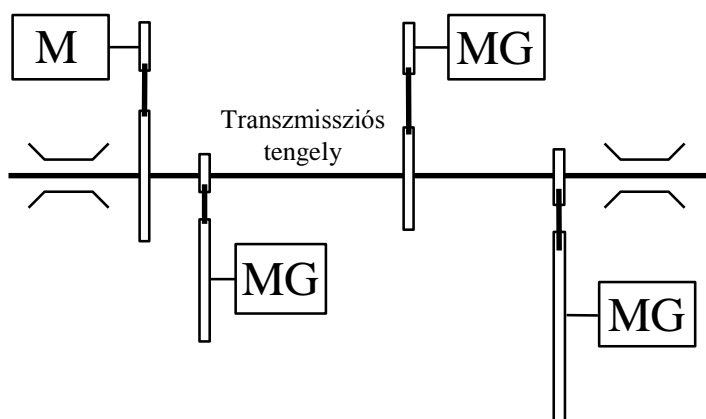


6. VILLAMOS GÉPEK ÜZEMELTETÉSE

6.1. VILLAMOS HAJTÁSOK KINETIKAI KÉRDÉSEI

A villamos gépek elméletének fejlődése és a különböző géptípusok kialakulása lehetőséget adott a villamos hajtások elterjedésére. Az 1900-as években az ipari hajtások már több mint 5 %-a villamos hajtás volt. A villamos motorok először a gőzgépek helyettesítésére szolgáltak. Így alakultak ki elsőként az ún. *csoportos* hajtások, ahol egy villamos motor állandó fordulatszámmal hajtott egy tengelyt (transzmissziós tengely), amelyre több munkagép csatlakozott a technológiának megfelelő áttétellel (6.1. ábra). Az áttétel általában szíjhajtás volt.



6.1. ábra Csoportos hajtás

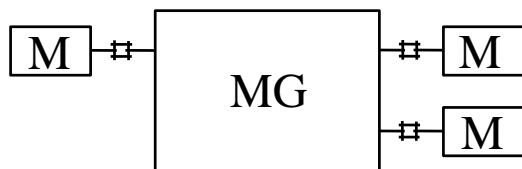
A villamos motorok vezérlésének és szabályozásának fejlődése nyújtotta a lehetőséget, hogy egy adott munkagéphez egy hajtómű alkalmazásával a lehető leggazdaságosabb mo-



6.2. ábra Egyedi hajtás

tor tartozzon. Ez a megoldás az *egydi* hajtás, melynek vázlatát a 6.2. ábrán láthatjuk.

Az összetett feladatokat végző munkagépeknél (pl. tengelymegmunkáló szerszámgép, marógép) az egyes feladatokra külön villamos motorok alkalmazása célszerűbb, mint egy motor és egy bonyolult hajtómű. Ezeket a hajtásokat nevezzük *többsmotoros* hajtásoknak (6.3. ábra). A többsmotoros hajtások előnye, hogy az egyes feladatok jól automatizálhatóak.



6.3. ábra Többsmotoros hajtás

A villamos hajtások ipari alkalmazásainál forgó és egyenes vonalú mozgások fordulnak elő. Tekintsük át a két mozgásforma alap-egyenleteit:

	Haladómozgás	Forgómozgás	
Mechanikai teljesítmény	$P = F \cdot v$	$P = M \cdot \omega$	(6.1)
Dinamikai erő ill. nyomaték	$F_d = m \cdot a$	$M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$	(6.2)
Kinetikai energia	$W = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	$W = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$	(6.3)

A fenti egyenletekben ω a forgó tengely szögsebessége, J pedig a tehetetlenségi nyomaték.

Az egyenleteket általában a nemzetközi **SI** mértékegységrendszerben használjuk, de például a teljesítmény gyakorlatban használatos alakjai az

$$\omega, \text{ r/s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n, 1/\text{min}}{60} = \frac{n, 1/\text{min}}{9,55}$$

egyenlet felhasználásával:

$$P, \text{ kW} = \frac{F, \text{ N} \cdot v, \text{ m/s}}{1000} \quad P, \text{ kW} = \frac{F, \text{ N} \cdot mv, \text{ m/s}}{9550}. \quad (6.4)$$

6.1.1. Tehetlenségi nyomaték

A villamos forgógépek és az általuk hajtott munkagépek forgórészeinek dinamikai viselkedésére a J *tehetlenségi nyomaték* a jellemző. A tehetlenségi nyomaték szerepel a

a) tömör henger

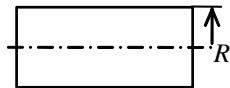
$$J = \frac{1}{2} m \cdot R^2$$

b) vékonyfalú cső $R_1 = R_2 = R$

$$J \cong m \cdot R^2$$

c) körgyűrű henger

$$J = \frac{1}{2} m(R_2^2 + R_1^2)$$



forgómozgás dinamikai nyomaték (mozgásegyenlet) és energia egyenletében is. Számítása a

$$J = \int_m r^2 \cdot dm \quad (6.5)$$

egyenlet szerint történhet. A gyakorlatban a különböző forgástestek tehetlenségi nyomatékát a műszaki kézikönyvek tartalmazzák. A forgógépek esetén leggyakrabban előforduló három

6.4. ábra Forgástestek tehetlenségi nyomatéka

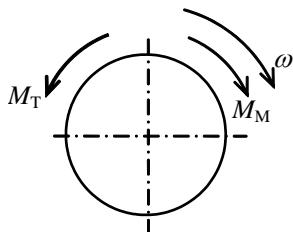
eset számítását a 6.4. ábra mutatja be.

A tehetlenségi nyomaték mértékegysége az alapdefiníció szerint kgm^2 , azonban az $1 \text{ N} = 1 \text{ kgm/s}^2$ és az $1 \text{ Nm} = 1 \text{ Ws}$ definíciók felhasználásával azt kapjuk, hogy $1 \text{ kgm}^2 = 1 \text{ Ws}^3$. Ezt a mértékegységet általában az időállandók számításánál használjuk. A tehetlenségi nyomaték helyett régebben az ún. lendítőnyomaték (GD^2) fogalmát használták. A két jellemző közötti összefüggést megkapjuk, ha felírjuk, hogy:

$$J, \text{Ws}^3 = m \cdot R^2 = \frac{G}{g} \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = \frac{(GD)^2}{4 \cdot g}, \text{Nm}^2.$$

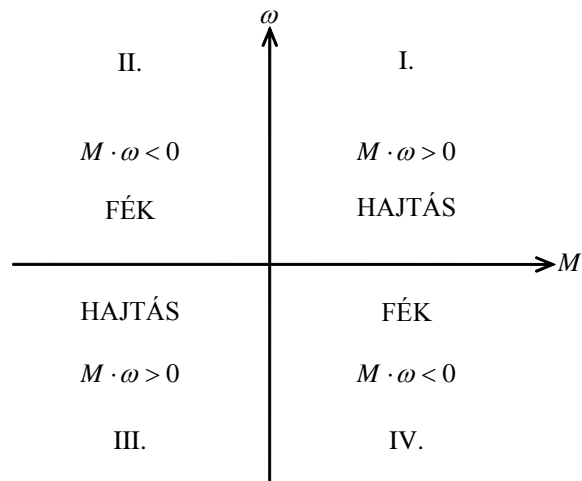
6.1.2. Nyomatékok osztályozása

A villamos hajtások esetén a forgógépek hajtásoldali tengelyvégükkel csatlakoznak a munkagépekhez. A tengelyen keresztül történik a teljesítmény, ill. a nyomaték átadás. A következőkben az $\omega - M$ koordináta rendszerben vizsgáljuk a gépek nyomatékát. A 6.5. ábrán láthatjuk a villamos motorok hajtásoldali szokásos vonatkoztatási irányait. A motor nyomatékának és szögsebességének pozitív iránya a hajtásoldali tengelyvéget szemből nézve az óramutató járásával egyező, a terhelő-, a nyomatéké pedig ellentétes irányú. A 6.6. ábra mutatja az $\omega - M$ koordináta-rendszer negyedeinek értelmezését. Pozitívnak tekintjük a villamos motor által leadott $P = M \cdot \omega$ (a munkagép által felvett) teljesítményt. Negatívnak a motor által a tengelyen felvett (a munkagép által leadott) teljesítményt. Ezek szerint a motor a I. és III. negyedben hajt, a II. és IV. negyedben pedig fékez. A terhelés oldaláról nézve éppen fordított az energiaáramlás iránya.



6.5. ábra Vonatkoztatási irányok

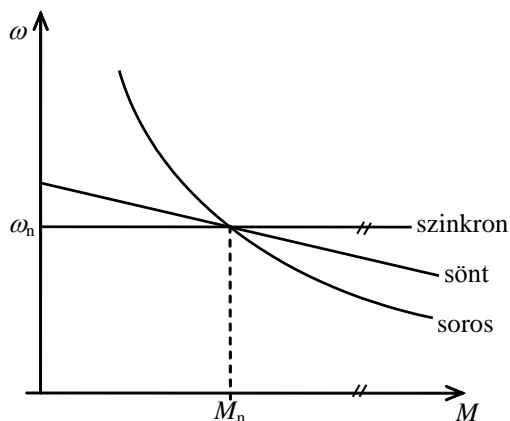
Az éppen vizsgált hajtásrendszer jelleggörbéi több síknegyeden is keresztül mehetnek, eszerint megkülönböztetünk *egynegyedes*, *kétnegyedes*, illetve *négyenegyedes* hajtásokat. A *négyenegyedes* hajtás azt jelenti, hogy egy motor mindkét irányban tudja a munkagépet hajtani, ill. fékezni.



6.6. ábra Az $\omega - M$ koordináta-rendszer értelmezése

A következőkben tekintsük át, hogy a 6.6. ábra szerinti koordináta-rendszerben milyen nyomatékok szerepelhetnek.

A villamos gépek esetén tanultak szerint beszélhetünk a szinkron-, az aszinkron- és az egyenáramú motorok mechanikai jelleggörbéiről. Az aszinkron, és az egyenáramú külső gerjesztésű (kompenzált) motorok fordulatszám-nyomaték jelleggörbéi hasonlóak, ezeket közösen *söntjellegű* jelleggörbéknek nevezzük. Az egyenáramú soros gerjesztésű motorok hiperbolikus mechanikai jelleggörbéit *soros* jellegűnek nevezhetjük. Így a motor jelleggörbéket *szinkron*, *sönt* és *soros* jelleg szerint osztályozhatjuk. A jelleggörbék osztályozását az $m = d\omega/dM$ differenciálhányados, azaz a meredekség névleges pontban adódó értéke szerint végezhetjük:



6.7. ábra Motornyomatékok osztályozása

- szinkron jellegű motor: $m_n = 0$, ha a motor szögsebessége független a terhelőnyomatéktól;
- sönt jellegű motor $m_n = -(0,02...0,01)$, a motor szögsebessége a terhelőnyomatékkal arányosan kismértékben csökken, $m_n \cong \text{áll.}$;
- soros jellegű motor $m_n = -(0,4...0,5)$, a motor szögsebessége a terhelőnyomatékkal jelentősen csökken (kb. a nyomaték négyzetgyökével).

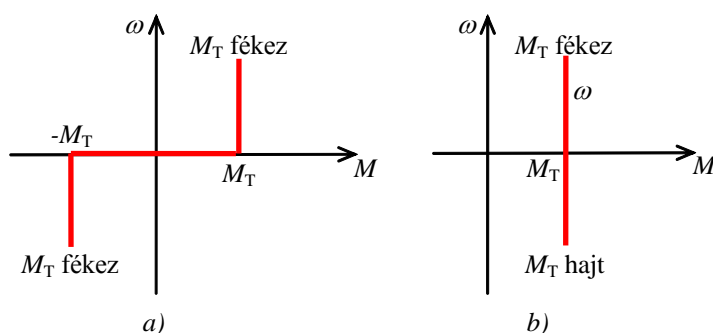
A motornyomaték jelleggörbéket a 6.7. ábra foglalja össze.

A motornyomatékok után tekintsük át a *terhelőnyomatékok* különböző fajtáit. A terhelőnyomaték pozitív irányát a 6.5. ábra szerint a motor szögsebességének pozitív irányával ellentétesen vettük fel.

A terhelőnyomaték irányának a forgásiránytól való függése szerint lehetnek:

- passzív*, mozgást gátló nyomatékokat, amelyek forgásirányváltáskor megváltoztatják előjelüket, tehát mindkét irányban fékeznek (pl: súrlódás, forgácsolás);
- aktív*, egyirányú nyomatékok, melyek forgásirányváltáskor megtartják előjelüket, tehát egyik irányban fékeznek a másik irányban pedig hajtani képesek (pl: súlytól származó nyomatékok azaz emelőgépek).

A passzív és aktív nyomatéokra a 6.8a, ill. 6.8b ábra mutat példát.



6.8. ábra Passzív a) és aktív b) terhelőnyomaték

A terhelőnyomatékok osztályozásának további lehetősége, hogy a terhelés folytonos, vagy szakaszosan változik.

Folytonos terhelés:

- $M_T = \text{áll.}$, emelőgépek, szállítószalagok terhelőnyomatéka, az álló helyzet közelében kismértékű nyomaték növekedés jellemző (6.9a ábra);

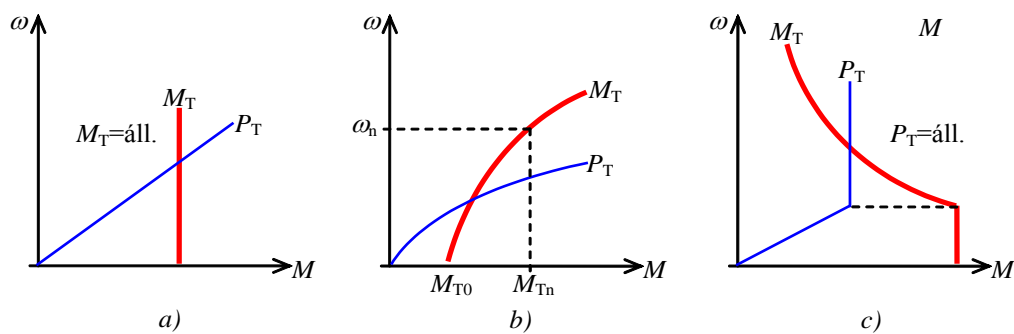
- M_T a szögsebesség függvénye, a jelleggörbe felírható az alábbi alakban:

$$M_T \cong M_{T0} + (M_{Tn} - M_{T0}) \cdot (\omega / \omega_n)^k,$$

ahol a k kitevő általában 1 és 4 között változik (lásd a 6.9b ábrát), ide tartoznak pl: a szellőzők, a szivattyúk, a fonógépek;

- Különleges esetet jelentenek egyes csévlő hajtások, ahol a haladási sebesség és a húzóerő állandósága technológia követelmény, amiből következik, hogy:

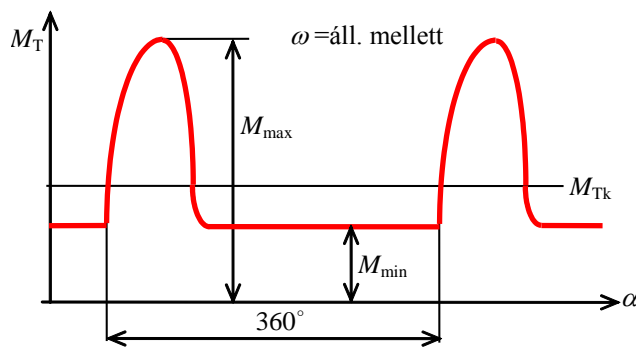
$$P_m = F \cdot v = M \cdot \omega = \text{áll.}, \text{ és így } M_T \text{ hiperbola szerint fog változni (lásd a 6.9c ábrát).}$$



6.9. ábra Folytonos, szögsebességtől függő terhelőnyomatékok

Szakaszosan változó terhelés:

✚ $M_T = f(\alpha)$; a dugattyús kompresszorok és a szivattyúk terhelőnyomatéka úgy függ az elfordulási szögtől, hogy közben van egy sűrűlődségből adódó nyomaték is. A forgattyús hajtóműves munkagépek: mint például a lemezvágó ollók, kovácsológépek nyomatéka szintén hasonló (lásd a 6.10. ábrát).



6.10. ábra Terhelőnyomaték változás az elfordulás függvényében

✚ $M_T = f(s)$; azoknál a munkagépeknek, ahol a főmozgás a haladó mozgás a terhelőnyomatékokat az út függvényében szokták megadni. Ilyenek például az exkavátorok, markolódarúk, hajlítógépek, stb.

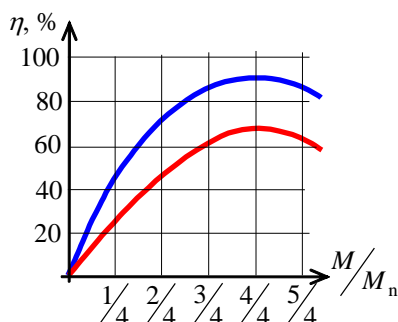
✚ $M_T = f(v, s)$; a villamos hajtású járművek terhelőnyomatéka a sebesség és út függvénye (pl. mozdonyok, targoncák).

✚ $M_T = f(t)$; azokat a munkagépeket sorolhatjuk ebbe a csoportba, amelyek terhelőnyomatéka az időben meghatározott, vagy véletlenszerűen változik (pl.: fafűrészgépek). A 6.4. pontban foglalkozunk még az időben változó nyomatékokkal is.

6.1.3 Terhelő és tehetetlenségi nyomatékok átszámítása a motor tengelyére.

A villamos hajtások esetén általában a motorok hajtóművön (mechanikai áttételen) keresztül csatlakoznak a munkagépekhez. Az áttételekre (amelyek a forgó mozgás jellemzőit módosítják) azért van szükség, mert a villamos motoroknak van egy gazdaságos fordulatszám tartománya (750...3000 1/min) ahol a kg/kW ill. Ft/kW mutatóik a legjobbak (jó a gép hatásfoka, teljesítménytényezője, melegedése stb.). A villamosgép gyárak széles teljesítménytartományban készítenek fogaskerék-, vagy csigakerék áttétellel összeépítve motorokat, ezek az ún. hajtóműves motorok. A mozgás jellemzőinek átalakítása veszteséggel jár, ezért a hajtóművek egyik legfontosabb adata a hatásfok.

A hatásfok változását a nyomaték függvényében a 6.11. ábra mutatja (kétfokozatú homlokkerékpár). Az ábrából látható, hogy a hajtóműveket is a névleges terhelés környékén jó üzemeltetni, mert itt adódik a legjobb hatásfok.



6.11. ábra Hatásfok változása a hajtóműveknél

Az i áttételi viszonyt úgy határozzuk meg, hogy a motortól kiindulva a motorhoz közelebb eső szögsebességet viszonyítjuk az utána következőhöz. Ennél a viszonyításnál a lassító áttételnél $i > 1$, a gyorsító áttételnél $i < 1$. Ha $i = 1$ akkor a forgó mozgás jellemzői nem változnak.

Egy fokozatra felírva az áttétel:

$$i = \frac{\omega_M}{\omega_T} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{z}{b}, \quad (6.6)$$

ahol ω_M a motor, ω_T a terhelés szögsebessége; z_1 hajtó-, z_2 a hajtott fogaskerék ill. lánckerék fogszáma; d_1 a hajtó-, d_2 a hajtott szíj, ill. a dörzskerék futási átmérője; b a csigaorsó bekezdéseinek száma és z a csigakerék fogszáma.

A hajtó villamos motor paramétereinek meghatározásához annak tengelyén kell ismer-ni a terhelés által okozott forgató, ill. tehetetlenségi nyomaték-hatásokat. Ezért a terhelés jellemzőit a motor szögsebesség szintjére kell átszámítanunk, redukálnunk. A redukált rendszernek a motor oldaláról vizsgálva minden szempontból meg kell felelnie az eredeti rendszernek.

Az (6.1)...(6.3) alapegyenletekből kiolvasható, hogy a forgatónyomatékok átszámítását a teljesítmények állandósága, a tehetetlenségi nyomatékok átszámítását pedig a kinetikai energiák állandósága alapján kell végezni.

