

Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság

**Magyar nyelvű szakelőadások
a 2000-2001-es tanévben**

**Kolozsvári Műszaki Egyetem
Villamosmérnöki Kar**

Szerzők

dr. Bíró Károly

Hegedüs Péter

dr. Imecs Mária

Jakab Sándor

Szabó Csaba

dr. Szabó Loránd

dr. Vodnár János

Kolozsvár, 2001

Támogató

Apáczai Közalapítvány - Budapest

Lektor

dr. Bíró Károly - egyetemi professzor

Kolozsvári Műszaki Egyetem

Villamosmérnöki Kar

Kiadó

Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság

Nyomdai előkészítés

Technorex Kft. - Kolozsvár

Nyomtatás

Incitato Nyomda - Kolozsvár

Tartalomjegyzék

dr. Vodnár János

Energetikai fogalmak

dr. Szabó Loránd

Villamos kapcsolókészülékek és vezérlőberendezések

Hegedűs Péter, Jakab Sándor

Analóg és digitális technika

dr. Bíró Károly

Villamos gépek működésének alapjai

dr. Bíró Károly

Villamos gépek felépítése és tervezése

dr. Imecs Mária

Villamos hajtások alapjai

dr. Imecs Mária

Teljesítményelektronika

Szabó Csaba

Permanens mágnes forgórészű szinkronmotoros hajtások

dr. Szabó Loránd

Térbeli grafikus ábrák MATLAB-ban

dr. Szabó Loránd

Elektromágneses mező számítógépes analízise

dr. Szabó Loránd

Térszámítás Monte Carlo módszerrel

dr. Vodnár János

Környezetvédelem - Környezetszennyezés

Energetikai fogalmak

Dr. Vodnár János, D. Sc. ny. egyetemi tanár

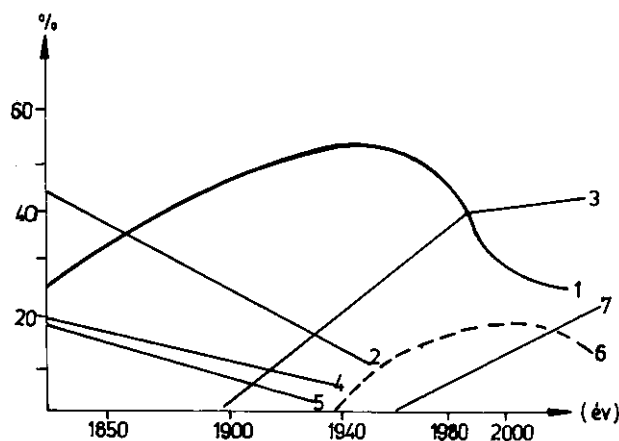
1. Általános tudnivalók

Az ipari termékek gyártása és általában mindennemű ipari termelés energiafogyasztással jár. Az iparban megszokottan használt energiafélések a mechanikai, villamos, hő-, víz- és atomenergia. A mechanikai energiát a különféle motorok szolgáltatják. A villamos energia termelése megköveteli a villamos generátorok használatát (ezeket a motorok, gőzgépek vagy más természetű meghajtó rendszerek működtetik). A nagy ipari erőműveket főleg villamos energia termelésére használják. Lakások és különféle más helyiségek fűtésére a fűtő, illetve melegítő központok szolgálnak. Az ezekben termelt hőmennyiséget tehát nem villamos energia termelésére használják.

A számítások szerint a Nap által kisugárzott hő csaknem végtelen mennyiségűnek tekinthető; évi mennyisége $2,8 \cdot 10^{30}$ kcal. Ennek a Föld felé irányuló része $1,4 \cdot 10^{21}$ kcal, s ebből a Föld felszínére jut $0,6 \cdot 10^{21}$ kcal. E sugárzás folytán a Nap tömege évente több millió kg-mal csökken, ez azonban még 16 billió év után sem változtatja meg lényegesen a kisugárzott hőt.

Az említett számadatokkal kapcsolatban érdemes rámutatnunk arra, hogy a Föld összes ásványiszen, kőolaj és földgáz tartalékának elégetése útján csupán $8 \cdot 10^{18}$ kcal nyerhető. Ezzel szemben a Föld urán és tórium készletéből $145 \cdot 10^{18}$ kcal hőenergia fejleszthető, ami lényegesen nagyobb, mint a Föld tüzelőanyag-készletéből nyerhető mennyiség. Ez érthetővé teszi azt a világviszonylatban jelentkező általános törekvést, hogy atomerőművek segítségével minél több energiát termeljenek. Ezáltal a szállítás is leegyszerűsödik, hiszen 1 kg 235-ös uránból annyi hő fejleszthető, amennyi 3 millió kg jó minőségű kőszén elégetése során szabadul fel (ha urán szállítására 1 vasúti kocsira van szükség, akkor kőszén esetében 3 millió vasúti kocsit kell használni).

A világ energiafogyasztásának alakulását az 1850. és 2000. közötti időszakban a 1. ábra szemlélteti.



1. ábra. Az energiafogyasztás szerkezetének alakulása 1850. és 2000. között:
1 - szén; 2 - fa; 3 - kőolaj; 4 - állati hulladék; 5 - izomenergia; 6 - földgáz; 7 - atomenergia

Tekintélyes mennyiségű természetes eredetű hő nyerhető termálvizek felhasználásával, vagy geotermikus központok építésével, amelyekben a Föld mélyében rejlő hőenergiát egy energiahordozó segítségével (például vízzel) hozzák a felszínre, sokszor 100 méternél is nagyobb mélységből. Ez a módszer különösen az aktív vulkánokhoz közelálló területeken alkalmazható jó eredménnyel. Az így nyert hőt (rendszerint melegvíz vagy vízgőz alakjában) helyiségek fűtésére, növényházak melegítésére stb. használják. Termálvizek használatakor nagy gondot kell fordítani azok korróziómentesítésére, mivel ellenkező esetben a használt csővezet fémanyaga aránylag rövid idő alatt tönkremegy.

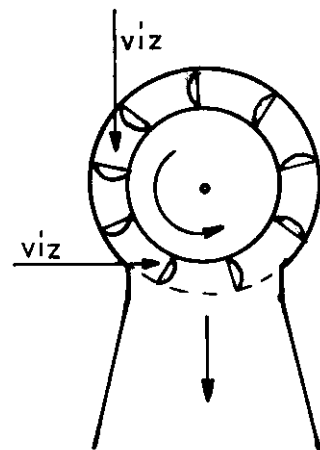
Az említett természetes energiaforrásokon kívül jelentőségük van még azoknak, amelyek kinetikai energiát tartalmaznak. Ilyenek például a következők: szél, tengeri árapály, tengeri hullámozás, folyóvizek. Ezek esetében a kinetikai energiát előbb mechanikai energiává alakítják, majd ezt munkavégzésre, vagy ha szükséges megfelelő generátorok segítségével villamos energiává alakítják át. Kivételt képez a tengeri hullámozás, amiből közvetlenül villamos energiát nyernek a „piezo-villamos” tulajdonságokkal rendelkező kristályok (például kvarc) felhasználásával. A hullámverések az említett kristályokra nyomóerőt gyakorolnak, így a kristálylapok két ellentétes oldalán levő felülete között villamos feszültség keletkezik, amit azután hasznosítanak. A kinetikus energiaforrásokat felhasználó erőművek közül a legnagyobbak és a legtöbb mechanikai, illetve villamos energiát termelik a vízerőművek, amelyekről a továbbiakban részletesen szólnunk.

2. A vízerőművek leírása és működése

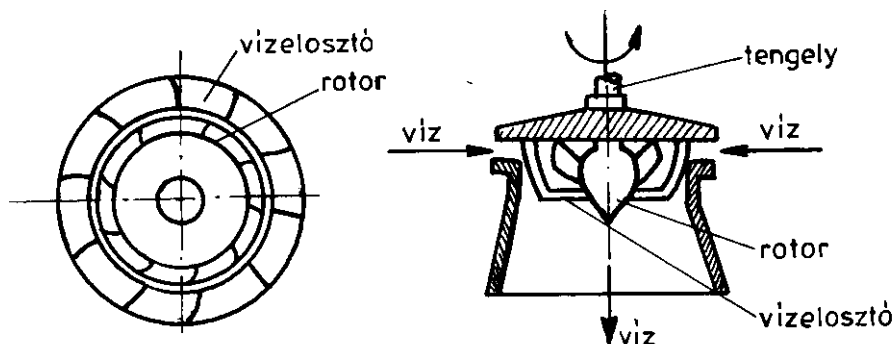
A vízerőművek a természetes vizek (folyóvizek) kinetikus, illetve hidraulikus energiáját használják fel, ami elsőkön a vízturbinák segítségével mechanikai energiává alakul, ezzel fűrészgépeket, vízimalmokat stb. működtetnek, vagy villamos generátorokat hoznak működésbe, amelyek villamos áramot szolgáltatnak. Röviden szólnunk kell a vízturbinákról, amelyek a hidraulikus motorok csoportjába tartoznak.

A vízerőművekben felhasználható vízhozamtól és a földrajzi-geológiai viszonyoktól függően, a vízturbinák három fő típusát szokták használni. Ezek a következők:

- Pelton-féle vízturbina (2. ábra), amit kis vízhozamok, de nagy esési magasság esetén használnak jó eredménnyel;
- Francis-féle vízturbina (3. ábra), amit közepes vízhozam és esési magasság esetén szoktak használni és
- Kaplan típusú vízturbina (4. ábra), amit nagy vízhozam és kis esési magasság esetén működtetnek (például a Duna mentén épült vízerőművekben).

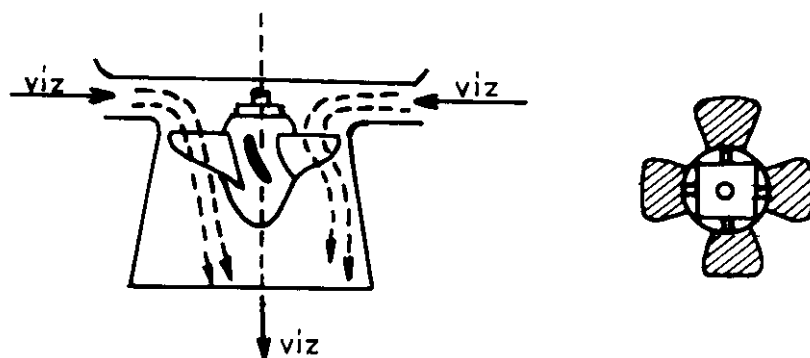


2. ábra. Pelton-féle vízturbina
(kis vízhozamnál és nagy esési magasságnál)



3. ábra. Francis-féle vízturbina (közepes vízhozam és esési magasságnál)

Amint a jelzett ábrákból látható, valamennyi vízturbina-típus lényegében egy turbinaházból és egy forgórészből (rotor) áll. A Pelton típusú turbina forgórészének vízszintes tengelye van, a peremén pedig lapátok, illetve kupaszerű, különleges geometriájú szerkezeti elemek találhatók, amikre a víz több tíz, esetenként több száz méter magasságból a rotorhoz viszonyítva érintőlegesen jut, és így mozgásban tartja a forgórészt. A Francis- és Kaplan-típusú turbináknál a forgórésznek függőleges tengelye van. Az előzőnél a víz érintőlegesen ömlik be a vízszintes síkban elhelyezkedő ütköző lapátokra, míg a Kaplan turbinákba sugárirányba ömlik be a víz néhány méter magasságból, majd főleg súlyánál fogva mozgásban tartja a turbina légcavarszerűen kiképzett forgórészét. A víznek a turbinaházból való gyors távozása növeli a turbina hatásfokát. Éppen ezért a víz a turbinaházból valamennyi típusú vízturbinából egy fokozatosan szélesedő elvezető csatornán (diffúzor) keresztül távozik.



4. ábra. Kaplan-féle vízturbina (nagy vízhozam és kis esési magasságnál)

A villamos vízerőművek működtetésükhöz szükségünk van egy természetes vízforrásra, ami rendszerint egy folyóvíz szokott lenni. Ha ennek a vízhozama (m^3/h) elég nagy, akkor a vizet egy kisméretű ún. elterelő gát segítségével irányítjuk a vízturbinákhoz. Kisebb és főleg az évszakonként változó hozamú folyóvizek esetében szükségessé válik egy nagyobb méretű gát megépítése, aminek a segítségével egy kisméretű gyűjtőtavat hoznak létre, s így az ebben összegyűjtött vízzel biztosítani lehet az erőmű egyenletes működését akkor is, amikor a folyóvíz vízhozama csökken. A nagyteljesítményű vízerőművek (200-600 MW stb.) folyamatos működtetéséhez sokmillió m^3 tárolt vízre van szükség ahhoz, hogy a természetes vízhozam csökkenése az időben ne okozzon zavart az erőmű üzemelésében. Ilyenkor nagyméretű gyűjtőtavat építenek, amivel egy egész völgy vízkészletét fel tudják fogni, sőt még a szomszédos völgyekben található kisebb folyóvizek, patakok vizét is ide terelik mesterséges úton (külszíni csatornákkal vagy föld alatti vezetékekkel). Egy ilyen gyűjtőtavat csak olyan völgyben szabad megépíteni, ahol tömör a talajszerkezet, mert különben állandó vízvesztéssel (elfolyással) kell

számolni. Végül meg kell említenünk azt az esetet, amikor a külszíni viszonyok lehetővé teszik egy nagy gyűjtőtógát megépítését, azonban az évszakonkénti nagy hőmérséklet-ingadozás miatt a gépházat, ahol a turbinák, a villamos generátorok stb. vannak, a föld alatt kell megépíteni. A víznek az erőmű hálózatán belüli, külszíni elterelésére szolgáló járatokat *elaterelő csatornáknak*, míg a föld alatti mesterségesen kiképzett járatokat *kényszervezetékeknek* nevezik. Ugyanígy nevezik azokat a vezetékeket is, amelyek külszíniak ugyan, de a víz áramlása zárt térben játszódik le. A vízerőmű egyenletes üzemelésének fenntartása végett a vízturbinák működtetésére szánt vizet előzőleg egy ún. víztoronyba vezetik (ami a kiegyenlítő készülék szerepét tölti be), ahonnan azután a kényszervezetéken keresztül, mindvégig állandó magasságból, juttatják a turbinákhoz. A föld alatti gépházzal rendelkező vízerőművek esetén a turbinákból kikerülő vizet egy vízvezető alagúton keresztül juttatják a külszíni elfolyóba.

A vízerőmű teljesítménye az alábbi képlettel számítható ki:

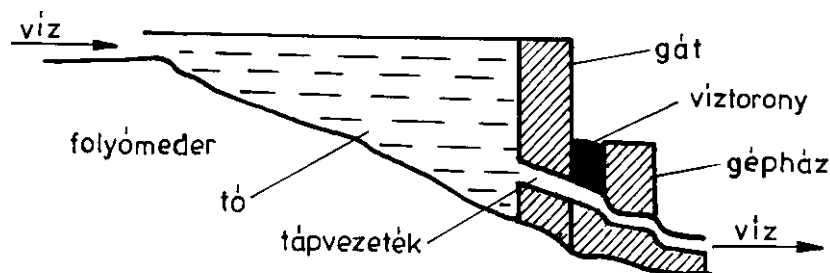
$$P = 9,81 \cdot E \cdot Q \cdot H \quad [\text{kW}] \quad (1)$$

ahol:

- E a víz hidraulikus energiájának villamos energiává való átalakulási tényezője ($E=0,85-0,95$);
- Q - vízhozam, t/s;
- H - a víz esési magassága, m.
- $9,81 \text{ m/s}^2$ - a nehézségi gyorsulás.

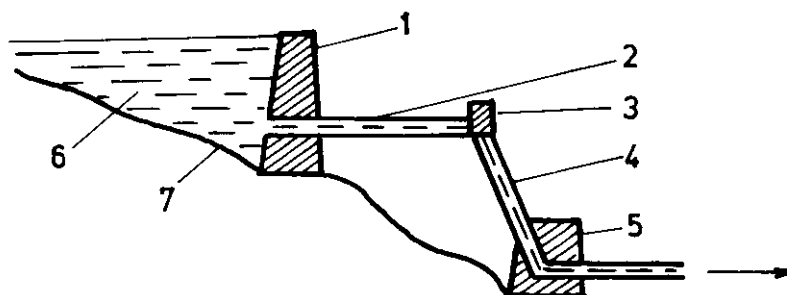
2. 1. Nagy gyűjtőtavas vízerőmű

Az ilyen típusú vízerőművek nagyméretű, völgyelzáró vízgyűjtőtógáttal rendelkeznek. A gépház (vízturbinák és a villamos generátorok részlege) a vízgyűjtő gát alsó szintjén helyezkedik el, a gát közvetlen közelében. Egy ilyen vízerőmű elvi metszetét mutatja be az 5. ábra. Ebben az esetben a kényszervezetékét tápvezetéknek nevezik. Ezeknek az erőműveknek az évi teljesítménye rendszerint meghaladja a 400 MW-ot. Ezeket az erőműveket csúcsidényben nagyon jó eredménnyel használják fel.



5. ábra. Nagy gyűjtőtavas vízerőmű függőleges elvi metszete

2. 2. Elterelőcsatornás és gyűjtőtavas vízerőmű

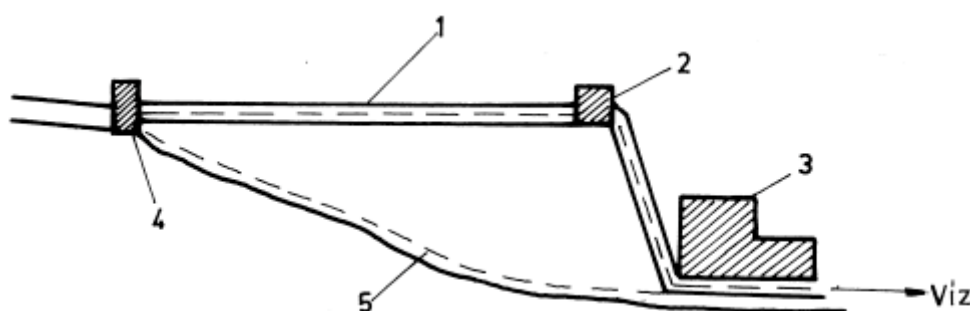


6. ábra. Elterelőcsatornás és gyűjtőtavas vízerőmű függőleges elvi metszete:
1 - gyűjtőtógát; 2 - elterelőcsatorna; 3 - víztorony; 4 - kényszervezeték; 5 - gépház; 6 - gyűjtőtó; 7 - vízmeder

Egy ilyen típusú vízerőművet szemléltet a 6. ábra. A vízgyűjtőtógát ebben az esetben kisméretű, mivel az adott természetes folyóvíz hozama elég nagy, viszont évszakonként aránylag nagymértékben változik. Látható, hogy ebben az esetben a megfelelő esési magasság elérése végett a vízgyűjtőtóból a vizet egy külszíni elterelő csatornán keresztül juttatják a víztoronyba, majd onnan a kényszervezetékbe, amely a vízturbinákhoz vezet.

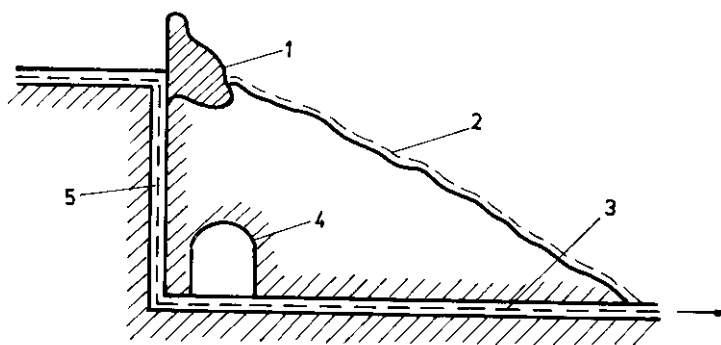
2. 3. Kisméretű, elterelő csatornával ellátott vízerőmű

Egy ilyen típusú vízerőmű látható a 7. ábrán. Ezeket az erőműveket akkor építik, amikor az igénybevett folyóvíz elég bő vízhozammal rendelkezik, ami évszakonként csak kevésbé változik. Az elterelő gát, illetve elterelő csatorna ebben az esetben csupán azt a célt szolgálja, hogy a vizet egy olyan földrajzi helyre eljuttassák, ahol biztosítható a víz kellő esési magassága.



7. ábra. Kisméretű, elterelő csatornával ellátott vízerőmű:
1 - elterelőcsatorna; 2 - víztorony; 3 - gépház; 4 - terelőgát; 5 - folyómeder

2. 4. Föld alatti gépházzal rendelkező vízerőmű



8. ábra. Föld alatti gépházzal rendelkező vízerőmű függőleges elvi metszete:
1 - gyűjtőgát; 2 - folyómeder; 3 - vízelvezető alagút; 4 - gépház; 5 - kényszervezeték

Egy ilyen erőművet szemléltet a 8. ábra. Legfőbb jellemzője, hogy gépháza a föld alatt van, aminek oka a téli alacsony hőmérséklet, valamint a nehéz geológiai viszonyok. Általában nagy teljesítményű vízerőművek. Egy ilyen erőmű üzemel az Argeş folyó mentén, csodálatosan szép természeti környezetben. Teljesítménye kb. 400 MW.

3. A hőerőművek leírása és működése

Jelenleg az atomerőművek mellett a hőerőművek termelik a legtöbb villamos energiát. Működésükhöz hőre van szükség, ezt pedig a különféle tüzelőanyagok elégetése útján nyerik (ásványi szenek, földgáz, kőolaj stb.). Az így fejlődő hő a keménységtől megszabadított vizet (lágú víz) nagynyomású gőzzé alakítja, ami meghajtja a gőzturbinákat, ezek pedig működésbe hozzák a villamos áramot szolgáltató generátorokat. A tüzelőanyagok elégetése a gőzkazánokhoz tartozó tüzelő berendezésekben játszódik le. Az így képződő forró égési gázok vagy a gőzkazán csövein haladnak át és így alakítják gőzzé a csöveket ellepő vizet (*lángcsöves gőzkazán*), vagy máskor - s az iparban ez a gyakoribb eset - kívülről fűtik a csöveket, miközben a bennük lévő víz alakul át gőzzé (*vízcsöves gőzkazán*). Ez utóbbiak fejlesztik a nagynyomású vízgőzt, ezért a nagyteljesítményű hőerőművekben főleg ezeket használják.

A használt tüzelőanyagok energetikai értékét azok *fűtőértéke* határozza meg, amit szilárd és cseppfolyós tüzelőanyagok esetében kcal/kg-ban szoktak megadni. Emellett használják a hőérték fogalmát is, amit ugyanazokban az egységekben fejeznek ki. Beszélhetünk alsó- és felső hőértékről. Az előbbi megegyezik a fűtőérték fogalmával, gyakorlati szempontból ennek van nagyobb jelentősége. Erről akkor beszélhetünk, amikor feltételezzük, hogy a tüzelőanyag elégetése során képződő víz az égési gázokkal eltávozik (tehát 100°C feletti hőmérsékleten van jelen). A felső hőértéket laboratóriumi viszonyok között határozzák meg, amikor is az égésvíz cseppfolyós állapotban marad vissza. Ebből következik, hogy a kettő közötti különbség számszerű értéke egyenlő azzal a hőmennyiséggel, amely szükséges ahhoz, hogy az égésvíz gőzzé alakuljon. A szilárd és a cseppfolyós tüzelőanyagok hőértékének meghatározására a bombakaloriméter nevű készüléket használják. Ez rozsdamentes acélból készült kb. 500 cm³-es autokláv, benne egy kívülről vezérelt gyújtószerkezet található, aminek segítségével a pontosan bemért kb. egy g-nyi tüzelőanyag-próba elégethető. A felszabaduló hőmennyiséget a bombakalorimétert ellepő víz veszi át, aminek ismerni kell a kezdeti és a meghatározás végén beálló hőmérsékletét. A felsőhőérték kiszámítására szolgáló képlet tehát a következő lesz:

$$H_f = \frac{c(G+W) \cdot (t_v - t_k)}{m} \quad [\text{kcal/kg}], \quad (2)$$

ahol:

- c - a víz fajlagos hőkapacitása, kcal/kg·°C;
- G - a meghatározáshoz használt víz tömege, g;
- W - a kaloriméter vízártéke, g;
- t_k és t_v - a használt víz kezdeti és végső hőmérséklete, °C;
- m - az elégetésre szánt próba tömege, g.

Egyszerűsítés céljából a $c(G+W)$ szorzatnak az értékét úgy határozzuk meg, hogy a kísérletet egy ismert felső hőértékű anyaggal végezzük el. Ezt az értéket K -val szokták jelölni és az adott kaloriméter vízártékének nevezik. A további méréseknél végig ezt az értéket használjuk, viszont a meghatározáshoz használt víz mennyisége mindig ugyanannyi kell, hogy legyen, mint amennyit a K állandó meghatározásánál használtunk. A fenti képlet ezek ismeretében a következő alakú lesz:

$$H_f = \frac{K \cdot (t_v - t_k)}{m}. \quad (3)$$

Ezek után az alsó hőértéket, vagyis a fűtőértéket (F) a következő képlettel számíthatjuk ki:

$$F = H_a = H_f - 6(9H + U), \quad (4)$$

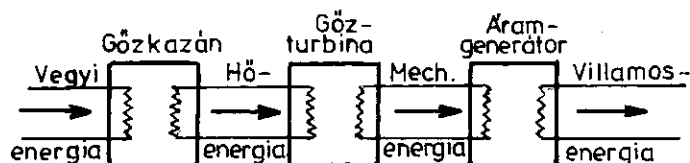
ahol:

- H - a vizsgált tüzelőanyag hidrogén-tartalma, %;
- U - a vizsgált tüzelőanyag nedvességtartalma, %;
- H_a - alsó hőérték, kcal/kg;
- H_f - felső hőérték, kcal/kg.

Itt kell megemlítenünk, hogy a gyakorlatban a technikai-gazdasági számításoknál nagyon gyakran használják az *egyezményes (konvencionális) tüzelőanyag* fogalmát. Ez alatt olyan szilárd vagy cseppfolyós tüzelőanyagot kell értenünk, amelynek a fűtőértéke 7000 kcal/kg.

A gáznemű tüzelőanyagok fűtőértékének a meghatározásánál hasonlóan járunk el, csupán az eredményt kcal/m³-ben kell megadni.

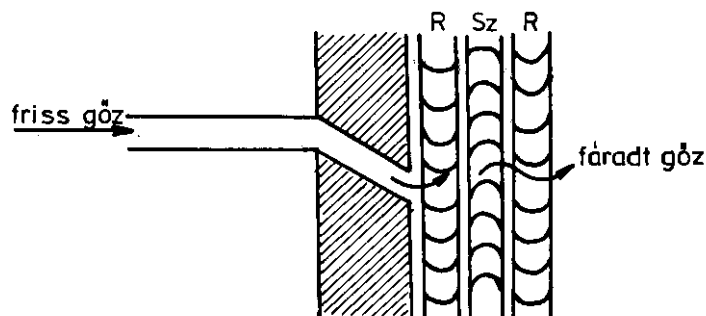
A gőzkazánok tüztérében elégetett tüzelőanyag égésmelegének a hatására, a gőzkazánba bevezetett víz egy része fokozatosan gőzzé alakul, aminek a nyomása több tíz atmoszféra is lehet. Ezzel a gőzzel üzemeltetik a gőzturbinákat, amelyek a villamos generátorokat működtetik, ezek pedig villamos áramot szolgáltatnak. Tehát a hőerőművekben szereplő energiafélések egymásba való átalakulásának a láncolatát a 9. ábrával lehet szemléltetni.



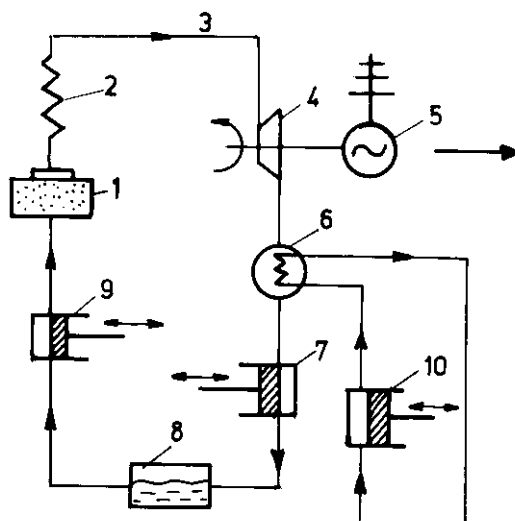
9. ábra.

A hőerőművekben szereplő energiafélések egymásba való átalakulásának láncolata

A gőzturbinák turbinaházból és egy (Laval) vagy több forgórészből (Curtis) állnak. Két szomszédos helyzetű forgórész között egy-egy állórész található, aminek a kerületén lapátok (kupák) vannak. Ezek jól meghatározott hajlásszöge azt a célt szolgálja, hogy miközben a gőz az egyik forgórészből a következő felé tart, haladási iránya végül is olyan legyen ami a legkedvezőbb beesési szöget biztosítsa a gőz számára. A több forgórészt tartalmazó turbináknál a gőz nyomása fokozatosan csökken, miközben egyik forgórésztől a másik felé tart. Ezért ezeket többfokozatú gőzturbináknak nevezik. Ennek az elvi függőleges metszetét szemlélteti a 10. ábra.



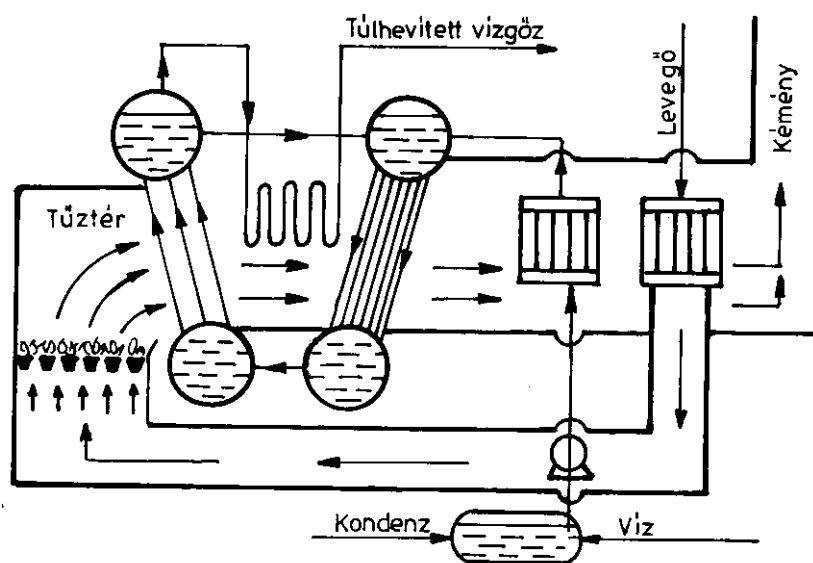
10. ábra. Curtis-féle több sebességű, illetve nyomásfokozatú gőzturbina:
R - rotor (forgórész); Sz - sztátor (állórész)



11. ábra. Egy teljes gőzkondenzációjú villamos hőerőmű szerkezeti ábrája:
1 - gőzkazán; 2 - túlhevítő; 3 - hőkondenzátor; 4 - gőzturbina; 5 - áramfejlesztő;
6 - hűtőkondenzátor; 7, 9, 10 - dugattyús szivattyúk; 8 - kiegyenlítő víztartály

A turbinából távozó vízgőzt még fel lehet használni különféle készülékek, sőt lakások melegítésére is. Ha ez teljesen hiányzik, akkor az üzem neve villamos hőerőmű, amit a 11. ábra szemléltet (szerkezeti ábra). A kazánban (1) keletkező gőz technológiai értéke növelhető azáltal, hogy átvezetik a túlhevítő szerkezeten (2), amikor a nyomása megnövekszik, s így kerül a turbinába (4). Az onnan kijövő fáradt gőz a hűtőkondenzátoron (6) halad át, miközben cseppfolyósodik és a szivattyúk (7 és 9) segítségével, a kiegyenlítő tartályon (8) keresztül visszakerül a gőzkazánba (1). A víznek ilyen természetű újrafelhasználása gazdasági szempontból igen lényeges, mivel a kazánok táplálására használt vizet előzőleg vegyszerekkel kell kezelni (lágyítani kell) a különben vízkövet okozó kalcium- és magnézium-hidrogénkarbonát

eltávolítása végett, valamint az erős korróziót kiváltó egyéb, a vízben oldódó kalcium- és magnézium só eltávolítása céljából. Így érthetővé válik, hogy a már egyszer kezelt és használt vizet célszerű minél huzamosabb ideig benntartani a technológiai járatban. A fáradt gőz kondenzálását a szivattyúval (10) áramoltatott hideg vízzel valósítják meg. A villamos áramfejlesztő (generátor) (5) kb. 10000 V-os áramot szolgáltat, amit az erőműhöz tartozó transzformátorállomáshoz irányítanak, ahol az áram feszültségét lényegesen megnövelik (transzformálással), mivel így a szállítás közbeni veszteség jelentősen lecsökken. Manapság már 1 millió voltos szállító vezetékeket (vonalakat) is építettek. Általában a 100-400 ezer voltos vezetékek a gyakoribbak. Ebből következik, hogy a felhasználás helyén a feszültséget ugyancsak transzformálás útján csökkenteni kell, háromfázisú áram esetén 380 V-ra, kétfázisú áram esetében pedig 220, esetleg 110 V-ra.



12. ábra. Egy hőerőmű gőztermelő energetikai egysége
(az égési gázok hőtartalmának a visszanyerésére szolgáló készülékekkel)

Ahhoz, hogy könnyebben elképzelhetővé váljon egy villamos hőerőműbeli gőzfejlesztő szerkezete és működése, a 12. ábrán egy ilyen energetikai egységnek az elvi metszetét mutatjuk be, amely példázza azt is, hogy miként hasznosítható az égési gázok hőtartalma, amit a tüzelőanyag elégetéséhez szükséges levegő, valamint a kazánba betáplált víz előmelegítésére használnak fel.

4. Atomerőművek leírása és működése

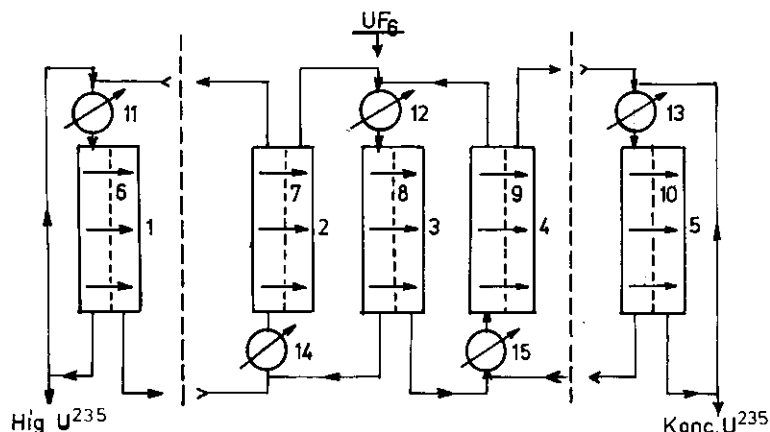
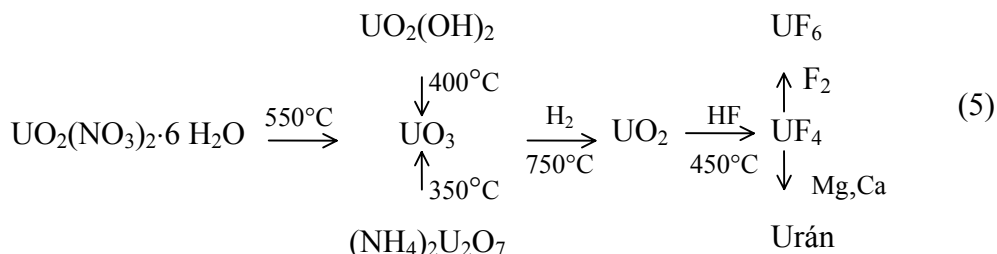
Az atomerőművek villamos energia termelésére, kisebb mértékben fűtési célokra szolgálnak. A működésükhöz szükséges energiát a radioaktív elemek szolgáltatják. Ilyen célokra főleg a 233-as és 235-ös tömegszámú uránt, valamint a 239-es tömegszámú plutóniumot használják. Ezek a radioaktív kémiai elemek azzal a tulajdonsággal rendelkeznek, hogy atommaghasadást szenvednek, miközben nagy mennyiségű hő szabadul fel. Ezt a továbbiakban ugyanúgy használják fel villamos energia termelésére, mint a villamos hőerőművek esetében. Az említett radioaktív elemek közül csak a 235-ös urán fordul elő a természetben. Mégpedig, a természetes urán csupán 0,7 %-nyi mennyiségben tartalmazza. Ennek radioaktív hasadása közben átlagosan 2,5 gyors neutron képződik, amelyek sebességcsökkentő anyagok hatására újabb maghasadást indíthatnak el. Ilyen úton a képződött neutronok száma fokozatosan növekszik, ami

végül ennek a láncreakciónak a mértékét annyira felfokozza, hogy bekövetkezhet az atomrobbanás (egy ilyen folyamat játszódik le az atombombában). Az atomreaktor csak akkor működhet folyamatosan (biztonságban), ha a maghasadási láncreakció sokszorozási tényezője egyenlő 1-gyel. Ez azt jelenti, hogy a maghasadási reakcióban felszabaduló átlagosan 2,5 neutronból csak egynek szabad maghasadást okoznia. E célból a feleslegesnek számító neutronokat ún. neutronbefogó elemekkel megkötik. Ilyenek a kadmium, bór, hafnium, tantál stb. A maghasadást kiváltó neutronokat normálsebességű vagy termikus neutronoknak nevezik. Az említett neutronbefogó elemekből rudakat készítenek, amelyeket az atomreaktor megfelelő járataiban önműködően szüllyesztenek vagy emelnek (az uránrudak közé), és így biztosítják az atomreaktor egyenletes működését. A gyorsneutronok sebességét az aktív magreakció céljából csökkenteni kell (különben ezek maghasadás nélkül beépülnek a 238-as urán atommagjába, vagy esetleg kijutnak az atomreaktorból), ezt a *moderátoroknak* nevezett anyagokkal lehet elérni. Ilyenek lehetnek a nehézvíz (D₂O), grafit, berillium (Be), sőt néha a közönséges víz. Ha a gyors neutronok ezeknek az anyagoknak a molekuláival ütköznek, akkor az ún. rugalmas ütközés valósul meg, aminek folytán az említett neutronok sebessége lecsökken a maghasadást kiváltó termikus sebességek értékére (azért termikus sebesség, mert ez a termikus hőenergiát felszabadító maghasadással jár együtt).

Illő megemlíteni, hogy az első kísérleti atomreaktort 1942-ben építették Chicagóban, az olasz Enrico Fermi vezetésével és a magyar származású Szilárd Leó és Wigner Jenő közreműködésével, míg az első ipari (áramtermelő) atomreaktort 1954-ben helyezték üzemi állapotba Oroszországban (Obnyinszkben). Azóta a világ minden részében épültek atomerőművek. Ezek száma már meghaladja az 500-at. Jóllehet az atomerőművek építésénél a maximális biztonsági szempontokat tartják szem előtt, mégis az idők folyamán már több üzemi (működésbeli) baleset történt, szerencsére ezek közül csak nagyon kevés volt tragikus kimenetelű. Néhányat ezek közül megemlítünk (Heti Világgazdaság, 1986. május 10., 11. oldal). 1957-ben az angliai Cumberland Windscale központjában egy plutóniumot előállító ún. szaporítóreaktor (breeder = bríder) túlmelegedett, kigyulladt, és egy napig égett. Több száz négyzetméter területet 131-s jódizotóppal szennyezett be. 1979-ben az Amerikai Egyesült Államokban, Pennsylvania állam Harrisburg nevű városa mellett a Three Mile Island atomerőműnél, hanyagásból kifolyólag eltörtött egy szelep a hűtővizet szállító szivattyúnál. Emiatt a reaktor felmelegedett és az urántöltet 20 %-a megolvadt és a környezetben megnövekedett a radioaktivitás (értéke elérte a 8-10 *milirem* értéket, ami kb. két röntgenvizsgálat sugáradagjával egyenlő). 1981-ben Japán Curuga nevű városa melletti atomerőmű körül az Urazokobeltengerben a radioaktivitás a 10-szeresére növekedett, mivel a munkások elfelejtették elzárni az egyik tartálék tartály csapját, s így 3 órán keresztül kb. 40 t radioaktív víz folyt ki. 1986-ban az angliai Cumberlandben 400 kg urántartalmú hulladék került az ír tengerbe. Ugyancsak 1986-ban a Kiev melletti csernobili atomerőműben meghibásodott a hűtőrendszer, ezért a reaktorok, és végül az egész rendszer túlmelegedett, törések-repedések keletkeztek, radioaktív felhők jöttek létre, amelyek durván szennyezték a környezetet Lengyelország, Ausztria, Németország, Magyarország, Svájc, Svédország, Dánia, Románia, Bulgária stb. területén. A katasztrófának számos halálos áldozata volt és több tízezer embert kellett elköltöztetni a környékről. Utólagos értékelések szerint 6 rendbeli mulasztást követtek el az erőmű alkalmazot-tai. Ez volt az eddigi legsúlyosabb baleset, ami a világ villamos atomerőműveiben lejátszó-dott.

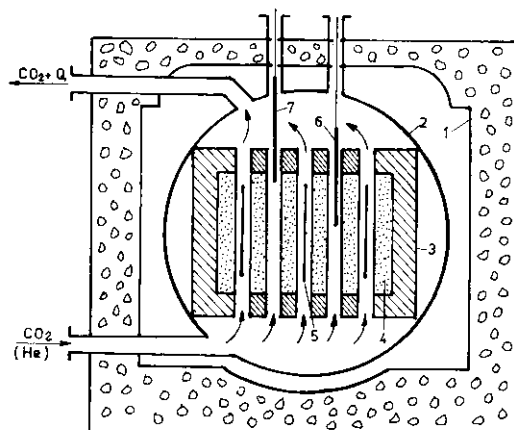
Az emberiség viszont annyira rá van szorulva az atomenergiára, hogy inkább hatványozottan hangsúlyozzuk, hogy: „*Rend a lelke mindennek*”, de az atomerőművek használatát és építését tovább folytatjuk, hiszen ugyanolyan tömegű 235-ös uránból például 3 milliószor több energiát lehet nyerni, mint a jóminőségű kőszénből (1 kg 235-ös uránból kb. 23 millió kWh energiát lehet nyerni, míg egy kg kőszénből 8,1 kWh-t). A természetben előforduló uránércből az

uránt erős ásványi savakkal (salétromsav, kénsav) vonják ki különféle vegyületek alakjában, amelyeket végül is urán-hexafluoriddá alakítanak át, ami gáznemű anyag, amivel elvégezhető a 235-ös uránt tartalmazó összetevő diffúzió útján való dúsítása. Az UF_6 előállítását az alábbi reakciókkal szemléltetjük:



13. ábra. A 235-ös uránizotóp diffúzió általi töményítésére szolgáló berendezés magyarázó ábrája: 1-5 - diffúziós kamrák; 6-10 - pórusos elválasztó falak; 11-15 - hőcserélők

Az így előállított uránnak csupán 0,7 %-a 235-ös urán. Ezért az atomreaktor jó hatásfokának elérése végett ezt dúsítani kell, hogy a 235-ös izotóp töménysége elérje a 3-3,5 %-ot. Ennek a folyamatnak az képezi az alapját, hogy a 235-ös izotópot tartalmazó urán-hexafluorid diffúziós sebessége 1,0043-szor nagyobb, mint a 238-as izotópot tartalmazóé. Azonban ez a sebességkülönbség nagyon kicsi, ezért a dúsítására szolgáló berendezés méretei igen nagyok és mind építésük, mind üzemeltetésük igen költséges. Ezért ezeket csak gazdaságilag nagyon fejlett államokban találhatjuk meg (Amerikai Egyesült Államok, Japán, Kanada, Oroszország, Anglia stb.). Például az USA-beli Oak-Ridge-ben üzemelő töményítő berendezésben több tízezer diffúziós kamra van, melyeknek a közepén egy-egy szinterizált (zsugorított) alumínium-oxidból vagy teflonból gyártott porózus fal található. A pórusok nagysága kb. 200 Å. A berendezés hossza 1,6 km, szélessége pedig 150 m. Egy ilyen berendezés függőleges elvi metszetét szemlélteti a 13. ábra. Az 1-5-tel jelölt diffúziós kamrákban találhatók a 6-10-zel jelölt porózus válaszfalak, amelyeken keresztül lejár a diffúzió, míg 11-15 a rendszer hőcserélői. A berendezés egyik végén távozik a 235-ös uránban gazdagabb urán-hexafluorid, míg a másik végén a kevesebb 235-ös uránt tartalmazó urán-hexafluorid. Az így kapott urán-fluoridokat ezután fémes kalciummal vagy magnéziummal uránná alakítják át. Ezt a dúsítást ultracentrifugálással és lézerrel való szelektív gerjesztéssel is el lehet végezni.

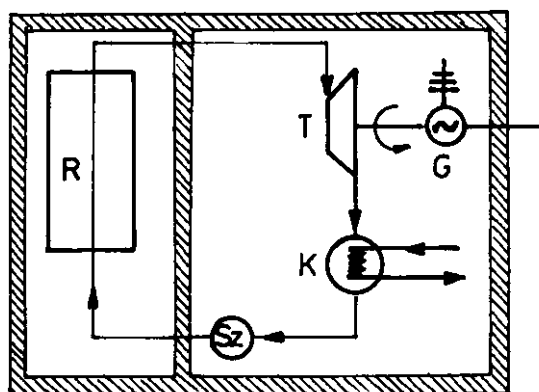


14. ábra. Grafitmoderátoros atomreaktor függőleges elvi metszete:

1 - biológiai védőfal; 2 - nyomásálló burok; 3 - grafit reflektor; 4 - grafit moderátor; 5 - radioaktív töltet;

6 - kadmium szabályozó rudak; 7 - biztonsági kadmium szabályozó

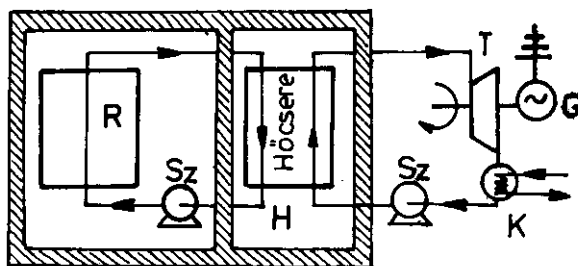
A dúsított uránt vagy ennek oxidját használják fel az atomreaktorba kerülő fűtőelemek gyártására, amelyeket arányosan helyeznek el az atomreaktorban, aminek egyik változatát szemlélteti a 14. ábra. Itt látható, hogy az atomreaktort egy masszív betonfal (biológiai védőfal) veszi körül, amit 1-gyel jelölünk, és ami megakadályozza a radioaktív sugarak környezetbe jutását, mivel ez károsan hatna az egész élővilágra. Ezen belül található az acélból készült nyomásálló burok (2), ami a megnövekedett nyomás ellen nyújt védelmet. Beljebb található a 3-as grafitból készült burok, ami a távozni próbáló gyors neutronokat visszairányítja a reaktor belsejébe. A reaktor belsejében a 4-gyel jelzett grafitbloomok a gyorsneutronok sebességének csökkentésére (moderátorként) szolgálnak. A hőenergiát az uránnal vagy urán-dioxiddal töltött fűtőelemek (5) szolgáltatják. Az atomreaktor működésének szinten tartására szolgálnak a kadmiumrudak (6), amelyek neutronokat képesek megkötni. A reaktor működésének növekvő intenzitása esetén ezeket a rudakat egy önműködő szerkezet fokozatosan beljebb tolja. Ezek mellett megjelennek a biztonsági kadmiumrudak (7), amelyeket kritikus helyzetekben szoktak igénybe venni. Manapság a grafitot, mint moderátort, főleg nehézvízzel, berilliummal stb. helyettesítik.



15. ábra. Forralóvízes vagy egyhűtőközeges villamos atomerőmű szerkezeti ábrája:

R - reaktor; T - gőzturbina; G - áramfejlesztő (generátor); K - gőzkondenzátor; Sz - szivattyú

A régebbi típusú atomerőművekben az atomreaktor és a gőzturbinák egyazon technológiai (szerkezeti) körben voltak, ezért itt a radioaktív szennyezés lehetősége aránylag nagy volt. Ezeket *forralóvízes* reaktoroknak vagy egyhűtőközeges reaktoroknak, illetve atomerőműveknek nevezik. Egy ilyen atomreaktorral ellátott atomerőműnek a szerkezetét szemlélteti a 15. ábra. Az említett hátrányok miatt az ilyen atomreaktorokat, illetve atomerőműveket már nem szokták használni. Helyettük a sokkal kisebb mértékben szennyező *nyomottvízes* atomerőműveket építik és üzemeltetik (nevezik még őket két hűtőközeges, illetve hűtőkörös atomerőműveknek is). Egy ilyen atomerőmű elvi, szerkezeti metszetét mutatja be a 16. ábra.



16. ábra. Nyomottvízes vagy kéthűtőközeges (hűtőkörös) villamos atomerőmű:
R - reaktor; Sz - szivattyúk; H - hőcsere; T - gőzturбина; G - áramfejlesztő (generátor); K - gőzkondenzátor

Látható, hogy az erőmű első szerkezeti körében keringő hűtőfolyadék (ami lényegében hőhordozóvá válik) átveszi az atomreaktor által termelt hőenergiát, majd átadja ezt a második hűtőkörben keringő közönséges víznek, ami ezáltal a megfelelő nyomású vízgőzzé alakul, s ez a gőzturbinákat tartja működésben, ezek pedig az áramfejlesztő gépeket (generátorokat) működtetik. A két hűtőkör (szerkezeti kör vagy járat) közötti hőcsere egy erre a célra szánt hőcserélőben valósul meg. A leírtakból kiderül, hogy a villamos hőerőművek és atomerőművek szerkezete és üzemelése között sok hasonló vonást találunk. A lényeges különbség abban rejlik, hogy a hőerőműveknél a szükséges hőmennyiséget a gőzkazánok tüzelőberendezéseiben elégetett tüzelőanyagok termelik, míg atomerőművek esetében az atomreaktorba helyezett 235-ös vagy 233-as urán (vagy ezek oxidjai), illetve a 239-es plutónium teszi ugyanezt maghasadás útján.

A nyomottvízes reaktorokhoz hasonlóak az ún. szaporító reaktorok (breederek), amelyekben a 238as uránizotópot alakítják át 239-es plutóniummá a gyors neutronok hatására. Ez a plutónium ugyanolyan jó eredménnyel használható, mint a 235-ös uránizotóp. Ahhoz, hogy ezek a szaporító atomreaktorok minél nagyobb hatékonyságúak legyenek, meg kellett oldani, hogy minél magasabb hőmérsékleten működhessenek anélkül, hogy a reaktort is magában foglaló hűtőkörön belül a nyomás túl magas értéket érne el. Ezt úgy valósították meg, hogy e hűtőkörben fémnátriumot használtak hűtőközegként (itt lényegében hőátvevő és továbbító oldadék). Sok olyan atomerőmű is működik, ahol a villamos energia termelése és a szaporítás (a plutónium előállítása) egy időben játszódik le.

5. A napenergia felhasználása

Az előzőekben már beszámoltunk arról, hogy milyen határtalan hőenergiát ajándékozik a Földnek (az emberiségnek) a Napnak nevezett hatalmas égitest. A földfelszín ennek az energiának egy részét természetes úton elraktározza, de a többi a fizika törvényeinek megfelelően visszaverődik és visszakerül a légkörbe, világűrbe. Ahhoz, hogy ennek a hatalmas mennyiségű

ajándékenergiának minél nagyobb részét az emberi társadalom szolgálatába állíthassák, nagyszámú módszerrel próbálkoztak már.

Az egyik ilyen módszer szerint a napenergiával fotocellákat lehetne működtetni, amelyek villamos áramot fejlesztenek, ezzel pedig elektrolizálni lehetne a nátrium-kloridot, aminek kapcsán nátriumot és klórt lehetne előállítani. E két kémiai elem egymással való reagáltatásával egy hőelektromos cellában villamos áramot lehetne fejleszteni a fogyasztók számára. Sajnos ez az elképzelt módszer még nem valósult meg az ipari gyakorlatban.

Egy másik módszer szerint (s ennek már gyakorlati jelentősége is van), a napsugarakat hatalmas gyűjtőlencsével egy meghatározott helyre sűrítik (a lencse gyújtópontjába) és ott használják fel. Ezen a helyen lehet egy „napkemence” (méhlépszerűen kiképzett csőrendszer), amely elraktározza a Nap melegét, hogy azután átadja azt egy másik közegnek, például víznek, amiből meleg víz lesz, amivel például lakások melegvíz-szükségletét elégítik ki. Máskor ezt a meleget egy nem korrodáló folyadék veszi át (például a freon-11), ami gőzzé alakul, majd ezek a gőzök a vízgőzhöz hasonlóan gőzturbinákat képesek üzemeltetni, amelyek viszont áramszolgáltató gépeket működtetnek. Ez a helyzet áll fenn a villamos naperőműveknél. Egyszerűbb esetekben a napenergiát lakások melegvíz-ellátására, vagy éppenséggel azok fűtésére használják.

Nagy jelentőségű lenne a napenergia felhasználása az iparilag megvalósítandó klorofill szintézise útján, amikor is a légkör szén-dioxidjából és nedvességből formaldehid és oxigén képződik, ezek elégetésével hőenergiát lehetne nyerni, amit különféle célokra fel lehetne használni, beleértve a villamos energia termelését is.

A fotodiódák segítségével a napenergia 14-18 %-os hozammal villamos energiává alakítható át. Legfontosabb szerkezeti összetevőjük egy félvezető tulajdonságokkal rendelkező lemez (szilícium, kalcium-szulfid, kadmium-tellur ötvözet stb.). Ha ezeknek a lemezeknek egyik oldalát napsugarak érik, a lemez két oldala között potenciálkülönbség lép fel, tehát elektromos áram keletkezik. Ilyen fotodiódákkal termelik az áramot az ürrepülőgépeken, űrszondákon stb.

Említésre méltó e tekintetben még az a megfigyelés, amely szerint ha antracén vizes szuszpenzióját napsugarak érik, akkor hidrogén és oxigén fejlődik; ezek elégetésével hőenergia, majd ebből a már ismertetett módon villamos energia keletkezik. Sajnos ezek az eredmények csupán laboratóriumi szinten valósultak meg.

