} = 0,05 \text{A}$

Az áram iránya

Az áram a töltéshordozók mozgása. Megállapodás szerint a pozitív töltéshordozók mozgásának irányát tekintjük az áram irányának. (Ez azt jelenti, hogy pl. fémekben, ahol a töltéshordozók negatív töltésű szabad elektronok, az áram megállapodás szerinti iránya az elektronok tényleges mozgási irányával ellentétes.) Az áram irányát kapcsolási rajzokon az 1. ábra szerinti (nem besötétített végű) nyíllal jelöljük.

Villamos töltés

A villamos áram a töltések áramlása. A töltés jele: Q .

Az áram (I) a vezeték keresztmetszetén időegység (t) alatt áthaladó töltésmennyiség (Q):

$$I = \frac{Q}{t}$$

ebből adódik a töltés meghatározása:

$$Q = I \cdot t$$

A szögletes zárójelek a mennyiségek mértékegységét jelentik, így

$$[Q] = [I] \cdot [t] = \text{A} \cdot \text{s} = \text{As}$$

a villamos töltés mértékegysége tehát az ampersekundum, melyet másképpen coulomb-nak neveznek, és C-vel jelölnek:

$$1 \text{C} = 1 \text{As}$$

Gyakran használatos a töltés nagyobb egysége is, az amperóra:

$$1 \text{Ah} = 3600 \text{As}$$

Példa:

1. Mennyi időn keresztül képes 300mA áramot szolgáltatni egy „1,2 V 2,4 Ah” jelzésű AA akkumulátorcella? (A 2,4 Ah azonos értelmű a 2400 mAh jelöléssel.)

Válasz:

$$t = \frac{Q}{I} = \frac{2400 \text{mAh}}{300 \text{mA}} = 8 \text{h}, \text{ tehát } 8 \text{ órán keresztül.}$$

2. Mekkora töltést tárol egy alkáli elem, ha 8 órán keresztül 500mA árammal lehet terhelni?

Válasz:

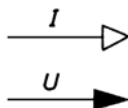
$$Q = I \cdot t = 0,5 \text{A} \cdot 8 \text{h} = 4 \text{Ah} = 4 \cdot 3600 \text{As} = 14400 \text{As} = 14400 \text{C}$$

Feszültség

Az energiaforrás elektromotoros ereje által szétválasztott, a kapcsain megjelenő pozitív és negatív töltések vonzzák egymást. Ezt a vonzó hatást nevezzük **feszültségnek**. **A feszültség jele: U, mértékegysége a V (volt)**. A gyakorlatban alkalmazzuk a μV (mikrovolt, 10^{-6}V), mV (millivolt, 10^{-3}V), kV (kilovolt, 10^3V) mértékegységeket is.

A feszültség iránya

Hasonlóan az áramhoz, a feszültségnek is megállapodás szerinti irányt tulajdonítunk: ez az az irány, amerre a feszültség hatására a *pozitív* töltések elmozdulnak (vagy elmozdulnának). Kapcsolási rajzokon a feszültség irányát az 1. ábra szerinti, besötétített végű nyíllal jelöljük.



1. ábra

Ellenállás

Ha egy energiaforrás kapcsait egy vezetővel összekötjük, a kapcsokon jelen lévő feszültség hatására a vezetőben lévő töltéshordozókra erő hat, ennek eredményeként a vezetőn áram alakul ki. A kialakult áram erőssége az energiaforrás kapocsfeszültségétől, és a vezetőben jelen lévő töltéshordozók számától függ. A vezetőben jelen lévő töltéshordozók számát a vezető **ellenállásával** jellemezzük. **Az ellenállás jele R, mértékegysége az Ω (ohm)**. Gyakran használjuk még a k Ω (kiloohm, $10^3\Omega$), és a M Ω (megohm, $10^6\Omega$) mértékegységeket. Minél nagyobb az ellenállás, annál kevesebb a vezetőben az áramot kialakító töltéshordozó.

A vezetőek ellenállása függ a vezetők anyagától, hosszától, és keresztmetszetétől:

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

ahol

R a vezetők ellenállása (mértékegysége: Ω)

ρ (ro) a vezetők anyagától függő „fajlagos ellenállás”
(mértékegysége: $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$; a fajlagos ellenállás 1 m hosszú és 1mm^2 keresztmetszetű vezető ellenállása 20°C hőmérsékleten)

l a vezetők hossza (m)

A a vezetők keresztmetszete (mm^2)

Néhány villamos vezető anyag fajlagos ellenállása 20°C -n:

Vezető anyaga	ρ ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
Ezüst	0,016
Vörösréz	0,017
Arany	0,023
Alumínium	0,029

Példa:

1. Határozzuk meg 120 m hosszú, 0,8 mm átmérőjű vörösréz huzal ellenállását!

Válasz:

A huzal keresztmetszete:

$$A = \frac{d^2 \Pi}{4} = \frac{0,8^2 \cdot 3,14}{4} = 0,502 \text{ mm}^2$$

Így a huzal ellenállása:

$$R = \rho \frac{l}{A} = 0,017 \frac{120}{0,502} = 4,06 \Omega$$

2. Milyen hosszú 1 mm átmérőjű alumínium huzalnak van 1 Ω ellenállása?

Válasz:

A huzal keresztmetszete:

$$A = \frac{d^2 \Pi}{4} = \frac{1^2 \cdot 3,14}{4} = 0,785 \text{ mm}^2$$

Az ellenállás kiszámítására szolgáló képletből l-et kifejezve:

$$l = \frac{RA}{\rho} = \frac{1 \cdot 0,785}{0,029} = 27,06 \text{ m}$$

3.1.2. Alapvető törvényszerűségek

Ohm törvénye

A tapasztalat szerint a vezetőben kialakuló áram egyenesen arányos az energiaforrás kapcsolófeszültségével, és fordítottan arányos a vezető ellenállásával:

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

ahol

U a fogyasztóra kapcsolt feszültség (V)

R a fogyasztó ellenállása (Ω)

I a fogyasztón kialakuló áram (A).

Ez az összefüggés **Ohm törvénye**.

Példa:

Mekkora legyen az ellenállás, hogy a 230V-os energiaforrás 1,9A áramot hajtson át rajta?

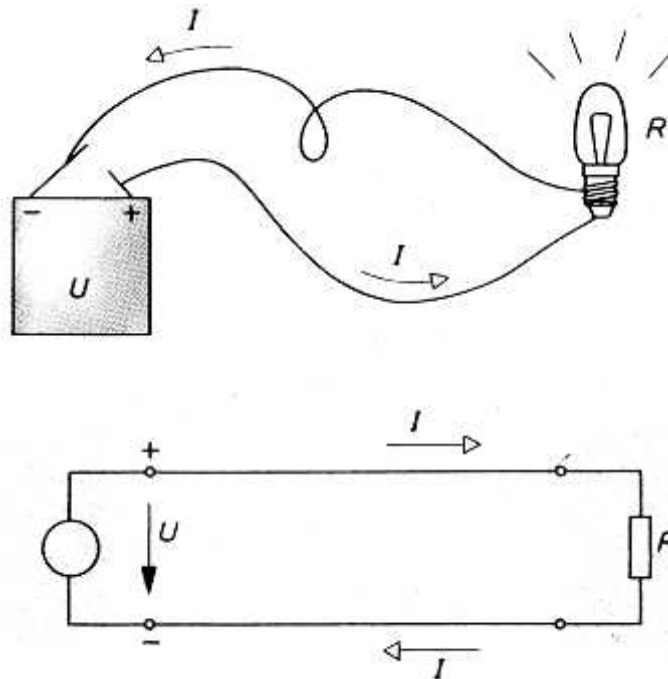
Válasz:

Ohm törvényéből az ellenállást kifejezve

$$R = \frac{U}{I} = \frac{230}{1,9} = 121,05 \Omega$$

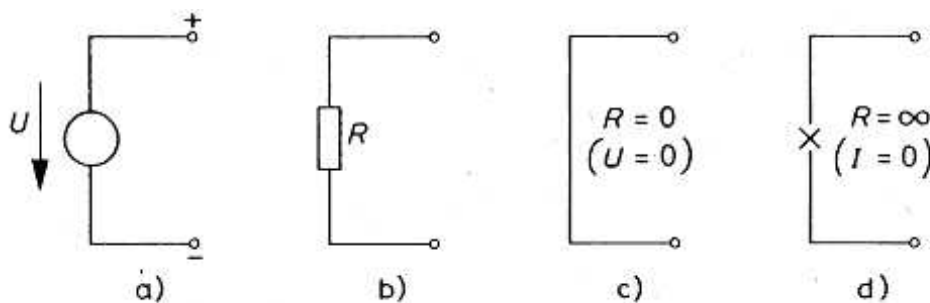
Villamos kapcsolási rajz

Egyszerű, csak néhány áramköri elemet (energiaforrást, fogyasztót) tartalmazó áramkör esetén az áramkör összeállítását akár a tényleges áramköri elemek lerajzolásával is ábrázolhatjuk (pl. a 2. ábra felső részén egy zseblámpatelep és a zseblámpaizzó összekapcsolását).



2. ábra

Könnyen belátható azonban, hogy bonyolult, akár több száz vagy több ezer áramköri elemből álló áramkör esetén az ilyen rajz olvashatatlan, használhatatlan lenne. Ezért az áramkör összeállítását mutató *kapcsolási rajzon* az áramköri elemek egyszerűsített jelképeit használjuk (3. ábra).



3. ábra

Ezek az **egyszerűsített jelképek az „ideális” tulajdonságú alkatrészeket jelölik**. Pl. a 3. c) ábrán láthatjuk, hogy a vezetéket egy összefüggő vonal ábrázolja. Az ilyen, lerajzolt vezetéket tökéletes vezetőnek tételezzük fel, melynek az ellenállása $R=0\Omega$, ezért bármekkora áram folyik is rajta, végpontjai között nem keletkezik feszültség (Ohm törvény: $U=I \cdot R$, tehát ha $R=0$, akkor $U=0$). A valóságban a vezetéknek mindig van valamekkora ellenállása; ha a vezeték ellenállásának az áramkör működése szempontjából jelentősége van, akkor azt az ideális vezetékkel sorba kapcsolt ellenállással jelezzük (4. ábra).

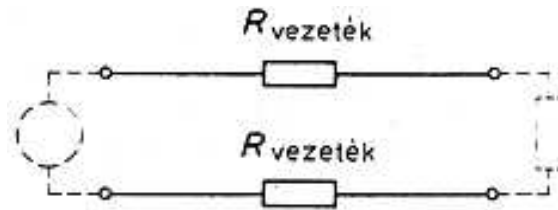
Az energiaforrást jelképező áramköri elem a **feszültséggenerátor** (3. a) ábra), amelynek kivezetései (másképpen: kapcsai, sarkai) között az energiaforrás U kapocsfeszültsége jelenik meg.

(Figyeljük meg, hogy az U feszültséget jelző nyíl a megállapodás szerint a feszültséggenerátor pozitív pólusától a negatív pólus felé mutat.)

A fogyasztó általános modellje az R ellenállás (3. b) ábra).

A megszakított áramkört a *szakadás* jelképezi (3. d) ábra).

A 2. ábra alsó részén a felül lerajzolt összeállítás kapcsolási rajzát láthatjuk. Az U feszültség hatására R ellenálláson $I (=U/R)$ áram alakul ki az áramkörben. (Figyeljük meg, hogy a vezetékeken az áramot ábrázoló nyíl megállapodás szerint a feltételezett pozitív töltéshordozók áramlási irányát mutatja.)



4. ábra

Villamos hálózatok

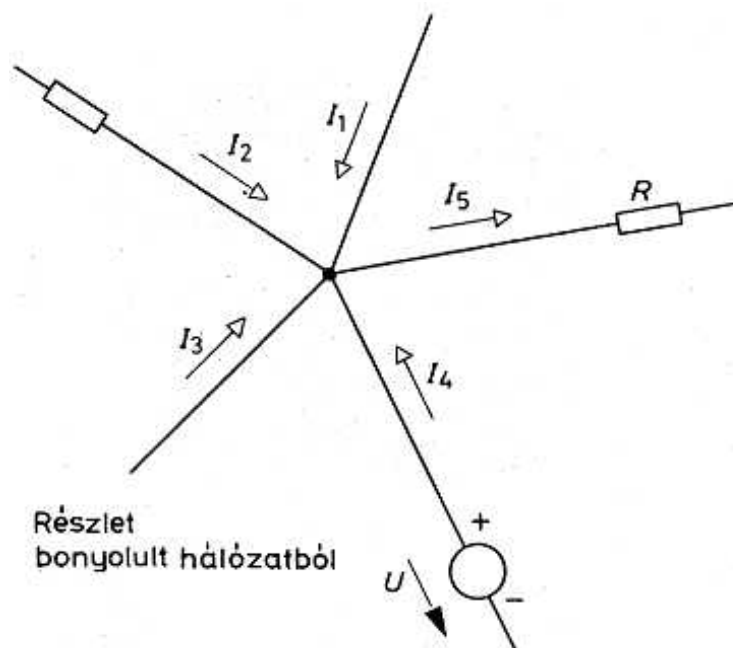
A villamos hálózatok egy vagy több villamos energiaforrásból és fogyasztóból állnak. Három vagy több vezető találkozási pontját **csomópont**nak hívják. Két csomópont között található a hálózat egy **ága**. **Huroknak** nevezzük azoknak az ágaknak az összességét, amelyeken végighaladva a kiindulási pontra térünk vissza (úgy, hogy közben egyetlen ágon sem haladtunk át többször).

Potenciál

A hálózat egy pontjának a másikhoz viszonyított **potenciálja a két pont közötti feszültségkülönbség**. Szokásos, hogy a hálózat valamely pontját leföldelik. Ebben az esetben az áramkör egy pontjának a földponthoz viszonyított feszültségkülönbségét nevezzük az adott pont potenciáljának.

Kirchhoff első (csomóponti) törvénye

Az 5. ábrán egy csomópontot láthatunk, melyben öt vezető találkozik.

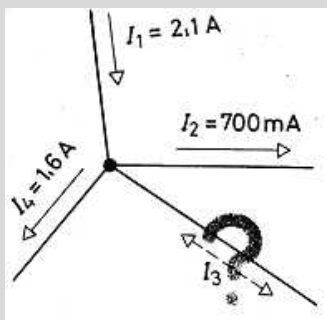


5. ábra

A csomópontba egyes vezetőkön töltések áramlanak be, más vezetőkön ugyanezek a töltések távoznak időegység alatt (a csomópont nem termel, és nem nyel el töltéseket.), azaz a csomópontba befolyó áramok összege megegyezik a csomópontból távozó áramok összegével. Ezt fejezi ki **Kirchhoff első törvénye**: a csomópontba befolyó áramokat pozitív, a kifolyó áramokat negatív előjellel figyelembe véve, **a csomópontba tartozó valamennyi áram előjelhelyes összege 0**.

Példa:

A 6. ábra szerinti csomópontban mekkora I_3 áram értéke, és milyen az iránya?



6. ábra

Megoldás:

Tételezzük fel először, hogy I_3 kifelé folyik a csomópontból, és ennek megfelelően írjuk fel a csomóponti egyenletet. (Ha a feltételezésünk téves, és I_3 ténylegesen a csomópontba befelé folyik, az áram értékét negatív előjellel kapjuk meg.)

$$I_1 + (-I_2) + (-I_3) + (-I_4) = 0$$

$$I_1 - I_2 - I_3 - I_4 = 0$$

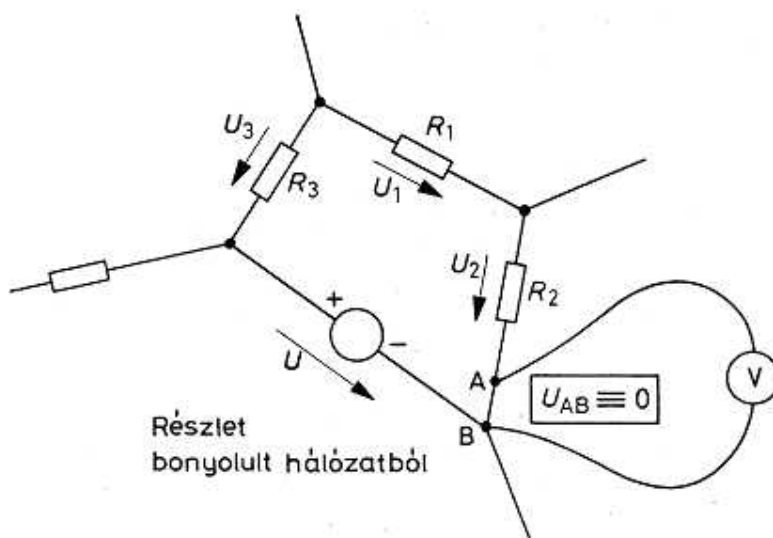
$$I_3 = I_1 - I_2 - I_4$$

$$I_3 = 2,1 - 0,7 - 1,6 = -0,2 \text{ A}$$

Tehát I_3 0,2A (=200mA) erősségű, és negatív előjele azt mutatja, hogy – előzetes feltevésünkkel ellentétben – ténylegesen befolyik a csomópontba.

Kirchhoff második (hurok-)törvénye

Tekintsük a 7. ábrát, mely egy áramkör részletét képező hurkot ábrázol.

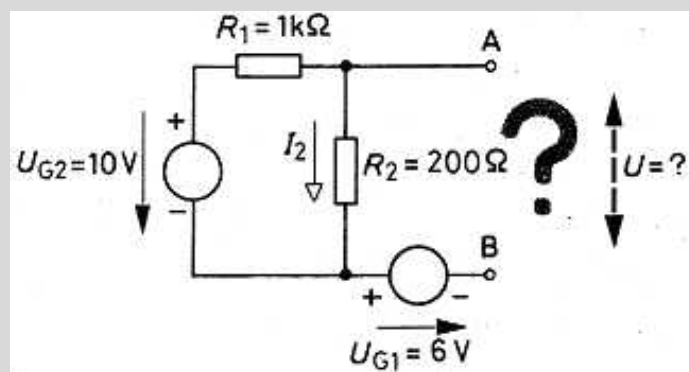


7. ábra

Tűzzünk ki két olyan pontot, amelyek között biztosan 0 a feszültség. Ilyenek az A és B pontok. Két pont között egyszerre csak egyféle feszültség lehet, tehát ha a hurokban mérhető többi feszültséget összegezzük, szintén nullát kell kapnunk. **Kirchhoff második törvénye: egy zárt hurokban a feszültségek előjelhelyes összege 0.**

Példa:

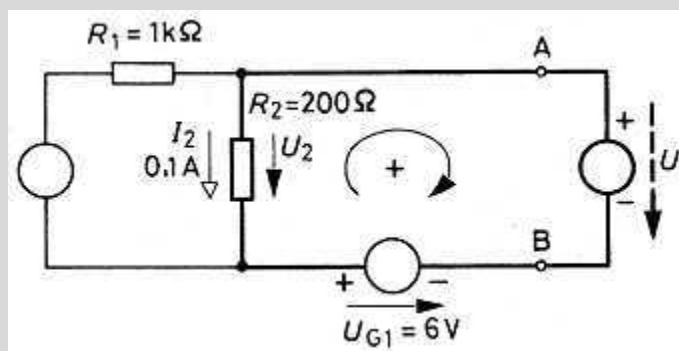
Mekkora és milyen polaritású feszültséget kell kapcsolni a 8. ábrán az A és B pontok közé, hogy R_2 ellenálláson folyó áram a bejelölt irányú, 0,1A nagyságú legyen?



8. ábra

Megoldás:

Rajzoljuk fel az áramkört a kiszámítandó kapocsfeszültségű U feszültséggenerátor bekapcsolása után (9. ábra).



9. ábra

U polaritását véletlenszerűen vettük fel úgy, hogy „A” pont a pozitívabb (ha ez a feltevés téves, az eredmény negatív előjellel fog adódni).

R_2 ellenálláson 0,1A áram hatására $U_2 = I_2 \cdot R_2 = 0,1 \cdot 200 = 20V$ feszültség esik.

Vegyünk fel a hurokban egy (tetszés szerinti) *körüljárási irányt* (ezt jelzi a hurok közepére, a körvonal végére rajzolt nyíl). Az olyan feszültségeket, amelyek a körüljárási iránnyal megegyező irányúak, pozitív, a körüljárási iránnyal ellentétes irányú feszültségeket negatív előjellel vesszük figyelembe.