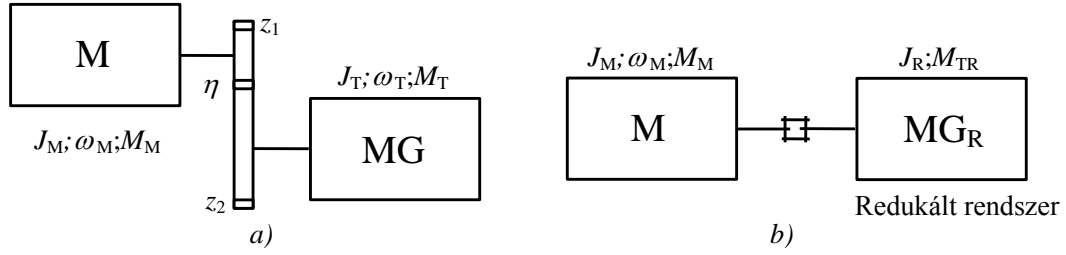
A motor tengelyére történő átszámításnál általában két eset fordulhat elő:

- ✚ forgómozgásról \Rightarrow forgómozgásra, és
- ✚ haladómozgásról \Rightarrow forgómozgásra.

A forgómozgás jellemzőinek átszámítása:

A 6.12a ábrán felrajzoltunk egy egyfokozatú fogaskerekes hajtóművel hajtott munkagép rajzát a jellemzők feltüntetésével, a 6.12b ábrán pedig a motor tengelyére redukált rendszert. Az áttétel $i = \omega_M / \omega_T = z_2 / z_1$.

A teljesítmény azonossága alapján ideális esetre írhatjuk, hogy $M_{TR} \cdot \omega_M = M_T \cdot \omega_T$, innen kifejezve M_{TR} -t kapjuk:



6.12. ábra Forgómozgásról-forgómozgásra történő átszámítás

$$M_{TR} = M_T \cdot \frac{\omega_T}{\omega_M} = \frac{M_T}{i} \quad (6.7)$$

Amennyiben figyelembe vesszük az áttétel hatásfokát, akkor különbséget kell tennünk az energia áramlás iránya szerint azaz, hogy a motor hajt vagy fékez. A motor szempontjából a hajtást \uparrow , a fékezést \downarrow jelöljük, így a redukált nyomaték:

$$M_{TR}^{\uparrow} = \frac{M_T}{i \cdot \eta} \quad M_{TR}^{\downarrow} = \frac{M_T}{i} \cdot \eta \quad (6.8)$$

A gyakorlatban többfokozatú áttételeket alkalmaznak. Ebben az esetben hajtás esetére a (6.6) egyenletet felhasználva, és ezt a közbenső tengelyek szögsebességeivel bővítve kapjuk, hogy:

$$M_{TR}^{\uparrow} = \frac{M_T}{i_1 \cdot i_2 \cdot i_3 \dots \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3} = \frac{M_T}{i_e \cdot \eta_e} \quad (6.9)$$

Állandósult állapotban a motor nyomatékának meg kell egyeznie a redukált terhelő nyomatékkal: $M_M = M_{TR}$. A mozgási energia azonossága alapján ideális esetben írhatjuk, hogy:

$$\frac{1}{2} \cdot J_R \cdot \omega_M^2 = \frac{1}{2} \cdot J_T \cdot \omega_T^2.$$

A redukált tehetetlenségi nyomatékot kifejezve:

$$J_R = J_T \cdot \frac{\omega_T^2}{\omega_M^2} = \frac{J_T}{i^2} \quad (6.10)$$

A hatásfokot és az energiaáramlás irányát figyelembe véve kapjuk:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_T}{i^2 \cdot \eta}, \quad \text{illetve} \quad J_R^{\downarrow} = \frac{J_T}{i^2} \cdot \eta \quad (6.11)$$

Tehát a terhelés tehetetlenségi nyomatékát az áttétel négyzetével kell redukálni. Többfokozatú hajtóművek esetén a redukált tehetetlenségi nyomaték számításakor valamennyi tengely tehetetlenségével számolnunk kell, így kapjuk pl. hajtás esetén, hogy:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_1}{i_1^2 \cdot \eta_1} + \frac{J_2}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} + \dots + \frac{J_T}{i_1^2 \cdot \dots \cdot i_n^2 \cdot \eta_1 \cdot \dots \cdot \eta_n} \quad (6.12)$$

Fékezéskor a hatásfok jellegű tényezők a számlálókba kerülnek.

A 6.12b ábra szerint a motor tengelyén a teljes tehetetlenségi nyomaték:

$$J_{\Sigma} = J_M + J_R, \quad (6.13)$$

azaz amelyik tengelyre redukálunk, annak a tehetetlenségi nyomatéka változatlan marad.

A haladó mozgás jellemzőinek átszámítása:

A haladó mozgásra szemléletes példa az emelés. A 6.13. ábra egy emelő berendezést mutat, ahol a fel-, vagy lefelé v sebességgel mozgatható súlyt (G) egy kötél-dobra tekeredő kötélemeli. A dob egyfokozatú áttételen keresztül hajtja a villamos motor. A dob szögsebessége ω_D , tehetetlenségi nyomatéka J_D , sugara R_D , valamint jelentkezik a dob és a köté között egy súrlódás, amelyet a μ deformációs tényezővel veszünk figyelembe. Ideális esetre a teljesítmény megmaradás elve alapján írhatjuk, hogy:

$$M_{TR} \cdot \omega_M = G \cdot v.$$

A redukált nyomaték:

$$M_{TR} = G \cdot \frac{v}{\omega_M} = G \cdot \rho, \quad (6.14)$$

ahol ρ az ún. redukálási sugár, amelyre $v = R_D \cdot \omega_D$ helyettesítésével írhatjuk, hogy:

$$\rho = \frac{v}{\omega_M} = \frac{R_D \cdot \omega_D}{\omega_M} = \frac{R_D}{i} \quad (6.15)$$

A veszteségeket figyelembe véve hajtás-, ill. féküzemre a redukálás:

$$M_{TR}^{\uparrow} = \frac{G \cdot \rho}{\eta} \cdot (1 + \mu) \quad M_{TR}^{\downarrow} = \frac{G \cdot \rho}{(1 + \mu)} \cdot \eta \quad (6.16)$$

A tehetetlenségi nyomaték átszámításához a haladó és forgási energiákat felírva kapjuk, hogy:

$$\frac{1}{2} \cdot J_R \cdot \omega_M^2 = \frac{1}{2} \cdot J_D \cdot \omega_D^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2,$$

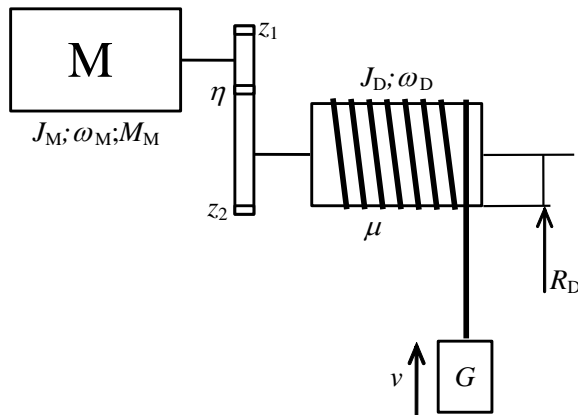
ahol $m = G/g$. Ebből a redukált tehetetlenségi nyomatékot kifejezve kapjuk, hogy:

$$J_R = \frac{J_D \cdot \omega_D^2}{\omega_M^2} + \frac{m \cdot v^2}{\omega_M^2}, \quad \text{azaz} \quad J_R = \frac{J_D}{i^2} + m \cdot \rho^2. \quad (6.17)$$

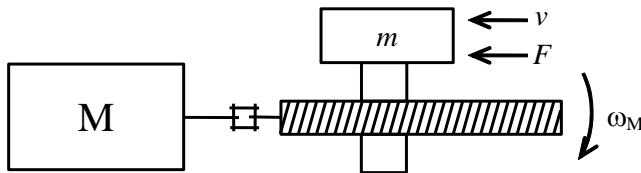
A veszteségeket figyelembe véve hajtás üzemben:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_D}{i^2 \cdot \eta} + \frac{m \cdot \rho^2}{\eta} \cdot (1 + \mu). \quad (6.18)$$

A motor tengelyén a teljes tehetetlenségi nyomaték: $J_{\Sigma} = J_M + J_R$.



6.13. ábra Haladó mozgás redukálása



6. 14.ábra Orsóhajtás

Szerszámgépek- és robotok esetén gyakran előfordul az orsóhajtás, melynek vázlatát közvetlen hajtás esetén a 6.14. ábrán láthatjuk. Ebben az esetben is haladó mozgás redukálásáról van szó. Az orsóhajtás fontos jellemzője az e menetemelkedés, amit általában mm/fordulatban adnak meg. A mozgatott tömeg sebessége:

$$v = \frac{n_M \cdot e}{1000}, \quad \text{ahol } n_M \text{ az orsó fordulatszáma 1/s-ban.} \quad (6.19)$$

Az $\omega_M = 2\pi \cdot n_M$ egyenletet felhasználva kapjuk, hogy:

$$v = \frac{\omega_M \cdot e}{2\pi \cdot 10^3}. \quad (6.20)$$

A teljesítmény azonosság alapján ideális esetre írhatjuk, hogy:

$$M_{TR} \cdot \omega_M = F \cdot v = F \cdot \frac{\omega_M \cdot e}{2\pi \cdot 10^3}, \quad \text{azaz}$$

$$M_{TR} = F \frac{e}{2\pi \cdot 10^3} = F \cdot \rho, \quad (6.21)$$

vagyis a redukálási sugár most $\rho = e / 2\pi \cdot 10^3$, így a tehetetlenségi nyomaték átszámítása:



$$J_R = m \cdot \rho^2 = m \cdot \left(\frac{e}{2 \cdot \pi \cdot 10^3} \right)^2. \quad (6.22)$$

6.1.4 Mozgásegyenlet, stabilitás vizsgálat

A (6.2) egyenletek közül az $M_d = J \cdot \frac{d\omega}{dt}$ a forgó mozgások alapegyenlete. A mozgásegyenlet ilyen alakban feltételezi azt, hogy a rendszer tehetetlenségi nyomatéka az időben nem változik. Amennyiben ez nem áll fenn, akkor a J változását is figyelembe kell vennünk a differenciálás során, azaz $M_d = \frac{d(J \cdot \omega)}{dt}$, ahol a $(J \cdot \omega)$ szorzat a villamos hajtás eredő mozgásmennyisége az adott időpillanatban. A villamos hajtások esetén a szögsebesség változását a motor és a terhelőnyomaték közötti különbség hozza létre, tehát:

$$M_d = M_M - M_T = J \cdot \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.22)$$

A vonatkoztatási irányokat figyelembe véve beszélhetünk:

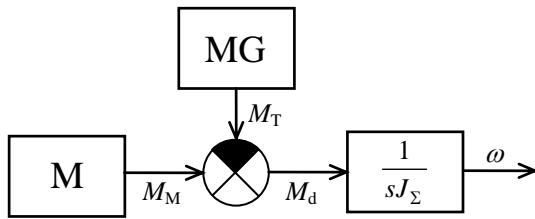
-  $M_d > 0$ esetén gyorsító nyomatékról;
-  $M_d < 0$ esetén lassító (fékező) nyomatékról.

Az előző fejezetben leírtak alapján a mozgásegyenletben mindig az egész rendszert figyelembe kell venni, tehát az egyenletben a motor tengelyére redukált értékekkel számolunk. Például hajtás üzemben:

$$M_d^\uparrow = M_M^\uparrow - M_{TR}^\uparrow = J_\Sigma^\uparrow \cdot \frac{d\omega_M}{dt}. \quad (6.23)$$

A mozgásegyenlet szabályozástechnikában alkalmazott alakját kapjuk a Laplace-transzformáció felhasználásával:

$$M_d(s) = M_M(s) - M_T(s) = J_\Sigma \cdot s \cdot \omega(s). \quad (6.24)$$



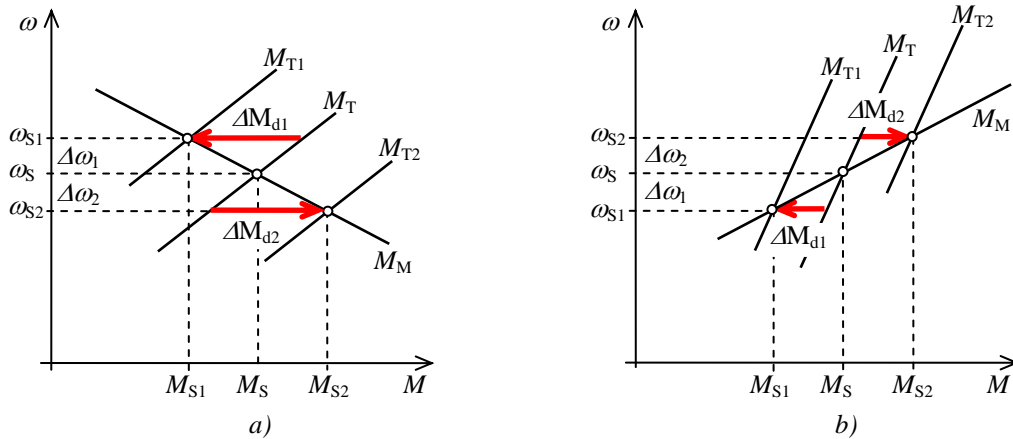
6.15. ábra Villamos hajtás hatásvázlat

Ebből az $\omega(s)$ -t kifejezve:

$$\omega(s) = \frac{M_M(s) - M_T(s)}{s \cdot J_\Sigma}, \quad (6.25)$$

amely alapján a 6.15. ábrán felrajzolhattuk a villamos hajtás hatásvázlatát.

A villamos hajtások esetén fontos megvizsgálnunk a terhelőnyomaték hatására kialakuló egyensúlyi állapot stabilitását. A stabilitást úgy tudjuk vizsgálni, hogy a rendszert valamilyen módszerrel kimozdítjuk az egyensúlyi állapotából, majd az eredeti állapotot visszaállítva megvizsgáljuk, hogy a rendszer visszatér-e az egyensúlyi helyzetébe.



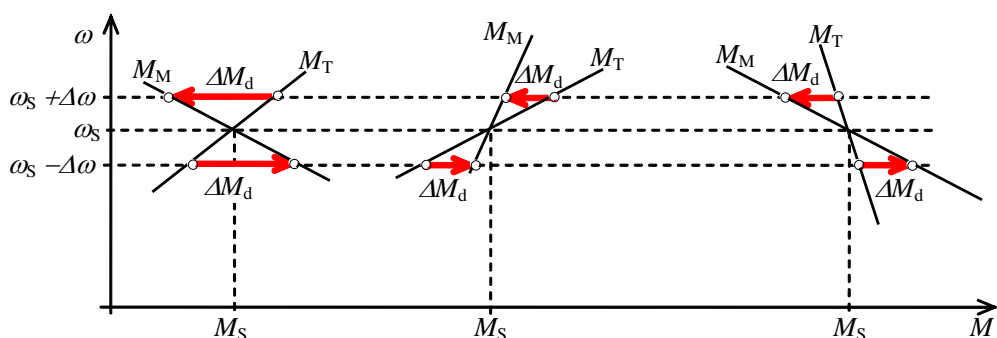
6.16. ábra Stabilitásvizsgálat

Amennyiben a hajtás újra visszatér az egyensúlyi munkapontba akkor *stabilis*-, ha nem, akkor *labilis rendszerről* beszélünk.

A rendszer egyensúlyi munkapontból történő kimozdítását a motor vagy a terhelőnyomaték megváltoztatásával tudjuk elérni. Például motoroknál a kapocsfeszültség, a frekvencia, az előtétellenállás, a gerjesztés értéke változhat.

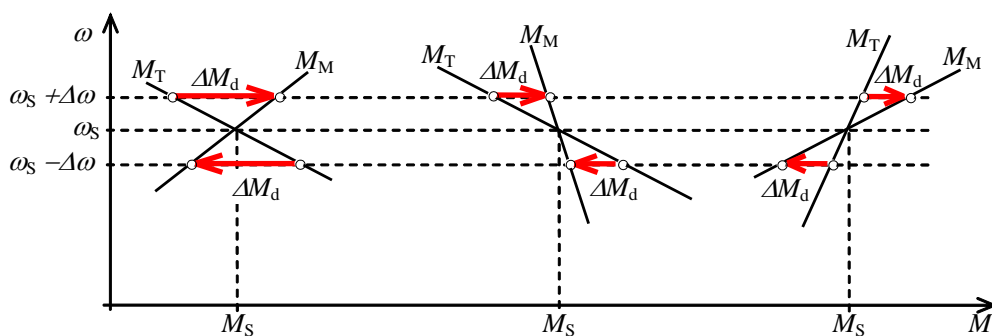
A 6.16. ábrán különböző motor és terhelőnyomatékokat ábrázoltunk. A 6.16a ábrán a motor nyomaték-jelleggörbéjének meredeksége negatív. Az egyensúlyi munkapont paramétereit az ω_S, M_S . Ha az M_T terhelőnyomaték M_{T1} -re változik, akkor az ω_{S1}, M_{S1} által meghatározott munkapont alakul ki. A szögsebesség változás $\Delta\omega_1 = \omega_{S1} - \omega_S > 0$, azaz pozitív. Ha a terhelőnyomaték hirtelen újra M_T értéket vesz fel, akkor $\Delta M_{d1} < 0$ lesz, ami fékező nyomatékot jelent, tehát a rendszer lassulni fog és visszaáll az eredeti munkapontba.

Ha M_T most M_{T2} -re ugrik, akkor az új munkapont ω_{S2}, M_{S2} lesz. A szögsebesség változás $\Delta\omega_2 = \omega_{S2} - \omega_S > 0$, azaz negatív. A terhelés M_T -re ugrása esetén $\Delta M_{d2} > 0$ gyorsító nyomaték lép fel és ω_S -ig gyorsul, a rendszer visszaáll az eredeti munkapontba. Tehát a 6.16a ábrán látható jelleggörbékkel rendelkező hajtás stabil egyensúlyi helyzetben van.



6.17. ábra Stabilis munkapontok

A 6.16b ábránál a motor nyomaték-jelleggörbéjének meredeksége pozitív. M_{T1} hatására a rendszer kimozdul az ω_s, M_s egyensúlyi munkapontból, a szögsebesség változása $\Delta\omega_1 = \omega_{s1} - \omega_s > 0$, majd M_{T1} megszűnésekor $\Delta M_{d1} < 0$. A lassító nyomaték hatására a rendszer leáll. Amikor a másik irányba térítjük ki a hajtást, vagyis M_{T2} lép fel, akkor $\Delta\omega_2 = \omega_{s2} - \omega_s > 0$, majd M_{T2} megszűnésekor kialakuló dinamikai nyomaték $\Delta M_{d2} > 0$ lép fel. Ez gyorsító nyomatékot jelent és a rendszer tovább gyorsul. Tehát a 6.16b ábrán látható jelleggörbékkel rendelkező hajtás labilis egyensúlyi helyzetben van.



6.18. ábra Labilis munkapontok

A vizsgálatunk eredményeit figyelembe véve megállapíthatjuk, hogy a stabilitás általános feltétele az, hogy a szögsebesség és a dinamikai nyomaték változása ellentétes értelmű legyen:

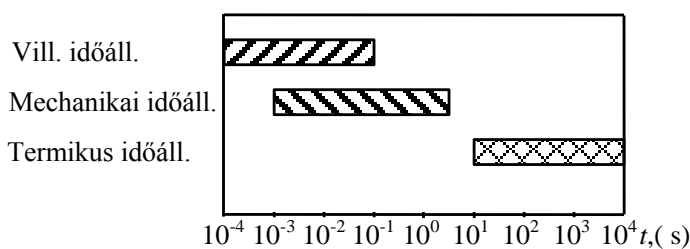
$$\frac{\Delta\omega}{\Delta M_d} < 0, \quad \text{vagy} \quad \text{határátmenetben} \quad \frac{d\omega}{dM_d} < 0. \quad (6.26)$$

A 6.17. és 6.18. ábrákon stabilis-, illetve labilis munkapontokat rajzoltunk fel.

6.1.5 Szögsebesség-idő függvények meghatározása átmeneti üzemállapotokban, időállandók

A villamos, mechanikus, termikus rendszerekben egy állandósult állapot eléréséhez mindig valamilyen átmeneti állapot szükséges. Az átmeneti jelenségekhez tartozó időállandók nagyságrendjét láthatjuk a 6.19. ábrán. A villamos hajtások esetén mind a három átmeneti jelenséggel találkozhatunk. Jelen fejezetben a hajtásrendszer indítását, fékezését, szögsebesség változási átmenetét vizsgáljuk.