A naperőművek megépítése nagy felületeket igényel. Így például egy kisebb méretű napkemence megépítéséhez 2000 m² területre van szükség. A napenergia használatával elérhető évi megtakarítások mértéke kb. 2 tonna egyezményes tüzelőanyag kW-ként.

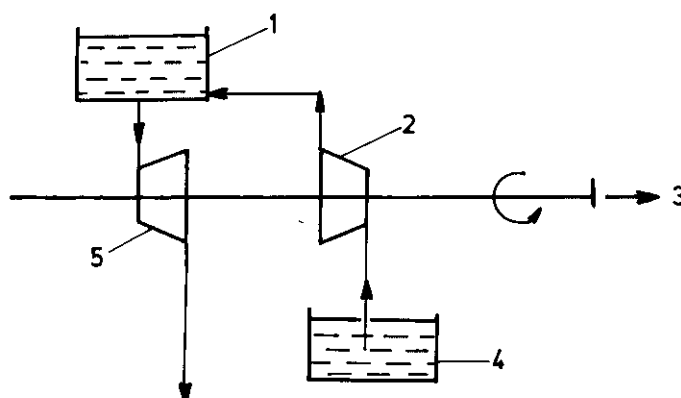
Annak érzékeltetésére, hogy a napenergia felhasználása céljából mekkora területet vettek igénybe bizonyos államok, szolgáljanak példaként a következő adatok:

- az Amerikai Egyesült Államokban 12 millió m²;
- Japánban 10 millió m²;
- Romániában kb. 1 millió m².

6. A szélenergia felhasználása

A szélenergiát felhasználó erőműveket, illetve villamos erőműveket olyan területen építik meg, ahol a szél aránylag nagy sebességgel és állandóan fúj. Ilyenek például a tengerparthoz közel eső síkterületek, magasabban fekvő hegyvidéki zónák stb. A szélerőműveket felhasz-

nálják a mezőgazdasági munkálatoknál, állattenyésztő farmokon stb., a víz szivattyúzására és általában a nem villamos gépek működtetésére. A villamos szélerőműveket viszont villamos energia (villanyáram) termelésére használják. Nagyságukat tekintve lehetnek mikroerőművek, melyeknek teljesítménye $0,1 \div 2$ kW és főleg akkumulátorok feltöltésére üzemeltett, kis teljesítményű erőművek 2-10 kW-osak, melyeket izolált menedékházak, farmok stb. villanyárammal való ellátására használnak, közepes nagyságú villamos szélerőművek 10-100 kW-os teljesítménnyel, melyeket földrajzilag izolált, kisebb települések áramellátására használnak, s végül ismeretesek a 100-1000 kW-os ilyen típusú erőművek, melyeket nagyobb települések, városok villanyárammal való ellátására használnak. Területéhez képest, Európában működik a legtöbb szélmotor, illetve szélerőmű, főleg Hollandiában.



17. ábra. Szélerőmű vízgyűjtőmedencével:

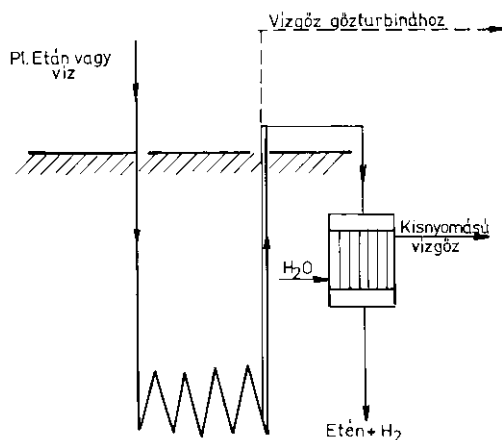
1 - vízgyűjtő medence; 2 - szivattyú; 3 - szélmotor; 4 - természetes vízforrás; 5 - vízturbina

A szélerőmű legfontosabb része a szélmotor, amely egy megfelelően magas állványból és az erre szerelt forgórészből áll; ez aránylag hosszú lapátszerű szerkezeti elemekből tevődik össze, melyeket a jó hatásfok elérése végett úgy rögzítenek, hogy a szél megfelelő szögben érje őket. A szélmotor tengelyéhez csatolják a meghajtásra szánt gépet, ami lehet szállítószalag, szivattyú, elevátor vagy éppenséggel egy áramfejlesztő gép. Ez utóbbi esetben egy villamos szélerőművel állunk szemben. Ahhoz, hogy ennek működése minél egyenletesebb legyen, egy vízgyűjtő medencével látják el, a szélmotor tengelyére pedig egy szivattyút és egy vízturbinát szerelnek. Amikor nagy a szél erőssége, beindítják a szivattyút, ami egy víztároló medencéből a vizet egy megfelelő magasságban megépített vízgyűjtő medencébe szállítja. Amikor a szél erőssége alábbhagy, a szivattyút leállítják, és az erőmű szinten tartása érdekében üzembe helyezik a szélmotor tengelyére szerelt vízturbinát, amit a gyűjtőmedencéből kiáramló víz tart mozgásban. Ezt a megoldást szemlélteti a 17. ábra. Romániában főleg a Fekete-tenger közelében, Dobrudzsában működnek szélerőművek.

7. A geotermikus energia felhasználása

Ez a fajta energia a Föld különböző mélységében található rétegekben van felhalmozva. Eredetét tekintve származhat a Föld középpontjában található „magma”ból, ahonnan a vulkánikus kéregmozgások útján jut el a Föld felszínéhez aránylag közel eső rétegekbe, másrészt a radioaktív anyagok maghasadási reakciójából. A geotermikus energia egy része egyenesen a földfelszínre jut meghatározott hőmérsékletű és nyomású vízgőz, vagy melegvíz (hévíz) alakjában. Ez a melegvíz vagy termásvíz jól használható növényházak, lakások, zootechnikai

létesítmények stb. fűtésére. Ha viszont sótartalma túl nagy, s főleg ha korróziós tulajdonságú, akkor felhasználása a tisztítási költségek miatt nem mindig gazdaságos. Sok termálvíz gyógyhatású, ezért különféle gyógyfürdők működését teszik lehetővé.



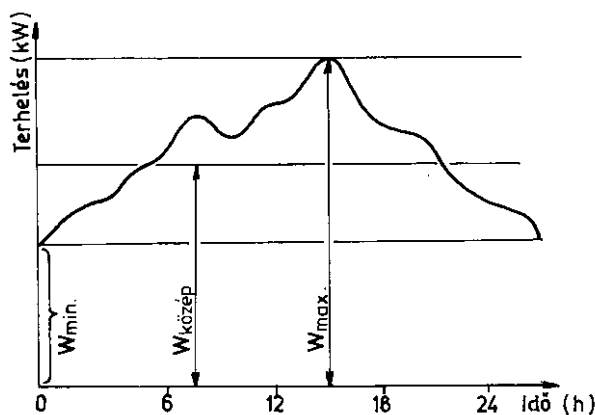
18. ábra. Geotermikus erőmű szerkezeti vázlata

Aktív külszíni vagy rejtett földalatti vulkánoktól bizonyos távolságra a földkéreg hőmérséklete bizonyos mélységben olyan nagy, hogy az ott rejlő hőt gazdaságosan fel lehet használni. E célból különféle bányászati műveletekkel megfelelő aknákat, járatokat vájnak és ezekben helyezik el azt a csőrendszert (szerkezetet), amelyen keresztül például vizet lehet áramoltatni. A csőrendszer egyik végén bevezetett víz a másik végén gőz alakjában kerül a felszínre. A vízhozam megfelelő beállításával elérhető, hogy a képződő vízgőznek meghatározott nyomása és hőmérséklete legyen, amivel például gőzturbinákat lehet működtetni, ezek pedig áramfejlesztő gépeket üzemeltetnek. Japánban például több ilyen villamos erőmű üzemel. Az is elképzelhető, hogy a geotermikus energiát gáznemű szénhidrogének bizonyos típusú bontására használják. Az említett felhasználási módok szemléltetésére szolgál a 18. ábra. Látható, hogy amikor az erőmű melegítő rendszerébe vizet vezetnek, akkor a kellő tulajdonságokkal rendelkező vízgőz képződik, ha pedig például etánt áramoltatnak a felfűtött csőrendszeren keresztül, akkor egy eténből, hidrogénből stb. álló keveréket nyernek. Tehát ebben az esetben az említett csőrendszert kémiai reaktorként használják. A vízhozam megfelelő beállításával elérhető, hogy a felszínre hozott víz a kívánt hőmérsékletű melegvíz alakjában kerüljön felhasználásra.

8. A villamos erőművek és erőrendszerek gazdasági mutatói, jellemzői

A villamos erőművek hatáskörébe tartozó fogyasztók energia illetve teljesítményigénye nagyon különböző lehet, attól függően, hogy milyen termékek gyártásával foglalkoznak. E tekintetben hasznosnak tartjuk megadni néhány fontos ipari termék fajlagos fogyasztását. Ezek a következők:

- hengerelt acéláru	120 kWh/t
- alumínium	17 000 kWh/t
- ötvöztlen acél	1000 kWh/t
- fűrészáru	10 kWh/t
- portlandcement	80-100 kWh/t.



19. ábra. Villamos erőművek napi terhelési diagramja

A fogyasztóknak az erőművel (vagy erőműrendszerrel) szemben támasztott napi teljesítményigényét szemlélteti a *terhelési diagram*. Egy erre vonatkozó példát mutat be a 19. ábra, amelynek a mezejét három különböző teljesítmény-igénybevételi részre oszthatjuk: minimális, közepes és maximális terhelési zónára. Az első nevezik még alapszónának, a másodikat csúcs előszónának, míg a harmadikat csúciszónának.

Az alapszónához tartozó teljesítményigényt fedezik az atomerőművek, a nagy teljesítményű villamos hőerőművek és az egyszerű terelőgátas vízerőművek. A közepes terhelési zónához tartozó igényeket fedezni lehet a kisméretű gyűjtőgáttal ellátott villamos vízerőművekkel, gőzkondenzációs villamos hőerőművekkel, valamint ezeknek azon fajtáival, melyek éjnek idején csökkentett teljesítménnyel működtethetők, s ha a helyzet megkívánja, le is állíthatók. A fogyasztások csúciszónáját fedezni lehet a nagy vízgyűjtőgáttal, illetve gyűjtőtóval ellátott villamos vízerőművekkel stb.

A villamos erőművek egy másik gazdasági jellemzője a *kiegyenlítési tényező*, amely azt mutatja meg, hogy egy bizonyos időszakban a közepes teljesítmény $P_{\text{közép}}$ [kW] igénybevétele ugyanabban az időperiódusban hányad része a maximális teljesítményigény P_{max} [kW]. Ha ezt a tényezőt k_t -vel jelöljük, akkor értékét a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$k_t = \frac{P_{\text{közép}}}{P_{\text{max}}} < 1 \quad (6)$$

ahol:

- $P_{\text{közép}}$ - a közepes teljesítményigény, kW;
- P_{max} - a maximális teljesítményigény, kW.

Ennek a k_t -nek az értéke 0,2 és 0,8 között szokott változni. Minél nagyobb ez az érték a jelölt intervallumban, annál gazdaságosabb az erőmű kihasználása.

A *beépített teljesítmény fajlagos ára* az erőmű gazdaságosságát jellemzi. A beruházási költségek B_k és a beépített teljesítmény P_b közötti viszony számszerű értékét adja meg például dollár/kW-ban. Ha ezt az értéket f_a -val jelöljük, akkor kiszámítására az alábbi képlet használható:

$$f_a = \frac{B_k}{P_b} \quad [\text{US dollár/kW}] \quad (7)$$

A villamos erőmű gazdaságos működését jellemzi a termelt villamos energia ára is, amit ha v_a -val jelölünk, akkor értékét a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$v_a = \frac{\dot{U}_k}{W} \quad [\text{US dollár/kWh}] \quad (8)$$

ahol:

- \dot{U}_k - az üzemeltetési költségek összege, [dollár];
- W - az adott üzemeltetési időszak alatt termelt energia, kWh.

Végül említésre méltó még a villamos erőművek gazdasági mutatói (jellemzői) közül az ún. *egyidejűségi tényező*, ami arra ad választ, hogy az erőművet milyen gazdaságosan használják fel a fogyasztók. Ha ezt e_t -vel jelöljük, akkor értékét a következő képlettel számolhatjuk ki:

$$e_t = \frac{P_{\max}}{\sum_i^n P_{\max}^i} = 0,25 \text{ és } 0,6 \text{ között}, \quad (9)$$

ahol:

- P_{\max} - az erőmű maximális teljesítménye egy adott időszakban;
- P_{\max}^i - a fogyasztók egyenkénti maximális teljesítményigénye ugyanabban az időszakban.

Ahhoz, hogy e tényezőnek a számszerű értéke a fenti határok között maradjon, az szükséges, hogy a különböző fogyasztók ne ugyanabban az időben (ne egyszerre) igényeljék a maximális fogyasztást. Ugyanis az összes P_{\max}^i összege nem haladhatja meg a P_{\max} értéket az adott időszakban, s ilyenkor e_t értéke egyenlő 1-gyel, ami rossz kihasználást jelent. Ugyanakkor minél kisebb ez az érték 1-nél, az erőmű kihasználása annál gazdaságosabb.

9. A villamos energia szállítása

A villamos erőművekben termelt váltóáram U feszültsége általában 6000 V vagy 10.000 V szokott lenni. Ezzel a feszültséggel nem lehet nagyobb távolságra szállítani tekintélyes veszteség nélkül. Ezt a veszteséget nagymértékben csökkenteni lehet a feszültség megnövelésével. Ezzel is magyarázható, hogy a villamos erőművekhez mindig hozzátartozik egy kisebb-nagyobb transzformátortelep is. Az említett áramveszteség, illetve teljesítményveszteség magyarázatára szolgáljanak az alábbi képletek. A villamos teljesítmény:

$$P = U \cdot I; \quad (10)$$

ahol - I - a villamos áram erőssége [amper]

viszont ismeretes, hogy a feszültségesés az ellenálláson:

$$\Delta U = R \cdot I, \quad (11)$$

s ha ezt behelyettesítjük a (10) képletbe, akkor azt kapjuk, hogy a teljesítményveszteség:

$$P_v = \Delta U \cdot I = R \cdot I^2 \quad (12)$$

a veszteséget wattban adja meg. A szállításra használt áramvezeték ellenállása (R) viszont megadható a következő képlettel:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (13)$$

ahol:

- L - a vezeték hossza, m;
- ρ - a vezeték fajlagos ellenállása, ohm·m (Ω m);
- S - a vezeték keresztmetszete, m².

Ezek után

$$P_v = I^2 \cdot \rho \frac{L}{S}. \quad (14)$$

Amennyiben R állandó, a feszültség (U) értékét pedig a 10-szeresére növeljük, akkor az (1) képlet alapján az I értéke a tízszeresére csökken. Vagyis ebben az esetben

$$P_v = \left(\frac{I}{10}\right)^2 \cdot R = \frac{I^2 \cdot R}{100}. \quad (15)$$

Ebből következik, hogy amennyiben a feszültség értékét a 10-szeresére növeljük, ugyanakkor a teljesítményveszteség (p_v) a 100-ad részére csökken stb.

Az (5) képlet alapján könnyen megérthetjük, hogy az áramvezeték méreteinek változtatásával az áramveszteség lényegesen nem csökkenthető, hiszen a hosszát meghatározza a szállítás távolsága. Ugyanez mondható el a fajlagos ellenállásról is, csupán a vezeték keresztmetszetének a növelésével lehetne némileg csökkenteni a veszteséget. Viszont ezáltal nagyon megnövekszik a fémfogyasztás és a vezeték súlya, ami végül is lehetetlen helyzetet teremtené a villamos áram szállítási vonalainak (hálózatának) megépítésénél.

A villamos áram szállítása történhet légi és föld alatti vezetékekben. Általában a 110 000 V-nál nagyobb feszültségű áram szállítása mindig légi elhelyezésű vezetékekben történik, míg az ennél kisebb feszültségek esetén föld alatti vezetékeket is használnak. Nedves időben a légi vezetékeken az áramveszteség mindig nagyobb.

A legjobb minőségű légi vezetékeket rézből készítik, de mivel a rézkészletek rohamosan fogynak, és nagyon drágán lehet hozzájutni, jelenleg csaknem mindig acélbelsővel megerősített alumínium vezetékeket használnak, amelyeknek elfogadható vezetőképességük mellett igen jó a szakítószilárdságuk is, ami a légi vezetékek esetében elsőrendű követelmény. Talán még ezeknél is jobbak az *aldrey* (öldri) ötvözetekből készült vezetékek, mivel sűrűségük kicsi (2,7 g/cm³), szakítószilárdságuk 2-szer nagyobb az alumíniuménál, míg vezetőképességük csupán 12 %-kal kisebb, mint az alumíniumé, és végül lényegesen olcsóbbak. Ezt az ötvözetet kb. 99 % alumíniumból, valamint 0,5 % szilíciumból és 0,5 % magnéziumból nyerik.

A légi áramszállító vezetékeket 20-62 m magas fém vagy vasbeton oszlopokra rögzítik különleges porcelánszigetelés felhasználásával. Az oszlopok közötti távolság a vezeték szakítószilárdságától függően általában 250-300 m szokott lenni.

A váltóáram légi vezetékekben való szállításánál a veszteség kb. 5-10 %-os. A felhasználás helyén vagy annak közelében az odaszállított nagyfeszültségű villamos áramot át kell alakítani alacsony feszültségűvé, ami rendszerint 220 V-os, vagy 380 V-os. Erre szolgálnak a hálózati transzformátorállomások.

A használt kifejezések magyar - román szótára

vízerőmű = hidrocentrala;

nyomásfokozat = treapta de presiune;

villamos vízerőmű = centrala hidroelectrică;
 esési magasság = înălțime de cădere;
 turbinalapát = paleta de turbină;
 turbinaház = carcasa turbinei;
 sugárirány = direcție radială;
 elterelő csatorna = canal de deviere;
 kényszervezeték = conducta forțată;
 gépház = hala de mașini;
 gyűjtő = lac de acumulare;
 gyűjtőgát = baraj de acumulare;
 tápvezeték = conductă de alimentare;
 terelőgát = baraj de deviere;
 vízcsöves gőzkazán = cazan cu țevi de apă;
 egyezményes tüzelőanyag = combustibil convențional;
 fűtőérték = putere calorică;
 láng - ill. forralócsöves gőzkazán = cazan cu țevi de fum;

égési gázok = gaze de ardere;
 hőtartalom = conținut caloric;
 túlhevítő = calorizator;
 dugattyús szivattyú = pompa cu piston;
 kémény = coș de fum;
 túlhevített vízgőz = abur supraîncălzit;
 atomreaktor = reactor nuclear;
 szélmotor = motor eolian;
 szélenergia = centrala eoliană;
 terhelési diagram = diagrama de sarcini;
 környezetvédelem = protecția mediului;
 kiegyenlítési tényező = indice de aplatizare;
 környezetszennyezés = poluarea mediului;
 egyidejűségi tényező = factor de simultaneitate;
 melegházhatás = efect de seră;
 ozonpajzs = strat protector de ozon.

Irodalomjegyzék:

- 1] Handrea, I.: Sistemul energetic de la centrale electrice la consumator, Ed. Albatros, București, 1980.;
- 2] Varga, J., Polinszky, K.: Kémiai technológia, I/1 és I/2., Tankönyvkiadó, Budapest, 1961.;
- 3] Vodnár, J. et. al.: Technologia și merceologia produselor industriale, Poligrafia Univ. Babeș-Bolyai, Cluj-Napoca, 1993-1994.;
- 4] Vodnár, J.: Általános kémiai technológia, I., Erdélyi Tankönyvtanács, Kolozsvár, 1999.;
- 5] Environmental Research and Development, A Report of the Carnegie Commission on Science, Technology and Government, USA, 1992.;
- 6] Hannus, I., Halász, J., Fejes, P.: Kémiai technológia, JATE Kiadó, Szeged, 1990.;
- 7] Kőrös, L., Technika (Műszaki Szemle), XXXIX. év, 11-12 sz., Budapest, 1996.,

Villamos kapcsolókészülékek és vezérlőberendezések

Dr. Szabó Loránd, adjunktus

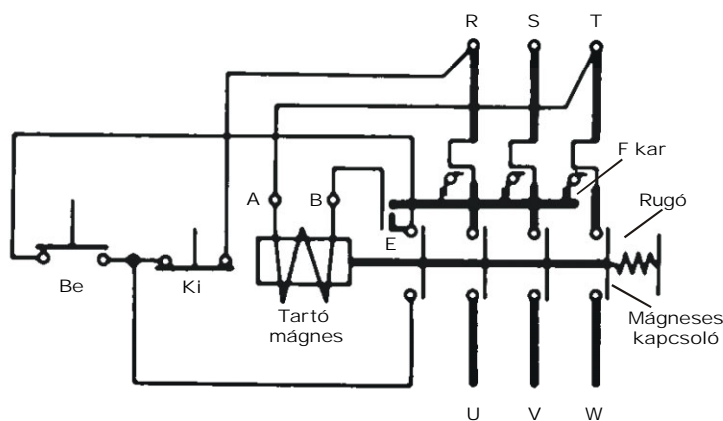
Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar

1. Villamos kapcsolókészülékek

A villamos kapcsolókészülékek egy vagy több áramkör nyitására, zárására, vezérlésére vagy védelmére szolgálnak. Ezek nagyfeszültségű (névleges feszültségük meghaladja az 1000 V-ot) vagy kisfeszültségű készülékek lehetnek. A kisfeszültségű hálózatokban különböző feladatokra az alábbi kapcsolókészülékeket használják a leggyakrabban: relék, mágneskapcsolók, olvadóbiztosítók, hőkioldók és kézi kapcsolók.

A *relék* olyan kapcsolókészülékek, amelyek valamely villamos mennyiség (áram, feszültség, teljesítmény, frekvencia stb.) változása következtében érintkezőik segítségével villamos áramköröket kapcsolnak. A relék két legfontosabb jellemzője a megfigyelt villamos mennyiséghez tartozó *megszólalási érték*, illetve a *késleltetés* (az az idő, amely a relé működését kiváltó ok fellépése és a relé működése között eltelik). Működésüket tekintve a relék lehetnek záró - vagy nyitórelék. A zárórelék működésükkor a segédáramkört zárják, míg a nyitórelék nyitják.

A *mágneskapcsolók* a leggyakrabban használatos kapcsolókészülékek közé tartoznak. Ezek feladatuk a fogyasztókészülékek ki- és bekapcsolása, valamint túlterhelés elleni védelme. A feszültség kimaradása esetén a fogyasztókészülékeket lekapcsolják a villamos hálózatról. A mágneskapcsolók jellemző kapcsolási rajzát az 1. ábrán láthatjuk.



1. ábra. Mágneskapcsoló kapcsolási rajza

Ha megnyomjuk a "Be" gombot, a tartómágnes tekercse gerjesztést kap, behúz és zárja a főérintkezőket és a tartó mellékérintkezőket is. Ekkor a háromfázisú táplálás (*R, S, T*) a hőkioldó érintkezőin és a főérintkezőkön keresztül a terhelésre (*U, V, W*) jut. Túlterhelés esetén az ikerfém hőkioldó az *F* kar segítségével megnyitja a behúzó mágnes áramkörét és a mágneskapcsoló megnyitja a főáramkört.

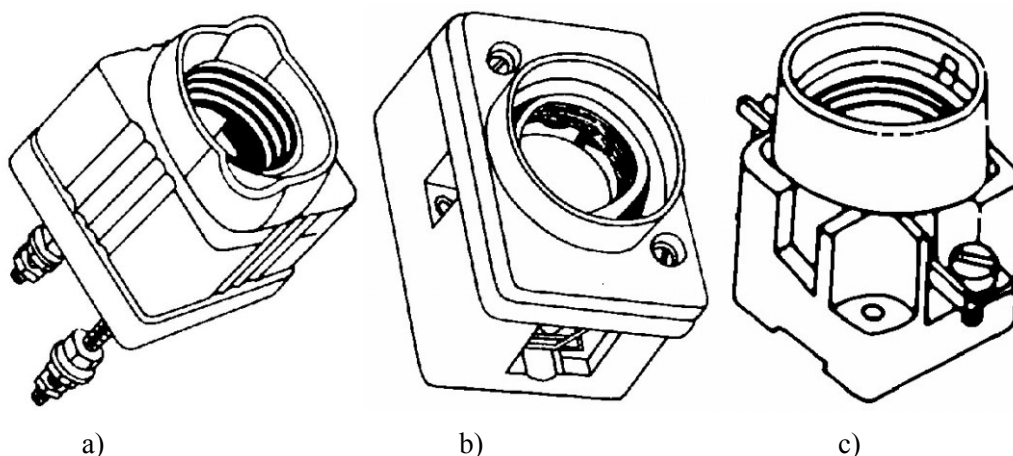
Számottevő feszültségcsökkenés vagy feszültség-kimaradás esetén a mágneskapcsoló azonnal nyit, mivel a mágnes nem kap elegendő gerjesztést és a rugó az érintkezőket széthúzza.

A "Ki" gombbal lehet a mágneskapcsolót kikapcsolni. Ekkor a behúzó mágnese áramkörre megszakad és a rugó az érintkezőket szétnyitja.

Az *olvadóbiztosító* olyan kapcsolókészülék, amely ha a rajta átfolyó áramerősség túllépi a meghatározott értéket, akkor egy vagy több elemének kiolvadásával bontja az áramkört és megszakítja az áramot. Az olvadóbiztosítók jellemző adatai közül említést érdemel a határ-áram (a legnagyobb áramerősség, amelyenél a biztosító még nem olvad ki) és a névleges áram (az az áram, amelyre, mint állandó terhelésre a biztosítót méretezték).

A kiolvadási idő függvényében a biztosítók lehetnek lomhák vagy gyorsolvadásúak.

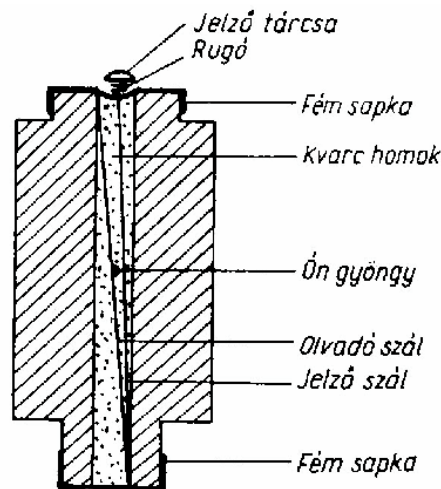
A legelterjedtebbek a „D-rendszerű” *biztosítóaljzatok*. Áramhozzávezetés szempontjából az aljzat lehet hátsó vagy mellső csatlakozású, illetve beépíthető (lásd a 2. ábrát).



2. ábra. „D-rendszerű” biztosítóaljzatok:
a) hátsó csatlakozású, b) mellső csatlakozású, c) beépíthető

A „D-rendszerű” biztosítóaljzatokhoz a 3. ábrán látható olvadóbetétet használják. Ívöltőközegük az olvadóbetétben levő tiszta kvarchomok. Működéskor a keletkező olvadékcsoportban diffundálnak az elolvadt olvadószál fémgőzei és az a megdermedés után elzárja az áram útját. Az olvadóbetétek szabványosított névleges áramerősségekre készülnek. A kiolvadást mutató jelzőtárcsa színe jelzi a névleges áramerősséget.

Az ipartelepi hálózatoknál leggyakrabban a nagyteljesítményű fogantyús biztosítókat használják. Az aljzaton kettős U alakú rugós érintkezők vannak, amelyek közé az olvadóbetét műanyag fogantyú segítségével helyezhető el. E rendszer előnye, hogy az olvadóbetét kiemelésével szakaszolásra is alkalmas. Ugyanilyen rendszerben készülnek az igen gyorsan kioldódó betétek, amelyeket főleg a teljesítményelektronikában használnak.



3. ábra. D-rendszerű olvadóbetét

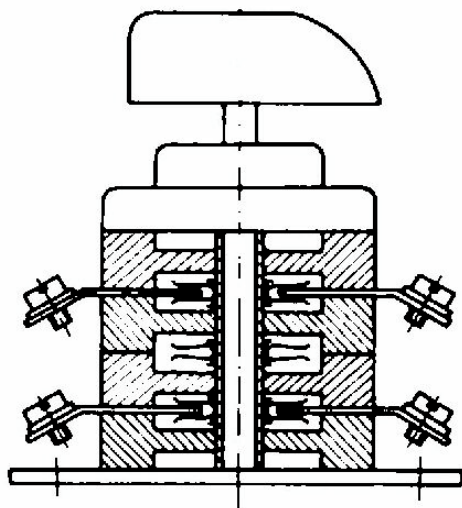
A *hőkioldók* a villamos áram hőhatására működnek és a túláramvédelmet szolgálják. Legelterjedtebbek az ikerfém hőkioldók. Az ikerfém két különböző hőtágulású fém összehengerlésével készül. Működési elve az, hogy az ikerfém-szalag meleg hatására elhajlik, és mechanikai kioldást tud elvégezni, vagy érintkezőket tud működtetni.

A *kézi kapcsolók* közül a gyakorlatban az ipartelepi berendezéseken és a vezérlőszekrényeken leginkább a kamrás kapcsolók és a görgős kapcsolók terjedtek el.

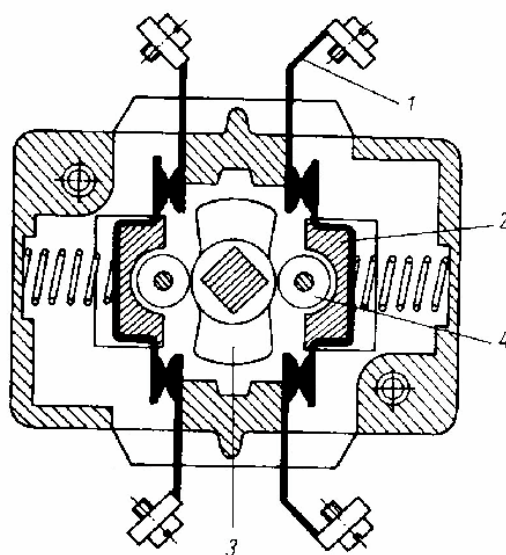
A *kamrás kapcsoló* (lásd a 4. ábrát) házát egymáshoz szorított peremes szigetelőtárcsák képezik, amelyek zárt kapcsolókamrákat alkotnak. Ezekbe a kamrákba nyúlnak bele az álló érintkező kései, amelyek külső végei egyúttal csatlakozókapcsokként szolgálnak. A villamos összeköttetéseket a végigmenő tengelyre szigetelten felfűzött érintkezőhidak végzik.

Ezzel a típusú kapcsolóval nagyon sokféle kapcsolási kombináció valósítható meg a kamrák számának és az érintkező hidaknak a megfelelő kiválasztásával.

A *görgős kapcsoló* szerkezete az 5. ábrán látható. A csatlakozókapcsokkal összefüggő álló érintkezőpár (1) között a mozgó híd (2) érintkezői zárják az áramkört. A hidat rugók tartják bekapcsolva. Kikapcsoláskor a szögletes tengelyre illeszkedő bütykös tárcsa (3) a görgők (4) közvetítésével eltolja a hidat és ezzel egyidejűleg két ponton szakítja meg az áramkört. Az ábra a kapcsoló egy kamrájának metszetét ábrázolja. Egy kamrába két áramkör építhető be. Egy más fölé több kamra helyezhető. A bütykös tárcsa és a kapcsolóállások száma a kívánt működésnek megfelelően választható ki.



4. ábra. Kamrás kapcsoló



5. ábra. Görgős kapcsoló

A nyomógombokat általában a villamos berendezések indítására vagy megállítására használják. Egy vagy több érintkezőpárt tartalmazhatnak. *Nyitó érintkezőnek* nevezzük azt, amelyik nyugalmi állapotban zárt, és a gomb benyomásakor nyit. A *záró érintkezők* a gomb megnyomásakor zárják az áramkört. A nyomógomb különböző típusú érintkezőt szükség szerint iktathatjuk be az áramkörbe. A 6. ábra egy olyan kétsarkú nyomógombot ábrázol, amelynek egy nyitó és egy záró érintkezője van.

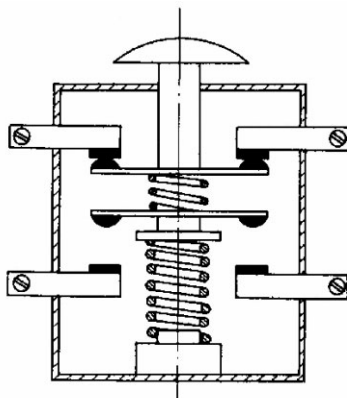
2. Kapcsolókészülékek felhasználása vezérlésekben

A kisfeszültségű kapcsolókészülékek fontos szerepet töltenek be a villamos gépek és egyéb készülékek üzemében. Ezekkel a kapcsolókészülékkel és a hozzájuk tartozó néhány szerkezettel hajthatjuk végre a különböző vezérlési műveleteket (be- és kikapcsolás, fékezés, for-

gásirány-váltás, sebességváltás, stb.). Ezekkel a műveletekkel tulajdonképpen a műszaki folyamatok előírt feltételeit biztosíthatjuk, illetve annak különböző jellemzőit befolyásolhatjuk.

A vezérlések lehetnek egyszerűek vagy önműködőek.

A vezérlőberendezések fő elemei az érzékelőelemek és a végrehajtóelemek. Az *érzékelő elemek* a vezérlőberendezést befolyásoló hatásokat villamos jelekké alakítják át (védőelemek, forgásérzékelők, végállás-kapcsolók, stb.). A *végrehajtó elemek* beavatkoznak a vezérelni kívánt folyamatba (mágneskapcsolók, mágneses tengelykapcsolók, fékmágnesek, mágneses működtetésű szelepek, segédmotorok stb.).



6. ábra. Kétsarkú nyomógomb

Az olyan megoldást, amelynél valamely működés csak adott feltételek teljesülése esetében lehetséges, *reteszelésnek* nevezzük. A reteszeléseknek még a helytelen emberi kezelés esetében is meg kell akadályozniuk a baleseteket vagy a berendezés tönkremenetelét.

A vezérlőberendezésekben gyakori feladat a *késleltetés* (egy kapott jelet csak megszabott idő elteltével kövesse valamely működtetés). Az ilyen feladatokat általában időrelével oldjuk meg.

A villamos berendezések elvi működését és felépítését a *kapcsolási rajz* rögzíti. Mivel nem lehet valamennyi követelményt (tervezés, szerelés, hibakeresés, a működés megértése stb.) egyetlen rajzrendszerrel kielégíteni, ezért a gyakorlatban a szükségleteknek megfelelően kétféle kapcsolási rajzrendszert használnak.

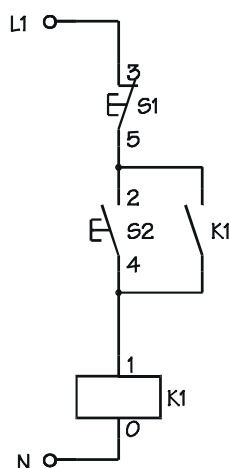
A *készülékes kapcsolási rajzrendszer* a villamos készülék kapcsoló és egyéb áramköri elemeit (érintkezők, tekercsek stb.) készülékenként csoportosítva sematizálja. Ezeknél a készülékek lehetőleg a valóságos elrendezésnek megfelelően vannak csoportosítva. Az áramköri elemeket a villamos vezetékeket jelképező vonalak kötik össze. Bonyolultabb berendezések esetében az ilyen kapcsolási rajzok gyakran áttekinthetetlenek, ezért ezeket csak egyszerűbb esetekben (gépek kapcsolási rajza, mágneskapcsoló kapcsolási vázlata stb.) használják.

Az *áramutas ábrázolási rajzrendszerek* esetében a hangsúly nem a készülékek, hanem az áramkörök ábrázolásán van. Egy-egy áramkör áramútját általában egyenes vonal ábrázolja, amelybe a tényleges összeköttetés sorrendjében vannak beiktatva a villamos készülékek érintkezői, tekercsei és egyéb áramköri elemei, függetlenül attól, hogy ezek az elemek melyik készülékben vannak elhelyezve. Ekképp az áramkörök rajza nagymértékben leegyszerűsödik és áttekinthetőbbé válik, annak ellenére, hogy a különböző villamos készülékek ábrázolása elveszti szemléletességét. Egy-egy villamos készülék összes elemeit azonos betűjelzéssel kell ellátni, hogy

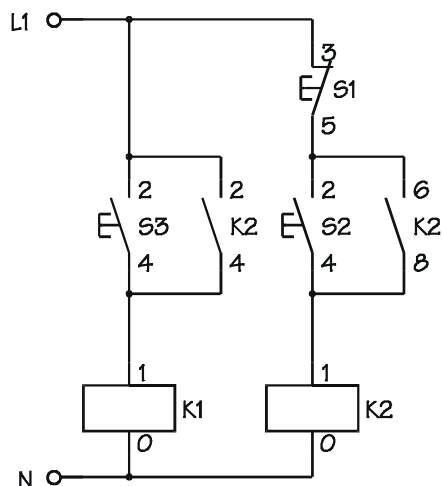
összetartozásuk könnyen megállapítható legyen. Mivel a készülékek térbeli elhelyezkedése nem tűnik ki az áramutas rajzokból, szükséges mellékelni egy *elrendezési rajzot* is.

3. Példák egyszerű vezérlési feladatok megoldására

Egy motor vagy villamos készülék tartós *ki- és bekapcsolására* a 7. ábrán látható kapcsolást használjuk. A *K1* kapcsoló működteti a vezérlendő villamos gépet vagy készüléket. A bekapcsoló gomb (*S2*) megnyomásakor záródik a *K1* kapcsoló áramköre és ennek záró érintkezője áthidalja az *S2* gombot. Ez azt jelenti, hogy az *S2* elengedése ellenére is a *K1* áramköre zárva marad mindaddig, míg ezt az *S1* kikapcsoló gomb segítségével meg nem szakítjuk.



7. ábra. Villamos készülék be- és kikapcsoló áramköre



8. ábra. Villamos készülék ún. háromgombos működtető áramköre

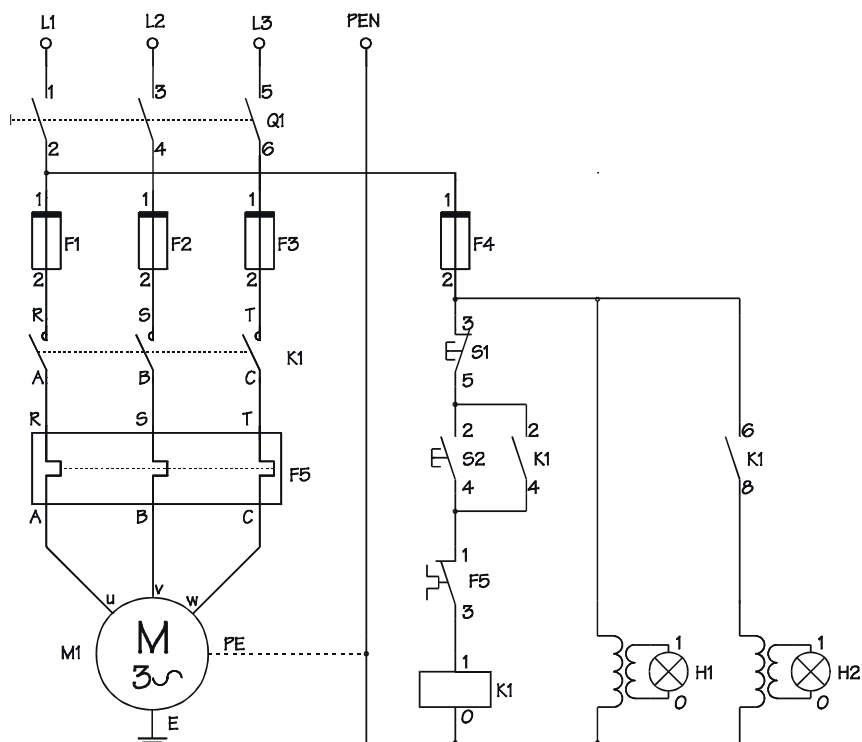
Ha azt kívánjuk, hogy egy villamos gépet vagy készüléket tartós ki- és bekapcsolás mellett pillanatokra is be tudjuk kapcsolni, akkor a 8. ábrán látható kapcsolást, az ún. *háromgombos működtetést* kell megvalósítani. A *K1* kapcsoló mellett egy segédrelét (*K2*) is használunk kell. Ebben az esetben a bekapcsoló gomb (*S2*) gomb a segédrelé áramkörét zárja. Ennek záró

érintkezője zárja a *K1* kapcsoló áramkörét. A pillanatnyi bekapcsolásra szolgáló gomb (*S3*) megnyomásakor is zárul a *K1* kapcsoló áramköre. Ez az áramkör azonban ebben az esetben csak addig marad zárva, amíg az *S3* gomb benyomott állapotban van. Ha a gombot elengedjük, a *K1* kapcsoló azonnal kikapcsol.

A 9. ábrán egy *aszinkron gép* teljes (védelemmel és jelző áramkörökkel is ellátott) *vezérlő áramkörét* mutatjuk be. A vezérlés teljesítmény-áramkörét a *Q1* kézi kapcsoló, az *F1*, *F2* és *F3* olvadóbiztosító, a *K1* kapcsoló záró érintkezői, az *F5* hőkioldó és maga az *M1* aszinkron motor alkotja. A motor zárlati védelmét az *F1*, *F2* és *F3* olvadóbiztosító, túláramvédelmét pedig az *F5* hőkioldó biztosítja. A *Q1* kézi kapcsoló az egész berendezés főkapcsolója.

Az ábra jobb oldalán látható a motor vezérlésének áramutas vázlata. A vezérlő feszültséget a főáramkör egyik fázisvezetőjéről vesszük le. A vezérlőáramkör védelmét egy külön (*F4*) olvadóbiztosító valósítja meg. A motor ki- és bekapcsolását a klasszikus, a 7. ábrán is bemutatott, áramkör módosított változatával valósítjuk meg. Ebben az esetben a villamos gépet működtető *K1* kapcsoló áramkörébe még az *F5* hőkioldó záró érintkezőjét is beiktatjuk. Amennyiben a vezérlendő motor túlterhelése következtében a hőkioldó kikapcsol, pótlólagos biztosításként ennek nyitó érintkezője megszakítja a *K1* kapcsoló vezérlő áramkörét is.

A vezérlőkapcsolás jelző-áramkörében két transzformátoros jelzőlámpa van. Az első (*H1*) mindaddig világít, amíg a *Q1* kézi kapcsoló be van kapcsolva és mutatja a hálózati feszültség meglétét. A másik jelzőlámpa (*H2*) a *K1* kapcsoló bekapcsolásakor gyúl ki, jelezvén a motor működését.

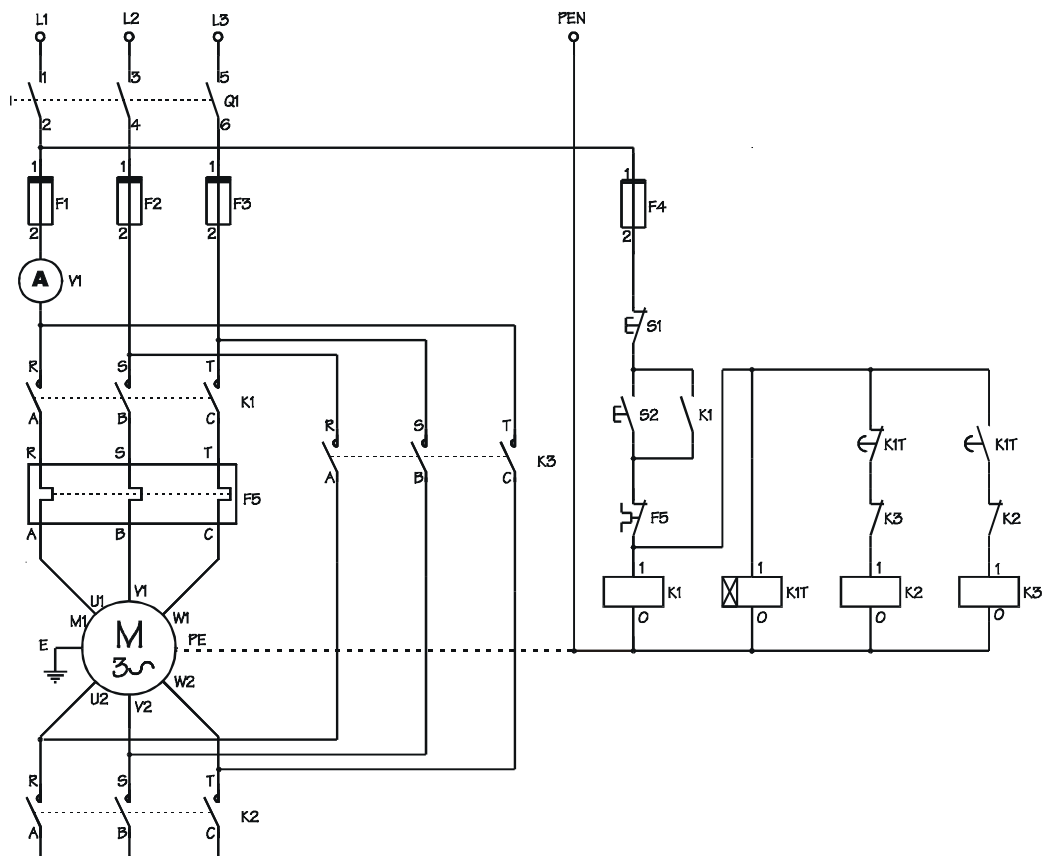


9. ábra. Aszinkron gép vezérlő áramköre

A villamos gépek vezérlése esetében az egyik leggyakrabban megoldandó feladat az *aszinkron motor csillag-háromszög indítása*. Csillagkapcsolásban a gép három fázisának végei hármas csomópontba, kezdetei pedig a hálózatra vannak kötve. A háromszög-kapcsolás esetében

a fázistekercsek vége mindig a következő fázistekercs elejéhez van kötve. Ekkor a tekercsek három közös pontját kötik a hálózatra. Ebben a kapcsolásban nincs nullavezető. A csillag-háromszög indítást relatív kisteljesítményű ($3 \div 100$ kW), háromszög-kapcsolású kalickás aszinkron gépek esetében alkalmazzák. Az indítási módszer lényege abban áll, hogy a motort csillagkapcsolásban indítjuk el, majd amikor a fordulatszáma eléri a szinkronfordulatszám $90 \div 95$ százalékát, átkapcsoljuk a normális háromszög-kapcsolásba. Ezáltal az indítási vonali áram háromszorosára csökken, ami nagymértékben kíméli a gép tekercselését is. Az átkapcsolást célszerű automatikusan megejteni. A kapcsolás lehet áramtól függő (amikor a vezérlés működése egy áramrelé alkalmazásán alapszik), vagy időtől függő (amikor egy időrelé használunk).

Az aszinkron motor időtől függő csillag-háromszög indítására szolgáló vezérlő áramkör áramutas vázlatát a 10. ábrán láthatjuk.

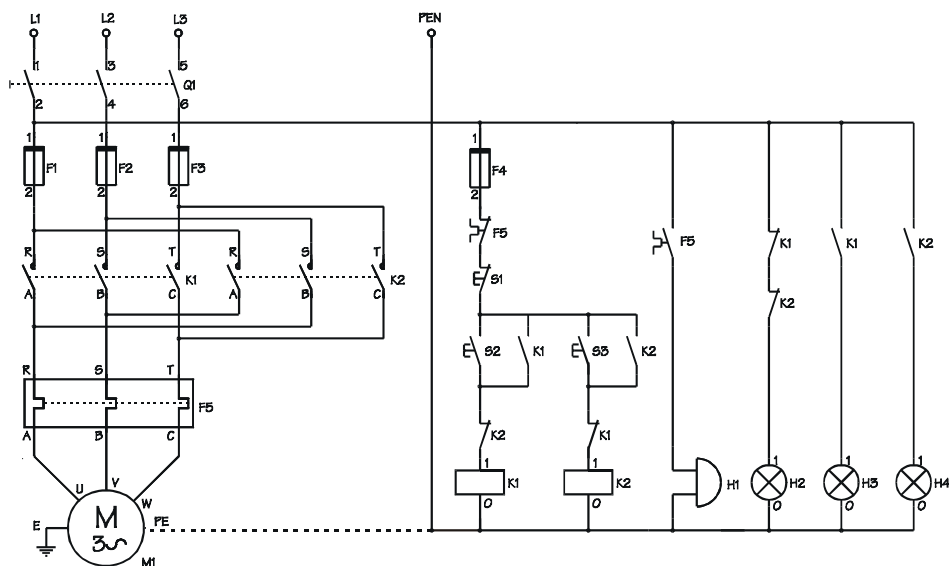


10. ábra. Aszinkron motor időtől függő csillag-háromszög indítására szolgáló áramkör

A 9. ábrán bemutatotthoz képest a teljesítmény-áramkör kiegészül két kapcsolóval: a $K2$ valósítja meg a csillagkapcsolást, míg a $K3$ a háromszög-kapcsolásra szolgál. Természetesen egyszerre csak egyikük lehet bekapcsolva. Az áramkörben megtalálható még egy ampermérő is, amivel ellenőrizhető a felvett vonali áram mértéke.

A motor vezérlésének áramutas vázlatából nyomon követhetjük az áramkör működését. A motor indítása és megállítása (gyakorlatilag a $K1$ kapcsoló vezérlése) az előbbieken leírt kapcsolás segítségével történik. A $K1$ kapcsoló bekapcsolásával egyszerre a $K1T$ időrelé

áramköre is bezárul. Ennek késleltetve meghúzó érintkezői vannak. A relé késleltetési idejét gyakorlatilag úgy kell beállítani, hogy körülbelül a szinkronfordulatszám $90 \div 95$ százalékának elérésekor történjen a motor átkapcsolása. A késleltetési idő lejárásaig a $K2$ kapcsoló van behúzva, amelyik a csillagkapcsolását valósítja meg a motornak. A késleltetési idő lejáta után az időrelé késleltetve meghúzó nyitó érintkezője megnyit (a $K2$ kapcsoló elenged) és késleltetve meghúzó záró érintkezője bezár. Ekkor a $K3$ kapcsoló behúz, a motor háromszög-kapcsolású lesz, és ebben az állapotban is marad megállításaig. A $K2$ és $K3$ kapcsoló reteszelését egy-egy nyitó érintkezőjük végzi. Egyikük sem kapcsolhat be mindaddig, míg a másik el nem enged.

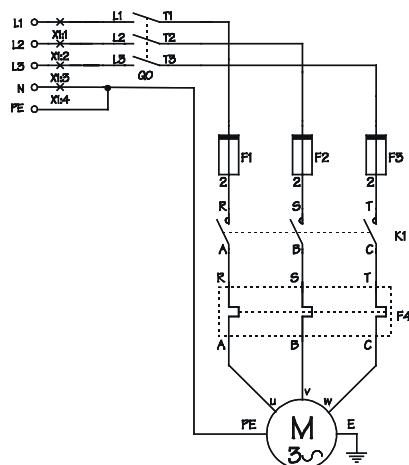


11. ábra. Háromfázisú motorok forgásirány változtató áramköre

A háromfázisú motorok forgásirány változtatása két fázis felcserélésével valósítható meg. Gyakorlatilag, amint az a 11. ábrából is kitűnik, ezt két kapcsolóval ($K1$ és $K2$) és két nyomógombbal ($S2$ és $S3$) oldhatjuk meg. A két kapcsolóba a fázisokat felcserélt sorrendbe kötjük be. A két kapcsoló kapható összeépítve is, mint irányváltó kapcsoló. A $K1$ kapcsoló az előre-forgást, a $K2$ pedig a hátraforgást kapcsolja. A két kapcsoló egyidejűleg nem kapcsolható, mert rövidzárat jelentene. Ezt egy reteszeléssel akadályozzák meg. Ha az $S2$ gombot nyomjuk meg, a $K2$ kapcsoló húz be, áthidalja az $S2$ nyomógombot és megnyitja a másik kapcsoló áramkörében levő nyíló érintkezőt. Hasonló történik a másik kapcsoló behúzásakor. A kiegészítő jelző-áramkörök négy jelzőberendezést tartalmaznak. A $H1$ jelzőkürt akkor szólal meg, amikor a hőkioldó a vezérelt motor túlterhelése következtében kikapcsol, és záródó érintkezője zárja a kürt áramkörét. A $H2$ jelzőlámpa akkor világít, amikor egyik kapcsoló sincs bekapcsolva, tehát a motor nincs üzemben. Gyakorlatilag ez a jelzőlámpa csak a hálózati feszültség jelenlétét mutatja a motor beindításaig. A másik két jelzőlámpa ($H3$ és $H4$) akkor világít, amikor valamelyik kapcsoló be van húzva. Ekképp ezek a motor forgásirányát jelzik.

4. Egy egyszerű vezérlési áramkör méretezése

A következőkben egy egyszerű vezérlési áramkör (a 12. ábrán látható aszinkron motort vezérlő áramkör) elemeinek méretezését ismertetjük.



12. ábra Aszinkron motor vezérlő áramköre

A példaként vett vezérlendő aszinkron motor fő adatai a következők:

- Névleges teljesítmény: $P_N=2,2 \text{ kW}$
- Névleges feszültség: $U_N=380 \text{ V}$
- Szinkron fordulatszám $n_0=1500 \text{ ford/perc}$

A kiválasztott motor adatlapjáról további értékeket kell leolvasnunk:

- Teljesítménytényező: $\cos\phi=0,8$
- Hatásfok: $\eta=79$
- Indítási és névleges áram viszonya: $I_p/I_N=6,5$

Ezek alapján kiszámítható a motor névleges árama:

$$I_N = \frac{P_N}{\sqrt{3}U_N \cos\phi} = 5,29 \text{ A} \quad (1)$$

A $Q0$ kézi kapcsolót a névleges áram függvényében kell kiválasztani. A legkisebb háromfázisú kamrás kézi kapcsoló 25 A névleges áramú. Ez megfelelő lesz céljainknak.

Az biztosítók olvadóbetétét úgy kell méretezni, hogy ne égjenek ki a motor indítása alatt felépő áram hatására, de rövidzár esetén védjék a motor tekercselését. Ehhez ki kell számítani a motor csúcserőtelű indítási áramát:

$$I_p = \frac{I_p}{I_N} I_N = 34,4 \text{ A} \quad (2)$$

Az olvadóbetétet az alábbi összefüggés segítségével kell méretezni:

$$I_f \geq \frac{I_p}{k_i} \quad (3)$$

ahol k_i az indítási állandó, amit általános esetben (ritka és könnyű indítások) 2,5-nek kell venni. Tehát az olvadóbetéteket 13,75 A-nél nagyobbra kell méretezni. D-rendszerű, LF25 típusú, mellső csatlakozású biztosítóaljzatokat választunk, amibe 16 A-es olvadóbetéteket fogunk használni (ezek névleges értéke nagyobb a közvetlenül kiszámított értéknél).