Írjuk fel ennek alapján (pl. „A” pontból kiindulva) a hurokban mérhető feszültségekre Kirchhoff második törvényét:

$$U - U_{G1} - U_2 = 0$$

$$U = U_{G1} + U_2 = 6 + 20 = 26V$$

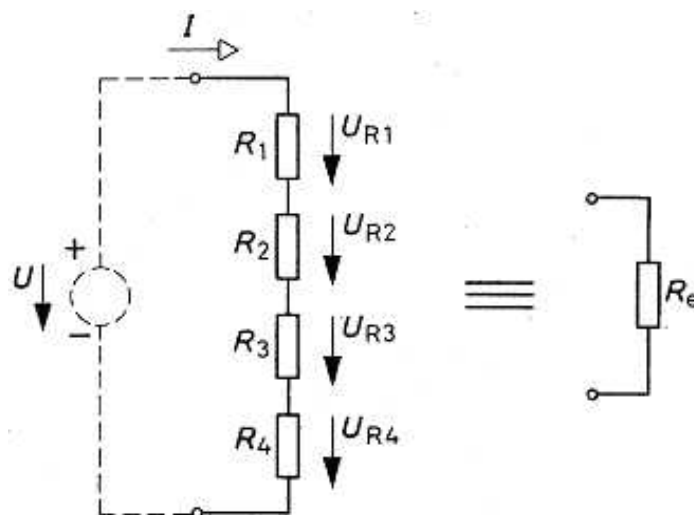
Azaz A és B pontok közé 26V-os feszültséggenerátort kell kapcsolnunk, mivel az eredmény pozitív előjelű, a feltételezett polaritással.

(Megjegyzés: Az általunk vizsgált huroknak nem része U_{G2} feszültséggenerátor és R_1 ellenállás, ezért nem vettük a számításnál figyelembe azokat.)

3.1.3. Ellenállások kapcsolásai

Ellenállások soros kapcsolása

A 10. ábrán az első ellenállás végét összekötjük a második elejével, a második végét a harmadik elejével, és így tovább, végül az első elejét és az utolsó végét kapcsoljuk a feszültséggenerátorra. Ezt a kapcsolási módot nevezik **soros** kapcsolásnak. *Soros kapcsolás esetén valamennyi áramköri elemen ugyanakkora áram folyik keresztül.*



10. ábra

A sorosan kapcsolt ellenállásokból álló hálózat helyettesíthető egyetlen ellenállással, amelyet a kapcsolás **eredő ellenállásának** neveznek, jelölése: R_e . Az eredő ellenálláson azonos kapocsfeszültség mellett ugyanaz az áram folyik keresztül, mint amely az ellenálláshálózaton keresztül folyik.

A továbbiakban az eredményhez vezető olyan számításokat, amelyek a vizsgának nem tárgyai, ezért a tanulmányozásból kihagyhatók, sötétebb árnyalással jelöljük.

A 10. ábra kapcsolására a huroktörvényt alkalmazva

$$U = U_{R1} + U_{R2} + U_{R3} + U_{R4}$$

adódik. A soros kapcsolás miatt minden ellenálláson ugyanakkora I áram folyik, ezért Ohm törvénye alkalmazásával

$$U = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 + I \cdot R_4 = I \cdot (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) \quad (1)$$

Az eredő ellenálláson U kapocsfeszültség hatására szintén I áram folyik, ezért

$$U = I \cdot R_e \quad (2)$$

(1) és (2) egyenlet összevetésével adódik az eredő ellenállás értéke:

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

Általánosságban: **a sorosan kapcsolt ellenállások eredője megegyezik az ellenállások összegével:**

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

Példa:

A 10. ábra kapcsolásában $R_1=100 \, \Omega$, $R_2=1,2 \, \text{k}\Omega$, $R_3=4,7 \, \text{k}\Omega$, $R_4=330 \, \Omega$. Mekkora a sorosan kapcsolt ellenállások eredője?

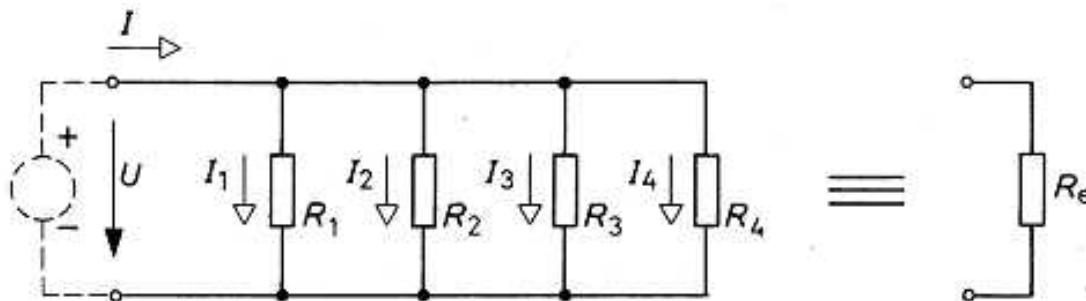
Megoldás: (az ellenállásokat ugyanabban a mértékegységben, itt Ω -ban helyettesítjük be)

$$R_e = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 = 100 + 1200 + 4700 + 330 = 6330 \, \Omega \quad (= 6,33 \, \text{k}\Omega)$$

Ellenállások párhuzamos kapcsolása

A 11. ábrán az ellenállások kezdeteit, majd végeit összekötjük egymással, és az összekötött kezdeteket és végeket kötjük ugyanarra a feszültségre. Ezt a kapcsolási mód a **párhuzamos** kapcsolás.

A párhuzamosan kapcsolt ellenállások szintén helyettesíthetők egy R_e eredő ellenállással, amelyen ugyanakkora kapocsfeszültség esetén ugyanakkora áram folyik, mint a párhuzamosan kapcsolt ellenállásokon.



11. ábra

A közös U kapocsfeszültség hatására R_1 ellenálláson $I_1=U/R_1$, R_2 ellenálláson $I_2=U/R_2$, R_3 ellenálláson $I_3=U/R_3$, végül R_4 ellenálláson $I_4=U/R_4$ áram folyik. Kirchhoff csomóponti törvénye értelmében az párhuzamosan kapcsolt ellenállásokon összességében

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \frac{U}{R_4} = U \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right) \quad (3)$$

áram folyik, ugyanez az áram kell, hogy az eredő ellenálláson U feszültség hatására kialakuljon:

$$I = U \frac{1}{R_e} \quad (4)$$

(3) és (4) egyenlet összevetésével adódik:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (5)$$

A párhuzamosan kapcsolt ellenállások eredőjét az

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

egyenlet segítségével határozhatjuk meg.

A párhuzamos eredőszámítást így is szokták jelölni:

$$R_e = R_1 \times R_2 \times R_3 \times \dots \times R_n$$

A műveletben jelölt „ $\times$ ” a „replusz” művelete (kiolvasása: R_1 replusz R_2 replusz R_3 stb.), jelentése: ezeket az ellenállásokat a párhuzamos eredők szabálya szerint kell összevonni.

(Megjegyzés: Az ellenállás reciprokát *vezetésnek* nevezik, és G betűvel jelölik. Így az eredő vezetésre felírható: $G_e = G_1 + G_2 + \dots + G_n$.)

Két ellenállás párhuzamos kapcsolása esetén a fenti egyenlet rendezésével az eredőt egyszerűen a

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

képlettel számíthatjuk ki.

Példa:

1) Párhuzamosan kapcsoljuk $R_1=100\Omega$ és $R_2=470\Omega$ ellenállást. Mekkora lesz az eredőjük?

Megoldás: =

$$R_e = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 470}{100 + 470} = \frac{47000}{570} = 82,45\Omega$$

2) Párhuzamosan kapcsoljuk az $R_1=1k\Omega$, $R_2=2,2k\Omega$ és $R_3=3,6k\Omega$ ellenállásokat. Mekkora az eredőjük?

Megoldás:

Ha az ellenállásokat $k\Omega$ -ban helyettesítjük az egyenletbe, az eredőt is $k\Omega$ -ban kapjuk. (Ha pedig Ω -ban íránk be azokat, akkor az eredmény is Ω -ban adódna.)

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2,2} + \frac{1}{3,6} = 1 + 0,454 + 0,277 = 1,731$$

$$R_e = \frac{1}{1,731} = 0,577k\Omega \quad (= 577\Omega)$$

3) 100Ω -os ellenállásra van szükségünk, de a rendelkezésünkre álló ellenállás mérés szerinti értéke 105Ω . Mekkora ellenállás párhuzamos kapcsolásával juthatunk a kívánt 100Ω eredőhöz?

Megoldás:

Itt az R_e eredő ellenállás és R_1 ismert, az egyenletet úgy kell átrendezni, hogy R_2 meghatározására legyen alkalmas:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_e} - \frac{1}{R_1} = \frac{1}{100} - \frac{1}{105} = 0,01 - 0,00952 = 0,00048$$

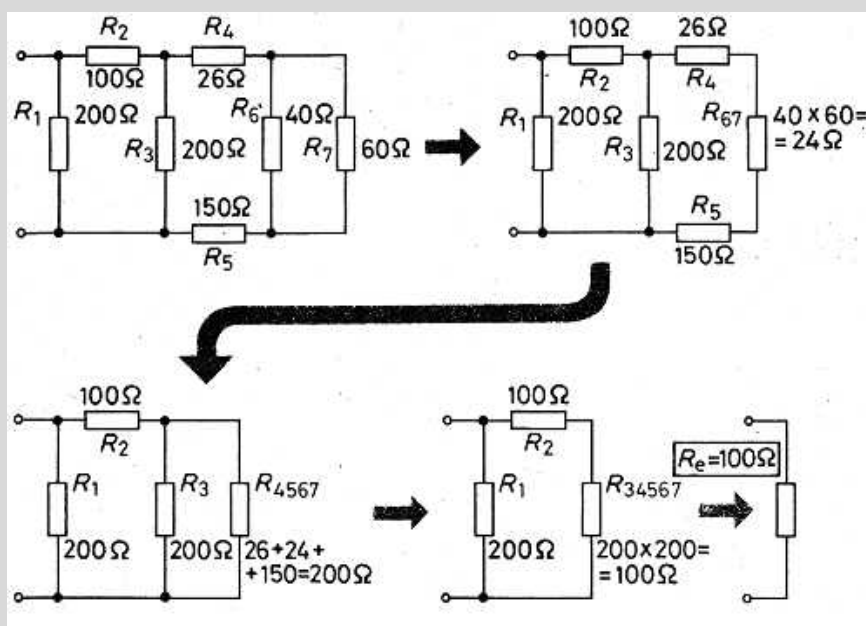
$$R_2 = \frac{1}{0,00048} = 2083\Omega$$

Tehát, közelítőleg 2083Ω -os ellenállást kell keresnünk.

Ellenállások vegyes kapcsolása

Példa:

A 12. ábra bal felső részén ellenállásokból kialakított hálózatot láthatunk. A feladat: határozzuk meg a hálózat eredő ellenállását.



12. ábra

Megoldás:

Eljárásunk az lesz, hogy a hálózatot egyszerű, soros és párhuzamos kapcsolású részhálózatokra bontjuk.

Először azt vehetjük észre, hogy R_6 és R_7 ellenállás párhuzamosan kapcsolódik egymással. Ezért első lépésként kiszámítjuk ezek párhuzamos eredőjét: $40\Omega \times 60\Omega = 24\Omega$. Ezzel az összevonással az ábra jobb felső részén ábrázolt hálózathoz jutunk.

Most azt láthatjuk, hogy R_4 , R_{67} , és R_5 ellenállások sorba kapcsolódnak, eredőjük a három ellenállás összege: $26+24+150=200\Omega$. Ezzel az összevonással az ábra bal alsó részletéhez jutottunk.

Ebben a hálózatban R_3 és R_{4567} egymással párhuzamosan kapcsolódik, párhuzamos eredőjük $200 \times 200 = 100\Omega$. (Az ábra alsó, középső részlete.)

Az így összevont hálózatban viszont R_2 és R_{34567} kapcsolódik sorba, eredőjük a két ellenállás összege: $100+100=200\Omega$. Ez a 200Ω -os eredő kapcsolódik párhuzamosan R_1 ellenállással, a két ellenállás párhuzamos eredője $200 \times 200 = 100\Omega$. Most már a hálózat valamennyi ellenállását összevontuk, tehát az egész hálózat eredő ellenállása 100Ω .

3.1.4. Villamos munka és teljesítmény

Villamos munka

Az áramló villamos töltések energiája a fogyasztón hő- fény- mechanikai, vagy vegyi energiává alakul át, munkát képes végezni. Kimutatható, hogy ha egy fogyasztón U feszültség hatására t ideig I áram folyik, akkor a végzett **villamos munka:**

$$W = U I t$$

A munka mértékegysége:

$$[W] = [U] * [I] * [t] = V * A * s = Ws \text{ (wattszekundum)}$$

tehát ha a feszültséget voltban, az áramot amperben, az időt s-ben helyettesítjük be, az eredményt wattszekundumban kapjuk. (A fizikában általánosan használt mértékegységekkel $1 Ws = 1 J = 1 Nm$)

A Ws kis egység, melynek általában a többszörösét használják:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Wh (wattóra)} &= 3600 \text{ Ws} \\ 1 \text{ kWh (kilowattóra)} &= 1000 \text{ Wh} = 10^3 \text{ Wh} \\ 1 \text{ MWh (megawattóra)} &= 1000 \text{ kWh} = 10^6 \text{ Wh.} \end{aligned}$$

A villamos munkát szokás villamos fogyasztásnak nevezni.

Villamos teljesítmény

A teljesítmény az időegység alatt végzett munka:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t} = U \cdot I$$

tehát

$$P = U I$$

a teljesítmény mértékegysége:

$$[P] = [U] * [I] = V * A = W$$

tehát ha a feszültséget voltban, az áramot amperben helyettesítjük be, az eredményt wattban kapjuk. A watt kis mértékegység, melynek gyakran a többszörösei használatosak:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW (kilowatt)} &= 1000W = 10^3 W, \\ 1 \text{ MW (megawatt)} &= 1000 kW = 10^6 W. \end{aligned}$$

Kis teljesítményű áramkörökben használatos a watt törtrésze is, mint mértékegység:

$$1 \text{ mW (milliwatt)} = 0,001W = 10^{-3} W.$$

(Átszámítás a régebben használatos „lóerő” mértékegységre: $1 \text{ kW} = 1,36 \text{ LE.}$)

Példa:

1) Mekkora teljesítményű az a fogyasztó, amely 230V kapocsfeszültség mellett 10A áramot vesz fel?
Megoldás:

$$P = U * I = 230 * 10 = 2300 \text{ W } (= 2,3kW)$$

2) Mennyi áramot vesz fel a gépkocsi akkumulátorából a 12V 55W-os fényszóró izzó?

Megoldás:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{55}{12} = 4,58 A$$

3) Egy hőszugárzó 230 V feszültségről 12 A áramot vesz fel. Mekkora a fogyasztása, ha 8 órán keresztül működtetik?

Megoldás:

A fogyasztó által felvett teljesítmény:

$$P = U \cdot I = 230 \cdot 12 = 2760 \text{ W}$$

A fogyasztás (azaz a végzett munka):

$$W = P \cdot t = 2760 \cdot 8 = 22080 \text{ Wh} = 22,08 \text{ kWh}$$

3.1.5. Valóságos (technikai) ellenállások

A kapcsolási rajzon megjelenő ellenállás *ideális áramköri elem*, melynek *pontosan* a mellé írt értékű ellenállása van (és ez soha nem változik meg), bármekkora feszültséget rákapcsolhatunk, bármekkora villamos teljesítményt fel tud venni (el tud disszipálni, azaz hővé tud alakítani). A valóságban az ellenállás, mint technikai alkatrész, soha nem ilyen tulajdonságú. A fő különbségeket az alábbiakban foglalhatjuk össze:

Névleges érték, tűrés

Sok más alkatrészhez hasonlóan az ellenállások tömeggyártását is a *szabványosítás* tette lehetővé. Nyilvánvaló, hogy (bár a számítással meghatározott ellenállás értéke bármekkora adódhat), ipari méretekben előállítani és készletezni csak előre meghatározott értékű ellenállásokat lehet. Mivel a tervezők eleve közelítésekkel, becslésekkel dolgoznak, általában nem okoz problémát, hogy nem a kiszámított, hanem az ahhoz legközelebb eső szabványos értékű ellenállást alkalmazzák. Így lehetővé válik a tömegben előre gyártott, olcsó alkatrészek felhasználása.

Az alkatrész egyik tulajdonsága a **névleges értéke** (pl. 1 kΩ). A valóságban azonban *pontosan* 1kΩ-os ellenállást nem lehet készíteni, ettől az értéktől az ellenállás tényleges értéke eltérhet. Az eltérés engedélyezett nagyságát a **tűrés** határozza meg. Ha pl. egy 1 kΩ-os ellenállás tűrése ±1%, akkor az ellenállás tényleges értéke 1kΩ = 1000Ω 1%-ával, azaz 10 Ω-al lehet kisebb vagy nagyobb a névleges értéknél (tehát az ellenállás 990Ω és 1010Ω közötti értékű).

Általános felhasználásra ± 10%, vagy ± 5% tűrésű ellenállásokat gyártanak. Az ellenállások névleges értékét úgy határozták meg, hogy

- tűrésmezők egybeérjenek (azaz az előző érték maximuma és a következő érték minimuma átfedje egymást), ettől minimális eltérés a b) szempont miatt elképzelhető,
- a sorba tartozó ellenállás értéke két számjeggyel, és tíz valamely hatványával kifejezhető legyen. (Pl. 330Ω=3,3*10²Ω).

A ± 10%-os (E12) névleges ellenállás-sorozat a következő 12 értékből áll:

Névleges érték	Minimum (-10%)	Maximum (+10%)
1,0	0,90	1,10
1,2	1,08	1,32
1,5	1,35	1,65
1,8	1,62	1,98
2,2	1,98	2,42
2,7	2,43	2,97
3,3	2,97	3,63
3,9	3,51	4,29
4,7	4,23	5,17
5,6	5,04	6,16
6,8	6,12	7,48
8,2	7,38	9,02

Pl. ha a számítás szerint 634,5 k Ω -os ($= 6,345 \cdot 10^5 \Omega$) ellenállásra van szükségünk, a táblázatból megállapíthatjuk, hogy a 6,345 érték a 6,80 névleges értékű ellenállás tűrésmezéjében szerepel, tehát a megfelelő névleges érték a $6,8 \cdot 10^5 \Omega = 680 \text{ k}\Omega$ lesz.

(Egyúttal azt is láthatjuk, hogy bármilyen értékre sikerül is a gyártás során egy ellenállás, az valamely névleges érték tűrésmezéjébe besorolható.)

Ha pontosabb, $\pm 5\%$ tűrésű ellenállásra van szükségünk, a 24 tagú E24 sorból választhatunk:

Névleges érték	Minimum (-5%)	Maximum (+5%)
1,0	0,95	1,05
1,1	1,045	1,155
1,2	1,140	1,260
1,3	1,235	1,365
1,5	1,425	1,575
1,6	1,520	1,680
1,8	1,710	1,890
2,0	1,900	2,100
2,2	2,090	2,310
2,4	2,280	2,520
2,7	2,565	2,835
3,0	2,850	3,150
3,3	3,135	3,465
3,6	3,420	3,780
3,9	3,705	4,095
4,3	4,085	4,515
4,7	4,465	4,935
5,1	4,845	5,355
5,6	5,320	5,880
6,2	5,890	6,510
6,8	6,460	7,140
7,5	7,125	7,875
8,2	7,790	8,610
9,1	8,645	9,555

Pl. 353 Ω -os számított ellenállás esetén a legközelebbi, 360 Ω értéket választjuk.

Az ellenállás tűrése nem csak arra ad útmutatást, hogy az ellenállás műhelyhőmérsékleten mekkora értékű a felhasználás időpontjában, hanem az ellenállás értéke a teljes élettartama alatt a megadott tűrésmezőn belül kell, hogy maradjon.

(Így pl. hiába válogatunk ki $\pm 10\%$ -os tűrésű ellenállásokból több darabot, amelyeket sorba kapcsolva a mérőműszerünk pontosan 1000 Ω eredő ellenállást mutat, lehetséges, hogy néhány hónap múltán az így kialakított ellenállás értéke akár 1100 Ω -ra változik, ez a $\pm 10\%$ -os tűrésbe belefér.

Ha a kiszámított értékhez valóban közel eső, nagyon nagy pontosságú, precíziós, „szűk tűrésű” ellenállásra van szükségünk, azt a gyártótól egyedileg kell megrendelni.)