A már ismert mozgásegyenletet:



6.19. ábra Átmeneti jelenségek időállandóinak nagyságrendje




$$M_d = M_M - M_T = J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dt}$$

felírva láthatjuk, hogy az egyenlet jobb oldalán szerepel a szögsebesség idő szerinti deriváltja. A differenciálegyenletet a változók szétválasztásával oldhatjuk meg, ha M_d , vagy annak átlagos értéke ω függvényeként értelmezhető, és – mint már

említettük – a tehetetlenségi nyomaték nem változik ($J_\Sigma = \text{áll.}$). A változók szétválasztásával kapjuk, hogy:

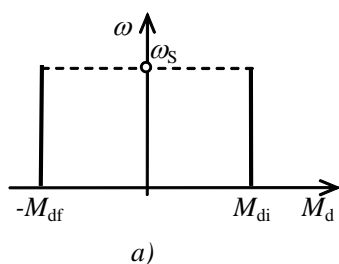
$$dt = \frac{J_\Sigma}{M_d(\omega)} \cdot d\omega = \frac{J_\Sigma}{M_M(\omega) - M_T(\omega)} \cdot d\omega. \quad (6.27)$$

A megoldás szempontjából tehát az $M_d = f(\omega)$ ismerete elengedhetetlen. A továbbiakban három különböző esetet vizsgálunk, amelyekkel az előforduló esetek helyettesíthetők, illetve megoldhatóak:

-  $M_d = f(\omega) = \text{állandó};$
-  $M_d = f(\omega) = \text{lineáris};$
-  $M_d = f(\omega) = \text{tetszőleges}.$

6.1.5.1. $M_d = f(\omega) = \text{állandó}$

A 6.20a ábra mutatja a dinamikai nyomaték változását. A mozgásállapot megváltoztatásához szükséges időtartam a (6.27) egyenlet határozott integráljával számítható:

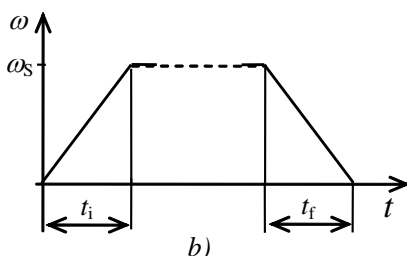


$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J_\Sigma}{M_d} d\omega. \quad (6.28)$$

Az integrálást elvégezve:

$$t_2 - t_1 = \frac{J_\Sigma \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_d}. \quad (6.29)$$

Behelyettesítve a $t_1 = 0, \omega_1 = 0$; a $t_2 = t_i, \omega_2 = \omega_s$; ill. $M_d = M_{di}$ feltételeket, az indítási időt kapjuk:



$$t_2 - t_1 = \frac{J_\Sigma \cdot (\omega_2 - \omega_1)}{M_d}$$

$$t_i = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_{di}} = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_M - M_T}. \quad (6.30)$$

6.20. ábra A szögsebesség változása $M_d = \text{áll. mellett}$

Az indítási idő alatti szögsebesség változást a határozatlan integrálszámítás alapján kapjuk:

$$\int_0^t dt = \frac{J_\Sigma}{M_d} \int_0^\omega d\omega. \quad (6.31)$$

Integrálva:

$$t = \frac{J_\Sigma}{M_d} \cdot \omega,$$

vagyis

$$\omega = f(t) = \frac{M_d}{J_\Sigma} \cdot t = c \cdot t. \quad (6.32)$$

(6.32) szerint a szögsebesség az indítás alatt egyenes szerint változik, mint azt a 6.20b ábrán láthatjuk.

Amennyiben a gyorsítandó tömeg csak a motor J_M tehetetlenségi nyomatéka, és a gyorsítás alatt a dinamikai nyomaték megegyezik a motor névleges nyomatékával ($M_d = M_n$), akkor a motor névleges indítási idejéről beszélünk:

$$T_{in} = \frac{J_M \cdot \omega_n}{M_n}. \quad (6.33)$$

A motor névleges indítási ideje meghatározza a motor dinamikai lehetőségeit, ezért ezt a jellemzőt gyakran használják a motorok minőségi összehasonlítására. Ha a (6.33) egyenlet jobboldalát megszorozzuk $2\omega_n / 2\omega_n$ -nel akkor:

$$T_{in} = \frac{1}{2} \cdot J_M \cdot \omega_n^2 \cdot \frac{2}{M_n \cdot \omega_n} = \frac{2 \cdot W_n}{P_n}, \quad (6.34)$$

ahol W_n a motor kinetikus energiája névleges szögsebességen és P_n a névleges teljesítmény.

(6.34) értelmében igényes hajtások esetén – ahol rövid gyorsítási-, és fékezési időkre van szükség – azonos teljesítmény esetén a kisebb fordulatszámú motorokat használják.

Ha a motor névleges indítási idejét és a hajtás redukált jellemzőit ismerjük, akkor a (6.30) és (6.33) egyenletek, valamint $\omega_s \cong \omega_n$ alkalmazásával az indítási idő:

$$t_i = FI \cdot T_{in} \cdot \frac{M_n}{M_M - M_{TR}}, \quad (6.35)$$

ahol $FI = \frac{J_\Sigma}{J_M} = \frac{J_M + J_R}{J_M}$ az inercia tényező (Faktor of Inertia = FI).

A fékezési idő a $t_1 = 0, \omega_1 = \omega_s$; a $t_2 = t_f, \omega_2 = 0$; ill. $M_d = M_{di}$ helyettesítéssel:

$$t_f = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_{df}}. \quad (6.36)$$

A fékezéshez szükséges dinamikai nyomatékot kétféleképpen hozhatjuk létre:

✚ megváltoztatjuk a motor nyomatékirányát: $M_M \Rightarrow -M_M$, ekkor:

$$-M_{df} = -M_M - M_T,$$

és így
$$t_f = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_M + M_T}. \quad (6.37)$$

✚ lekapcsoljuk a motort, $M_M = 0$ ekkor:

$$-M_{df} = -M_T,$$

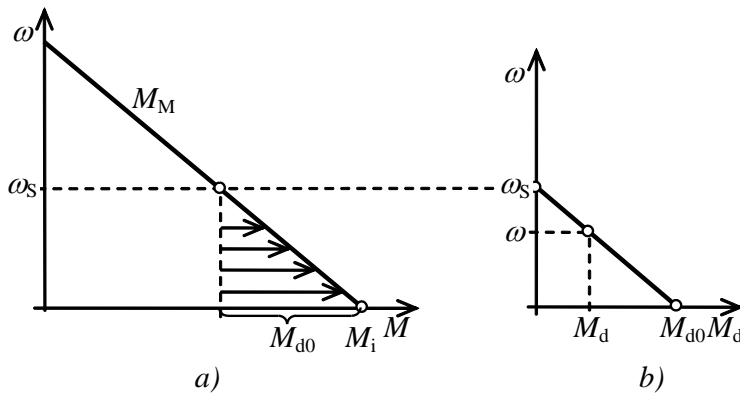
$$\text{és így} \quad t_f = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_T}. \quad (6.38)$$

Fékezéskor a (6.32) egyenlet szerint az egyenes meredeksége negatív lesz a $-M_d$ értékének megfelelően, ezt láthatjuk a 6.20b ábra fékezési tartományában.

6.1.5.2. $M_d = f(\omega) = \text{lineáris}$

Lineáris dinamikai nyomatékot kapunk a söntjellegű motorok ellenállásos indításakor, ha a terhelőnyomaték $M_T = \text{áll.}$, vagy $M_T = 0$. A 6.21a ábra mutatja az indítás első fokozatát, a 6.21b ábrában pedig külön felrajzoltuk a dinamikai nyomaték változását.

A 6.21b ábra alapján meghatározhatjuk az $M_d = f(\omega) = -a\omega + b$ lineáris függvényt.



6.21. ábra Söntjellegű motorindítás és lineáris dinamikai nyomaték

Az $\omega(M_d)$ koordinátarendszerben az egyenes egyenlete:

$$\omega = -\frac{\omega_s}{M_{d0}} \cdot M_d + \omega_s.$$

Innen M_d -t kifejezve:

$$M_d = M_{d0} \cdot \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}.$$

Ezt a függvényt a mozgásegyenlet (6.27) alakjába behelyettesítve és az integrálást kijelölve:

$$\int_0^t dt = \int_0^\omega \frac{J_\Sigma}{M_d} \cdot d\omega = \int_0^\omega \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_{d0} \cdot (\omega_s - \omega)} \cdot d\omega = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_{d0}} \int_0^\omega \frac{1}{\omega_s - \omega} \cdot d\omega. \quad (6.39)$$

Az egyenlet jobb oldalán kiemelt állandó mennyiségek egy indítási idő jellegű tagot határoznak meg, amelyet a hajtás elektromechanikai időállandójának nevezünk:

$$T_m = \frac{J_\Sigma \cdot \omega_s}{M_{d0}}. \quad (6.40)$$

A hajtás elektromechanikai időállandója az a fiktív indítási idő, amely alatt a hajtás elérné az állandósult szögsebességét $M_{d0} = \text{áll.}$ esetén. A 6.21b ábra alapján az ω_s / M_{d0} hányados megadja a jelleggörbe meredekségét, ezt felírva és általánosítva kapjuk, hogy:

$$\frac{\omega_s}{M_{d0}} = -m = -\frac{d\omega}{dM_d}. \quad (6.41)$$

$$\text{Így:} \quad T_m = -m \cdot J_\Sigma = -J_\Sigma \cdot \frac{d\omega}{dM_d} \quad (6.42)$$

A T_m jelölést felhasználva és a (6.39) egyenletet megoldva:

$$t = T_m \cdot \left[-\ln(\omega_s - \omega) \right]_0^\omega = -T_m \cdot \ln \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}. \quad (6.43)$$

Ezt átalakítva:

$$-\frac{t}{T_m} = \ln \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s},$$

majd az inverziót elvégezve:

$$e^{-\frac{t}{T_m}} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}.$$

Ebből ω -t kifejezve:

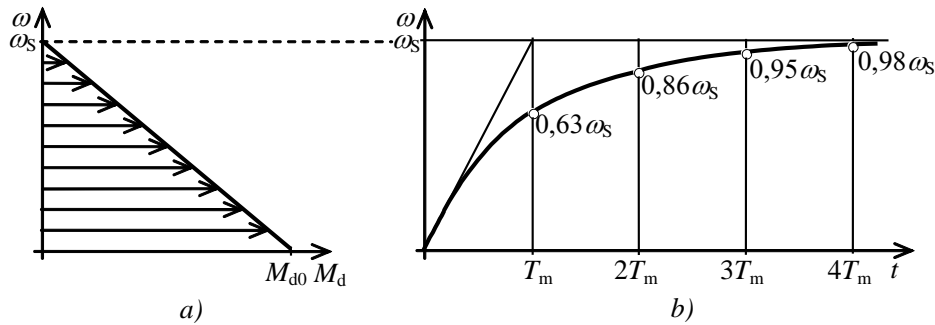
$$\omega = \omega_s \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T_m}} \right). \quad (6.44)$$

Tehát a lineárisan csökkenő M_d hatására a szögsebesség $1 - e^{-\frac{t}{T_m}}$ függvény szerint változik. (6.44)-ből következik, hogy az állandósult szögsebességet elméletileg végtelen hosszú idő alatt éri el a hajtás, mert ω_s -hez közelítve $M_d \Rightarrow 0$.

A (6.44) egyenlet kezdeti érintőjét a $t = 0$ időpontban meghatározva:

$$\left[\frac{d\omega}{dt} \right]_{t=0} = \left[-\omega_s \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \left(-\frac{t}{T_m} \right) \right]_{t=0} = \frac{\omega_s}{T_m}. \quad (6.45)$$

Az $\omega(t)$ jelleggörbe kezdeti meredekségét tehát az elektromechanikai időállandó határozza meg. A 6.22. ábra. mutatja a lineáris dinamikai nyomaték (6.22a ábra) és a hozzá tartozó szögsebesség-idő (6.22b ábra) változását.



6.22. ábra Szögsebesség változás lineáris M_d -nél

ω_s -től való eltérése kisebb, mint 2 %. Ezért a gyakorlatban $t = 4...5 T_m$ idő múlva a szögsebesség eléri állandósult értékét.

A 6.23a ábra fékezés esetén mutatja a dinamikai nyomatékot, amely negatív. Az ábra alapján az egyenlete:

$$M_d = f(\omega) = -\frac{\omega}{\omega_s} \cdot M_{d0}. \quad (6.46)$$

A mozgásegyenlet megoldása az (6.46) felhasználásával:

$$\int_0^t dt = \int_{\omega_s}^{\omega} \frac{J_{\Sigma}}{M_d(\omega)} \cdot d\omega = \int_{\omega_s}^{\omega} -\frac{J_{\Sigma} \cdot \omega_s}{M_{d0} \cdot \omega} \cdot d\omega, \quad (6.47)$$

és

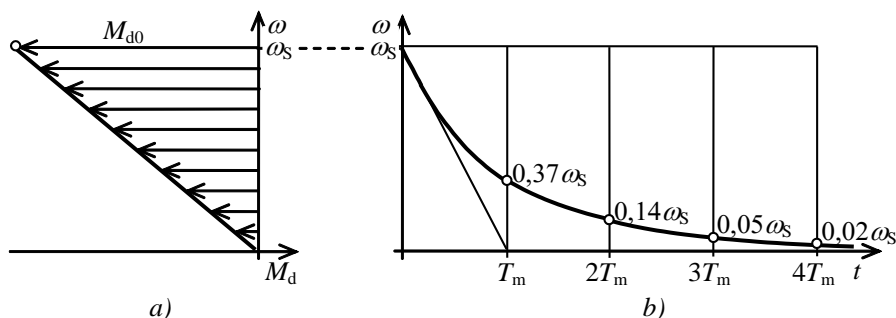
$$t = T_m \cdot \left[-\ln \omega \right]_{\omega_s}^{\omega} = -T_m \cdot \ln \frac{\omega}{\omega_s}.$$

A szögsebességet kifejezve:

$$\omega = \omega_S \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (6.48)$$

Féküzem esetén ω változására exponenciális függvényt kaptunk, melynél a kezdeti érintő meredeksége:

$$\left[\frac{d\omega}{dt} \right]_{t=0} = -\frac{\omega_S}{T_m}. \quad (6.49)$$



6.23. ábra Szögsebesség változás lineáris M_d -nél féküzemben

A szögsebesség változását lineáris dinamikai nyomatéknál féküzemre a 6.23b ábra mutatja.

Az $\omega(t)$ függvényeket *menetdiagramoknak* is szokták nevezni. A menetdiagramokat eddig csak indításra és fékezésre (leállítás) értelmeztük. Az integrálási határok célszerű megválasztásával lehetőség adódik egy stabilis munkapontból egy másik munkapontba való áttérés vizsgálatára is.

Legyen a gyorsításnál a kezdeti-, vagy kiindulási szögsebesség ω_k , az pedig, amelyet el akarunk érni, továbbra is ω_S . Ezeket a határokat alkalmazva és a mozgásegyenletet megoldva kapjuk, hogy:

$$t = T_m \cdot \ln \frac{\omega_S - \omega_k}{\omega_S - \omega}, \quad \text{és}$$

$$e^{-\frac{t}{T_m}} = \frac{\omega_S - \omega}{\omega_S - \omega_k}.$$

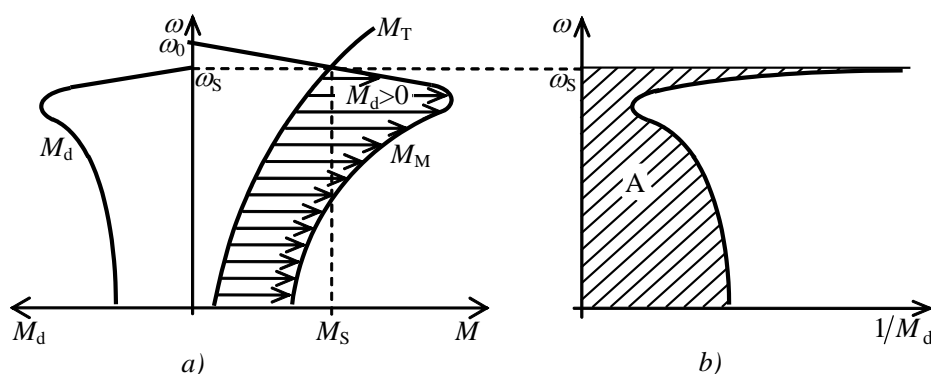
Végül:
$$\omega = \omega_S - (\omega_S - \omega_k) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}}. \quad (6.50)$$

Fékezéskor a lassítás végére megadott szögsebesség legyen ω_v , így adódik:

$$t = T_m \cdot \ln \frac{\omega_S - \omega_v}{\omega - \omega_v}.$$

Ebből:
$$\omega = \omega_v + (\omega_S - \omega_v) \cdot e^{-\frac{t}{T_m}} \quad (6.51)$$

6.1.5.3. $M_d = f(\omega) = \text{tetszőleges}$.



6.24. ábra Tetszőleges lefolyású M_d függvény

A 6.24a ábrán felrajzoltuk egy normál kalickás aszinkron motor $\omega(M_M)$ jelleggörbét. A motor egy szelölő ventilátort hajt, amelynek terhelőnyomaték jelleggörbé-

je $\omega(M_T)$.

Indításkor az $M_d = M_M - M_T$ nyomaték-különbségeket az ábrában bejelöltük és a koordináta-rendszer baloldalán felrajzoltuk az $M_d = f(\omega)$ függvényt. Látható, hogy az M_d függvény analitikusan nehezen határozható meg. Ebben az esetben célszerű grafikus eljárást alkalmazni.

A mozgásegyenlet (6.28) szerinti alakjából:

$$\int_0^{t_i} dt = J_\Sigma \cdot \int_0^{\omega_s} \frac{1}{M_d(\omega)} \cdot d\omega.$$

Ennek alapján a t_i indítási idő meghatározásához az $1/M_d(\omega)$ függvény ismerete szükséges. Ezért a 6.24b ábrában az M_d függvényt felhasználva megrajzoltuk annak reciprokát. Ha az $1/M_d(\omega)$ görbe alatti területet A -val jelöljük akkor:

$$A = \int_0^{\omega_s} \frac{1}{M_d(\omega)} \cdot d\omega.$$

és értékét ún. planimetriálással lehet meghatározni. Az ω_s értékhez közelítve $M_d \rightarrow 0$ és $1/M_d \rightarrow \infty$, ezt a problémát kiküszöbölhetjük, ha az ω_s előtti érintővel számolunk. Így

$$t_i = J_\Sigma \cdot A \quad (6.52)$$

Tetszőleges M_d függvény-nél az indítási időt meghatározhatjuk még az állandó és a lineáris esetre vonatkozó megoldásokkal úgy, hogy szakaszonként ezekkel közelítjük a függvényt.




6.2. ÉPÍTÉSI ALAKOK, VÉDETTSÉG, SZIGETELÉSI OSZTÁLYOK

A villamosgép gyártóknak versenyképességük érdekében a motorok kiváló villamos paraméterein kívül teljesíteniük kell a ipar legkülönbözőbb igényeit is. Ilyen igények például a motorok csereszabotossága, a környezeti hatások elleni védelem, a klímaállóság, stb.

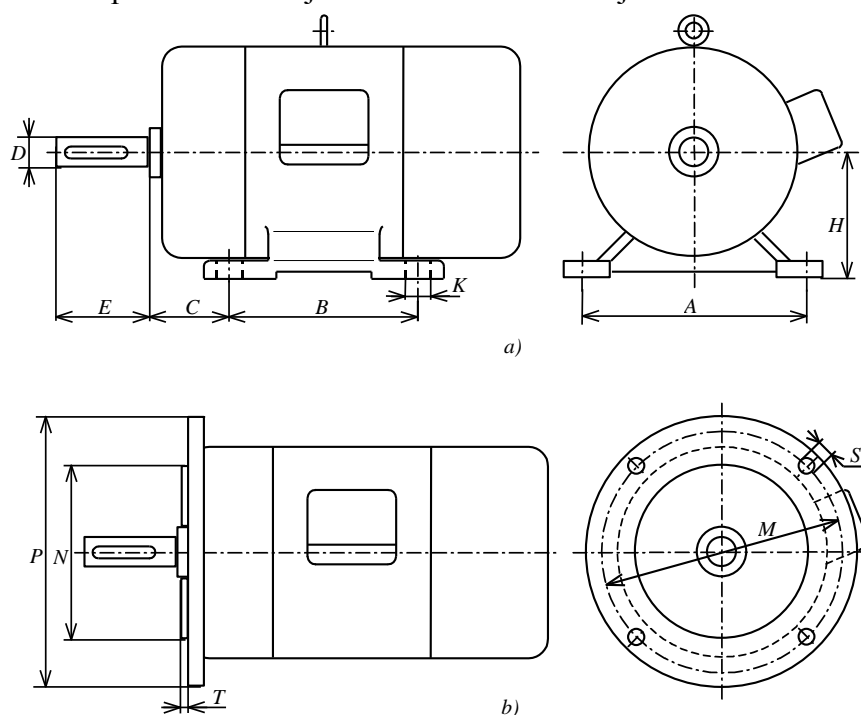
Ezeket, a követelményeket az egységesítés érdekében nemzetközi- és nemzeti szabványok rögzítik. A Nemzetközi Elektrotechnikai Bizottság (International Electrotechnical Commission, az IEC) például már évtizedek óta foglalkozik a gyártás és felhasználás szempontjából leggyakoribb teljesítménytartomány (0,55...500 kW) egységesítésével, ami azt jelenti, hogy a gépek fontosabb villamos- és mechanikai jellemzőinek ajánlásait megadják. Az utóbbi évtizedben megjelentek az Európai Unió szabványai (EN) is. A villamos hajtások területére az Elektrotechnikai Szabványosítás Európai Bizottsága (European Committee for Electrotechnical Standardization, CENELEC) szabványok előírásai mérvadóak. Ezeket, a szabványokat három hivatalos fordításban (angolul, franciául, és németül) adják ki, a Bizottság tagtestületei jogosultak saját nyelvükön fordítást készíteni, amely szintén hivatalosnak minősül. Hazánkban a magyar szabványok (MSZ) általában átveszik a nemzetközi előírásokat és az átvételt fel is tüntetik (például az MSZ EN 60034 a villamos gépekkel foglalkozik).