A háromfázisú hőkioldó méretezésénél az alábbi összefüggést használjuk:

$$I_r = (1 \div 1,2) I_N \quad (4)$$

az állandó középértékével (1,1) számolva 5,6 A-t kapunk eredményként. A kiválasztott háromfázisú hőkioldó a legkisebb, 10 A névleges értékű lesz, típusa TSA 10. E hőkioldó-család tagjainál a védett áram beállítható 60 és 100% között. Tehát egy olyan típusra van nekünk szükségünk, amelynél az áram 3,6 és 6 között állítható, és amit majd az erre engedélyezett laboratóriumokban 5,6 A-re kell majd beállítani.

A kapcsolót a motor névleges árama függvényében kell kiválasztani. A TCA 6 típusú, 6 A névleges áramú háromfázisú általános használatú kapcsolóra esett a választásunk.

Az áramköri elemek közötti kábelezéshez szükséges szigetelt vezető kiválasztásakor szintén a motor névleges áramát kell figyelembe venni. Vezérlőáramkörökről lévén szó, kizárólag csak olyan réz vezetőket használhatunk, amelyek keresztmetszete legalább $2,5 \text{ mm}^2$. A táblázatokból kitűnik, hogy ezek legnagyobb megengedett terhelése (amennyiben három független kábelt használunk, állandó terhelés alatt zárt térben) 35 A, ami messzemenően meghaladja szükségleteinket. Rugalmas, PVC szigetelésű VLPY 2,5 típusú kábelt fogunk használni.

Ezzel a vezérlő áramkör valamennyi elemét meghatároztuk.

A használt kifejezések román-magyar szótára

Román	Magyar
Ampermetru	Ampermérő
Bimetal	Ikerfém
Bobină	Behúzó tekercs
Buton	Nyomógomb
Circuit principal	Főáramkör
Circuit secundar	Mellékáramkör
Colivie	Kalitka
Comandă	Vezérlés
Comutator cu came	Görgős kézi kapcsoló
Comutator pachet	Kamrás kézi kapcsoló
Contact	Érintkező
Contact de temporizare la acționare	Késleltetve meghúzó érintkező
Contact de temporizare la revenire	Késleltetve elejtő érintkező
Contact limitator de cursă	Helyzetkapcsoló
Contact normal deschis	Záró érintkező
Contact normal închis	Nyitó érintkező
Contacto	Kapcsoló
Curent de linie	Vonali áram
Curentul de limită	Határáram
Factor de putere	Teljesítménytényező
Hupă	Jelzőkürt
Interblocaj	Reteszelés
Înterupător	Megszakító, szakaszoló
Înterupător automat	Mágneskapcsoló
Lampă	Jelzőlámpa
Releu auxiliar	Segédrelé
Releu de curent	Áramrelé
Releu termic	Hőkioldó
Rețea	Hálózat
Schemă de amplasament	Elrendezési rajz
Schemă desfășurată	Áramutas vázlat

Román	Magyar
Schemă funcțională	Készülékes kapcsolási rajz
Schemă electrică	Kapcsolási rajz
Semnalizare	Jelzés
Siguranță	Biztosító
Siguranță fuzibilă	Olvadóbiztosító
Suport de siguranță	Biztosítóaljzat
Suprasarcină	Túláram, túlterhelés
Temporizare	Késleltetés
Tensiune de linie	Vonali feszültség
Valoare de vârf	Csúcsérték
Valoare nominală	Névleges érték
Voltmetru	Voltmérő

A használt kifejezések magyar-román szótára

Magyar	Román
Ampermérő	Ampermetru
Áramrelé	Releu de curent
Áramutas vázlat	Schemă desfășurată
Behúzó tekercs	Bobină
Biztosító	Siguranță
Biztosítóaljzat	Suport de siguranță
Csúcsérték	Valoare de vârf
Elrendezési rajz	Schemă de amplasament
Érintkező	Contact
Főáramkör	Circuit principal
Görgős kézi kapcsoló	Comutator cu came
Hálózat	Rețea
Határáram	Curentul de limită
Helyzetkapcsoló	Contact limitator de cursă
Hőkioldó	Releu termic
Ikerfém	Bimetal
Jelzés	Semnalizare
Jelzőkürt	Hupă
Jelzőlámpa	Lampă
Kalitka	Colivie
Kamrás kézi kapcsoló	Comutator pachet
Kapcsolási rajz	Schemă electrică
Kapcsoló	Contact
Késleltetés	Temporizare
Késleltetve elejtő érintkező	Contact de temporizare la revenire
Késleltetve meghúzó érintkező	Contact de temporizare la acționare
Készülékes kapcsolási rajz	Schemă funcțională
Mágneskapcsoló	Înterupător automat
Megszakító	Înterupător
Mellékáramkör	Circuit secundar
Névleges érték	Valoare nominală

Magyar	Román
Nyitó érintkező	Contact normal închis
Nyomógomb	Buton
Olvadóbiztosító	Siguranță fuzibilă
Reteszelés	Interblocaj
Segédrelé	Releu auxiliar
Szakaszoló	Înterupător
Teljesítménytényező	Factor de putere
Túláram, túlterhelés	Suprasarcină
Vezérlés	Comandă
Voltmérő	Voltmetru
Vonali áram	Curent de linie
Vonali feszültség	Tensiune de linie
Záró érintkező	Contact normal deschis

Irodalomjegyzék

- 1] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Magyar-román műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1981.
- 2] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Román-magyar műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1979.
- 3] Hajach T. - Meluzin H. - Bernáth J.: *Elektrotechnikai számítások*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
- 4] Királyfalvi I.: *Erősáramú elektrotechnika II.*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1983.
- 5] Pietrăreanu E.: *Agenda electricianului*, Editura Tehnică, București, 1979.
- 6] Puskás F. (szerk.): *Elektrotechnikai kislexikon*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1994.

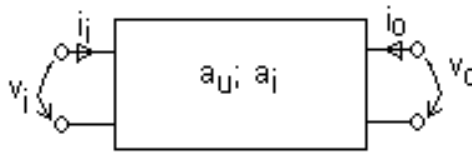
Analóg és Digitális technika

Hegedüs Péter, Jakab Sándor

Gábor Dénes Főiskola Erdélyi Konzultációs Központ

1. Négypólusok

Adott egy fekete doboz melynek a kivezetéseit (pólusait) két kapura osztjuk. Ezeket bemenő illetve kimenő kapuknak nevezzük (1. ábra).



1. ábra

Egy ilyen négypólust ismertnek tekintünk, ha ismerjük a következő paramétereit:

a.) Bemenő impedancia. (a bemenetre egy ismert feszültségforrást kötünk és kiszámítjuk a bemenő áramot, úgy, hogy a kimenetet üresben hagyjuk)

$$Z_i = \frac{v_i}{i_i} \Big|_{\text{végtelen terhelő ellenállással}}$$

b.) Kimenő impedancia (a kimenetre egy ismert feszültségforrást kötünk és kiszámítjuk a kimenő áramot, úgy hogy a bemenetet rövidre zárjuk)

$$Z_o = \frac{v_o}{i_o} \Big|_{\text{rövidre zárt bemenettel}}$$

c.) Erősítés.

- Feszültségerősítés

$$a_u = \frac{v_o}{v_i} \qquad a_u[dB] = 20 \log \frac{v_o}{v_i}$$

- Áramerősítés

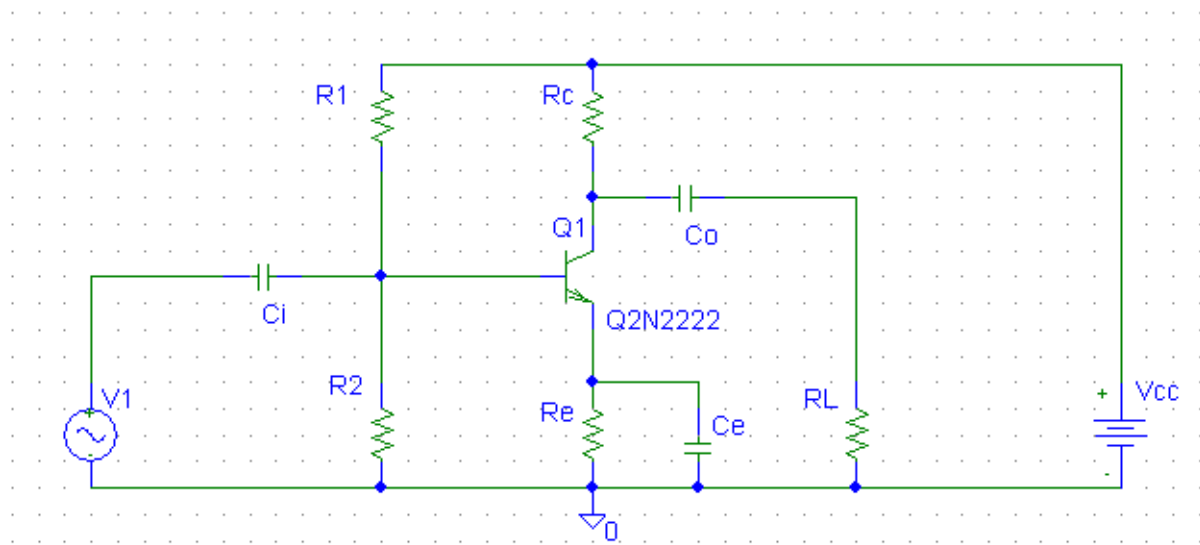
$$a_i = \frac{i_o}{i_i} \qquad a_i[dB] = 20 \log \frac{i_o}{i_i}$$

- Teljesítményerősítés (ez következik az előbbi két erősítésből)

$$a_p = \frac{v_o i_o}{v_i i_i} = \frac{P_o}{P_i} \quad a_p[dB] = 10 \log \frac{P_o}{P_i}$$

2. Tranzisztoros alapkapsolások

Egy tranzisztoros erősítő kiszámolását a földelt emitterű alapkapsoláson keresztül vizsgáljuk. A kapsolást a 2. ábrán láthatjuk.



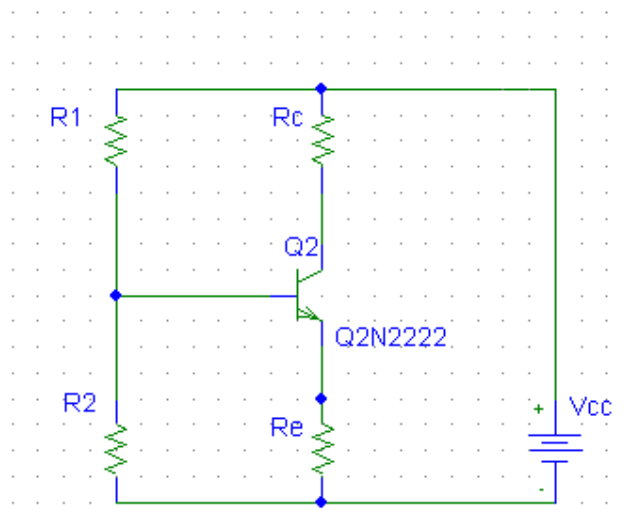
2. ábra

Egy tranzisztoros kapcsolás kiszámítását két lépésben végezzük el:

2.a.) Egyenáramú számítás

Az egyenáramú számításhoz felrajzoljuk az egyenáramú kapcsolást, ami azt jelenti, hogy az összes kondenzátort végtelen ellenállásnak tekintjük és a váltóáramú jelforrásokat passzivizáljuk.

Az egyenáramú kapcsolás a következő képpen néz ki:



3. ábra

Kiszámítjuk a tranzisztor munkapontját (V_{cc} , I_c) - ebből meghatározzuk hogy a tranzisztor milyen működési állapotban (aktív, vezető, zárt) van.

Az ábrán láthatjuk, hogy a tranzisztor egyenáramú polarizációját a bázisában levő feszültségosztó biztosítja. A számítások leegyszerűsítéséhez feltételezzük, hogy az osztó terheletlen, vagyis $I_B=0$.

Innen következik:

$$U_B = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Tudva, azt hogy a Bázis-Emitter (BE) átmenet úgy viselkedik mint egy nyitó irányban polarizált dióda $\Rightarrow V_{BE}=0.6$ V. Tehát:

$$V_E = V_B - 0.6 = V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 0.6$$

Ohm törvényéből következik:

$$I_E = \frac{V_E}{R_E}$$

Figyelembe véve Kirchhoff első törvényét a tranzisztorra

$$I_E = I_C + I_B \quad \text{és} \quad I_E \approx 0 \quad I_E \approx I_C$$

vagyis

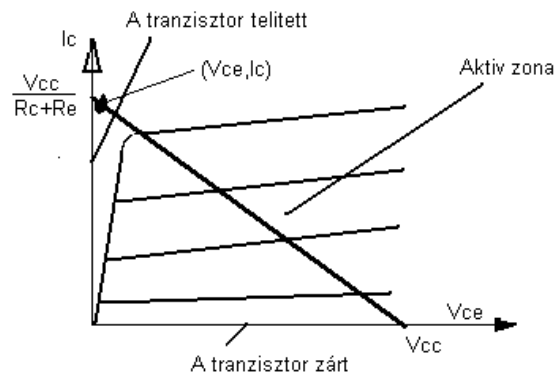
$$I_C \approx I_E = \frac{V_B - 0.6}{R_E} = \frac{V_{cc} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - 0.6}{R_E}$$

A munkapont másik elemét V_{CE} Kirchhoff második törvényéből számítjuk ki:

$$V_{CC} = (R_E + R_C)I_C + V_{CE} \text{ (munkaegyenés egyenlete)} \Rightarrow V_{CE} = V_{CC} - (R_C + R_E)I_C$$

Ha a munkaegyenest ábrázoljuk a tranzisztor kijövő karakterisztikáján akkor a munkapont helyzete szerint megkülönböztetjük a következő eseteket:

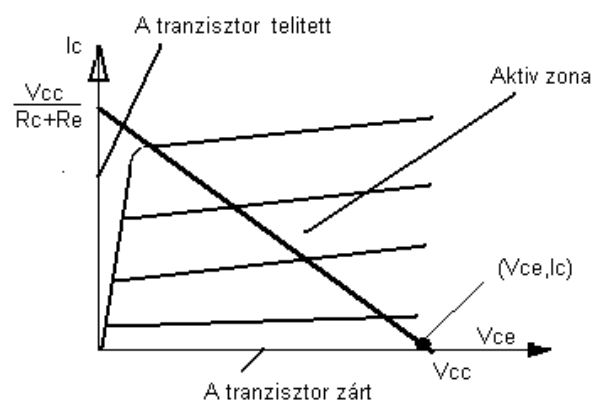
2.a.1. A tranzisztor telített



4. ábra

Ebben az esetben a tranzisztoron maximális áram folyik, amelyet az R_C és R_E határoz meg. A tranzisztor bázisán a vezérlés hatástalan marad. (kis amplitúdójú jelek esetén)

2.a.2. A tranzisztor zárt

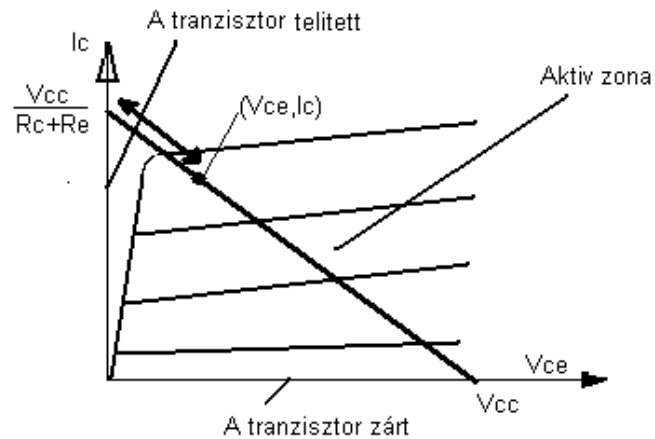


5. ábra

Ebben az esetben a tranzisztoron nem folyik áram, mert az R_1 és R_2 feszültségosztó nem biztosítja a tranzisztor bázisának a nyitó feszültséget. A tranzisztor bázisán a vezérlés hatástalan marad (kis amplitúdójú jelek esetén).

2.a.3. A tranzisztor erősít (a munkapont az aktív zónában helyezkedik el)

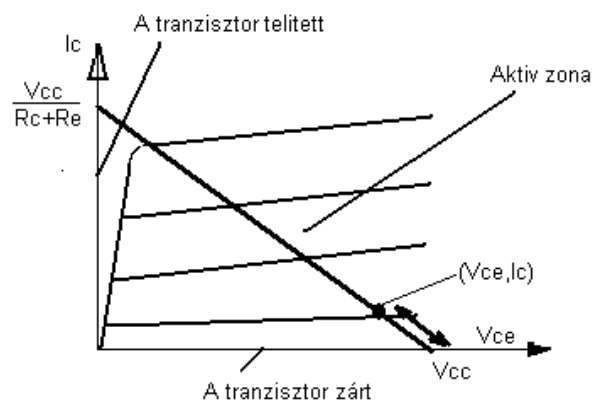
2.a.3.1. A tranzisztor közel van a telítettséghez



6. ábra

A munkapont az aktív zónában helyezkedik el, vagyis a kapcsolás, mint erősítő működik. Ellenben a munkapont közel van a telítettségi részhez, ezért a tranzisztor csak kis amplitúdójú jelekkel vezérelhető meg. Nagy vezérlőjelek esetén a tranzisztor egy bizonyos amplitúdó felett telített állapotba megy át, ami a kimenőjel torzítását okozza.

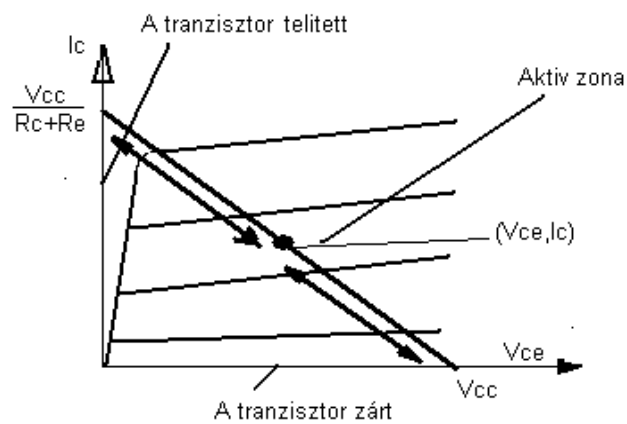
2.a.3.2. A tranzisztor közel van a záróértékhez



7. ábra

A munkapont az aktív zónában helyezkedik el, vagyis a kapcsolás mint erősítő működik. Ellenben a munkapont közel van a zárt részhez, ezért a tranzisztor csak kis amplitúdójú jelekkel vezérelhető meg.

2.a.3.3. A tranzisztor erősítés szempontjából optimálisan van polarizálva.

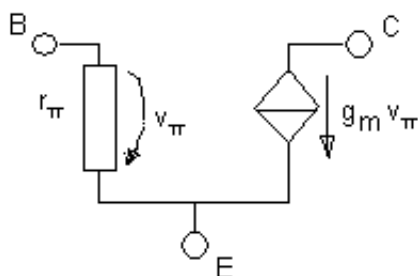


8. ábra

A munkapont az aktív zóna közepén helyezkedik el, így a tranzisztor kivezérelhetősége maximális, így kaphatunk legnagyobb amplitúdójú kiejövő jelet torzítás nélkül.

2.b.) Váltóáramú számítás

A váltóáramú számításokhoz a tranzisztor egyszerűsített π hibrid modelljét használjuk, mely a következő képpen néz ki:



9. ábra

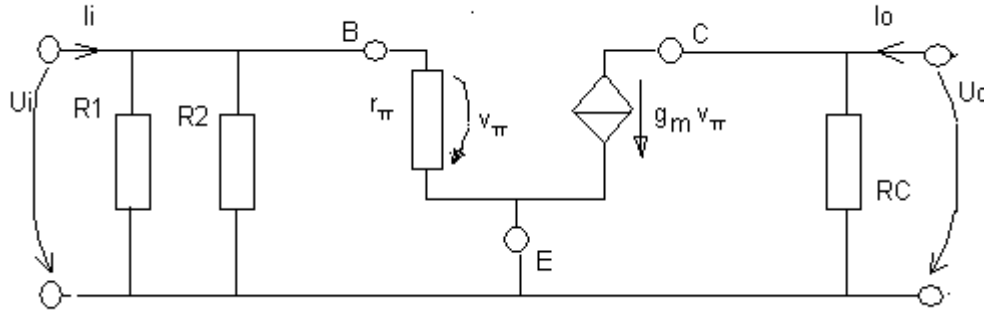
$$g_m = 40I_c [mS]$$

$$\beta = g_m r_\pi$$

ahol: $\beta = I_c / I_B$

I_C a munkapontnál kiszámolt kollektor áram, β a statikus áramerősítés (adatlap adat - tranzisztor típustól függő), g_m a tranzisztor transzkonduktanciája (meredeksége), r_π a tranzisztor dinamikus bemenő ellenállása.

A **IIhibrid** modell alkalmazásánál felrajzoljuk a váltakozó áramú kapcsolását az erősítőnek (a kondenzátorokat rövidzárlatnak tekintjük, az egyenáramú tápforrásokat passzivizáljuk).



10. ábra

A feszültség erősítés kiszámolása

$$v_\pi = u_i$$

$$i_c = g_m v_\pi = g_m u_i$$

$$u_o = -i_c R_C = -g_m R_C u_i$$

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -g_m R_C$$

A bemenő impedancia (ellenállás) kiszámítása

$$i_i = i_{R1} + i_{R2} + i_{r_\pi}$$

$$i_i = \frac{u_i}{R1} + \frac{u_i}{R2} + \frac{u_i}{r_\pi} = u_i \left(\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{r_\pi} \right)$$

$$R_i = \frac{u_i}{i_i} = R1 \parallel R2 \parallel r_\pi$$

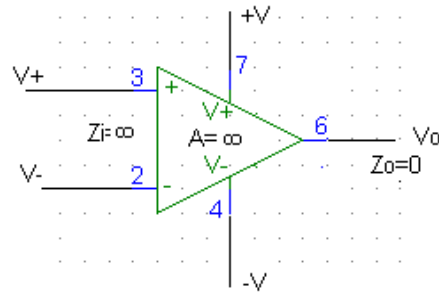
A kijövő impedancia (ellenállás)

Mivel a kijövő impedanciát a bemenetel rövidre zárásával számoljuk ki $g_m v_\pi = 0$ tehát:

$$R_o = \frac{u_o}{i_o} = R_C$$

3. Műveleti erősítők

A műveleti erősítők közel ideális eszközök, amelyeknek a paraméterei könnyen idealizálhatók, így a számítások egyszerűvé válnak.



11. ábra

Ahol	V^+	nem invertáló bemenet
	V^-	invertáló bemenet
	V_0	kimenet
	$+V$	pozitív tápfeszültség
	$-V$	negatív tápfeszültség

Egy ideális műveleti erősítő jellemzői:

- végtelen feszültség erősítés (a valóságban nagyobb, mint 20.000)
- végtelen bemenő ellenállás (a valóságban nagyobb, mint 10 M Ω)
- zérus kimenő ellenállás (a valóságban kisebb, mint 10 Ω)
- végtelen frekvencia átvitel (ez a feltevés nagyon eltér a valóságtól - egy normál műveleti erősítő 0dB erősítésnél 1MHz átvitelt biztosít).

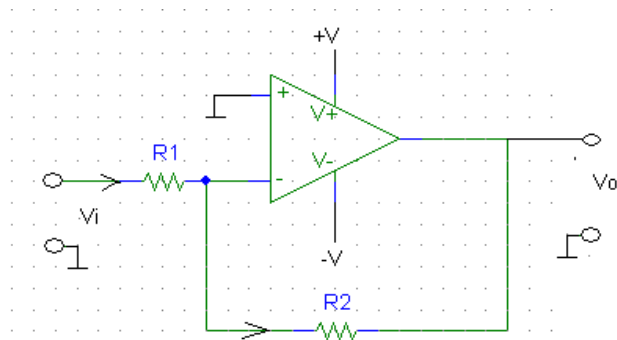
A műveleti erősítő alapképlete: $v_0 = a(v^+ - v^-)$

A műveleti erősítőket általában visszacsatolt áramkörökben használják. Ez azt jelenti, hogy a kimenő feszültség egy bizonyos része valamilyen módon visszajut a bemenetre, tehát képes azt befolyásolni.

A fenti képletből, figyelembe véve, hogy $a \rightarrow \infty \Rightarrow v^+ = v^-$

Alapkapcsolások műveleti erősítővel

3.a.) Invertáló erősítő



12. ábra

Figyelembe véve, hogy $v^+ = v^-$ és $v^+ = 0V \Rightarrow I_{R1} = U_i / R1$ és $I_{R2} = -U_o / R2$

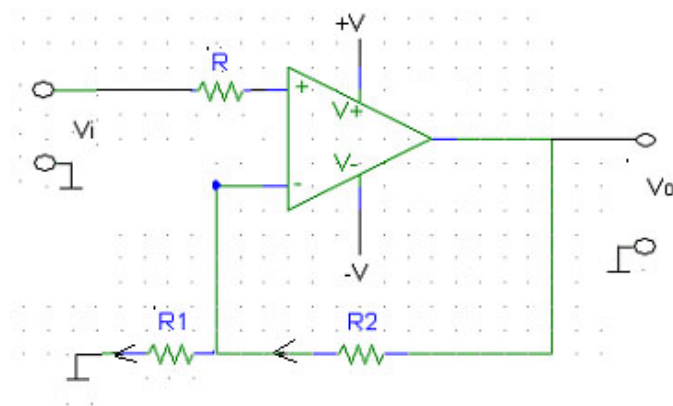
Mivel a műveleti erősítő bemenő impedanciája végtelen Kirchhoff első törvényéből következik:

$$\frac{U_i}{R1} = -\frac{U_o}{R2}$$

$$I_{R1} = I_{R2} \Rightarrow A = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{R2}{R1}$$

A bemeneti impedanciát az R1 ellenállás adja, míg a kimeneti impedancia az zéró.

3.b.) Nem invertáló erősítő

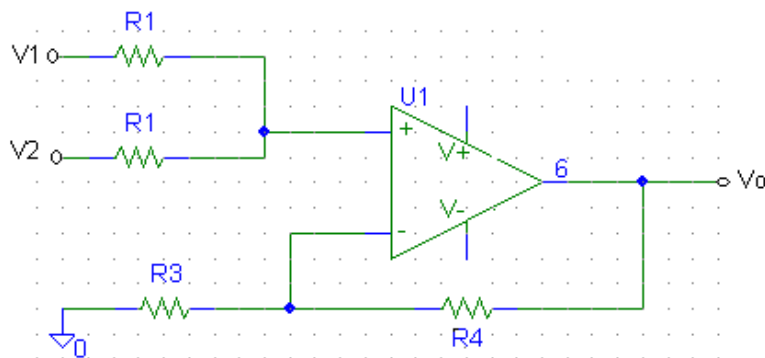


13. ábra

$$\left. \begin{aligned} V_i &= V^+ = V^- \\ I_{R1} &= \frac{V^+}{R1} = \frac{V_i}{R1} \\ I_{R2} &= \frac{V_o - V^+}{R2} = \frac{V_o - V_i}{R2} \\ I_{R1} &= I_{R2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow A = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R2}{R1}$$

Az áramkör bemenő és kimenő impedanciáját a műveleti erősítő adja.

3.c.) Összeadó áramkör

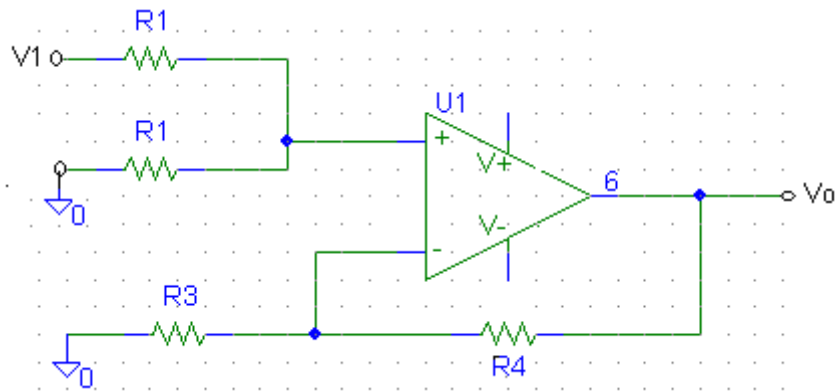


14. ábra

Ezt az áramkört a hatásfüggetlenség elvével számítjuk ki. Vagyis minden tápforrás külön-külön kifejti hatását és az eredmény a hatások algebrai összege (ezt a módszert csak lineáris áramkörök esetén lehet használni).

1. lépés. Kiszámítjuk V1 hatását úgy, hogy V2-t passzivizáljuk.

Az áramkör:



15. ábra

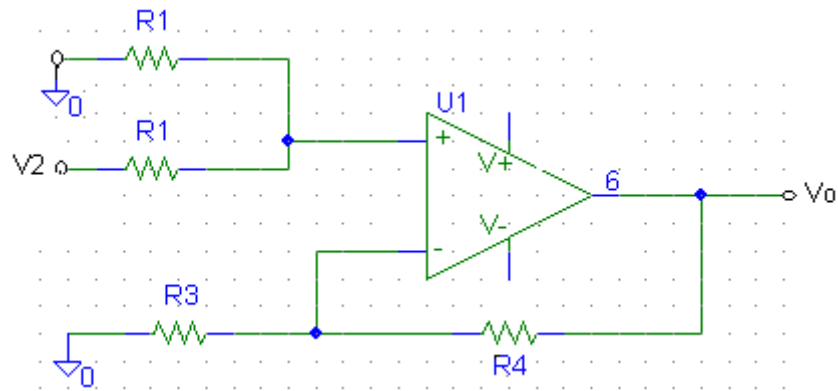
$$V^+ = \frac{1}{2} V_1$$

felismerve, hogy a kapcsolás nem invertáló erősítő

$$V_{o1} = V_1 \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R4}{R3} \right)$$

2. lépés. Kiszámítjuk V2 hatását úgy, hogy V1-t passzivizáljuk.

Az áramkör a következő képpen néz ki:



16. ábra

$$V^+ = \frac{1}{2} V_1 \quad \text{felismerve, hogy a kapcsolás nem invertáló erősítő}$$

$$V_{02} = V_2 \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R4}{R3}\right)$$

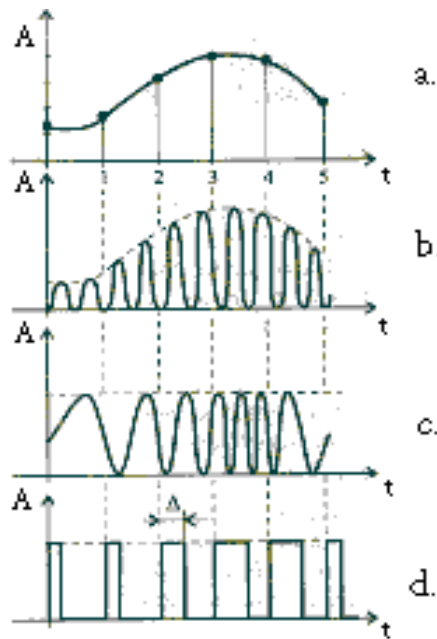
$$\text{Tehát: } V_0 = V_{01} + V_{02} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{R4}{R3}\right) (V_1 + V_2)$$

4. Digitális rendszerek

4.1. Analóg és digitális jelek

Analóg jelek: A fizikai jelenségek alakulásának leírásának alkalmazott matematikai modellt úgy válasszuk meg, hogy a bevezetett változók értékváltozásai folyamatosan követik a fizikai történéseket, azokkal mindig „analóg” módon viselkednek. Az ilyen módon jellemzett rendszereket analóg rendszereknek nevezzük.

A következő ábrán felsorolunk néhány analóg jelet:



17. ábra

Az a. ábra az időben arányosan változó amplitúdójú jelet ábrázolja.

A b. ábra modulált amplitúdójú jelet ábrázol.

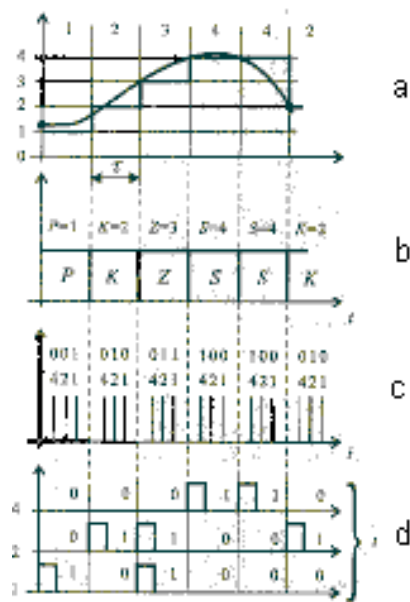
A c. ábra modulált frekvenciájú jelet ábrázol.

A d. ábra modulált impulzus szélességű jelet ábrázol.

Mind a négy esetben a fizikai jellemző változása egy paraméter arányos változását vonta maga után (amplitúdó, frekvencia, idő).

Digitális jelek. A leírandó fizikai mennyiséget bizonyos időpontokban (mintavételi időpontokban) megvizsgáljuk és pillanatnyi, tapasztalt értéket számjegyek, értékek halmazára képezük le, valamilyen előzetes megállapodásban rögzített összerendelés alapján. Ezt az összerendelést kódolásnak nevezzük.

A következő ábrán felsorolunk néhány digitális jelet:



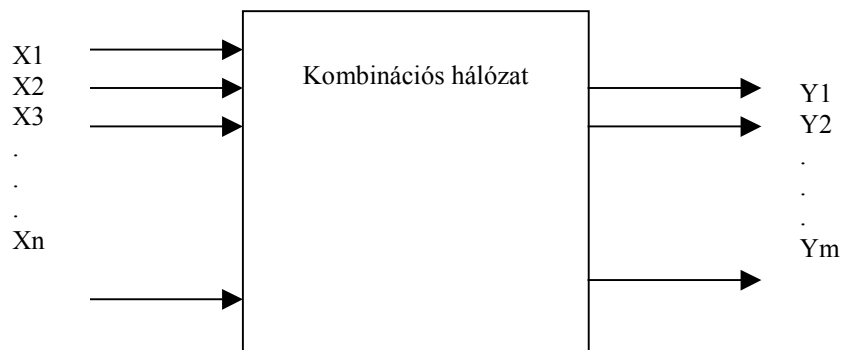
18. ábra

- a. Kvantált lépcsőzés négy diszkrét amplitúdó állapottal
- b. Szín kód (Piros=1, Kék=2, Zöld=3, Sárga=4)
- c. Soros bináris kód
- d. Párhuzamos bináris kód

4.2. Digitális áramkörök (hálózatok)

4.2.1. Kombinációs hálózatok

Kombinációs hálózatoknak nevezzük az olyan logikai függvényekkel jellemezhető áramköröket, melyek kimenetelén vagy kimenetelein jelentkező logikai értéket a bemenetekre adott érték kombinációk egyértelműen meghatározzák.



19. ábra

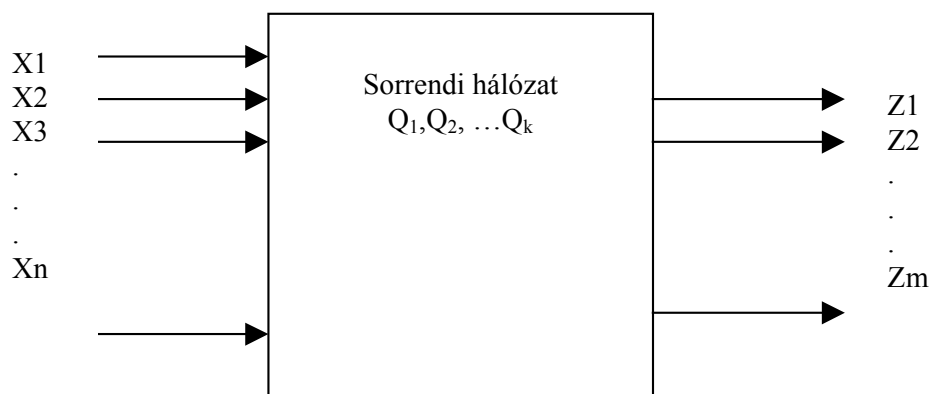
A kimeneti függvényrendszer:

$$\left. \begin{array}{l} Y_1 = F_1(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n,) \\ Y_2 = F_2(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n,) \\ \dots \\ Y_m = F_m(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n,) \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{Y} = \mathbf{F}_k(\mathbf{X})$$

4.2.2. Sorrendi hálózatok

Sorrendi hálózatnak nevezzük az olyan logikai áramköröket, melyek kimenetén vagy kimenetein jelentkező logikai értékek kétféle feltételtől függenek:

- a bemenetekre adott logikai érték kombinációktól,
- a hálózat korábbi működésére jellemző (emlékező) belső állapotok, melyeket az úgynevezett “szekundér” változók (Q_i) képviselnek.



20. ábra

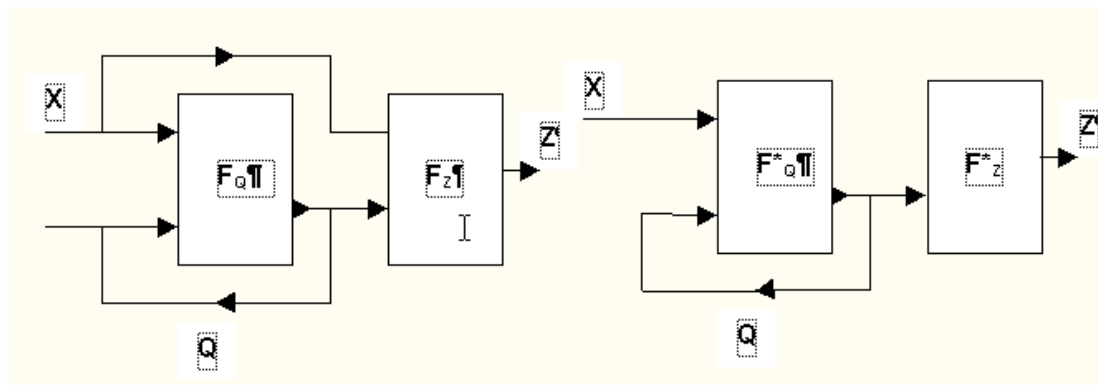
A belső állapotokat leíró egyenletek

$$\left. \begin{array}{l} Q'_1 = F_{Q1}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \\ Q'_2 = F_{Q2}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \\ \dots \\ Q'_k = F_{Qk}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{Q}' = \mathbf{F}_Q(\mathbf{X}, \mathbf{Q})$$

A kimeneti függvényrendszer

$$\left. \begin{array}{l} Z_1 = F_{Z1}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \\ Z_2 = F_{Z2}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \\ \dots \\ Z_m = F_{Zm}(X_1, X_2, \dots, X_n, Q_1, Q_2, \dots, Q_k,) \end{array} \right\} \Rightarrow \mathbf{Z} = \mathbf{F}_Z(\mathbf{X}, \mathbf{Q})$$

A függvények transzformációja során eljutunk a MEALY és MORE struktúrákhoz, amelyeknek a tömbvázlatát az alábbiakban mutatjuk be:



21. ábra

Irodalomjegyzék:

- 1] U. Tietze-Ch. Schenk: Analóg és digitális áramkörök, Műszaki Könyvkiadó, Bp., 1973.
- 2] Dr. Szittya Ottó: Digitális és Analóg technika informatikusoknak. LSI Oktatóközpont 1999.
- 3] Herpy - Benke: Aktív RC szűrők. Műszaki Könyvkiadó, 1981.
- 4] *** - Texas TTL receptek, Műszaki Könyvkiadó 1976.

Villamos gépek működésének alapjai

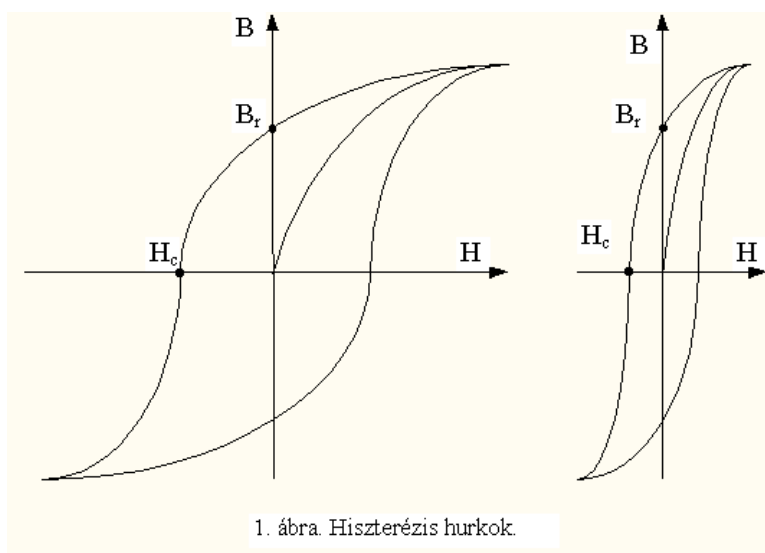
Dr. Bíró Károly, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos gépek tanszék

A villamos gépek energia-átalakítók. Az átalakítás közege a mágneses tér. Ennek oka, hogy az egységnyi térfogatban felhalmozható mágneses energia 10^4 -szer nagyobb a villamos energiánál. De ismertek olyan átalakítók is, amelyekben az átalakítás közege a villamos tér.

1. Mágneses alapfogalmak

A mágneses tér létrehozása állandó mágnessel vagy gerjesztőárammal lehetséges. A mágneses teret az általa létrehozott hatásokból lehet felismerni. Ezek a hatások lehetnek: erőhatások, feszültségindukáló hatások és más, a villamos gépekben legtöbbször nem hasznosítható hatások.



A mágneses teret zárt erővonalakkal ábrázolják. Az erővonalak meghatározzák a mágneses tér irányát. A mágneses tér jellemzői, amelyek jellemzik a tér hatásait, a **B** mágneses indukció, és **H** mágneses térerősség. A két jellemző közti összefüggést grafikusan, a **B** indukciót a **H** térerősség függvényében, a **mágnesezési görbe** adja. A mágnesezési görbe kezdetben meredeken emelkedik, tehát a B/H arány nagy. A görbe nagyobb térerősségnél veszít meredekségéből, míg végül majdnem eléri a nem mágneses anyagokra jellemző hajlásszöget. Ferromágneses anyagok esetében, ha a mágneses tér értékét a legnagyobb pozitív értékig, majd a negatív legnagyobb értékig, majd vissza változtatjuk, vagyis az anyagot teljesen átmágnesezzük, teljes szimmetrikus hurkot, az úgynevezett **hiszterézis hurkot** kapjuk.

A hiszterézis hurok metszéspontja a **B** tengellyel a **remanens indukció B_r** , a **H** tengellyel a **H_c koercitív erő**. A hiszterézis hurok alakja szerint a ferromágneses anyagokat két csoportba oszthatjuk. Széles hurok nagy koercitív erő értékkel a kemény ferromágneses anyagok jellemzője. Ebből készülnek az állandó mágnesek. Keskeny hurok kis koercitív erő értékkel a lágy ferromágneses anyagok jellemzője. A hiszterézis hurok miatt a mágneses fluxus és az őt ger-

jesztő áram időbeni változása különböző. Ha az egyik időben szinuszosan változik, a másik nem. A két mennyiség egymáshoz képest fázisban is különbözik. Éspedig az áram a fluxushoz képest időben siet γ_H szöggel. A γ_H *hiszterézis szög* nagyságát a hiszterézis hurok szélessége határozza meg. Lágy ferromágneses anyagok estében ez néhány fok.

Nagy pozitív vagy negatív térerősség esetén a ferromágneses anyagok telítődnek.

A permeabilitást a

$$\mu = \frac{B}{H} = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (1)$$

összefüggés határozza meg, ahol μ_0 [Hm^{-1}] a vákuum permeabilitása, μ_r a relatív permeabilitás, értéke a B indukcióval változik. Telítés esetében megközelíti a nem ferromágneses anyagoknak megfelelő $\mu_r = 1$ értéket.

A mágneses tér különböző pontjain általában különböző nagyságú és irányú mágneses indukciót találunk. A mágneses tér ábrázolásakor az indukcióelosztás érzékeltetése az erővonalak sűrűségével történik.

Homogén mágneses térben az indukció iránya és nagysága állandó. Csak homogén mágneses tér összefüggéseit lehet egyszerű képletekkel kiszámítani. A gyakorlatban ezért a nem homogén mágneses tereket helyettesítjük becslt vagy közelítő számításokkal meghatározott homogén terekkel.

Valamely felületen áthaladó mágneses indukció a **mágneses fluxus**. Homogén mágneses tér esetében a

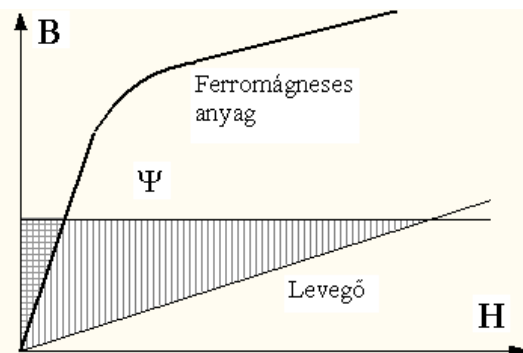
$$\phi = B \cdot A \quad [Vs] \quad [Wb] \quad (2)$$

képlettel számítható. A homogén mágneses szakasz U_m **mágneses feszültsége** a térerősség H [Am^{-1}] és a homogén mágneses szakasz l [m] hosszának szorzata:

$$U_m = H \cdot l = \frac{l}{\mu} B = \frac{l}{\mu \cdot A} \phi = R_m \cdot \phi \quad [A] \quad (3)$$

ahol R_m a mágneses ellenállás vagy **reluktancia**.

A mágneses kör teljes mágneses feszültsége a kör homogén szakaszai mágneses feszültségeinek összege. A **gerjesztés törvénye** szerint a sorba kötött szakaszok mágneses feszültségeinek összege egyenlő a gerjesztéssel.



2. ábra. A mágneses energia.

$$\Theta = \sum U_i \quad (4)$$

A villamos gépekben minél kisebb gerjesztéssel létesített, minél nagyobb indukciójú mágneses terekre van szükség. E célból a mágneses fluxust lehetőleg vasban vezetik, a levegőben a

mágneses tér hosszát minél rövidebbre szabják és a legkisebb mértékre csökkentik az erővonalak szétszóródását.

A mágneses tér létrehozásához energiára van szükség, illetve, ha a mágneses tér megszűnik, energia szabadul fel.

A mágneses energia

$$W_m = \frac{1}{2} \int_0^\Psi i \cdot d\Psi \quad (5)$$

képlettel számítható, ahol Ψ a teljes fluxus. A mágneses energia arányos a 2. ábrán a vízszintesen vonalkázott területtel. Nem mágneses anyag esetében az energia arányos a függőlegesen vonalkázott területtel. Ez számítható az előző összefüggések felhasználásával kapott képlettel is.

$$W_m = \frac{1}{2} \frac{\Theta}{N} \Psi = \frac{1}{2} U_m \cdot \phi = \frac{1}{2} H \cdot l \cdot B \cdot A = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot V \quad (6)$$

ahol : $V = l \cdot A$ a térfogat.

A 2. ábrán a felületek összehasonlításából látható, hogy ferromágneses anyagokban sokkal kisebb energiával lehet mágneses teret létesíteni.

2. Az elektromechanikai energiaátalakítás. Nyomatékképzés

Az energiaátalakítás akkor lehetséges, ha a mágneses tér energiája függ a mechanikai elemek kölcsönös helyzetétől. Erőhatás létrejöttéhez a mágneses tér megzavarása szükséges. A villamos gépekben, ahol a mechanikai energia is megjelenik két egymáshoz képest elmozdulható rész kell legyen, ezek az **állórész** és a **forgórész**. A villamos gép mindkét részén vagy csak az egyik részen vannak tekercsek. Így lehetséges egy oldalról és két oldalról gerjesztett gépekről beszélni.

Általános esetben a villamos gép nyomatékát a

$$C = \left| \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \right|_{i=all.} \quad C = \left| \frac{\partial W_m}{\partial \alpha} \right|_{\Psi=all.} \quad (7)$$

képletekkel számíthatjuk, amelyek a két szélső esetben, a mozgás gyorsaságától függően, adják a pontos értéket.

Ha a fluxusokat áramok hozzák létre, akkor a kéttekercses gép, i_1 , i_2 áramokkal, L_1 , L_2 öninduktivitásokkal és M_{12} kölcsönös induktivitással, nyomatéka:

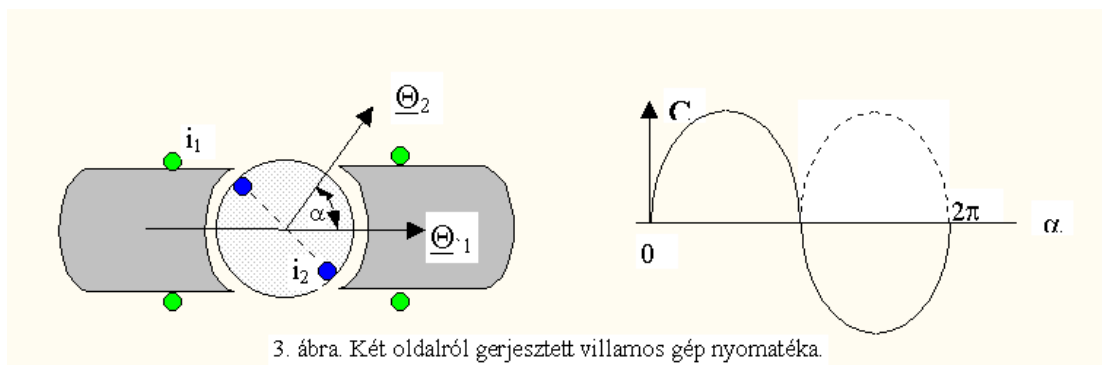
$$C = \frac{1}{2} \cdot i_1^2 \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} + \frac{1}{2} \cdot i_2^2 \cdot \frac{dL_2}{d\alpha} + i_1 \cdot i_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \quad (8)$$

összefüggéssel számítható.

Teljesen hengeres felépítésű gép esetében $L_1 = \text{áll.}$, $L_2 = \text{áll.}$ És így a nyomatékot az áramok szorzatát tartalmazó tag adja. A kölcsönös induktivitások, szinuszos légrésindukció elosztást feltételezve, forgás közben az elfordulási szöggel változnak

$$M_{12} = M_{12m} \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

kifejezés szerint, mert $\alpha = 0$ esetén a kölcsönös induktivitás a legnagyobb, M_{12m}

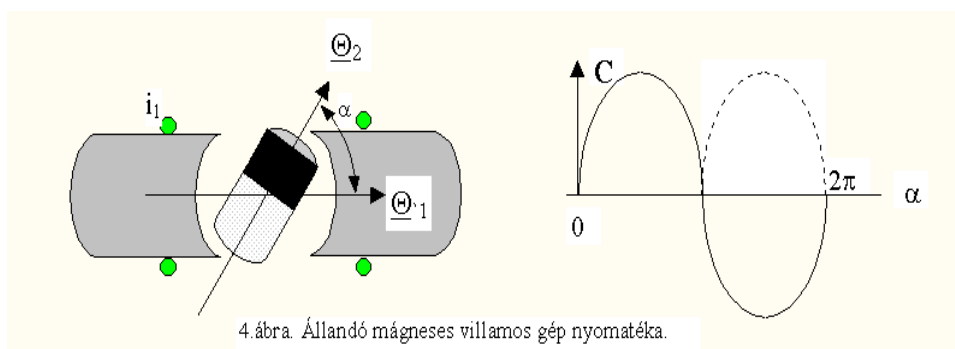


3. ábra. Két oldalról gerjesztett villamos gép nyomatéka.

A nyomaték:

$$C = -i_1 \cdot i_2 \cdot M_{12m} \cdot \sin \alpha \quad (10)$$

Ha az i_1 és i_2 áramokat, mint térvektorokat értelmezzük, akkor a nyomaték vektor a két térvektor vektoriális szorzatával arányos, tehát a forgástengely irányába mutat. Látható, hogy a nyomaték függ a két áramvektor viszonyított helyzetétől, ha ez változik, akkor a nyomaték is változik. Ha feltételezzük, hogy az áramok állandók és a forgórész elfordul az állórészhez képest, akkor a nyomaték szinuszosan változik. A legnagyobb értéket akkor éri el, ha a két térvektor egymásra merőleges. Ha azt akarjuk, hogy legyen állandó nyomaték komponens, akkor az $\alpha = \pi$ szögnél szükséges az egyik áramvektor irányváltása. Ami azt jelenti, hogy az egyik áram váltóáram kell legyen. A váltóáram frekvenciáját a forgórész szögsebessége adja meg.



4. ábra. Állandó mágneses villamos gép nyomatéka.

Tehát, ha $i_1 = I$ egyenáram, akkor $i_2 = I_{2cs} \cdot \sin \omega_2 \cdot t$ és az elfordulási szög

$\alpha = \omega \cdot t + \gamma$, ahol γ a forgórész helyzetét rögzíti az áramok egybeesésének pillanatában és $\omega = \omega_2$; $\sin \gamma \neq 0$.

Az állandó nyomatékkomponens értéke :

$$C = -I_1 \cdot I_{2cs} \cdot M_{12m} \cdot \sin \gamma \quad (11)$$

Ha a forgórész gerjesztését állandó mágnessel helyettesítjük, akkor minden $\alpha = \pi$ szögnél szükséges az állórészvektor irányváltása, tehát az állórészfrekvenciát a forgórész szögsebes-

sége adja meg. Ha a forgórész gerjesztését egyenáram adja, akkor ugyanazt az eredményt kapjuk.

Ha az egyik oldalon, például a forgórész kiálló pólusos, akkor forgás közben az állórésztekercs öninduktivitása nem állandó. Az $\alpha = 0$ helyzetben, amikor a forgórész hossziránya az állórész tengelyébe esik, az öninduktivitás maximális, mert a mágneses kör ellenállása a legkisebb. Az $\alpha = \frac{\pi}{2}$ helyzetben viszont az öninduktivitás a legkisebb, de nem zérus.