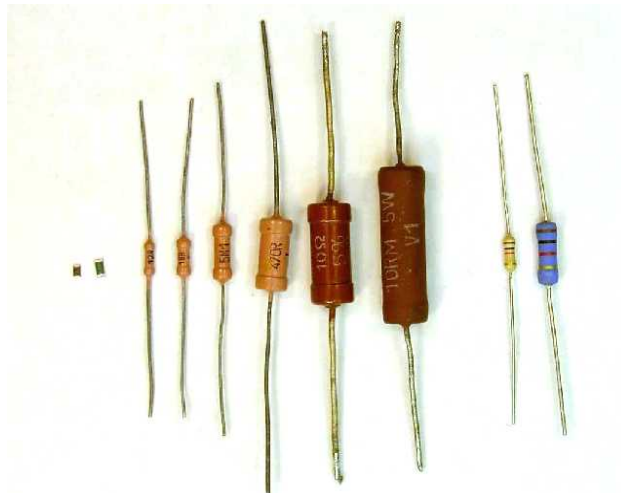
Névleges teljesítmény

Az ellenálláson a sarkaira kapcsolt feszültség hatására áram indul meg. Az áram és a feszültség szorzata megadja azt a teljesítményt, ami az ellenálláson hővé alakul. Az ellenállás addig melegszik, ameddig a környezetének (sugárzással, vagy hővezetéssel) leadott hőmennyiség meg nem egyezik a felvett villamos teljesítményből keletkező hőmennyiséggel. Ekkor az ellenállás hőmérséklete stabilizálódik.

Ahhoz, hogy az ellenállás a megfelelő hőmennyiséget le tudja sugározni, kellő nagyságú sugárzó felületre van szüksége. Ha a sugárzó felület túl kicsi, az ellenállás túlhevül, és elég. Ezért a gyártó minden ellenállásra megadja a *terhelhetőségét*, azaz azt a teljesítményt, amelyet az ellenállás károsodás nélkül el tud disszipálni. Ilyen, ma szokásos teljesítmény értékek: 1/16W, 1/8W, 1/4W, 1/2W, 1W, 2W stb. Minél nagyobb az ellenállás terhelhetősége, annál nagyobbak mechanikai méretei (felülete).

Az ellenállás terhelhetősége mechanikai méretein kívül függ anyagától (mekkora hőfokot visel el károsodás nélkül), és a hűtés módjától (sugárzással vagy hővezetéssel is hűl). Az idők folyamán az ellenállások mérete több okból is jelentősen csökkent:

- az elektroncsöves berendezésekben nagyobb teljesítményű (min. 0,5W) ellenállásokra volt szükség, a tranzisztorok, majd az integrált áramkörök megjelenésével már az 1/4W, 1/8W, 1/16W teljesítmény is általában elegendő,
- a régi szénréteg ill. kristályos szénréteg ellenállásanyagokat felváltotta a *fémréteg* ellenállás, amely kisebb zaja mellett nagyobb hőmérsékletet is elvisel,
- a korszerű SM (surface mounted = felületszereléses) technológia lehetővé teszi a hőátadással való hűtést is.



13. ábra
Ellenállások

A 13. ábrán balról jobbra a következő ellenállásokat láthatjuk: „0805” méretű (1/4W-os), és „1206” méretű (1/2W-os) SM ellenállás, és hagyományos ellenállások: 1/8W, 1/4W, 1/2W, 1W, 2W, 5W terhelhetőséggel, és 1/4W ill. 1/2W (színsávos jelölésű) ellenállás.

A legáltalánosabban használt fémréteg ellenállás (az ábrán az 1/8W...2W teljesítményűek ilyenek) teste kerámia rúd, amelyre ellenállás anyag fémréteget gőzölögtetnek. A rúd két végére kivezetéssel ellátott fém sapkát sajtolnak. Az ellenállás végleges értékét hengerbe való beköszörüléssel alakítják ki (pl. spirális köszörülés esetén az ellenálláspálya hosszabb, ezért az ellenállás nő).

Megjegyzés: Nagyfrekvenciás alkalmazásra speciális, „indukciószegény” ellenállásokat gyártanak, melyekben a beköszörülés nem spirális, hanem a tengellyel párhuzamos.

Hőmérsékleti tényező

A vezetők ellenállása a hőmérséklet függvényében változik. Általában az anyagok ellenállása a hőmérséklet növekedésével nő, ezeket pozitív hőmérsékleti tényezőjű, (PTK = pozitív hőmérséklet-koefficiensű) anyagoknak nevezik. Más ellenállás anyagok ellenállása a hőmérséklet emelkedésével csökken (NTK = negatív hőmérséklet-koefficiensű, negatív hőmérsékleti tényezőjű anyagok). Az ellenállások hőmérsékleti tényezőjét a gyártók *ppm (part per million = milliomodrész)* egységben adják meg. Pl. a „PTK 200ppm/°C” azt jelzi, hogy egy Celsius fok hőmérséklet növekedés hatására az ellenállás értéke 200 milliomodrészével nő. Pl. egy ilyen, 1kΩ ellenállás értéke 30 °C hőmérsékletváltozás hatására 6Ω-ot változik.

Megengedett maximális feszültség

Ha az ellenállásra ismétlődő, rövid időtartamú, nagy feszültségű impulzusok formájában kapcsolunk feszültséget, előfordulhat, hogy bár az ellenálláson hővé alakuló (átlag)teljesítmény nem lépi túl a megengedett értéket, de a túl nagy feszültség átívelést (elektrosztatikus átütést) okoz az ellenállás egyes részei között. Ezért a gyártók megadják az ellenállásra rövid időre károsodás nélkül kapcsolható feszültség maximumát is.

3.1.6. Az ellenállások jelölése, feliratai

A félvezetős áramkörökben alkalmazott, kis teljesítményű és ezért kis méretű ellenállásokon a lehető legkevesebb karakter felírását szükségessé tevő jelölési rendszert alkalmaznak. Az ellenálláson *névleges értékét* és *tűrését* tüntetik fel.

A nem szűktűrésű (tehát az E24 sorba tartozó 5% tűrésű, vagy az E12 sorba tartozó 10% tűrésű) ellenállások névleges értéke nem több, mint 2 számjeggyel és a szorzóra utaló betűjellel ($R = \Omega$, $k = k\Omega$, $M = M\Omega$), tehát összesen legfeljebb 3 karakterrel kifejezhető:

$$\begin{aligned} 47R &= 47 \Omega \\ 12k &= 12 k\Omega \\ 1M &= 1 M\Omega \end{aligned}$$

A tizedespontot a szorzóra utaló betűjelnek az egész és a tizedesrész közé helyezésével jelölik (ennek oka, hogy így a tizedespont nem kopik le hamarabb az ellenállásról, mint a jelölés többi része):

$$\begin{aligned} 8R2 &= 8,2 \Omega \\ 3k6 &= 3,6 k\Omega \\ 4M7 &= 4,7 M\Omega \end{aligned}$$

Ha az egészrész 0, azt a szorzóra utaló betűjel előtt fel sem tüntetik:

$$\begin{aligned} R1 &= 0R1 = 0,1\Omega \\ k82 &= 0k82 = 0,82 k\Omega = 820 \Omega \\ M12 &= 0M12 = 0,12 M\Omega = 120 k\Omega \end{aligned}$$

Az ellenállás tűrését az ABC egyetlen nagybetűjével jelzik. Minél előbb van a betű az ABC-ben, annál kisebb a tűrés. A nem szűktűrésű ellenállások a J vagy K (esetleg M) csoportba tartoznak:

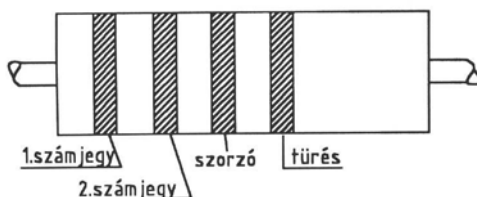
$$\begin{aligned} J &= \pm 5\% \\ K &= \pm 10\% \\ M &= \pm 20\% \end{aligned}$$

(A szűktűrésű ellenállásoknál pedig:

$$\begin{aligned} B &= \pm 0,1\% \\ C &= \pm 0,25\% \\ D &= \pm 0,5\% \\ F &= \pm 1\% \\ G &= \pm 2\% \end{aligned}$$

Elvárás, hogy a nyomtatott áramkörbe az ellenállások úgy legyenek beültetve, hogy értékjelzésük felülről leolvasható legyen. A kézi beültetés korában ezt az előkészítő betanított munkások biztosították az alkatrészek lábainak megfelelő irányú hajlításával. A gépesített beültetéshez olyan rendszert dolgoztak ki, amelyben az értékjelzés minden irányból leolvasható (egyúttal ez a jelölési rendszer kopásállóbb is, mivel az ellenállás nem kopott részén az értékjelzés még leolvasható).

Nem szűktűrésű ellenállásokon 4 (esetleg 3) színes sáv mutatja az ellenállás értékét (14.ábra):



14. ábra
Színsávjelölés nem szűktűrésű ellenállásnál

Az első és második színes karika a névleges érték két számjegyét jelenti (ne felejtsük el, hogy a nem szűktűrésű ellenállás névleges értéke két számjeggyel mindig kifejezhető). A harmadik karika a szorzót mutatja: a mutatott szám azt jelzi, hogy az első két számjegyből kiadódó számot 10-nek hányadik hatványával kell megszorozni. A negyedik karika a tűrésre utal.

A színek jelentése:

a) Első két karika: a névleges érték két számjegye

- 0 = fekete
- 1 = barna
- 2 = piros
- 3 = narancssárga
- 4 = sárga
- 5 = zöld
- 6 = kék
- 7 = lila (ibolya)
- 8 = szürke
- 9 = fehér

b) Harmadik karika: szorzó

- 0 – 9 azonos az a)-val
- 1 = arany ($\cdot 0,1$)
- 2 = ezüst ($\cdot 0,01$)

c) Negyedik karika: tűrés

- $\pm 5\%$ = arany
- $\pm 10\%$ = ezüst
- (nincs negyedik karika) = $\pm 20\%$

Példák:

Barna	Zöld	Narancs	Arany	
1	5	3	$\pm 5\%$	$= 15 \cdot 10^3 \Omega = 15 \text{ k}\Omega$
Piros	Piros	Ezüst	Ezüst	
2	2	-2	$\pm 10\%$	$= 22 \cdot 10^{-2} \Omega = 0,22 \Omega$

Szűktűrésű ellenállások esetén a névleges érték meghatározásához három számjegy szokásos, ezért ilyenkor nem 4, hanem 5 színsáv kerül az ellenállásra, amelyből az első három a névleges értéket, a negyedik a szorzót (tíz adott hatványa), az ötödik a tűrést mutatja. Ilyenkor az ötödik helyen álló színsáv jelentése:

- Lila = $\pm 0,1\%$
- Kék = $\pm 0,25\%$
- Zöld = $\pm 0,5\%$
- Barna = $\pm 1\%$
- Piros = $\pm 2\%$

Példák:

Barna	Piros	Kék	Narancs	Barna	
1	2	6	3	$\pm 1\%$	$= 126 \cdot 10^3 \Omega = 126 \text{ k}\Omega$
Barna	Fekete	Fekete	Piros	Zöld	
1	0	0	2	$\pm 0,5\%$	$= 100 \cdot 10^2 \Omega = 10 \text{ k}\Omega$

A színes karikák leolvasását mindig annál a karikánál kell kezdeni, amely közelebb van az ellenállás kivezetéséhez. Kétség esetén vizsgáljuk meg, melyik szélső karika jelentheti a tűrést (pl. nem jelentheti, ha narancssárga, fehér vagy fekete), ez is útbaigazítást adhat.

Az SMD (Surface Mounted Devices = felületre szerelt eszközök) technológia még kisebb méretű alkatrészekkel dolgozik, melyeknél az ellenállások jelölésére a színes karikák alkalmatlanok. Ezekre a miniatűr alkatrészekre a névleges értékre utaló 3 számjegyet írnak fel, melyek a színsávos jelölés logikája szerint a névleges érték első két számjegyet és a szorzót (tíz hatványa) mutatják:

222	=	$22 \cdot 10^2 \Omega = 2,2 \text{ k}\Omega$
104	=	$10 \cdot 10^4 \Omega = 100 \text{ k}\Omega$
1R0	=	1Ω
0R0	=	rövidzár (ellenállás méretben)

Ha nem három, hanem négy számjegy szerepel az ellenálláson, az arra utal, hogy szűktűrésű ellenállásról van szó, ez esetben az első három szám a névleges érték három számjegyet, a negyedik a szorzót mutatja:

$$1542 = 154 \cdot 10^2 \Omega = 15,4 \text{ k}\Omega$$

SMD ellenállásokon a tűrést nem jelzik (a szokásos érték nem szűktűrésű ellenállásnál $\pm 5 \%$).

Gyakran előfordul, hogy ugyanilyen logika szerint jelölnek más, szubminiatűr alkatrészeket (kondenzátorok, trimmer potenciométerek stb.) Ha a jelölés utolsó számjegye nem 0, az figyelmeztetés, hogy ilyen jelölési rendszerről lehet szó, pl. 472 felírat egy trimmer potenciométeren nyilván nem 472Ω -ot jelent (az nem az E24 sor szerinti érték) hanem $47 \cdot 10^2 = 4,7 \text{ k}\Omega$ -ot.

3.1.7. Változtatható ellenállások (potenciométerek)

Sokszor az ellenállás pontos értékét a készülék bemérésekor, hitelesítésekor kell beállítani, máskor (pl. egy hagyományos rádió hangerő-szabályozója esetében) az ellenállás értékét (vagy két ellenállás arányát) üzem közben is folyamatosan változtatnunk kell.

Ilyen esetben változtatható értékű ellenállást alkalmaznak. Olyan ellenállás „pályát” alakítanak ki, amelyet egy csuszka „tapogat le”, azaz az ellenállás pályán végighaladva annak mindig más pontjával érintkezik. Az ellenálláspálya egyik végpontja és a csuszka érintkezési pontja közötti szakasz ellenállása, illetve a csuszka és az ellenállás másik végpontja közötti szakasz ellenállása két sorba kapcsolt ellenállásnak felel meg, melyeket a csuszka elfordításával változtathatunk (az egyik növelésével a másik csökken, a kettő összege állandó: a teljes ellenálláspálya ellenállása.). Ha a két végpont különböző potenciálon van, a csuszka mozgatásával a potenciálja is változik, ezért ezt az alkalmazást, és ennek nyomán magát az alkatrészt **potenciométernek** nevezik.

A 15. ábra két potenciométer felépítését, jobb oldalon pedig a potenciométer áramkörti jelképét mutatja. A bal oldali, szétbontott potenciométeren kerámia lapkára vitték fel a körív alakú szénréteg ellenálláspályát, melynek mindkét végpontja ki van vezetve. Összerakott állapotban (a potenciométer fém házát az ábra nem mutatja) a zöld műanyag csuszkatartót a tengely segítségével forgathatjuk úgy, hogy az általa tartott fekete szénecsuszka az ellenálláspályát végigjárja, miközben a csuszkát tartó rugó hozzáér az ellenálláspálya közepén lévő fém szegecshez, mely a kerámia lap másik oldalán a csuszka elektromos kivezetését tarja.



15. ábra
Potenciométerek

Az ábra középső részén „huzalpotenciométert” láthatunk, amelyen az ellenálláspálya szigetelőanyagra tekercselt ellenálláshuzalból, szintén körív mentén van kialakítva. A tengellyel elfordítható csuszka elektromosan a középső kivezetéshez csatlakozik.

A potenciométer ellenálláspályáját vagy úgy alakítják ki, hogy a csuszka elfordulásakor az egyik végpont és a csuszka közötti ellenállás a csuszka elfordulási szögével arányosan nőjön (*lineáris potenciométer*, jelölése: A), vagy úgy, hogy az elfordulási szöggel ez az ellenállás közel logaritmikusan változzon (*logaritmikus potenciométer*, jelölése attól függően, hogy az ellenállás változása a tengely milyen irányú elfordításakor logaritmikus: B vagy C).

Ha a potenciométert változtatható ellenállásként kívánjuk használni, csak az egyik végpontot, és a csuszka kivezetését kötjük be. Ilyenkor szokás a csuszkát az ellenállás másik végpontjával elektromosan összekötni, hogy ha a csuszka mozgása közben egy pillanatra nem érintkezne az ellenálláspályával, a változtatható ellenállás erre az időre sem szakadást, hanem a teljes ellenállását mutassa.

Vannak potenciométerek (pl. rádió vevőkészülék hangerő szabályozója), amelyek csúszkájának helyzetét üzemszerűen állítják, az ilyen potenciométerek tengelyét a készülék előlapjára kivezetik, és forgatógombot szerelnek rá.

Az olyan potenciométereket, amelyek a berendezés bemérésekor, hitelesítésekor való egyszeri vagy néhány alkalommal való beállításra szolgálnak, úgy alakítják ki, hogy csavarhúzóval lehet a csuszkát állítani, ezeket **trimmer** (beállító) potenciométereknek nevezik. A 16. ábrán különféle trimmer potenciométereket láthatunk. Az ábra jobb oldala a trimmer potenciométer áramköri jelképét mutatja.



16. ábra
Trimmer ellenállások

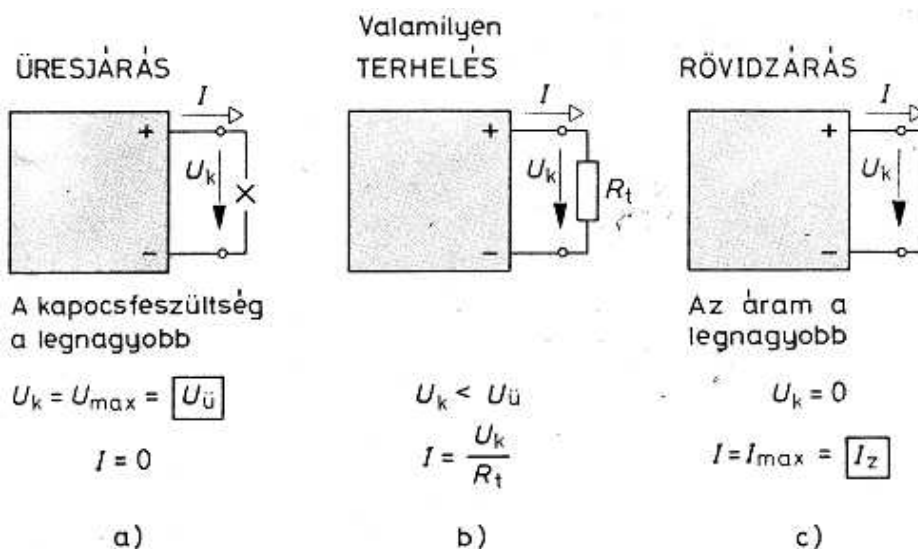
3.2. Feszültségforrások

Valóságos feszültségforrás

A 3.a. ábrán egy U kapocsfeszültségű *ideális* feszültséggenerátor rajzjelét látjuk. Az *ideális* feszültséggenerátor kapcsain a terheléstől függetlenül ugyanazt a feszültséget (U) szolgáltatja.

A valóságos feszültségforrások kapocsfeszültsége azonban függ a terhelő ellenállástól (illetve a kialakuló áramtól).

A *valóságos feszültségforrás* kapocsfeszültsége (U_k) akkor a legnagyobb, amikor nem terheljük, azaz *szakadással* zárjuk le (17.a. ábra). Ilyenkor terhelő áram nem folyik. A generátornak ezt az állapotát **üresjárásnak** nevezik, az ekkor mérhető kapocsfeszültség az **üresjárási feszültség** (U_0).



17. ábra

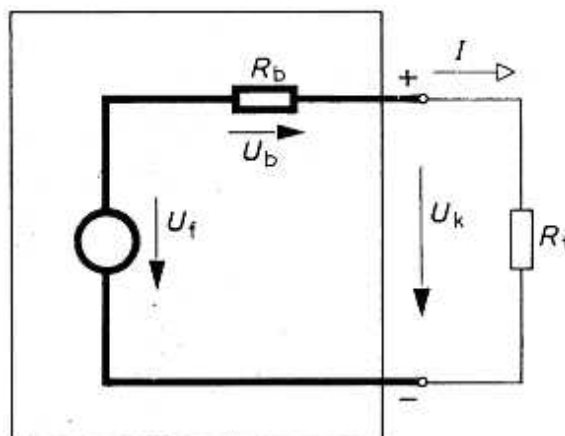
Ha a generátort R_t terhelő ellenállással zárjuk le, U_k kapocsfeszültsége $U_{\bar{u}}$ üresjárási feszültségnél kisebb (17.b. ábra). Ekkor a terhelő ellenálláson (Ohm törvényének alkalmazásával)

$$I = \frac{U_k}{R_t}$$

áram folyik.

A feszültségforrás kapocsfeszültsége 0-ra csökken, ha kapcsait rövidre zárjuk (17.c. ábra). Ekkor folyik a legnagyobb, ún. **rövidzárási áram** (I_z), amelyet a feszültségforrás szolgáltatni képes.

Megállapítható, hogy a valóságos feszültségforrás úgy viselkedik, mint egy ideális feszültséggenerátor, és egy vele sorbakapcsolt **belső ellenállás** (18. ábra).