6.2.1. Villamos forgógépek építési alakjai

A villamos forgógépek építési alak szerint lehetnek:




-  talpas, pajzscsapágyas;
-  peremes;
-  bakcsapágyas, alaplemezes.

A különböző építési alakok rajzait a 6.25. ábrán láthatjuk.



6.25. ábra Villamos forgógépek építési alakjai
a) talpas b) peremes

A talpas és peremes motorok csereszabotosságát az IEC szabványok betartásával biztosíthatjuk, melyek előírják a 6.25a és 6.25b ábrán feltüntetett beépítési és csatlakozási méreteket. Az alapvető jellemző a tengelymagasság (H), illetve a csatlakozó perem osztókörének átmérője (M). Azonos tengelymagasságon belül további lépcsőzés van a ház hosszúsága alapján:

-  S (Small) a rövid;
-  M (Middle) a közepes;
-  L (Long) a hosszú.





A három hossz értelemszerűen teljesítmény különbséget is jelent.

A bakcsapágyas, alaplemezes gépek általában nagyobb teljesítményű, MW nagyságrendű, helyhez kötött célgépek (6.25c ábra).

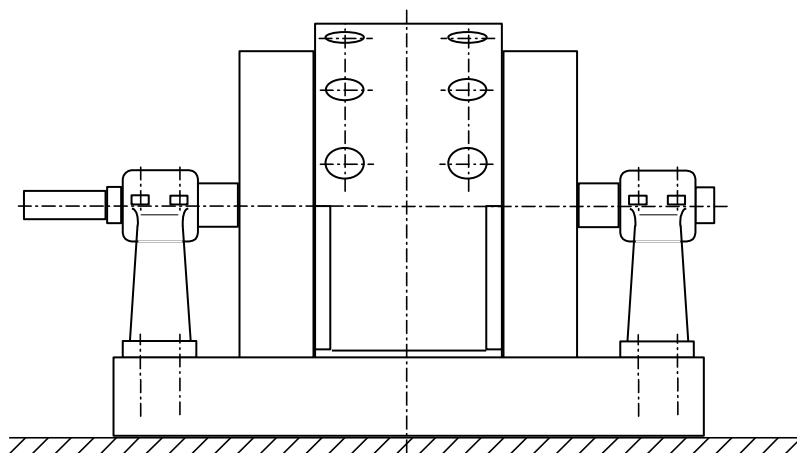
A villamos forgógépek felépítési típusaival, szerelési helyzeteivel és a kapocsház elrendezések osztályozásával az MSZ EN 60034-7 szabvány foglalkozik.

A forgógépek üzemi helyzeteit is egy jelrendszer rögzíti, az IM (International Mounting) után a B és egy kódszám a vízszintes tengelyű gépeket, IM után V és egy kódszám a függőleges tengelyű gépeket jelenti, a betűk után egy vagy két számjegy van, melyeket a szabvány 1. táblázata tartalmaz (pl.: IM 1001 a talpas motor, míg az IM 3001 a peremes motor kódja).

A korszerű villamos motoroknak már a környezetvédelmi követelményeket is ki kell elégíteniük. Ilyen követelmények például a gépek rezgés és zajszintjére vonatkozó előírások. Ebből a szempontból lehetnek:

-  Normál;
-  csökkentett rezgésű ill. zajú;
-  rezgés ill. zajszegény;
-  precíziós ill. különlegesen zajszegény gépek.




A villamos gépeknek továbbá ki kell elégíteniük az MSZ EN60034-1 szerinti „nyugodt járás” követelményét, amely a csapágyakon mérhető rezgés szintjét írja elő.









6.25. ábra Villamos forgógépek építési alakjai
c) bakcsapágyas

6.2.2. Villamos forgógépek védettsége

A villamos berendezéseket – így a gépeket is – védeni kell a:

-  mechanikai;
-  légköri;
-  vegyi hatásokkal szemben.

Ezért a berendezéseket tokozatba helyezik, mely véd a:

-  feszültség alatti részek véletlen érintése;
-  mozgó, forgó részek érintése;
-  folyadék bejutás;
-  porok, gőzök, pára bejutás;
-  durva mechanikai beavatkozás;
-  vegyi hatások ellen.

Ezek a kialakítások bizonyos fokú védettséget nyújtanak, melynek mértékét a villamos berendezés védettségi fokozatával határoznak meg. Az MSZ IEC 34-5 szerint a villamos forgógép védettsége IPXY (International Protection), ahol az első számjegy a szilárd testek behatolás elleni védettséget határozza meg, a második számjegy a víz behatolása elleni védettségi fokozatot jelöli.

X: 0...6-ig részleteiben a következő védettségi fokozatokat jelenti:

- 1: nincs védettség.
- 2: 50 mm-nél nagyobb méretű szilárd testek (pl. kéz) behatolása elleni védettség.
- 3: 12 mm-nél nagyobb méretű szilárd testek (pl. ujj) behatolása elleni védettség.
- 4: 2,5 mm-nél nagyobb méretű szilárd testek (csavarhúzó) behatolása elleni védettség.
- 5: 1 mm-nél nagyobb méretű szilárd testek behatolása elleni védettség.
- 6: a gép működésére káros mennyiségű por behatolása elleni védettség.






Y: 0...8-ig a következő védettséget jelenti:

- 0: nincs védettség.
- 1: a burkolatra függőlegesen, cseppekben leeső víz elleni védettség.
- 2: a függőlegestől bármely irányban legfeljebb 15°-kal megdőntött burkolatra függőlegesen leeső vízcseppek elleni védettség.
- 3: a függőlegeshez viszonyított 60°-os szögtartományban lehulló, esőszerű víz elleni védettség.
- 4: a burkolatra bármely irányból (alulról is) freccsenő víz elleni védettség.
- 5: a burkolatra irányított bármilyen irányú vízsugár elleni védettség.
- 6: a gépre nézve már káros mennyiségű hullámzó víz (pl.: tengervíz) behatolása elleni védettség.
- 7: meghatározott nyomásviszonyok és időtartam mellett vízbe merített gép védettsége káros mennyiségű víz behatolása ellen.

8: a gép meghatározott feltételek mellett hosszú időre vízbe meríthető (pl.: búvárszivattyú).

Ha a forgógép védetség foka a víz behatolása szempontjából nem ugyanaz álló- és forgó állapotra, akkor az álló állapotra vonatkozó jelölést S (Static) betűvel, a forgó állapotra vonatkozót pedig M (Mobile) egészítik ki.

A védeleg fokozaton belül a két szempontból megvalósított védeleg nem térhet el egymástól nagymértékben, mert az egyik fajta védelegnek konstrukciós okokból bizonyos mértékben vonzata a másik. A villamos gépeknél leggyakrabban előforduló védeleg fokozatok:

-  IP11 és IP12;
-  IP22 és IP23;
-  IP33 és IP34;
-  IP43 és IP44;
-  IP54 és IP55.

Az IP védeleg szint nem mérhető a robbanás elleni védelem szempontjából, az ennek megfelelő gépek különleges kivételük. A robbanás elleni védelem célja az, hogy esetleges villamos szikra hatására bekövetkező robbanás csak a gép belső terére korlátozódjék, ne tudjon innen kiindulva továbbterjedni.

A robbanásbiztos (Rb) és sűjtőlégbiztos (Sb) villamos berendezéseket alkalmazási terület szerint két alkalmazási csoportba soroljuk:

- I. alkalmazási csoport: földalatti sűjtőlég és szénpor robbanásveszélyes bányatérsg.
- II. alkalmazási csoport: minden más robbanásveszélyes hely (további felosztás: A,B,C alcsoport).

Robbanásbiztos védelmi módok (MSZ EN 500XX):

Védelem elve	Védelmi mód	Jele	Szabványa
Mechanikai szilárdság	Nyomásálló tokozás	EEx d	MSZ EN 50018
Energiakorlátozás	Gyűjtőszikramentes áramkör	EEx i	MSZ EN 50020
Szerkezeti kialakítás	Fokozott biztonság	EEx e	MSZ EN 50019
Gáz-levegő elegy kizorítása a tokozásból	Túlnyomásos védelem	EEx p	MSZ EN 50016
	Olaj alatti védelem	EEx o	MSZ EN 50015
	Kvarchomok védelem	EEx q	MSZ EN 50017
	Légmentes lezáras kiöntőanyaggal	EEx m	MSZ EN 50028

A robbanás hevességét a láng terjedési sebessége határozza meg, amely a robbanó elegy összetételétől függ. Az égés, a robbanás és a detonáció jellegében ugyanaz az oxidációs folyamat. A különbség a nyomáshullám, illetőleg a láng terjedési sebességeiben

van. Az égésnél ez az érték m/s tartományban, robbanásnál pedig 100 m/s tartományba esik. A detonációs égési folyamat a hangsebesség többszöröse is lehet.

Földalatti bányatérsekben, a sújtólégveszélyes környezetben a villamos berendezésekkel kapcsolatos követelményeket az Általános Bányászati Biztonsági Szabályzat (ÁBBSZ) szabályozza.

6.2.3. Villamos forgógépek szigetelési osztályai.

A villamos forgógépek tekercselése és a lemezteste közé helyezett szigetelőanyagok hőállósága meghatározza azt a megengedett határhőmérsékletet, amelyet a gép aktív részei elérhetnek. Ez a hőmérséklet pedig befolyásolja gépek kihasználtságát. A villamos szigetelőanyag hőállósága az a képesség, melynél fogva a megengedett hőmérséklet növekedés hatására is megtartja jellemző tulajdonságait a villamos motorra előírt üzemidő alatt.

Az osztály jele	Határhőmérséklet a legmelegebb ponton $\theta_{\text{határ}}, ^\circ\text{C}$	Az osztályba tartozó szigetelőanyagok fő csoportjai
A	105	Pamut, selyem, papír impregnálva, vagy olajba helyezve
E	120	Pamut és papíryananyagok szintetikus gyantákkal kezelve vagy fóliával bevonva
B	130	Mika, üvegrost, aramid, kapron, stb. és ezek kombinációi általában szintetikus kötőanyagokkal
F	155	Az előbbi anyagok és kombinációik
H	180	Szilikon elasztomerek és mika, üvegrost, üvegfólia kombinációk szilikon gyantákkal és lakkokkal kezelve
C	>180, esetenként meghatározva	Mika, porcelán, üveg, kvarc és ezek kombinációi szervesetlen kötőanyaggal, vagy anélkül




6.1. táblázat Szigetelőanyagok hőosztályai

Az IEC 60085 szabvány szerinti szigetelőanyagok hőállósági osztályba sorolása vonatkozik a villamos forgógépek szigetelési rendszerére is. A szigetelési osztályokat, a hozzájuk tartozó megengedett határhőmérsékletet és a szigetelőanyag fajtákat a 6.1.táblázat tartalmazza.

A 6.1.táblázat a gépek legmelegebb pontján adja meg a határhőmérséklet értékét, a hőmérsékletmérési módszerek közül azonban nem mindegyik biztosítja ennek a pontnak a

mérési lehetőségét. Ezért a szabvány a mérési módszer és a mérési bizonytalanság miatt $\theta_{\text{határ}}$ értékét lejjebb szállítja és helyette a θ_{meg} értéket (*a villamos forgógép megengedett hőmérséklete*) adja meg a különböző szigetelési osztályokra.

A gépek hőmérsékletét az alábbi mérési módszerek valamelyikével kell megállapítani:

-  hőmérővel,
-  ellenállásméréssel,
-  villamos hőérzékelővel.

A villamos gépeknél a maximális környezeti hőmérsékletet (θ_{kmax}) figyelembe véve inkább a megengedett túlmelegedés értékét szokták megadni:

$$\Delta\theta_{\text{meg}} = \theta_{\text{meg}} - \theta_{\text{kmax}} = \vartheta_{\text{meg}} \quad (6.53)$$

A 6.2. táblázat tartalmazza a leggyakrabban használt, ellenállásmérés, illetve beépített hőérzékelős hőmérséklet meghatározásnál a megengedett hőmérsékleteket és túlmelegedéseket 40 °C környezeti hőmérséklet mellett.

Az osztály jele	$\theta_{\text{határ}}$	Ellenállásmérési módszer		Beépített hőérzékelős módszer	
		$\theta_{\text{meg}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{\text{meg}}, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{meg}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta\theta_{\text{meg}}, ^\circ\text{C}$
A	105	100	60	105	65
E	120	115	75	115	75
B	130	120	80	130	90
F	155	145	105	150	110
H	180	165	125	170	130

6.2. táblázat A tekercselések megengedett hőmérsékletei és túlmelegedései

A villamos gépek névleges teljesítményét (ha eltérő hivatkozás nincs) mindig 40 °C maximális környezeti hőmérsékletre adják meg. Ha $\theta_{\text{k}} > 40 ^\circ\text{C}$, akkor a gép névleges teljesítményét csökkenteni kell. Ha $\theta_{\text{k}} < 40 ^\circ\text{C}$, akkor a névleges teljesítményt növelhetjük.

6.3. VILLAMOS FORGÓGÉPEK MELEGEDÉSE, HŰLÉSE ÉS HŰTÉSE

6.3.1. Villamos forgógépek melegedése és hűlése

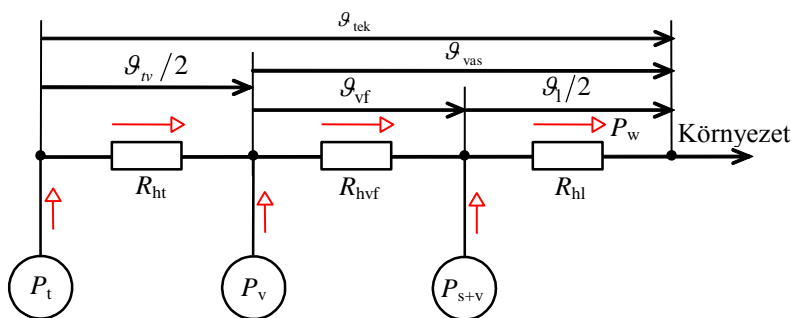
Villamos forgógépek esetén az energiaátalakítás közben veszteségek keletkeznek, amelyek hővé alakulnak. Ezek a hőmennyiségek a keletkezés helyén a géprészek hőfok-emelkedését okozzák a környezethez képest, és a kisebb hőmérsékletű felületek felé áramlanak. A villamos gépekben keletkező veszteségek és jelölésük:

- ✚ tekercselési veszteség (P_t),
- ✚ vasveszteség (P_v),
- ✚ sűrűlási és ventilációs veszteség (P_{s+v}).

A következőkben a villamos gépet egy adott terhelési pontban, állandósult üzemiállapotban az alábbi feltételek mellett vizsgáljuk:

- ✚ a veszteségi teljesítmény, a fajhő, a hőátadási tényező állandó,
- ✚ a túlmelegedés függvényt a legmagasabb hőmérsékletű részre, a tekercselésre értelmezzük,
- ✚ a vizsgált gép a veszteségek eloszlása és szerkezeti szempontból sem homogén, de egyszerűsítve a melegedési vizsgálat során a tekercselést homogénnek tekintjük, és a többi veszteségnek a tekercselésre gyakorolt hatását a mértékadó veszteség módszerével vesszük figyelembe.

A fenti kikötésekkel a hornyokban elhelyezkedő tekercselések melegedésére, állandósult állapotban a 6.26. ábra szerinti villamos helyettesítő vázlatot rajzolhatjuk fel.



6.26. ábra. A tekercsmelegedés villamos helyettesítő vázlata
állandósult állapotra

A helyettesítő vázlatot a hőátadás Ohm törvénye alapján rajzolhattuk fel, amelyet a

$$\Delta\theta = \vartheta = P_w \cdot R_h \quad (6.54)$$

alakban írhatunk le, ami azt jelenti, hogy a veszteségi teljesítmény (P_w) mint hőáram halad át a test és a környezet közötti hőellenálláson (R_h), amihez annál nagyobb túl-

melegedés (ϑ) szükséges, minél nagyobb a veszteségi teljesítmény és a hőellenállás. A helyettesítő vázlatban a P_t tekercs, P_v vas, és a P_{s+v} sűrűlási és ventilációs veszteségeket jelképező áramgenerátorok mellett alkalmazott további jelölések:

- ✚ ϑ_{iv} és R_{ht} a tekercselés és a vastest közötti hőlépcső, ill. hőellenállás,
- ✚ ϑ_{vf} és R_{hvf} a vastest és a hőleadó felület hőlépcsője ill., hőellenállás,
- ✚ ϑ_l és R_{hl} a hűtőlevegő túlmelegedése ill. a környezetig terjedő szakasz hőellenállás, azért számolunk az átlagos $\vartheta_l/2$ -vel, mert a gép aktív részeivel érintkező hűtőlevegő hőmérséklete a be- és kiömlő keresztmetszetnél mért érték között van,
- ✚ ϑ_{tek} és ϑ_{vas} a tekercselés ill. a vastest túlmelegedése a környezethez képest.

A (6.54) egyenlet értelmében írhatjuk, hogy

$$\vartheta_t = P_t \cdot R_{ht} + (P_t + P_v) \cdot R_{hvf} + (P_t + P_v + P_{s+v}) \cdot R_{hl}. \quad (6.55)$$

A szorzásokat elvégezve és a veszteségi teljesítményeket kiemelve:

$$\mathcal{G}_t = P_t \cdot (R_{ht} + R_{hvf} + R_{hl}) + P_v \cdot (R_{hvf} + R_{hl}) + P_{s+v} \cdot R_{hl}.$$

Az egyenlet jobboldalán a hőellenállások összegét kiemelve:

$$\mathcal{G}_t = (R_{ht} + R_{hvf} + R_{hl}) \cdot \left(P_t + \frac{R_{hvf} + R_{hl}}{R_{ht} + R_{hvf} + R_{hl}} P_v + \frac{R_{hl}}{R_{ht} + R_{hvf} + R_{hl}} P_{s+v} \right),$$

és bevezetve $R_h = R_{ht} + R_{hvf} + R_{hl}$ eredő hőellenállást:

$$\mathcal{G}_t = R_h \cdot \left(P_t + \frac{R_{hvf} + R_{hl}}{R_h} P_v + \frac{R_{hl}}{R_h} P_{s+v} \right). \quad (6.56)$$

A (6.56) egyenlet zárójelben lévő részét mértékadó vagy redukált veszteségnek nevezhetjük, így:

$$\mathcal{G}_t = R_h \cdot P'_w, \quad (6.57)$$

ahol

$$P'_w = P_t + k_v \cdot P_v + k_s \cdot P_{s+v}, \quad (6.58)$$

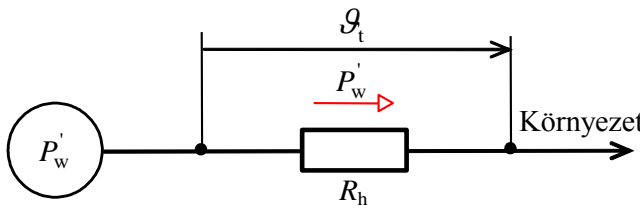
és

$$k_v = \frac{R_{hvf} + R_{hl}}{R_h} \quad \text{illetve,} \quad k_s = \frac{R_{hl}}{R_h}$$

melyeknek tapasztalati értéke: $k_v \cong 0,6 \dots 0,8$ ill. $k_s \cong 0,1$.