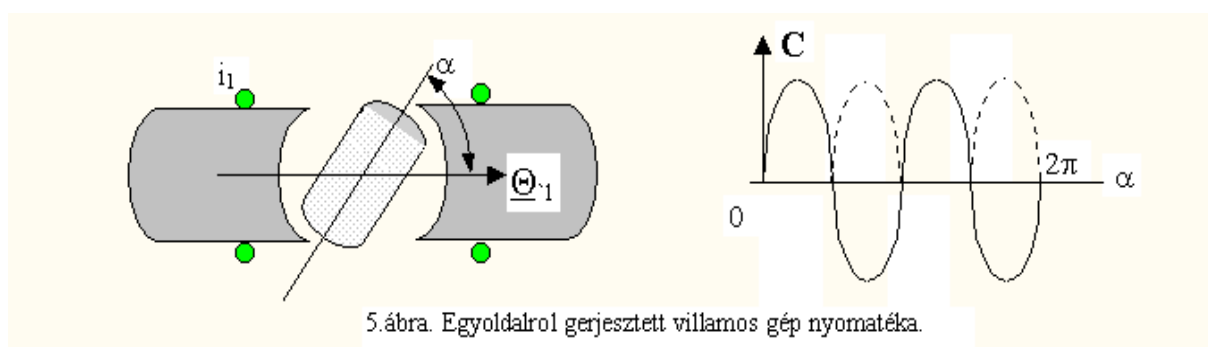
Ha Fourier sorba bontjuk és figyelembe vesszük a sor első két tagját, akkor az állórésztekercs öninduktivitásának kifejezése :

$$L_1(\alpha) = L_0 + \Delta L \cdot \cos(2\alpha) \quad (12)$$

A nyomaték csak egyetlen fordulatszámon $\omega = \omega_1$ van. Értéke :

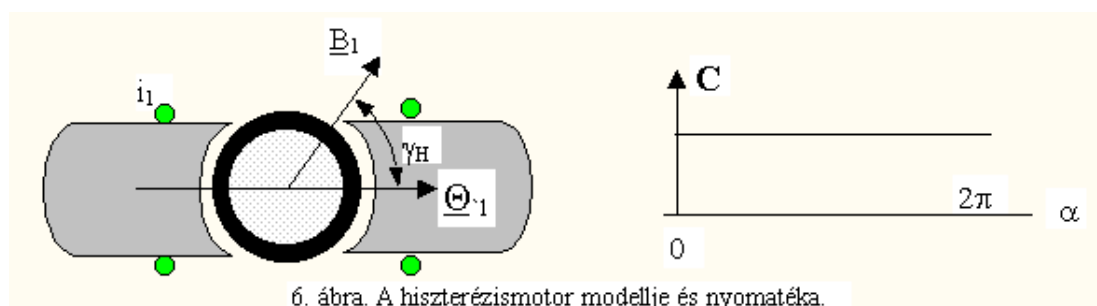
$$C = -\frac{I_1^2 \cdot \Delta L}{4} \sin(2 \cdot \gamma) \quad (13)$$

Ez a **reluktancianyomaték**



Tehát, zérustól eltérő nyomaték középértéket csak akkor kapunk, ha az áramok körfrekvenciái és a villamos szögsebesség közti feltételek teljesítve vannak. Általános esetben ezek a feltételek a **frekvenciafeltételben** egyesíthetők.

$$\omega = \pm \omega_1 \pm \omega_2 \quad \sin \gamma \neq 0 \quad (14)$$



Kemény mágneses anyagból készült forgórész esetében a légrésindukció a „permanens mágnes” típusú gerjesztéséhez képest a térben állandó γ_H szöggel van lemaradva. Így a nyomaték

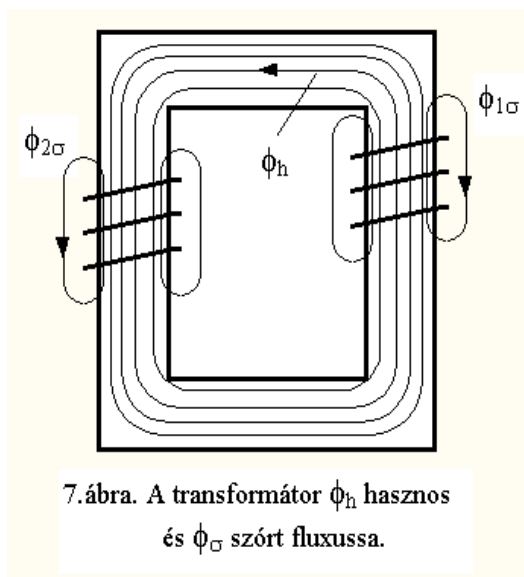
a térerősség és az indukció vektorok szorzatából számítható. A két vektor szöge állandó így a nyomaték is állandó és arányos a hiszterézis szöggel, vagyis a hiszterézis hurok felületével.

$$C = k \cdot H_1 \cdot B_1 \cdot \sin \gamma_H \quad (15)$$

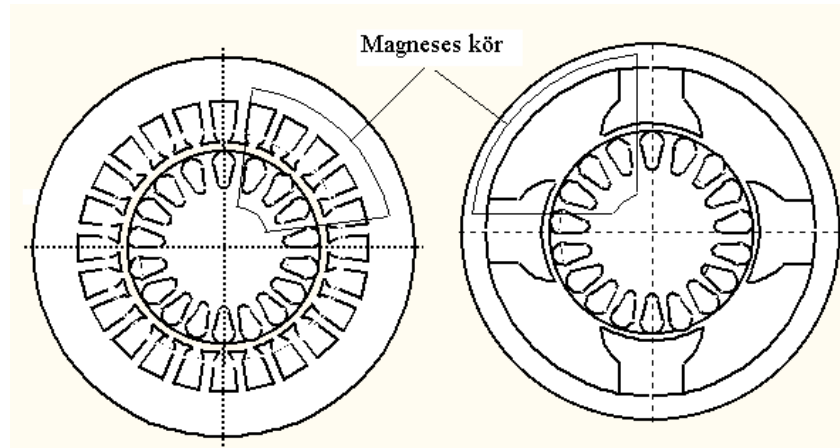
3. Villamos gépek mágneses köre. Mezőgörbék

A transzformátor mágneses köre végig vasban záródik, a légrés csak technológiai okokból jelenik meg. Annak ellenére, hogy a vasban azonos gerjesztés sokkal nagyobb fluxus alakít ki, mint a levegőben, a fluxus egy része mégis kilép a vashoz a levegőbe. Ezt a jelenséget szóródásnak nevezik. Így a gerjesztés által létrehozott fluxus két párhuzamos ágra oszlik : a vason és a légrésen záródó, és a gép tekercseit összefogó, **hasznos fluxusra** és a gépben nem hasznosítható, az egyik tekercselést elkerülő **szórt fluxusra**. A szórt fluxus nagysága telítéstől függő.

A forgó villamos gépek mágneses körében a forgás miatt **légrés** szükséges. A villamos gépek legnagyobb része mágneses szempontból 2p párhuzamosan kapcsolt, azonos felépítésű mágneses körből áll. A mágneses kör jellegzetes részei: δ vastagságú légrés, h_f magasságú fogak, l_{k2} hosszúságú armatúrakoszorú, h_p magasságú pólus, l_{k1} hosszúságú koszorú.



A mágneses indukció a légrés kerülete mentén periodikusan változik heteropoláris gép esetében. Ezt nevezik **mezőgörbének**. A légrésindukció térbeli elosztását a Θ **gerjesztés** térbeli eloszlása és a légrés vastagsága határozza meg.



8. ábra. Villamos gépek magneses körei.

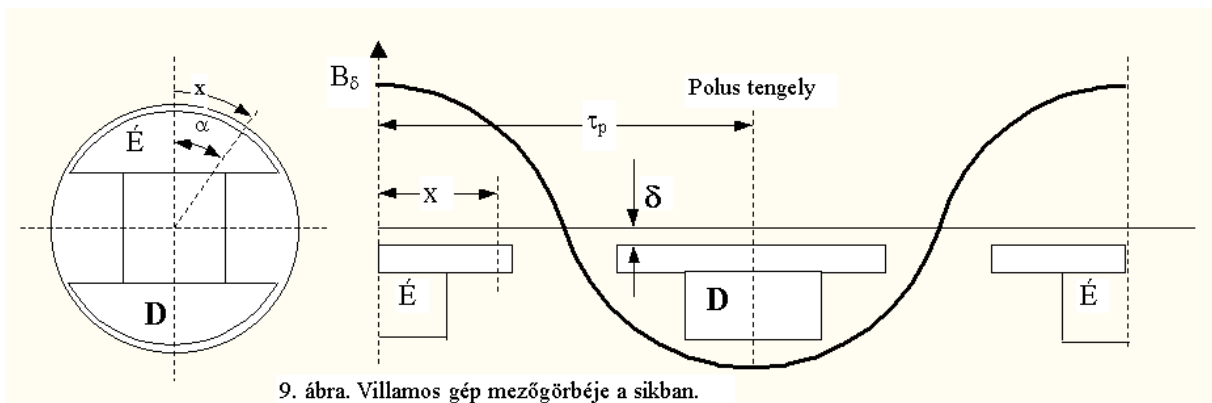
$$B_{\delta} = \frac{\mu_0 \cdot \Theta}{2 \cdot \delta_i} \quad [Wb / m^2] \quad [Te] \quad (16)$$

A δ_i **ideális légrésvastagság** figyelembe veszi a telítést, k_t telítési tényezővel és a fogak és hornyok által meghatározott légrésindukció változását, k_C Carter tényezővel. Az ideális légrésvastagságot a pólusközépen mért δ légrésvastagságból számítják:

$$\delta_i = k_t \cdot k_C \cdot \delta \quad (17)$$

A légrés a gép kerülete mentén lehet állandó vagy változó. Így lehetőség van arra, hogy a légrésindukció változását a követelményeknek megfelelően alakítsuk ki.

A mezőgörbe matematikai leírásához egy koordináta rendszert kell megválasztani. Ez általában a gép tengelyére merőleges síkban van meghatározva. Ezért a forgórész felülete alkotta hengerpalástot egy alkotója mentén felvágjuk, a síkban kiterítjük és a papír síkjára merőlegesen helyezzük el. Ha az alkotót, amely mentén felvágjuk a hengerpalástot úgy választjuk meg, hogy az egybeessen a pólus tengelysíkjaival, akkor a 9. ábrán látható vázlatot kapjuk.



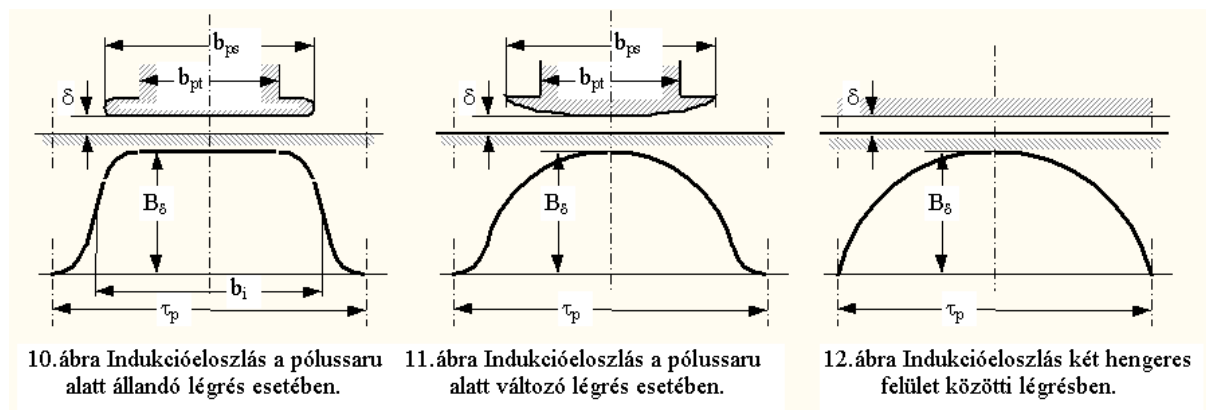
9. ábra. Villamos gép mezőgörbéje a síkban.

A villamos gépek pólusainak száma mindig páros, ezért a póluspárok számát p -vel jelölik, a pólusok száma pedig $2p$. Azért, hogy általános $2p$ pólusra is érvényes összefüggéseket lehessen megállapítani, bevezették a **villamos fok (radián)** fogalmát. 360 villamos foknak nevez-

zük egy póluspár szögét függetlenül attól, hogy az hány geometriai foknak felel meg. Így például egy $2p = 6$ pólusú gép teljes kerülete $p \cdot 360$ villamos foknak felel meg.

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D}{2p} \quad [m] \quad \tau_p = \frac{2 \cdot \pi}{2p} = \pi \quad [\text{vill. radian}] \quad (18)$$

A pólusosztás τ_p két egymásmelletti pólus tengelye közti, a légrés mentén mért távolság. A pólusosztás mindig 180 villamos foknak, vagy π villamos radiánnak, felel meg. Az álló- és forgórésznek mindig azonos pólusszámúnak kell lennie, de lehet különböző fázisszámú. A fázisok és póluspárok száma egymástól független fogalmak.



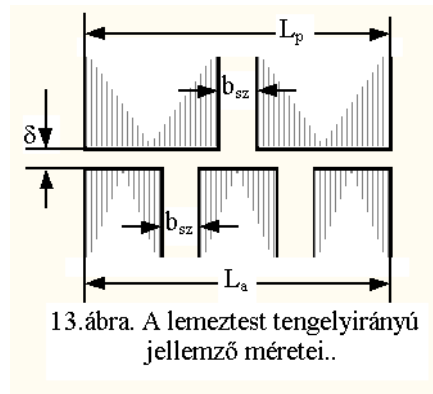
A légrés bármely pontjának helyzete meghatározható az α szöggel vagy az x távolsággal. A kettő közti összefüggés:

$$x = \frac{\tau_p}{\pi} \alpha \quad (19)$$

Azért, hogy a villamos gépekben az energiaátalakítás minél hatékonyabb legyen, megfelelő nagyságú és eloszlású mágneses térre van szükség. Előnyös tulajdonságai miatt időben szinuszos lefolyású feszültséget használunk. Ezért a mezőgörbe alakja is szinuszos lefolyású kell legyen. Így a légrésindukció a légrés bármely pontjában a következő összefüggéssel számítható:

$$B(x) = B_\delta \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_p} x = B_\delta \cdot \cos \alpha \quad (20)$$

A valós mezőgörbe nem szinuszos alakú. Ha a gerjesztést pólustekercs hozza létre akkor : állandó légrés esetében mezőgörbe „trapéz” alakú, ha a légrés a pólussaruk széle felé növekszik, akkor a mezőgörbe majdnem szinuszos.



13. ábra. A lemezttest tengelyirányú jellemző méretei..

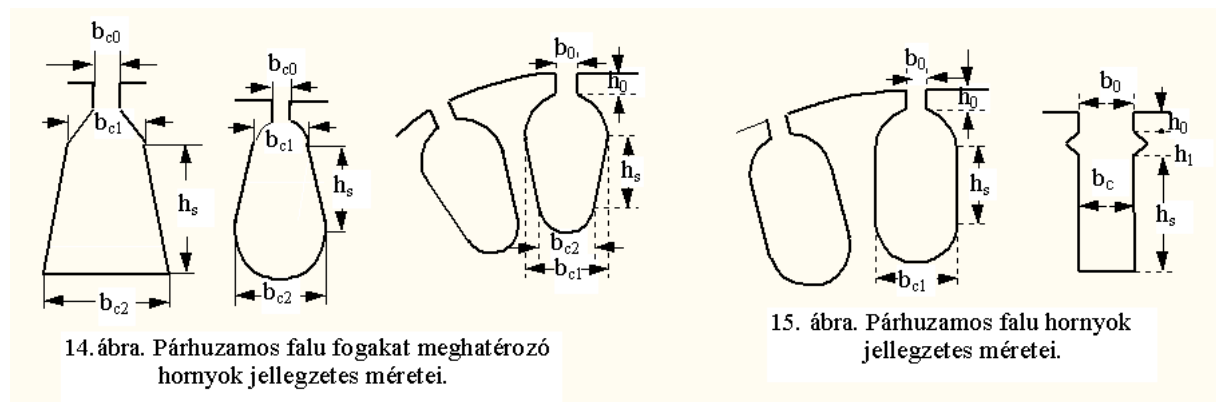
A légrés fluxus nagysága :

$$\phi = b_i \cdot l_i \cdot B_\delta \quad (21)$$

Ahol b_i a **pólussarú ideális szélessége**, értékét az ábra szerint lehet számítani, l_i az **armatúra ideális hossza**, amely figyelembe veszi a szellőzőrések befolyását a légrés indukció maximális értékére, megközelítőleg a következő egyszerűsített képlettel számolható:

$$l_i = \frac{1}{2} (L_p + L_a - n_{sz} \cdot b_{sz}) \quad (22)$$

A pólus pólustörzsből és pólussarúból áll. A pólustörzs b_p szélessége kisebb a pólussarú b_i szélességénél.



14. ábra. Párhuzamos falu fogakat meghatározó hornyok jellegzetes méretei.

15. ábra. Párhuzamos falu hornyok jellegzetes méretei.

A **fogak** alakját és méreteit a **hornyok** határozzák meg. Két alaptípusa: párhuzamos falú, tehát állandó szélességű fog, amikor a horony trapéz alakú és párhuzamos falú horony, amikor a fogszélesség változó.

A **horonynyílás** nagyságát a tekercshuzal méretei, a tekercselés és a horony alakja határozza meg. A horonynyílás nagysága, a fogosztás nagysága és a légrés nagysága a Carter tényezőt határozzák meg.

4. Villamos gépek gerjesztése és mágneses mezői

A vezetőkön áthaladó áram létrehozza a gerjesztést. A gerjesztés térbeli eloszlása a tekercseléstől függ. A pólustörzseken elhelyezkedő **pólustekercsek** egytengelyű csévés vagy tárcsás

tekercsek. Mivel a tekercs két oldala közt a gerjesztés állandó értékű, a gerjesztési görbe négyszög alakú, ha a tekercs vastagságát elhanyagoljuk a pólusosztáshoz képest, vagy trapéz alakú. A gerjesztés csúcsértéke:

$$\Theta_p = N_p \cdot k_b \cdot I_{csúcs} \quad (23)$$

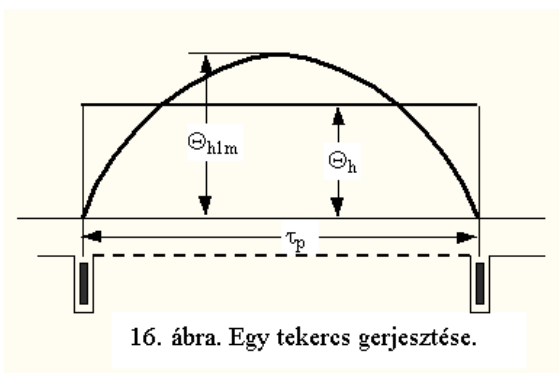
Ahol N_p a pólustekercs menetszáma, k_b a **tekercselési tényező**.

Ha ezt a görbét különböző frekvenciájú szinuszok összegére bontjuk, akkor egy **alapharmonikust** és **felharmonikusokat** kapunk. Az alapharmonikus csúcsértéke:

$$\Theta_1 = \frac{4}{\pi} \Theta_p = \frac{4}{\pi} N_p \cdot k_b \cdot I_{cs} \quad (24)$$

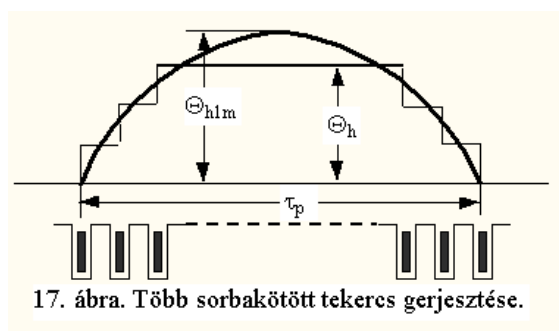
A **hornyokban elosztott tekercselés** esetében minden tekercs négyszög alakú gerjesztést hoz létre, aminek a csúcsértéke:

$$\Theta_h = I_{cs} \cdot \frac{N_h}{2} \cdot k_y \quad (25)$$



Pólusonként q sorbakötött tekercs van. Ezek a tekercsek nem fogják körül valamennyien a teljes fluxust, hanem egyesek annak csak egy részét, ezért a gerjesztés nem q szoros hanem $q \cdot k_q \cdot k_q$ egynél kisebb szám a **sávtényező** a neve. A gerjesztés alapharmonikusának a csúcsértéke:

$$\Theta_{1cs} = \frac{4}{\pi} I_{cs} \cdot q \cdot \frac{N_h}{2} \cdot k_q \cdot k_y \quad (26)$$



Ha figyelembe vesszük, hogy a teljes menetszám

$$N = N_h \cdot p \cdot q \quad (27)$$

és a tekercselési tényező $k_b = k_q \cdot k_y$, akkor :

$$\Theta_{1cs} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{N \cdot k_b}{p} I_{cs} \quad (28)$$

Ha a tekercsen átfolyó áram időben nem változik, akkor a gerjesztés térben szinuszosan változik és időben állandó lesz - ezt nevezik **állandó gerjesztésnek**. Matematikai alakja:

$$\Theta_1(x, t) = \Theta_{1cs} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_p} x \quad (29)$$

Ha az áram időben szinuszosan változik, akkor a gerjesztés térben és időben szinuszosan változik. Ezt nevezik **lűktető gerjesztésnek**. A légrés bármely pontjában, a pont helyzetének megfelelő pozitív és negatív értékek között időben periodikusan változik. Látható, hogy vannak olyan pontok, ahol gerjesztés mindig zérus.

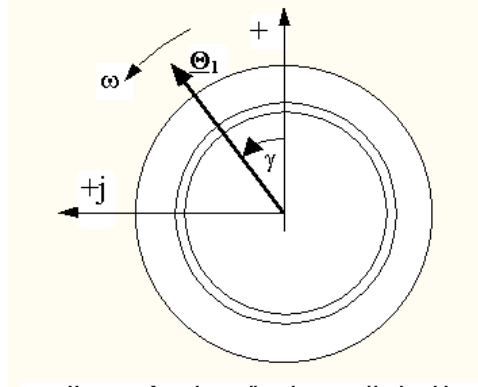
$$\Theta_1(x, t) = \Theta_{1cs} \cdot \cos \frac{\pi}{\tau_p} x \cdot \sin \omega t \quad (30)$$

Ha több fázis, egymáshoz képest a térben $\gamma = \frac{2 \cdot \pi}{m}$ villamos szögben helyezkedik el és az áramok szimmetrikusak, egyenlő amplitúdójúak és a köztük levő azonos fázisszögeknek megfelelő időeltolódás van, akkor az eredő gerjesztés csúcsértéke időben nem változik, de térben igen. Ez a gerjesztés a **csúszó** vagy **forgó-gerjesztés**.

$$\Theta_1^m(x, t) = \frac{m}{2} \Theta_{1cs} \cdot \sin \left(\frac{\pi}{\tau_p} x - \omega \cdot t \right) \quad (31)$$

A gerjesztés csúcsértéke elmozdul a fázissorrend szerint. Az elmozdulás sebessége egyenlő az áram időbeli szögsebességével.

$$\frac{dx}{dt} = \omega \cdot \frac{\tau_p}{\pi} = 2 \cdot f \cdot \tau_p \quad (32)$$



18. ábra. A forgómező vektoros ábrázolása.

Mivel a gerjesztés mind időben mind térben szinuszosan változónak feltételezzük, lehet használni a vektorábrázolást. Hasonlóan az idővektorokhoz, ha a komplex koordináta-rendszer kezdőpontját a gépkeresztmetszet középpontjába helyezzük, akkor a térben szinuszosan változó gerjesztőhullám egy vektorral leírható.

Így egy, térben szinuszos és időben állandó gerjesztést egy rögzített helyzetű és állandó nagyságú vektor jellemez. A vektort a különböző tengelyekre, sugarakra vetítve a kerület kérdéses pontjainak gerjesztési értékét kapjuk.

A lüktető gerjesztést egy rögzített helyzetű de időben változó nagyságú vektor jelképez. A vektor kifejezése az adott koordináta-rendszerben:

$$\underline{\Theta} = \Theta_{1cs} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (33)$$

Ha ugyanabban a rendszerben felírjuk egy másik, az előzőhöz képest γ szöggel eltolt gerjesztés értékét :

$$\underline{\Theta}_{\gamma} = \Theta_{1\gamma cs} \cdot e^{j\gamma} \cdot \sin(\omega \cdot t + \beta) \quad (34)$$

és számítjuk az eredő gerjesztést, akkor a következőt kapjuk :

$$\underline{\Theta} = \frac{1}{2j} \left(\Theta_{1cs} + \Theta_{1\gamma cs} \cdot e^{j\gamma} \cdot e^{j\beta} \right) - \frac{1}{2j} \left(\Theta_{1cs} + \Theta_{1\gamma cs} \cdot e^{j\gamma} \cdot e^{-j\beta} \right) \quad (35)$$

Ha: $\Theta_{1cs} = \Theta_{1\gamma cs}$, a két gerjesztés csúcsértéke egyenlő, és térben merőlegesek egymásra, $\gamma = \frac{\pi}{2}$ és időben $\beta = \frac{\pi}{2}$ szöggel késik egyik a másikhoz képest, akkor:

$$\underline{\Theta} = -j \cdot \Theta_{1cs} \cdot e^{j\omega t} \quad \text{vagy} \quad \underline{\Theta} = j \cdot \Theta_{1cs} \cdot e^{-j\omega t} \quad (36)$$

létrejön egy a kerület mentén egyenletes sebességgel haladó forgó gerjesztés. A forgásirányt a fázissorrend határozza meg.

Három vagy több fázisú tekercselés esetén a létrejött forgógerjesztés amplitúdója megnövekszik :

$$\underline{\Theta} = \frac{m}{2} \cdot \Theta_{1cs} \cdot e^{j\omega t} \quad (37)$$

Ha az álló gerjesztést állandó (egyenletes) sebességgel forgatjuk, akkor a rögzített koordináta rendszerhez képest forgó gerjesztést kapunk:

$$\underline{\Theta} = \Theta_{1cs} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (38)$$

Két egyenlő nagyságú, ellentétes irányban azonos szögsebességgel forgó gerjesztés eredője:

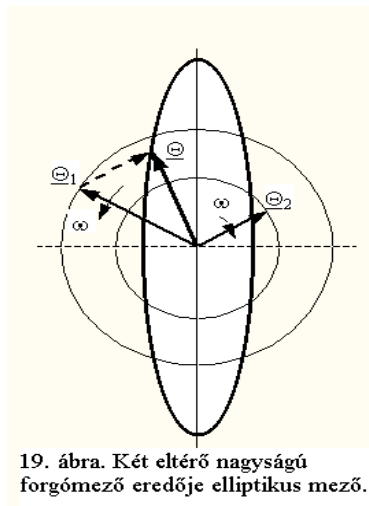
$$\Theta_{1cs} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} + \Theta_{1cs} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot t} = 2 \cdot \Theta_{1cs} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (39)$$

lűktető gerjesztés. Ennek a fordítottja is igaz. Bármely lűktető gerjesztés két feleakkora nagyságú azonos szögsebességgel ellentétes irányban forgó gerjesztésre bontható.

Ha két vagy több gerjesztés nem egyenlő nagyságú vagy az áramrendszer nem szimmetrikus, akkor **elliptikus gerjesztést** kapunk. Az eredőgerjesztésvektor egy ellipszis mentén mozog, de nem állandó szögsebességgel. Érvényes a Kepler törvény: a vektor egyenlő idő alatt egyenlő területeket sűrol.

Egy elliptikus gerjesztés felbontható egy forgó és egy lűktető gerjesztésre vagy két eltérő nagyságú, azonos szögsebességgel ellenkező irányban forgó gerjesztésre.

Terheléskor az armatúra tekercseiben is folyik áram. Az armatúraáram meghatározza az armatúragerjesztést. Az armatúragerjesztés elosztása térben és időben az armatúrához képest más, mint a pólusgerjesztés, de mindkettő pólusszáma azonos. A pólusgerjesztés és armatúragerjesztés relatív helyzete, állandósult állapotban mozdulatban, tranziens állapotban változhat de nem periodikusan, mert ez esetben nincs állandó nyomaték-összetevő. Az armatúragerjesztés befolyását a pólusgerjesztésre **armatúra-visszahatásnak** nevezik. A két gerjesztés relatív helyzete miatt az eredő gerjesztési görbe eltérhet a pólusgerjesztés görbétől.



Irodalomjegyzék.

- 1] Jekelfalussy G.,Krisch E.,Szita I. -Villamos gépek- Műszaki könyvkiadó, 1962.
- 2] Retter Gy.-Az egységes villamosgép elmélet- Műszaki könyvkiadó, 1976.
- 3] * * *-Elektrotechnikai kislexikon- Kriterion könyvkiadó, 1994.

Villamos gépek felépítése és tervezése

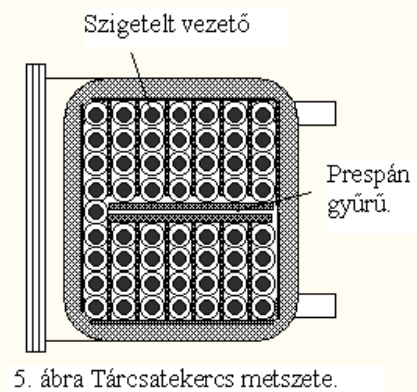
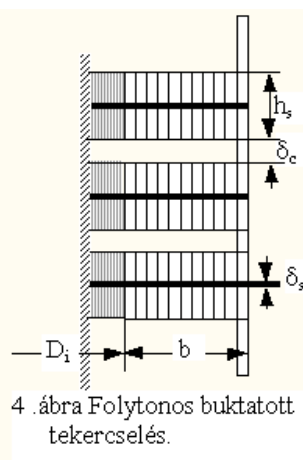
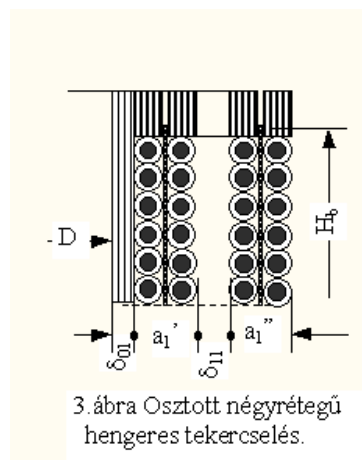
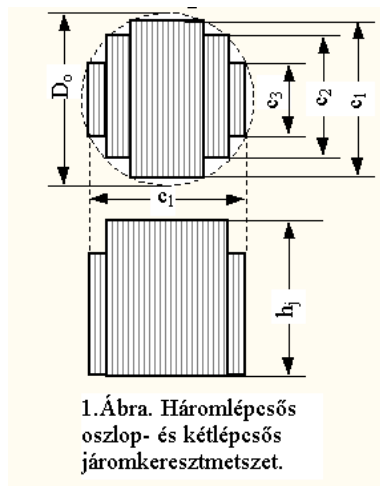
Dr. Bíró Károly, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Gépek Tanszék

1.A transzformátor szerkezete

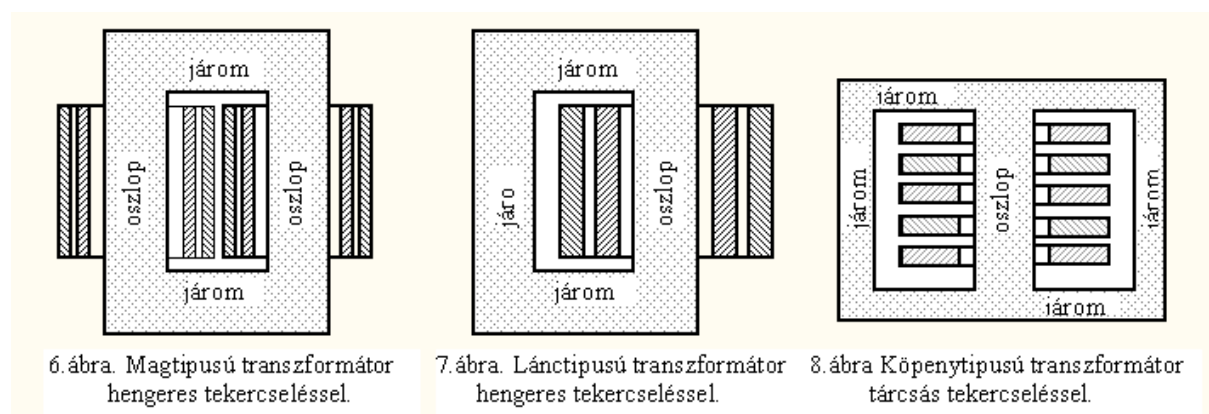
Mint minden villamos gép, a transzformátor is több építőelemből áll. Ezek a következők: vasmag, tekercselés, belső- és külső -szerelvények.

A **vasmag** transzformátorlemezéből készül. A lemezeket szigetelőréteggel borítják. A lemezek alakját és méreteit úgy választják meg, hogy a reluctancia minél kisebb legyen. A vasmagnak azt a részét, amelyen a tekercsek vannak, **oszlopnak** nevezik. A mágneses kört a **jármok** zárják. A lemezek **átlapolásával**, az oszlopok és jármok találkozásánál, a légrés lecsökkentését érik el. Előnyös, ha a vasmag oszlopainak keresztmetszete közel kör alakú. Ezt különböző szélességű lemezek lépcsős összerakásával érhető el. Gyakran a jármok keresztmetszete is lépcsős. A transzformátorlemezeket szigetelő hengerekkel, csavarokkal, szorítógerendákkal fogják össze.



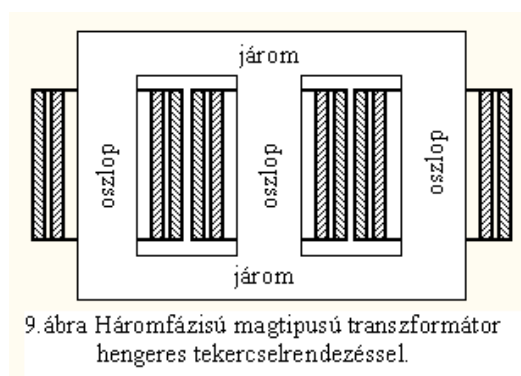
A transzformátor **tekercselését** a menetszám, a vezetők keresztmetszete és a tekercs veszteségek befolyásolják. Minden transzformátornak egy nagyobb és kisebb feszültségű tekercse van. Ezek egymáshoz viszonyított elrendezése lehet **hengeres** vagy **tárcsás**. A tekercsek lehetnek: egy vagy többrétegű *hengeres* tekercsek, *tárcsatekercsek*, *buktatott eljárással készült tárcsatekercsek*, *spirális* tekercsek. A transzformátor feszültség változtatásáért a nagyobb feszültségű tekercset **megcsapolással** készítik.

A tekercselés elhelyezése a vasmagon többféleképpen történhet. Ha a tekercsek és a vasmag úgy kapcsolódnak egymásba, mint két láncszem, akkor az egyfázisú transzformátor úgynevezett **láncszem típusú**. Ha mindkét oszlopon van tekercselés, akkor **mag típusú** a transzformátor. A **köpenytípusú** transzformátornál a tekercsek az oszlopon helyezkednek el, míg a jármok körülveszik a tekercseket.

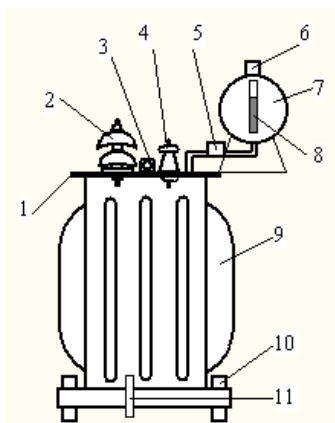


Háromfázisú transzformátorokat legtöbbször magtípusúra építik, de lehetséges köpenytípusú is.

A belső szerelvények a járomszorító gerendák, ezeket összeszorító csavarok, a transzformátor mozgását biztosító emelőhorgok, olajtranszformátoroknál a váz olajedény fedeléhez erősítő csavarok.



Az olajtranszformátort olajjal töltött edénybe helyezik. Az **olajedény** felülete sima kis teljesítmény esetén. A felület megnövelésére lemezekből hajlított és hegesztett *bordákat*, csöveket, *hűtőtáskákat* (radiátorokat) használnak.

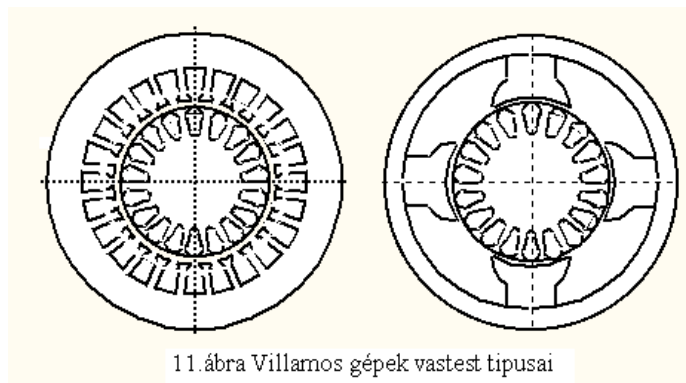


10. ábra Olajtranszformátor
külső szerelvényei.

A vas és tekercsvesztésektől felmelegedett levegő vagy olaj áramlása történhet a melegedés okozta fajsúly csökkenés miatt, amikor *természetes hűtésről*, vagy külső beavatkozás miatt, amikor *mesterséges hűtésről* beszélünk. A radiátorok hűtése ugyanúgy történhet.

Az olajedény fedelén (1) található az **átvezető szigetelők** (2,4), az **emelőfülek** (3), és a **tágulódédeny** (7) (konzervátor). A tágulódédeny oldalán található az **olajállásmutató** (8), és **légzőnyílás** (6). Az olajedény oldalain bordák (9), vagy csövek, vagy hűtőtáskák, a fedelén olajtöltőnyílás, alján pedig olajleeresztőcsap (11) van. A szállítás megkönnyítésére az olajedény alján szállítógörgők (10) vannak. Nagyteljesítményű transzformátoroknál az olajedényt a tágulódéennyel összekötő csővezetékre szerelik a **gázrelét** (5).

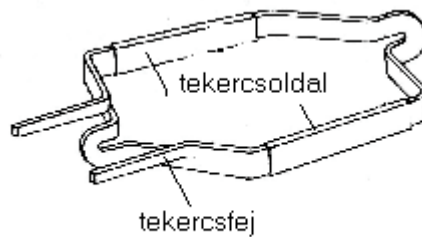
2. Forgó villamos gépek szerkezeti elemei



11. ábra Villamos gépek vastest típusai

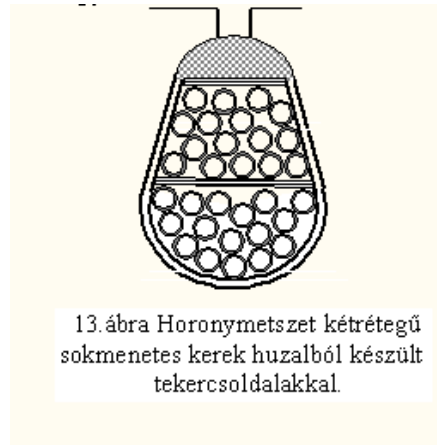
A forgó villamos gépek aktív elemei a **vastest** és a **tekercselés**. A vastest felépítése a gép típusától függ. A mágnes kör azon részei, ahol a fluxus állandó, tömör acélból készülnek de, készülhetnek lemezekből is. A váltakozó fluxus tömör vastestben nagy veszteségeket okoz. Ezért a váltakozó fluxust vezető **lemeztestet**, többféle minőségű 0,5 mm vastag dinamólemezből (szilícium-lemezből) készítik. A lemezeket **sajtolás** útján kapjuk. A lemezek szélein keletkezett **sorját** sajtolás után sorjátlanítani kell és szigetelni (ha a lemez nem volt szigetelve). A lemeztestet 1 m átmérőig **körgyűrűkből**, azon felül **szegmensekből** állítják össze. A lemeztest összefogására **szorítógyűrűket**, **szegecseket** vagy sajtoló réseket használnak. A pólussaruk és pólustörzsek majdnem mindig lemezekből készülnek, mert a lemezek sajtolása és összerakása egyszerűbb, mint tömör tömbből a pólust kigyalulni vagy kimarni. Az állandó

fluxust vezető koszorúk rendszerint tömör acélból készülnek: hengerelt lemezből hajlítva és hegesztve, vagy öntve.



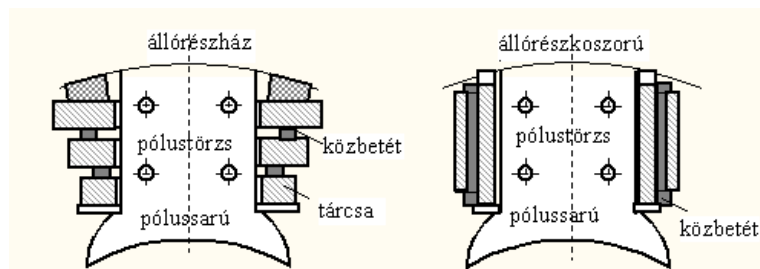
12. ábra A tekercs elemei.

A **pólustekercsek** mint egytengelyű csévék a pólustörzseken helyezkednek el. Alakjuk legtöbbször téglalap lekerekített élekkel. A hűtés miatt a 30 mm -nél vastagabb tekercset több részre kell osztani. Az osztás irányát a hűtőlevegő áramlási iránya adja meg. Sugárirányú szellőzéshez egytengelyű **csévékre**, tengelyirányú szellőzéshez **tárcsákra** bontják a tekercset.

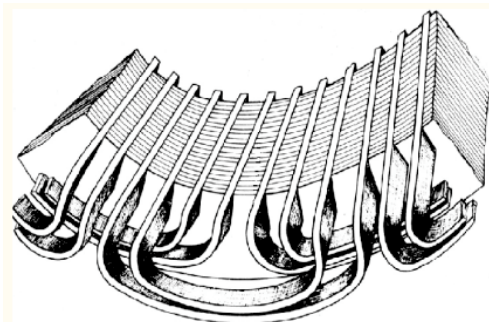


13. ábra Horonymetszet kétrétegű sokmenetes kerek huzalból készült tekercsoldalakkal.

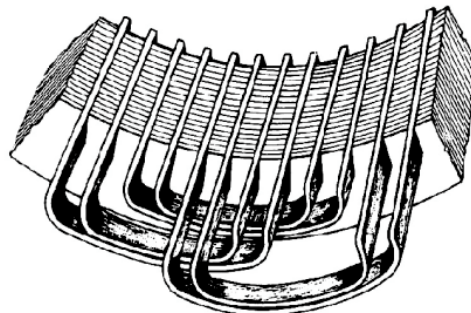
Az **armatúra tekercselés** Q számú horonyban a kerületen egyenletesen elosztva helyezkedik el. A tekercselés tekercsekből, a tekercsek a horonyban lévő **tekercsoldal**akból és a vastesten kívüli **tekercsfej**ekből állnak. A tekercsek egy vagy több menetet tartalmaznak. A menetek alakja megegyezik a tekercsek alakjával. A két tekercsoldal közti horonyszámban mért távolság a tekercs szélessége. Ha a **tekercsszélesség** egyenlő a pólusosztással a tekercselés **átmérős**. Ha annál kisebbre vagy nagyobbra választjuk, **húros tekercselést** kapunk. Ha egy horonyban csak egy tekercsoldal található, akkor a tekercselés **egyrétegű**. Ha a horonyban két tekercsoldal, két különböző tekercsből, található, akkor a tekercselés **kétrétegű**. Ha tekercsoldalanként csak egy vezető van, annak neve rúd és az ilyen tekercselést **rúdtekercselésnek** hívják.



14. ábra Növelt hűtőfelületű pólustekercsek.



15. ábra Kétsíkú tekercselés egytengelyű tekercsekkel.

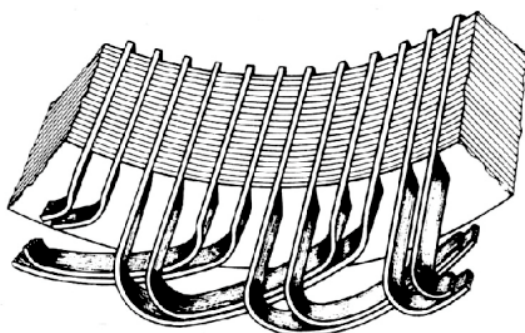


16. ábra Háromsíkú tekercselés egytengelyű tekercsekkel.

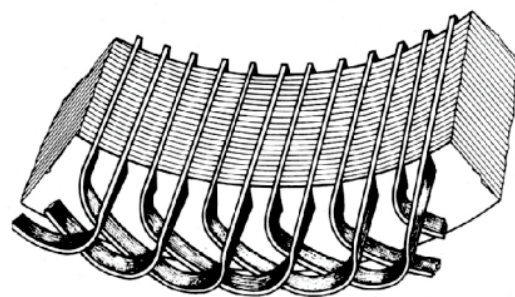
A tekercselés készülhet: *azonos szélességű tekercsekből* négyzetű, trapéz, ötszögű alakban, és *különböző szélességű egytengelyű (koncentrikus) tekercsekből*. A fázisok tekercselése pólusonként több tekercsből tevődik össze. Ha egyes fázisokra pólusonként azonos egész számú horonyszám esik, vagyis ha

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = \text{egész szám} \quad (1)$$

a tekercselés **egészhoronyszámú** tekercselés. Használunk **törthoronyszámú** tekercselést is nagy gépek esetében. Ha először sorba kötjük az egy póluspár alatt fekvő q tekercset, majd a következő póluspár felé haladunk, akkor **hurkos tekercselést** kapunk. A **tekercselés hullámos** lesz, ha sorba kötünk egy-egy tekercsoldalt minden pólus alatt. Az egyrétegű tekercselés tekercsfejei haladhatnak együtt egy kötegben - osztatlan-, vagy kétfelé osztva - osztott tekercsfejekkel. A tekercsfejek elhelyezkedhetnek két vagy három síkban. Így egy tekercselés jellemzői lehetnek: egyrétegű, kétsíkú, hurkos, egytengelyű, többmenetes tekercselés.



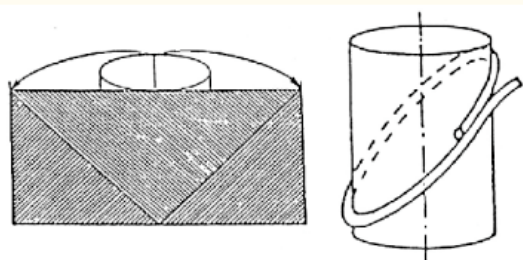
17. ábra Koszorú tekercselés egyenlő alakú tekercscsoportokkal.



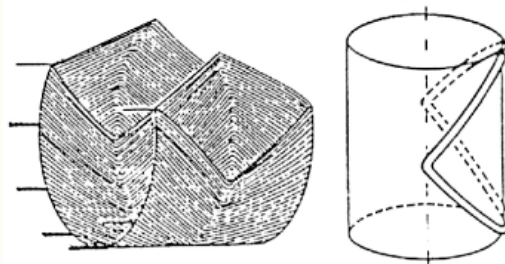
18. ábra Koszorú tekercselés egyenlő alakú és szélességű tekercsekkel

A tekercselést úgy kell megvalósítani, hogy a fázis feszültségek minél nagyobbak, szimmetrikusak és szinuszosak legyenek, ugyanakkor a tekercs által létrehozott gerjesztés szinuszos eloszlású legyen a légrésben. Ez lehetséges ha megfelelően választják meg az egy fázisra és pólusra jutó horonyszámot, a tekercsszélességet és esetleg a horonyferdítést. Ezek együttesen meghatározzák a k_b az alap és felharmonikusok tekercselési tényezőit.

A tekercselés végeit a kapcsokra, csúszógyűrűkre vagy a kommutátor szeletekhez kapcsolják.



19. ábra Faulhaber típusú ferde légréstekercselés



20. ábra Fütterer típusú rombusz légréstekercselés.

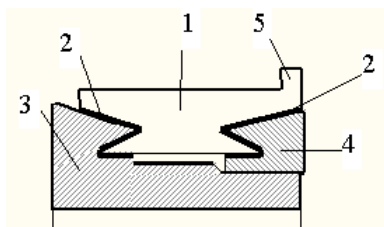
Törpe villamos motoroknál a hornyok nagy helyet foglalnak el, ezért a tekercselést a légrésbe helyezik. Így ugyan megnő a légrés vastagsága, romlik a teljesítménytényező, nő az üresjárási áram, de a gép méretei lecsökkennek. Két ilyen tekercseléstípus látható a 19. és 20. ábrákon.

A **kapcsok** az állórész tekercseléssel közvetlenül vannak összekötve kábellel vagy sínnel.

A **csúszógyűrűk** szigetelt anyagra szerelt bronzgyűrűkből állnak. Hozzájuk csatlakozik a forgórésztekercselés.

A **kommutátor** egymáshoz és tengelyhez képest mika alapú anyagokkal szigetelt (2) kemény rézből készült szeletekből (1) áll. A forgórésztekercs végeit a szeleteken lévő zászlókba (5) forrasztják.

Az áramot a csúszógyűrűkről, ill. a kommutátorról **kefék** veszik le. A keféket a következő csoportba oszthatjuk : **kemény szénkefék**, amorf szénből és kötőanyagból nagy hőmérsékleten nagy nyomással készülnek, **grafitkefék**, természetes grafitból és kötőanyagból sajtolva és izzítva készülnek, **elektrografit kefék**, amorf szénből és karbidképző anyagból készülnek, **fémek kefék**, grafitból, rézporból és kokszolható kötőanyagból készülnek.



21. ábra Kommutátor.

A keféket a csúszófelületen a **kefetartók** vezetik. Több típus létezik, amelyek részben kielégítik a kefetartókkal szemben támasztott néha ellentmondó követelményeket.

A lemezelt állórészvastesteket **állórészház**ba préselik. Az állórészház készülhet öntöttvasból, alumíniumból, hengerelt acéllemezről hegesztve. Az állórészház hordja a pólusokat, és a **csapágy**pajzsokat, amelyek úgy illeszkednek az állórészházhoz, hogy biztosítsák a légrés állandóságát és a forgórész szabadon forgását. Ha a csapágyak az állórészen kívül helyezkednek el, nagy nehéz gépeknél, akkor **bakcsapágy**nak nevezik. Ebben az esetben az állórész és a bakcsapágyak közös **alaplemezen** állnak.

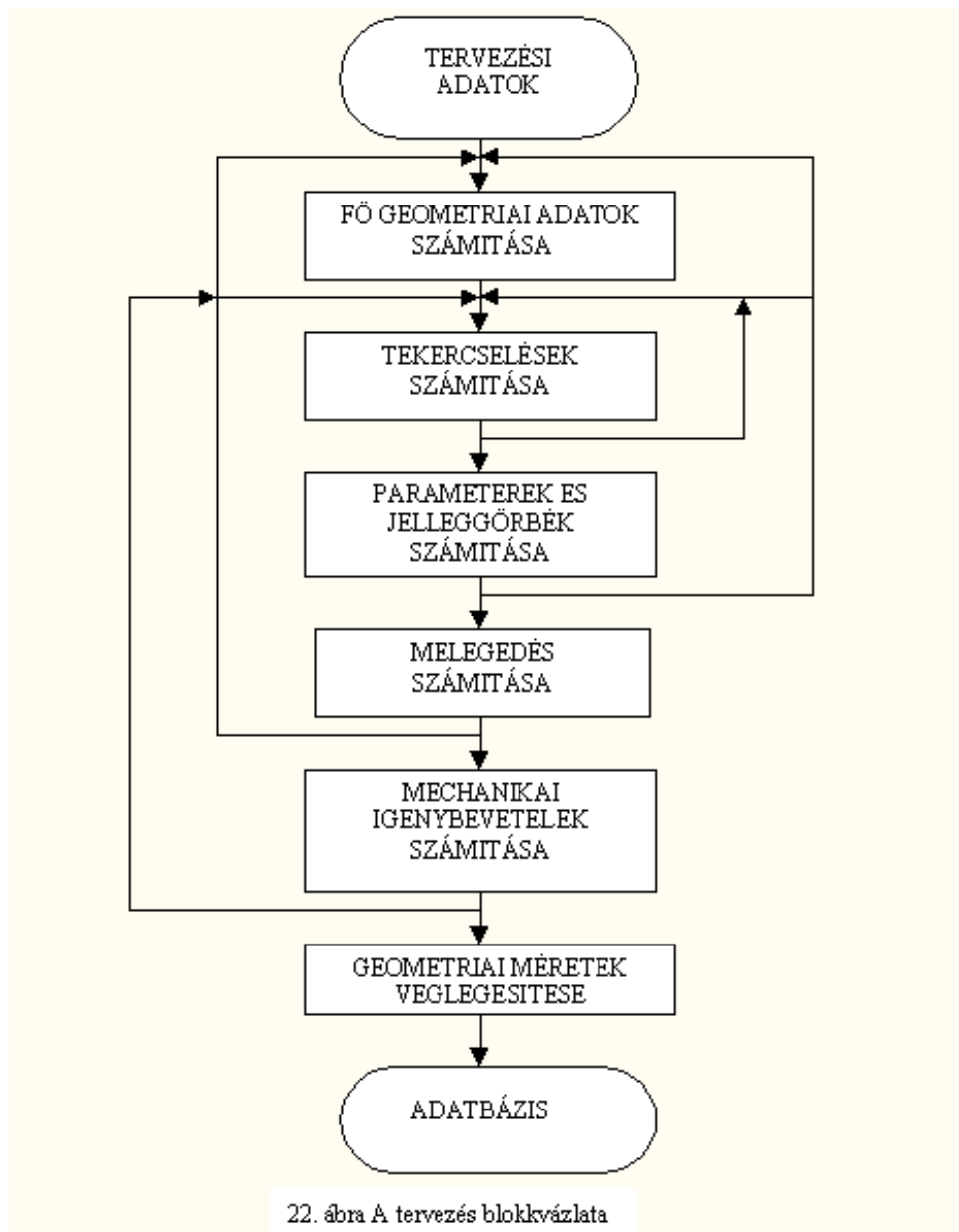
A villamos gép a nyomatékot a **tengelyen** adja le, illetve veszi fel. A tengely forgását a csapágyak biztosítják.