18. ábra

E feszültséggenerátor feszültségét **forrásfeszültségnek** (U_f) nevezik. A forrásfeszültség megegyezik a valóságos generátor üresjárási feszültségével:

$$U_f = U_{\bar{u}}$$

A feszültségforrás kapocsfeszültsége azért csökken a terhelő áram növekedésével, mert ez az áram R_b belső ellenálláson is átfolyik, és rajta feszültséget ejt (így Kirchhoff huroktörvénye értelmében

kisebbs feszültség jut a terhelő ellenállásra). Amikor a feszültségforrást rövidre zárjuk, a teljes forrásfeszültség a belső ellenállásra kapcsolódik, ezért kialakuló *rövidrezárási áram*:

$$I_z = \frac{U_f}{R_b}$$

Példa:

1) Egy zseblámpatelep üresjárási feszültsége 4,5V. Ha 200 mA áramfelvételű zseblámpaizzót kapcsolunk rá, a kapocsfeszültség 3,5V-ra csökken. Mekkora a telep belső ellenállása?

Megoldás:

Az ideális generátor forrásfeszültsége megegyezik az üresjárási feszültséggel, ez 4,5V.

Ha az izzó bekapcsolásakor a kapocsfeszültség 3,5V-ra csökken, Kirchhoff huroktörvénye szerint a belső ellenálláson $4,5 - 3,5 = 1V$ feszültség esik. Így a belső ellenállás Ohm törvényének alkalmazásával (ha a feszültségeket V-ban, az áramot A-ban helyettesítjük be, az eredményt Ω -ban kapjuk):

$$R_b = \frac{U_f - U_k}{I} = \frac{4,5 - 3,5}{0,2} = \frac{1}{0,2} = 5\Omega$$

2) Ha ugyanerre a telepre 10 Ω -os terhelő ellenállást kapcsolunk, mekkora kapocsfeszültség alakul ki?

Megoldás:

A telep forrásfeszültsége 4,5V, belső ellenállása 5 Ω .

Ha a kapcsokat 10 Ω -os ellenállással terheljük, az áramkörben összesen $R_b + R_t = 5 + 10 = 15\Omega$ eredő ellenállás van jelen. Ohm törvénye értelmében

$$I = \frac{U_f}{R_b + R_t} = \frac{4,5}{15} = 0,3A$$

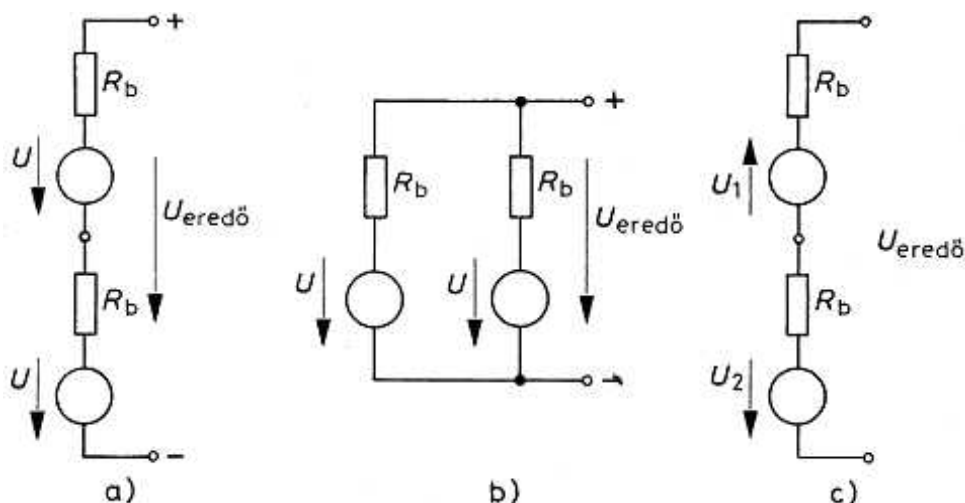
áram folyik, melynek hatására a terhelő ellenálláson létrejövő feszültség

$$U_k = I \cdot R_t = 0,3 \cdot 10 = 3V$$

amely megegyezik a kapocsfeszültséggel.

Feszültségforrások soros és párhuzamos kapcsolása

Ha a szükséges feszültség nagyobb, mint egy energiaforrás feszültsége, *több energiaforrást sorba kell kapcsolni* (19.a. ábra).

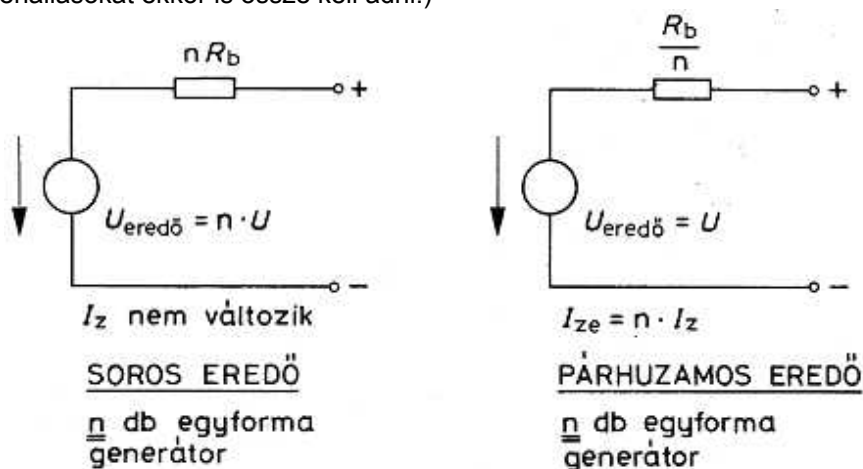


19. ábra

Ilyen esetben olyan energiaforrást nyerünk, melynek üresjárási feszültsége megegyezik a sorba kapcsolt feszültségforrások üresjárási feszültségeinek összegével, eredő belső ellenállása pedig a sorbakapcsolt feszültségforrások belső ellenállásainak az összegével. A 20. ábra bal oldala az

eredő forrásfeszültséget és belső ellenállást mutatja n darab egyforma generátor soros kapcsolása esetén.

(Ha a 19.c. ábrának megfelelően ellentétes polaritással kapcsoljuk sorba a feszültségforrásokat, az eredő feszültség számításánál a fordított polaritású feszültséget negatív előjellel kell figyelembe venni, de a belső ellenállásokat ekkor is össze kell adni.)



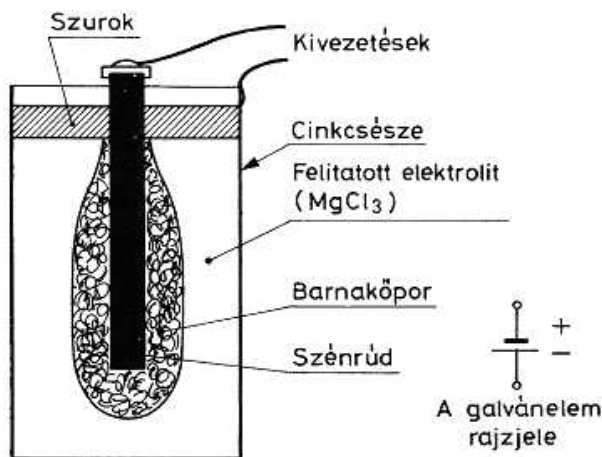
20. ábra

Ha a szükséges áramerősség nagyobb, mint egy energiaforrás megengedett terhelhetősége, akkor kell több energiaforrást párhuzamosan kapcsolni (19.b. ábra). Célszerű azonos forrásfeszültségű és belső ellenállású generátorokat párhuzamosan kapcsolni, ebben az esetben olyan energiaforrást nyerünk, melynek forrásfeszültsége megegyezik a párhuzamosan kapcsolt generátorok (megegyező) forrásfeszültségével, belső ellenállása pedig n generátor párhuzamos kapcsolása esetén egy generátor belső ellenállásának n -ed részével (20. ábra jobb oldali kapcsolás).

Elemek, telepek

A valóságos feszültségforrások egyike a *galvánelem*, amely kémiai energiát alakít át villamos energiává. A kémiai folyamat révén az elem fém alkotórészei maradandó változást szenvednek (feloldódnak, felületükön sók rakódhatnak le), ezért e folyamat végén az elem tönkremegy (üresjárási feszültsége csökken, belső ellenállása megnő).

Igen régen a már bemutatott (hígított kénsavba mártott réz- és horganylemezéből álló) és hasonló rendszerű (üvegedényben elhelyezett folyadék elektrolitba merülő elektródákból álló) galvánelemeket alkalmaztak. Ma kizárólag *szárazelemeket* használnak, amelyekben az elektrolitot nedvszívó anyaggal itatják fel (így nem folyhat ki, ezért nevezik szárazelemnek). A hagyományos szárazelem felépítését a 21. ábra mutatja.



21. ábra

Az elem negatív elektródája a cink csésze, a pozitív elektróda a középén, szigetelten elhelyezkedő szénrúd. Az elektrolit általában magnézium-klorid ($MgCl_2$) vizes oldata, szálas, vagy pépes anyagba felitatva. A szénrudat barnakőpor (MnO_2) „depolarizátorral” veszik körül, hogy az elem működése közben a pozitív elektródán felszabaduló (és az elem belső ellenállását nagyon megnövelő) hidrogént eltávolítsa (vízzé oxidálja).

Az elem működése folyamán a cink csésze feloldódik, és kilyukadhat. Ekkor az elektrolit kifolyhat, és tönkretelheti, szétmarhatja azokat az alkatrészeket, amelyekkel kapcsolatba kerül. Ennek elkerülése céljából hívják fel a felhasználók figyelmét a teleses készülékek gyártói, hogy ha hosszabb ideig nem használják a készüléket, az elemeket távolítsák el belőle.

A szárazelemeket folyamatosan fejlesztik, hogy élettartamukat, hőmérséklettűrésüket, kapacitásukat növeljék, belső ellenállásukat csökkentsék, illetve védekezzenek az elektrolit kifolyása ellen a csésze kilyukadása esetén. A fejlesztés eredményeként jöttek létre (más anyagból készült elektródák és elektrolitok, valamint az elektrolit kifolyása ellen védő burkolat alkalmazásával) az ún. *alkáli* elemek.

A szárazelem névleges üresjárási feszültsége 1,5V (ténylegesen új állapotban ennél néhány tized voltal több, a használat során pedig folyamatosan csökken). Az elemeket különböző méreteken gyártják. Minél nagyobb a méret, annál nagyobb az elem kapacitása (és annál kisebb a belső ellenállása):

Jelzés	Magyar megnevezés	Átmérő (mm)	Hosszúság (mm)	Max. kapacitás (mAh) (2005 év végén, típusfüggő)	
				Elem (Alkáli)	Akkumulátor (Ni-MH)
AAA	mikro, LR03	10,5	44,5	1250	950
AA	ceruza, LR6	14,5	50,5	2850	2600
C	baby, LR14	26,2	50,0	8350	4500
D	góliát, LR20	34,2	61,5	20500	9000

Ha az elemi cella 1,5V-jánál nagyobb feszültségre van szükség, több elem sorba kapcsolásával *telep*hez jutunk:

Megnevezés, jelzés	Méret (mm)	Max. kapacitás (mAh) (2005 év végén, típusfüggő)	
		Telep (Alkáli)	Akkumulátor (Ni-MH)
9V, 6LR61	17.5 x 26.5 x 48.5	625	200

A 22. ábra segítséget ad az elemek méreteinek összehasonlításához:



22. ábra. Álló sor balról jobbra: C, D elemek, 9V telep
Fekvő elemek balról jobbra: AAA, AA

Akkumulátorok

Az akkumulátor energiatároló berendezés, amely töltéskor a bevezetett villamos energiát vegyi energiává alakítja át, vegyi energia formájában huzamosabb ideig tárolni tudja, majd kisütéskor villamos energiává alakítja vissza.

Az akkumulátorra fogyasztót kapcsolva (*kisütés*) az akkumulátor úgy működik, mint egy galvánelem; a töltésszétválasztó folyamat közben elektródáinak anyaga átalakul. Amikor ez a folyamat teljesen végbement, az akkumulátor *kisütött* állapotba kerül. Ekkor a *töltés* során a kapcsaira adott feszültség hatására töltőáram alakul ki (ilyenkor az akkumulátor, mint fogyasztó, energiát vesz fel), melynek hatására az előbbi vegyi folyamat fordított irányban megy végbe, és az elektródák anyaga eredeti állapotba kerül vissza. A folyamat végén az akkumulátor *feltöltődött*, és ismét képes energiát szolgáltatni.

Az akkumulátor kapocsfeszültsége a kisütés során folyamatosan csökken, a töltés során folyamatosan nő. Ha kisütés közben kapocsfeszültsége a – típusától függő – érték alá esik, az akkumulátor kisült, a kisütést be kell fejezni, mert a további terhelés az akkumulátor károsodását okozhatja. A töltést szintén be kell fejezni, amikor a kapocsfeszültség a töltésre megadott értéket eléri. A túltöltés ugyanúgy tönkreteszi az akkumulátort, mint a megengedettnél nagyobb kisütés.

A gépkocsikban ún. savas akkumulátorokat alkalmaznak, melyek cellafeszültsége 2V. Az általánosan használt 12V-os akkumulátor 6 sorosan kapcsolt cellát tartalmaz.

Elektronikus berendezésekben „száraz” akkumulátorcellákat használnak, melyeket szokás ugyanolyan méretben készíteni (AA, AAA, C, D, 9V) mint az elemeket, telepeket, abból a célból, hogy az elem helyére behelyezhetőek legyenek. Lényeges különbség azonban az elemhez képest, hogy a ma használatos akkumulátorcellák (Ni-Cd = nikkél-kadmium, Ni-MH = nikkél-metálhidrid) névleges üresjárási feszültsége csak 1,2V. Így az elemek helyett akkucellákat használva a berendezést működtető feszültség kisebb lesz, bár a legtöbb esetben ez nem okoz problémát.

A fenti táblázat az adott méretű elem mellett az azonos méretű akkumulátorcella kapacitását is mutatja. Mint a táblázatból kiolvasható, ma ugyanabban a méretben az alkáli elemek valamivel nagyobb kapacitásúak, mint a Ni-MH akkumulátorcellák. Meg kell jegyezni, hogy bár az akkumulátor az energiát hosszú ideig tárolni tudja, ez az idő (néhány hónap) azonban nem mérhető össze az alkáli elemek élettartamával (néhány év). Az akkumulátorcella ára azonos nagyságrendben van az azonos méretű alkáli elemével, viszont akár 1000-szer feltölthető, így alkalmazása sokkal gazdaságosabb (de rövidebb energiatárolási ideje miatt akkor csak gyakran használt berendezések üzeméhez ajánlható).

Az akkumulátor veszteséggel dolgozik, azaz nagyobb töltést (és energiát) vesz fel, mint amekkora kisütéskor lead. A veszteségek jellemzésére két *hatásfok*ot szokás megadni:

Az amperóra-hatásfok a visszaadott és a felvett amperórák hányadosa:

$$\eta_{Ah} = \frac{Q_{visszaadott}}{Q_{töltéskorfelvett}} = \frac{I_{kisütő} \cdot t_{kisütés}}{I_{töltő} \cdot t_{töltés}}$$

A wattóra-hatásfok pedig a visszaadott és felvett energia hányadosa:

$$\eta_{Wh} = \frac{W_{visszaadott}}{W_{felvett}} = \frac{U_{kisütő} \cdot I_{kisütő} \cdot t_{kisütés}}{U_{töltő} \cdot I_{töltő} \cdot t_{töltés}}$$

(A wattóra-hatásfok mindig rosszabb, mint az amperóra-hatásfok, mert a töltés magasabb feszültségen megy végbe, mint a kisütés.)

A Ni-Cd ill. Ni-MH akkumulátorcellák amperóra-hatásfoka kb. 70%, ezért a névleges amperóra-kapacitásának $1/0,7=1,4$ -szeresével szokás feltölteni, és pedig az amperóra kapacitás $1/10$ -ének megfelelő árammal.

Példa:

Mekkora árammal és mennyi ideig töltünk fel egy teljesen kisült, 1,2V 2400 mAh-s akkumulátorcellát?

Megoldás: A töltő áram legyen az amperóra-kapacitás $1/10$ -e, azaz $2400/10 = 240$ mA. A töltési idő (70% hatásfokot feltételezve) legyen 14 óra.

Megjegyzés: A ma használatos akkumulátorokra (a 3V kapocsfeszültségű lítium-ion cella kivételével) jellemző a *memória effektus*. Ez abban nyilvánul meg, hogy ha a cellát nem sűtik ki teljesen, mielőtt feltöltik, energiatároló képessége lecsökken (mintegy „emlékszik” arra, hogy feltöltés előtt nem teljesen sűtötték ki), és eredeti tároló képességét csak akkor nyeri vissza, ha teljesen kisűtik, és ez után töltik fel.

A tápegység, mint feszültségforrás

A kémiai energiát villamos energiává alakító feszültségforrások (elem, akkumulátor) alkalmazása lehetővé teszi hordozható berendezések üzemeltetését, de stabilan telepített

berendezések esetében gazdaságtalan. (Jelenleg adott energiamennyiség vételezése kb. 500-szor annyiba kerül alkáli elemből, mint a villamos hálózatról.)

Ezért a stabil üzemű berendezések tápellátását *tápegységek* segítségével szokás megoldani, amelyek a villamos hálózat feszültségéből alakítják ki a berendezés működtetéséhez szükséges feszültsége(ke)t. A tápegység ugyanolyan valóságos feszültségforrás (forrásfeszültséggel, belső ellenállással), mint az elem, vagy az akkumulátor.

Műszaki megoldásaival a későbbiekben foglalkozunk.

3.3. Villamos tér

Villamos erőter

A *villamos kölcsönhatás* az atomi részecskék között fellépő erőhatás. Az azonos nemű töltések taszítják, a különneműek vonzzák egymást.

Töltés akár vezetőtestben is létesíthető, pl. ha egy energiaforrás egyik sarkához hozzáérintjük.

Szigetelőanyagban is keletkezhet töltés, pl. egy állati szőrrel megdörzsölt borostyánkőről a dörzsölés elektronokat távolíthat el, ez által a korábban kifelé semleges anyag pozitív töltést nyer.

Coulomb megállapítása szerint két (pontoszerű) töltés vákuumban egymást

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

erővel vonzza (taszítja),

ahol

F a két töltés között fellépő erő (N)

Q₁ az egyik töltés nagysága (As)

Q₂ a másik töltés nagysága (As)

r a két töltés távolsága (m)

ε₀ a vákuum dielektromos állandója, értéke 8,86 * 10⁻¹², mértékegysége: As/Vm

A tér egy pontján (Q₁ töltéstől adott távolságra) tehát valamely odahelyezett Q₂ töltésre F erő hat.

A térnek azt a részét, amelyben valamely villamos töltésre erő hat, **villamos erőternek** nevezik.

Térerősség

Úgy tekinthetjük, hogy tér adott pontján Q₁ töltés villamos erőteret létesített. A tér e pontján lévő Q₂ töltésre a villamos erőter miatt hat erő.

A villamos tér adott pontján **térerősségnek (E) az egységnyi (1 As) töltésre ható erőt nevezik.**

A Q₂ töltés 1 As-nyi részére jutó erőt megkapjuk, ha a fenti egyenlet mindkét oldalát osztjuk Q₂-vel :

$$E = \frac{F}{Q_2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{Q_1}{r^2}$$

ahol

E a villamos térerősség (**mértékegysége V/m**)

Q₁ az erőteret létrehozó töltés nagysága (As)

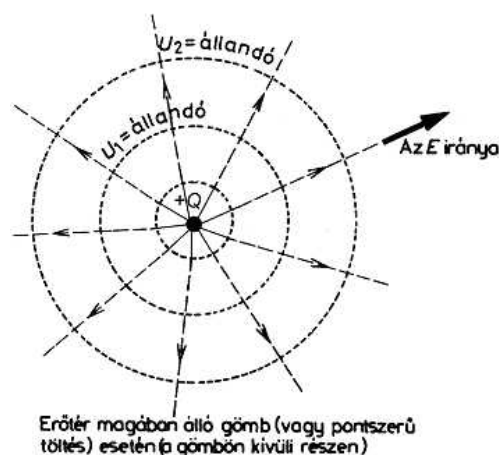
r az erőteret létrehozó töltés távolsága (m)

ε₀ a vákuum dielektromos állandója, 8,86 * 10⁻¹² (As/Vm)

A térerősségnek nagyságán kívül iránya is van (azaz *vektormennyiség*). Q₁ töltés terében a térerősség iránya mindig Q₁ és Q₂ összekötő egyenesébe esik, és megállapodás szerint abba az irányba mutat, amely irányú erő egy pozitív Q₂ töltésre hatna (tehát, ha Q₁ pozitív, akkor egy másik pozitív töltést taszítana, ezért az általa létrehozott villamos tér iránya Q₁-től elfelé mutat).