A mértékadó veszteség azt a veszteségi teljesítményt jelenti, amely a tekercselésben keletkezve az R_h nagyságú hőellenálláson keresztül a környezetbe távozva a valóságossal

azonos túlmelegedést hozna létre. Ez teszi lehetővé azt, hogy a tekercs melegedését a gép többi részétől függetlenül vizsgálhatjuk.



6.27. ábra A tekercsmelegedés egyszerűsített villamos helyettesítő vázlata

A (6.57) egyenlet lehetőséget ad a melegedés egyszerűsített villamos helyettesítő vázlatának felrajzolására, amely a 6.27. ábra szerinti.

A továbbiakban a melegedés, ill. a hűlés tranziens folyamatait vizsgáljuk, melynek során meghatározhatjuk az időfüggvényeket. A vizsgálathoz a redukált rendszert használjuk. Eszerint a mértékadó veszteség által okozott, dt idő alatt keletkező hőenergia egyrészt a tekercselés túlmelegedését növeli (vagyis a hőkapacitásba halmozódik fel), másrészt a hőellenálláson (hűtőfelületen) keresztül távozik. A melegedés differenciálegyenletét a redukált rendszerre felírva:

$$P'_w \cdot dt = m \cdot c \cdot d\mathcal{G} + A \cdot h \cdot \mathcal{G} \cdot dt, \quad (6.59)$$

amelyben m a tömeg, c a fajhő, A a hűtőfelület és h a hőátadási tényező.

Felhasználva, hogy a hőkapacitás:

$$C_h = m \cdot c, \quad \text{a hőellenállás:} \quad R_h = \frac{1}{A \cdot h},$$

valamint, hogy az állandósult túlmelegedés elérésekor $d\mathcal{G} = 0$ és (6.57)-ből

$$P'_w = \frac{\vartheta_{\max}}{R_h},$$

a differenciálegyenlet:
$$\frac{\vartheta_{\max}}{R_h} \cdot dt = C_h \cdot d\vartheta + \frac{\vartheta}{R_h} \cdot dt. \quad (6.60)$$

A változók szétválasztásával:

$$\frac{\vartheta_{\max} - \vartheta}{R_h} \cdot dt = C_h \cdot d\vartheta.$$

Átrendezve és az integrálási határokat kijelölve:

$$\int_0^{\vartheta} \frac{1}{R_h \cdot C_h} dt = \int_0^{\vartheta} \frac{1}{\vartheta_{\max} - \vartheta} \cdot d\vartheta,$$

majd
$$\frac{t}{R_h \cdot C_h} = [-\ln(\vartheta_{\max} - \vartheta)]_0^{\vartheta} = -\ln \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta}{\vartheta_{\max}}.$$

Bevezetve a $T = R_h \cdot C_h = \frac{m \cdot c}{A \cdot h}$ jelölést, a villamos analógia alapján megkapjuk a termikus folyamatok időállandóját, így:

$$-\frac{t}{T} = \ln \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta}{\vartheta_{\max}},$$

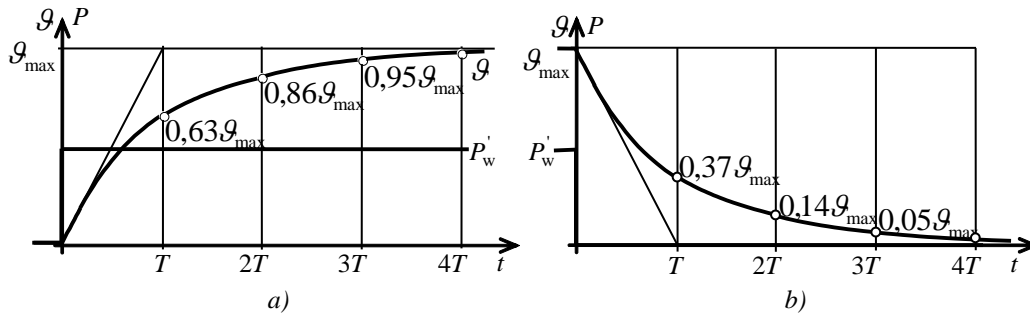
és
$$e^{-\frac{t}{T}} = \frac{\vartheta_{\max} - \vartheta}{\vartheta_{\max}}.$$

Eszerint a túlmelegedés változása az idő függvényében:

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right). \quad (6.61)$$

A lehűlés akkor következik be, amikor a motort lekapcsoljuk a hálózatról és feszültségmentes állapotba kerül. Ekkor $P'_w = 0$, és a differenciálegyenlet megoldása:

$$\vartheta = \vartheta_{\max} \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.62)$$



6.28. ábra Melegedési és hűlési jelleggörbék

A felmelegedés és lehűlés jelleggörbéit a 6.28a és 6.28b ábra mutatja, feltüntetve a mértékadó veszteséget is. A görbék kezdeti érintői:

$$\left. \frac{d\vartheta}{dt} \right|_{t=0} = \frac{\vartheta_{\max}}{T}, \quad \text{ill.} \quad \left. \frac{d\vartheta}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{\vartheta_{\max}}{T}. \quad (6.63)$$

A két görbénél azonos időállandót tételeztünk fel. A gyakorlatban ez csak akkor valósulhat meg, ha a melegedés és hűlés folyamán a gépek hőátadása megegyezik. A hőátadás nem változik, ha a gép a fordulatszámától független, külső (idegen) szellőző berendezéssel rendelkezik. A saját szellőzésű motorok esetén az álló- (hűlés), és a forgó állapothoz tartozó időállandó jelentősen különbözik egymástól.

A villamos motorok melegedési időállandóit a gyári katalógusok általában nem adják meg. A melegedési időállandó nagymértékben függ a gép védettségi fokától, valamint a szellőzési módtól. Tájékoztatóképpen megadjuk néhány típus időállandóját:

✚ Nyitott egyenáramú gépek	H= 100...160 mm-es tengelymagassággal	T = 25...40 min.
✚ Zárt egyenáramú gépek	H=280...400 mm-es tengelymagassággal	T = 70...100 min.
✚ Átszellőztetett aszinkron motorok	H=100...160 mm-es tengelymagassággal	T = 15...30 min.

Amennyiben a melegedés kezdeti értéke (ϑ_k), ill. a hűlés végső értéke (ϑ_v) nem zéró ($\vartheta \neq 0$), akkor az időbeni változásokra az alábbi egyenleteket kapjuk:

$$\vartheta = \vartheta_{\max} - (\vartheta_{\max} - \vartheta_k) \cdot e^{-\frac{t}{T}}, \quad (6.64)$$

illetve

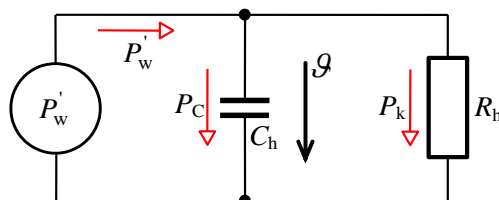
$$\vartheta = \vartheta_v + (\vartheta_{\max} - \vartheta_v) \cdot e^{-\frac{t}{T}}. \quad (6.65)$$

A (6.59) egyenletet felírhatjuk

$$P'_w = C_h \cdot \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{\vartheta}{R_h} = P_c + P_k \quad (6.66)$$

alakban is, amely lehetőséget nyújt egy általános villamos helyettesítő vázlat felrajzolására (lásd 6.29. ábrát), mert (6.66) egy áramgenerátoros táplálású párhuzamos RC-tag egyenlete.

A villamos motoroknál gyakran előforduló állapot a rövid ideig fellépő hirtelen túlterhelés (például az aszinkron motoroknál az indítási áramlökés). Ebben az esetben a mértékadó veszteség ugrásszerűen megnövekszik és a keletkező hő-



6.29. ábra A melegedés általános villamos helyettesítő vázlata

menyiség a tekercselés hőmérsékletét fogja megemelni, mert a környezetnek a rövid idő miatt nem tud hőt átadni ($P_k \cong 0$). A (6.66) egyenlet ekkor:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{P'_w}{C_h} = \frac{P'_w}{m \cdot c} = \frac{\Delta\vartheta}{\Delta t}. \quad (6.67)$$

Tehát a melegedés növekedése:

$$\Delta\vartheta = \vartheta_v - \vartheta_k = \frac{P'_w}{m \cdot c} \cdot \Delta t \quad (6.68)$$

ahol Δt a túlterhelés időtartama.

A veszteség (P_w) és a tömeg (m) a tekercselés térfogatával arányos, így az előbbi összefüggést az anyagállandókkal is felírhatjuk:

$$\Delta\vartheta = \frac{\rho \cdot s'^2 \cdot V}{\kappa \cdot V \cdot c} \cdot \Delta t = \frac{s'^2}{k_g} \cdot \Delta t, \quad (6.69)$$

ahol ρ a fajlagos ellenállás, κ a sűrűség, s' a P'_w -nek megfelelő áramsűrűség (a gyakorlatban számolhatunk a valódi áramsűrűséggel $s' \cong s$) és $k_g = \kappa \cdot c / \rho$ a tekercselés melegedésére jellemző állandók.

Az s^2 / k_g hányados segítségével gyors becslést végezhetünk a hőfoknövekedés sebességére.

Legyen például egy kalickás aszinkron motor névleges áramsűrűsége $s_n = 5 \text{ A/mm}^2$, a rövidzárási áram $I_m = 6 I_n$ és (vörösrézre és 75°C -ra) $k_g = 160 \text{ As}^\circ\text{Cmm}^4$. Ezekkel:

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = \frac{s^2}{k_g} = \frac{6 \cdot 5^2}{160} \cong 5,63^\circ\text{C/s}.$$

Eszerint a motor tekercselésének hőmérséklete rövidzárással $5,63^\circ\text{C}$ -kal emelkedik másodpercenként, és B osztályú szigetelés esetén 14,2 másodperc múlva éri el a megengedett 80°C túlmeleget.

6.3.2. Villamos forgógépek hűtése

A forgógépekben keletkezett hőteljesítményt a hűtőközeg és a környezet három, a hőtanból ismert alapvető fizikai jelenség útján veszi át, melyek:

-  a melegvezetés,
-  a sugárzás,
-  a természetes és mesterséges áramlás (konvekció).





A *melegvezetés* hatása a villamos forgógépek hűtése szempontjából az álló állapoton kívül gyakorlatilag elhanyagolható.

A *sugárzási hőteljesítmény* leadási lehetősége az alacsony fordulatszámú, nagyméretű, sima felületű motoroknál, valamint álló állapotban jelentős. A sugárzással leadható (idő- és felületegységre jutó) melegmennyiséget a *Stefan-Boltzmann törvény* szerint számíthatjuk:

$$q_r = \varepsilon \cdot B \cdot (T_M^4 - T_K^4), \quad (6.70)$$

ahol ε a motor színére jellemző viszonyszám, $B = 5,77 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ a Boltzmann-állandó, T_M a motor felület és T_K a besugárzott környezet abszolút hőmérséklete Kelvin fokban.

Az ε értéke különböző színeknél:

-  abszolút fekete testnél: 1,00;
-  matt fekete gépeknél: 0,95;
-  sötétszürke gépeknél: 0,85;
-  világosszürke gépeknél: 0,60.

Ezért a korszerű motorok általában matt fekete színűek.

A (6.70) egyenletet átalakítva és az állandók értékét behelyettesítve:

$$q_r = h_r \cdot \vartheta = h_r \cdot (\theta_M - \theta_K), \quad (6.71)$$

ahol $h_r = 19,6 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{T_M - T_K}{2} \right)^3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ a sugárzási hőátadási tényező, θ_M a motor felület és θ_K a környezet hőmérséklete $^{\circ}\text{C}$ -ban, ha $\varepsilon=0,85$. A sugárzási hőátadási tényező gyakorlati értéke $h_r=6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$, ami azt jelenti, hogy egy fok hőmérsékletkülönbségnél m^2 -ként az álló motor $6,5 \text{ W}$ -ot tud sugárzással eldisszipálni.

A villamos forgógépek legfontosabb hűtési módszere a hőáramlás, azaz konvekció, amely lehet természetes vagy mesterséges.

Természetes konvekciónál a meleg motort körülvevő levegő részecskéi a felülettel érintkezve felmelegednek, emiatt könnyebbé válnak, felszállnak és helyüket a hidegebb levegő foglalja el, és ez folyamat ismétlődik. Létrejön egy természetes áramlás, amely a meleget elszállítja. Természetes konvekciónál a hőátadási tényező tapasztalati értéke:

$$h_{tk} = 6,5 \dots 7,5 \text{ W/}^{\circ}\text{C m}^2.$$

A hőleadási teljesítmény:

$$q_{tk} = h_{tk} \cdot \vartheta = h_{tk} (\theta_M - \theta_k) \cong 7 \cdot 10^{-2} \cdot (\theta_M - \theta_k), \text{ W/dm}^2. \quad (6.72)$$

Ha a forgógép nem rendelkezik idegen szellőzéssel, akkor álló állapotban a sugárzás és a természetes áramlás együttesen hat, és a két hőátadási tényező összegét statikus hőátadási tényezőnek nevezzük:

$$h_{st} = h_r + h_{tk} \cong 13...15 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2. \quad (6.73)$$

A mesterséges konvekciót szinte valamennyi villamos motornál alkalmazzák. Ez azt jelenti, hogy a gép mesterséges szellőzéssel rendelkezik. A hőátadási tényező meghatározása ilyenkor igen bonyolult, mert a gép belsejében a légáramlással szembeni ellenállást kellene kiszámítani. A gyakorlatban a ventilátor által szállított hűtőlevegő mennyisége (V_{lev}) elég pontosan számítható és ismerjük a motor összes veszteségét (P_W). E két adat alapján meghatározhatjuk, hogy a hűtőlevegő mekkora átlagos túlmelegedéssel fogja elhagyni a gépet. Nem ismerjük viszont, hogy a levegő az egyes áramlási szakaszokban a hőteljesítményből mennyit vesz fel, és a hűtött felület milyen mértékű túlmelegedésénél viszi el a meleget.

A tapasztalatok szerint a hőleadó felületek melegedése háromszor akkora, mint a belépő hűtőlevegőé, ennek alapján mondható, hogy a kilépő levegő hőmérséklete $15...25 \text{ }^\circ\text{C}$ -kal lehet melegebb, mint a beáramlóé. A hűtőlevegő túlmelegedése $^\circ\text{C}$ -ban:

$$\vartheta, \text{ }^\circ\text{C} = \theta_{lki} - \theta_{lbe} = \frac{P_W}{c_{lev} \cdot V_{lev} \cdot \rho_{lev}}, \quad (6.74)$$

ahol P_W a motor összes vesztesége W-ban, c_{lev} a levegő fajhője, ρ_{lev} a levegő sűrűsége: $\rho_{lev} \cdot c_{lev} = 1200 \text{ Ws/}^\circ\text{C m}^3$, V_{lev} a hűtőlevegő mennyisége m^3/s -ban.

A leggyakrabban alkalmazott radiális, síklapátú szellőzőknél az áramlási ellenállást és a nyomásesést figyelembe véve a szállított légmennyiség:

$$V_{lev} \cong 0,2 \cdot v_k \cdot A_k, \quad (6.75)$$

ahol v_k a szellőzőkerék kerületi sebessége m/s -ban, A_k a levegő kilépési keresztmetszete m^2 -ben.

A kerületi sebességet a fordulatszámmal kifejezve azt a gyakorlattal is bizonyított megállapítást kapjuk, hogy a légszállítás 1:10 arányú kerületi sebesség tartományban a fordulatszámmal arányosan változik:

$$V_{lev} \cong k \cdot n. \quad (6.76)$$

A tapasztalat szerint a mesterséges áramlás hőátadási tényezője 1,5...4-szerese a gép statikus hőátadási tényezőjének így:

$$h_{mk} = 1,5...4 \cdot h_{st} \cong 20...55 \text{ W/}^\circ\text{Cm}^2. \quad (6.77)$$

A villamos forgógépek hűtési módszereinek jelölésrendszerét és terminológiáját az MSZ EN34-6 ajánlások alapján foglaljuk össze. A hűtési mód jelölésére minden hűtési

körre vonatkozóan az IC betűk (International Cooling) és az azt követő egy betűből és két számból álló jelcsoport szolgál. A számok előtti betű a hűtőközeg fajtáját jelenti:

- | | |
|---|---|
|  A: levegő |  H: hidrogén |
|  N: nitrogén |  C: széndioxid |
|  W: víz |  U: olaj |

A levegő jelét csak kombinált hűtési rendszernél szükséges feltüntetni.

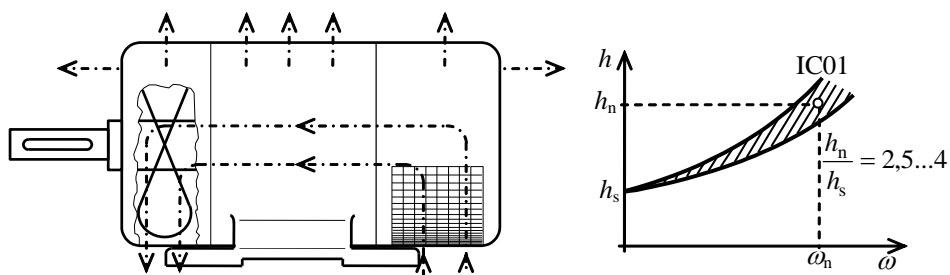
Az első szám a hűtőközeg áramlásának és a keletkezett hőmennyiség eltávolításának módját adja meg, a második szám pedig a hűtőközeg áramoltatásához szükséges energia betáplálási módjára jellemző.

A jelöléseket a 6.3. táblázat tartalmazza:

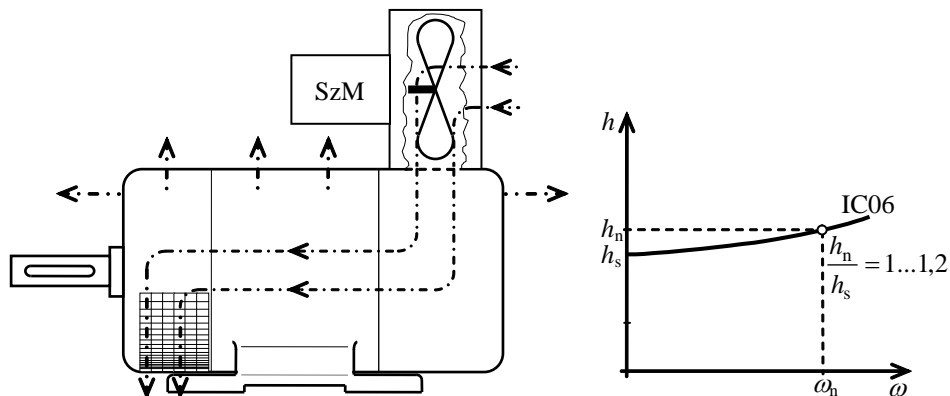
Jelzőszám	Az első szám jelentése	A második szám jelentése
0	Szabad áramlás a környezetből a gépbe ill. a hőcserélőbe és vissza.	Szabad áramlás, a hűtőközeg mozgását a hőmérsékletkülönbség idézi elő.
1	Csőcsatlakozás vagy légcsatorna a beszívó oldalon, kiáramlás a környezetbe.	Saját szellőzés, a hűtőközeg mozgását a forgórész vagy a rászertelt ventilátor végzi.
2	Csőcsatlakozás vagy légcsatorna a kifúvó oldalon, beszívás a környezetből.	Külön ventilátoros szellőzés, melyet a forgórész áttételen keresztül hajt.
3	Csőcsatlakozás vagy légcsatorna a beszívó és a kifúvó oldalon.	A gépre szerelt külön ventilátor, a géppel azonos tápfeszültséggel működtetve.
4	Felületi hűtés, a gépben a hűtőközeg zárt körben áramlik.	A műszaki fejlődéstől függően bővítésre fenntartva.
5	Beépített hőcserélő a környezeti hűtőközeget alkalmazva.	Beépített ventilátor, külön tápfeszültségről működtetve.
6	Gépre szerelt hőcserélő, a környezeti hűtőközeget alkalmazva.	A gépre szerelt ventilátor, külön tápfeszültségről működtetve.
7	Beépített hőcserélő, nem a környezeti hűtőközeget alkalmazva.	A hűtőközeg mozgását a géptől független ventilátor vagy szivattyú végzi.
8	A gépre szerelt hőcserélő, nem a környezeti hűtőközeget alkalmazva.	A hűtőközegben való viszonylagos mozgás következtében jön létre a hűtőhatás.
9	A géphez csatlakoztatott, de külön szerelt hőcserélő.	Bármilyen speciális hűtőközeg mozgatás.