Az energiatranszformáció miatt létrejött veszteségek a villamos gépekben hőenergiává alakulnak. Ennek az energiának a kivonását a villamos gépből a **hűtőrendszer** vagy **szellőzőrendszer** biztosítja. Kis teljesítményű gépek hűtésére levegőt használnak. A levegő mozgását a szellőzőrendszer biztosítja. Ez leggyakrabban egy ventilátorból és a megfelelően kialakított szellőzőcsatornákból áll.

3. Villamos gépek tervezésének alapelvei

Tervezés az a tevékenység, amelynek eredményeképp ismertté válik a villamos gép gyártásához, felhasználásához szükséges összes adat.

Tervezési adatok. Azok az adatok, amelyek meghatározzák a gép típusát, felépítését, üzemmódját, névleges üzemi adatait, más tipikus másodrendű üzemi adatokat, amelyek nincsenek feltüntetve az adattáblán, gép milyen követelményeknek kell megfeleljen a gyártás és felhasználás folyamán, és a korlátozásokat.



A géptípus tartalmazza a megnevezést, rendeltetést. Pl: egyfázisú rezgő motor.

A gép felépítése tartalmazza:

- Belső konstrukciós adatokat: a forgórész alakja, szerepe és helye. Építési alak: tengelyhelyzet, a ház típusa, a csapágypajzsok száma stb.
- Védettségi fokozat: az érintés és az idegen tárgyak behatolása elleni védelem. Szigetelési osztály: a megengedett legmagasabb melegedés és a szigetelő anyagok használata. Hűtés és szellőzés: a hűtőközeg.

Az üzemmód meghatározza a gép táplálását, kapcsolási vázlatát, szabályozását, terhelési módját.

A névleges üzemi adatok a gép típusától függően lehetnek: teljesítmény, frekvencia, álló- és forgórész feszültségek és áramok, nyomaték, erő, fordulatszám, elfordulás, hatásfok, teljesítménytényező stb.

Másodrendű üzemi adatok (épp olyan fontosak, mint a névleges adatok) a gép típusától függően: felfutó nyomaték, indítási áram, rövidzárási feszültség, üresjárási áram stb.

A követelmények lehetnek szabvány előírások, amelyek vonatkozhatnak az előbb felsorolt adatokra vagy a környezetszennyezésre, és gyártási előírások.

A korlátozások lehetnek követelmények vagy nem szabvány által rögzített különleges követelmények a geometriai méretekre, villamos (A a kerületi áram) ill. mágneses igénybevételre (B_δ légrésindukció), az anyagokra, a gyártási folyamatokra stb., vonatkozóan.

A tervezési adatokból kiindulva el kell dönten, hogy tudjuk-e használni a létező és ismert gépek adatait vagy egy új típusú gépet tervezünk.

Tervezés főbb feladatai :

Megtalálni a vastest fő geometriai méreteit és a fő elektromos és mágneses igénybevételeket: az áramsűrűséget, a vastest különböző pontjaiban előálló indukciót, a légrés nagyságát.

1. A fő geometriai méreteket meghatározására a gép belső teljesítményét a gép légrése által határolt henger köbtartalmával és a gépek fajlagos kihasználásával kifejezett képletből számítják.

$$P_b = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} k_b \cdot \alpha_i \cdot (A \cdot B_\delta) \cdot (D^2 \cdot L_i) \cdot \cos \varphi \quad (2)$$

a fajlagos kihasználás függ a gép típusától, nagyságától, pólusainak számától. Ismert géptípusokra sok adat vonatkozik.

2. A tekercselés meghatározása és elhelyezése a vasmagon úgy, hogy a gyártási feltételeket, szabványelőírásokat betartva megfelelően az összes követelményeknek. Forgó villamos gépeknél a horonyméretek meghatározása.

3. A paraméterek és jelleggörbék kiszámítása és ellenőrzése, hogy megfelelően az előírottaknak

4. Melegedés számítása és ellenőrzése, hogy megfelelően az előírt szigetelési osztálynak.

5. Mechanikai igénybevételek számítása és szerkezeti elemek meghatározása.

Módszer

A több legyártott sorozat villamosgép adatainak összehasonlítása útján kapott különféle félempirikus képleteket felhasználva meghatározzuk a vastest fő geometriai méreteit és a fő elektromos és mágneses igénybevételeket.

Mindig számolni kell azzal, hogy nem lehet azonnal olyan tekercseléshelyezést találni, amely tökéletesen kielégíti az összes követelményeket. Néhányszor a tekercselés-elhelyezést át kell dolgozni és esetleg a vastest méreteit is helyesbíteni. A számítás menete a 22. ábra szerint történik.

Irodalomjegyzék

- 1] N. I. Bulgakov: Transzformátorszámítás. - Nehézipari könyv és folyóiratkiadó vállalat, 1953.
- 2] Jekelfalussy G.,Krisch E.,Szita I. -Villamos gépek- Műszaki könyvkiadó, 1962.
- 3] Kovács K., P. - Villamos gépek tranziens folyamatai.- Műszaki könyvkiadó, 1970.

- 4] Karsai K., Kerényi D., Kiss L. - Nagytranszformátorok., Műszaki Könyvkiadó, 1973.
- 5] Retter Gy.-Az egységes villamosgép elmélet- Műszaki könyvkiadó, 1976.
- 6] Rajki I. - Törpe és automatikai villamos gépek. - Műszaki könyvkiadó, 1990.
- 7] ***-Elektrotechnikai kislexikon- Kriterion könyvkiadó, 1994.

Villamos hajtások alapjai

Dr. Imecs Mária, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Hajtások és Robotok Tanszék

A technológia első ugrásszerű fejlődését, az úgynevezett ipari forradalmat a gépesítés és a munkagépeknek az erőgépekkel való hajtása hozta meg. Újabb nagy horderejű minőségi változást jelentett a hajtástechnikában a villamos energia felhasználása, azaz a villamos motorok alkalmazása. Mondhatjuk, hogy a XX. század végére elért technológiai színvonalat teljes egészében a villamos hajtás és az irányítástechnika gyors fejlődése alapozta meg, így ezek eredményeinek felhasználása - technikai oldalról nézve - a mai életforma és életszínvonal kialakulásának legfontosabb feltétele volt. Ma már a villamos energia legnagyobb részét villamos motorokkal hasznosítják és a munkagépek hajtására szinte kizárólag villamos motorokat alkalmaznak. A korszerű ipari termelés elképzelhetetlen villamos hajtás nélkül. A villamos motorok könnyen szabályozhatók és ezáltal gazdaságos megoldásokat tesznek lehetővé különféle termelési folyamatok automatizálására.

A villamos motorok és a munkagépek kapcsolatának üzemtani kérdései képezik a villamos hajtások mechanikával kapcsolatos alapjait. A munkagépeket, melyek a villamos motorok terhelését képezik, széles határok között értelmezzük. Így a háztartási gépektől a villamos mozdonyokig nagyjából minden beleértendő. A fő cél a villamos motorokkal kapcsolatos jelenségek, összefüggések és jelleggörbék felhasználása a munkagépek és technológiai berendezések hajtási feladatainak megoldásánál. Lényegében a villamos hajtások a villamos motorok alkalmazástechnikája az előírt műszaki adatok, üzemi feltételek és körülmények mellett. A rendkívül sokfajta munkagép a motorokkal szemben sokrétű követelményt támaszt.

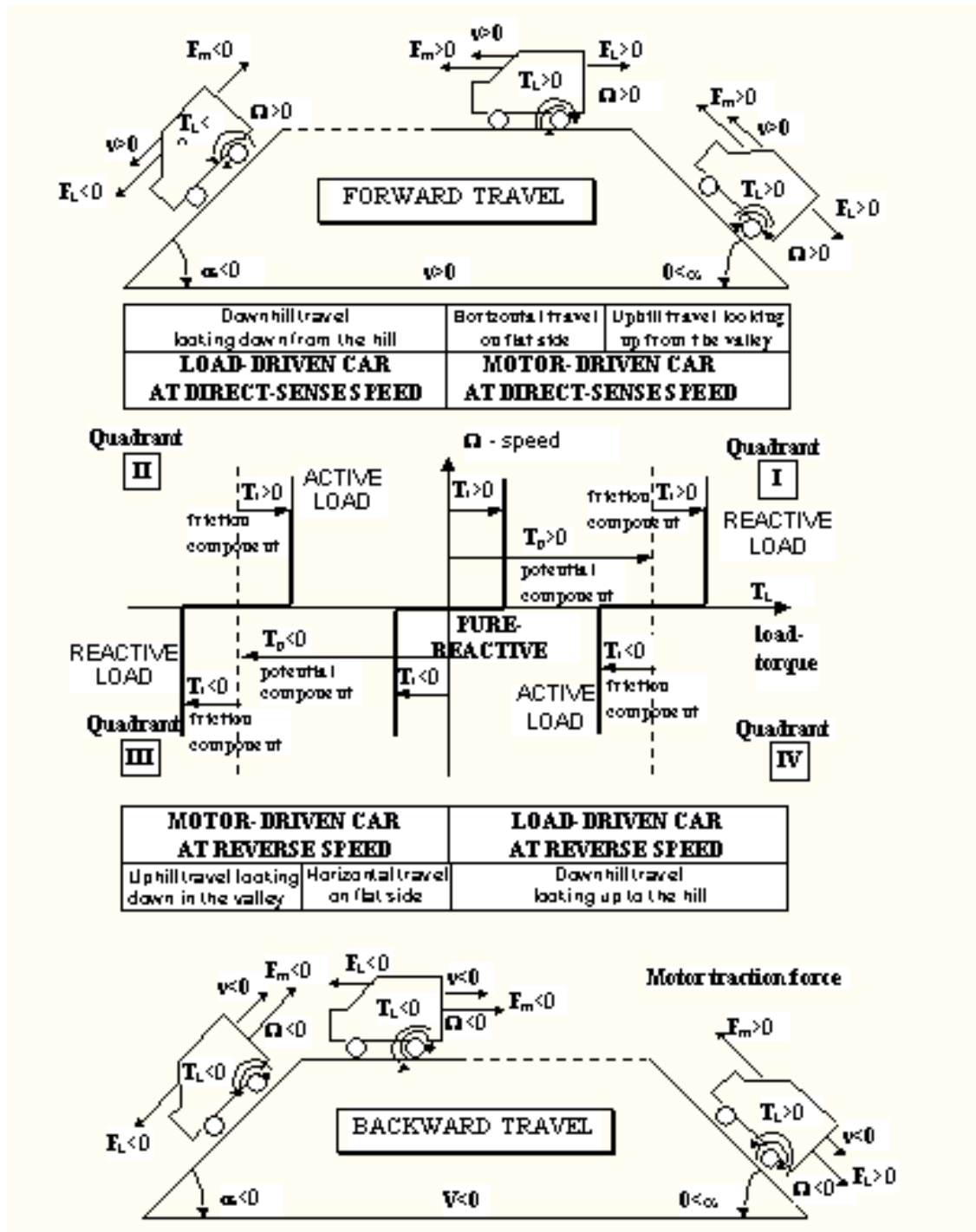
Az automatizált villamos hajtások más szakterületek bevonását is szükségessé tette. Ma már a villamos hajtások tervezésén dolgozók, a terület összetett jellegénél fogva, egyidejűleg járatosak kell legyenek nemcsak a mechanika, a gépelemek, a villamos gépek, a villamos készülékek, hanem az ipari elektronika (gyenge- és erősáramú), az áramátalakítók (teljesítményelektronika), az irányítástechnika (vezérléstechnika), a méréstechnika, adat- és jelfeldolgozás, a számítástechnika, a programozás, a számítógépek stb. területéről is a legfontosabb fogalmakkal és összefüggésekkel. Mivel egyetlen szakember nehezen rendelkezhet ilyen sokrétű ismeretekkel, mind a kutatásban, mind a tervezésben ajánlatos a csoportmunka. A hajtástervező csoportokban ajánlatos többféle szakterületről összetoborozni a tagokat, melyeknek az ismeretei - az eredményes összedolgozás érdekében - részben fedniük kell egymást. Tehát a villamos hajtások több hagyományos és újabb mérnöki szakma határterülete. Ennek ellenére ma már a villamos hajtástechnikát önálló szakterületnek szokták tekinteni. A jelenlegi időszakban már sokkal több a motorfelhasználó és üzemeltető, a hajtástervező és üzembehelyező szakember, mint a villamosmotor-fejlesztő és gyártó szakember.

A villamos hajtások szerkezeti szempontból tehát gépészeti berendezéseket, villamos gépeket és készülékeket, valamint az automatizált villamos hajtások esetén erősáramú és gyengeáramú elektronikai, valamint újabb számítástechnikai berendezéseket is tartalmazhatnak.

Magát a villamos gépet általános értelemben elektromechanikai átalakítónak lehet tekinteni, viszont nem lehet magában letárgyalni, ugyanis a munkagép jellege és üzemmódja annyira meghatározó lehet - és nagyrészt az is szokott lenni - hogy a tervezőnek legtöbbször annak az adatai alapján kell elindulnia. A klasszikus villamos hajtások alapjait ezért a munkagépek és a villamos motorok együttes üzemének tárgyalása képezi. Ha a villamos motort összes előnyeinek kiaknázásával kívánjuk felhasználni, akkor először a hajtandó munkagép sajátosságait,

majd a hajtó villamos motor tulajdonságait és végül a kettő együttműködését kell gondosan megvizsgálni. A következőkben a munkagépek üzemét és mechanikai jelleggörbéit egy villamos meghajtású jármű (*ELECTRIC CAR*) példáján fogjuk tanulmányozni, mint ahogyan azt az 1. ábra is mutatja.

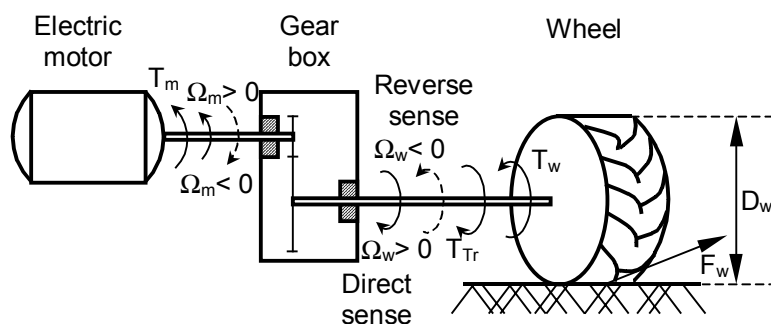
ELECTRIC CAR



Torque-Speed Characteristics

1. ábra. Villamos meghajtású jármű mechanikai jelleggörbéi különböző üzemmódokban

Általában mechanikai jelleggörbéken a sebesség és a nyomaték közötti függvényeket („torque-speed characteristics”) értjük. A sebességet gyakorlatilag fordulatszámban szokták megadni, de elméletileg a szögsebességgel kívánatos dolgozni, mert egyszerűbb számítási képletekhez jutunk. A munkagép forgó- vagy egyenes vonalú mozgását át kell számítani a motor tengelyére vonatkoztatott forgó mozgássá. Ezt az átszámítást nemcsak a sebességre és gyorsulásra kell elvégezni, hanem a munkagép egyenes vonalú mozgást végző tömegét és a munkát végző erőt is át kell számítani a megfelelő lendítő- és forgató nyomaték értékére, mely a motor tengelyén jelentkezik. Ha a munkagép ugyancsak forgó mozgást végez, mint a motor, akkor az átszámítások valamivel egyszerűbbek.



2. ábra. Villamos motor - jármű-munkagép rendszer

Mint a 2. ábra is mutatja, a keréknél jelentkező súrlódási erő F_w nyomatékot hoz létre a tengelyen (T_w), melyet a motor által kifejtett húzóerőnek megfelelő ellenkező irányú nyomaték (T_{Tr}) egyenlítő ki. Ennek, a motor tengelyére átszámított értéke a T_m . A motor sebessége Ω_m a működési karakterisztikája szerinti értéken stabilizálódik, mely végül is meghatározza a kerék Ω_w sebességét is. A jármű előre haladási irányának a motor pozitív sebessége, míg a hátrafele haladási irányának a negatív sebessége (az ábrán szaggatott vonallal jelöltük) felel meg.

Egy villamos meghajtású jármű esetében a villamos motor („electric motor”) tengelyén jelentkező terhelő nyomaték analitikusan a következő képlettel írható le:

$$T_L = \frac{mg}{k_{mt}} \frac{D_w}{2} [\sin\alpha + (\text{sign}\Omega_m)\mu\cos\alpha] + \beta\Omega_m \quad (1)$$

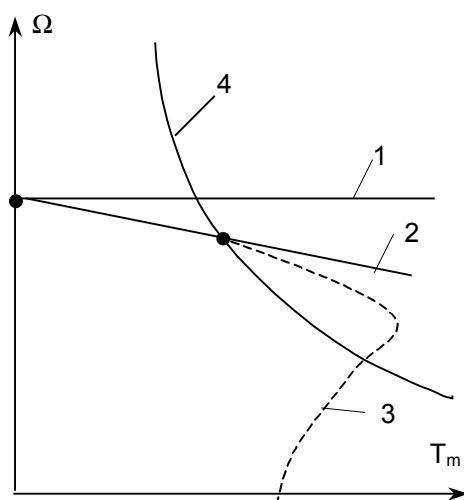
Mint látható a terhelő nyomaték (T_L) függ a szállítandó tölegetől (m - „mass”), az út („route”) dőlési szögétől (α - „slope”), amely tulajdonképpen meghatározza a terhelés jellegét. Ez lehet kimondottan reaktív hatású terhelés („pure-reactive load”), mely csupán súrlódásból adódik, vagy két összetevőből keletkező, azaz súrlódásból („friction component”) és gravitációból („potencial component”) adódó aktív- („active load”) vagy reaktív- („reactive load”) hatású terhelés. A μ és β súrlódási tényezőket („friction coefficient”) az időjárás („weather”) befolyásolja, ezért ezeket zavaró tényezőként kezelhetünk. A közlőmű („gear box”) áttétele k_{mt} és a kerék („wheel”) átmérője D_w a hajtás mechanikai részének a jellemzői. A terhelő nyomatéknak a szögsebességtől (Ω_m) való függősége a motor és a munkagép kölcsönhatását fejezi ki. Mint látható, a villamos meghajtású jármű négy negyedben működik, ha

figyelembe vesszük azt is, hogy előre („**forward travel**”) is meg hátra is, azaz visszafele („**backward travel**”) is, kell tudni közlekedni. Ha nincs szükséges a villamos gép előre is („**direct sense**”) meg fordított irányba is („**reverse sense**”) tud hajtani. Az (1) képlet alapján az 1. ábrán a villamos meghajtású jármű szögsebesség- (Ω - „**speed**”) és a terhelő-nyomaték (T_L - „**load torque**”) összefüggését is ábrázoltuk. Az ábrán a motor által kifejtett húzóerőt is megjelöltük (F_m - „**motor traction force**”) valamint a jármű lineáris sebességét (v) és az általa kifejtett terhelő erőt (F_L - „**load force**”). A villamos gépnek a nyomatéka állandósult üzemmódban a hatás-visszahatás törvénye értelmében mindig egyenlőnek kell lennie a terhelő nyomatékkal, viszont fizikailag ellenkező irányba fog hatni. Következésképpen, a villamos gép nyomatéka a terheléstől függ, ami egy járműnél az út jellegéből adódik.

Energetikai szempontból, amikor a jármű a sík területen („**horizontal travel on the flat side**”) előre vagy hátra halad, vagy az emelkedőn felfele közlekedik („**uphill travel**”), függetlenül attól, hogy a vezető a völgyből néz a magaslat felé („**looking up from the valley**”), ha előre halad vagy a völgybe lát lefelé („**looking down in the valley**”), ha visszafele közlekedik, a gépnek a villamos energiát kell átalakítania mechanikai energiává, tehát motor üzemenben fog működni. Amikor a jármű lefele halad a leejtőn („**downhill travel**”), akár úgy, hogy a vezető a völgy fele néz („**looking down from the hill**”), akár úgy, hogy a völgyből a magaslat felé tekint („**looking up to the hill**”), akkor a gép villamos energiát fog termelni a jármű fogyó potenciális energiájából.

A villamos gép tehát az első („**quadrant I**”) és a harmadik („**quadrant III**”) síknegyedben hajtó- („**motor-driven car**”), a második („**quadrant II**”) és negyedik („**quadrant IV**”) síknegyedben pedig fékezőüzemben működik. Ebben az esetben a terhelés hajtja meg a villamos gépet, vagyis a jármű önsúlyának köszönhető potenciális energiától fog mozogni („**load-driven car**”). Az első és a második síknegyedben a jármű előre halad („**direct-sense speed**”), míg a harmadik és negyedik síknegyedben hátrafele („**reverse speed**”).

Az 1. ábrán feltüntetett görbék tulajdonképpen a sztatikus karakterisztikákat jelentik. Gyorsuláskor (ide tartozik az indítás is) valamint lassuláskor (azaz fékezés esetén) tranziens jelenségekről beszélünk. Ilyenkor a sztatikus terhelő nyomatékon és a motor nyomatékán kívül, még egy úgynevezett dinamikus nyomaték is megjelenik, amely meg tudja változtatni a villamos gép üzemmódját. Ebben az esetben a nyomaték egyenletben ezt az utóbbi nyomatékokat is figyelembe kell venni, melynek az értéke a sebességváltozással és a tehetetlenségi nyomatékkal (minden mozgó tömeg hatása ide tartozik) arányos.



3. ábra. Villamos motorok sztatikus mechanikai jelleggörbéi

Ha a dinamikus nyomatékot az alábbi képlettel határozzuk meg:

$$T_m - T_L = T_d, \quad (2)$$

akkor gyorsuláskor a dinamikus nyomaték pozitív, lassulás esetén pedig negatív értékű.

A 3. ábra a villamos motorokra legjellemzőbb mechanikai karakterisztikákat mutat be. Az 1-es görbe a szinkron gépekre érvényes. A 2-es az mellékáramkörű egyenáramú motorokra vonatkozik, de hasonló karakterisztikája van az állandó rotor-fluxuson működő aszinkron gépnek is. Ha a légrés- vagy az állórész fluxust tartjuk állandó értéken, akkor a Kloss féle képlet szerinti 3-as karakterisztikát nyerjük, mely hasonlít a motor klasszikus görbéire, melyeket állandó feszültség esetén nyerünk. A 4-es görbe soros-gerjesztésű egyenáramú motorokra jellemző.

Irodalomjegyzék

1. Román nyelven

- 1.1] Kelemen Árpád: **Acțiunări electrice**. Ediția II revizuită, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979.
- 1.2] Kelemen Árpád: **Acțiunări electrice**. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976.
- 1.3] Brașovan, M.: **Acțiunări electro-mecanice**. Editura didactică și pedagogică, București, 1967.
- 1.4] Brașovan, M.; Seracin, E.: **Metode noi de proiectarea acțiunărilor electrice**. Editura Academiei Române, București, 1968.
- 1.5] Fransua, A.; Saal, C., Țopa, I.: **Acțiunări electrice**. Editura didactică și pedagogică, București, 1975.
- 1.6] Tunsoiu, Gh.; Seraciu, E.; Saal, C.: **Acțiunări electrice**. Editura didactică și pedagogică, București, 1982.
- 1.7] Fransua, A.; Mărgureanu, R.: **Mașini și acțiunări electrice. Elemente de execuție**. Editura Tehnică, București, 1986.
- 1.8] Boțan, N. V.: **Bazele calculului acțiunărilor electrice**. Editura Tehnică, București, 1970.
- 1.9] Seracin, E.; Popovici, D.: **Tehnica acțiunărilor electrice**. Editura Tehnică, București, 1985.

2. Magyar nyelven

- 2.1] Imecs Mária: Villamos hajtások szabályozása mai szemmel. ENELKO 2000 Energetika-Electrotechnika Konferencia, Kolozsvár, Kiadó: EMT.
- 2.2] Boțan, N. V.; Boțan, C.; Mihoc, D.; Papadache, I.; Popescu, Șt.: Hajtástechnika és automatizálás. Tankönyv az ipari líceumok XII. osztálya számára, Editura didactică și pedagogică, București, 1979.

- 2.3] Rácz István; Csörgits Ferenc; Halász Sándor; Hunyár Mátyás; Lázár József; Schmidt István: Villamos hajtások. Tankönyvkiadó, Budapest, 1974.
- 2.4] Pálfi Zoltán: Villamos hajtások. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- 2.5] Schönfeld, R.: Villamos hajtások kézikönyve. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- 2.6] Rothenbach, G.; Vaske, P.: Villamos hajtások. Tankönyvkiadó, Budapest, 1973.
- 2.7] Kuczogi Endre: Villamos hajtások. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
- 2.8] Zimin, E. N.; Kacevics, V. L. ; Kozirjev, S. K.: Áramirányítás egyenáramú hajtások. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

3. Angol nyelven

- 3.1] Leonhard, W: Control of Electrical Drives. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1985.
- 3.2] Fransua, A.: Măgureanu, R.: Electrical Machines and Drive Systems. Technical Press, Oxford, 1984.

4. Német nyelven

- 4.1] Leonhard, W.: **Regelung in der elektrischen Antriebstechnik.** Teubner Studienbücher, Stuttgart 1987.
- 4.2] Kümmel, F.: **Electrische Antriebstechnik.** Teil 1: **Maschinen**, Teil 2: **Leistungsstellglieder.** VDE-Verlag GmbH, Berlin und Offenbach, 1989.
- 4.3] Pfaff, G; Meier, Ch.: **Regelung electrischer Antriebe.** Ed. R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1981.
- 4.4] Vogel, J.: **Grundlagen der electrischen Antriebstechnik mit Berechnungspielen.** VEB Verlag Technik, Berlin, 1977.
- 4.5] Siemens: **Handbuch der Elektrotechnik.** Siemens Aktiengesellschaft. Berlin, München, 1971.
- 4.6] VEM- Handbuch: **Die Technik der electrischen Antriebe.** Grundlagen. VEBVerlag Technik, Berlin, 1963.

Teljesítményelektronika

Dr. Imecs Mária, egyetemi tanár

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Hajtások és Robotok Tanszék

A teljesítményelektronika az erősáramú elektrotechnika egyre nagyobb jelentőségű része. Az erősáramú elektrotechnika feladata a villamos energia fejlesztése, szállítása, szétosztása és a felhasználási helyen a szükségleteknek megfelelő átalakítása, illetve szabályozása. Ebben az utóbbi két feladatban vesz részt a teljesítményelektronika, mely a villamos energiaáramlásban a villamos energia jellemzőit változtatja meg elektronikus elemek segítségével.

Tehát a teljesítményelektronika tárgya: a villamos energia kapcsolása, vezérlése és átalakítása áramirányító elemekkel, továbbá az ehhez szükséges mérő-, vezérlő- és szabályozó berendezések. A teljesítményelektronikát minden olyan esetben alkalmazzák, amikor a villamos energia átalakítása, vezérlése és érintkező nélküli kapcsolása szükséges.

Napjainkban az ipari üzemek és háztartások az energiaszükségletük túlnyomó részét villamos energiából fedezik. A villamos energiát központosítva állítják elő, azután a felhasználás helyén szükség szerint átalakítható, ugyanis a fogyasztók nem minden esetben elégíthetők ki az adott feszültségen működő 50 vagy 60 Hz-es váltakozó áramú hálózatról.

Az erősáramú iparon belül a félvezető diódák, különösen a tirisztorok felfedezésével forradalmi átalakulás kezdődött. Segítségükkel ugyanis igen jó hatásfokkal oldható meg a villamos energia szükség szerinti átalakítása. Így számos, már évtizedek óta felvetődött elképzelés vált megvalósíthatóvá. Az elméleti kutatások ma már nagyrészt lezárultak és az erősáramú elektronika ipari alkalmazása egyre tágabb körben terjed el.

A teljesítményelektronika az elmúlt évtizedekben a villamos energetika fontos területévé fejlődött. A villamos energia átalakításával és vezérlésével szembeni egyre szigorúbb követelményeknek köszönheti ma is növekvő jelentőségét. Gyors előretörését jelentősen elősegítette a nagy teljesítményű félvezetők - a szilíciumdiódák, a tirisztorok és a teljesítménytranzisztorok - megjelenése. A teljesítményelektronikára a villamos energetika minden területén szükség van. A legfontosabb alkalmazási területek az ipari hajtások, a villamos energia termelése és elosztása, a villamos hőtechnika, az elektrokerámia, a villamos vontatás és jelenleg egyre növekvő mértékben a villamos háztartási készülékek. Ezenkívül, még sok érdekes alkalmazása van egészen különleges szakterületeken, mint például a részecskegyorsítókban és más fizikai készülékekben.

A teljesítményelektronika eszközeivel kapcsolt, vezérelt és átalakított villamos energia mennyisége napról napra nő. Mivel a teljesítményelektronika fontos összekötő kapocs az energiatermelés és az energia felhasználás között, jelentősége a villamos energia vezérlésével és átalakításával szemben támasztott fokozott követelményekkel együtt növekszik.

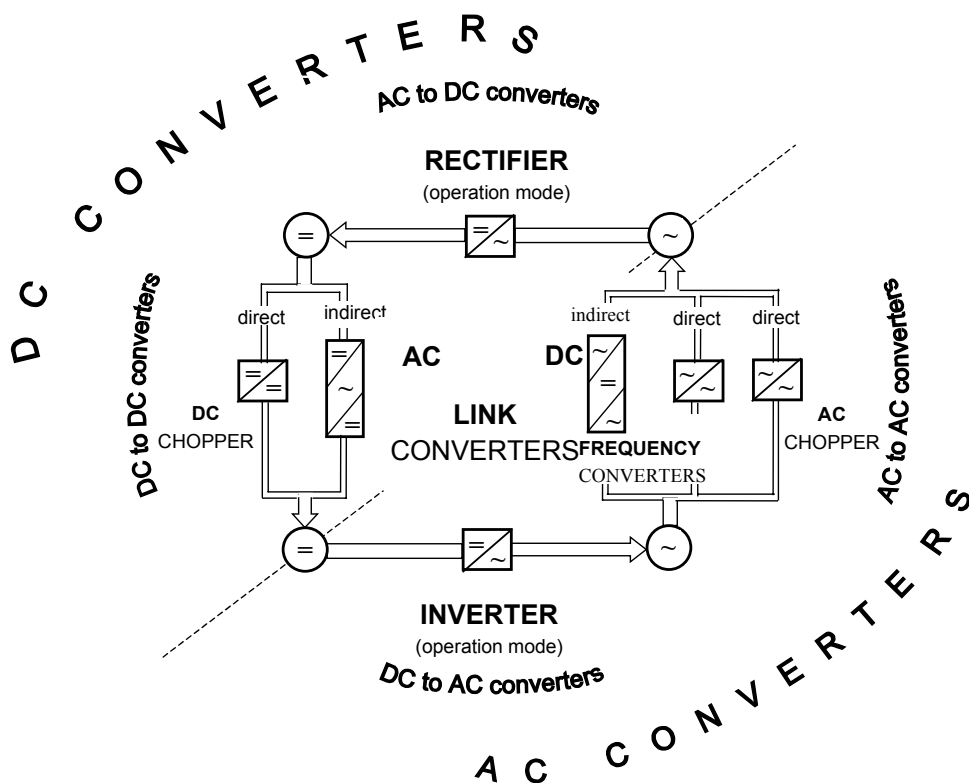
A teljesítményelektronika sokrétű. Magában foglalja a nagy teljesítményű berendezésrészeket, vagyis az áramirányító kapcsolásokat, a vezérlő- és szabályozó egységeket, a működtető áramköröket és a védelmi berendezéseket is.

A teljesítményelektronikai berendezésekben nagyteljesítményű egységet, továbbá a vezérlő- és szabályozóegységeket különböztetünk meg. Ezek a berendezésrészek ma legtöbbször egykristály félvezető építőelemekből állnak. A teljesítményegység erősáramú félvezető diódákból, tirisztorokból és nagy teljesítményű tranzisztorokból, a vezérlő- és szabályozó egységek gyengeáramú diódákból, tranzisztorokból és integrált áramkörökből épülnek fel. Ilyen alkatrészeket használva érhető el, hogy a teljesítményelektronika építőelemcsoportjai, készülékei

és berendezései azonosan nagy megbízhatóságúak legyenek. Szabályozástechnikai szempontból az áramirányító nagy teljesítményű beavatkozó szerv. A villamosenergia-forrás és az áramirányító, továbbá az áramirányító és a terhelés kölcsönösen hatnak egymásra.

Az áramirányítók legfontosabb műszaki tulajdonsága abban áll, hogy alkalmasak a villamos energia átalakítására, azaz képesek a feszültség, a frekvencia és a fázisszám megváltoztatására. Folyamatosan és gyorsan vezérelhetők és szabályozhatók valamint nagyon jó hatásfokon dolgoznak. Az áramirányítók üzemi tulajdonságai közül a nagy megbízhatóság, a kis karbantartási igény és a kismértékű kopás a legfontosabbak. A beruházási költségek az utóbbi időben csökkenő tendenciát mutatnak.

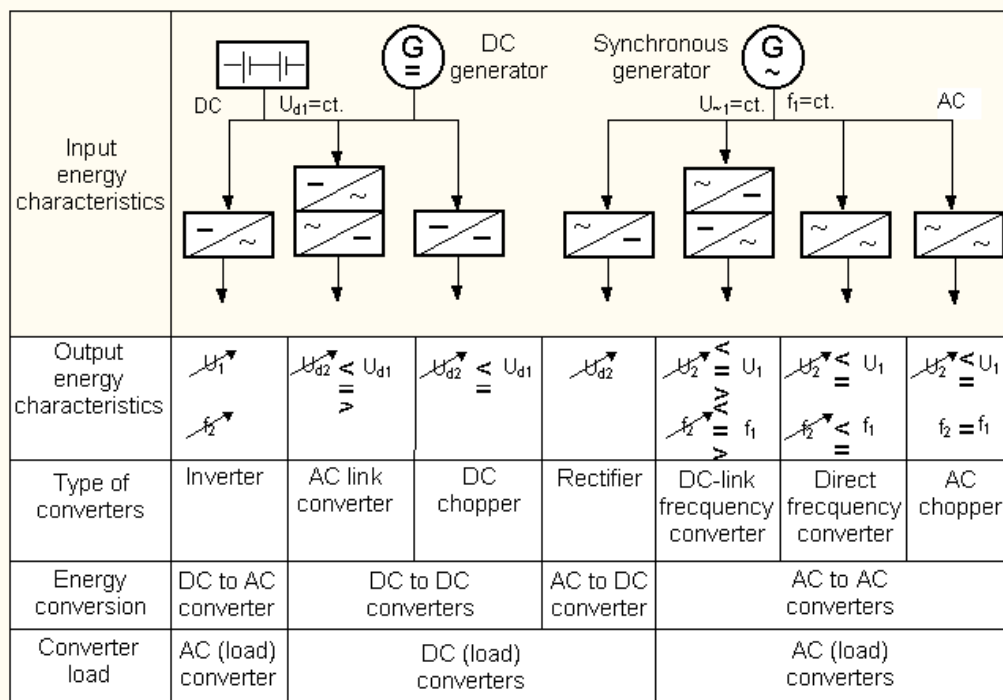
Az áramirányító berendezés a villamos energiát az úgynevezett áramirányító szelepekkel, azaz ma már teljesítmény félvezetőkkel átalakítja vagy vezérli. Az áramirányítókkal a különböző villamos hálózatok közötti energiaáramlás iránya vezérelhető. Váltakozó- és egyenáramú rendszerek összekapcsolásakor négy alapvető feladatot különböztetünk meg, mint ahogyan az 1. ábra is mutatja.



1. ábra. Az áramirányítók fajtái a villamosenergia-átalakítás szempontjából

1. *Egyenirányítás*, vagyis a váltakozó áramú energia átalakítása egyenáramú energiává. Az energia a váltakozó áramú rendszerből az egyenáramú rendszerbe áramlik.
2. *Váltóirányítás*, vagyis az egyenáramú energia átalakítása váltakozó áramú energiává. Az energia az egyenáramú hálózatból a váltakozó áramú hálózatba áramlik.
3. *Egyenáram-átalakítás*, vagyis adott nagyságú és polaritású egyenfeszültség átalakítása más nagyságú, és adott esetben ellentétes polaritású egyenfeszültséggé. Az energia az egyik egyenáramú hálózatból a másik egyenáramú hálózatba áramlik.

4. *Váltakozóáram-átalakítás*, vagyis adott nagyságú, frekvenciájú és fázisszámú váltakozó-feszültség átalakítása más nagyságú, frekvenciájú és fázisszámú váltakozófeszültséggé. Az energia az egyik váltakozó áramú hálózatról a másik váltakozó áramú hálózatra áramlik.



2. ábra. A kimeneti energia szabályozási lehetőségei a különböző áramirányító fajtáknál.

A villamosenergia-átalakításának ezt a négy alapvető formáját megfelelő áramirányítók végzik, mint ahogyan az nemcsak az 1., hanem a 2. ábrán is követhető. Mint látható, az egyenáramú áramirányítók („**DC CONVERTERS**”) azok az áramirányítók, melyek a kimenetnél egyenáramot adnak, míg a bemenetnél lehet ugyancsak egyenáram, de akár váltakozó áram is. Hasonlóképpen, a váltakozó áramú áramirányítók („**AC CONVERTERS**”) kimeneténél váltakozó áram jelentkezik és ennél is két különböző típus van, azaz egyenáramú- és váltakozó áramú bemenettel.

Az egyenirányítást egyenirányító („**RECTIFIER**”), a váltóirányítást váltóirányító („**INVERTER**”) végzi. Az egyenirányítóban és a váltóirányítóban (inverterben) az energiaáramlás lehet egyirányú vagy akár kétirányú is. Ebben az utóbbi esetben az adott áramirányítónak két üzemmódról („**operation mode**”) beszélünk, melyeket hasonlóképpen nevezünk meg. Így van olyan egyenirányító („**AC to DC converter**”), melyik működik váltóirányító üzemmódban („**inverter-operation mode**”) is, viszont, ha egy úgynevezett váltóirányítóban („**DC to AC converter**”) fordul meg az energia áramlás, azt már nem szokás egyenirányító-nak nevezni, de még az üzemmódját sem („**rectifier-operation mode**”) egyenirányításnak.

Az egyenáram átalakítást egyen/egyen átalakítók („**DC to DC converters**”) végzik. Ezek lehetnek közvetlen („**direct**”) átalakítók, mint például az egyenáramú szaggató („**DC CHOPPER**”) vagy közvetett („**indirect**”) átalakítók, azaz váltakozó áramú közbensőkörös áramirányítók („**AC LINK CONVERTERS**”).

A váltakozó áram átalakításra váltó/váltó átalakítókat („**AC to AC converters**”) használnak. Ezek között ugyancsak vannak közvetlen átalakítók, mint a váltakozó áramú szaggató („**AC CHOPPER**”) vagy a frekvenciaváltók közül („**FREQUENCY CONVERTERS**”) a közvet-

len típusúak („**Direct frequency converters**”). Az utóbbiaknál több fajta is van, mint például a klasszikusnak számító szinuszátalakító („**cyclo-converter**”) és egy újabb típus, amit matrix átalakítónak („**matrix-converter**”) neveznek. Ez az utóbbi tulajdonképpen átmenetet képez a közvetlen és a közvetett, azaz az egyenáramú-közbensőkörös frekvenciaváltók („**DC LINK FREQUENCY CONVERTERS**”) között.

Az áramirányítók által szolgáltatott energia jellemzői („**Output energy characteristics**”) a 2. ábrán vannak feltüntetve. Amint ott látható, a váltakozó áramú áramirányítóknál csak a váltakozó áramú szaggatók frekvenciája nem szabályozható.

Az egyen /egyen átalakítóban és a frekvenciaváltókban, általános esetben, az energia áramlásiránya változó is lehet. Kisebb teljesítményeknél, főleg az olcsó megoldásoknál, energiaáramlás szempontjából találkozunk egyirányú kapcsolásokkal is.

Az áramirányítók alapvető feladata nemcsak a váltakozó áramú és egyenáramú hálózatok összekapcsolása, mint ahogyan azt az 1. ábra mutatja, hanem alkalmasak aktív és passzív fogyasztók egyen- és váltakozó-áramú táplálására is. A bemenő energia fő jellemzője („**Input energy characteristics**”) minden esetben az állandó feszültség. Az egyenáram estében az energiát akkumulátorról vagy egyenáramú-generátorról („**DC generator**”) nyerjük, melyek rendszerint állandó értékű egyenfeszültséget szolgáltatnak. A váltakozó áramú energiát - a villamoshálózaton keresztül - általában váltakozó áramú, de nagyrészt szinkrongenerátorokról („**Synchronous generator**”) kapjuk, melyek a nagyjából állandó effektív értékű váltakozó áramú feszültséget ugyancsak állandó frekvencián termelik.

A felsorolt fő alkalmazási területeken kívül az áramirányítók további feladatokra is használatosak. Így vannak meddőteljesítmény-kompenzátorok vagy egyen- és váltakozó áramú kapcsolók is. Ezek az alkalmazások igaz, hogy eredetileg a villamos energia átalakítás különleges esetei közé tartoztak, de ma már egyre inkább elterjedő tendenciát mutatnak, úgyhogy már nem lehet egyöntetűen annak tartani.

A négy alapvető áramirányító fajtát a gyakorlatban sokféle kapcsolással valósítják meg. A kapcsolásokat rendszerint a kommutáció módja szerint csoportosítva tárgyalják, mert ebben hasonlítanak a működés szempontjából. Így a hasonló fizikai jelenségek könnyen követhetők a különböző kapcsolásoknál, ha azonos kommutációjú áramirányító kategóriába tartoznak.

Ilyen alapon beszélhetünk kommutáció nélküli, külső-, azaz természetes-kommutációs (hálózati vagy terhelési vezérlésű) és belső-, azaz kényszer-kommutációs áramirányítók kapcsolástechnikájáról.

A váltakozó áramú kapcsolók és szaggatók nagyjából a kommutáció nélküli kapcsolások közé sorolhatók, viszont van olyan is, mely bizonyos körülmények között természetesen is kommutálhat. Ilyenek például a háromfázisú nullvezeték nélküli váltakozó áramú szaggatók. Azonban a hagyományos egyenirányítók (ide tartozik az inverter üzemmód is), melyek hagyományosan természetes-kommutációval működnek, valamint a egyenáramú szaggatók és inverterek, melyek viszont kényszer-kommutációs kapcsolások, ugyancsak működhetnek kommutáció nélkül, abban az esetben, amikor szaggatott üzemmódba kényszerülnek. Vannak kényszer-kommutációs egyenirányítók, melyek a hálózatról szinuszos áramot szívnak maximális teljesítménytényezővel, és vannak természetes-kommutációjú váltóirányítók is, melyek a túlgerjesztett terhelő szinkrongéptől meddő teljesítményt kapnak a kommutáció elvégzésére. Ezeket áramirányítós motoroknak nevezik.

Az első váltóirányító kapcsolásokat egyenáramú szaggatókból építették, a közvetlen frekvenciaváltók (a szinuszátalakító) pedig egyenirányítókból vagy (a mátrix átalakító) váltóirányítókból állnak. A közbensőkörös frekvenciaváltók rendszerint egy vagy két természetes-kommutációjú egyenirányítóból és egy kényszer-kommutációs váltóirányítóból tevődnek

össze, viszont van olyan is, amelyik már két kényszer-kommutációs váltóirányítóból épül, azért hogy - ellentétben az előző megoldásokkal - a hálózatról maximális teljesítménytényezővel szinuszos áramot szívhassanak.

Irodalomjegyzék

1. Román nyelven

- 1.1] Kelemen Árpád; Imecs Mária: *Electronică de putere*. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983.
- 1.2] Kelemen Árpád; Imecs Mária; Matlac, Ion; Titz, Georg: **Mutatoare, aplicații**. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980.
- 1.3] Kelemen Árpád; Imecs Mária: **Mutatoare**. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978.
- 1.4] Kelemen Árpád; Imecs Mária; Marschalko Richard; Voiculescu, Emil; Koós Ferenc; Broscoi, Alexandru: **Electronică industrială - Mutatoare**. Îndrumator de laborator. Lito Institutul Politehnic Cluj-Napoca, 1982.
- 1.5] Ponner, I.: **Electronică industrială**. Editura Didactică și Pedagogică, București, 1972.
- 1.6] Möltgen, G.: **Tiristoare în practică - Mutatoare cu comutație de la rețea**. Editura Tehnică, București, 1970.
- 1.7] Meyer, M.: **Tiristoare în practica - Mutatoare cu comutație forțată**. Editura Tehnică, București, 1970.

2. Magyar nyelven

- 2.1] Imecs Mária: **Villamos hajtások szabályozása mai szemmel**. ENELKO 2000, Energetika-Elektrotechnika Konferencia, Kiadó: EMT, Kolozsvár, 2000.
- 2.2] Csáki Frigyes; Ganszki Károly; Ipsits Imre; Marti Sándor: **Teljesítményelektronika**. (3.változatlan kiadás), Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
- 2.3] Csáki Frigyes; Hermann Imre; Ipsits Imre; Kárpáti Attila; Magyar Péter: **Teljesítmény-elektronika, Példatár**. (2 átdolgozott kiadás), Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1988.
- 2.4] Marti Sándor: **Erősáramú elektronika**. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976.
- 2.5] Heumann, K.: **A teljesítményelektronika alapjai**. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- 1.8] Heumann, K.; Strumpe, A. C.: **Tirisztorteknika**. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1971.
- 2.6] Schonfeld, R.: **Villamos hajtások kézikönyve**. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977.
- 2.7] Lambert Miklós: **Tirisztor-atlasz**. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1975.

3. Angol nyelven

- 3.1] Mohan, N.; Underland, T.M.; Robbins, W. P.: **Power Electronics - Converters, Applications and Design** (Second edition). John Wiley & Sons INC., New York, 1995.

- 3.2] Dewan, S. B.; Straughen, A.: **Power Semiconductor Circuits**. John Wiley & Sons INC., New York, 1975.
- 3.3] Bose, B. K.: **Power Electronics and AC Drives**. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1986.
- 3.4] Imecs Mária: **Synthesis About Pulse Modulation Methods in Electrical Drives**. Part 1 and Part 2, CNAE'98, Craiova, Romania, pp. 19-33.
- 3.5] Imecs Mária: **Synthesis About Pulse Modulation Methods in Electrical Drives**. Part 3, Acta Universitatis CIBIENSIS, Vol. XVI Technical series, H. Electrical Engineering and Electronics, "Lucian Blaga" Univ. of Sibiu, Romania 1999, pp. 15-26.
- 3.6] Imecs Mária: **Open-Loop Voltage-Controlled PWM Procedures**. ELECTROMOTION '99, Patras, Greece, Vol. I, pp. 285-290.
- 3.7] Imecs Mária: **How to Correlate the Mechanical Load Characteristics, PWM and Field-Orientation Methods in Vector Control Systems of AC Drives**. CNAE 2000, Iași, Romania, pp. 21-30.

4. Német nyelven

- 4.1] Heumann, K.: **Grundlagen der Leistungselektronik**. Teubner Studienbuecher, Stuttgart, 1975.
- 4.2] Joetten, R.: **Stromrichtergespeiste Antriebe**. VDE, 1973.

Permanens mágnes forgórészű szinkronmotoros hajtások

Szabó Csaba, egyetemi tanársegéd

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamos Hajtások és Robotok Tanszék

Bevezetés

A teljesítményelektronika fejlődése a frekvenciaváltók megjelenését és elterjedését eredményezte. Ez lehetővé tette a szinkronmotorok széles körű alkalmazását a váltóáramú villamos hajtások területén. Fontosságukat nemcsak energiatakarékossági szempontok igazolják, hanem a szabályozás minősége is. A szinkronmotor képes reaktív teljesítményt visszaszolgáltatni a hálózatba, amennyiben kapacitív teljesítménytényezővel ($\cos\varphi < 1$) működik. Ezt az energiát más hálózati fogyasztók felhasználhatják. Ugyanakkor a szinkronmotor működtethető egységnyi teljesítménytényezővel is ($\cos\varphi = 1$).

A váltakozóáramú motoros hajtások vektoriális vezérlése a mezőorientáció elvén alapulnak. A szinkronmotorok esetében erre két alapvető lehetőség létezik: gerjesztőmező-orientáció, illetve az eredő armatúramező-orientáció. [1].

Abban az esetben, ha a gerjesztőmező nem szabályozható - a permanens mágnes forgórészű szinkronmotorok (PMFSZM) esetében - rendszerint a forgórész pozíciójának függvényében történik a kommutáció. A hajtásrendszerek működésének tanulmányozásakor szükséges a motor és a szabályozási rendszer matematikai modelljének ismerete.

A PMFSZM matematikai modellje

A motor matematikai modellje, azaz a motor működését leíró általános egyenletek rendszerint forgórészhez kötött koordinátarendszerben íródnak. A Blondel-Park elmélet segítségével, amely a változók kettős cseréjén alapszik, a motor háromfázisos szerkezetű matematikai modellje átalakul egy ezzel egyenértékű, a forgórész mágneses szerkezetéhez kötött kétfázisos ($d\theta-q\theta$) felépítésű rendszerré. Ennek következtében a motor matematikai modelljét alkotó differenciálegyenletek állandó együtthatókkal fognak rendelkezni. A $d\theta$ tengelyt hosszirányú tengelynek nevezzük, ez a forgórész pólusának mágneses tengelye. A $q\theta$ tengely az előbbire merőleges keresztirányú tengely, amelyet interpoláris tengelynek is nevezünk.

A motor villamos (áramerősség, armatúrafeszültség) illetve mágneses mennyiségei (mágneses fluxusok) egy-egy térfázor segítségével ábrázolhatóak. Ezeknek a térvektoroknak az összetevői a két említett koordinátatengely irányába mutatnak.

A permanens mágnes forgórészű szinkronmotor kétfázisos rendszerben felírt általános egyenletei a következők:

Az armatúrafeszültség összetevői:

$$u_{sd\theta} = R_s i_{sd\theta} + \frac{d\Psi_{sd\theta}}{dt} - \omega \Psi_{sq\theta} \quad (1)$$

$$u_{sq\theta} = R_s i_{sq\theta} + \frac{d\Psi_{sq\theta}}{dt} + \omega \Psi_{sd\theta}$$

Az armatúrafluxus összetevői:

$$\Psi_{sd\theta} = \Psi_{\sigma sd\theta} + \Psi_{md\theta} = \Psi_{ssd\theta} + \Psi_{PM} = L_{sd}i_{sd\theta} + \Psi_{PM} \quad (2)$$

$$\Psi_{sq\theta} = \Psi_{\sigma sq\theta} + \Psi_{mq\theta} = \Psi_{ssq\theta} = L_{sq}i_{sq\theta}$$

A légrésfluxus összetevői:

$$\Psi_{md\theta} = \Psi_{msd\theta} + \Psi_{PM} = L_{md}i_{sd\theta} + \Psi_{PM} \quad (3)$$

$$\Psi_{mq\theta} = \Psi_{msq\theta} = L_m i_{sq\theta}$$

Az elektromágneses nyomaték a következőképpen fejezhető ki:

$$m_e = k_M z_p (\Psi_{sd\theta} i_{sq\theta} - \Psi_{sq\theta} i_{sd\theta}) = k_M z_p [\Psi_{PM} i_{sq\theta} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd\theta} i_{sq\theta}] \quad (4)$$

A modellt le lehet írni állapotegyenletek segítségével is. Az állapotváltozók az állórészáramok illetve a forgórész szögsebessége. A PMFSZM modellje a feszültségegyenleteket, illetve a mozgásegyenletet tartalmazza, tehát a differenciál egyenletrendszer három állapotegyenletet fog tartalmazni. A motor modellje:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd\theta} \\ i_{sq\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_{sd}} & \omega \frac{L_{sq}}{L_{sd}} \\ -\omega \frac{L_{sd}}{L_{sq}} & -\frac{R_s}{L_{sq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd\theta} \\ i_{sq\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sd}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sq}} & -\frac{\omega}{L_{sq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{sd\theta} \\ u_{sq\theta} \\ \Psi_M \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{3}{2} \frac{z_p^2}{J} [\Psi_M i_{sq\theta} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd\theta} i_{sq\theta}] - \frac{z_p}{J} \left(m_A + m_R \text{sign} \omega + B \frac{\omega}{z_p} \right),$$

ahol Ψ_{PM} a permanens mágnes fluxusa, ω a forgórész szögsebessége, z_p a póluspárszám, B a súrlódási együttható.