A villamos tér ábrázolása

A villamos tér szemléletes ábrázolását kapjuk, ha a töltésekből kiinduló olyan vonalakat rajzolunk, amelyek iránya minden pontban a térerősség irányát mutatja. Ezeket a vonalakat *erővonalaknak* nevezik (23.ábra).



23. ábra

Ha az erővonalak mentén egy töltést mozgatunk, a fellépő erőhatás és az út szorzataként munkát kapunk. Ez a munka az elmozduló töltés által végzett villamos munkával egyezik meg:

$$W = U \cdot q = U \cdot Q$$

az egyenlet átrendezésével

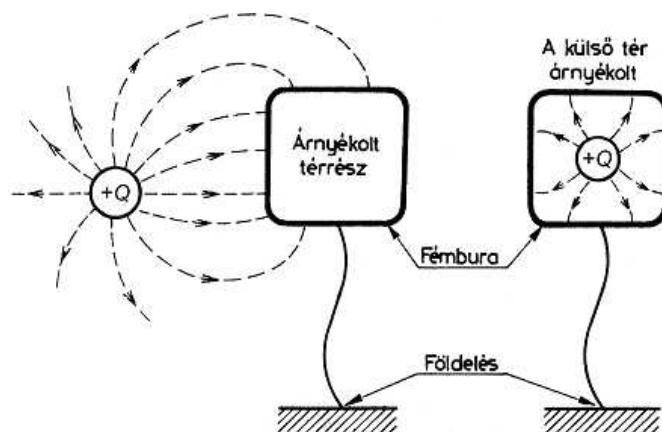
$$U = \frac{W}{Q}$$

tehát a töltésnek az erőter két pontja közti elmozdulásához tartozó munkavégzés elosztva a töltés nagyságával a két pont közötti feszültségkülönbséget (potenciált) adja meg.

A villamos tér árnyékolása

Ha a tér egy részét vezető anyaggal vesszük körül, annak pontjai között nem lehet potenciálkülönbség (ha lenne, a vezető anyag révén kiegyenlítődne). Ha pedig a vezető test minden pontjának azonos a potenciálja ($U = 0$), belsejében a töltés mozgatásához szükséges munka ($W = Q \cdot U$) is 0, tehát *vezető test belsejében a térerősség 0, nincs villamos tér*.

Ez teszi lehetővé a terek **villamos árnyékolását**: azt a térrészt, amelyet ki akarunk zárni a külső villamos térből, árnyékoló fémburával vesszük körül (a bura anyagának és vastagságának nincs jelentősége). A 24. ábra mutatja az árnyékolás kettős hatását: sem a burán kívüli töltések nem keltenek villamos teret a bura belsejében, sem a bura belsejében lévőek a burán kívül.

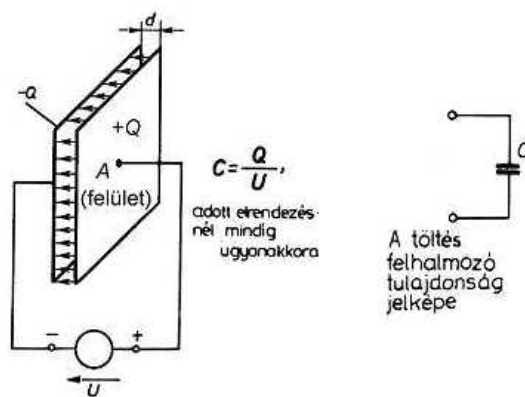


24. ábra

3.3.1. Kondenzátorok

Kondenzátor, kapacitás

Ha két fémlemez elhelyezünk egymással szemben (25. ábra), és a két lemez közé feszültségforrást kapcsolunk, a feszültségforrás negatív sarkából elektronok áramlanak a hozzá csatlakozó fémlemezbe (így az negatív töltést nyer), míg a másik fémlemezről elektronok távoznak a feszültségforrás pozitív sarka felé (így ennek pozitív töltése lesz). A két fémlemez ellentétes villamos töltései vonzzák egymást, e vonzóerő miatt a töltések akkor is megmaradnak a fémlemezekben, ha a feszültségforrást eltávolítjuk.



25. ábra

A két fémlemezről (ún. *fegyverzet*ből) álló elrendezés tehát villamos töltések tárolására („sűrítésére”) alkalmas, ezért **kondenzátornak** (sűrítő) nevezik. A kondenzátor tároló képességét a **kapacitással (C)** jellemzik, amely a kondenzátorban tárolt töltés, és a kondenzátor fegyverzetei között mérhető feszültség hányadosa (mértékegysége a *farad F*, $1\text{ F} = 1\text{ As/V}$):

$$C = \frac{Q}{U}$$

ahol

- C a kondenzátor kapacitása (F)
- Q a kondenzátor által tárolt töltés (As)
- U a kondenzátor fegyverzetei közt mérhető feszültség (V)

A farad nagy egység, melynek a gyakorlatban a törtrészei használatosak:

- 1 pF (pikofarad) = 10^{-12} F
- 1 nF (nanofarad) = $10^{-9}\text{ F} = 1000\text{ pF}$
- 1 μF (mikrofarad) = $10^{-6}\text{ F} = 1000\text{ nF}$

Megjegyzés: A régen használatos CGS mértérendszerben a kapacitás mértékegységéül a *cm* (centiméter) adódott. Nagyon régi kondenzátorokon találkozhatunk még ilyen kapacitás megjelöléssel. Átszámítás: $1\text{ cm} \cong 1,1\text{ pF}$.

A 25. ábra jobb oldalán a kondenzátor kapcsolási rajzokon alkalmazott *áramköri jelképe* látható.

A két egymással szemben elhelyezett fémlemezről álló, ún. síkkondenzátor kapacitása csak geometriai méreteitől, valamint a két fegyverzet közötti szigetelőanyagtól függ:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d}$$

ahol

- C a kondenzátor kapacitása (F)
- ε_0 a vákuum dielektromos állandója ($8,86 \cdot 10^{-12}\text{ As/Vm}$)
- ε_r a két fegyverzet közötti anyag (dielektikum) relatív dielektromos állandója (mértékegység)

- nélküli mérőszám, amely megmutatja, hogy az adott dielektrikummal a kondenzátor kapacitása hányszorosa a vákuumban mért kapacitásnak)
- A a fegyverzetek egymással szembeni felülete (m²)
- d a fegyverzetek távolsága (m)

Néhány anyag relatív dielektromos állandója:

Anyag	ϵ_r
Levegő	1
Csillám	5-8
Calit	6,5

Példa:

- 1) Mekkora a kapacitása annak a légszigetelésű síkkondenzátornak, melynek két fegyverzete (egyenként) 80 cm² felületű, és a fegyverzetek távolsága 0,1 mm?

Megoldás:

(Minden mennyiséget a megoldóképletben szereplő mértékegységben helyettesítünk be. Így pl. 80 cm² = 80 · 10⁻⁴ m², 0,1 mm = 10⁻⁴ m. Ekkor a végeredményt is a megoldóképlet mértékegységében, faradban kapjuk.)

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 8,86 \cdot 10^{-12} \frac{80 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 708,8 \cdot 10^{-12} F = 708,8 pF$$

- 2) Hogyan változik az előző kondenzátor kapacitása, ha a lemezei közötti teret nem levegő, hanem $\epsilon_r=5$ relatív dielektromos állandójú csillám tölti ki?

Megoldás:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 8,86 \cdot 10^{-12} \cdot 5 \cdot \frac{80 \cdot 10^{-4}}{10^{-4}} = 3544 \cdot 10^{-12} F = 3544 pF = 3,544 nF$$

- 3) Egy (még töltetlen) 1000 µF kapacitású kondenzátorba 10 ms időn keresztül 200 mA áram folyik be. Mekkora lesz a kapcsolófeszültsége?

Megoldás:

(Minden mennyiséget a megoldóképletekben szereplő mértékegységben helyettesítünk be, így az eredményt is a megoldóképlet mértékegységében kapjuk.)

A kondenzátor által felvett töltés: $Q = I t = 0,2 A \cdot 10^{-2} s = 0,2 \cdot 10^{-2} As$

A kondenzátor feszültsége:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{0,2 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 10^{-6}} = \frac{2 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}} = 2V$$

Kondenzátorok párhuzamos kapcsolása

Könnyen belátható, hogy ha több kondenzátort párhuzamosan kapcsolunk, azzal mintegy növeljük az egymással szemben álló fegyverzetek felületét, így a kondenzátorok együttes (eredő) kapacitása növekszik. A párhuzamosan kapcsolt kondenzátorok eredő kapacitását az egyes kondenzátorok kapacitásának összeadásával számíthatjuk ki:

$$C_r = C_1 + C_2 + \dots + C_n$$

Példa:

Egy áramkörben 12200 pF-es kondenzátorra lenne szükségünk. Van már egy 10 nF-es kondenzátorunk. Mekkora kapacitású kondenzátort kell ezzel párhuzamosan kapcsolnunk, hogy a kívánt kapacitáshoz jussunk?

Megoldás:

(A kapacitásokat a számítás során ugyanabban az egységben, most nF-ban helyettesítjük be a képletbe. 12200 pF = 12,2 nF.) Most az eredő és az egyik párhuzamosan kapcsolt kapacitás ismert, a másik kapacitás kiszámításához a képletet átrendezzük:

$$C_2 = C_r - C_1 = 12,2 - 10 = 2,2 nF = 2200 pF$$

Kondenzátorok soros kapcsolása

A kondenzátorok soros kapcsolása úgy fogható fel, hogy az egymással szembeni felületek távolságát növeljük, így az eredő kapacitás csökken. A sorosan kapcsolt kondenzátorok eredő kapacitása ugyanúgy számítható ki, mint a párhuzamosan kapcsolt ellenállásoké:

$$C_r = C_1 \times C_2 \times \dots \times C_n$$

azaz

$$\frac{1}{C_r} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$$

Példa:

Sorba kapcsolunk egy 10 nF-os, egy 3,3nF-os, és egy 820 pF-os kondenzátort. Mekkora lesz az eredő kapacitás?

Megoldás:

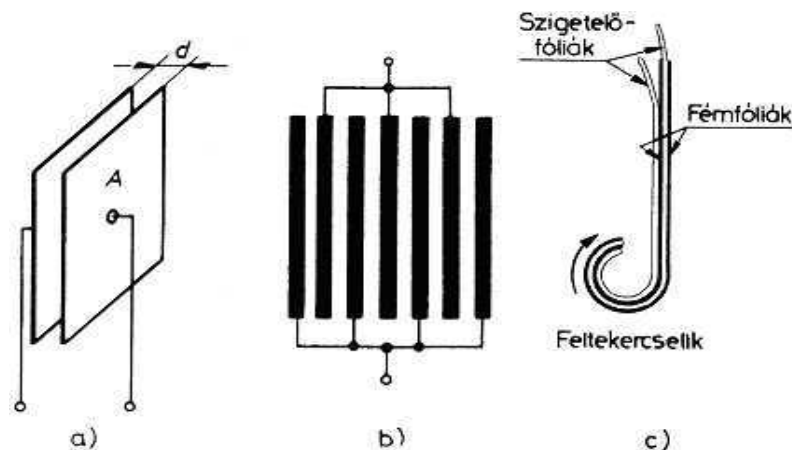
(Minden kondenzátor kapacitását nF-ban írjuk az egyenletbe, így a megoldást is nF-ben kapjuk. Ugyanígy megtehetnénk, hogy minden kapacitást pF-ban vagy F-ban helyettesítenénk be, ekkor az eredményt is pF-ban vagy F-ban kapnánk.)

$$\frac{1}{C_r} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{10} + \frac{1}{3,3} + \frac{1}{0,82} = 0,1 + 0,303 + 1,219 = 1,622$$

$$C_r = \frac{1}{1,622} = 0,616nF = 616pF$$

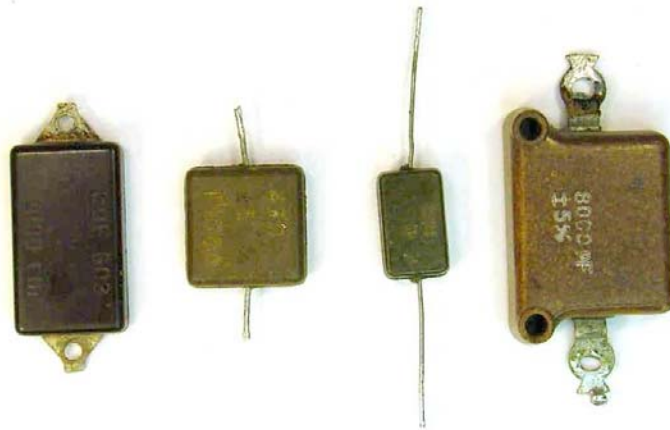
3.3.2.Valóságos (technikai) kondenzátorok

A kondenzátor, mint alkatrész szintén dielektrikummal elválasztott, egymással szemben elhelyezett vezető felületekből áll, de – mivel a síkkondenzátornak viszonylag nagy felület esetén is csekély a kapacitása - a valóságos (technikai) kondenzátorok kialakításánál a méretek csökkentése érdekében különféle módszereket alkalmaznak (26. ábra):



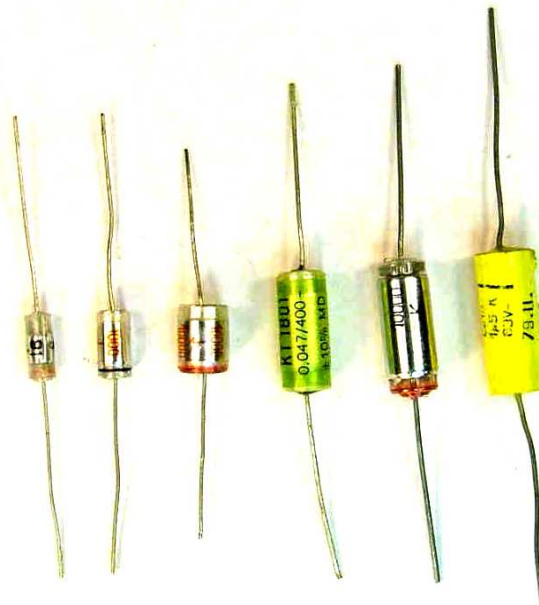
26. ábra

- a) az egymással szembeni sík lemezek felületét úgy növelik, hogy több lemezt helyeznek el egymással szemben (26.b. ábra: az egymással szembeni lemezfelület hatszorosa a 26.a. ábra szerinti síkkondenzátorhoz képest). Így készülnek pl. az igen jó minőségű csillámszigetelésű kondenzátorok (27. ábra).



27. ábra
Csillámkondenzátorok

- b) a fegyverzeteket vékony fémfóliaként készítik el, melyeket (dielektrikumként szolgáló szigetelő fólia közbeiktatásával) feltekercesznek (26.c. ábra). A henger alakú kondenzátor két végén helyezik el az egyik ill. másik fegyverzethez csatlakozó kivezetéseket. (Vannak kondenzátortípusok, ahol a fegyverzet nem külön fémfólia, hanem magára a dielektrikum fóliára gőzölögtetett fémréteg.) Néhány hengeres kialakítású kondenzátort mutat a 28. ábra.



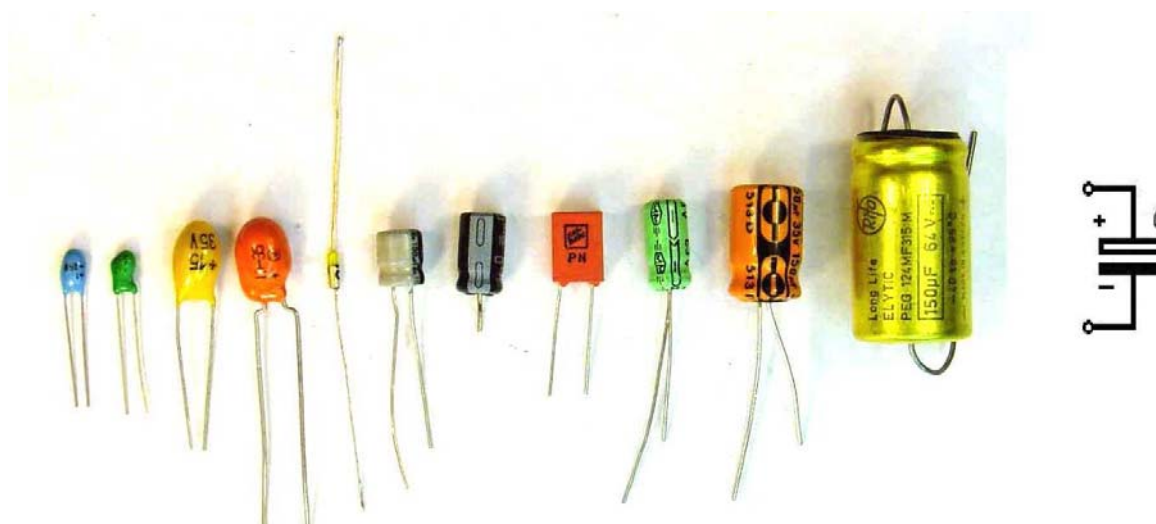
28. ábra
Hengeres kivitelű, műanyag dielektrikumú kondenzátorok

- c) A kerámia kondenzátorok dielektrikuma kerámia anyag. A hengeres kondenzátoroknál a kerámia henger külső ill. belső felületére, tárcsakondenzátoroknál a tárcsa két oldalára gőzölögtetett fémréteg képezi a fegyverzeteket (29. ábra).



29. ábra
Kerámia kondenzátorok

- d) a jobb helykihasználás céljából az **elektrolit kondenzátorok (ELKO)** egyik fegyverzetét vegyi úton érdesített alumínium vagy tantál fólia alkotja, a szigetelő réteg pedig az ezen létrehozott oxidréteg. A másik „fegyverzet” elektrolit (pl. borsav oldat), amely mint folyékony anyag, tökéletesen követi a fém fegyverzet érdesített (azaz megnövelt) felületét. A fém fóliát és a felitatott elektrolitot tartalmazó vékony fóliát feltekerkselik. Az így létrejövő kondenzátor felülete igen nagy, a fegyverzetek távolsága pedig csekély (az oxidréteg vastagsága $0,1\mu\text{m}$ nagyságrendjében van), így ilyen módon igen nagy kapacitású, és kis méretű kondenzátor készíthető. Az elektrolit kondenzátorokra csak meghatározott polaritással kapcsolható egyenfeszültség, a fordított polaritású feszültség hatására az oxid szigetelőréteg megszűnik és a kondenzátor vezetővé válik. (A gyártás során *formálással* alakítják ki a végleges oxid szigetelőréteget. Ha az ELKO hosszabb ideig nem üzemel, újraformálást igényelhet: helyes polaritású, fokozatosan növekvő feszültséget kell rákapcsolni, amely végül eléri a névleges üzemi feszültséget.) A 30. ábra különféle kivitelű elektrolit kondenzátorokat mutat. Az ábra bal oldalán öt tantál elektrolit kondenzátor látható, ezek közül négy a tantál kondenzátorok egyik jellegzetes, „csepp” kiviteli formájában. Szintén tantál a hasáb alakú, narancssárga ELKO a közepén. Az ábra jobb oldalán az ELKO kapcsolási rajzjele látható: a pozitív fegyverzet nincs besötétítve



30. ábra
Elektrolit kondenzátorok

Üzemi feszültség

Ha a kapcsok közötti feszültséget növeljük, a kondenzátorok fegyverzetei között a villamos térerősség növekszik, és egy (a fegyverzeteik közötti dielektrikum anyagától és vastagságától függő) kapocsfeszültség elérésekor a kondenzátor „átüt”, azaz a két fegyverzet közötti töltés szikra formájában (ha van dielektrikum, azt átégetve) kisül.

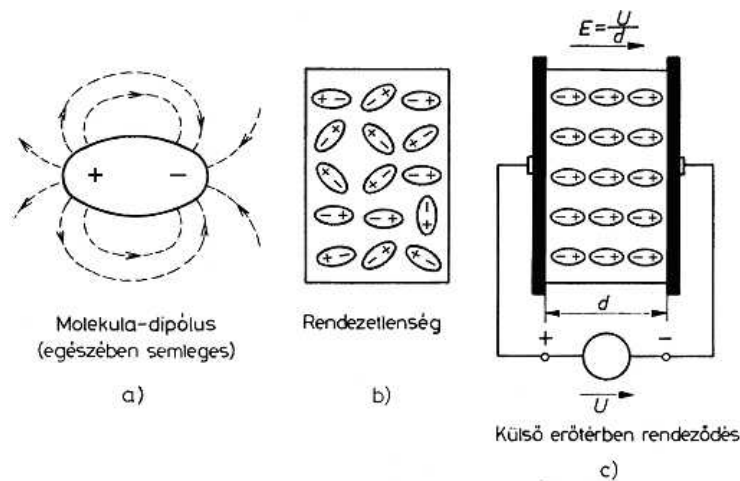
Ezért a gyártó minden esetben megadja (és az alkatrészen jelzi) azt a feszültséget, amely a kondenzátorra az átütés veszélye nélkül rákapcsolható.