6.3. táblázat A villamos forgógépek hűtési módjai

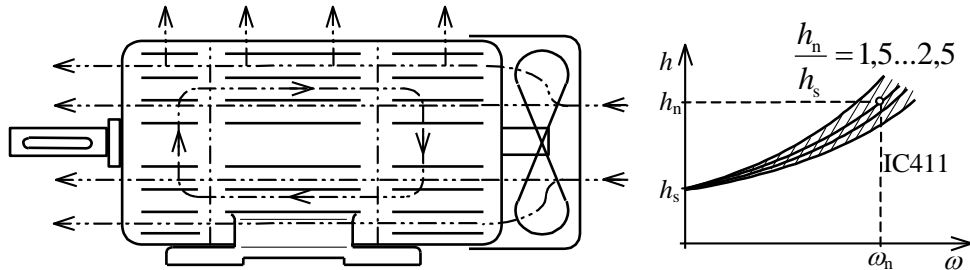
A megvalósítható hűtési mód részben a védettség függvénye, amelynek konstrukciós okai vannak. A 6.30a, b, c és d ábrán bemutatunk négy fontosabb hűtési rendszert. Az ábrákon megadjuk a hőátadási tényező (h) a szögsebességtől való függését is.



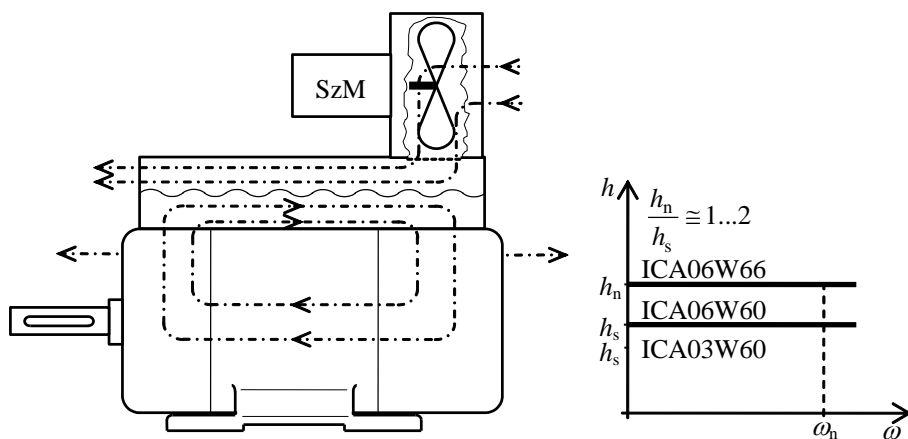
a) Saját szellőzésű, nyitott hűtési rendszer, freccsenő víz ellen védett



b) Idegen szellőzésű, nyitott hűtési rendszer, freccsenő víz ellen védett



c) Saját szellőzésű, zárt hűtési rendszer, zárt, felületi hűtésű vagy beépített hőcserélővel



d) idegen szellőzésű, közvetlen folyadékűtésű, zárt, ráépített hőcserélővel

6.30. ábra Villamos forgógépek hűtési módjai

A saját szellőzésű gépeknél problémát jelent, ha a fordulatszám kisebb a névlegesnél. A hűtőlevegőt ilyenkor a motor tengelyére szerelt ventilátor, vagy maga a forgórész szállítja, és a légmennyiség a (6.76) szerint arányosan változik a fordulatszámmal. Az áramlási keresztmetszet viszont változatlan, így ezért megnövekszik a levegő saját túlmelegedése. Ezért a névlegesnél kisebb fordulatszámon csökkenteni kell a veszteségeket, ami terhelés csökkentését vonja maga után (leértékeljük a motort). A csökkentés mértékére saját szellőzésű aszinkron gépeknél a 6.4. táblázat ad tájékoztatást.

Fordulatszám, %	100	90	80	70	60	50	40
Nyomaték, %	100	96	91	85	80	72	62
Teljesítmény, %	100	86	73	60	48	36	25

6.4.táblázat A veszteségek csökkentésének mértéke különböző fordulatszámokon

A 40 %-nál kisebb fordulatszámon a légszállítás gyakorlatilag már olyan kevés, hogy a motorban csak annyi veszteség képződhet, amennyit a természetes légáramlás el tud szállítani.



6.4. VILLAMOS MOTOROK ÜZEMTÍPUSAI, A MOTORKIVÁLASZTÁS SZEMPONTJAI

A villamos forgógépek névleges adatainak és üzemi jellemzőinek előírásait az MSZ EN60034 Országos Szabvány tartalmazza. E szabvány műszaki tartalma teljesen megegyezik az IEC 34-1+Am.No.1(2000) nemzetközi szabványával. A szabvány alkalmazási területe minden villamos forgógépre kiterjed, kivéve azokat, amelyekre egyéb előírások vagy szabványok vonatkoznak (pl. vasúti vagy közúti közlekedés). Az előírások közül a villamos hajtásokra vonatkozó legfontosabbakat foglaljuk össze ebben a fejezetben.

A **motor üzeme**: a motor terhelési viszonyainak alakulása, az időtartam és a sorrendiség figyelembevételével, beleértve a nyugalmi és feszültségmentes periódusokat is.

Az **üzemi feltételek** azon külső tényezőknek az összessége (pl. feszültségváltozás, környezeti hőmérséklet, stb.), amelyek a motor működését befolyásolják.

Az **üzemi állapotok**:

-  **Nyugalmi és feszültségmentes állapot** azt jelenti, hogy a motor áll, de sem villamos, sem mechanikai teljesítményt nem vesz fel, idegen szellőzés esetén a hűtés üzemszerűen működik.
-  **Üresjárási állapot** azt jelenti, hogy a motor üzemszerűen forog, de sem villamos, sem pedig mechanikai teljesítményt nem ad le (ideális esetben elhanyagoljuk a súrlódási- és a ventilációs veszteségeket).

- ✚ **Terhelési állapot** azt jelenti, hogy a motor villamos és mechanikai, vagy mechanikai teljesítményt ad le, illetve vesz fel.

A **névleges értékek** azok az értékek, amelyekre a motort tervezték és gyártották, és amelyeket az adattáblán feltüntetnek. A villamos motor **névleges üzeméről** akkor beszélünk, ha az adattáblán feltüntetett adatok és feltételek egyidejűleg alakulnak ki. A névleges üzem magában foglalja a feszültség, a frekvencia, az áram, a teljesítmény, a teljesítménytényező, a fordulatszám, a gerjesztőfeszültség, az üzemtípus, a védettség stb. névleges adatait, melyeket a motor adattábláján fel kell tüntetni.

A villamos motorok **hőmérsékleti állapotai**:

- ✚ *Hideg állapotban* van a motor, ha az összes géprész hőmérséklete legfeljebb $\pm 3\text{ °C}$ -kal tér el a környezet ill. hűtőközeg hőmérsékletétől.
- ✚ *Üzemmeleg állapotban* van a motor, ha az összes géprész hőmérséklete legfeljebb $\pm 10\text{ °C}$ -kal tér el a névleges terheléskor kialakuló hőmérséklettől.
- ✚ *Termikus egyensúlyban* van a motor, ha a vizsgált géprészek hőmérséklete óránként legfeljebb 2 °C -kal változik. A termikusan egyensúlyban lévő motor esetén a tekercselések túlmelegedését ellenállásmérésből az alábbi összefüggés alapján kell meghatározni:

$$\vartheta = \theta_2 - \theta_a = \frac{R_2 - R_1}{R_1} (235 + \theta_1) + \theta_1 - \theta_a, \quad (6.78)$$

ahol θ_2 a tekercselés hőmérséklete a mérés végén (°C), θ_1 a tekercselés (hideg) hőmérséklete a kezdő ellenállásmérés pillanatában (°C), θ_a a hűtőközeg hőmérséklete a mérés végén (°C), R_2 a tekercselés ellenállása a mérés végén, R_1 a tekercselés hideg ellenállása θ_1 hőmérsékleten.

- ✚ Réztől eltérő anyagok esetén a képletben szereplő, a rézre jellemző 235-ös tényezőt, az illető anyag 0 °C -hoz tartozó hőmérsékleti tényezőjének reciprokával kell helyettesíteni. Alumínium esetében ez a tényező 225.
- ✚ A vonatkoztatási hőmérséklet az az érték, amelyre a motor hatásfokának számításakor az egyes géprészekben keletkezett veszteségeket, vagy a motor egyéb jellegzetes értékeit vonatkoztatjuk. Értéke A , E és B hőosztálynál $\theta_v = 75\text{°C}$, F és H hőosztálynál $\theta_v = 115\text{°C}$.

Valamennyi villamos motornak ki kell elégítenie az alábbi *terhelhetőségi feltételeket* és előírásokat:

- ✚ A motoroknak névleges teljesítménnyel terhelve – váltakozóáram esetén a névleges frekvencián – a névleges feszültségtől $\pm 5\%$ -kal eltérő feszültségen is kifogástalanul kell üzemelniük.
- ✚ A motoroknak névleges feszültségen (és frekvencián) leállás vagy hirtelen sebességváltozás nélkül 15 sec-ig ki kell bírniuk a névleges nyomaték 1,6-szorosát (egyenáramú motoroknál ezt a feltételt az armatúraárammal is ki lehet fejezni).

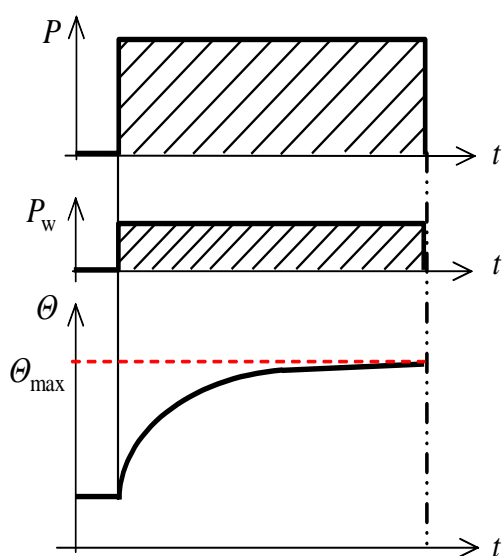
- ✚ Minden állandó üzemű (S1-es) motornak, üzemmeleg állapotban, az előírt feszültség határok mellett a névleges áram 1,5-szeresét mind mechanikai, mind villamos szempontból károsodás és maradó alakváltozás nélkül váltakozóáramú gépeknél 2 min-ig, egyenáramú gépeknél 1 min-ig ki kell bírnia. Ilyen igénybevétel esetén a megengedett túlmeleg értéke túlléphető.

A váltakozóáramú motorok esetén a névleges adatokat szinusz alakú hálózati feszültségnél szimmetrikus háromfázisú rendszerrel kell érteni. Az egyenáramú motoroknál a névleges adatokat sima egyenfeszültségű (maximális hullámosság 4 %) hálózaton vagy tápforráson kell érteni.

6.4.1 A villamos motorok üzem típusai

A motorok üzem típusai a terhelés okozta nyomaték, veszteség, melegedés időbeni változását osztályozzák. A szabvány tíz üzem típust (S1...S10) különböztet meg. A jellegzőgörbék felrajzolásánál az alábbi jelöléseket használjuk:

- | | |
|--|---|
| ✚ P : terhelés | ✚ P_w : a villamos gép veszteségei |
| ✚ t_s : állandó terhelésű működés időtartama | ✚ t_k : üzemszünet időtartama |
| ✚ t_i : indítás, gyorsulás időtartama | ✚ t_f : villamos fékezés időtartama |
| ✚ t_0 : üresjárás időtartama | ✚ T_c : egy terhelési ciklus időtartama |
| ✚ θ_{\max} : elért legnagyobb hőmérséklet | ✚ θ : hőmérséklet |
| ✚ bi : viszonylagos bekapcsolási idő (az egyes üzem típusoknál értelmezzük). | |



6.31. ábra S1 üzem típus

Folyamatos üzem - S1 üzem típus

Állandó terhelésű működés, amelynek időtartama elegendő a hőegyensúlyi állapot eléréséhez (lásd a 6.31. ábrát).

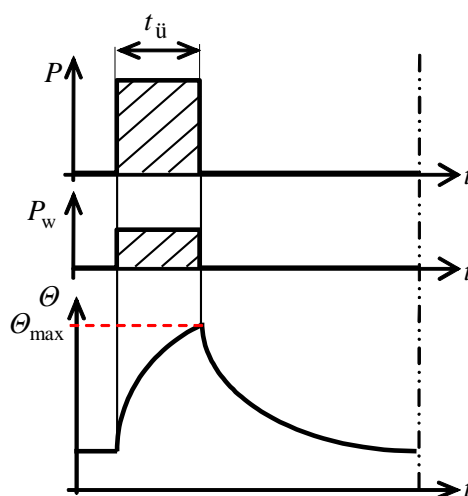
Megjegyzés: Az üzemidő nincs korlátozva, a szögsebesség gyakorlatilag állandó.

Rövid idejű üzem - S2 üzemtípus

Állandó terhelésű működés, melynek időtartama nem elegendő a hőegyensúlyi állapot eléréséhez. Az üzem után olyan hosszú üzemszünet következik, amely elegendő arra, hogy a gép a környezet hőmérsékletére lehűljön $\pm 2 \text{ K}$ pontossággal (lásd a 6.32. ábrát).

Megjegyzés: az állandó terhelésű szakasz alatt a szögsebesség gyakorlatilag állandó, az üzemidőkre jelenleg nincsenek szabványos értékek, de az üzemtípus rövidített jelölése után meg kell adni az üzem időtartamát is. pl.: S2 60 min.

A régebbi szabványok a 10, 30, 60 (az ún. órás üzem) és 90 min. üzemidőket rögzítettek.



6.32. ábra S2 üzemtípus

Szakaszos periodikus üzem - S3 üzemtípus

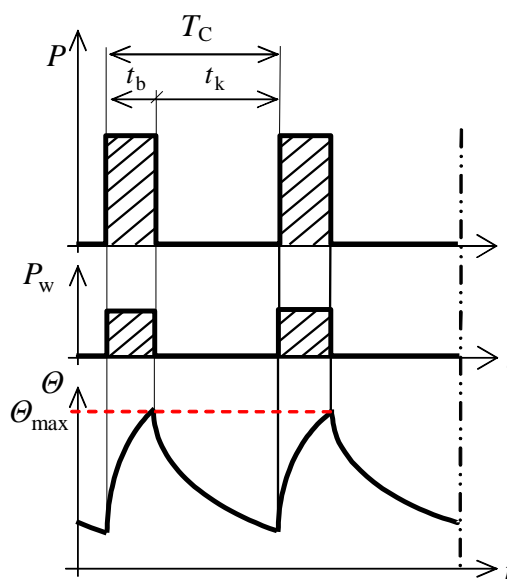
Azonos üzemi ciklusok sorozata, amelyben minden periódus egy állandó terhelésű szakaszból és egy üzemszünetből áll; egy periódus alatt a gép nem éri el a hőegyensúlyi állapotot, és az indítási áram nem befolyásolja jelentősen a melegedést (lásd a 6.33. ábrát).

Megjegyzés: Az ábra jelölése szerint a periódusidő $T_C = t_b + t_k$, a viszonylagos bekapcsolási idő.

$$bi = \frac{t_b}{t_b + t_k} \cdot 100 \% = \frac{t_b}{T_C} \cdot 100 \% \quad (6.79)$$

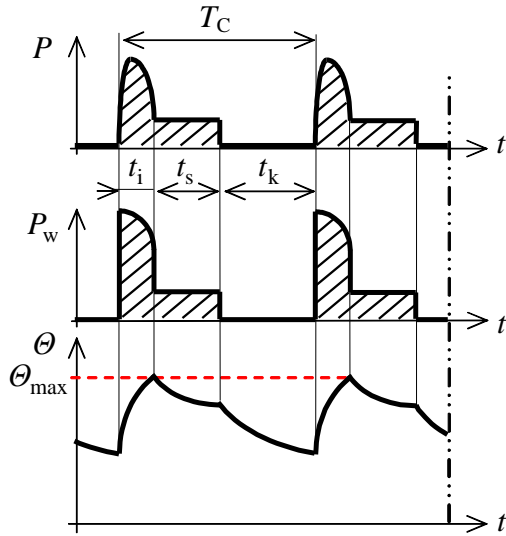
A szakaszos üzem egy periódusának időtartama 10 min. legyen és a viszonylagos bekapcsolási időtartamot a következő értékek közül kell választani: 15 %, 25 %, 40 %, 60 %. A jelölés után a *bi*-t meg kell adni pl.: S3 25 %.

Az S3 üzemtípusnál meg szokták adni még az indítási gyakoriságot is (*z*), amely a motoroknak az adott időtartamon belüli megengedhető, üzemszerű indításainak számára, valamint a közvetlen egymás utáni indítások gyakoriságára utaló adat.



6.33. ábra S3 üzemtípus

Szakaszos periodikus üzem indítással-S4 üzemtípus



6.34. ábra S4 üzemtípus

Azonos üzemi ciklusok sorozata, amelyben minden periódus jelentős mértékű indítási, állandó terhelésű szakaszból és üzemszünetből áll (lásd a 6.34. ábrát).

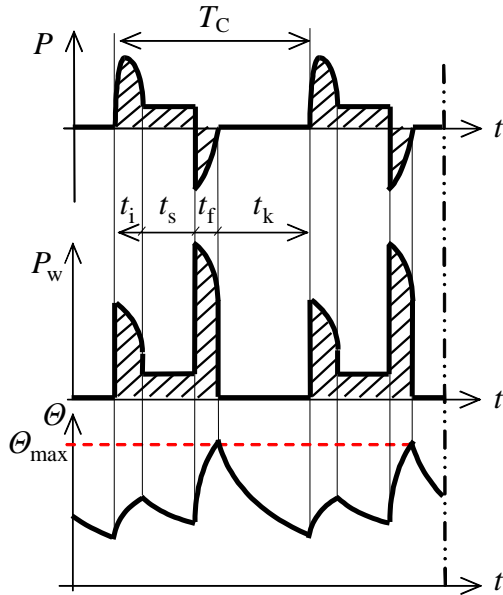
Megjegyzés: Az üzemtípus rövidített jelölése után meg kell adni a viszonylagos bekapcsolási időtartamot, a motor és a terhelés (motortengelyre redukált) tehetetlenségi nyomatékát (J_M , J_R) például S4 25 %; $J_M=0,15 \text{ kgm}^2$, $J_R=0,5 \text{ kgm}^2$.

A viszonylagos bekapcsolási idő:

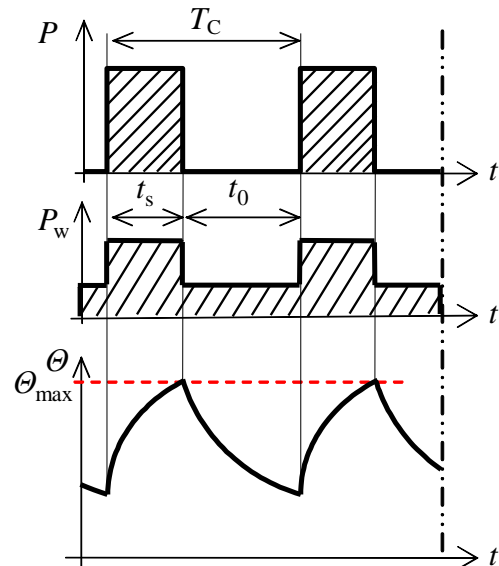
$$bi = \frac{t_i + t_s}{t_i + t_s + t_k} \cdot 100 \% = \frac{t_i + t_s}{T_C} \cdot 100 \% \quad (6.80)$$

Szakaszos periodikus üzem, indítással és villamos fékezéssel-S5 üzemtípus

Olyan azonos üzemi periódusokból álló sorozat, amelyben minden periódus indítási, állandó terhelésű, gyors villamos fékezésű szakaszból és üzemszünetből áll (lásd a 6.35. ábrát).