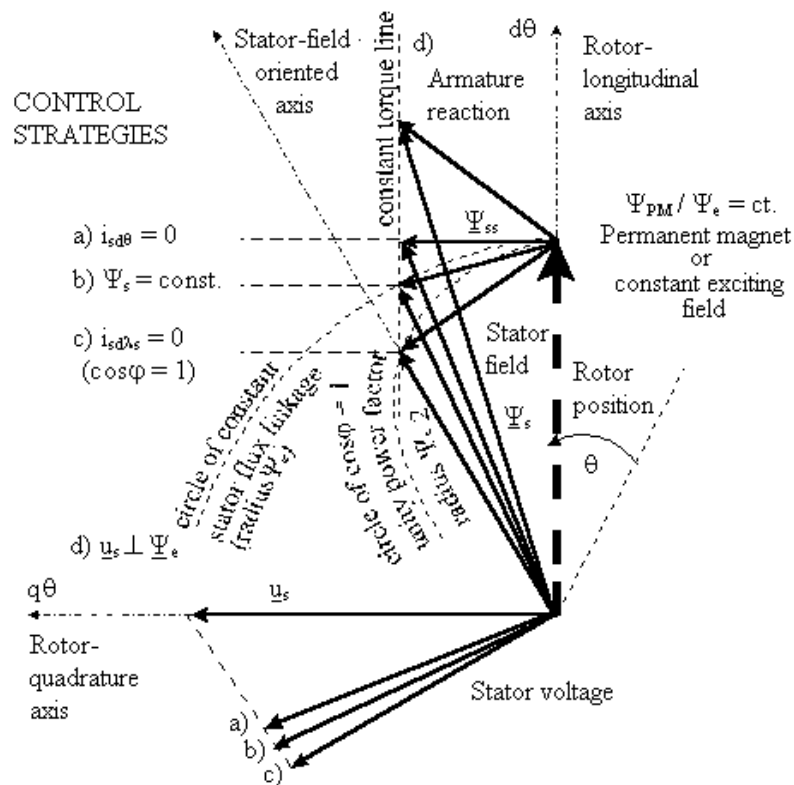
A PMFSZM vektoriális vezérlése

A PMFSZM térvektorábrája az 1. ábrán látható. Az állórész-fluxus illetve az állórész-feszültség térvektorjainak helyzetét ábrázolja, különböző vezérlési stratégiák alkalmazásakor. A $d\theta-q\theta$ vonatkoztatási rendszer forgórész-orientált. Az armatúravisszahatást a következő képlet írja le:

$$\Psi_{-ss\theta} = L_{sd} i_{sd\theta} + j L_{sq} i_{sq\theta} \quad (6)$$

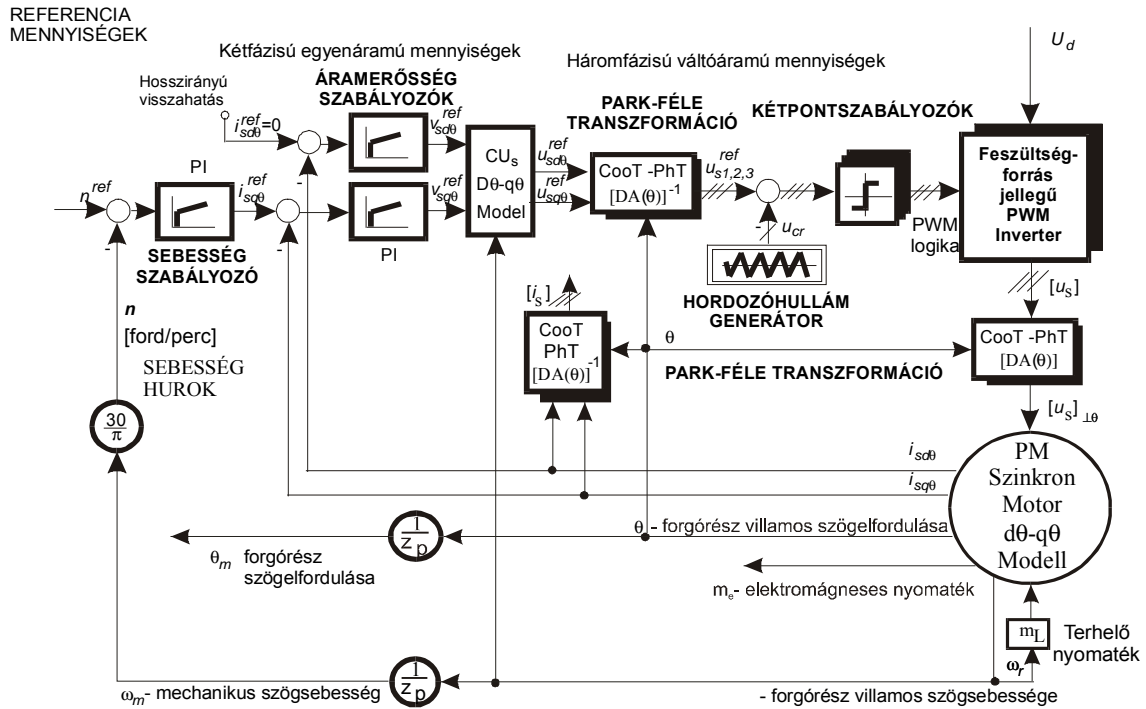
Ha a motort frekvenciaváltóról tápláljuk, alapjában véve két mennyiséget szabályozhatunk: a tápfeszültséget illetve a frekvenciát. Ebből kifolyólag a PMFSZM esetében csak két alapvető vezérlőhurkot lehet kiképezni. Az egyik a motor mechanikai (pozíció, sebesség illetve nyomaték), míg a másikon a motor mágneses mennyiségeit szabályozhatjuk. Ez utóbbi esetben négy lehetőségünk van, amint azt az 1. ábra is mutatja. Forgórész-orientált rendszerek esetében a hosszirányú armatúravisszahatás semlegesíthető, illetve létezhet olyan szabályozás, amikor az armatúrafeszültség vektora merőleges a gerjesztőmező vektorára. Armatúramező-orientáció esetén lehetséges az armatúrafluxus értékének szabályozása, illetve a motor működtethető egységnyi teljesítményteljesítővel is.

A váltóirányítót impulzushossz-modulációs (PWM) eljárással szabályozzuk. A 2. ábrán található invertert zárt hurokban szabályozzuk, áram-PWM eljárással, míg a 3. ábrán a feszültségforrás jellegű inverter szabályozása nyílt hurokban történik, hordozóhullámos PWM elv alapján.



Ezen utóbbi esetben figyelembe kell venni a mágneses keresztthatást is, az CU_s számítási blokk segítségével, amely összekapcsolja a két különálló szabályozási hurkot, amint azt a következő feszültségegyenletek is mutatják:

$$\begin{aligned} u_{sd\theta}^{\text{Ref}} &= v_{sd\theta}^{\text{Ref}} - \omega L_q i_{sq\theta} \\ u_{sq\theta}^{\text{Ref}} &= v_{sq\theta}^{\text{Ref}} + \omega L_d i_{sd\theta} + \omega \Psi_{PM} \end{aligned} \quad (7)$$

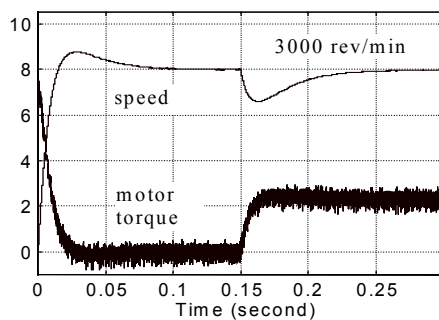


3. ábra. Feszültségforrás jellegű inverterről táplált PMFSZM gerjesztőmező-orientált szabályozásának blokkvázlata

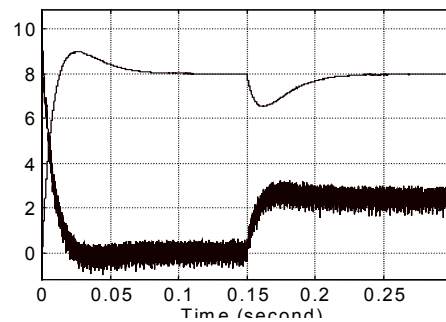
Hordozóhullámos feszültség PWM módszer esetén a modulációs logika a következőképpen alakul:

$$m_{\log} = \begin{cases} 0 & \text{at } u_{cr} < u_{s1,2,3}^* \\ 1 & \text{at } u_{cr} > u_{s1,2,3}^* \end{cases} \quad (9)$$

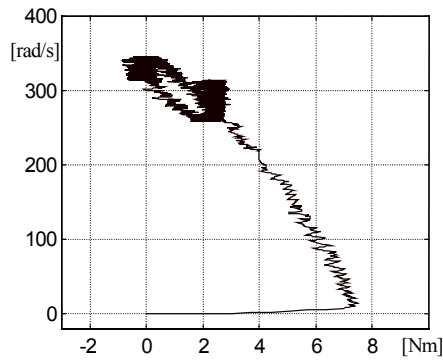
Szimulációs eredmények



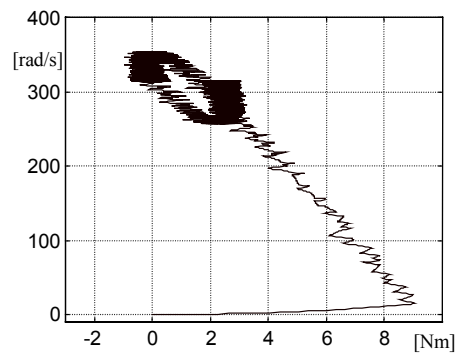
4. ábra. Fordulatszám és elektromágneses nyomaték jelleggörbék az A esetben



5. ábra. Fordulatszám és elektromágneses nyomaték jelleggörbék a B esetben



6. ábra. Mechanikai jelleggörbe az A esetben



8. ábra. Mechanikai jelleggörbe a B esetben

A PMFSZM főbb adatai:

- 500 W-os névleges teljesítmény;
- 3000 ford/perc névleges fordulatszám;
- 3 póluspár;
- 1.7 Nm névleges nyomaték;
- 1.6 A névleges áramerősség.
- permanens mágnes fluxusa 0.2334 Wb;
- tehetetlenségi nyomaték $1.84 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$;
- súrlódási együttható $5 \cdot 10^{-5} \text{ Nm (rad/sec)}^{-1}$.

Megjegyzés:

A szimulációs eredmények bemutatásakor az A esetre a 2-es ábra, a B-re a 3-as ábra vonatkozik.

Irodalomjegyzék

- 1] Kelemen A. and Imecs Maria, *Vector Control of AC Drives*, Volume 2: *Vector Control of Synchronous Machine Drives*, Ecriture-Publisher, Budapest, 1992.
- 2] Leonhard, W., *Control of Electrical Drives*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1985.
- 3] Imecs Maria, Birou I., Janky P. and Kelemen A., *High Performance Control of PM-Synchronous Servomotors Using the TMS320C5x Processor*, PCIM'97, Nuernberg, Germany, Volume: Intelligent Motion, pp. 157-166.
- 4] Imecs Maria, Birou I. and Szabo Cs., *Control Strategies for Synchronous Motors with Permanent-Magnet or Constant Exciting Current*, PCIM'99, Nuernberg, Germany, Volume: Intelligent Motion, pp. 339-344.
- 5] Imecs Maria, Szabo Cs. and Birou I., *Modelling and Simulation of Vector-Control Strategies for PM-Synchronous Motors*, Q&A-R 2000, Cluj-Napoca, Tome 2, pp. 151-156.
- 6] * * * MATLAB-Simulink, *Dynamic System Simulation Software*. User's Guide. The Math Works Inc., Massachusetts, 1992.
- 7] Imecs, Maria: (1998), Synthesis about pulse modulation methods in electrical drives. Part I and II. *In Proceedings of the 9th National Conference on Electrical Drives CNAE'98*, Craiova, pp. 18-33.
- 8] Imecs, Maria; Szabo Cs.; Birou, I.: Modelling and Simulation of Vector-Control Strategies for PM-Synchronous Motors. Q&A-R 2000, Cluj-Napoca, Romania, Tome 2, pp. 151-156.
- 9] Imecs Maria, Szabo Cs.: Permanens mágnes forgórészű szinkron motorok szabályozásának szimulációs modelljei. Energetika Elektrotechnika Konferencia, ENELKO 2000, Kolozsvár 2000, okt. 6-8, 44-50 old.
- 10] Maria Imecs, Szabo Cs.: *Synthesis about modelling and simulation of control strategies for PM-synchronous motors*. 10th National Conference on Electrical Drives, CNAE 2000, Iași 13-15 Oct. 2000. Editat de Buletinul Institutului Politehnic din Iasi. Tomul XLVI(L), Fasc. 5. pp. 182-188.

Térbeli grafikus ábrák MATLAB-ban

Dr. Szabó Loránd, adjunktus

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar

1. Bevezetés

A MATLAB (a MathWorks Inc. terméke) egy nagy hatékonyságú, interaktív, a tudományos és műszaki számítások, valamint a számítási eredmények vizuális (grafikus) megjelenítésének támogatására kifejlesztett programcsomag. Számos függvénytára alkalmassá teszi a numerikus analízis, a mátrix algebra, a jelfeldolgozás és a grafikus ábrázolás leggyakoribb feladatainak megoldására [5].

Manapság az egyik legelterjedtebb általános számítási programcsomag. Számos egyetemen oktatják és alkalmazzák a lineáris algebra, az automatikai szabályozások, a matematikai programozás és számtalan egyéb tantárgy segédeszközeként. Ugyanakkor megtaláljuk ipari környezetben is, ahol mind kutatási, mind mérnöki és matematikai feladatok megoldására felhasználják.

Széleskörű felhasználtságához nagymértékben hozzájárult bővíthetősége is. A MATLAB alapcsomagot ún. eszköztárakkal (*toolbox*) lehet kibővíteni, amelyek egy-egy speciális feladatosztály megoldására létrehozott MATLAB függvények átfogó gyűjteményei. Ezek egy részét maga a MathWorks gyártja és árulja. Ezek számos tudományterületet (digitális jelfeldolgozás, optimalizálás, irányítási rendszerek, rendszeridentifikáció, neurális hálózatok, spline-függvények, robusztus irányítás, statisztika, szimbolikus számítások és számos más témakört) lefednek. Ezen kívül bárki összeállíthat a saját alkalmazásaihoz legjobban illeszkedő saját függvénytárat. Az ilyen kiterjeszthetősége a MATLAB egyik legvonzóbb sajátossága. Azok a felhasználók, akik eszköztárukat nyilvánosan elérhetővé szándékoznak tenni, a MathWorks Inc. honlapjára (www.mathworks.com) feltehetik, ahonnan bárki érdeklődő letöltheti. Ekképp a nyilvánosan hozzáférhető eszköztárak köre folyamatosan bővül.

A jelen dolgozatnak nem célkitűzése a MATLAB programcsomag teljes megismertetése, csak egy kis részének (a háromdimenziós grafikák elkészítésének) viszonylag részletes ismertetése és egy lehetséges felhasználási területük (a villamos gépek karakterisztikáinak paraméterfüggő ábrázolása) bemutatása. Mindehhez természetesen feltételezi az olvasó alapfokú jártasságát a MATLAB programozás és a villamos gépek területén.

A MATLAB programozási környezet nagyszámú függvénnyel támogatja a kétváltozós függvények térbeli grafikus ábrázolását. Ezek egyik érdekes alkalmazási területe a villamos gépek karakterisztikáinak paraméterfüggő ábrázolása.

2. Háromdimenziós grafika MATLAB-ban

A MATLAB számtalan lehetőséget nyújt háromdimenziós rajzok készítésére (főként kétváltozós függvények ábrázolására). Segítségével könnyen rajzolhatunk térbeli görbéket, felületeket vagy akár megvilágított felületeket is.

Egy kétváltozós $z=f(x,y)$ függvény ábrázolásához először egy rácsot kell definiálni az x - y síkban. Ennek csomópontjaiban számolja majd ki a program az ábrázolandó függvény értékeit.

A rácsdefiniálás a MATLAB-ban nagyon egyszerű. Erre használatos a **meshgrid** függvény, amelynek legelterjedtebb szintaktikája a következő:

[X,Y]=meshgrid(x,y)

Ez a függvény az x és y monoton növekvő, állandó lépéstávolságú vektor által definiált síktartománynak megfelelően az X és Y mátrixot (táblázatot). Ha x n -méretű és y m -méretű, akkor X és Y egyaránt $n \times m$ méretű lesz. Az X úgy keletkezik, hogy az x vektort m -szer egymás alá helyezzük, az Y pedig úgy, hogy az y -t oszloponként n -szer egymás után írjuk. Ez a két mátrix arra jó, hogy az összes felvett rácspontban definiálhassuk a kétváltozós függvényt.

1. Példa

Az alábbi programrész:

```
x=1:1;  
y=-2:0.5:3;  
[X,Y]=meshgrid(x,y);
```

előállítja az X és Y mátrixot, amelyek meghatározzák az adott síktartományon definiált rács csomópontjait:

$X =$

```
-1  0  1  
-1  0  1  
-1  0  1  
-1  0  1  
-1  0  1  
-1  0  1
```

és

$Y =$

```
-2 -2 -2  
-1 -1 -1  
0  0  0  
1  1  1  
2  2  2  
3  3  3
```

2. 1. Szintvonalas ábrázolások

Egy adott kétváltozós $z=f(x,y)$ függvényt ábrázolhatunk mind két- és háromdimenziós szintvonalakkal. A két dimenziós szintvonalak hasonlóak a térképészetből közismert magassági szintvonalakkal. Két szomszédos szintvonal közötti távolság érzékelteti a két szint közötti magasságkülönbséget. A szintvonalas ábrázolásra MATLAB-ban a **contour** utasítást használjuk.

Az elkövetkezőkben valamennyi példa esetében az alábbi kétváltozós függvényt fogjuk ábrázolni:

$$z(x, y) = 3(1-x)^2 e^{x^2-(y+1)^2} - 10\left(\frac{x}{5} - x^3 - y^3\right) e^{-x^2-y^2} - \frac{1}{3} e^{-(x+1)^2-y^2} \quad (5)$$

Ennek a függvénynek látványos a térbeli ábrázolása, ezért a MathWorks is valamennyi példaprogramjában ezt a függvényt ábrázolja. A függvény a **peaks.m** állományban található meg.

A **contour** függvényt többféleképpen hívhatjuk, amelyek közül csak a lényegesebbeket említjük:

```
contour(X,Y,Z)
C=contour(X,Y,Z)
[C,h]=contour(X,Y,Z)
contour(X,Y,Z,n)
contour(X,Y,Z,v)
```

Az első esetben **X** és **Y** az adott síktartománynak megfeleltetett és egy **meshgrid** utasítással előállított mátrix. A **Z** mátrix pedig tartalmazza a meghatározott rácspontokban az ábrázolandó függvény értékeit. Ebben az esetben a MATLAB az ábrázolandó kétváltozós függvény 10 szintvonalát rajzolja ki.

Amennyiben a második szintaktikát alkalmazzuk, a 10 szintvonal mellett az ún. szintvonal-mátrixot (**C**) is megkapjuk. Ez egy kétsoros mátrix, amely egymás után tartalmazza az ábrázolt szintekhez tartozó szintvonalak koordinátáit. Ez hasznos lehet a szintvonalak címkézésénél.

A következő esetben a megrajzolt grafikus objektum azonosítóját (**h**) is megkapjuk.

Az utolsó két szintaktika alkalmazásával előírhatjuk az ábrázolandó szintvonalak számát (**n**), illetve megadhatjuk a **v** vektorban azokat az értékeket, amelyekhez tartozó szintvonalakat akarjuk ábrázolni.

1. Példa

*Vizsgáljuk meg a **contour** utasítás különböző szintaktikáival előállított grafikákat.*

```
% Racsponatok definialasa
[X,Y]=meshgrid(-3.75:0.05:3.5);

% A pelda fuggveny ertekeinek maeghatározasa a definialt racspontokban
Z=peaks(X,Y);

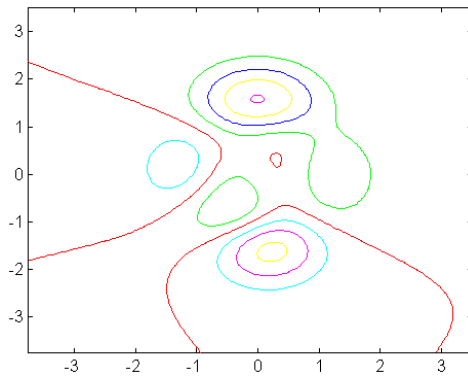
% A szintvonalak abrazolasa
contour(X,Y,Z)
```

Ezzel az utasítással az 1. ábrán látható grafikát állítjuk elő.

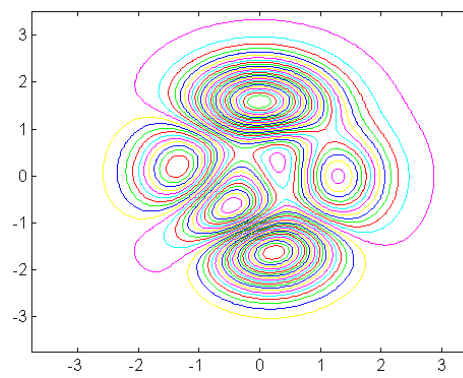
Amennyiben 50 szintvonalat szeretnénk ábrázolni, akkor az alábbi utasítást kell kiadni:

```
contour(X,Y,Z,50)
```

és ekkor a 2. ábrán látható szintvonalas ábrázolást kapjuk.



1. ábra



2. ábra

A következő programrészletben csak a v vektorban megadott értékekhez tartozó szintvonalakat fogjuk ábrázolni 1,5 vastagságú sötétkék vonalak segítségével.

```
% Az abzazolando szintvonalknak megfelelo ertekek megadasa
v=[-1:2:7];

% A szintvonalak abzazolasa, a szintvonalmatrix es a
% grafikus azonosito lekerese
[C,h]=contour(X,Y,Z,v,'b');

% A vonalvastagsag beallitasa
set(h,'LineWidth',1.5);
```

Az ekképp előállított grafikus ábrázolás a 3. ábrán látható.

Lehetőség van a negatív és pozitív értékeknek megfelelő szintvonalakat különböző vonaltípussal ábrázolni. Ehhez a Z mátrix feltöltése után az alábbi programrészt kell betáplálni:

```
% Az abzazolando szintvonalknak megfelelo negativ ertekek megadasa
v_neg=-3:0.5:-1;

% Az abzazolando szintvonalknak megfelelo pozitiv ertekek megadasa
v_poz=1:0.5:7;

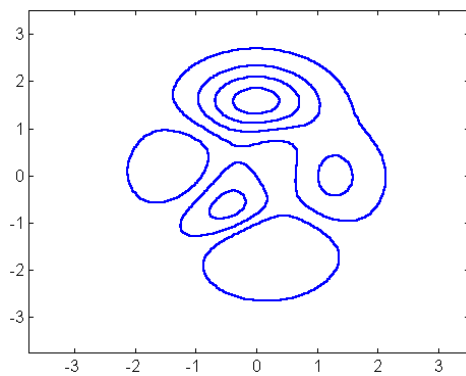
% A szintvonalak megazjzolasa
% - a negativ ertekeknek megfeleloket szaggatott kek vonallal
contour(X,Y,Z,v_neg,'b--');

hold on

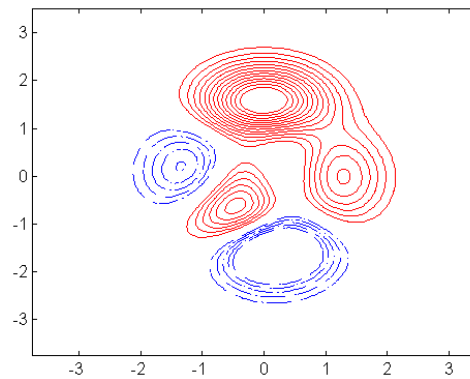
% - a pozitiv ertekeknek megfeleloket folytonos piros vonallal
contour(X,Y,Z,v_poz,'r-');

hold off
```

Az eredmény a 4. ábrán látható.



3. ábra



4. ábra

A MATLAB lehetőséget nyújt a **clabel** utasítás által a kirajzolt szintvonalak címkézésére (a nekik megfelelő értékek kiírására). Ennek leggyakrabban használt változatai a következők:

```
clabel(C)
clabel(C,v)
clabel(C,'manual')
```

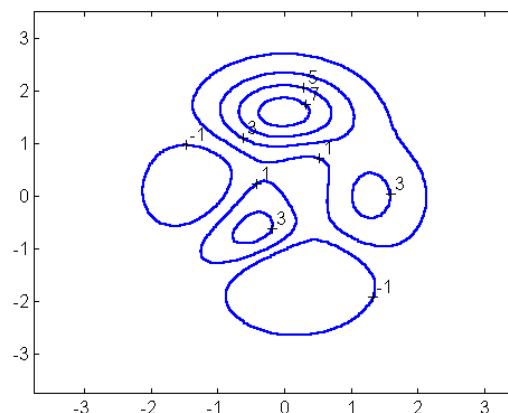
Az első utasítás a már kirajzolt szintvonalak mellé automatikusan kiírja a nekik megfelelő értékeket. A második szintaktust használva előírhatjuk, hogy csak a *v* vektorban megadott értékekhez tartozó szintvonalakat címkézzé meg. Az utolsó lehetőség a szintvonalak kézi címkézése. Ekkor csak arra a helyre rakja a címkét, amelyre az egér bal gombjával rákattintottunk. A címkézési eljárást ebben az esetben a "return" billentyű lenyomásával fejezhetjük be.

2. Példa

A 3. ábrán látható grafikus ábrázolás szintvonalaink automatikus címkézését az alábbi utasítás elvégzésével valósíthatjuk meg:

```
clabel(C)
```

A címkézett szintvonalak az 5. ábrán láthatóak.



5. ábra

Háromdimenziós szintvonalakat a **contour3** utasítással rajzolhatunk. Valamennyi a **contour** utasításnál ismertetett szintaktika itt is alkalmazható.

3. Példa

Ábrázoljuk 30 darab, 1,5 vastagságú, térbeli szintvonallal az (1) függvényt. A kapott ábrát lássuk el címmel, a tengelyeket címkézzük meg és helyezzünk egy rácsot a koordináta rendszerre.

Ennek megoldására az alábbi programot használhatjuk:

```
% A függvény értékeinek meghatározása az adott siktartományban
[X,Y]=meshgrid(-3.75:0.25:3.5);
Z=peaks(X,Y);

% A 30 térbeli szintvonal rajzolása
[C,h]=contour3(X,Y,Z,30);

% A vonalvastagság beállítása
set(h,'LineWidth',1.5)

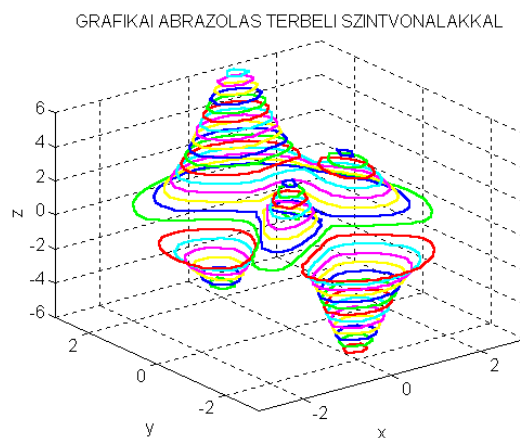
% A térbeli rács elhelyezése a koordináta rendszerre
grid on

% A tengelyek minimumának és maximumának beállítása
axis([-3,3,-3,3,-6,6])

% A három tengely címkézése
xlabel('x')
ylabel('y')
zlabel('z')

% A rajz címenek megadása
title('GRAFIKAI ABRAZOLÁS TERBELI SZINTVONALAKKAL')
```

A program futtatása nyomán a 6. ábrán látható rajzot kapjuk



6. ábra

Amint az ábrából jól kitűnik, a térbeli szintvonalas ábrázolás kifejezőbb mint a kétdimenziójú szintvonalakkal való ábrázolás.

2.2. Háromdimenziós felületek rajzolása

A MATLAB a megadott háromdimenziós adatok (például egy kétváltozós függvény értékei a definiált síktartomány rácspontjaiban) alapján egy hálószerű felületet rajzol. Egyenes vonallal összeköti a szomszédos pontokat, így olyan eredményt kapunk, mintha egy olyan hálót borítottunk volna az adott felületre, amelynek a csomópontjai a megadott pontok, de csak a háló látszik az ábrán.

A kétváltozós függvény hálós megjelenítése esetében első lépésként szintén szükséges a síktartományon definiált rácsozat elkészítése és a függvényértékek kiszámítása a rácspontokban. Ezután a **mesh** parancsot kell használnunk, amelynek általános szintaktusa:

```
mesh(X,Y,Z,C)
```

ahol **X**, **Y**, és **Z** ugyanazt jelenti, mint a **contour** parancs esetében. A háló színezését a **C** mátrix adja meg. Amennyiben ezt nem adjuk meg, akkor a színeket sorban egyesével veszi az egyes hálóelemekre vonatkozóan.

A **mesh** utasításnak további három változata is van: **meshc** (a háló alá pótlólagosan egy szintvonalat is készít), **meshz** (a háló alá egy rácsvonalrajzot is készít) és a **waterfall** (amelyik hasonló a **meshz**-hez, de a hálót és a rácsot alkotó vonalakat csak egy irányba rajzolja).

Hasonló módon lehet a kétváltozójú függvényeket folytonos, színezett felülettel is ábrázolni. Erre a **surf** utasítást használhatjuk, aminek szintaktusa megegyezik az előbbi utasításáéval:

```
surf(X,Y,Z,C)
```

4. Példa

Ábrázoljuk háló, illetve színes felület segítségével az (1) kétváltozós függvényt.

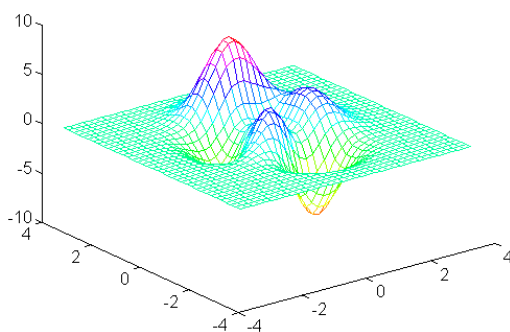
```
% A függvény értékeinek meghatározása az adott síktartományban
[X,Y]=meshgrid(-3.75:0.2:3.5);
Z=peaks(X,Y);
% A hálós ábrázolás kirajzolása
mesh(X,Y,Z)
```

A kapott rajz a 7. ábrán látható.

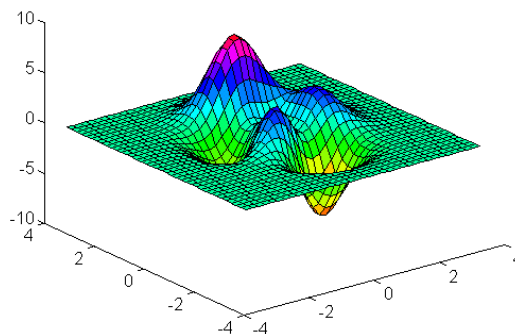
A színes felülettel való ábrázoláshoz az utolsó utasítást az alábbira kell cserélni:

```
surf(X,Y,Z)
```

és akkor a 8. ábrán látható megjelenítést kapjuk.



7. ábra



8. ábra

Akárcsak a **mesh** utasításnak, a **surface** függvénynek is számos változata van: **surf** (a meg-rajzolt felület alá szintvonalakat is rajzol), **surfl** (ebben az esetben megadható a felület megvilágásának pontja), valamint **surfnorm** (az ábrázolt felületen kívül valamennyi rácspontban kirajzolja az egységnyire normált külső normális vektorokat is).

A háromdimenziós felületekkel ábrázolt kétváltozós függvények könnyebb kiértékelését segítik a grafikus ablakba, az ábrázolt felület mellé rajzolt színskálák. A színárnyalatok mellé ki van írva, hogy melyik szín milyen értéknek felel meg. A színskálát a **colormap** utasítással rajzolhatjuk, amelynek két lehetséges szintaktusa a következő:

```
colorbar('helyzet')
```

ahol a **helyzet** lehet **vert** vagy **horz** (az első esetben egy függőleges, míg a másik esetben egy vízszintes színskálát kapunk). Amennyiben az utasítást argumentum nélkül adjuk, a gép automatikusan függőleges színskálát rajzol.

5. Példa

Ábrázoljuk ismét hálót, illetve színes felület segítségével az (1) kétváltozós függvényt úgy, hogy egy függőleges, illetve vízszintes színskálát is tüntessünk fel a grafikus ablakban.

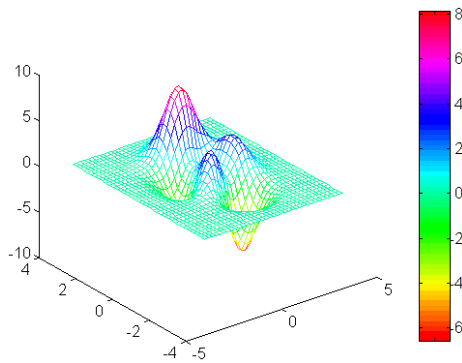
*Ebben az esetben a **Z** mátrix generálása után az alábbi két-két programsort kell megadnunk:*

```
mesh(X,Y,Z)
colorbar
```

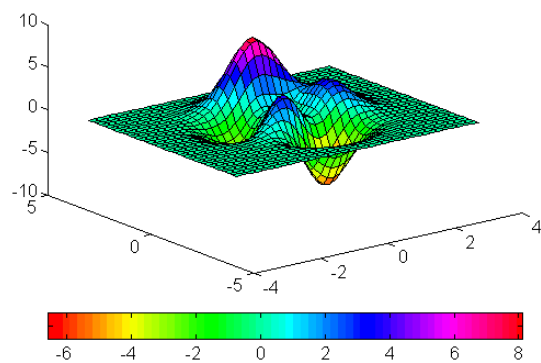
illetve:

```
surf(X,Y,Z)
colorbar('horz')
```

Az így kapott két grafikus ábrázolás a 9. és 10. ábrán látható.



9. ábra



10. ábra

2.3. Egyéb háromdimenziós grafikák

A felsoroltak mellett a MATLAB számos egyéb háromdimenziós ábrázolási lehetőséget nyújt. Ezeket itt gyakorlatilag csak összefoglaljuk, részletes ismertetésükre nem térünk ki.

A kétdimenziós ábrázolásokból ismert **plot** utasítás háromdimenziós megfelelője a

```
plot3(x,y,z)
```

amelyik kirajzolja, és egy vonallal összeköti az **x**, **y**, és **z** vektor által megadott háromdimenziós koordinátájú összes pontot. A **plot** utasítás valamennyi változata ennél az utasításnál is megvan.

Az ugyancsak a kétdimenziós ábrázolásokból ismert **fill** utasításnak is van térbeli ábrázolást lehetővé tevő megfelelője:

```
fill3(x,y,z,c)
```

amelyik egy kiszínezett háromdimenziós poligont rajzol. A poligon csúcsait az **x**, **y**, **z** vektor határozza meg, míg **c** adja meg a kitöltés színét.

A **cylinder** utasítással megrajzolható bármely vonal **z**-tengely körüli forgatásával nyert térbeli felület. Segítségével rajzolhatunk hengert, kúpot vagy csonkakúpot, valamint más, összetettebb térbeli alakzatot. Gömböt a **sphere** függvénnyel rajzolhatunk a legkönnyebben.

2.4. A térbeli grafikák kezelése

Egy térbeli ábrát jobban meg lehet érteni, ha meg tudjuk nézni különböző nézőpontokból, illetve ha rá tudunk nézni különböző szögekből. Ezeket a **view** paranccsal tehetjük meg, amelynek két gyakran használt hívási módját adjuk meg itt:

```
view(v,h)
view([x,y,z])
```


Az első esetben két adatot kell megadni (szögben): a nézőpont \mathbf{v} oldalszögét (az x - y síkban való elfordulás szögét az óramutató járásával ellentétesen), illetve \mathbf{h} emelkedési szögét. A másik esetben a nézőpont három koordinátáját kell definiálni.

6. Példa

Nézzük meg a 8. ábrán látható felületet az x -irányú oldalnézetből, illetve egy magas emelkedésű szögből.

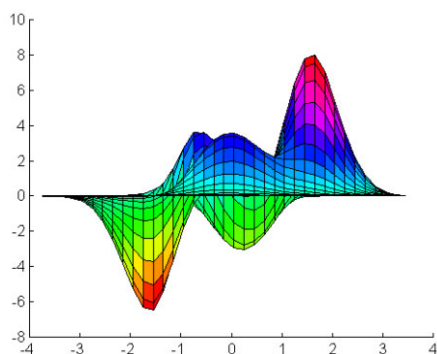
Ebben az esetben pótlólag az alábbi két utasítást kell megadnunk:

```
view([1,0,0])
```

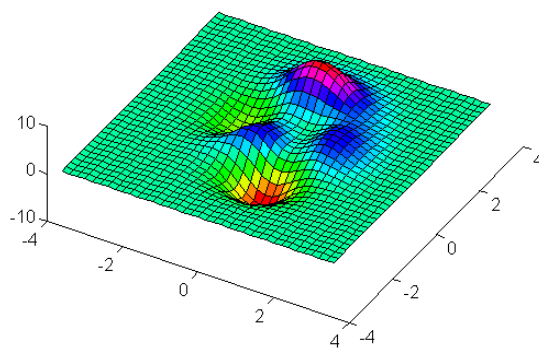
illetve:

```
view(30,65)
```

Az így kapott két grafikus ábrázolás a 11. és 12. ábrán látható.



11. ábra



12. ábra

A háromdimenziós grafikák értelmezését nagy mértékben segíti színezésük. A MATLAB lehetővé teszi a felhasználó számára, hogy maga állítsa az ábrák színeit és a megvilágítását.

A **shading** utasítás állítja be a felületek rajzolási módját:

```
shading faceted
shading flat
shading interp
```

Az első esetben (ez a program alapértelmezése) az ábrán a hálónonalak is látszanak. A második beállításakor az egyes kis felületek (rácsszemek) konstans színnel kerülnek kirajzolásra, míg az utolsó esetben a felület kirajzolásakor a csomópontok színeinek színinterpolációját használja. Az utóbbi esetben szebb színátmenetet kapunk az ábrán.

A MATLAB a felületek kiszínezésénél ún. színtérképeket használ. Ez egy $m \times 3$ méretű mátrix, amelynek m színt határoz meg. A mátrix elemei 0 és 1 közötti értékek, amelyek megadják, hogy az RGB (piros, zöld és kék) színek milyen arányban vannak az adott színben. A használt színtérkép beállításait a **colormap** utasítással végezhetjük el. Ennek számos hívási módja van, amelyekből csak az alábbiakat ismertetjük:

```
colormap(szinterkep_nev(n))
colormap(C)
C=colormap
```

Az első esetben meghatározza, hogy az **m** színskálát tartalmazó **szinterkep_nev** nevű színtérképet használjuk. Az **m** argumentum hiányozhat, ebben az esetben az alapértelmezés alapján **m=64**. A MATLAB 11 beépített színtérképet kínál: **gray** (szürke színek árnyalata), **hsv** (telten fénylő színek a pirostól a kéken át ismét a pirosig - ez a program alapértelmezése), **hot** (forró színkeverék), **cool** (hideg színkeverék), **bone** (késszürke színárnyalat), **copper** (a réz színéhez hasonló vöröses színskála), **pink** (rózsaszín színskála), **flag** (az angol és amerikai zászlóban fellelhető piros, fehér, kék és fekete színek ciklikus változtatása), **prism** (ciklikusan változnak a szivárvány színei: piros, narancssárga, sárga, zöld, kék és ibolyaszín) **jet** (a meleg színektől a hideg színekig), valamint **white** (tisztán csak fehér színt használ).

Lehetőség nyílik a felhasználónak saját színtérképet is készíteni. Ekkor ezt a háromszlopos **C** mátrixba tölti be és a második szintaktussal alkalmazza az ábrázoláshoz. Az utolsó változat használatával megkaphatjuk az éppen érvényes színskálát meghatározó **C** mátrixot. A **caxis** utasítás segítségével használhatjuk a beépített színskáláknak csak egy részét.

A háromdimenziós ábrák élességét és kontrasztját a **brighten**, illetve **contrast** utasítással állíthatjuk be. Ezek gyakorlatilag a színtérképet módosítják.

7. Példa

Nézzük meg a 8. ábrán látható felületet más színezéssel.

Először a felület generálása után adjuk ki az alábbi két utasítást:

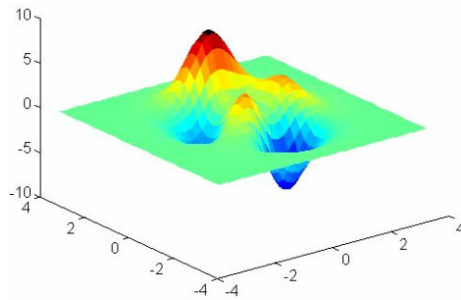
```
shading flat
colormap(jet(250))
```

A 13. ábrán látható az ekképp megjelenített grafikus ábrázolás.

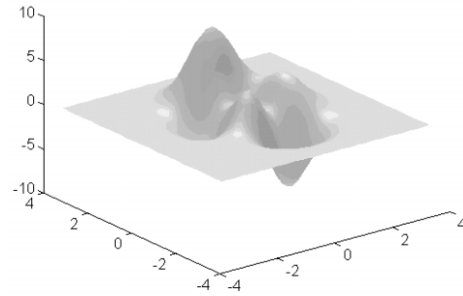
*Használhatjuk most a **surf** utasítást az eddignél különböző színbeállításokkal. A kapott felületet világítsuk meg felülről.*

```
surf(X,Y,Z,[0,90])
colormap(pink)
shading interp
```

A kapott grafikus ábrázolás a 14. ábrán látható.



13. ábra



14. ábra

3. A villamos gépek karakterisztikáinak paraméterfüggő ábrázolása térbeli grafikákkal

A fennebb ismertetett háromdimenziós grafikai lehetőségeket felhasználhatjuk a villamos gépek karakterisztikáinak paraméterfüggő ábrázolása.

Például a külső- és söntgerjesztésű egyenáramú gépek estében (amikor jelleggörbe-módosító külső ellenállás is van az áramkörben) a sebességi jelleggörbe egyenlete a következő:

$$\Omega = \frac{U - (R_a + R_{ext})I_a}{K_e \Phi} \quad (5)$$

ahol Ω a sebesség, U a kapcsolófeszültség, R_a az armatúra ellenállás, R_{ext} a külső ellenállás, I_a az armatúra áram, K_e a gép feszültség állandója, Φ pedig a gerjesztett hasznos fluxus.

8. Példa

Ábrázoljuk az alábbi adatokkal rendelkező külső gerjesztésű egyenáramú gép sebességi jelleggörbéit különböző külső ellenállási értékeknél:

$$U_N = 220 \text{ V}$$

$$R_a = 0.82 \text{ } \Omega$$

$$\Omega_N = 50 \cdot \pi \text{ rad/s}$$

$$I_N = 22 \text{ A}$$

$$K_e \Phi = 1.285 \text{ Vs}$$

A külső ellenállás változzon 0-tól 7 Ω -ig (1-1 Ω -onként).

A kért 8 karakterisztikát ábrázoló MATLAB program a következő:

```

clear all; clf

% A gép adatai
UN=220; %[V]
Ra=0.82; %[ohm]
OmegaN=50*pi; %[rad/s]
IN=22; %[A]
KeFi=1.285; %[Vs]

% For ciklus a különbozo karakterisztikak megrajzolasara
for Rext=0:7;
    I=0:0.1:25;
    Omega=(UN-(Rext+Ra)*I)/KeFi;
    plot(I,Omega,'b','LineWidth',1.5)
    hold on
end

axis([0,30,0,180])
xlabel('I [A]')
ylabel('\Omega [rad/s]')
hold off

% For ciklus a karakterisztikak cimkezesere
for Rext=0:7;
    I=25;
    Omega=(UN-(Rext+Ra)*I)/KeFi;
    stext(I,Omega,[' R_{ext}=',num2str(Rext),' \Omega'])
end

```

A megrajzolt karakterisztikák a 15. ábrán láthatóak.

Ezután ábrázoljuk az előbbi karakterisztikákat térbeli grafika segítségével.

```

clear all; clf

% A racs generalasa
Rext=0:0.5:7;
I=0:25;
[X,Y]=meshgrid(I,Rext);

% A Z matrix feltoltese

nrx=0;
for x=I
    nrx=nrx+1;
    nry=0;
    for y=Rext
        nry=nry+1;
        Z(nry,nrx)=mcc1(x,y);
    end;end;

```

```

% A karterisztikák halos abrazolasa
mesh(X,Y,Z)

% A halo atlatszova tetele
hidden off

grid

% A nezopont beallitas
view([1,1,1])
axis([0,25,0,7,0,175])

% A tengelybeosztasok megadasa
set(gca,'Xtick',0:5:25)
set(gca,'Ytick',[0,2,4,6,7])
set(gca,'Ztick',0:25:175)

% a tengelyek cimkezes
xlabel('I [A]')
ylabel('R_{ext} [\Omega]')
zlabel('\Omega [rad/s]')

```

Ebben a programban a sebesség értékét egy előre megírt, kétváltozójú függvény (*mcc1*) segítségével kapjuk meg a paraméterek függvényében. E függvény a következő programsorokat tartalmazza és kötelező módon a *mcc1.m* névvel van elmentve.

```

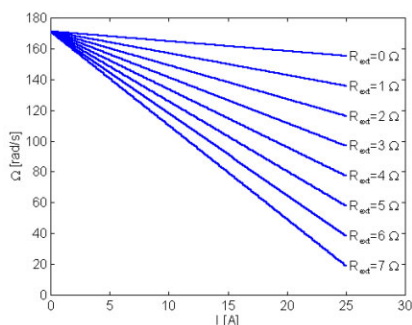
function Omega=mcc1(I, Rext)

% A gep adatai
IN=22; % [A] UN=220; % [V]
Ra=0.82; % [ohm]
OmegaN=50*pi; % [rad/s]
IN=22; % [A]
KeFi=1.285; % [Vs]

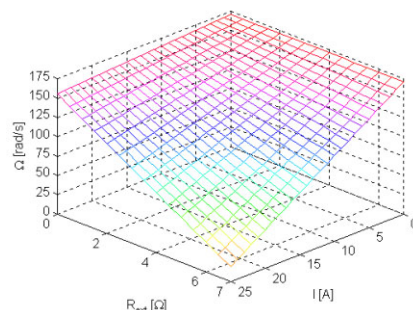
% a sebesseg kiszamitasa
Omega=(UN-(Rext+Ra)*I)/KeFi;

```

Az így kapott térbeli grafikus ábrázolás a 16. ábrán látható.



15. ábra



16. ábra

Amint a két ábra összehasonlításából tisztán kitűnik, a térbeli ábra sokkal kifejezőbben mutatja meg a külső ellenállás hatását a sebesség változására, mint a klasszikus ábrázolásmód.

A hálót azért rajzoltuk átlátszónak, hogy könnyebben le lehessen olvasni az adatokat az ábráról. Amennyiben erre nincs szükség, a hidden parancsot át lehet állítani on-ra, vagy esetleg egy surf paranccsal, egy felülettel is lehet ábrázolni a kapott eredményeket. Ekkor egy színskálával is segíthetjük az ábra értelmezését.

A csúszógyűrűs aszinkron motor mechanikai jelleggörbáját, $M=f(s)$ (az elektromágneses nyomaték a csúszás függvényében) a következő egyenlet írja le:

$$M = \frac{m_1 p R_2'}{2\pi f_1 s} \frac{U_{f1}^2}{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (6)$$

ahol m_1 a fázisok száma, p a póluspárok száma, U_{f1} , illetve f_1 a táplálási feszültség és ennek frekvenciája, R_1 az állórész ellenállása, R_2' az állórészre redukált forgórész körüli ellenállás, X_1 a primer tekercselés szórási reaktanciája, X_2' pedig a forgórész tekercselés redukált szórási reaktanciája.

A csúszógyűrűs aszinkron motor fordulatszáma változtatása elterjedten a forgórész körbe kapcsolt szimmetrikus ellenállások változtatásának segítségével valósítható meg.

9. Példa

Ábrázoljuk az alábbi adatokkal rendelkező csúszógyűrűs aszinkron motor mechanikai jelleggörbáját a forgórész körbe kapcsolt különböző szimmetrikus ellenállások esetében.:

$$m_1=3, p=3$$

$$U_{f1}=220 \text{ V}, f_1=50 \text{ Hz}$$

$$R_1=0,472 \, \Omega, \quad R_2'=0,568 \, \Omega$$

$$X_1=2,3 \, \Omega, \quad X_2'=2,272 \, \Omega,$$

A forgórész teljes ellenállást változtassuk R_2' -től $11 \cdot R_2'$ -ig.

A kért mechanikai karakterisztikákat a következő MATLAB programmal rajzolhatjuk meg:

```
clear all; clf
% A gép adatai
UN=220; % [V]
m=3;
p=3;
f=50; % Hz
R1=0.472; % ohm
R2=0.568; % ohm
X1=2.3; % ohm
```

```

X2=2.272; %ohm

% For ciklus a kulonbozo karakterisztikak megrajzolasara
nr=0;
for k=1:2:11;
    nr=nr+1;
    s=-2:0.005:2;
    if s==0 M=0;
    else
        M=m*p/2/pi/f*k*R2./s*UN^2./((R1+k*R2./s).^2+(X1+X2)^2);
    end
    % Ket vektor feltoltese a kiszamitott karatkteristikakkal
    SS(:,nr)=s';
    MM(:,nr)=M';
end
% A 6 karakterisztika megrajzolasa
plot(SS,MM,'LineWidth',1.5)
xlabel('s')
ylabel('M [Nm]')
% Az abra szin-magyarazatanak meghatarozasa
h=legend('R2','3R2','5R2','7R2','9R2','11R2');
grid on
% A racsozat eltuntetese a szin-magyarazatbol
axes(h);
refresh

```

A megrajzolt 6 karakterisztika a 17. ábrán látható.

Ezután ábrázoljuk a mechanikai karakterisztikákat most térbeli grafika segítségével.

```

clear all; clf
% A racs definialasa
k=1:0.5:11;
s=-2:0.25:2;
[X,Y]=meshgrid(s,k);
% A Z matrix feltoltese
nrx=0;
for x=s
    nrx=nrx+1;
    nry=0;
    for y=k
        nry=nry+1;
        Z(nry,nrx)=mas1(x,y);
    end;end;
% A terbeli abrazolas felulettel
surf(X,Y,Z)
% A szinskala berajzolasa

```

```

colorbar
grid
    % A nezopont meghataro
view(15,50)
    % A tengely, ill. a tengelybeosztasok meghatarozasa
axis([-2,2,1,11,-175,125])
set(gca,'ytick',[1,2,3,5,7,9,11])
set(gca,'Ztick',[-150,-100,-50,0,50,100,150])
    % A tengelyek cimkezes
xlabel('s')
ylabel('k \cdot R2 [\Omega]')
zlabel('M [Nm]')

```

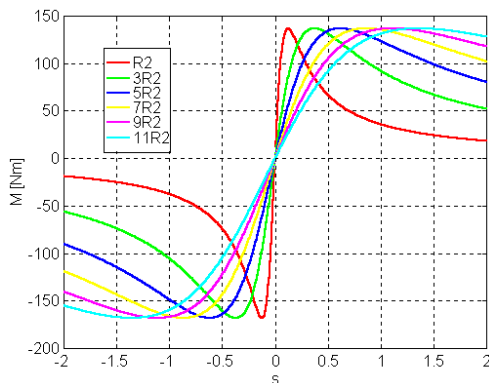
Ebben a programban az aszinkron gép nyomatékát a szlip (s), illetve a forgórészközi ellenállás szorzójának (k) a függvényében a következő, **mas1.m** néven előre megírt és elmentett, kétváltozójú függvény segítségével kapjuk.

```

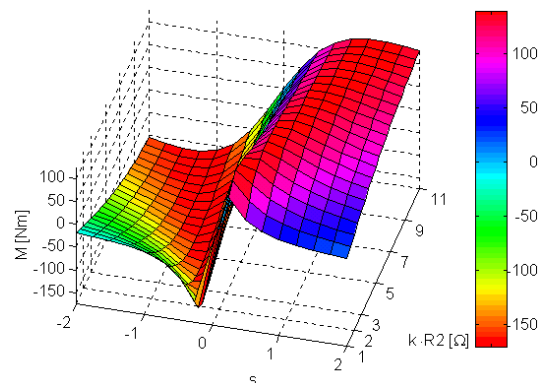
function M=mas1(s,k)
    % A gep adatainak meghatarozasa
UN=220; %[V]
m=3;
p=3;
f=50; % Hz
R1=0.472; %ohm
R2=0.568; % ohm
X1=2.3; %ohm
X2=2.272; %ohm
    % A nyomatek kiszamitasa az argumentumok fuggvényeben
if s==0 M=0;
else
    M=m*p/2/pi/f*k*R2./s*UN^2./((R1+k*R2./s).^2+(X1+X2)^2);
end

```

Az így kapott térbeli grafikus ábrázolás a 18. ábrán látható.



17. ábra



18. ábra

Amint a két ábra összehasonlításából ebben az esetben is tisztán kitűnik, a térbeli ábra sokkal plasztikusabban ábrázolja a forgórészközi külső ellenállások hatását az aszinkron gép nyomatékára. A mellékelt színskála segítheti az ábra helyes értelmezését.

Irodalomjegyzék

- 1] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: Magyar-román műszaki szótár, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1981.
- 2] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: Román-magyar műszaki szótár, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1979.
- 3] Biran A. - Breiner M.: MATLAB 5 for Engineers, Addison Wesley Longman, 1999.
- 4] Ghinea M. - Firețeanu V.: MATLAB. Calcul numeric, grafică, aplicații, Teora Könyvkiadó, Bukarest, 1995.
- 5] Stoyan G. (szerk.): MATLAB (4. és 5. Verzió) - Numerikus módszerek, grafika, statisztika, eszköztárak, TYPOTEX Könyvkiadó, Budapest, 1999.
- 6] ***: MATLAB - High-Performance Numeric Computation and Visualization Software, User's Guide, MathWorks Inc., Natick, 1994.
- 7] ***: The MATLAB EXPO. An Introduction to MATLAB, SIMULINK, and the MATLAB Application Toolboxes, MathWorks Inc., Natick, 1993.

Elektromágneses mező számítógépes analízise

Dr. Szabó Loránd, adjunktus:

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki Kar

1. Előszó

A villamosmérnöki gyakorlatban számtalan alkalommal szükséges a különböző feltételek mellett kialakuló elektromágneses mezők minél pontosabb meghatározása. A gyakorlat által felvetett feladatok analitikus, zárt formában megadható megoldásának lehetősége azonban igen korlátozott. Ilyen megoldásokat csak különleges mértani elrendezések és egyszerű tulajdonságú közegek esetén kaphatunk. A gyakorlatban szükséges általános feladatok megoldásához feltétlenül numerikus módszerekre és a számítástechnika eszközeinek alkalmazására van szükség.

Ismertetjük az elektromágneses mező általános egyenleteit, különös figyelmet szentelve a stationárius áramok gerjesztette mágneses terekre. A továbbiakban a mágneses tér számítására szolgáló leghasználatosabb numerikus módszereket (a végesdifferenciák és a végeselemek módszerét) ismertetjük és hasonlítjuk össze.

Végezetül egy tényleges mágneses mezőszámítási feladat megoldását mutatjuk be egy gyári program segítségével.

2. Az elektromágneses tér egyenletei

Az elektromágneses tér, lévén vektortér, jellemzői helytől és időtől függő vektorok:

- az elektromos térerősség: $\vec{E}(\vec{r}, t)$,
- az elektromos eltolás: $\vec{D}(\vec{r}, t)$,
- a mágneses térerősség: $\vec{H}(\vec{r}, t)$ és a
- a mágneses indukció: $\vec{B}(\vec{r}, t)$.

Az elektromágneses teret gerjesztő mennyiségek a következők:

- az elektromos áramsűrűség $\vec{J}(\vec{r}, t)$ és az
- elektromos töltéssűrűség $\rho(\vec{r}, t)$.

Az elektromágneses tér alaptörvényeinek matematikai leírását a most felsorolt mennyiségek és parciális deriváltjaik közötti kapcsolatot leíró Maxwell-egyenletek, illetve a belőlük származtatott differenciálegyenletek és integrálegyenletek adják. Ezek képezik az elektrodinamika axiómáit.

Az elektromágnesség terén Ampère, Oersted, Faraday, és mások által begyűjtött kísérleti eredményeket, tapasztalati törvényeket James Clark Maxwell öntötte egységes matematikai formába. Az egyes egyenletek ugyanakkor megőrizték a törvények eredeti felfedezőjének nevét is, így érthető az egyenletek kettős elnevezése.