Megjegyzés: Ha egy kondenzátor átüt, a dielektrikum átégésével fegyverzeteti általában rövidzárra kerülnek, ezáltal tönkremegy. Azoknál a kondenzátor típusoknál azonban, ahol a fegyverzet a dielektrikum fóliára gőzölögtetett fémréteg, a dielektrikum átégésekor elpárolog a rá gőzölögtetett fémfólia fegyverzet is, így nem keletkezik rövidzár, és a kondenzátor (az elpárolgott elektródafelületek miatt valamivel csökkent kapacitással) használható marad.

Veszteség

A valóságos kondenzátor vesztesége két tényezőből adódik:

- A dielektrikum nem tökéletes szigetelő, ezért a kondenzátorra kapcsolt feszültség hatására áram indul meg (ez a *szivárgási áram*),
- A dielektrikum molekuláinak pozitív és negatív töltései kiegyenlítik egymást, belső eloszlásuk azonban az adott molekula szerkezetétől függ. Vannak olyan anyagok, amelyek molekulái elektromosan „dipólusok” (31.a. ábra). Ha az ilyen anyag villamos térbe kerül, az egyébként rendezetlen (31.b. ábra) dipólusok a villamos térerőnek megfelelően rendeződnek, „befordulnak” (31.c. ábra). Ha a térerő iránya megváltozik, a dipólusok az új térerőnek megfelelően fordulnak át: a töltések mozognak. A töltések ilyen mozgását *dielektromos eltolási áramnak* nevezik.



31. ábra

A két áram összegének és a kondenzátorra kapcsolt feszültségnek a szorzata egy teljesítményt ad meg, amely a kondenzátoron hővé alakul, ez a kondenzátor vesztesége.

A kondenzátor veszteségeinek váltakozó áramú alkalmazáskor van jelentősége, ezért a váltakozó áramú vizsgálatkor térünk vissza rá.

Hőmérsékleti tényező

A hőágulás (valamint a dielektrikum tulajdonságainak változása) miatt a hőmérséklet változásával a kondenzátor kapacitása is változik. A hőmérsékleti tényező (TK) ugyanúgy lehet negatív és pozitív, mint az ellenállások esetében, és a gyártók szintén ppm-ben adják meg az értékét. Ha széles hőmérsékleti tartományban változatlan kapacitásra van szükség, szokás pozitív és negatív hőmérsékleti tényezőjű kondenzátorokat párhuzamosan kapcsolni; megfelelő méretezés esetén ekkor a hőmérséklet növekedtével az egyik kondenzátor kapacitása ugyanannyival nő, mint amennyivel a másik csökken, így az eredő kapacitás változatlan marad.

3.3.3. A kondenzátorok jelölése

A kondenzátorok névleges értékét általában számfelirattal jelölik. A tizedespontot (ugyanúgy, mint az ellenállásoknál) szokás a szorzóra utaló betűjelnek az egész és a tizedesrész közé helyezésével jelölni. Ha a szám mögött nincsen betű, akkor a kapacitás pF-ben (nagyobb kapacitású kondenzátor esetén azonban μ F-ban) értendő.

Példa: A kondenzátor felirata:	2,7	kapacitása:	2,7 pF
	12		12 pF
	n33		0,33nF = 330pF
	47n		47 nF

0,047
4 μ 7

0,047 μ F = 47 nF
4,7 μ F

Ha a felirat három karakterből áll, és az utolsó szám nem 0, akkor az SMD alkatrészeknél alkalmazott jelölési logikáról van szó; az eredményt pF-ben kell leolvasni:

Példa: 104 = $10 \cdot 10^4$ pF = 100 nF
222 = $22 \cdot 10^2$ pF = 2200 pF = 2,2 nF

Egyes esetekben színes csíkokkal vagy pontokkal jelölik a névleges értéket, ilyenkor a gyártó adatlapján kell tájékozódni a leolvasás módjáról.

A tekercselt kondenzátorok *külső fegyverzetét* a kivezetés melletti csíkkal jelölik meg. Kis jelszintek feldolgozásánál vagy nagyobb frekvenciás alkalmazáskor célszerű a megjelölt fegyverzetet kötni a (váltakozóáramúlag) földhöz közelebbi pontra. (Figyeljük meg a 28. ábrán külső fegyverzet jelölését: a kivezetés körül fekete vagy színes karika, ill. a felirat mellett csík).

Polarizált kondenzátor (ELKO) esetén megjelölik valamelyik kivezetés polaritását. Régebbi, fémházas ELKO fém háza egyúttal a negatív polaritású kivezetés szokott lenni, a fém háztól elszigetelt kivezetés a pozitív polaritású. A nyomtatott áramkörbe való beültetésre szánt, egy oldalon, axiálisan kivezetett ELKO-k esetén a fém háztól mindkét kivezetés el van szigetelve, a fém házra húzott műanyag fólia jelzése (+ vagy – jelzés az egyik kivezetésre mutató nyílban) mutatja az adott kivezetés polaritását (ld. a 30. ábrán is). Tantál ELKO-k kivezetéseinek polaritását felirattal szokták jelölni.

Az elektrolitkondenzátorok helyes bekötésére nagy figyelmet kell fordítani, mert a fordított polaritással bekötött ELKO szigetelő oxidrétege felbomlik, ennek hatására egyre nagyobb szivárgó áram alakul ki. A szivárgó áram és a kondenzátorra kapcsolt feszültség szorzataként adódó teljesítmény az ELKO-t melegíti, ennek hatására az elektrolitból gáz fejlődik, amelynek nyomása az ELKO házát szétvetheti.

A kondenzátorra megengedett maximális feszültséget számfelirattal szokás jelölni (pl. 16V). A tűrés jelölése általában ugyanúgy történik, mint az ellenállásoknál ($J = \pm 5\%$, $K = \pm 10\%$, $M = \pm 20\%$ stb. Kondenzátoroknál előfordulnak aszimmetrikus tűrésmezők is: pl. vannak alkalmazások, amikor csak annak van jelentősége, hogy a kondenzátor kapacitása legalább megközelítsen egy értéket, de az nem baj, ha annál jóval több. Ekkor a tűrésmező nem szimmetrikus: pl. $Z = +80\% - 20\%$)

A veszteséget a gyártók a gyártmány adatlapján közlik, ill. különféle módon (pl. színjelzéssel) jelölik.

3.3.4. Változtatható kapacitású kondenzátorok

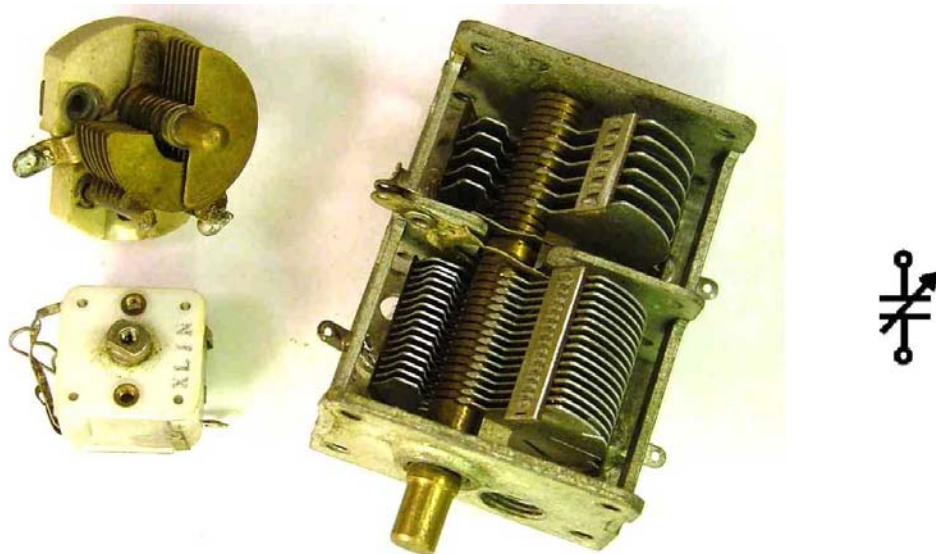
Ugyanúgy, mint a változtatható ellenállásoknál, kondenzátorok esetében is felmerül az igény arra is, hogy annak értékét a beméréskor, hitelesítéskor pontosítsák (trimmer kondenzátor), valamint arra is, hogy kapacitását üzemszerűen változtassák (pl. hagyományos rádióvevő „állomáskeresője”). A változtatható kapacitású kondenzátorokat úgy képezik ki, hogy egymással szembeni fegyverzeteik felülete változtatható legyen.

Az ún. forgókondenzátor egyik fegyverzete rögzítve van, míg a másik egy tengely forgatásával az állórész lemezei közé befordítható, hol jobban, hol kevésbé hozva „egymással szembe” a két fegyverzetet (32. ábra).

Az ábra jobb oldalán a változtatható kapacitású kondenzátor kapcsolási rajzjelét láthatjuk.

Középen nagyobb méretű, levegő dielektrikumú forgókondenzátort látható. Ez ún. *kettősforgó*, melyben ugyanaz a tengely elől egy nagyobb, hátul egy kisebb kapacitású – kevesebb lemezből álló, nagyobb lemeztávolságú – kondenzátor lemezeit forgatja, így a két változtatható kapacitású kondenzátor kapacitása együtt nő vagy csökken (a nagyobb kapacitású kondenzátor teljesen befordított lemezekkel 500 pF kapacitású). Speciális célokra gyártanak hármass, ill. négyes forgókondenzátorokat, ahol ugyanazon a tengelyen három vagy négy kondenzátor kapacitása változik együtt a tengely forgatásakor.

Az ábra bal felső részén szintén nyitott, levegő dielektrikumú, kerámia testre erősített (jellegzetesen rövidhullámú áramkörökben alkalmazott) forgókondenzátor látható, alul pedig egy bedobozolt, műanyag dielektrikumú (ilyent alkalmaznak a zsebrádiók „állomáskeresője”-ként).



32. ábra
Forgókondenzátorok

Az egymással szemben elforduló lemezek alakjától függően a változtatható kapacitású kondenzátor karakterisztikája lehet *kapacitás egyenes* (a kapacitás a tengely elfordulási szögével kb. lineárisan változik, a 32. ában balra fent), *frekvencia egyenes* vagy *hullámhossz egyenes* (ez utalás az „állomáskereső”-ként való alkalmazásra, ld. később).

A trimmer kondenzátorok általában csavarhúzóval állíthatók be. Lehetnek levegő, műanyag vagy kerámia dielektrikumúak (33. ábra). Jobb oldalon a trimmer kondenzátor kapcsolási rajzjele látható. Balról jobbra: 2 db. levegő dielektrikumú, 4 db. klf. műanyag dielektrikumú trimmer; egy régebben alkalmazott levegő dielektrikumú „hernyótrimmer”, amelynek fegyverzetei koncentrikus alumínium hengerek, a mozgó fegyverzetet kézzel lehet a középső csavarmenetes rúdon az álló fegyverzet hengerei közé csavarni; balról az utolsó trimmer kondenzátor pedig kerámia dielektrikumú.



33. ábra
Különféle kialakítású trimmer kondenzátorok

Megjegyzés: Kis kapacitású (néhány pF) trimmer kondenzátorhoz (ún. huzaltrimmer) juthatunk, ha egy vastagabb szigetelt huzal darabra (ez lesz az egyik fegyverzet) néhány menet vékonyabb szigetelt huzalt tekercselünk (ez pedig a másik). A menetszám változtatásával változik az egymással szembeni felület, így a kapacitás is.

3.4. Mágneses tér

Az áramot szállító vezetők egymásra hatása

Mint a villamos áramerősség meghatározásánál már említésre került, két párhuzamos, egyenes vezeték, amelyekben áram folyik, erőhatást gyakorol egymásra. Ha a két áram egyirányú, a vezetékek vonzzák, ha ellentétes irányú, akkor taszítják egymást.

A vonzó (taszító) erő nagysága:

$$F = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2 l}{r}$$

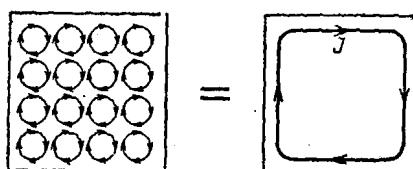
ahol:

F	a kialakuló vonzó (taszító) erő (N)
I_1	az egyik vezetőben folyó áram (A)
I_2	a másik vezetőben folyó áram (A)
l	a vezetők hossza (m)
r	a vezetők távolsága (m)

Az áramot szállító vezetők és a mágnesség kapcsolata

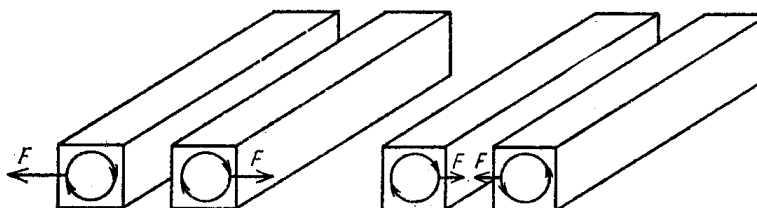
A különböző anyagok atomjaiban az elektronok keringése negatív töltések mozgását jelenti, a töltések mozgása pedig áram. Szintén töltések mozgását jelenti az elektronok tengelyük körüli pörgése is. Az elektronok keringéséből és pörgéséből származó áramokat *molekuláris köráramoknak* nevezik.

Egyes anyagokban a molekuláris köráramok síkjai egymással tartósan párhuzamosak. Mint egy ilyen anyagból készített metszetben a 34. ábrán láthatjuk, a molekuláris köráramok ellentétes irányú szomszédos oldalai az anyag belsejében lerontják egymás hatását, így a köráramoknak összességében olyan a hatása, mint ha csak a külső felületen folya áram:



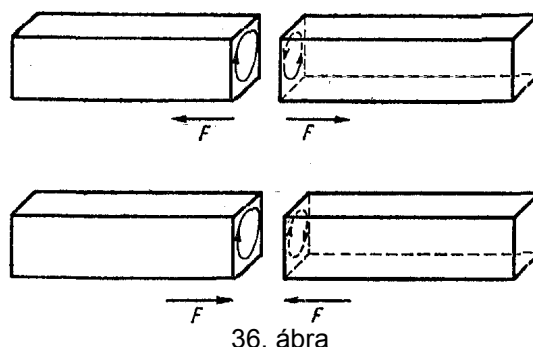
34. ábra

Két ilyen rudat egymás mellé helyezve, ha mindkettőben azonos (a 35. ábra bal oldalán az áramutató járásával megegyező) a köráramok iránya, az egymás mellett haladó ellentétes irányú áramok – ennek nyomán a rudak is - taszítják egymást. Ha (mint az ábra jobb oldalán) a köráramok iránya ellentétes, az egymás mellett, (az ábrán lefelé) folyó áramok azonos irányúak, ezért az áramok (és így a rudak is) vonzzák egymást.



35. ábra

Ugyanilyen taszító ill. vonzó hatás figyelhető meg, ha a két rudat egymással szembe fordítjuk (36. ábra). Az ábra felső részén a két rúd egymáshoz közeli végén folyó köráramok ellentétes irányúak, ezért taszítják egymást. Az ábra alsó részén ezek a köráramok azonos irányúak, ezért a két rúd vonzza egymást.

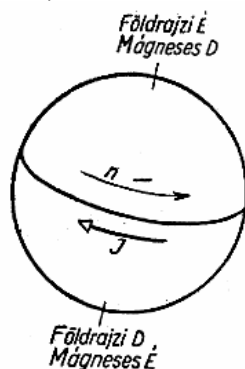


36. ábra

Ez a vonzó-taszító hatás a *mágnesség*. Az ilyen tulajdonságokat mutató anyag a **mágnes**, a rúd mágnes végei a **mágneses sarkok (pólusok)**. Az azonos irányú köráramot tartalmazó sarkokat egyneműnek nevezik. Mint a 35. és 36. ábrából látható, az egynemű mágnessarkok taszítják, a különeműek vonzzák egymást.

A Föld felülete a mérések szerint negatív töltésű, így a Földdel együtt forgó negatív töltések (az áram megfigyelés szerinti irányát figyelembe véve) a Föld forgási irányával ellentétes irányú köráramot adnak. Ilyen formán a Föld is egy állandó mágnes, melynek sarkai a földrajzi sarkok közelében vannak. Ha egy mágnesrudat úgy függesztünk fel, hogy az függőleges tengelye körül elfordulhasson, a kialakuló erő hatására a mágnesrúd úgy fordul el, hogy sarkai a Föld mágneses sarkai felé irányulnak. Az ilyen eszköz alkalmas az északi irány meghatározására, ezért iránytűnek nevezik.

Az iránytűnek azt a sarkát, amely a Föld északi sarka felé mutat, **északi sarok**nak nevezik. Mivel az ellentétes mágneses pólusok vonzzák egymást, a Föld északi sarkán déli mágnessaroknak kell lennie, a délin pedig északinak (37. ábra).



37. ábra

Az ábrából az is kitűnik, hogy a köráram milyen mágneses pólust hoz létre: *Ha egy dugóhúzót az áram irányába forgatunk, az az északi mágneses pólus felé halad (dugóhúzószabály).*

Mágneses erőter, indukció

A tér egy pontján (I_1 áramtól adott távolságra) tehát valamely oda helyezett I_2 áramot szállító vezetőre F erő hat. A térnek azt a részét, amelyben valamely áramot szállító vezetőre erő hat, **mágneses erőternek** nevezik.

Úgy tekinthetjük, hogy tér adott pontján I_1 áram mágneses erőteret létesített, és a tér e pontján lévő I_2 áramra a mágneses erőter miatt hat erő.

A mágneses tér adott pontján **mágneses indukciónak (B) az egységnyi (1m) hosszú vezetőben folyó egységnyi (1 A) áramra ható erőt nevezik**. Az I_2 áram 1A-nyi, 1m hosszú szakaszára jutó erőt megkapjuk, ha az erőhatásra vonatkozó egyenlet mindkét oldalát osztjuk I_2 -vel és l -el:

$$B = \frac{F}{I_2 l} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1 I_2 l}{r I_2 l} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I_1}{r}$$

ahol

B a mágneses indukció, mértékegysége: Vs/m²
 I₁ a mágneses teret létesítő vezetőben folyó áram (A)
 r a mágneses teret létesítő áram távolsága (m)

Tehát a B indukciójú mágneses erőterben I₂ áramra

$$F = B I_2 l$$

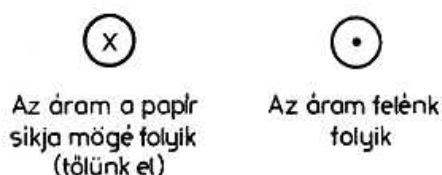
(I₂ irányától függően vonzó vagy taszító) erő hat, ahol

F az erő nagysága (N)
 B a mágneses indukció (Vs/m²)
 I₂ az erőterbe helyezett áram nagysága (A)
 l az erőterbe helyezett áramvezető hossza (m)

A mágneses tér ábrázolása, indukcióvonalak

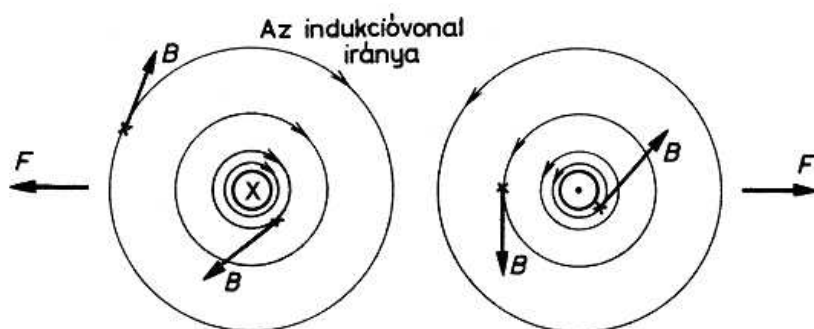
A mágneses indukciót *indukcióvonalakkal* szemléltetik: ezek olyan vonalak, melyek érintője minden pontban a mágneses indukció irányába esik. Egy egyenes vezetőben folyó áram olyan mágneses teret létesít, melynek *indukcióvonalai a vezetékre merőleges síkban fekvő körök*, középpontjuk a vezeték közepén van. Az indukcióvonalaknak irányt tulajdonítunk, melyet a már említett „dugóhúzószabály” segítségével határozhatunk meg: az áram irányában haladó dugóhúzót az indukcióvonalak irányában kell forgatni.

Az áramok, az általuk létrehozott indukcióvonalak és fellépő erők (egymásra merőleges) irányának szemléltetésénél azt is ábrázolnunk kell, ha az áram a papír síkjára merőleges vezetéken folyik (38. ábra).