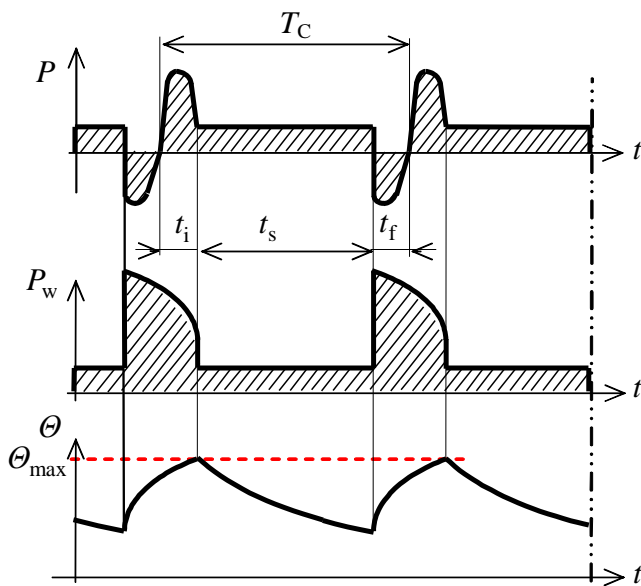


6.35. ábra S5 üzemtípus



6.36. ábra S6 üzemtípus

Megjegyzés: Az előző üzemtípushoz hasonlóan pl.: S5 40 %; $J_M = 1,6 \text{ kgm}^2$, $J_R = 2,5 \text{ kgm}^2$. A viszonylagos bekapcsolási idő:



6.37. ábra S7 üzemtípus

$$bi = \frac{t_i + t_s + t_f}{T_C} \cdot 100 \% . \quad (6.81)$$

Folyamatos működésű periodikus üzem - S6 üzemtípus

Olyan azonos üzemi periódusokból álló sorozat, amelyben minden periódus állandó terhelésű és üresjárási szakaszból áll, üzemszüneti periódus nincs (lásd a 6.36. ábrát).

Megjegyzés: A rövidített jelölés után meg kell adni a viszonylagos bekapcsolási időt, pl. S6 40 %; ahol:

$$bi = \frac{t_s}{T_C} \cdot 100 \% . \quad (6.82)$$

Folyamatos működésű periodikus üzem, indítással és villamos fékezéssel - S7 üzemtípus

Azonos üzemi ciklusok sorozata, amelyben minden periódus egy indításból, egy adott fordulatszámú, állandó szakaszból áll, amit egy vagy több, az előzőtől eltérő, de állandó fordulatszámú és terhelésű szakasz követ. Egy periódus alatt a gép a hőegyensúlyi állapotot nem éri el (lásd a 6.37. ábrát).

Megjegyzés: A rövidített jelölés után meg kell adni a motor és a terhelés (motortengelyre redukált) tehetetlenségi nyomatékát, pl.: S7; $J_M=0,4 \text{ kgm}^2$, $J_R=3,5 \text{ kgm}^2$.

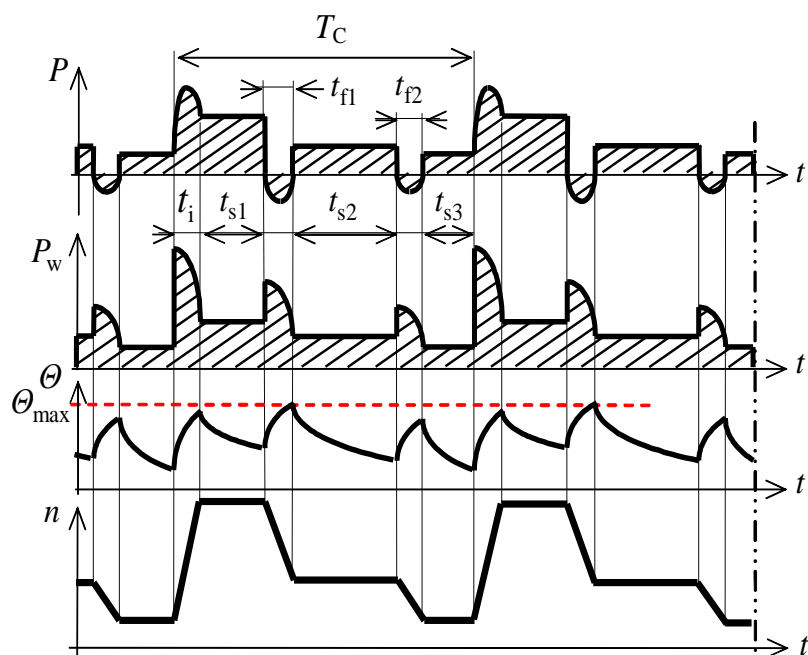
A viszonylagos bekapcsolási idő $bi=100 \%$.

Folyamatos működésű periodikus üzem, összerendelt terhelés és fordulatszám változásokkal - S8 üzemtípus

Azonos üzemi ciklusokból álló sorozat, amelyben minden periódus, egy előre meghatározott fordulatszámú állandó terhelésű, majd egy vagy több ezt követő másik állandó terhelésű, az előzőtől különböző fordulatszámú szakaszból áll, üzemszüneti periódus nincs (lásd a 6.38. ábrát).

Megjegyzés: az üzemtípus jelölése után meg kell adni a tehetetlenségi nyomatékokat, valamint mindegyik üzemszakaszt a hozzá tartozó terheléssel, fordulatszámmal és a viszonylagos bekapcsolási idővel, például:

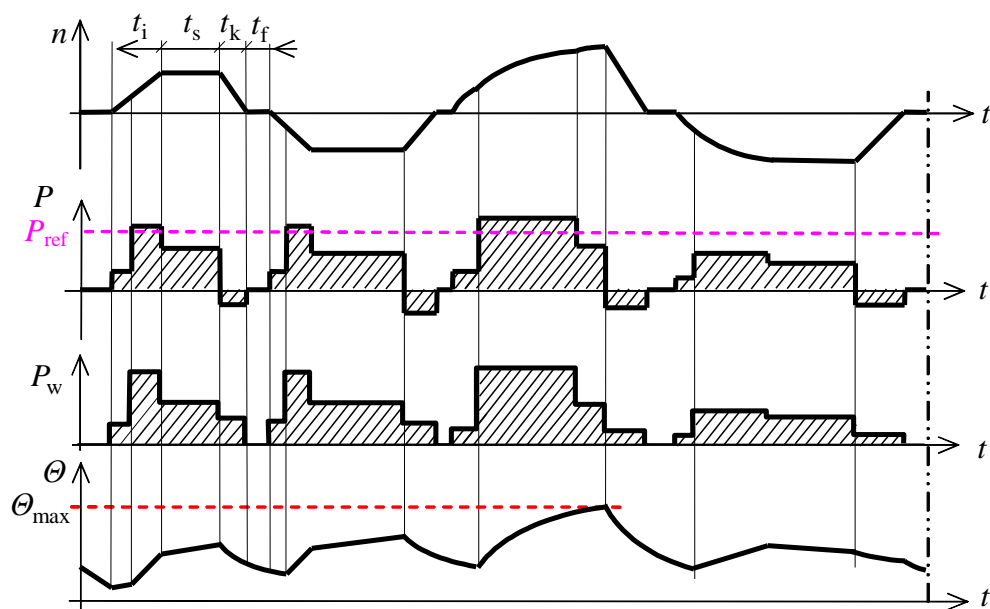
S8; $J_M = 0,8 \text{ kgm}^2$	$J_R = 2,6 \text{ kgm}^2$	
16 kW	740 min^{-1} ,	20 %
40 kW	1460 min^{-1} ,	40 %
25 kW	980 min^{-1} ,	40 %.



6.38. ábra S8 üzemtípus

Nem periodikus terhelés és fordulatszám változásokkal jellemezhető üzem - S9 üzemtípus

Olyan üzem, amely során általában a terhelés és a fordulatszám nem periodikusan változik a megengedett üzemi tartományon belül, ez az üzem gyakori olyan túlterheléseket tartalmaz, amelyek jelentősen meghaladják a teljes terhelést (lásd a 6.39. ábrát).

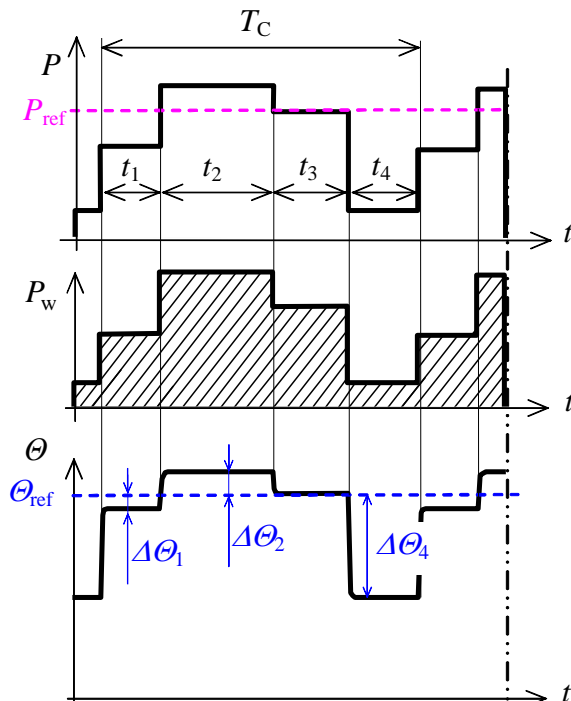


6.39. ábra S9 üzemtípus

Megjegyzés: ehhez az üzemtípushoz a megfelelő teljes terhelést a túlterhelhetőség figyelembevételével kell megválasztani.

Különböző állandó terhelésekkel jellemezhető üzem - S10 üzemtípus:

Olyan üzem, amely négynél nem több diszkrét terhelésből áll, amelyek mindegyike elegendő ideig tart ahhoz, hogy a gép elérje a termikus egyensúlyt. Az egy üzemszakaszon belüli legkisebb terhelés nullaértékű is lehet.



6.40. ábra S10 üzemtípus

A viszonylagos bekapcsolási idő és a kapcsolási gyakoriság szerinti üzemmódok:

✚	könnyű üzem:	$bi \leq 25\%$ és $z \leq 120$ k/h.
✚	könnyű kapcsoló üzem	$bi \leq 40\%$ és $z \leq 240$ k/h.
✚	nehéz üzem	$bi \leq 60\%$ és $z \leq 600$ k/h.
✚	különlegesen nehéz üzem	$bi > 60\%$ és $z > 600$ k/h.

6.4.2. A villamos motorok kiválasztásának szempontjai

A gyári katalógusok általában S1-es üzemtípusra adják meg a motorok paramétereit, esetleg külön közlik az S2, S3 és S6-ra érvényes adatokat is.

Az S1-től eltérő üzemtípusoknál túlterhelés léphet fel és ez problémát okozhat a szinkron és aszinkron motoroknál. Bevezetjük a túlterhelési tartalék fogalmát:

$$\lambda = \frac{M_B}{M_n}, \quad (6.83)$$

amelynek értéke szinkron motoroknál $\lambda = 1,4 \dots 1,8$; aszinkron motoroknál $\lambda = 2,0 \dots 2,5$. A λ értékét a különböző üzemtípusoknál figyelni kell, hogy lehetőleg ne csökkenjen 1,5 alá.

Állandó üzemű gépek kiválasztása (S1, S6...S9)

Legegyszerűbb a motor kiválasztása az S1 üzemtípusnál mivel itt az átmeneti folyamatoknak nincs hatása a melegedésre, így a szokásos biztonsággal:

$$P_n \geq 1,05 \dots 1,1 \cdot P_m, \quad (6.84)$$

ahol P_m a statikus terhelés mechanikai teljesítménye.

Változó terhelés és fordulatszám esetén nem tudjuk P_m -et közvetlenül meghatározni, hanem a korábbi üzemi tapasztalatok alapján kell megközelítőleg kiválasztani egy motort, majd annak adatai és jelleggörbéi ismeretében megszerkeszteni a P'_w mértékadó veszteségek időbeli változását. Azzal a gyakorlatnak megfelelő feltételezéssel, hogy az egyes terhelési szakaszok periódus ideje a melegedési időállandóhoz képest nem nagy $T_C/T \leq 0,3$, akkor a gép átlagos túlmelegedésével számolhatunk, mely arányos lesz a ciklus közepes mértékadó veszteségével:

$$P'_{wk} = \frac{1}{T_C} \cdot \int_0^{T_C} P'_w dt \cong \frac{P'_{w1} \cdot t_1 + \dots + P'_{wx} \cdot t_x}{t_1 + \dots + t_x}, \quad (6.85)$$

ahol az integrálás helyett azért térhettünk át súlyozott átlagszámításra, mert a veszteségek szakaszonként állandóak, a t -k az egyes szakaszok idejét például indítás (t_i), állandó terhelésű szakasz (t_s) stb. jelentik.

Az (6.85) kifejezés akkor ad helyes eredményt, ha a hűlési viszonyok az egyes időszakokban azonosak (idegen szellőzés). Ha a gépnek saját szellőzője van akkor a hőátadási tényező függ a fordulatszámtól, ezt a hűtési redukciós tényezővel vesszük figyelembe, mely $\alpha \leq 1$. Így a közepes mértékadó veszteség:

$$P'_{wk} = \frac{P'_{w1} \cdot t_1 + \dots + P'_{wx} \cdot t_x}{\alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x} = \frac{P'_{w1} \cdot t_1 + \dots + P'_{wx} \cdot t_x}{T'_C}, \quad (6.86)$$

Amelyben a $T'_C = \alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x$ időt redukált ciklusidőnek nevezzük.

Ha a gépet jól választottuk ki, akkor a P'_{wk} -nek kisebbnek kell lennie a tekercselés névleges állandó üzemére vonatkozó P'_{wn} mértékadó veszteségnél:

$$P'_{wn} = 1,05 \dots 1,1 \cdot P'_{wk}. \quad (6.87)$$

Ezt a motor kiválasztási eljárást az egyenértékű veszteségek módszerének nevezik, amely hosszadalmas, de viszonylag pontos eredményt ad.

Egyszerűsítő feltételekkel a gyakorlatban jobban alkalmazható módszereket kapunk, amelyek közül legelterjedtebb az egyenértékű áram módszere, amely a (6.85) egyenlet felhasználásával a

$$P'_{wk} \cong k_v \cdot P_v + c \cdot I_e^2 \quad (6.88)$$

közelítésen alapul ($k_v \cdot P_v \cong \text{áll.}$). Most is közelítőleg kiválasztunk egy motort, majd a terhelésnek megfelelő $M_M = f(t)$ alapján megrajzoljuk az $I_M = f(t)$ görbét és ezután meghatározzuk a melegedés szempontjából egyenértékű áramot. Szakaszonként állandó áramoknál:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{T_C} \cdot \int_0^{T_C} I^2 dt} = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + \dots + I_x^2 \cdot t_x}{t_1 + \dots + t_x}}, \quad (6.89)$$

ill. sajátzellőzésű motoroknál:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 \cdot t_1 + \dots + I_x^2 \cdot t_x}{\alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x}}. \quad (6.90)$$

Az így kapott egyenértékű áramot összehasonlítva az előzetesen kiválasztott motor **S1** üzemi névleges áramával teljesülnie kell az

$$I_n = 1,1 \dots 1,2 \cdot I_e \quad (6.91)$$

feltételnek.

A közel állandó fluxusú motoroknál (aszinkron, külső- és söntgerjesztésű egyenáramú motorok) alkalmazhatjuk az egyenértékű nyomaték módszerét. Saját szellőzésű motornál:

$$M_e = \sqrt{\frac{1}{T_C} \cdot \int_0^{T_C} M^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_1 + \dots + M_x^2 \cdot t_x}{\alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x}}. \quad (6.92)$$

Soros gerjesztésű egyenáramú motorok esetén a veszteségek jó közelítéssel arányosak a nyomatékkal, így az egyenértékű nyomatékuk:

$$M_e = \frac{1}{T_C} \int_0^{T_C} M \cdot dt = \frac{M_1 \cdot t_1 + \dots + M_x \cdot t_x}{\alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x}. \quad (6.93)$$

Az egyenértékű nyomatéknál is teljesülnie kell az alábbi feltételnek:

$$M_n \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot M_e, \quad (6.94)$$

ahol M_n a motor névleges nyomatéka S1 üzemtípusnál.

Ha söntjellegű motoroknál üzem közben csak a terhelés változik, de a szögsebesség közel állandó, akkor az egyenértékű teljesítmény módszerét alkalmazhatjuk:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 \cdot t_1 + \dots + P_x^2 \cdot t_x}{\alpha_1 \cdot t_1 + \dots + \alpha_x \cdot t_x}}, \quad (6.95)$$

$$\text{és most is} \quad P_n = 1,1 \dots 1,2 \cdot P_e. \quad (6.96)$$

Az eddigiek szerint kiválasztott motort mindig ellenőrizni kell a maximális terhelőnyomaték szempontjából, és teljesülnie kell:

$$M_{T\max} \leq \lambda \cdot M_n \quad (6.97)$$

feltételnek, ahol λ a már említett túlterhelhetőségi tényező.

Szakaszos periodikus működésű gépek kiválasztása (S3, S4, S5)

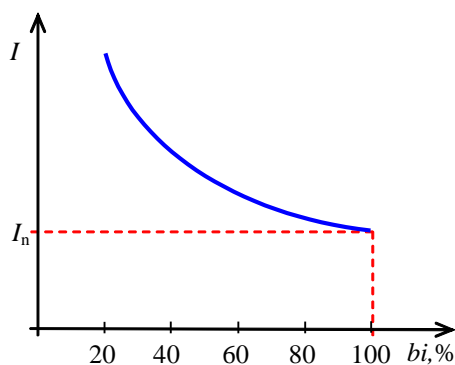
A szakaszos üzemtípusok jellegzetessége, hogy az átmeneti folyamatok: az indítás- és a fékezés hatása a motorok melegedésére jelentős. Ilyenkor a dinamikai nyomatékigény lényegesen nagyobb, mint az állandósult állapothoz tartozó terhelőnyomaték. Ez a dinamikai nyomaték a forgó tömegek gyorsítására és fékezésére fordítódik.

Az $M_{MT} = f(t)$ és $\omega_M = f(t)$ függvények ismeretében előzetes becslés alapján ki kell választanunk egy motort, ha szükséges, akkor az áttételt is. Ismerve a motor tehetetlenségi nyomatékát a mozgásegyenlet felhasználásával adódik:

$$M_M = M_{TR} + J_\Sigma \cdot \frac{d\omega_M}{dt}. \quad (6.98)$$

Az $M_M = f(t)$ és $\omega_M(t)$ alapján megszerkeszthetjük az $I_M = f(t)$ függvényt, amelyből az egyenértékű áramot meghatározhatjuk:

$$I_e = \sqrt{\frac{1}{t_b} \cdot \int_0^{t_b} I^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{I_i^2 \cdot t_i + I_s^2 \cdot t_s + I_f^2 \cdot t_f}{\alpha_i \cdot t_i + \alpha_s \cdot t_s + \alpha_f \cdot t_f}}, \quad (6.99)$$



6.41. ábra Az I áram változása a viszonylagos bekapcsolási idő függvényében

ahol t_i az indítási idő, t_s az állandó terhelésű szakasz, t_f a villamos fékezés ideje, a bekapcsolási idő $t_b = t_i + t_s + t_f$, és a redukált bekapcsolási idő $t'_b = \alpha_i \cdot t_i + \alpha_s \cdot t_s + \alpha_f \cdot t_f$.

Az egyenletből látható, hogy I_e -t csak a bekapcsolási időre vonatkoztatjuk. A kiválasztott motort ebben az esetben is ellenőriznünk kell az alábbi összefüggéssel:

$$I_n \geq 1,1 \dots 1,2 \cdot I_e, \quad (6.100)$$

ahol I_e a viszonylagos bekapcsolási időtől függő áramérték.

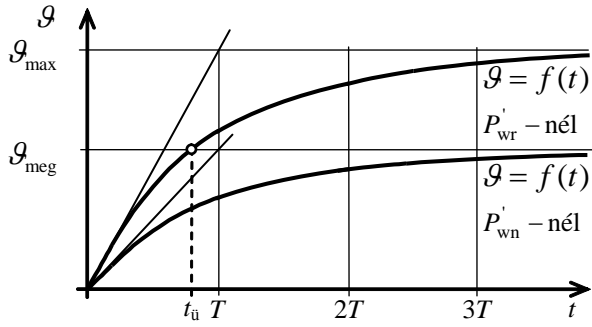
A motorok névleges áramának változását a viszonylagos bekapcsolási idő függvényében a 6.41. ábrán láthatjuk.

Szakaszos üzemtípusoknál, ha a (6.100) feltétel nem teljesül akkor, nem választhatunk automatikusan egy nagyobb teljesítményű motort, mert a tehetetlenségi nyomaték (J_M) változása miatt a (6.98) egyenlet is változik. Ilyenkor a számítást újra el kell végezni.

Rövid idejű üzemű gépek kiválasztása:

Ha az állandó terhelésű szakasz üzemideje $t_{\bar{u}}$ kisebb, mint a melegedési időállandó kétszerese, akkor a motort termikusan az S1-es teljesítményénél jobban lehet terhelni.