A továbbiakban a Maxwell-egyenletek differenciális formáját ismertetjük.

Az Ampère-Maxwell gerjesztési törvény azt fogalmazza meg, hogy az elektromos áram, valamint az időben változó elektromos mező örvényes mágneses mezőt kelt:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (1)$$

A nyugalmi indukció törvénye (Faraday indukciós törvénye) szerint az időben változó mágneses mező örvényes elektromos mezőt kelt:

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (2)$$

Ennek a törvénynek integrális változata azt mondja, hogy ha egy A felület mágneses fluxusa időben változik, akkor a felület peremgörbéje mentén feszültség indukálódik.

Gauss törvénye azt állapítja meg, hogy az elektromos mező forrásos, és az elektromos mező forrásai az elektromos töltések:

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho \quad (7)$$

Gauss törvénye mágneses mezőre kimondja, hogy a mágneses mező (gyakorlatilag az indukció) forrásmentes, tehát nincsenek mágneses töltések:

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (8)$$

Az egyenletek egyértelmű megoldásához kiegészítő egyenletek szükségesek, amelyek a közegek tulajdonságait írják le. Ezen anyagi egyenletek alakja lineáris közegekben, lokális és pillanatnyi kölcsönhatásokat feltételezve:

$$\begin{aligned} \bar{D} &= \varepsilon \bar{E} + \bar{P}_i \\ \bar{B} &= \mu \bar{H} + \bar{M}_i \end{aligned} \quad (9)$$

Ezekhez társul az elektromos áramsűrűség analóg kifejezése:

$$\bar{J} = \sigma(\bar{E} + \bar{E}_i) \quad (10)$$

ahol \bar{E}_i a tértől független, "idegen" térerősség. Az utóbbi kifejezésekben az alábbi anyagjellemzők szerepelnek:

- a permittivitás (dielektromos állandó) ε ,
- a permeabilitás μ és
- a fajlagos vezetés σ .

Általános esetben ezek az anyagjellemzők helytől és időtől függő tenzorok is lehetnek.

A permittivitást és permeabilitást gyakran a dimenzió nélküli relatív értékükkel adják meg:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \varepsilon_0 \varepsilon_r \\ \mu &= \mu_0 \mu_r \end{aligned} \quad (11)$$

ahol $\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m a vákuum permittivitása, illetve $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m a vákuum permeabilitása.

A \bar{P}_i és \bar{M}_i a tértől független, de helytől és időtől függő, elektromos és mágneses polarizáció.

A Maxwell egyenleteknek számos sajátos alakja van, amelyek különböző időfüggés esetén érvényesek. A villamosmérnöki gyakorlatban gyakran tanulmányozzák az időben állandó elektromágneses tér viselkedését. Ebben a sztatikus-stacionárius esetben formálisan $\partial/\partial t = 0$ és az (1) és (2) egyenletekből eltűnnek az idő szerinti parciális deriváltak. Ekkor a teljes egyenletrendszer három, egymástól független egyenletcsoportra oszlik, amelyeket egymástól szintén függetlenül tárgyalhatunk:

- a sztatikus elektromos teret jellemző egyenletek:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} &= 0 \\ \operatorname{div} \bar{D} &= \rho \\ \bar{D} &= \epsilon \bar{E} + \bar{P}_i \end{aligned} \quad (12)$$

- a stacionárius áramlási tér:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \bar{E} &= 0 \\ \operatorname{div} \bar{J} &= 0 \\ \bar{J} &= \sigma \bar{E} + \bar{J}_i \end{aligned} \quad (13)$$

ahol \bar{J}_i a tértől független áramsűrűség, valamint

- a stacionárius áramok gerjesztette mágneses tér:

$$\operatorname{rot} \bar{H} = \bar{J} \quad (14)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (15)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} + \bar{M}_i \quad (16)$$

A gyakorlatban és elméletben szintén kitüntetett jelentőségűek a szinuszos időbeli lefolyású jelenségek, amelyeket komplex időfüggvények segítségével írhatunk le.

3. A stacionárius áramok gerjesztette mágneses tér

Mint már említettük a villamosmérnöki gyakorlatban kitüntetett figyelmet szentelnek a stacionárius áramok gerjesztette mágneses terek analízisének.

Amint a (14) ÷ (16) összefüggések is mutatják, ebben az esetben a mágneses térerősség rotációja nem azonosan zérus, következésképpen a térerősség általában nem állítható elő valamely skalárpotenciál gradienseként.

Azonban azonosan zérus a mágneses indukció divergenciája (15). Ez a matematikából jól ismert módon azt jelenti, hogy ez a függvény előállítható egy alkalmasan választott \bar{A} vektorpotenciál rotációjaként:

$$\bar{B} = \operatorname{rot} \bar{A} \quad (17)$$

mivel teljesül az alábbi feltétel:

$$\operatorname{div} \bar{B} = \operatorname{div} (\operatorname{rot} \bar{A}) = 0 \quad (18)$$

Az \bar{A} mágneses vektorpotenciálnak nincs közvetlen fizikai értelme, de kiválóan alkalmas a mágneses fluxus és induktivitás numerikus számítására.

A (14), (16) és (17) összefüggésekből következik:

$$\text{rot rot } \bar{A} = \mu \bar{J} \quad (19)$$

amit könnyen az alábbi formára hozhatunk:

$$\text{grad div } \bar{A} - \Delta \bar{A} = \mu \bar{J} \quad (20)$$

Az \bar{A} mágneses vektorpotenciált úgy választjuk meg, hogy a mezőnk forrásmentes legyen:

$$\text{div } \bar{A} = 0 \quad (21)$$

Ebben az esetben a vektorpotenciálra homogén térrészben a vektoriális Poisson-egyenlet érvényes:

$$\Delta \bar{A} = -\mu \bar{J} \quad (22)$$

amit Descartes koordinátarendszerben felírhatunk úgy is, mint:

$$\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial z^2} = -\mu \bar{J} \quad (23)$$

Ezt három, komponensenként felírt skaláregyenletre bonthatjuk. E három egyenlet megoldása nem független, hiszen ki kell elégíteniük a (21) feltételt. Az egyenletrendszer megoldását az is nehezíti, hogy a vektorpotenciálra nem minden esetben lehet közvetlenül előírni a peremfeltételeket.

Ezért jelentős, hogy egyes sajátos esetekben a mágneses térerősséget egyetlen skaláris mennyiségből származtathatjuk. Például árammentes térrészben, ahol a mágneses térerősség rotációja zérus, a térerősség előállítható egy skalárpotenciál gradienseként és erre a skalárpotenciálra homogén térrészekben az egyszerűbb Laplace egyenlet lesz érvényes.

A villamosmérnöki gyakorlatban gyakran találkozunk kétdimenziós feladatokkal, mivel a számítások rövidítése érdekében gyakran folymadunk a reális, háromdimenziós feladatok egyszerűsített formában való megfogalmazásához. Ez esetben nemcsak a független változók száma csökken, hanem a feladat függő változóinak száma is. Alkalmas választással a feladat visszavezethető egyetlen skalármennyiségre vonatkozó másodrendű parciális differenciálegyenletre.

A reális feladatokat leggyakrabban síkproblémákra egyszerűsítjük. Ebben az esetben feltételezzük, hogy az elektromos áramsűrűség vektornak (\bar{J}) csak a síkra merőleges z irányú komponense van. Ebből természetesen következik, hogy a mágneses vektorpotenciálnak is csak z irányú komponense lesz, és ekkor a Poisson-egyenlet alábbi egyszerűsített alakját kapjuk:

$$\Delta A_z = -\mu J_z \quad (24)$$

4. A mágneses tér számítására szolgáló numerikus módszerek

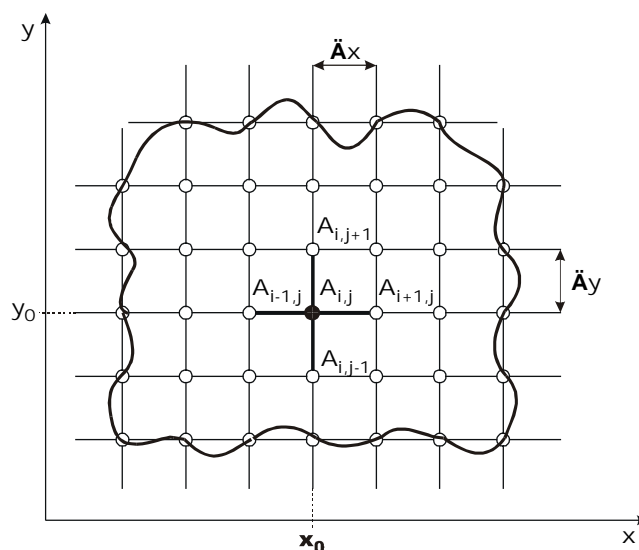
A stacionárius áramok gerjesztette mágneses terek megoldására számtalan, úgy analitikus, mint numerikus módszer ismeretes. Ezek közül itt a jelenleg legelterjedtebb numerikus módszereket tekintjük át.

4.1. A végesdifferenciák módszere

A végesdifferenciák módszere (rácsmódszer) a parciális differenciálegyenletek megoldásának egyik legáltalánosabb, legerjedtebb és legegyszerűbb numerikus módszere.

A módszer lényege, hogy az eredetileg folytonos tartomány belsejében és határán diszkrét pontokat, úgynevezett rácspontokat értelmezünk és a megoldást ezekben a pontokban keressük. A kijelölt pontok egy szabályos (az egyszerűség kedvéért rendszerint derékszögű) síkbeli vagy térbeli rács pontja (lásd az 1. ábrát).

A rácsponti függvényértékek segítségével a parciális differenciálegyenletekben szereplő deriváltak differenciálhányadosokkal közelíthetők meg, tehát kifejezhetők az ismeretlen függvényértékek lineáris kombinációjaként. Hasonlóképpen az előírt peremfeltételek is kifejezhetők rácsponti függvényértékek lineáris kombinációjával. Ekképp az eredeti bonyolult feladat egy matematikailag egyszerűen megoldható algebrai feladatra vezethető vissza.



1. Ábra A végesdifferenciák módszerénél használt rács-szerkezet

A legegyszerűbb esetben a rács egyenletes (ekvidisztáns, egyenközű), azaz a rácsosztás mindkét irányban azonos és állandó:

$$\Delta x = \Delta y = h \quad (25)$$

Felhasználva a közismert

$$f'' \approx \frac{f(x-h) - 2f(x) + f(x+h)}{h^2} \quad (26)$$

végesdifferenciákkal való közelítést a kétdimenziós Laplace-operátor közelítésére az alábbi, ún. ötponos differenciasémát kapjuk:

$$\Delta A \approx \frac{A_{i-1,j} + A_{i+1,j} + A_{i,j-1} + A_{i,j+1} - 4A_{i,j}}{h^2} \quad (27)$$

Ezzel a (22) Poisson-egyenlet közelítésére az (i,j) indexű pontban az alábbi differencia-egyenletet kapjuk:

$$A_{i-1,j} + A_{i+1,j} + A_{i,j-1} + A_{i,j+1} - 4A_{i,j} = -\mu_{i,j} J_{i,j} \quad (28)$$

Az előbbi egyenlet csak a tartomány belsejében levő rácspontokra érvényes. A tartomány területén levőkre megfelelőképpen át kell alakítani a differenciaegyenletet. Az esetleges közegethatárokat érintő elírásokat is sajátos formában kell megadni.

Az előírandó peremfeltételek közelítése is sajátosságos ennél a numerikus módszernél.

Az elsőfajú (Dirichlet) peremfeltétel előírja a vizsgált tartomány peremén a vektorpotenciál pontos értékét. Ennek a feltételnek gyakorlati előírása nem nehéz amennyiben a tanulmányozandó tartomány határa egybeesik a rácsszerkezet határával. Ez a feltétel a villamosmérnöki gyakorlatban a legtöbbször teljesül.

A stacionárius áramok gerjesztette mágneses terek szigetelő határain, valamint a különböző feladatok szimmetriatengelyei mentén fekvő rácspontokra (ahol a mágneses potenciál deriváltja zérus) a másodfajú (Neumann) peremfeltételeket kell előírni. E peremfeltétel közelítése is igen egyszerű abban az igen gyakran előforduló esetben, amikor az adott körvonal (kontúr) egyenes vonalú rácsvonalra fektethető. Ekkor a Neumann peremfeltételt a körvonalhoz igen közel fiktív rácspontok közbeiktatásával lehet legkönnyebben megoldani.

A végesdifferenciák módszerének gyakorlati alkalmazásakor első lépésként az adott tartományhoz rendelni kell egy megfelelő rácsot. Különös figyelmet kell szentelni a rácsosztás helyes megválasztására, mivel ez nagymértékben befolyásolja a számítások pontosságát. Nem szabad azt a tényt se elhanyagolni, hogy nagyszámú pont felvétele esetében a számítási sebesség nagymértékben lecsökken. Kompromisszumot kell kötni az elvárt számítási pontosság (gyakorlatilag a rácspontok mennyisége) és a szükséges számítási idő között. A rácsot úgy alakítani, hogy a kontúrvonalak, a különböző anyagok határai, valamint a szimmetriatengelyek rácsvonalakkal essenek egybe.

A továbbiakban meg kell adni valamennyi rácspont mértani koordinátáit, valamint meg kell határozni a hozzá rendelt áramsűrűséget, illetve anyagjellemzőt.

Következő lépésként valamennyi belső rácspontra felírjuk a (28) differenciaegyenletet. A körvonalon levő rácspontokra is felírjuk a megfelelően módosított differenciaegyenleteket. A továbbiakban előírjuk a perem- és szimmetria feltételeket. Mindezek nyomán egy olyan lineáris egyenletrendszer kapunk, amelyikben az egyenletek száma megegyezik az ismeretlenek (a felvett rácspontok) számával. Ennek megoldása már csak matematikai feladat.

Mivel a villamosmérnöki gyakorlatban a felvett rácspontok száma, és természetesen az egyenletek száma, igen magas lehet (akár több tízezer is) az egyenletrendszer megoldása még a modern számítástechnikai eszközökkel is idő- és tárolókapacitás-igényes. A nagyszámú differenciaegyenletből kialakított egyenletrendszer számítógépes megoldására többféle algoritmust használnak.

A pontiterációs algoritmus alkalmazása során egyidejűleg csak egyetlen differenciaegyenlet alkalmazása szükséges. Ezért a teljes egyenletrendszert soha sem állítjuk elő, hanem a rácson valamilyen rendszer szerint végighaladva az egyes differenciaegyenleteket újra és újra generáljuk és megoldjuk. Az iteratív módszert addig ismétljük, míg a megszabott pontosságot el nem érjük. A pontosság egyik legmértékesebb mértéke az elért relatív hiba maximális értéke

$$\varepsilon_r = \max \left(\sum_{i,j} \left| \frac{A_{i,j}^k - A_{i,j}^{k-1}}{A_{i,j}^k} \right| \right) \quad (29)$$

amely gyakorlatilag megmutatja mennyi a legnagyobb relatív különbség két egymás utáni lépésben elért eredmény között.

A pontiterációs módszer fő hátránya, hogy konvergenciája gyakran igen lassú és bizonytalan.

Gyakran használják a pontiterációs algoritmus módosított változatát, a soriterációs módszert. Ez az algoritmus hasonló az előzőleg ismertetetthez, azzal a különbséggel, hogy ebben az esetben egyszerre egy adott soron levő valamennyi rácsponttal tartozó differenciaegyenletből

alakítunk ki egy kisebb méretű egyenletrendszert, és ezt oldjuk meg. Így egy számítási ciklus során jóval több mágneses potenciálérték számítható ki.

A konvergencia további gyorsítása érdekében alkalmazzák e módszer javított változatát is, az egymást követő sorok szuprarelaxációjának (SLOR - Successive Line Over-Relaxation) módszerét. Ekkor az azonos sorban levő rácspontoknak megfelelő mágneses vektorpotenciál értékét szuprarelaxáljuk az alábbi rekurzív összefüggés alapján:

$$A_{i,j}^k = A_{i,j}^{k-1} + \omega(A_{i,j}^k - A_{i,j}^{k-1}) \quad (30)$$

ahol a felső kitevő a pillanatnyi iteráció számát jelöli és ω az ún. szuprarelaxációs együttható. Ennek értéke az $1,1 \div 2,5$ intervallumba tartozik és az adott feladattól függő. Optimális értékét próbálgatással lehet kitapasztalni.

Más algoritmusok alkalmazásakor előállítják az egész megoldandó lineáris egyenletrendszert. Ennek megoldása tárigényes, de megfelelő programszervezéssel ez a gond is megoldható. Az ilyenkor generált igen nagyméretű lineáris egyenletrendszer megoldása továbbra is komoly matematikai feladatot jelent. Alkalmazható bármelyik ismert közvetlen (direkt) vagy iteratív megoldási módszer.

Direkt módszer alkalmazása esetén jól meghatározható véges (de nagyszámú) aritmetikai művelet elvégzése után, a kerekítési hibáktól eltekintve, pontos végeredményt kapunk. Az iteratív módszerek alkalmazása esetén valamely első közelítésből kiindulva az iterációs algoritmus elvileg végtelen sokszori ismétlésével állítják elő a végeredményt. Gyakorlatilag a szükséges pontosság elérése után az iterációs folyamatot megszakíthatjuk. Ebben az esetben a műveletigény előre nehezen felbecsülhető, mivel a konvergenciasebesség és az előírt pontosság függvénye.

Az előállított globális lineáris egyenletrendszer mátrixa ritka felépítésű, azaz a zérustól különböző elemek száma viszonylag csekély. Mindemellett a zérustól különböző elemek elhelyezkedése sávstruktúrára utal. Gyorsíthatjuk a számítási sebességet, ha az ezekre a típusú lineáris egyenletrendszerekre kidolgozott speciális (direkt vagy iteratív) módszereket alkalmazzuk.

4.2. A végelemek módszere

A végelemek módszere az előbbieken ismertetett rácsmódszer általánosításának is tekinthető tetszőleges geometriájú rácsra. A rácspontokra vonatkozó differenciaegyenletek levezetése az igen általános variációs elvek segítségével történik.

Ennél a módszernél a rács felvétele úgy történik, hogy a vizsgált tartományt egymáshoz szorosan csatlakozó (a csúcspontokban és az elemhatárokon érintkező) felületelemek rendszerével teljesen lefedjük és a megoldásfüggvényt e felületelemek csúcspontjaiban keressük.

A végelemekre vonatkozó lineáris egyenletrendszer levezetése az alábbi mágneses energia funkcionál közelítő minimalizálásával történik:

$$F = W_m = \iint_D \left\{ \frac{1}{2} \nu \left[\left(\frac{\partial A(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] - J(x,y) \cdot A(x,y) \right\} dx dy \quad (31)$$

ahol $\nu = 1/\mu$ a mágneses reluktivitás (fajlagos reluktancia).

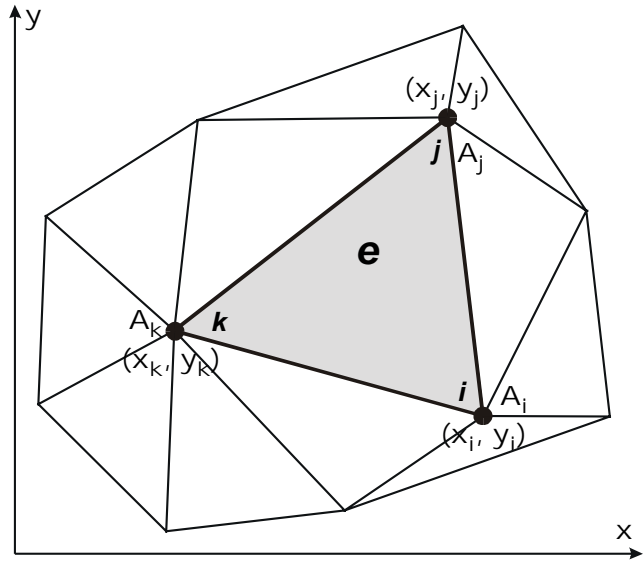
A (31) funkcionál minimumát az alábbi összefüggésből kapjuk:

$$\frac{\partial F}{\partial A_i} = 0, \quad i = 1 \div N \quad (28)$$

ahol N a felvett rácspontok száma.

Tekintsük a 2. ábrán látható, a gyakorlatban leggyakrabban előforduló, háromszög alakú e végeselemet, amely három csúcspontjának jelölése i, j , és k . Ezek koordinátái (x_i, y_i) , (x_j, y_j) és (x_k, y_k) . A mágneses vektorpotenciál a három csúcspontban A_i , A_j és A_k .

A végeselemekre vonatkozó egyenletek levezetésének lényege, hogy a (31) funkcionál minimalizálása közelítőleg elvégezhető az egyes végeselemeken felvett lineáris interpolációs függvények segítségével. A háromszög alakú végeselemekhez tartozó lineáris interpolációs potenciálfüggvény a következő:



2. Ábra Háromszög alakú végeselem koordinátái és potenciáljai

$$A(x, y) = ax + by + c \quad (29)$$

Ha az interpolációs potenciálfüggvényt felírjuk a háromszög csúcspontjaira, akkor az alábbi egyenletrendszert nyerjük:

$$\begin{cases} A_i = ax_i + by_i + c \\ A_j = ax_j + by_j + c \\ A_k = ax_k + by_k + c \end{cases} \quad (30)$$

amit megoldva megkapjuk a (29) potenciálfüggvény a , b és c együtthatóit:

$$\begin{aligned} a &= \frac{1}{2\Delta} [A_i(y_j - y_k) + A_j(y_k - y_i) + A_k(y_i - y_j)] \\ b &= \frac{1}{2\Delta} [A_i(y_k - y_i) + A_j(y_i - y_j) + A_k(y_j - y_k)] \\ c &= \frac{1}{2\Delta} [A_i(x_j y_k - x_k y_j) + A_j(x_k y_i - x_i y_k) + A_k(x_i y_j - x_j y_i)] \end{aligned} \quad (31)$$

ahol Δ az adott háromszög alakú végeselem területe:

$$\Delta = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_k & y_k \end{vmatrix} \quad (32)$$

Behelyettesítve a kapott együtthatók értékét a (29) egyenletbe, az alábbi alakú összefüggést kapjuk:

$$A(x, y) = N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k \quad (33)$$

ahol az N_i , N_j és N_k súlyfüggvények csak a csúcspontok koordinátáitól függnek (tehát a rácsszerkezet generálása pillanatában már ismertek):

$$\begin{aligned} N_i &= \frac{1}{2\Delta} [(y_j - y_k)x + (x_k - x_j)y + (x_j y_k - x_k y_j)] \\ N_j &= \frac{1}{2\Delta} [(y_k - y_i)x + (x_i - x_k)y + (x_k y_i - x_i y_k)] \\ N_k &= \frac{1}{2\Delta} [(y_i - y_j)x + (x_j - x_i)y + (x_i y_j - x_j y_i)] \end{aligned} \quad (34)$$

A súlyfüggvények segítségével kifejezhetjük a (31) funkcionális az e végelemre vonatkoztatott összefüggését:

$$\begin{aligned} F^e = W_m^e = \iint_e \left\{ \frac{1}{2} \nu \left[\left(\frac{\partial N_i}{\partial x} A_i + \frac{\partial N_j}{\partial x} A_j + \frac{\partial N_k}{\partial x} A_k \right)^2 + \left(\frac{\partial N_i}{\partial y} A_i + \frac{\partial N_j}{\partial y} A_j + \frac{\partial N_k}{\partial y} A_k \right)^2 \right] - \right. \\ \left. - J^e (N_i A_i + N_j A_j + N_k A_k) \right\} dx dy \end{aligned} \quad (35)$$

ahol J^e az e végelemnek megfelelő áramsűrűség.

Jelölje L azon sorszámok halmazát, amely sorszámú végelemek az i -edik rácspontot csúcspontként tartalmazzák. Ekkor az i -edik rácspontra vonatkozó egyenlet a (28) és (35) összefüggés alapján az alábbi formára hozható:

$$\sum_{e \in L} \frac{\partial F^e}{\partial A_i} = 0 \quad (36)$$

mivel F^e csak $e \in L$ esetben függvénye az A_i vektorpotenciálnak.

A (36) egyenlet részletes felírása már minden nehézség nélkül elvégezhető:

$$\begin{aligned} \frac{\partial F^e}{\partial A_i} = & \left\{ [(y_j - y_k)A_i + (y_k - y_i)A_j + (y_i - y_j)A_k] \frac{y_j - y_k}{4\Delta^2} + \right. \\ & + [(x_k - x_j)A_i + (x_i - x_k)A_j + (x_j - x_i)A_k] \frac{x_k - x_j}{4\Delta^2} \left. \right\} \cdot \iint_e \nu dx dy - \\ & - \iint_e J^e \frac{1}{2\Delta} [(y_j - y_k)x + (x_k - x_j)y + (x_j y_k - x_k y_j)] dx dy \end{aligned} \quad (37)$$

A (37) összefüggésben szereplő mágneses reluktivitás kiszámításához szükség van az e végelemhez tartozó mágneses indukcióra, amit ekképp számíthatunk ki:

$$B^e = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \quad (38)$$

aminek összetevőit az alábbi összefüggések adják:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{1}{2\Delta} [(x_k - x_j) A_i + (x_i - x_k) A_j + (x_j - x_i) A_k] \\ B_y &= \frac{1}{2\Delta} [(y_j - y_k) A_i + (y_k - y_i) A_j + (y_i - y_j) A_k] \end{aligned} \quad (39)$$

Ezek ismeretében néhány egyszerű számítás segítségével megkaphatjuk a (37) összefüggéssel megadott funkcionális deriváltjának végső alakját:

$$\frac{\partial F^e}{\partial A_i} = M_i A_i + M_j A_j + M_k A_k - \frac{J^e \Delta}{3} \quad (40)$$

ahol:

$$\begin{aligned} M_i &= \frac{v_e}{4\Delta} [(y_j - y_k)^2 + (x_k - x_j)^2] \\ M_j &= \frac{v_e}{4\Delta} [(y_k - y_i)(y_j - y_k) + (x_i - x_k)(x_k - x_j)] \\ M_k &= \frac{v_e}{4\Delta} [(y_i - y_j)(y_j - y_k) + (x_j - x_i)(x_k - x_j)] \end{aligned} \quad (41)$$

A (36) egyenletet minden rácspontra felírva egy lineáris algebrai egyenletrendszert kapunk az ismeretlen rácsponti potenciálokra:

$$\frac{\partial F}{\partial [A]} = [M][A] + [SZ] = 0 \quad (42)$$

Az egyenletrendszer M együtthatómátrix ennél a módszernél is ritka és sávstruktúrájú, mivel egy adott rácspontra vonatkozó egyenletben csak saját potenciálja és a rácspontba befutó végelem-oldalak másik végéhez tartozó potenciálok szerepelnek.

Az együtthatómátrix sáv szélességének csökkentésével számottevően lerövidíthető a számolási idő. Mivel a sáv szélesség függ a rácspontok számozásától, kifejlesztettek számos a rácspontokat automatikusan átszámoló algoritmust (például a Cuthill–McKee-féle módszer).

A végelemek módszerénél a perem- és határfeltételek előírása igen egyszerű, ha a végelemek illeszkednek a perem- és határfeltételi kontúrokhoz, aminek semmilyen gyakorlati akadálya nincs.

4.3. A két módszer összehasonlítása

A végesdifferenciák módszere esetén az alkalmazott szögletes rács miatt meglehetősen kényelmetlen a rácsvonalakhoz nem illeszkedő kontúrokon definiált perem- és határfeltételek előírása. A rács lokális finomítása a tartomány egészére kihat, mert a besűrített rácsvonalak a teljes tartományon végighaladnak. Részben ez az oka, hogy a végesdifferenciák módszerénél a rácspontok száma általában indokolatlanul nagyra adódik.

A végelemek módszerének - kétségtelen előnyei mellett - számos hátránya is van a végesdifferenciák módszerével szemben. Az adatelőkészítés bonyolultabb és emiatt időigényesebb, mivel meg kell adni valamennyi felvett rácspont koordinátáit és a végelemek számozását is. Mindemelllett a megoldandó lineáris egyenletrendszer szabálytalan struktúrájú ritka mátrix, aminek gyors megoldása körülményes lehet.

Azonban a numerikus módszerek, valamint a számítástechnika dinamikus fejlődése a végelemek módszerét hozta ki "nyertesnek" a két módszer vetélkedéséből, mivel főbb hátrányainak nagy része az idők során elhárult.

Mára az elemek automatikus generálására, a rácspontok számozására és újraszámolására számtalan a gyakorlatban jól bevált algoritmust dolgoztak ki. A modern numerikus módszerek és a rendkívül gyors számítógépek segítségével bármilyen nagyságú és bonyolultságú egyenletrendszer elfogadható időn belül megoldható.

A végelemek módszere vált a legelterjedtebbé nemcsak az elektromágneses terek számítása esetén, hanem a gépészeti és építészeti struktúrák szilárdsági elemzésénél vagy a termikus számítások terén is. Számos, jobbnál-jobb gyári programot kínálnak valamennyi típusú alkalmazásra. Ezek felhasználó-barátok, azaz a munka nehezét igyekeznek levenni a felhasználó válláról. Ekképp a legbonyolultabb feladatok megfogalmazása is igen egyszerű és könnyen elsajátítható. Az eredmények kiértékelésében is nagy segítséget kapnak a felhasználók, mivel, mint később látni fogjuk, változatos formákban lehet az eredményeket megjeleníteni.

Az elektromágneses mezőszámító programok közül a legismertebbek az ANSYS, MagNet, Opera, Flux2D, melyek továbbfejlesztésén állandóan dolgoznak a szakemberek.

A következőkben egy tényleges feladat megoldását mutatjuk be egy gyári program segítségével.

5. Egy Példaprogram megoldása

Végezzük el egy SRM (Switched Reluctance Motor) típusú villamos gép stacionárius áramok gerjesztette mágneses terének számítógépes analízisét. A feladat megoldásához egy gyári programcsomagot használunk.

E feladat megoldása, akár csak bármely hasonló feladaté, három alapvető szakaszból áll:

1. A feladat megfogalmazása (*pre-processing*)
2. A számítások elvégzése (*processing*)
3. Az eredmények feldolgozása (*post-processing*)

5.1. A feladat megfogalmazása

A reális feladatot a könnyebb megfogalmazás érdekében leegyszerűsítjük, de csak olyan mértékben, hogy az elsődleges fizikai jelenségek ne szenvedjenek csorbát. Az elvégzendő számítások csökkentése érdekében a problémát először is síkproblémára egyszerűsítjük, feltételezve, hogy a gép tengely-irányban végtelen hosszúságú. Ebben az esetben az elektromos áramsűrűség vektornak és a mágneses vektorpotenciálnak is csak z irányú komponense lesz, míg a mágneses térerősségnek és indukciónak pedig nem lesz z irányú összetevője. A gépet alkotó ferromágneses anyagokat izotrópoknak és homogéneknek tekintjük, figyelembe véve nemlineáris jellegüket is, de elhanyagolva a mágneses hiszterézis jelenségét.

Meg kell határozni, hogy a gép forgórészének mely helyzetében szándékozunk elvégezni a mezőszámítást és ekkor mely tekercsek mekkora árammal vannak táplálva. A jelen feladatban két tekercspáron folyik át áram.

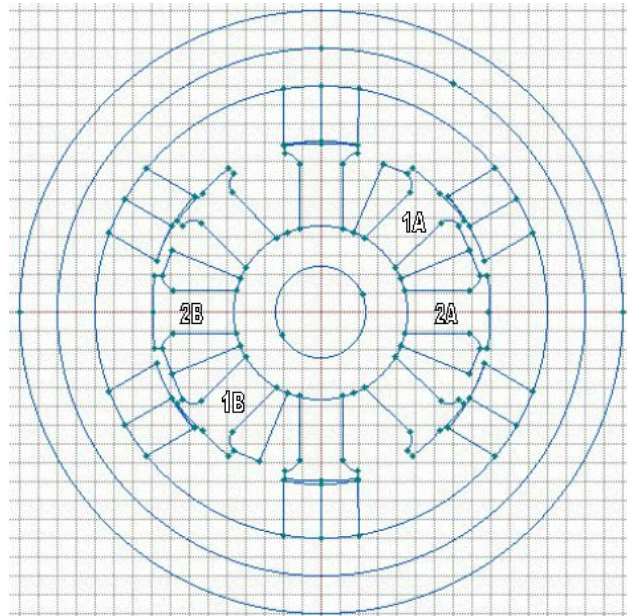
El kell készíteni a tanulmányozandó villamos gép keresztirányú metszetének rajzát. Ehhez magas szintű grafikai támogatást biztosít a legtöbb gyári program, de meg lehet rajzolni speciális rajzoló programok (pl. AutoCAD, CADKey, stb.) segítségével is, és valamilyen közismert grafikai formátumban (pl. DXF) be lehet olvasni a programba.

Mindkét esetben nagy figyelmet kell szentelni annak, hogy a zárt tartományokat zárt körvonallal. Az adott villamos gép keresztmetszetének rajza a 3. ábrán látható.

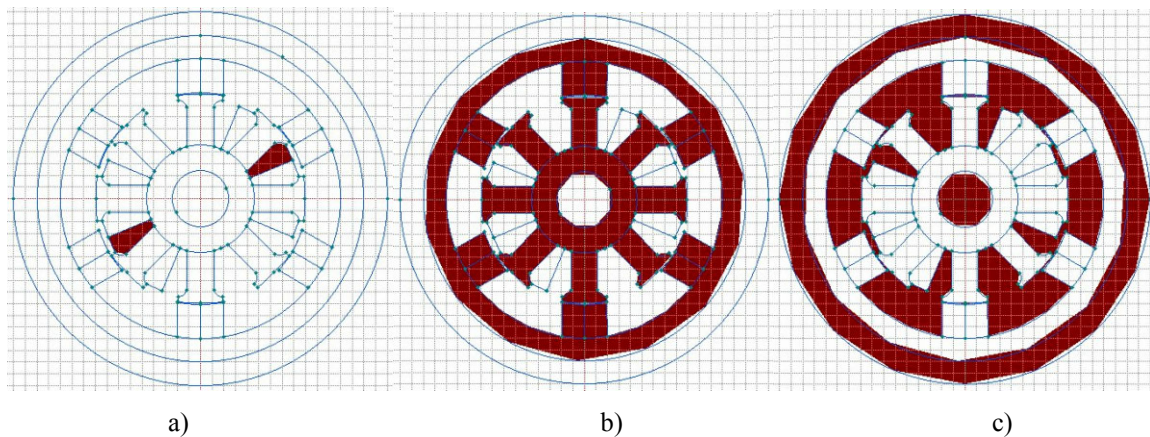
A következő lépésben meg kell határozni valamennyi tartományt, a hozzájuk tartozó anyagjellemzőkkel és áramértékekkel együtt.

Mint már említettük, ebben a feladatban két ellenkapcsolt tekercspáron (1A-1B és 2A-2B) folyik át áram. Mivel minden tekercs a metszetben két féltekercsként van ábrázolva (az egyikbe behatol az áramsűrűség vektor, a másiból meg kijön), jelen esetben összesen 8 tartományt kell definiálnunk a táplált tekercseknek megfelelően. Természetesen az ellencsatolt tekercspároknak megfelelő féltekercsekhez rendelt áramsűrűség abszolút értéke azonos kell legyen.

Az egyik féltekercs-párnak megfelelő tartomány-pár 4.a. ábrán látható. Ugyanezen az ábrán tekinthető meg az álló- és forgórész vasmagjának, valamint a levegőnek megfelelő tartomány is. Jól látható, hogy a táplálás nélküli tekercsek, lévén relatív permeabilitásuk közel 1, akárcsak a levegőé, szintén levegőként értelmezettek



3. Ábra A villamos gép keresztirányú metszetének rajza



3. Ábra Különböző tartományok meghatározása: egyik féltekercs-pár (a), a vasmagok (b) és a levegő (c)

Az 5. ábrán látható a villamos gép álló- és forgórészének vasmagjának megfelelő ferromágneses anyag mágnesezési görbéje.

A továbbiakban elő kell írunk a perem- és szimmetria feltételeket. Az egyetlen előírt peremfeltételt ebben az

esetben egy, a gépet kívülről körülvevő körön írjuk elő (lásd a 6. ábrát). Megszabjuk, hogy ezen a körön a vektorpotenciál értéke zérus legyen, ami azt jelenti, hogy behatároljuk az elemzett térrészt, mert ezáltal az erővonalak nem léphetnek ki a körön kívül. Mivel a villamos gép teljes keresztmetszetét vizsgáljuk, ennél a feladatnál szimmetria feltételeket nem kell előírunk.

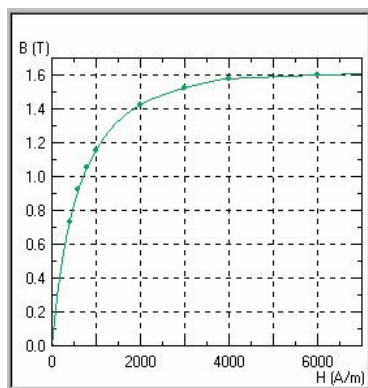
Ezzel a feladatot teljes mértékben meghatároztuk, áttérhetünk a feladat konkrét megoldására.

5.2. A feladat megoldása

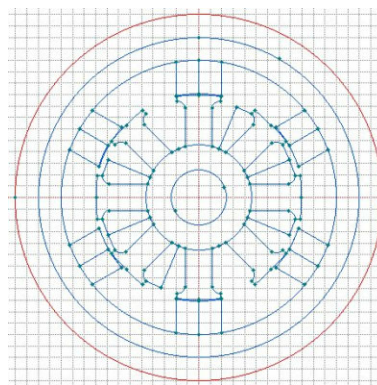
Ez a szakasz a legkényesebb. Az alkalmazott algoritmusok minőségétől függ az eredmények pontossága és még inkább egy igen fontos tényező, a számolási idő. A gyártók ennek a szakasznak a kidolgozására, finomítására fektetik a legnagyobb hangsúlyt, mivel ennek a teljesítőképessége döntően befolyásolja az egész eredményességét a programnak. A felhasználó szemszögéből nézve a dolgokat, itt van a legkevesebb tenivaló. Csak néhány, főleg a megoldás pontosságára vonatkozó paraméter beállítása hárul az alkalmazókra, a többi a program feladata.

Első lépésként a program automatikusan elkészíti a rácsozatot. Az adott feladathoz elkészített rácsozat a 7. ábrán látható. Itt szeretnénk megjegyezni, hogy az alkalmazott program egy igen egyszerű, amely korlátozott végelelem felvételét engedélyezi. Az igényesebb programok ennél jóval több rácspont felvételét teszik lehetővé, de didaktikai célra, mint azt az eredményekből is látni fogjuk, ez a programcsomag is tökéletes.

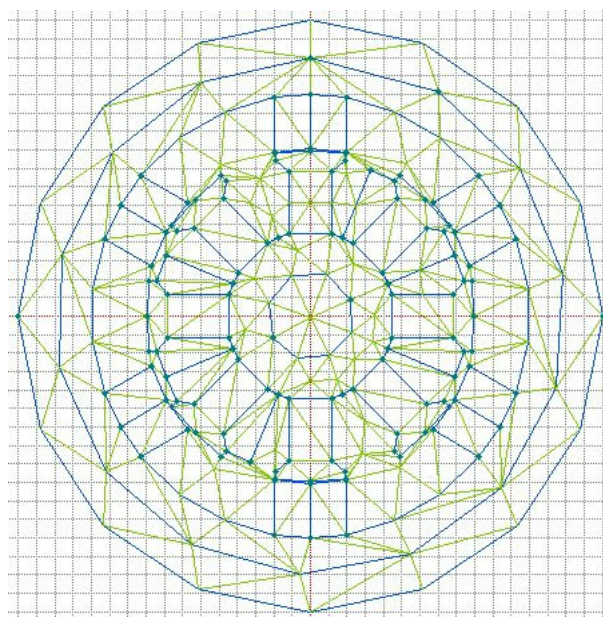
Ezután a program összeállítja a feladat különböző feltételeit is figyelembe vevő lineáris egyenletrendszer, amit a legjobb algoritmus kiválasztásával meg is old. Ennek nyomán megkapjuk valamennyi felvett rácspontban a mágneses vektorpotenciál értékét.



5. Ábra A vasmagok mágnesezési görbéje



4. Ábra Az előírt elsőfajú (Dirichlet) peremfeltétel görbéje



6. Ábra Az automatikusan generált rácsozat

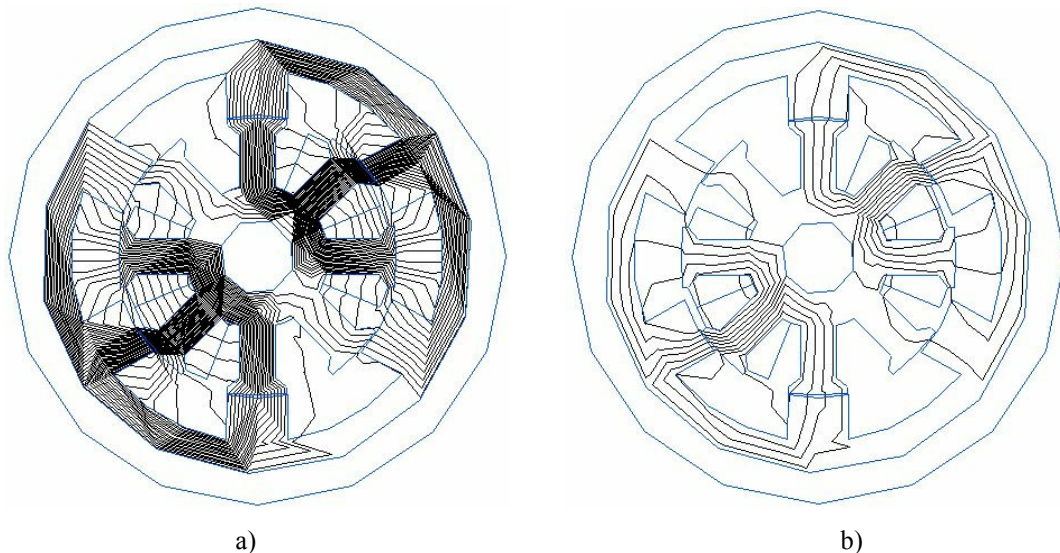
5.3. Az eredmények feldolgozása

Az előző szakasz befejezésekor a program gyakorlatilag kiszámította a feladat megoldását, ami nem más, mint valamennyi rácspontban a mágneses vektorpotenciálnak a két derékszögű koordinátára kivetített összetevője. Ez gyakorlatilag a legtöbb esetben egy hatalmas, kezelhetetlen adattömeg, amit feltétlenül fel kell dolgozni az eredmények kiértékelése érdekében.

Ebben nyújtanak nagy segítséget a felhasználóknak a gyári programok. A fentebb említett adathalmazból a megoldott feladat számos jellemzőjét kaphatjuk meg ezúton.

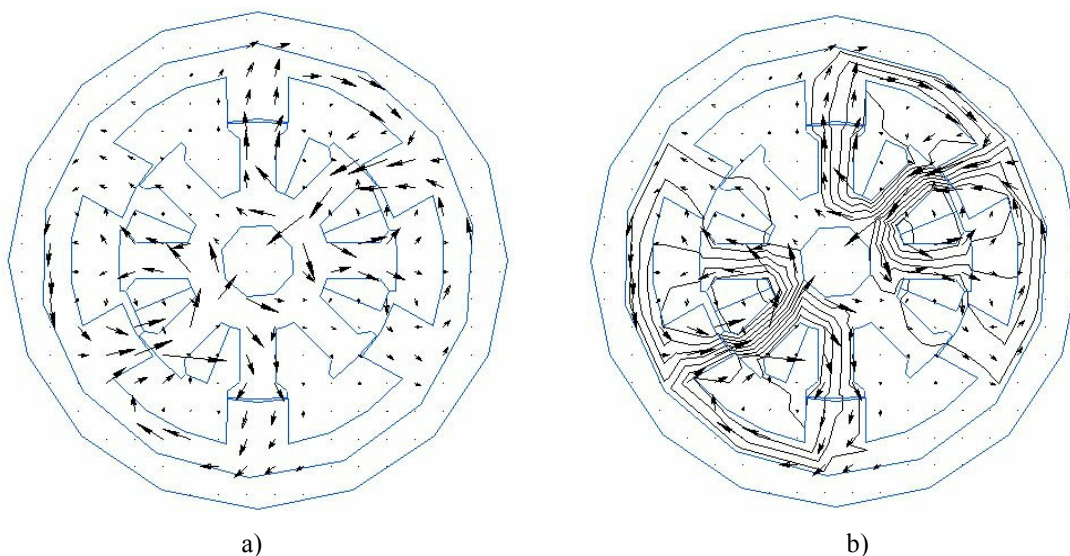
Az egyik legkifejezőbb ábrázolási módja az eredményeknek a mágneses tér ábrázolása. Ez skalárpotenciál híján csak erővonalakkal lehetséges. Az erővonalak érintője mindenütt megegyezik a térerősség irányával, sűrűségük pedig arányos a térerősség abszolút értékével. Ekképp egy adott felületen áthaladó erővonalak száma arányos a térerősségnek a felületre vett skalárértékű integráljával, a mágneses fluxussal.

A 8. ábrán bemutatjuk az adott villamos gép numerikus számítások útján meghatározott erővonalait. A megrajzolandó erővonalak száma megadható a program számára. Az ábrán látható egy-egy megjelenítés több, illetve kevesebb erővonal ábrázolásával.



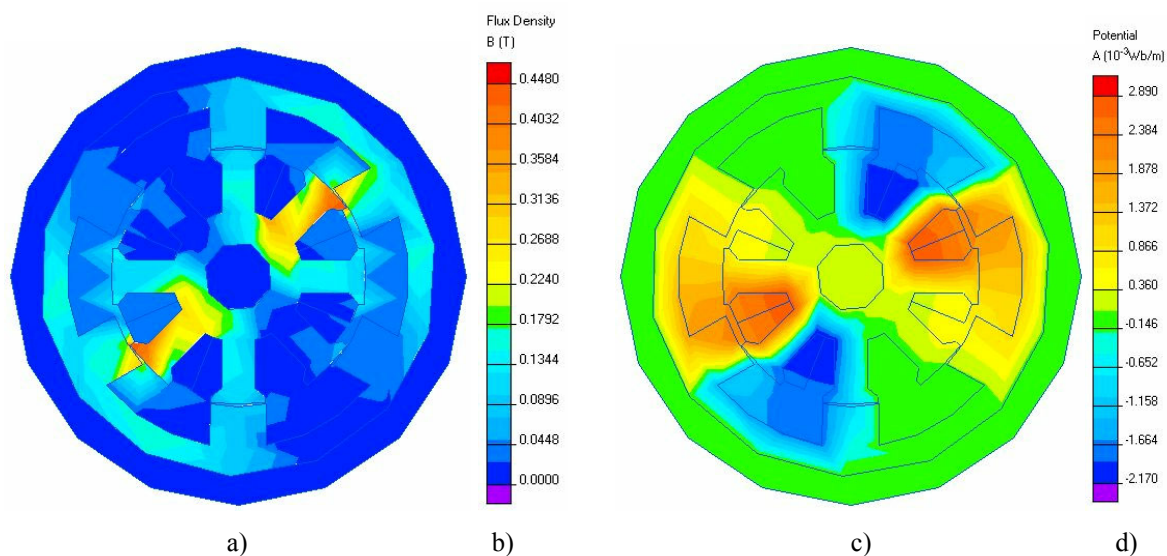
7. Ábra A mágneses mező erővonalai

A kiszámított mágneses teret nyilak (vektorok) segítségével is ábrázolhatjuk. A berajzolt vektorok mérete arányos a térerősség abszolút értékével, irányítása pedig megegyezik a térerősség irányításával. Amint a 9. ábrán is látni lehet, lehetőség van csak a nyilakkal történő ábrázolásra, vagy kombinálható az erővonalak megrajzolásával is.



8. Ábra A mágneses mező ábrázolása nyilak (vektorok) segítségével

Nagyon szuggesztív a szintérképekkel való ábrázolásmód is. Az ábrázolt fizikai mennyiség (például mágneses indukció, térerősség, energia-sűrűség, stb.) értékeinek színeket feleltetnek meg. A szintérképekhez mellékelnek egy színskálát is, amiről leolvasható, hogy melyik szín-árnyalatnak milyen érték felel meg. A 10. ábrán bemutatunk két ilyen szintérképet a hozzájuk tartozó színskálával.



9. Ábra Szintérképes ábrázolása a mágneses indukciónak (a-b) és a mágneses vektorpotenciálnak (c-d)

A fenti szintérképeken ábrázolt két mennyiség a mágneses indukció és a mágneses vektorpotenciál. A szintérképeket tanulmányozva könnyen megállapítható például a villamos gép különböző részeinek telítettsége.

A mezőszámító gyári programok lehetővé teszik, hogy egy tetszőleges kontúr mentén különböző fizikai mennyiségeket (a mágneses vektorpotenciált, az indukciót, valamint különböző koordinátarendszerekben számított vetületeit, a mágneses permeabilitást és energiasűrűséget, stb.) ábrázoljunk.

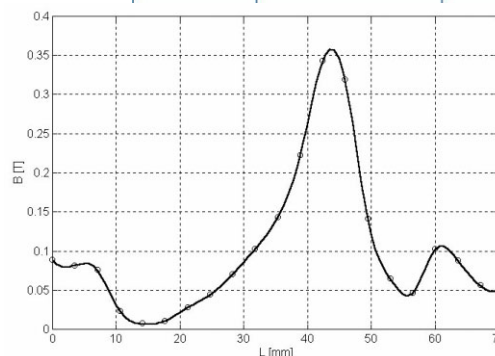
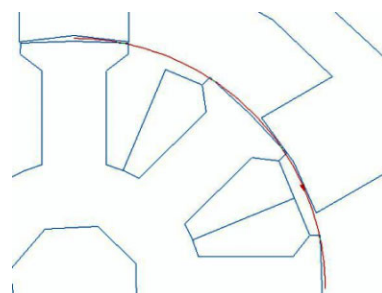
Ehhez első lépésként meg kell határozni azt a kontúrt (görbét vagy egyenest), valamint irányát, amelynek mentén ábrázolni szeretnénk a kívánt mennyiséget (lásd a 11. ábrát).

Példaként az ábrázolandó mennyiségnek a mágneses indukciót választottuk. Ennek változása a meghatározott görbe mentén (gyakorlatilag a hosszúság függvényében) a 12. ábrán látható.

Ugyancsak könnyen megkaphatunk a definiált kontúron kiszámított számos integrálértéket (az kifejtett elektrodinamikuss erőt és nyomatékot, a mágneses fluxust, mágneses energiát, stb.)

Mindezek mellett a gyári mezőszámító programok segítségével más módon is megkaphatjuk a kívánt eredményeket. Például az egér segítségével kiválaszthatunk egy pontot az adott tartományban és megállapíthatjuk, a pont koordinátái mellett, számos mennyiség (a mágneses vektorpotenciál, a mágneses térerősség, indukció vagy a mágneses energiasűrűség) pontos lokális értékét ebben a pontban.

Mindezek híven illusztrálják a mezőszámító programcsomagok hasznosságát és széleskörű felhasználhatóságát. Manapság a villamosmérnöki gyakorlat (kiváltképp a villamos gépek tervezése és szimulációja) szinte elképzelhetetlen e hasznos segédeszközök nélkül.



11. Ábra A mágneses indukció változása a kiválasztott kontúr mentén

6. Irodalomjegyzék

1. Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Magyar-román műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1981.
2. Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Román-magyar műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1979.
3. Hajach T. - Meluzin H. - Bernáth J.: *Elektrotechnikai számítások*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1980.
4. Hamayer K. - Belmans R.: *Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices*, WIT Press, Southampton, 1999.
5. Salon S.J.: *Finite Element analysis of Electrical Machines*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1995.
6. Zombory L. - Koltai M.: *Elektromágneses terek gépi analízise*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.
7. ***: *Computer Aided Design in Magnetics*, Katholieke Universiteit Lueven, Belgium, 1997.

Térszámítás Monte Carlo módszerrel

Dr. Szabó Loránd, egyetemi adjunktus

Kolozsvári Műszaki Egyetem, Villamosmérnöki kar

1. Bevezetés

Monte Carlo módszereknek általában a matematikai feladatok megoldásának véletlen mennyiségek modellezését felhasználó numerikus módszereket nevezzük. Numerikus módszer lévén, előretörése nagymértékben összefüggésbe hozható a számítógépek rohamos és töretlen fejlődésével. A Monte Carlo módszerrel sokféle feladat megoldható, nemcsak a véletlen mennyiségekkel kapcsolatos valószínűség-számítási feladatok. Előszeretettel használják a fizikában, kémiában, biológiában, közgazdaságtanban, automatizálásban, aerodinamikában és még számtalan más tudományágban. Alkalmazható, mint látni fogjuk, elektromos és mágneses terek számítására is.

A módszer elnevezése a kaszinóiról híres Monaco Nagyhercegségbeli patinás Monte Carlo város nevéből származik, mivel a véletlen számok egyik legegyszerűbb és legismertebb előállítási eszköze a rulett. Elnevezését 1949-ben kapta a módszer N. Metropolis és S. Ulam egyik cikkében (*The Monte Carlo Method*).

A Monte Carlo módszert már a XX. század elején is használta néhány statisztikus, de nem válhatott elterjedt számítási módszerre a számítógépek megjelenéséig. Igazi karrierje csak akkor indult igazán fejlődésnek, amikor Neumann János, S. Ulam és E. Fermi atommagreakciókra vonatkozó bonyolult matematikai problémák számítógéppel történő közelítő megoldására használta Los Alamosban (USA).

Ezután Monte Carlo módszernek szigorúbb értelemben az olyan mesterséges sztochasztikus modell előállítását nevezzük, amely a sztochasztikus folyamatok minden szükséges tulajdonságával rendelkezik, realizálása viszont a szokásos számítási eszközök: ceruza, papír, elektronikus számítógépek segítségével történik. Néha a probléma analitikus megfogalmazásából indulunk ki, ezután keresünk megfelelő sztochasztikus modellt, pl. véletlen bolyongási modellt, és ezzel dolgozunk. Más esetekben már a kiindulási probléma önmaga is egy sztochasztikus folyamat.