38. ábra

A 39. ábrán két, a papír síkjára merőlegesen, párhuzamosan, ellentétes irányban haladó áramot, és az általuk létrehozott indukcióvonalakat láthatjuk. Az indukcióvonalak irányát a dugóhúzó szabály segítségével határozhatjuk meg. A bal oldali áram a papír síkja mögé folyik, tehát a dugóhúzó akkor halad az áram irányába, ha az óramutató járásával megegyező irányban csavarjuk. A jobb oldali áram ellentétes irányú, a dugóhúzó az óramutató járásával ellentétes irányú forgatásakor halad az áram irányába:



39. ábra

Az áramok közötti erőhatásokat egyszerűen meg lehet állapítani az általuk létrehozott indukcióvonalak irányának segítségével. Az áramot szállító vezetékek köré egy-egy indukcióvonalat rajzolunk (40. ábra).



40. ábra

Az ábra bal oldalán az ellentétes irányú áramok F erővel taszítják egymást. Mint láthatjuk, a két áram közti térben mindkét áram azonos irányú (lefelé mutató) indukcióvonalakat hoz létre. Ezért az áramok egymásra gyakorolt erőhatását az indukcióvonalakra vonatkoztatva azt mondhatjuk, hogy az *azonos irányú indukcióvonalak taszítják egymást*. Az ábra jobb oldalán az azonos irányú áramok a két áram közti térben ellentétes irányú indukcióvonalakat létesítenek, ezért megállapíthatjuk, hogy az *ellentétes irányú indukcióvonalak vonzzák egymást*.

A dugóhúzó-szabály alkalmazásával a 37. ábra alapján azt is megállapíthatjuk, hogy az *állandó mágnes* (az ábrán a Föld) indukcióvonalai (a mágnesen kívüli térben) az *északi mágneses pólustól a déli mágneses pólus felé haladnak*.

Mindezek alapján könnyen meghatározhatjuk a mágneses térbe helyezett áramra ható erő irányát (41. ábra). Az ábrán a mágneses tér indukcióvonalai felülről lefelé irányulnak (azaz a teret létrehozó mágnes északi sarka fent, déli sarka lent található). Először vizsgáljuk a bal oldali, a papír síkja „mögé” folyó és a mágneses tér kölcsönhatását. Az áram által létrehozott indukcióvonal az óramutató járásával megegyező irányú. Bal oldalt a külső mágneses tér és az áram által létrehozott indukcióvonal ellentétes irányú, így balra irányuló vonzóerő alakul ki. Az áram jobb oldalán az általa létrehozott indukcióvonal és a külső mágneses tér indukcióvonala is azonos irányú, így jobbról balra ható taszító erő alakul ki. Mindkét erő az áramot jobbról balra taszítja.

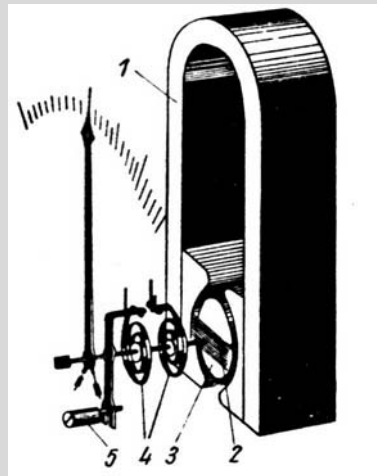


41. ábra

Az ábra jobb oldalán, a papír síkjából kifelé folyó áram az óramutató járásával ellentétes irányú indukcióvonalakat létesít, amelyekre a külső mágneses tér indukcióvonalai mindkét irányból balról jobbra irányuló erővel hatnak.

Példa:

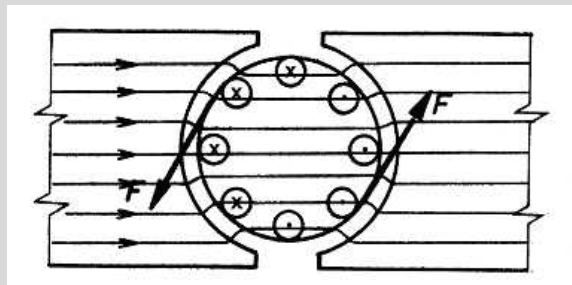
A mágneses tér és az áramjárta vezető kölcsönhatásán alapszik a Deprez rendszerű árammérő műszer (42. ábra)



42. ábra

A rögzített **1** állandómágnes végeihez lágyvas saruk csatlakoznak. A lágyvas saruk hengeres kivágása és a szintén rögzített **3** lágyvas henger közötti, mindenütt azonos nagyságú légrésben erős, egyenletes mágneses tér keletkezik. Ebbe helyezik bele a vékony szigetelt huzalból készült **2** forgótekercset, melybe a mérendő áramot két, miniatűr lapos **4** tekercsrúgón vezetik be. (A valóságban, az ábrától eltérően, az egyik tekercsrúgó a mágnes másik oldalán csatlakozik a tengelyhez). Az **5** nullára állító kar az egyik rúgó megfeszítettségét szabályozza, ennek elforgatásával lehet beállítani, hogy a mutató alaphelyzetben a skála 0 pontjára mutasson.

A légrés mágneses tere és a forgótekercsbe vezetett áram mágneses tere kölcsönhatásba lép, (ld. 43. ábra), minek következtében a tekercsre forgató nyomaték hat, és az a rúgó visszatérítő ereje ellenében elfordul. A tekercs addig tud elfordulni, amíg a rúgó a kitéréssel arányos visszafordító ereje meg nem egyezik a tekercsen átfolyó árammal arányos kitérítő erővel. Mindez azt jelenti, hogy a forgótekercses alpműszer *kitérése egyenesen arányos a tekercsbe vezetett árammal*, tehát skálája lineáris.



43. ábra

A mágneses tér gerjesztése

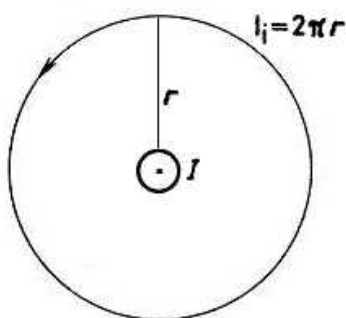
A mágneses teret létrehozhatják molekuláris köráramok (állandó mágnes esetében), vagy vezetőben folyó áramok. Utóbbi esetben I áramtól r távolságban létrejövő mágneses indukció

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r}$$

értékű.

A gyakorlatban sokszor az indukcióvonal hosszát ismerjük. Ha r távolság helyett az ahhoz tartozó indukcióvonal hosszával kívánunk számolni (44. ábra), a számlálót és nevezőt is szorozzuk 2π -vel:

$$B = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{r} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{2\pi I}{2\pi r} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{I}{l_i}$$



44. ábra

ahol

- B a mágneses indukció (Vs/m^2)
 I a mágneses indukciót létrehozó áram (A)
 l_i az indukcióvonal hossza ($=2\pi r$),

azaz a mágneses indukció egyenesen arányos a létrehozó árammal és fordítottan az indukcióvonal hosszával. Az arányossági tényezőt a *vákuum permeabilitásának* nevezik, és μ_0 -al jelölik:

$$B = \mu_0 \frac{I}{l_i}$$

ahol

- B a mágneses indukció (Vs/m^2)
 μ_0 a vákuum permeabilitása (értéke: $4\pi \cdot 10^{-7} \approx 1,256 \cdot 10^{-6}$, mértékegysége Vs/Am)
 I a mágneses indukciót létrehozó áram (A)
 l_i az indukcióvonal hossza ($=2\pi r$)

Ha a mágneses teret nagyobb áram létesíti (*gerjeszti*), az indukció értéke is nagyobb lesz. Nagyobb gerjesztő áramot úgy is létrehozhatunk, ha több, azonos erősségű áramot szállító vezetéket (egy *tekercs* meneteit) teszünk egymás mellé. Ha a tekercs menetszáma N , és abban I áram folyik, a mágneses teret

$$\Theta = N I$$

áram gerjeszti. Az NI szorzatot *gerjesztésnek* nevezik, és Θ - val jelölik. A gerjesztéssel kifejezve

$$B = \mu_0 \frac{\Theta}{l_i}$$

Az egységnyi hosszú (1m) indukcióvonal létesítésére jutó gerjesztést mágneses **térerősségnek** nevezik, és H -val jelölik (mértékegysége: A/m):

$$H = \frac{\Theta}{l_i}$$

így a mágneses indukció

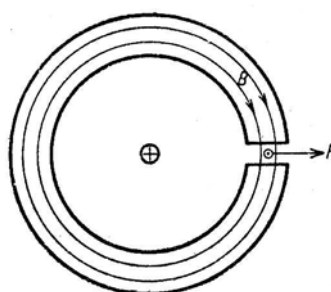
$$B = \mu_0 \frac{\Theta}{l_i} = \mu_0 H$$

lesz.

Relatív permeabilitás

Ha a mágneses teret gerjesztő vezeték köré kis réssel ellátott vasgyűrűt helyezünk, melynek részében helyezzük el a másik áramot szállító vezetékét (45. ábra), azt tapasztalhatjuk, hogy a fellépő erőhatás sokkal nagyobb, mint a korábban közölt képletből kiszámítva adódik. A vas ugyanis megnöveli a mágneses indukciót. Azt, hogy az adott anyagban azonos térerő hatására hányszorosa a mágneses indukció, mint a vákuumban, a relatív permeabilitás fejezi ki, melyet μ_r -el jelölnek. Az indukció értéke az adott anyagban tehát μ_r -szeres lesz:

$$B = \mu_r \mu_0 H$$



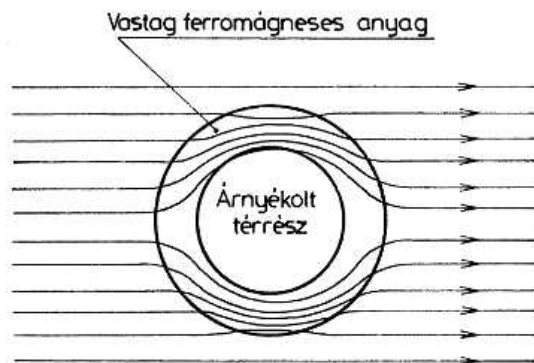
45. ábra

Az anyagok relatív permeabilitásuk alapján három csoportba sorolhatók:

- a *diamágneses* anyagok relatív permeabilitása valamivel kisebb, mint 1 (pl. réz),
- a *paramágneses* anyagok relatív permeabilitása valamivel nagyobb, mint 1 (pl. aluminium),
- a *ferromágneses* anyagok relatív permeabilitása egy adott hőmérsékletig (Curie-pont) sokkal nagyobb, mint 1, e hőfok felett már csak paramágneses tulajdonságot mutatnak. (Pl. vas.)

A mágneses tér árnyékolása

Ha mágneses térbe ferromágneses anyagból készült testet helyezünk, az mintegy „magába gyűjti” az indukcióvonalakat, a test belsejében nincs mágneses tér. (46. ábra). A mágneses árnyékolás annál jobb, minél vastagabb a ferromágneses anyagból készült árnyékoló bura.

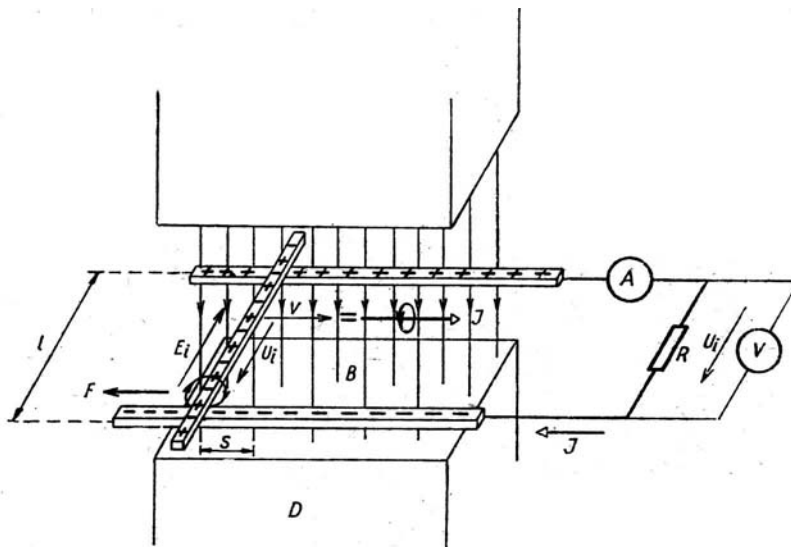


46. ábra

A mágneses árnyékolás is kettős hatású: sem a burán kívüli mágneses tér nem jut a bura belsejébe, sem a bura belsejében lévő a burán kívülre.

Mozgási indukció

Ha két egymással párhuzamos vezető rudat mágneses térbe helyezünk, és v sebességgel balról jobbra egy vezetőt csúsztatunk rajtuk (47. ábra), a vezetővel együtt mozognak az abban jelen lévő pozitív és negatív töltések. A töltések egyirányú mozgása áram, melynek megegyezés szerinti iránya a pozitív töltések mozgási iránya.



47. ábra

A pozitív töltések jobbra irányuló árama (I) körül kör alakú indukcióvonalak keletkeznek (egy ilyen indukcióvonal az ábrán a dugóhúzó-szabálynak megfelelő irányítással meg van jelölve). A külső mágneses tér és az áram mágneses tere egymásra hat: a kör alakú indukcióvonal felénk eső oldala megegyező irányú a külső mágneses tér indukciójával, így taszítják egymást, ezért az áramot hordozó pozitív töltésre hátrafelé irányuló erő hat. Ugyanígy módon belátható, hogy a negatív töltésekre (melyek a mozgásukkal ellentétes irányú áramnak felelnek meg) felénk irányuló erő hat. Ezen erő hatására a mozgó fém vezetőben csak az elektronok tudnak elmozdulni, ezek a vezető felénk eső részében sűrűsödnek, míg a vezető hátsó végén elektronhiány (pozitív töltéstöbblet) jelentkezik. A töltésszétválasztó erőt *indukált elektromotoros erőnek* (E_i) nevezik, iránya a pozitív töltések elmozdulási iránya, azaz esetünkben hátrafelé mutat.

Az indukált elektromotoros erő által szétválasztott töltésektől a hátsó rúd pozitív, az első rúd negatív töltésű lesz. Az ilyen módon létrejött U_i *indukált feszültség* iránya a hátsó rúd pozitív töltéseitől az első rúd negatív töltései felé mutat. U_i feszültség a két rúd közé kapcsolt R ellenálláson keresztül áramot indít meg, az E_i által szétválasztott töltések így egyenlítődhetnek ki. A mozgó vezető az energiaforrás, az ellenállás a fogyasztó.

Nyugalmi indukció

A mozgási indukció jelensége azt mutatja, hogy ha egy vezető mágneses térben, az indukcióvonalakat metszve elmozdul, abban feszültség indukálódik. Nyilvánvaló, hogy ha nem a vezető mozog a mágneses térben, hanem a mágneses tér mozog a nyugvó vezetőkhöz képest, a vezető ugyanúgy metszi az indukcióvonalakat, ezért a vezetőben ugyanígy feszültség indukálódik.

Ha a 47. ábra szerinti elrendezésben a mágneses teret nem állandó mágnes létesíti, hanem azt egy tekercs áramával gerjesztjük, a gerjesztő áram növekedésével vagy csökkenésével az indukció is nő vagy csökken, az indukcióvonalak száma változik, emiatt a mágneses térben elhelyezett vezető „metsző” indukcióvonalak száma változik, és így a vezetőben ismét feszültség indukálódik. Ez a jelenség (a mágneses indukció változásakor a mágneses térben elhelyezett vezetőben feszültség indukálódik) a *nyugalmi indukció*.

Önindukció

Ha egy vezetőben vagy tekercsben az áram erőssége változik, változik az áram által létrehozott indukció, így feszültség indukálódik magában abban a vezetőben (tekercsben) is, amely a mágneses teret létrehozta. Ez a jelenség az *önindukció*.

Az önindukcióval keletkező feszültség irányát *Lenz* törvényének alkalmazásával határozhatjuk meg. E törvény szerint az indukálódó feszültség iránya olyan, hogy az indukciót létrehozó okot gátolja. Pl. ha a tekercsben az áram növekszik, olyan önindukciós feszültség keletkezik, amely az áram növekedését gátolni igyekszik; U_i mintegy szembe kapcsolódik az áramot létesítő feszültséggel, kivonódik abból.

Az önindukcióval keletkező feszültség nagyságát az

$$U_i = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

képlet segítségével határozhatjuk meg, ahol

U_i az indukálódott feszültség (V)

L a tekercs (vezeték) *önindukciós tényezője* (másképpen: induktivitása, **mértékegysége: H (henry)**, ($1\text{H}=1\Omega\text{s}$))

ΔI a tekercsben (vezetékben) az áram változása (A)

Δt az az idő, amely alatt a tekercsben (vezetékben) az áram ΔI -vel megváltozott (s)

Az **önindukciós tényező (induktivitás)** a tekercs geometriai méreteitől függ. Az átmérőjéhez képest hosszú, légmagos tekercs (48. ábra) induktivitása

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$$

ahol

L a tekercs induktivitása (H)

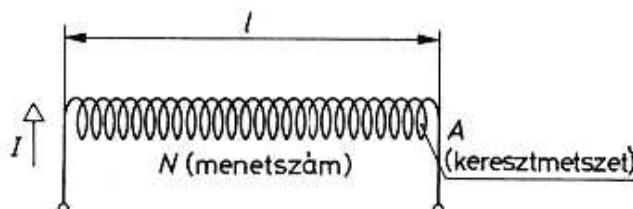
μ_0 a vákuum permeabilitása ($1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}$)

N a tekercs menetszáma

A a tekercs keresztmetszete (m^2)

l a tekercs hossza (m)

A keresztmetszeti méretekhez képest
HOSSZÚ, LÉGMAGOS tekercs



48. ábra

Ha a tekercs belsejét nem levegő tölti ki, akkor az önindukciós tényező a kitöltő anyag relatív permeabilitásától is függ:

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{l}$$

ahol

μ_r a tekercs belsejében lévő anyag relatív permeabilitása.

A tekercs belsejét kitöltő anyagot szokás *magnak* nevezni. Így, ha ez az anyag levegő, a tekercs *légmagos*, ha vas anyag, *vasmagos*, vagy a mag lehet pl. réz, alumínium is.

Példa:

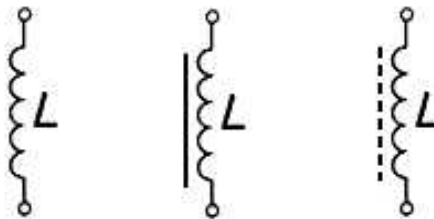
Mekkora az induktivitása egy légmagos, 20mm hosszú, 3mm átmérőjű, 50 menetes tekercsnek? Megoldás (minden adatot a képletben szereplő mértékegységben helyettesítünk be:

$$A = \frac{d^2 \Pi}{4} = \frac{(3 \cdot 10^{-3})^2 \Pi}{4} = \frac{9 \cdot 10^{-6} \cdot 3,14}{4} = 7,065 \cdot 10^{-6} m^2$$

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A}{l} = \frac{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 50^2 \cdot 7,065 \cdot 10^{-6}}{20 \cdot 10^{-3}} = 1,109 \cdot 10^{-6} H = 1,109 \mu H$$

3.4.1. A tekercs, mint áramköri elem

A villamos kapcsolási rajzon a tekercset a 49. ábra szerinti módon szokták jelölni. Az ábra bal oldalán az általános jelölési formát látjuk. Más esetben, amikor arra is utalnak a rajzon, hogy a tekercsnek milyen a tényleges kialakítása, a bal oldali változat a légmagos tekercset jelöli, a középső a vasmagost, a jobb oldali a pormagost (ld. alább).



49. ábra

3.4.2. Valóságos (technikai) tekercsek

A 49. ábra L induktivitású *ideális* tekercset jelöl. Az ideális tekercs egyenáramú ellenállása 0, induktivitása állandó, és nincs korlátozva, hogy mekkora áram folyhat rajta, vagy hogy a tekercsen kívül mekkora, és milyen irányú mágneses teret létesíthet. A gyakorlatban azonban a tekercsek tulajdonságai oly kevésbé ideálisak, és kíváncsi kiviteli formájuk annyira függ a felhasználás módjától, hogy sorozatgyártásuk, készletezésük is csak rendkívül szűk körben (mikroinduktivitások) szokásos. Csak a tekercsek készítéséhez szükséges szerelvényeket (csévetestek, magok, rögzítő elemek) gyártják sorozatszerűen és készletezik, magát a tekercset az adott alkalmazáshoz egyedileg készítik el.