A Monte Carlo módszereket leginkább ott alkalmazzák, ahol a matematikai probléma igen számolásigényes, vagy ahol már az eredeti probléma is valamilyen sztochasztikus folyamat, amelynek analitikus leírása és megoldása gyakorlatilag nem lehetséges és/vagy nem is szükséges. Léteznek azonban olyan számolásigényes problémák, amelyek megfogalmazása semmiféle kapcsolatban nincs a valószínűség-számítással, mégis jól alkalmazható megoldásukhoz a Monte Carlo módszer. Ebben az esetben a probléma analitikus megfogalmazásából indulunk ki, ezután ehhez keresünk megfelelő sztochasztikus modellt, majd megfigyeléseket kell végezni ezzel a modellel kapcsolatban, és végül különböző statisztikákkal megbecsülni az eredeti feladatban szereplő paramétereket. Ezek legjellemzőbb példái az elliptikus differenciálegyenletekre (ilyen a mágneses vektorpotenciálra felírt Poisson-egyenlet is) vonatkozó peremérték-problémák és a parabolikus differenciálegyenleteknél fellépő rokon problémák.

2. A Monte Carlo módszer alapja

A Monte Carlo módszerekkel leginkább valaminek a várható értékét kell kiszámolni. Ez elvileg azt jelenti, hogy bonyolult kifejezések kiértékelésénél az adott esetben időigényes és

pontatlan numerikus megközelítések helyett egy olyan egyszerű, véges szórású valószínűségi változót keresünk, amelynek várható értéke éppen a keresett kifejezés.

Matematikailag megfogalmazva mindezt, ahhoz, hogy valamilyen a skalár mennyiséget közelítőleg meghatározzunk, találnunk kell egy olyan ξ valószínűségi változót, hogy

$$\mathbf{M}\xi = a \quad (1)$$

legyen. A statisztikában kevésbé jártasak számára itt jegyezzük meg, hogy az \mathbf{M} a várható érték (*expected value*) operátora. Ekkor a ξ -re N számú független megfigyelést végezve igaz az, hogy:

$$a \approx \frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N} \quad (2)$$

A várható érték az a szám, amely körül egy adott valószínűségi változó megfigyelt értékeinek számtani középértéke ingadozik.

A közelítés hibája fordítottan arányos az adott konfidenciával kifejezett szórással. Fontos előnye ennek a módszernek, hogy a hiba független a megoldandó feladattól és annak dimenziójától.

A Monte Carlo módszer lényegét legkönnyebben egy egyszerű, de látványos példa megoldásával érzékeltethetjük.

1. Példa

Határozzuk meg a Monte Carlo módszer segítségével a 2 egységnyi sugarú kör közelítő területét (T_k).

A módszer lényege, hogy rajzolunk a kör köré egy ismert területű (T_n) négyszöget. Véletlenszám-generátor segítségével előállítunk N pontot a négyszögön belül. Megvizsgáljuk, hogy hány pont esik a körön belülré (N_b). Amennyiben elégségesen sok pontot vettünk fel, akkor igaz az alábbi becslés:

$$\frac{N_b}{N} \approx \frac{T_k}{T_n}$$

ahonnan megkaphatjuk a kör területének várható értékét:

$$T_k = T_n \frac{N_b}{N}$$

Ebben a példában a ξ valószínűségi változó értéke T_n ha a felvett véletlen pont a kör területén belül esik, illetve nulla, ha nem. Világosan látszik, hogy ekkor a várható érték:

$$\mathbf{M}\xi = T_k$$

és a független megfigyelések matematikai átlaga:

$$\frac{\sum_{i=1}^N \xi_i}{N} \approx T_n \frac{N_b}{N} = T_k$$

A számítások elvégzésére, valamint a felvett pontok grafikus ábrázolására az alábbi MATLAB programot írtuk.

```

clear all; clf
a=2; b=2;

% A kor megadása és kirajzolása
r=0:0.005:2*pi;
xp=a*sin(r);
yp=b*cos(r);
plot(xp,yp,'k','LineWidth',1.5)
hold on

% A négyzet mereteinek megadása és megrajzolása
limit=2.5;
xx=[-limit,limit,limit,-limit,-limit];
yy=[-limit,-limit,limit,limit,-limit];
plot(xx,yy,'k','LineWidth',3)

% A tengelyek beállítása
axis equal
axis([-limit,limit,-limit,limit])

% A kezdőértékek megadása
nrjo=0;
nrrand=10
flops(0)

% A számítási ciklus elindítása
for nrtot=1:nrrand;

% A két koordinata véletlen generalása
x=limit*(-1+2*rand(1));
y=limit*(-1+2*rand(1));

% A pont helyzetének megállapítása
% - kod=1 ha a körön belül van
% - kod=0 ha a körön kívül van
if kor(x,y)>=a^2+b^2 kod=0; else kod=1; end

% A pont berajzolása:
% - piros + jellel, ha kívül van a körön
% - zöld x jellel, ha a körön belül van
if kod==0 plot(x,y,'r+'); else plot(x,y,'gx'); end

% Ha a körön belül van megnoveljük a pont-számot
if kod==1 nrjo=nrjo+1; end;

end;

% Kiírjuk a keresett pontok számát
muveletek_szama=flops

% A kör területének pontos merteke
Tjo=pi*2^2

% A négyszög területe
Ttart=(2*limit)^2;

% A kör területének becslt értéke
Tszam=Ttart*nrjo/nrrand

% A relatív hiba kiszámítása

```

```

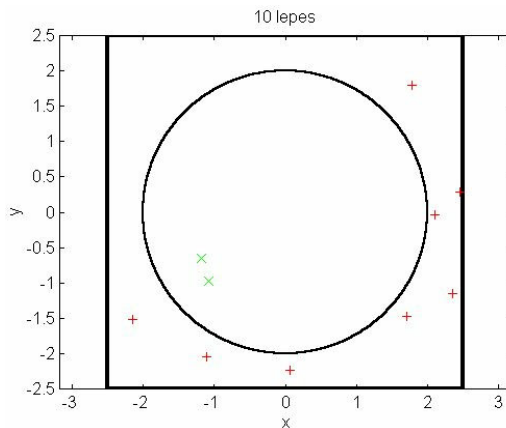
error=abs((Tjo-Tszam)*100/Tjo)

% Az abra cimenek es a tengelyek cimkeinek megirasa
title([num2str(nrrand), ' lepes'])
xlabel('x')
ylabel('y')

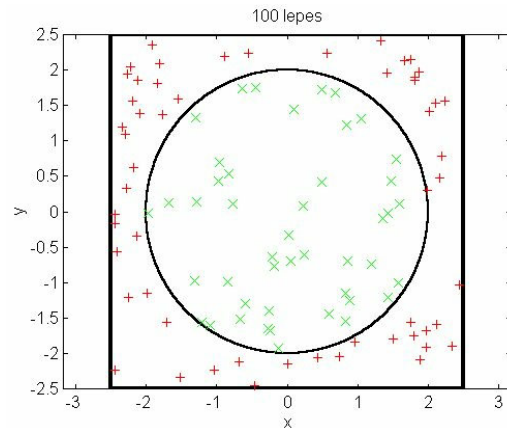
```

A programot többször futtattuk, úgy, hogy mindig megnöveltük a generált pontok számát.

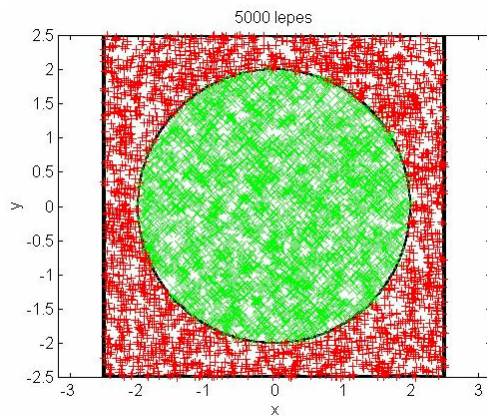
A következő négy ábrán nyomon követhető hogyan oszlanak meg a generált pontok a négyszögön belül.



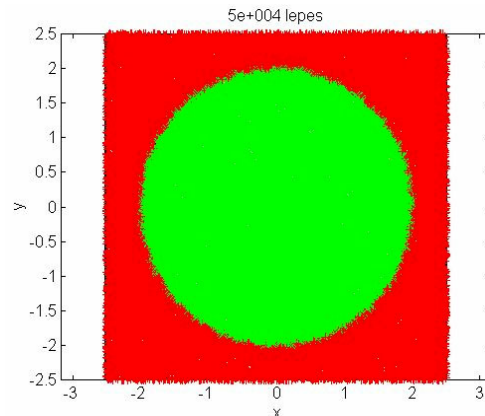
1. ábra



2. ábra



3. ábra



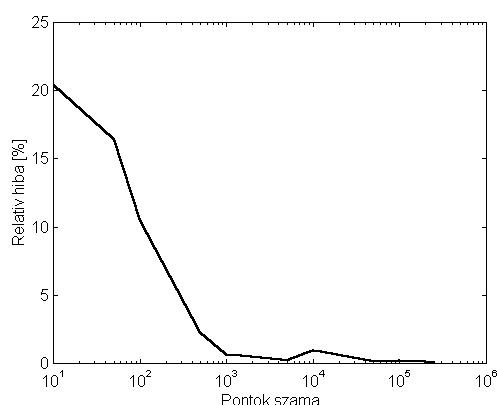
4. ábra

Mint az ábrákból is kitűnik, nagyszámú pont felvétele szükséges ahhoz, hogy a kapott eredmény értékelhető legyen.

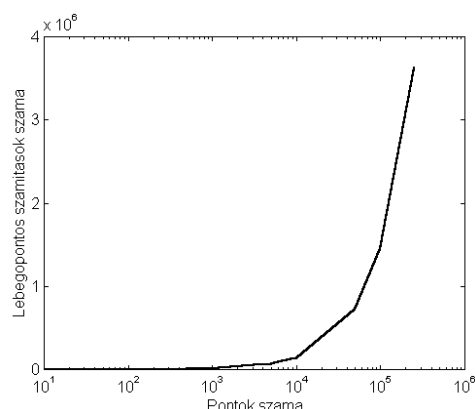
A kapott eredményeket részletesen az alábbi táblázatban foglaltuk össze. A relatív hibát a kör valós területéhez (12,5664) viszonyítva számítottuk. Az adott eredmény kiszámításához szükséges lebegőpontos számítások számát a **flops** utasítással rögzítettük.

Pontok száma	Becsült terület	Relatív hiba [%]	Számítások száma
10	10	20,42	144
50	10,5	16,44	721
100	11,25	10,46	1.445
500	12,85	2,26	7.257
1.000	12,65	0,66	14.506
5.000	12,595	0,23	72.519
10.000	12,566	0,96	145.075
50.000	12,586	0,16	725.172
100.000	12,536	0,24	1.450.145
250.000	12,578	0,09	3.625.784

Mint a táblázatból is látható, a definiált pontok számának növekedésével csökken a relatív hiba és természetesen nő az elvégzendő számítások száma is. A viszonylagos hibaérték, illetve a számítások számát ábráztuk a generált pontok számának függvényében. A kapott grafikák az 5. és a 6. ábrán láthatók.



5. ábra



6. ábra

Az 5. ábra egy kis magyarázatra szorul. Elméletileg az volt várható, hogy a hiba folytonosan csökkenjen a pontok számának növekedésével. Ellenben a valóságban az eredményt befolyásolják az ún. kumulatív (felhalmozódó) hibák, amik a számok számítógépes tárolásából erednek. Mivel minden szám bizonyos jól meghatározott számú bitben van tárolva, elkerülhetetlen a számok végének lefaragása. Minél több számolást végzünk el, annál több esetben kell a számítógépnek lekerekítenie a tárolt értékeket.

A másik jelenség amit ebben az esetben figyelembe kell venni az, hogy mivel a pontokat véletlenszerűen generáljuk, sohasem kapjuk meg még azonos számú előállított pont esetében sem kétszer ugyanazt az eredményt. Úgy is fogalmazhatunk, hogy egy kis szerencsével kevesebb pont felvétele esetében is érhetünk el pontosabb eredményt, mint mintha jóval több pontot definiáltunk volna. Előfordult (természetesen véletlenül), hogy nagyon pontos eredményt értünk el már 10 felvett pont esetében is! Ezután többször

futtatva ugyanazokkal a beállításokkal a programot nem sikerült még egyszer még közel sem olyan jó eredményt elérni ilyen kevés ponttal.

Hasonló módon járhatunk el bármely határozott integrál kiszámítása esetében is. Ugyanis ennek megoldása is egy területszámítási példára vezethető vissza (az integrálandó függvényt ábrázoló görbe alatti terület becslt értékét kell meghatározni).

3. A Monte Carlo módszer felhasználása elliptikus differenciálegyenletek megoldására

Az elliptikus differenciálegyenletek a differenciálegyenletek egyik fontos osztálya. Fontos szerepük van a természet legkülönbözőbb stacionárius folyamatainak leírásában, így a sztatikus elektromos és mágneses terek analízisében is.

A gyakorlatban leggyakrabban előforduló elliptikus differenciálegyenlet a Laplace-egyenlet, amelynek másodrendű alakja a következő:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (32)$$

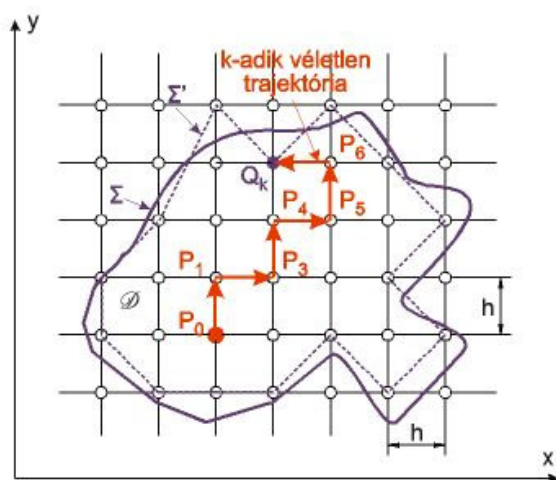
valamint a Poisson-egyenlet:

$$\Delta u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = F(u) \quad (4)$$

Az elliptikus differenciálegyenletek megoldására a Monte Carlo módszerekben belül több algoritmus létezik, amik közül az elkövetkezőkben az alábbiakkal fogunk foglalkozni: a rögzített és a változó véletlen trajektóriák módszere.

3.1. A rögzített véletlen trajektóriák módszere

A módszer alkalmazásának első lépéseként az adott tartomány belsejében és határán diszkrét pontokat, úgynevezett rácspontokat értelmezünk és a megoldást ezekben a pontokban keressük. A kijelölt pontok egy szabályos (az egyszerűség kedvéért rendszerint derékszögű) síkbeli vagy térbeli rács pontja (lásd az 7. ábrát).



7. ábra. A rögzített véletlen trajektóriák módszerének grafikus magyarázata

Mind a Laplace, mind a Poisson-egyenlet megoldásához elengedhetetlenül szükséges a peremfeltételek előírása és figyelembevétele. A Σ tartományperemet közelítjük Σ' sokszöggel, amelynek csúcsai a felvett rács csúcspontjaival esnek egybe. A legegyszerűbb és legelterjedtebb esetben az elsőfajú (Dirichlet) peremfeltétel előírja a vizsgált tartomány (D) közelített peremén (Σ') az ismeretlen fizikai mennyiség pontos értékét:

$$u|_{\Sigma'} = f_D(x, y), \quad \forall (x, y) \in \Sigma \quad (5)$$

Valamennyi belső (x_0, y_0) koordinátájú P_0 rácspontnak van négy szomszédos pontja: $P_1(x_0+h, y_0)$, $P_2(x_0, y_0+h)$, $P_3(x_0-h, y_0)$ és $P_4(x_0, y_0-h)$, ahol h a rácsosztás. Felírhatjuk ebben az esetben is a Poisson-egyenletet közelítő közismert, ún. ötpontos differenciasémát, a P_0 rácspontra vonatkozóan:

$$u(P_0) = \frac{1}{4} \sum_{k=1}^4 u(P_k) - \frac{h^2}{4} F(P_0) \quad (6)$$

Az említett parciális differenciálegyenleteknek a Monte Carlo módszer alapján történő megoldásának alapja egy fiktív részecske véletlenszerű bolyongása, ami alatt a részecske véletlenszerűen ugrik az egyik rácspontról a másikra. Ezt a sztochasztikus folyamatot a matematikusok véges elemű Markov-láncként értelmezik. A bolyongás addig tart, amíg a részecske el nem ér egy a határon levő rácspontot. Általános esetben a P_0 kezdeti pontból induló és a peremen fekvő Q_k pontba érkező k -adik véletlen bolyongás útján meghatározott trajektóriához rendelhető Markov-lánc a következő: $P_0 \rightarrow P_1 \rightarrow \dots \rightarrow P_s \rightarrow P_{s+1} \rightarrow Q_k$. A leírt véletlen trajektória ebben az esetben rögzített, mivel a részecske csak egy szomszédos rácspontba ugorhat.

2. Példa

Rajzoljunk ki 4 rögzített véletlen trajektóriát, melyek egy 50x50-es rácsozat középpontjából indulnak ki.

A véletlenszerű lépések irányát (dx és dy) két, a $[0,1]$ intervallumban generált véletlenszám (a és b) határozza meg az alábbi táblázat alapján:

a	b	dx	dy
$\geq 0,5$	$\geq 0,5$	1	0
$< 0,5$	$\geq 0,5$	0	1
$\geq 0,5$	$< 0,5$	-1	0
$< 0,5$	$< 0,5$	0	-1

```
clear all; clf
nr=50;
hold on
    % A racsozat megrajzolasa
for k=0:nr; plot([k,k],[0,nr],'k'); end
for k=0:nr; plot([0,nr],[k,k],'k'); end
axis([0 nr 0 nr])
axis square
    % A perem megrajzolasa
plot([0,nr,nr,0,0],[0,0,nr,nr,0],'b','LineWidth',2.5)
```



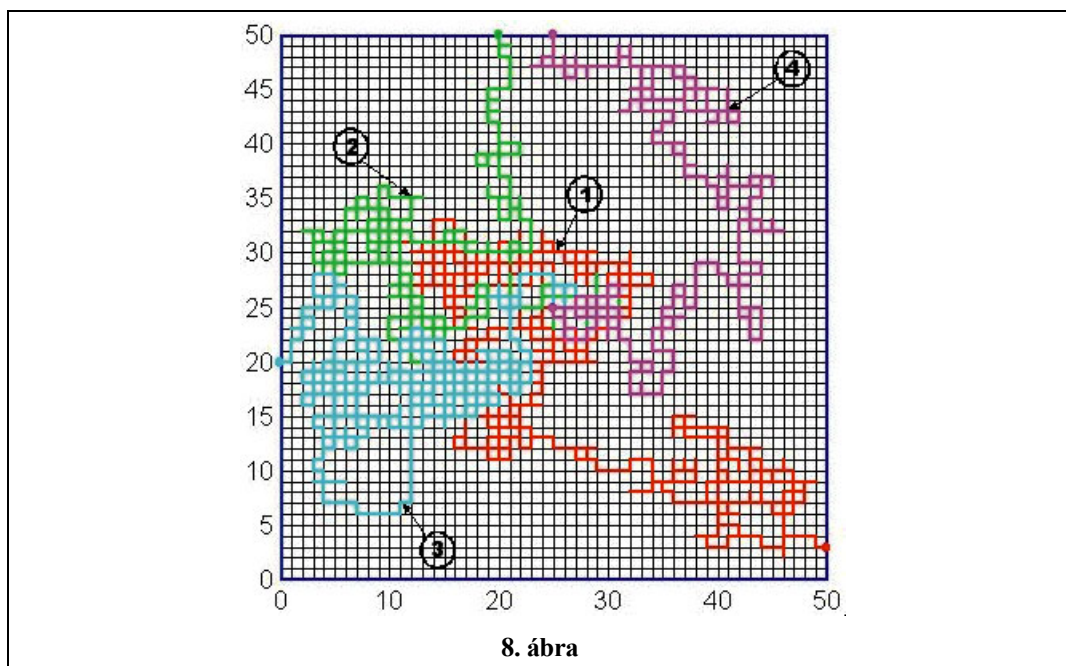
```

        % A racs kozeppontjanak bejelolese
plot(nr/2,nr/2,'r.','MarkerSize',15)

x0=nr/2; y0=nr/2;
dx0=0; dy0=0;
x=x0; y=y0;
elert=0;
N=0;
while elert==0;
    % Amig el nem erjuk a racs szelet hajtsuk vegre az alabbi utasitasokat
    % A veletlenszamok generalasa
    a=rand(1); b=rand(1);
    % A lepes iranyanak megallapitasa
    if a>=0.5 & b>=0.5 dx=1; dy=0; end;
    if a<0.5 & b>=0.5 dx=0; dy=1; end;
    if a>=0.5 & b<0.5 dx=-1; dy=0; end;
    if a<0.5 & b<0.5 dx=0; dy=-1; end;
    % A lepes berajzolasa es kiszamitasa
    plot([x,x+dx],[y,y+dy],'r','LineWidth',1.5)
    x=x+dx; y=y+dy;
    X(N+1)=x; Y(N+1)=y;
    N=N+1;
    % A perem eleresenek ellenorze
    if x==0 | x==nr | y==0 | y==nr elert=1; end
end;
plot(x,y,'r.','MarkerSize',15)

```

A fenti programot négyszer futtattuk le. A célba éréshez 1023, 498, 676, illetve 419 lépésre volt szükség. A megtett lépéseket a 8. ábrán követhetjük figyelemmel. A négy véletlen trajektória ábrázolásakor sorrendben a következő színeket használtuk : piros, zöld, halványkék és lila.



A Monte Carlo módszer alkalmazásakor az a (6) egyenletben szereplő $u(P_k)$ $1/4$ értékű együtthatójának megfeleltetjük a P_0 kezdeti pontból a P_k ($k=1 \div 4$) pontba való véletlenszerű ugrás valószínűségét. Elméletileg bizonyítható, hogy az u függvény értékét a P_0 pontban statisztikailag megközelíti a k -adik véletlen trajektóriának megfeleltetett alábbi érték:

$$Z_k = f_D(Q_k) - \frac{h^2}{4} \sum_s F(P_s) \quad (7)$$

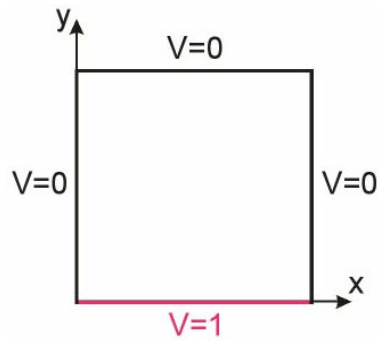
ahol $f_D(Q_k)$ a láncnak a peremre eső végpontjában a Dirichlet feltétel szabta értéke, $\sum_s F(P_s)$ az F függvény valamennyi elért s pontban kiszámított értékének összege. Az összegbe bele kell számítanunk a P_0 kezdeti pontnak megfelelő függvényértéket is.

Amennyiben kellőképp nagyra választjuk a tanulmányozott bolyongások számát (N), akkor a Z_k értékek számtani középárayosa megegyezik az $u(P_0)$ várható értékével. Az imént ismertetett módon kiszámíthatjuk valamennyi belső rácspontban a keresett függvény várható, közelítő értékét.

A módszer várható hibája elméletileg fordítottan arányos az N szám négyzetgyökével.

3. Példa

Oldjuk meg a rögzített véletlen trajektóriák módszerének segítségével az alábbi egyszerű elektrosztatikai példát: tekintsünk a 9. ábrán látható, légtüres térben levő egységnyi oldalú négyzet alakú tartományt. A négyzet alapjának potenciálja legyen 1 V , míg a többi oldalán zérus. Végezzük el az elektromos tér számítását a négyzeten belül és rajzoljuk meg a térerővonalakat.



9. ábra

A feladat megoldását az elektrosztatikus térre vonatkozó Laplace-egyenlet adja:

$$\Delta V = \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} = 0$$

amelyhez csatolnunk kell a peremfeltételeket:

$$\begin{aligned} V(x, 0) &= 1 \\ V(x, 1) = V(0, y) = V(1, y) &= 0; \quad x, y \in [0, 1] \end{aligned}$$

A feladat megoldására az alábbi MATLAB programot írtuk:

```
clear all; clf

nr=30; % A racspontok száma egy tengely mentén
Nmax =10000; % A pontonként vizsgált trajektoriak száma
% A peremfeltételek megszabása

V=zeros(nr);
V(1,:)=ones(1,nr);

% A számítási dupla ciklus elindítása
for i=2:nr-1
    for j=2:nr-1
        N=0;
        Ztot=0;
        % A trajektoriak generalasa
        while N<=Nmax
            x=i; y=j;
            elert=0;
            while elert==0;
                % A véletlen lépések meghatározása
                a=rand(1); b=rand(1);
                if a>=0.5 & b>=0.5 dx=1; dy=0; end;
                if a<0.5 & b>=0.5 dx=0; dy=1; end;
                if a>=0.5 & b<0.5 dx=-1; dy=0; end;
                if a<0.5 & b<0.5 dx=0; dy=-1; end;
                % Az új helyzet megállapítása
                x=x+dx; y=y+dy;
                % A perem elérésének ellenőrzése
```

```

        if x==0 elert=1; Z=1; end
        if x==nr | y==0 | y==nr elert=1; Z=0; end
    end;

    % A peremen levo pontban a Dirichlet feltetel ervenyesítése
    Ztot=Ztot+Z;
    N=N+1;
end;

% Az (i,j) pontban a potenciál kiszamitasa
V(i,j)=Ztot/N;

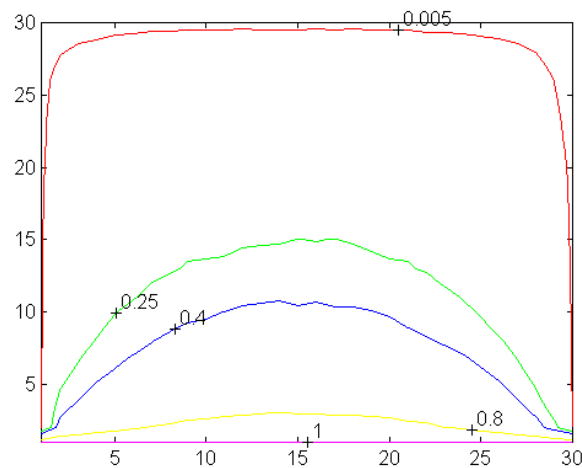
end;end;

% A konturvonalak megrajzolasa
[C,H]=contour(V,[0.005,0.25,0.4,0.8,1]);
clabel(C);

% Az eredmeny kimentese szovegfajlba
save rezmonte V -ascii

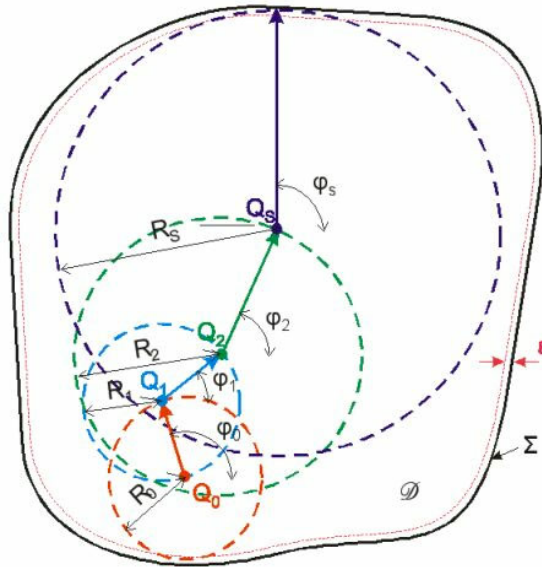
```

A program futtatásával az alábbi ábrát kaptuk, amelyen ábrázoltuk a 0,005 V, 0,25 V, 0,4 V, 0,8 V és 1 V potenciálnak megfelelő erővonalakat.



10. ábra

3.2. A rugalmasan változó véletlen trajektóriák módszere



11. ábra. A rugalmasan változó véletlen trajektóriák meghatározásának grafikus magyarázata

A rugalmasan változó véletlen trajektóriák módszerének (*floating random-walk*) fő előnye, hogy a megteendő lépéseknek se a hossza, se az iránya nincs előre megszabva, és emiatt kevesebb lépés meghatározása szükségeltetik, ami nagymértékben felgyorsítja a számítási folyamatot.

Tekintsük ismét a Poisson-egyenletet a hozzárendelt peremfeltétellel. Az előzőekben ismertett rács csúcspontjait helyettesítsük az ún. próbapontok (P_0, P_1, \dots, P_N) sorozatával. Ezek felvételének módját semmilyen szabály nem határozza meg. Ezekben fogjuk közelítőleg kiszámítani az ismeretlen értékét.

A $Q_0 = P_0(x_0, y_0)$ pontból kiinduló $Q_0 \rightarrow Q_1 \rightarrow \dots \rightarrow Q_s \rightarrow Q_{s+1} \rightarrow \dots \rightarrow Q_v$ rugalmasan változó véletlen trajektória meghatározása a következőképpen történik (lásd az 11. ábrát). A Q_0 pont körül egy R_0 véletlen nagyságú sugarú kört rajzolunk, amely a meghatározott tartomány belsejébe esik. Ennek a körnek a kerületén választjuk ki a következő $Q_1(x_1, y_1)$ pontot, amelynek ko-

$$\begin{aligned} x_1 &= x_0 + R_0 \cos \varphi_0 \\ y_1 &= y_0 + R_0 \sin \varphi_0 \end{aligned} \quad (8)$$

ordinátáit az alábbi összefüggések adják:

ahol a φ_0 szög egyenletes eloszlású a $(0, 2\pi)$ intervallumban.

Legyen az adott D tartomány Σ határán egy korlátos $g(P)$ függvény. Rögzítsük a tartomány peremének egy elegendően kicsi ε környezetét. Az ismeretlen u függvény $Q_0(x_0, y_0)$ pontbeli értékének kiszámítása érdekében szerkesszünk egy $Q_0 \rightarrow Q_1 \rightarrow \dots \rightarrow Q_v$ rugalmasan változó véletlen trajektóriát, addig, míg ennek Q_v végpontja a Σ határ ε környezetébe nem esik. Legyen P_v a Σ határ a Q_v ponthoz legközelebb eső pontja. Ebben az esetben úgy vehetjük, hogy $u(Q_v)$ közelítőleg egyenlő $g(P_v)$ -vel. N számú ilyen trajektóriát szerkesztve N értéket kapunk: $g(P_{v_1}), \dots, g(P_{v_s})$. A keresett megoldást ezekkel az értékekkel becsüljük:

$$u(P_0) \approx \frac{1}{N} \sum_{s=1}^N g(P_{v_s}) \quad (9)$$

A módszer konvergenciája a nagy számok törvényének alapján könnyen igazolható [7].

4. Összegzés

A Monte Carlo módszer alkalmazásának számos előnye van:

- Segítségével a potenciál értékei meghatározhatók a tartománynak csak egy részében, anélkül, hogy szükség lenne a potenciál ismeretére a tartomány többi részében.
- Könnyen alkalmazható térbeli mezőproblémák megoldására is. A számítások száma nem nő meg számottevően a plusz dimenzió megjelenésével.
- Alkalmazása nem feltételez konvergencia és stabilitás elővizsgálatot.
- Az alkalmazott algoritmusok egyszerűek és nem függenek se a tartomány bonyolultságától, se a tartományhatároktól.

Mindezek mellett a tanulmányozott módszernek van hátránya is: konvergenciája lassú és véletlenszerű, ami miatt a számítási idő nagy. Ellenben a számítógépek teljesítőképességének rohamos növekedésével ez a hátrány eltörpülőben van. Természetesen a kutatók folytonosan dolgoznak a módszer tökéletesítésén, újabb, gyorsabb algoritmusok kidolgozásán. Mindezt figyelembe véve biztosan állíthatjuk, hogy a Monte Carlo módszernek még fontos szerepe lesz nemcsak a stacionárius terek analízisében, hanem szinte valamennyi tudományágban.

5. Irodalomjegyzék

- 1] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Magyar-román műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1981.
- 2] Biró A. - Jenei D. - Rohonyi V.: *Román-magyar műszaki szótár*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1979.
- 3] Dumitrescu I.I.: *Simularea câmpurilor potențiale*, Akadémiai Könyvkiadó, Bukarest, 1983.
- 4] Maurer Gy. - Orbán B. - Radó F. - Szilágyi P. - Vincze M.: *Matematikai kislexikon*, Kriterion Könyvkiadó, Bukarest, 1983.
- 5] Mîndru Gh. - Rădulescu M.M.: *Analiza numerică a câmpului electromagnetic*, Dacia Könyvkiadó, Kolozsvár, 1986.
- 6] Stoyan G. (szerk.): *MATLAB (4. és 5. Verzió) - Numerikus módszerek, grafika, statisztika, eszköztárak*, TYPOTEX Könyvkiadó, Budapest, 1999.
- 7] Szobol I.M.: *A Monte-Carlo módszerek alapjai*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- 8] Zombory L. - Koltai M.: *Elektromágneses terek gépi analízise*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1979.

Környezetvédelem - Környezetszennyezés

Dr. Vodnár János, D. Sc. ny. egyetemi tanár

1. Általános tudnivalók

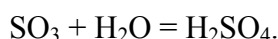
A minket körülvevő természet képezi életünk környezetét. Jól érezzük magunkat, ha minden, ami körülöttünk van, szép, tiszta és rendezett. Ahhoz, hogy ez valóban így legyen, az oktatók és a szülők meg kell magyarázzák a gyermekeknek: mennyire helytelen az, ha valaki találomra dobja el a csokitól megmaradt papirost, az autóbusszjegyet stb., illetve az építkezéseknél megmaradt, a ház körül összegyűlt szennyet, hulladékot kirándulásokra alkalmas tisztásokra, erdőszelekre szállítják, durván szennyezvén ezáltal környezetünket.

Sajnos az ipari termelés sokirányú fejlődésével is egyre több olyan helyzet alakul ki, amikor a hasznos termék mellett számos korróziós tulajdonságú és az emberre nézve ártalmas anyag kerül a levegőbe, folyóvizekbe és a talajba. Ezek károsak az élő szervezetekre nézve, lerontják az erdőállományt, a legelőket és a gabonaföldeket, nagy kárt tesznek a különféle fémszerkezetekben, művészeti alkotásokban (szobrok, festmények, építészeti díszítőelemek stb.), a könyvtárakban őrzött felbecsülhetetlen értékű folyóirat- és könyvállományban. A káros anyagokat, valamint az előzőekben említetteket gyűjtőnéven környezetszennyező anyagoknak nevezzük. Mennyiségük kb. olyan ütemben halmozódik, amilyen ütemben növekszik az ipari és mezőgazdasági termelés. Egyes helyeken olyan töménységben jelennek (és jelentek) meg, hogy már az emberek életét veszélyeztetik, sőt nem egy ízben emberéleteket is követeltek (például a Saar-vidéken egy súlyos kén-dioxid alapú szennyezés 120 ember halálát okozta: HVG 14., 4., 1986.). Az ilyen természetű balesetek nyomán a világ államai nemzeti és nemzetközi bizottságokat alakítottak, amelyek ellenőrzik a környezetszennyező anyagok megengedett töménységét a levegőben, vízben és a talajban, intézkedéseket fogantatnak a környezetszennyezés megelőzése érdekében.

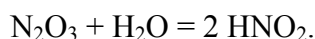
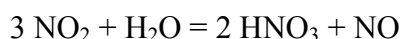
A hollandiai Rotterdamban működik egy nemzetközi törvényszék, ahol az országok közötti vitás környezetszennyező kihágásokat bírálják el. Eddig már száznál is több vállalat és ipari társaság került a vádlottak padjára.

Sajnálattal kell tudomásul vennünk, hogy Európa légterébe már 1965-ben évente kb. 150 millió tonna kén-dioxid került (elsődlegesen) és elképzelhető, hogy 2000-ig ez a mennyiség eléri a 330 millió tonnát. A korróziós és az egészségre ártalmas anyagok közül a kén-dioxidot a nitrogén-oxidok követik, majd ez után sorban következik a kén-hidrogén, az ólomvegyületek, szénhidrogének, fém- és fém-oxid porok meg egyéb mindenféle porszennyeződés, beleértve a szénrel üzemelő hőerőművekből az égési gázokkal együtt elszálló hamut stb. (a legnagyobb mennyiségben képző szén-dioxidot még meg sem említettük).

A levegőbe került kén-dioxid az ott levő nedvességgel kénsavvá alakul, a kén-trioxid pedig kénsavvá:



A nitrogén-oxidok a levegő nedvességével salétromsavat vagy salétromossavat képeznek:



Ezek a savak a lehulló esővel együtt a Földre kerülnek *savas esők* alakjában, és a már jelzett nagy károkat okozzák olyan területeken is, amelyek teljesen ártatlanok a környezetszennyezés tekintetében. Így például a trópusokon, ahol gyakrabban esik az eső, évente több tízezer km² erdő pusztul el. Pedig nem ártana megjegyezni azt, hogy a földi halandók közül kb. 2 milliárd ember fával tüzel, fából készül sok szép bútor, meg falun a sok meleg házikó, fából gyártják a cellulózt, a papírt, a viszkóz műselymet stb. Ugyancsak a savas esők pusztítják el a fák gyökérzetén megtelepülő *nitrifikáló baktériumokat*, amelyek a levegő nitrogénjét a termőtalajt tápláló nitrátokká alakítják.

Természetesen, erdőkárosodás, illetve pusztulás lejátszódhat mérsékelt éghajlati zónában is. Ez történt például Németországban a Harz-hegységben, ahol a teljes erdőállomány elpusztult.

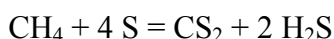
A fent ismertetett helyzetelemző adatok után ismerkedjünk meg a környezetet durvábban szennyező, károsító és nagyobb mennyiségekben képződő anyagokkal és azok eredetével. Kezdjük a légkör egyes számú közellenségével, a kén-dioxiddal.

2. A gyakoribb környezetszennyező anyagok

Nagy mennyiségű *kén-dioxid* kerül a levegőbe a szénrel üzemelő hőerőművekből és általában a tüzelő berendezésekből, viszkóz típusú műselyemgyárakból, szulfidos érceket pörkölő berendezésekből (réz, cink, ólom stb. kohászati üzemek), kőolajfinomítókból stb. A levegőbe kerülő kén-dioxid mennyisége világviszonylatban nagyobb, mint amennyi szükséges a világ kénsavtermelésének a fedezésére! Ennek a mennyiségnek kb. az 50 %-a szénféleségek elégetése nyomán, 30 %-a a földgáz és a kőolajtermékek elégetésekor, 20 %-a pedig különféle vegyipari és kohászati gyártásfolyamatok során képződik. Itt kell megemlítenünk, hogy - sajnos - a fent említett, elégetésre szánt nyersanyagok minősége fokozatosan romlik, ami elsősorban azt jelenti, hogy kén tartalmuk fokozatosan növekszik. Viszont a fokozatosan kimerülő tartalékok arra kényszerítik az érdekelteket, hogy az ilyen gyengébb minőségű nyersanyagokat is felhasználják, mégpedig növekvő mennyiségben. Így aztán könnyű elképzelni azokat a körülményeket, amelyek létrejönnek egy nem túl nagy hőerőmű körül, ahonnan óránként kb. 500 000 m³ égési gáz kerül a levegőbe (12 millió m³/nap), aminek a kén-dioxid tartalma elérheti a 0,25 %-ot és emellett még megjelenik köbméterenként kb. 20 g szállóhamu. Ezekből az adatokból következik, hogy az ipari véggázok (hulladékgázok) kén-dioxidtól való mentesítése nemcsak környezetvédő szempontot, hanem igen fontos gazdasági feladatot is jelent.

A *kén-hidrogén* nagy mennyiségben kerül a levegőbe a kokszkémiai üzemek berendezéseiből, a kőolajfinomítókból, műselyemgyárakból stb. Illetékes szakirodalmi adatok szerint egy tonna koksztolt ásványi szén után kb. 3 kg H₂S kerül a levegőbe. Ismervén, hogy például Románia évi kohászati kokszt termelése közel 7 millió tonna és minden tonna kokszhoz 1,3 t szén kell felhasználni, azt kapjuk, hogy a képződő kén-hidrogén évi mennyisége eléri a 27 millió kg-ot.

A műselyemgyárakban a kén-hidrogént a metán és az elemi kén közötti reakció útján nyerik:



100 t műselyem gyártásakor kb. 6 t kén-hidrogén képződik. Ha feltételezzük, hogy az évi termelés 130 000 t (mint például Romániában), akkor évente 7800 tonna kénhidrogén képződik.

A kőolajfinomítóknál 1000 t kőolaj feldolgozása nyomán kb. 25 t kén-hidrogén keletkezik (katalitikus kéntelenítés vagy hidrofinálás során). Ez azt jelenti, hogy egy évi 20 millió tonnát feldolgozó finomítóban 500 000 t kén-hidrogén képződik.

A kén-hidrogénnel való környezetszennyezésnek a következő okok miatt kell elejét venni:

- a hiánylistán szereplő nyersanyagok egyike;
- felhasználják tioszulfát, elemi kén, merkaptánok (tioalkoholok) gyártására;
- az élő sejteket és enzimeket (biokatalizátorok) mérgezi és ez által gátolja az élő szervezetek működését;
- az idegrendszer irreverzibilis károsodását idézi elő;
- gátolja az oxigénnek a tüdőből a szövetekbe való szállítását;
- savas kémiai jellegénél fogva korrodálja a fémszerkezeteket, az ezüst tárgyakat, megszünteti az ólom-szulfát alapú fehér olajfestékréteget stb.

A szén-dioxid a legnagyobb mennyiségben képződő gáznemű környezetszennyező anyag, szerencsére nem a legártalmasabbak közül való. Az égésnél lejátszódó reakciók alapján tudjuk, hogy minden 12 t közepes minőségű ásványi szén elégetésénél 44 t szén-dioxid képződik és ugyanakkor 32 t oxigén használandó el a levegőből. Jelenleg a világ hőerőműveiben több mint 5 milliárd tonna szenet égetnek el, amiből kb. 18 milliárd tonna szén-dioxid képződik és ezzel egyidőben használandó el a levegőből 14 milliárd tonna oxigén! A szén-dioxid töménységének a levegőben való növekedése fokozatos felmelegedést idéz elő. Ezért a Déli-sarkon található jéghegyek olvadni kezdtek és immár évente mérhető a tengerek (Világtenger) vízszintjének az emelkedése. Amíg ezt a folyamatot nem sikerül megfékezni, egyre nagyobb területek kerülnek víz alá, másrészt az egyre fokozódó felmelegedés mind nehezebbé teszi az életet a Földön.

A szén-monoxid, ólom-oxid és ólom főleg a motorhajtó anyagok elégetése útján kerül a levegőbe a kipufogógázokkal együtt. A szén-monoxid a nem teljes (tökéletlen) égés során képződik, az ólom-oxid és az ólom a benzinek oktánszámának a növelésére használt ólom-tetraetilből képződik a motorban lejátszódó égés alkalmával.

A szén-monoxid vérméregként károsítja az emberi szervezetet, ugyanis a hemoglobinnal karboxi-hemoglobint képez, s így elhasználódik az a hemoglobin mennyiség, ami a tüdőben jelenlévő oxigénnel oxihemoglobint képezhetne, hogy majd leadhassa az oxigént a szervezet különböző szöveteibe.

Az ólom-tetraetilből származó ólomból finom eloszlású ólom-oxid és ólom alapú aeroszol képződik, ami károsítja az idegrendszert, a májat, a vesét stb. Nagyobb mennyiségben és hosszabb ideig tartó hatás nyomán az *elefantiázis* nevű megbetegedést idézhetik elő, ami a végtagok aránytalan megvastagodásával jár.

A radioaktivitással való környezetszennyezést főleg az atomerőművek idézhetik elő. Ezekben nem képződnek a vegyi-, kohászati- stb. gyárakéhoz hasonló környezetszennyező anyagok, de radioaktív hulladékok képződnek. Ezeket viszont jól el lehet raktározni víz alatti raktárakban, vagy kitermelt (kimerült) sóbányákban, ahol ezek a hulladékok végül is elveszítik veszélyességüket. Balesetek persze előfordulnak. A szakirodalomból tudjuk, hogy valamennyi technikai forradalmat kiváltó találmány alkalmazásakor bizony előfordultak emberáldozatot követelő balesetek is. Így például a gőzkazánok alkalmazásának kezdetén szinte sorozatban robbantak fel kazánok, a villamos áram használata kapcsán sokszor tömeges halálos balesetokről számoltak be, amiket az áramütés idézett elő. Mindezeket az eseteket figyelembe véve, meg lehetett állapítani, hogy a nukleáris vagy atomerőmű a legkevésbé veszélyes. Természetesen itt nem mindenáron Csernobilra gondolni, ahol egy elavult rendszerű atomerőmű üzemelt, és ahol - sajnos - hatrendbeli emberi mulasztás idézte elő a tragédiát. Ahhoz, hogy bebizonyítsuk, hogy az atomerőművek nem az emberiség rémei, hadd említsük meg, hogy Angli-

ában például 1962 és 1975 között a nukleáris atomerőművekben összesen 4 halálos áldozatról számoltak be, de egyiket sem a radioaktív sugárzás okozta. Viszont ugyanabban az időszakban, azok közül, akik a nukleáris iparban dolgoztak, 66-an veszítették életüket közúti balesetekben. Különben a nyugati világban a közúti balesetek halálos kimenetelének valószínűsége 1:4000, míg a nukleáris iparban 1:5 milliárd arányú. Azok, akik az erőműhöz közel laknak, a megengedett sugáradag fölött csupán annyi radioaktív sugárzásnak vannak kitéve, mint azok az emberek, akik naponta 20 percig nézik a színes TV-műsort. Ez az adag pedig egy évre számolva kisebb, mint az, amely akkor éri az embert, amikor Londontól New Yorkig repüléssel teszi meg az utat.

Mindezek ellenére, ismervé az emberi gyarlóságot, olykor-olykor felelőtlenséget, nem kell teljesen megfélemlkezni Csernobilről sem, ahol az 1986-ban bekövetkezett atomerőmű katasztrófa 31 ember azonnali halálát okozta, míg 80-an azután haltak meg, 130 000 ember lett sugárbeteg és 500 000 ember kényszerült elköltözni! Falvak egész sora néptelenedett el úgy, hogy a tanító és a pap is elment. Fehéroroszország kára a csernobili katasztrófa nyomán kb. 234 milliárd dollár volt.

A kőolajszennyezés különösen a tengereket és óceánokat sújtja. Ha az utóbbi években bekövetkezett tankhajó baleseteket nem is vesszük figyelembe, akkor is évente legalább 1,9-4,1 millió tonna kőolaj jut az óceánokba (Géczi Róbert: *Szabadság* - Kolozsvár, 1996. május 6). Ennek legnagyobb része a kőolajat szállító hajók szennyvizének kiürítéskor kerül a tenger-vízbe, másik részéért a tengerre szerelt kőolajkutak a felelősek. A kiömlött kőolaj a tengervíz felületén egy filmréteget képez, ami megakadályozza a levegő és a víz között lejátszódó természetes oxigéncserét. A hosszantartó olajborítás következtében a víz felmelegszik, oxigénhiány lép fel, rothadási folyamatok kezdődnek el, amelyek mérgező anyagokat termelnek. Ezek pusztítják az algákat, az állati és a növényi planktonokat, amelyek a tengeri élővilág táplálékát képezik. Az 1989-es környezeti katasztrófa következtében az Alaszkai-öböl vizéből eltűntek a lazacok, heringek, néhány angolnafaj és az arra vándorló bálnák. Mindez pedig a madár- és főkapopulációk csökkenését eredményezte. A hullámmázzal és a dagállyal a partra kerülő olaj átítatja és összetapasztja a madarak tollazatát és ezáltal megbénítja őket. Sajnos az utóbbi évtizedekben szinte sorozatos volt a környezeti katasztrófát okozó tankhajóbalesetek száma. Ezek közül megemlítnék néhányat (zárójelben a kiömlött olajmennyiség szerepel): 1967-ben a Bretagne-félsziget partjainál (200 000 t), 1979-ben a Mexikói-öbölben (470 000 t), 1983-ban Perzsa-öbölben (308 000 t), 1989-ben az Alaszkai-öbölben (151 000 t), 1996-ban az angol partok közelében (120 000 t). 1991-ben az öbölháború idején, mégpedig annak hatodik napján, az irakiak megkezdték a kőolajtartályok és vezetékek felrobbantását. Ezáltal naponta minimum 210 000 t, maximum 1,7 millió tonna kőolaj ömlött a Perzsa-öbölbe, ami valóságos ökológiai katasztrófát eredményezett.

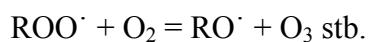
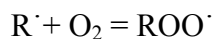
A melegházhatás a levegő szennyezettségének egyik, az emberre nézve nagyon kellemetlen következménye. Lényege abban áll, hogy a légkör természetellenesen túlmelegszik, és ezáltal nehezen elviselhetővé teszi az ember számára különösen a nyári napokat. Ezt a hatást legnehezebben az asztmások, szívbetegsége és általában a magas vérnyomásban és a légúti bántalmakban szenvedők tudják elviselni. Kialakulásához a légköri szennyeződések járulnak hozzá, amelyek nem teszik lehetővé, hogy a Föld által visszavert napsugarak, amelyek normális körülmények között a világűrbe kellene, hogy eljussanak, valóban szabad utat nyerjenek. A szennyeződések ezt meggátolják, vagyis visszaverik a napsugarak melegének egy részét. Ezt a helyzetet szemlélteti az 1. ábra. A melegházhatást kiváltó légköri szennyeződések eredetét és az eredet %-os súlyát szemlélteti a táblázat adatai.

A különböző légköri szennyeződések eredete és %-os súlyuk az adott területen

1. táblázat

CO ₂ -ot eredményező tevékenység	NO _x források (amelyek O ₃ -t is fejlesztenek)
szállítás 22,5 %	szállítás 45 %
erdőtelenítés 23 %	erőművek 37 %
villamos energiatermelés 22,5 %	ipar 12 %
ipar 16 %	egyéb 6 %
egyéb tevékenységek 16 %	
A légköri CH ₄ eredete	Szénhidrogén források
kőolaj és földgáz	ipar..... 37 %
kitermelés 15 %	szállítás 33 %
mocsaraktól 21 %	kőolajfeltárás, természetes
rizstermelés 20 %	gázömlés..... 23 %
bélbaktériumok 22 %	egyéb 7 %
egyéb 22 %	

A melegházhatás kialakulásához az említett szennyeződések különböző mértékben járulnak hozzá. Ezt érzékeltetik a 2. táblázatban felsorolt adatok. Látható, hogy az ózon, ami aránylag kismértékben képződik, annál nagyobb súllyal vesz részt a melegházhatás kialakulásában. Ez az atmoszférában megjelenő ózon különösen a nitrogén-oxidok és a szénhidrogén-szennyeződések hatására keletkezik:

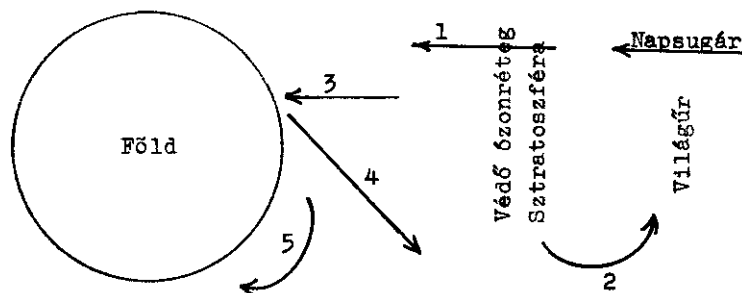


2. táblázat A melegházhatást okozó gázok

A gáz neve	A CO ₂ -hoz viszonyított hatás	Az évi növekedés	A melegházhatáshoz való hozzájárulás jelenleg
CO ₂	1	+0,4 %	50 %
CH ₄	30	+1,0 %	18 %
NO _x	150	+0,3 %	6 %
O ₃	2000	+1,5 %	12 %
Freon	10 000-20 000	+4,0 %	14 %

Erre az ózonra hívják fel a napozók figyelmét nyári időszakban, jelezvén, hogy a napozás orvosilag nem ajánlott délelőtt 11 és általában délután 4 óra között, amikor az ózon töménysége a legnagyobb a levegőben, mivel ez az ózon bőrrákot idézhet elő. Nem tévesztendő össze ez a levegőben keletkező és megjelenő ózon, a sztratoszféra alsó rétegeiben levő ózonnal (ózonpajzs), amelynek az a szerepe, hogy a napsugarakat a kellő mértékben megsűrje az ultraibolya sugaraktól (kemény sugarak), amelyek nagy mennyiségben károsítják az emberi szervezetet és általában minden élőlényt. Erre az ózonpajzsra jelentenek veszélyt a freonok (alacsony szénhidrogének klórt és fluort tartalmazó származékai), amelyek a levegőbe jutva, kis

sűrűségüknél fogva felszállnak, eljutnak a sztratoszféra ózonrétegébe, ahol az ózon bomlását idézik elő, ami a már említett szűrőhatást nagymértékben csökkenti, veszélyeztetve az egész élővilágot.



1. ábra. A napenergia megoszlása a Nap és a Föld közötti térben:

1 - a sztratoszférán (15-50 km) áthatoló napsugarak; 2 - a sztratoszféra által visszavert napsugarak; 3 - a Földet melegítő napsugarak; 4 - a Föld által a sztratoszférába visszairányított napsugarak; 5 - a levegőszennyezések által elnyelt napsugarak, amelyek a melegázhatást okozzák

Irodalomjegyzék

- 1] Kirk Othmer: *Encyclopedia of Chemical Technology*, Interscience Publishers, a Division of John Wiley Son's Inc., New York, London, 1963.;
- 2] Negoiu, D., Kriza, A.: *Poluanți anorganici în aer*, Ed. Academică, București, 1977.;
- 3] Vidrașcu, B.: *Substanțe periculoase în industrie și măsurile de prevenire a accidentelor*, Ed. Technică, București, 1969.;
- 4] Vodnár J.: The obtaining of Sulfur Dioxide from Diluted Industrial Gases, 405th Event of the European Federation of Chemical Engineering (5th Conference On Applied Chemistry, Unit Operations and Processes), vol. II., 1989, p. 39, Balatonfüred (Hungary);
- 5] Vodnár, J.: Spirálcsoves önkeverő laboratóriumi készülékek, *Magy. Kém. Lapja*, XLVIII., No. 3, 125 (1993);
- 6] Vodnár J.: *Általános kémiai technológia*, I. k., Kolozsvár (Erdélyi Tankönyvtanács), 1999;
- 7] Vodnár, J.: RO Szabadalmak: 53686 sz. (1970); 55910 sz. (1972); 59703 sz. (1976); 93128 sz. (1987); 96372 sz. (1972); 97786 sz. (1989); 89508 sz. (1985).