Induktivitás

A tekercs menetszámát számítással határozzák meg. A geometriai méretek és a mágneses anyagok tulajdonságainak pontatlansága miatt azonban a tényleges induktivitás lényegesen eltérhet a számított értéktől. Ha az induktivitás pontos értékének jelentősége van, a tekercset *hangolhatóra* készítik. A huzalt műanyag vagy kerámia csévetestre tekercselik fel, így a geometriai méretek nem változtathatóak. A hangolást általában úgy végzik, hogy a hengeres csévetest furatába készített menetbe a szükséges hosszban ferromágneses, paramágneses vagy diamágneses anyagból készült hernyócsavar magot hajtanak be.

Ferromágneses anyagok relatív permeabilitása függ a térerő ill. az indukció nagyságától is, ezért az ilyen maggal készült tekercs induktivitása a gerjesztő áramtól is függ.

Veszteség

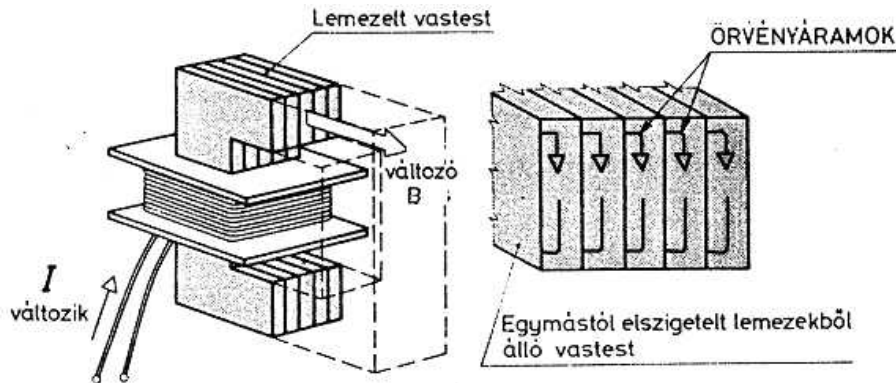
A valóságos tekercsnek a geometriai méreteitől, valamint a tekercs anyagának fajlagos ellenállásától függő, 0-tól bizonyosan különböző ellenállása van. Ezen az ellenálláson a tekercsen átfolyó áram hatására feszültség esik, az áram és a feszültség szorzataként adódó teljesítmény a tekercsben hővé alakul **tekercsveszteség**, vagy **rézveszteség**).

Vasmagos tekercs esetén az indukció változása esetén a vasmag melegszik (**vasveszteség**). A vasveszteségnek két oka van: az *örvényáramú veszteség* és az *átmágnesezési veszteség*.

Örvényáramú veszteség

A váltakozó mágneses indukció magában a vasmagban is feszültséget indukál. Az indukált feszültség hatására a vasmag kis belső ellenállásán keresztül ún. örvényáramok alakulnak ki. Az

indukált feszültség és a kialakuló (a vasmagon belüli kis ellenállások miatt nagy értékű) örvényáram szorzataként kialakuló veszteségi teljesítmény a vasmagot melegíti. Az örvényáramú veszteséget a vasban kialakuló áramút ellenállásának növelésével lehet csökkenteni. Ezért egyrészt növelik a vasmag anyagának fajlagos ellenállását, másrészt a *vasmagot egymástól elszigetelt lemezekből alakítják ki* (50. ábra), így a kialakuló örvényáramok kisebb vaskeresztmetszeten folynak át.



50. ábra

Az örvényáramok kialakulása úgy is meggátolható, hogy a magot ferromágneses anyag porából, sajtolással készítik el, úgy hogy az egyes porszemek között nincs elektromos áramút (**porvasmagok**). Ilyen mágneses anyag a **ferrit**.

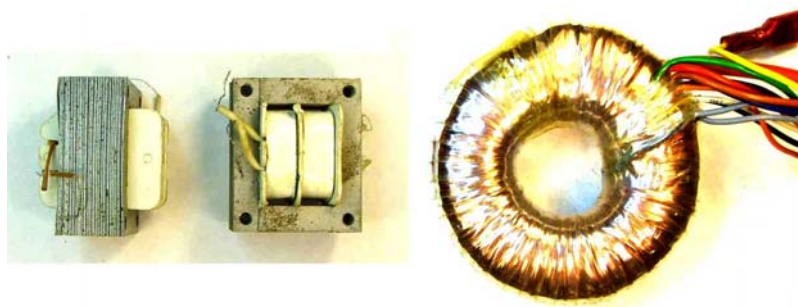
Átmágnesezési veszteség

A ferromágneses anyagokban az atomok tartományokba rendeződnek, melyeken belül a molekuláris köráramok egy irányba állnak be. A mágneses indukció nagyságának, irányának megváltozásakor e tartományok a külső tér irányába fordulnak be, ami energiavesztéssel jár. Ez az átmágnesezési veszteség (hiszterézisvesztés).

Megjegyzés: a csévetest anyagában is keletkezhet az indukció változásakor veszteség. Kis veszteségű tekercshez jó minőségű, kerámia vagy műanyag csévetestet alkalmazunk.

Szórt mágneses tér

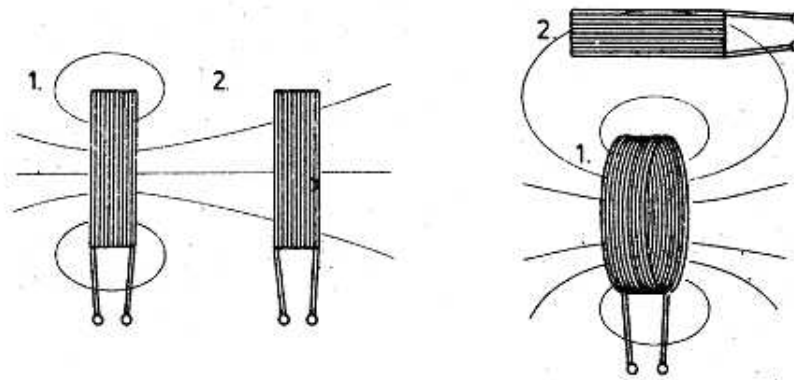
A zárt vasmagos tekercsek indukciójának döntő többsége a magon keresztül záródik, így az indukció változása a tekercs közelében elhelyezett másik tekercsben vagy vezetékben nem, vagy nagyon csekély mértékben indukál feszültséget. (Ilyen zárt magos tekercseket mutat az 51. ábra).



51. ábra Zárt magos tekercsek

A zárt vasmaggal nem rendelkező tekercsekben folyó áram által létrehozott mágneses tér indukciójának azonban a közelben elhelyezett másik tekercsen is áthaladnak, így a másik tekercsben is feszültséget indukálhatnak (52. ábra). Ezt a jelenséget a két tekercs közötti **csatolás**nak nevezik. Az ábra bal oldalán látható 1. tekercs indukciójának egy része a 2. tekercsen is áthalad, így a két tekercs között csatolás jön létre. Az ábra jobb oldalán a tekercsek egymásra merőleges tengellyel vannak elhelyezve, így az tekercsek erővonalai szinte nem haladnak át egymáson, a csatolás minimális.

A csatolást annál szorosabbnak nevezik, minél nagyobb a két tekercs mágneses terének egymásra hatása. *Laza* csatolásnál a két tekercs egymásra hatása csekély.



52. ábra

Megjegyzés: A csatolás általában egymástól független tekercsek esetében nem kívánatos, az áramkör működésében zavarokat okozhat. Egyes alkalmazásokban azonban (pl. transzformátor, ld. később) szándékosan hoznak létre csatolást tekercsek között.

Tekercsek soros és párhuzamos kapcsolása

Egymással csatolásban nem lévő tekercsek soros kapcsolása esetén az eredő inductivitás az egyes tekercsek inductivitásának összege:

$$L_r = L_1 + L_2 + \dots + L_n$$

Párhuzamos kapcsolás esetén pedig az eredő inductivitás a párhuzamos ellenállások eredőjéhez hasonlóan számítandó:

$$L_r = L_1 \times L_2 \times \dots \times L_n$$

A tekercsek gyakorlati kivitele

a) Légmagos tekercs

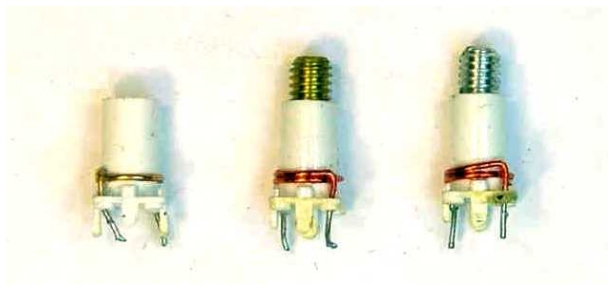
A légmagos tekercsre a kis inductivitás jellemző. Igénytelenebb kivitel esetén viszonylag nagyobb (0,5-0,8 mm) átmérőjű szigetelt huzalból *öntartó* kivitelben készítik, azaz nincs csévetest, a két végén beforrasztott tekercs saját súlyát önmaga tartja meg. Az ilyen tekercs inductivitásának pontos értékét a menetek széthúzásával/összetolásával (azaz a tekercs hosszának változtatásával) szokás beállítani (53. ábra). A beállítás után a meneteket sokszor méhviasszal való csepegtetéssel rögzítik.



53. ábra

Zsebrádió légmagos, öntartó URH tekercsei (balra lent, és középen, fent)

Igényesebb kivitel esetén a tekercset hengeres, kis veszteségű kerámia vagy műanyag csévetestre készítik el. Ha a pontos induktivitás értéket be kell állítani, a hangolást paramágneses vagy diamágneses anyagból készült maggal végzik (54. ábra). Paramágneses maggal az induktivitás kis mértékben növelhető, diamágneses maggal csökkenthető.

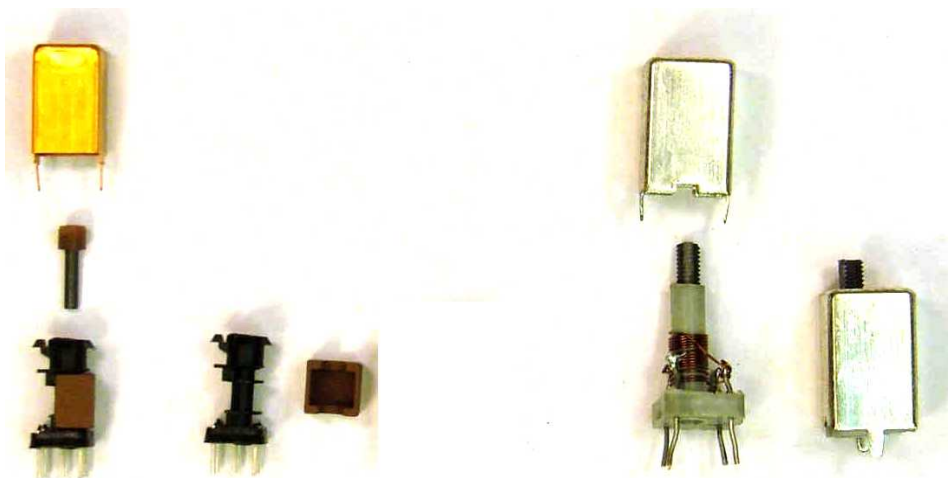


54. ábra

Tekercs csévetesten, légmaggal, réz, ill. alumínium maggal hangolva

b) Vasmagos tekercs

Nagyobb induktivitású tekercset vas (ferromágneses) maggal szokás készíteni. Ha a más tekercsrel való nemkívánatos mágneses csatolás veszélye nem fenyeget, a tekercset ugyanolyan hengeres csévetestre készítik, mint a légmagosat, csak most ferrit maggal állítják be a megfelelő induktivitást (55. ábra). Nagyfrekvenciás tekercshez kisveszteségű ferrit magot alkalmaznak.



55. ábra

Ferritmagos tekercs szerelvények

Az ábrán két vasmagos szerelvényt látunk szétszedve, és összeillesztve.

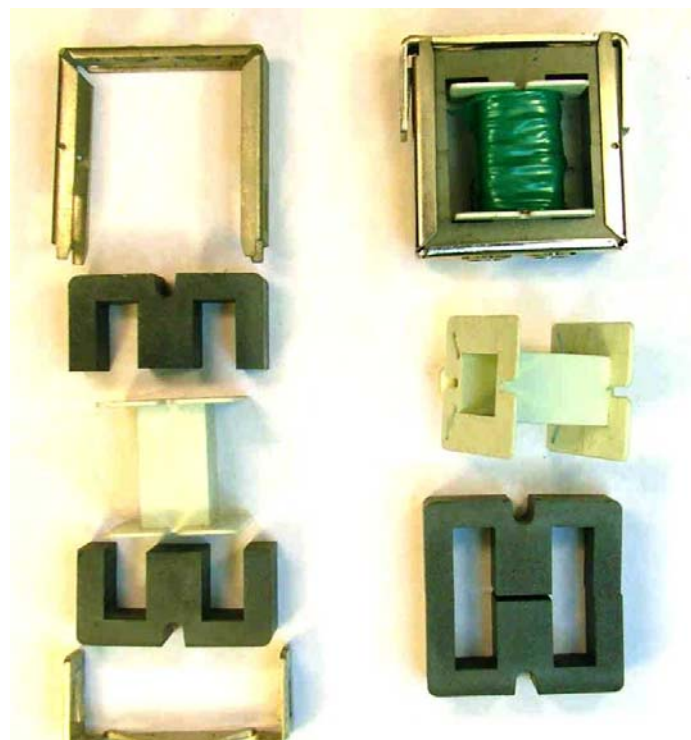
A bal oldali szerelvény fekete műanyag csévetestből, barna ferrit félhengerből, menetes barna műanyagba foglalt ferrit hangoló magból és fém árnyékoló burából áll (ld. felül). A tekercset a műanyag csévetest középső részére kell elkészíteni, majd ráhúzni az induktivitást növelő ferrit félhengert (eddig összeállítva ld. bal oldalon alul), ez után lehet a csévetest belső menetes részébe csavarni a hangoló magot, ill. a tekercsre húzni az árnyékoló burát. Az induktivitást a hangoló mag segítségével a tekercs beforrasztása után, az áramkör bemérésekor állítják végleges értékére.

A jobb oldali szerelvényhez műanyag csévetest, menetes ferrit mag és fém árnyékoló búra tartozik. A néhány menetes tekercs már a csévetestre van tekercselve, és a ferrit hangoló mag egy

része is már be van csavarva. Az árnyékoló bura felhúzása után a kész tekercset a jobb szélén láthatjuk.

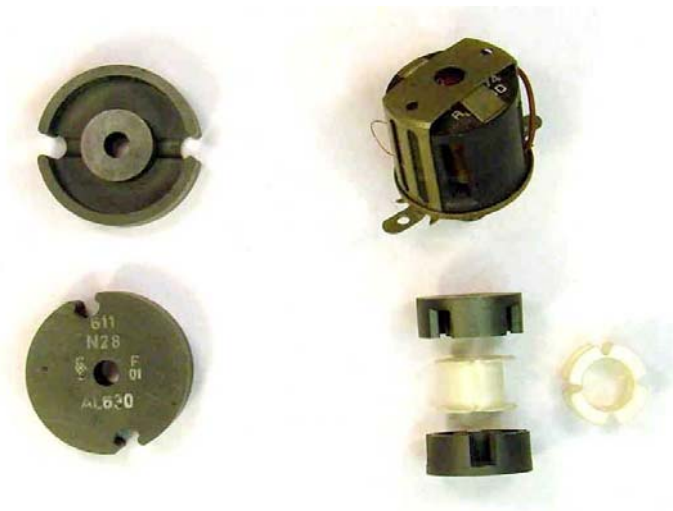
E szerelvényekben az árnyékoló bura nem ferromágneses anyagból készül, *nem mágnesesen árnyékol*. Működése a következő: ha a bura belsejében a mágneses indukció változik, az a bura anyagában feszültséget indukál, melynek hatására a bura fém anyagában örvényáram keletkezik. Az örvényáram Lenz törvénye értelmében olyan irányú, hogy saját mágneses hatásával lerontja az őt létrehozó mágneses tér hatását. Ilyen módon *a burán kívül* a két mágneses hatás lerontja, kiegyenlíti egymást, az ott elhelyezett vezetékben nem indukálódik feszültség. Az árnyékoló hatás két irányú: ha a mágneses indukció a burán kívül változik, az a burában szintén olyan feszültséget indukál, amely hatására létrejövő örvényáramok mágneses hatásukkal a bura belsejében kiegyenlítik, semlegesítik a külső tér hatását.

Ha el akarjuk kerülni a közelben lévő tekercsekkel való *mágneses* csatolást, zárt vasmagos tekercset alkalmazunk. Kis veszteségű tekercshez ferrit magot használhatunk. Pl. ilyen a ferrit E mag (56. ábra), vagy a fazékvasmag (57. ábra). Ilyen magokat (szerelvényeikkel együtt) sok fajta méretben gyártanak.



56. ábra
Ferrit E mag, szerelvényeivel

Az 56. ábra bal oldalán az összeállítás sorrendjében láthatjuk a szerelvényeket: fentről lefelé: tartó kengyel, a felső ferrit E mag, csévetest, alsó ferrit E mag, a tartó kengyel lezáró szerelvénye. Jobb oldalt alul a két összeillesztett E magot látjuk, középen a kissé félrebillentett műanyag csévetestet, fent pedig az összeállított tekercset.



57. ábra

Ferrit fazékmag szerelvényeivel

Az 57. ábra bal oldalán a fazékmag külső és belső kialakítása, jobb oldalon alul az összeállítás sorrendjében az alsó mag, a csévetest, és a felső mag, jobb oldalt felül pedig a két magot összeszorító szerelvénnyel szerelt kész tekercs látható.

c) A ferrit magos tekercs induktivitása

Zárt ferrit magoknál a tekercs menetszáma és induktivitása közötti összefüggést az alábbi képlet adja meg:

$$L = A_L \cdot N^2$$

ahol

L a tekercs induktivitása (nH)

A_L a ferrit magra a gyártó által megadott jellemző (mértékegysége: nH/menet²)

N a tekercs menetszáma.

Megjegyzés: Az A_L értéket a E mag esetén a középső szárán, fazékmagnál a középső hengeres magrészen kialakított légréssel állítja be a gyártó. Fazékmagnál a tengely furatba illesztett szerelvénnyel hajtott ferrit hangoló mag ebbe a légrésbe nyúlhat, így az A_L kismértékű változtatása révén az induktivitás pontos értéke beállítható.

A zárt ferrit magok méreteit, A_L értékeit és egyéb paramétereit a gyártó adatlapjából ismerhetjük meg. Az A_L értéket a magon szokták tüntetni.

Példa:

24 mH induktitású tekercset készítünk $A_L=320$ értékű ferrit fazékmagra. Mekkora legyen a menetszám?

Megoldás:

A képletet N-re rendezve:

$$N = \sqrt{\frac{L(nH)}{A_L}}$$

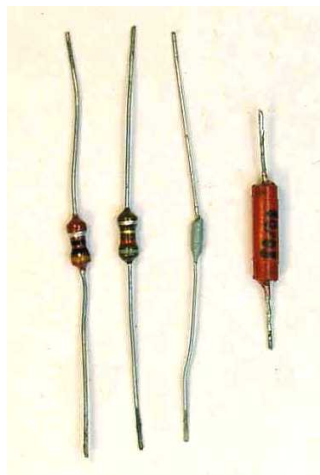
Ne felejtjük el, hogy L értékét nH-ban (10^{-9} H) kell behelyettesíteni! $24\text{mH} = 24 \cdot 10^6 \text{nH}$, ezért

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{24 \cdot 10^6}{320}} = \sqrt{75000} = 273,8$$

tehát 273-274 menetre van szükség.

Ha a pontos értéket hangolással állítjuk be, a vasmag behajtásakor az induktivitás nőni fog, ezért valamennyivel kevesebb menetet (250-270) alkalmazhatunk.

Az egyetlen, az ipar által előre gyártott tekercsfajta a *mikroinduktivitás*. Ez miniatűr ferrit magra készített egysoros, néhány menetből álló tekercs, amelyet hasonló kiviteli formában és méretben készítenek el, mint egy kisebb teljesítményű ellenállást. Az induktivitást az ellenállásoknál megismert E12 sor szerinti névleges értékekkel készítik, gyártótól függően, kb. az $1\mu\text{H} \dots 100\mu\text{H}$ értéktartományban. Néhány, különböző gyártmányú mikroinduktivitást láthatunk az 58. ábrán.



58. ábra
Mikroinduktivitások

A névleges értéket felirattal, vagy az ellenállásoknál megismert színsávokkal jelölik. A négy színes karika közül (a széléhez közelebb eső) kettő a névleges érték két számjegyét, a harmadik a szorzót (tíz hatványa) jelöli, a negyedik karika a tűrésre utal. Az értéket μH -ban fejezik ki.