Állandó üzemből a névleges teljesítményhez tartozó P'_{wn} mértékadó veszteség \mathcal{G}_{meg} , míg a P_r -hez tartozó P'_{wr} állandó üzemből $\mathcal{G}_{max} = \sigma \cdot \mathcal{G}_{meg}$ túlmelegedést hozna létre. Ha a motor P_r teljesítményt ad le, akkor a \mathcal{G}_{meg} elérésekor a $t_{\bar{u}}$ időpontban le kell kapcsolni és olyan hosszú ideig kell feszültségmentes üzemszünetet hagyni, hogy a gép visszahűljön a



6.42. ábra Melegedés rövid idejű üzemnél

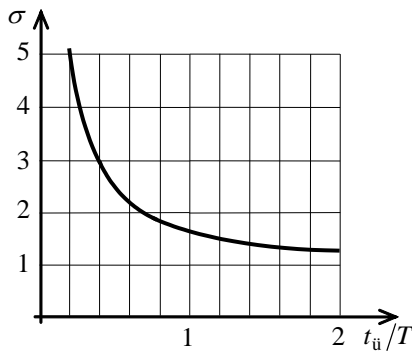
környezet hőmérsékletére. Az állandó, illetve a rövid idejű üzemi teljesítményekhez tartozó melegedési görbéket a 6.42. ábra mutatja.

A σ és t_u közötti összefüggést megkapjuk, ha felírjuk, hogy:

$$\sigma = \frac{G_{\max}}{G_{\text{meg}}} = \frac{P'_{\text{wr}}}{P'_{\text{wn}}}, \quad \text{és} \quad (6.101)$$

$$G_{\text{meg}} = G_{\max} \cdot (1 - e^{-t_u/T}). \quad (6.102)$$

(6.101)-ből és (6.102)-ből kifejezve:



6.43. ábra A viszonylagos mértékadó veszteség változása

$$\sigma = \frac{1}{1 - e^{-t_u/T}} = \frac{P'_{\text{wr}}}{P'_{\text{wn}}}, \quad (6.103)$$

Ezen összefüggés alapján a 6.43. ábrán felrajzoltuk az S2 üzemben megengedett viszonylagos mértékadó veszteség σ változását a t_u/T függvényében. Látható, hogy jelentős teljesítménynövekedést csak $t_u < T$ esetén lehet elérni. Ha $t_u/T < 0,3$ akkor a görbe jó közelítéssel egyenes és írhatjuk, hogy:

$$\sigma = \frac{P'_{\text{wr}}}{P'_{\text{wn}}} \cong \frac{T}{t_u}, \quad \text{és ebből} \quad (6.104)$$

$$P'_{\text{wn}} \cdot T \cong P'_{\text{wr}} \cdot t_u \quad (6.105)$$

(6.105)-ből láthatjuk, hogy $t_u \ll T$ esetén, amikor a hőleadás elhanyagolható, a $P'_{\text{wr}} \cdot t_u$ hőenergia van maximálva.

A rövid idejű üzemnél is a P_r értékét csak közvetett úton tudjuk meghatározni. Például egy kalickás aszinkron motornál normál üzemben a terhelés növekedésével gyakorlatilag csak a tekercselési veszteség változik. Legyen a rövid üzemi teljesítmény:

$$P_r = \xi \cdot P_n. \quad (6.106)$$

A mértékadó veszteségek viszonya pedig, a k_s tényező elhanyagolásával sőt jellegű motorokra ($\Phi \sim \text{áll}$):

$$\sigma = \frac{P'_{\text{wr}}}{P'_{\text{wn}}} = \frac{\xi^2 \cdot P_{\text{tn}} + k_v \cdot P_{\text{vn}}}{P_{\text{tn}} + k_v \cdot P_{\text{vn}}}. \quad (6.107)$$

Innen:

$$\xi = \sqrt{\sigma + k_v \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{P_{vn}}{P_{tn}}}, \quad (6.108)$$

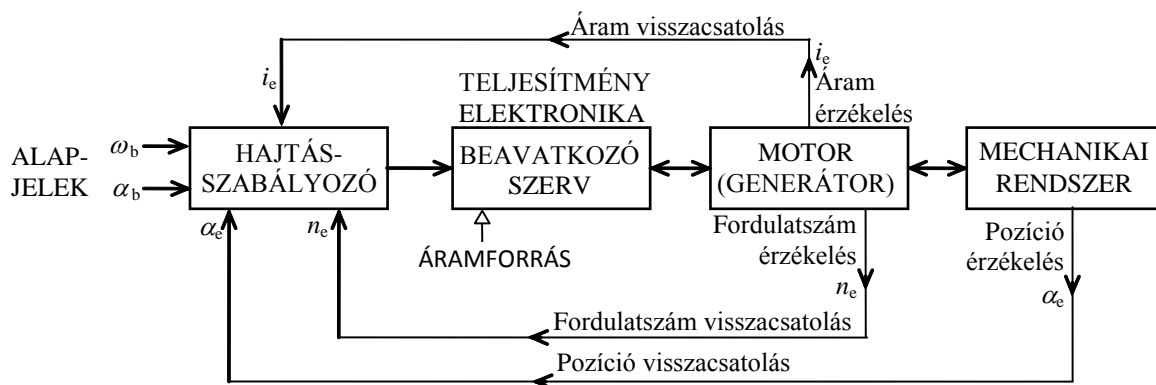
amelynek alapján meghatározhatjuk a rövid idejű üzemre érvényes teljesítményt. Az **S2** üzemnél is szükség van a nyomaték túlterhelhetőség ellenőrzésére.

6.5. VILLAMOS HAJTÁSOK SZABÁLYOZÁSÁNAK ÁLTALÁNOS KÉRDÉSEI

A 6.44. ábrán megadott blokkvázlat szemlélteti egy szabályozott villamos hajtás általános felépítését. A hajtás részei:

✚ **Mechanikai rendszer:** a felhasználó szempontjából egy adott technológiai folyamat megvalósítása a fontos, ezért a meghajtómotort a munkafolyamat igényeihez illesztve kell kiválasztanunk, ez az elsődleges szempont. A technológia (a hajtott munkagép) határozza meg a szükséges fordulatszám- és nyomatékigényeket az idő függvényében. A munkagépek legtöbbször hajtónyomatékot igényelnek. Irányváltó hajtások esetén szükséges lehet a mechanikai rendszer villamos fékezése, amikor is az energiaáramlás iránya megfordul, a meghajtó motorból generátor lesz. Ezt a visszatáplálást természetesen a beavatkozó szervnek is fogadnia kell tudnia. A mechanikai rendszerrel kapcsolatos kérdésekkel a 6.1. fejezet foglalkozik.

✚ **Motor (generátor):** az adott feladat megoldásához meghatározott $M(\omega)$ karakterisztikájú géptípus választása szükséges (pl. egy jármű esetén, alacsony fordulatszámon nagy a nyomatékigény, amely megköveteli a soros jellegű karakterisztikát). A géptípus meghatározása után a megfelelő teljesítményű gép kiválasztása történik. A motorkiválasztás szempontjai a 6.4. fejezetben találhatók. Az egyenáramú gépek különösen alkalmasak szabályozott hajtások készítésére, mert a kommutáció a gép fluxusát az armatúraáramokra merőlegesen rögzíti, így a gép nyomatéka arányos a gép fluxusával és armatúraáramával, a kettő közötti szög nem függ sem a terheléstől, sem a fordulatszámtól. Hátránya, hogy a gép a kommutátor miatt drága és karbantartás-igényes. Aszinkron motoroknál a helyzet bonyolultabb, mert a frekvencia csökkenésekor a fluxus és a rotoráram elfordul egymáshoz képest, a bezárt szög csökkenése miatt a nyomaték is csökken



6.44. ábra A szabályozott villamos hajtások általános felépítése

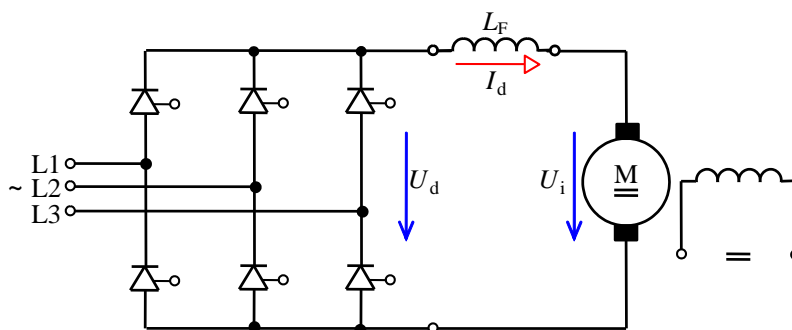
(nem arányos a fluxussal és a rotorárammal). Az aszinkron gépet ezért egy mezőorientációs gépmodell és transzformációk alkalmazásával olyan gépre vezetik vissza, amelynél az egyenáramú géphez hasonlóan a fluxus és a rotoráram egymásra merőleges. Ekkor a nyomaték már egyértelműen szabályozható, de a közbenső számítások miatt a szabályozó sokkal bonyolultabb (vagy célorientált integrált áramkörökkel, vagy gyors mikrogepekkel, DSP-vel oldják meg). A szabályozókör bonyolultságát ellensúlyozza, hogy a rövidrezárt forgórészű gép karbantartási igénye normál esetekben csak a csapágyakra korlátozódik.

✚ **Beavatkozó szerv:** a motort(generátort) szabályozott villamos hajtásokban valamilyen teljesítményelektronikai készülékről vezéreljük. Ezeknek a teljesítményelektronikai bevezetéseknek a részletes tárgyalása nem témája könyvünknek, ezért itt csak a legfontosabb, jelenleg alkalmazott módszereket emeltük ki a beavatkozási módszerek érzékelésére.

✚ **Áramforrás:** lehet hálózat, aggregátor, akkumulátor.

Egyenáramú gépek esetén a közel veszteségmentes beavatkozás a feszültség változtatásával történik. Az egyik legelterjedtebb, nagyobb teljesítményű ($1...10^4$ kW) hajtásoknál alkalmazott megoldás lényege, hogy a hálózat feszültségét vezérelhető áramirányítóval (pl. tirisztoros hiddal) egyenirányítják (6.45. ábra), és az így kapott hullámos egyenfeszültséget kapcsolják az armatúrakörre. A beavatkozás a gyújtásszög vezérlésével történik. A szaggatott vezetés elkerülése érdekében az armatúrakörbe sorosan simító fojtótekercset iktathatunk be (lásd ezzel kapcsolatban a 3.12.2. pontot).

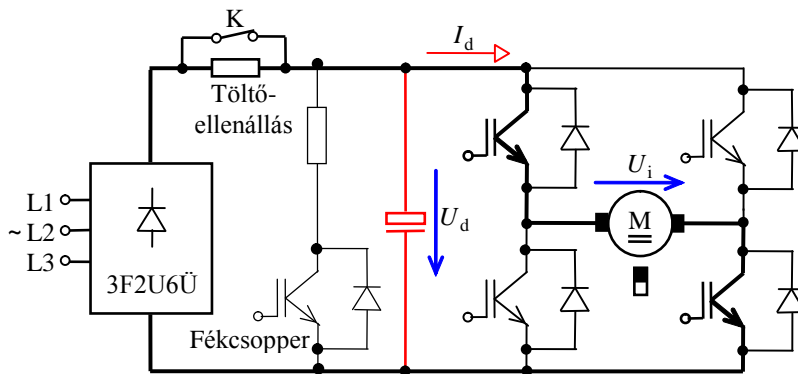
Négynegyedes üzem az áramirányítók szelephatása miatt csak két készlet áramirányítóval (áramirányítók kereszt-, vagy ellenpárhuzamos kapcsolása), az armatúrakör mágneskapcsolókkal történő polaritáscseréjével, vagy a gerjesztőáram megfordításával lehetséges.



6.45. ábra Áramirányítás egyenáramú hajtás

A másik, kisebb teljesítményű- ($1\text{ W}...10\text{ kW}$), ill. szervohajtásoknál alkalmazott megoldás lényege, hogy a hálózati diódás egyenirányító hiddal egy közbensőkori pufferkondenzátort töltünk és a motorra jutó feszültséget szaggató kapcsolással, impulzus-szélesség modulációs (ISZM) módszerrel változtatjuk (6.46. ábra). Az ISZM alapfrekvenciája a jelenleg alkalmazott térvezérlésű- (FET) és szigetelt vezérlőelektródájú bipoláris (IGBT) tranzisztorok esetén $5...20\text{ kHz}$. Az armatúraáram simításához így külön simító fojtótekercs nem szükséges, a táplálás feszültséggenerátoros jellegű. Az alkalmazott hídkapcsolás négynegyedes üzemet biztosít. Fékezéskor a visszarám-diódák

működnek, amelyek megemelik a közbenső egyenáramú kör feszültségét. A fékezési energiát vagy ellenálláson disszipálják, vagy egy másik, hálózati kommutációs áramirányító segítségével visszatáplálják a hálózatba.

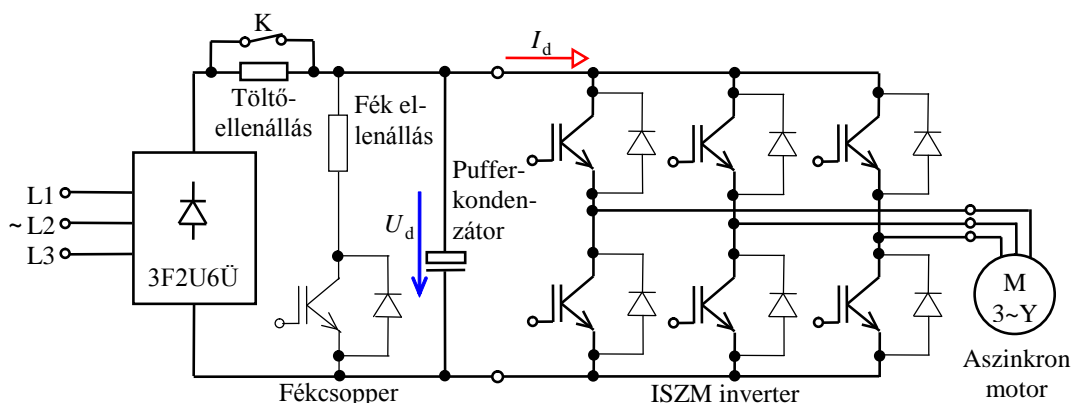


6.46. ábra Szaggatós egyenáramú hajtás (szabályozás ISZM-el)

Aszinkron motorok esetén jelenleg a leggyako-

ribb megoldás ISZM feszültségforrás jellegű frekvenciaváltók alkalmazása. Az ISZM alapfrekvenciája az alkalmazott oltható tirisztoroknál (GTO) 1...2 kHz, a szigetelt vezérlőelektródájú bipoláris (IGBT) tranzisztorok esetén itt is 10...20 kHz. A 6.46. ábrán látható kapcsolásban az ISZM inverter a frekvenciaváltoztatáson kívül a motorra jutó kapocsfeszültség módosítását is megoldja. Az $U(f)$ diagram összetartozó pontjait a szabályozó számítja ki (egyre gyakrabban a mezőorientációs gépmodell és a hozzátartozó összefüggések felhasználásával). Féküzem esetén az áram a visszaramdiódákon keresztül folyik, a gép generátoros üzemben tölti a közbensőköri pufferkondenzátort. Ha a pufferkondenzátor feszültsége meghaladja a hálózat egyenirányított feszültségét, a diódahíd leválik. A 6.47. ábrán felrajzolt megoldásban a hálózat egyenirányított feszültsége és a megnövekedett sínfeszültség közötti feszültségkülönbséget érzékelve működtetik a fékcsoPPER tranzisztort, így a fékezési energia a fékellenálláson disszipálódik. Nagyobb teljesítmények esetén egy további hálózatvezetett inverteren keresztül a fékezett teljesítmény vissza is táplálható a hálózatba.

Szinkron gépek esetén alapvető különbség, hogy az aszinkron gépekhez képest a forgórész is gerjesztett, így az armatúrában indukálódó feszültség felhasználható a kommutáció vezérlésére. Az ilyen természetes kommutációjú gépeket áramirányítós szinkron motoroknak nevezzük, és az 50 kW...15 MW-ig terjedő sávban alkalmazzák őket. Ezeknél némi problémát okoz, hogy álló állapotban (kb. 5 Hz alatt) nincs indukált feszültség, ezért az indítást a hálózati frekvenciáról szinkronizálva oldják meg.



6.47. ábra ISZM frekvenciaváltó

Egészen kis, állandómágneses szinkron gépeknél a kommutációt forgórész pozíció-érzékelőről vezérlik.

✚ **Hajtásszabályozó:** a szabályozott hajtások fordulatszámának és áramának, vagy egyéb szabályozott jellemzőjének időbeli alakulását a hajtásszabályozó áramkörökkel befolyásoljuk. Néhány általánosan alkalmazott szabályozott jellemző: a fordulatszám; a nyomaték; a húzóerő; a leadott(mechanikai) teljesítmény (csévélő hajtások); a nyomás; a folyadéksztint (vízműves alkalmazások), a pozíció stb.

A jelenlegi hajtásszabályozókat mindig ellátják áramszabályozóval és azon belül az áram maximális értékét korlátozó (áramkorlát) körrel. Ennek a szabályozó körnek a kis termikus időállandójú félvezetők védelme érdekében nagyon gyors működésűnek kell lennie: olyan gyorsnak, hogy az áramkorlát lehetőleg előbb csökkentse az áramot, mielőtt a hajtás letiltását (és ezzel üzemkiesést) eredményező félvezető-fedővédelem megszólalna.

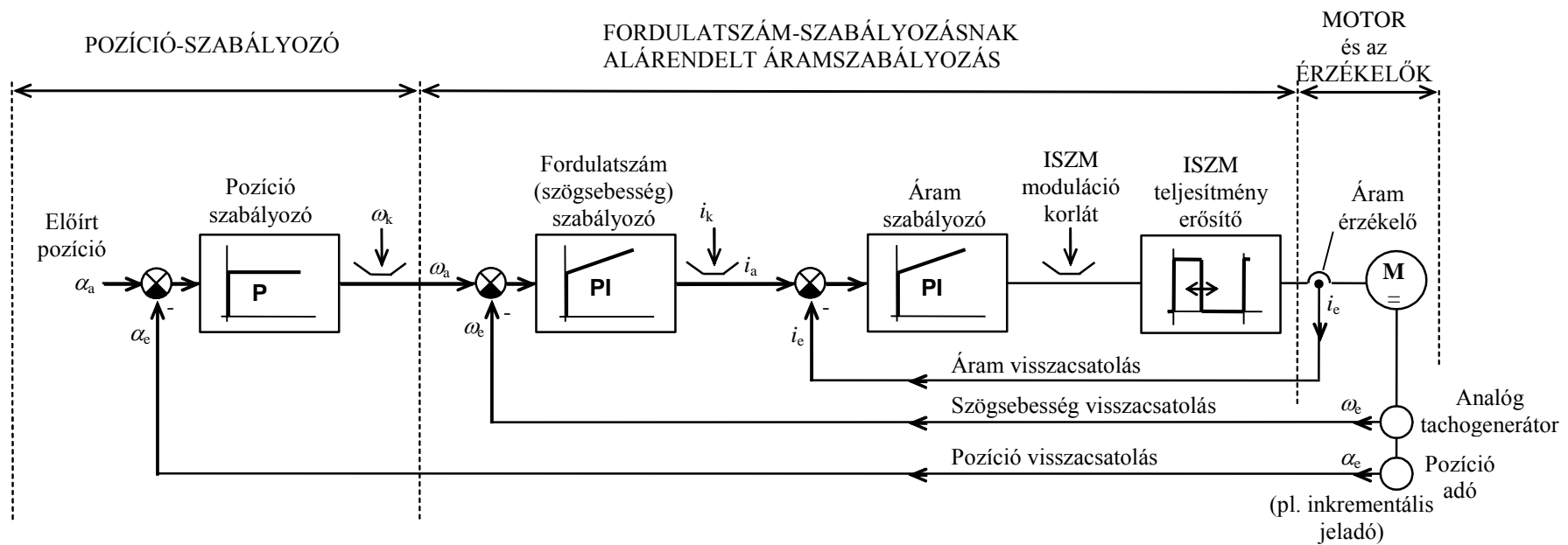
A jelenleg alkalmazott legtöbb szabályozott hajtás ún. *alárendelési elv* alapján készül. Ennek az elvnek az a lényege, hogy a szabályozott rendszer több szabályozó hurokra oszlik, melyeket alárendelnek egymásnak.

A rendszernek több lényeges előnye van: a szabályozott hurkok stabilitása a hurok bemenetén levő szabályozóval viszonylag könnyen biztosítható, maguk a szabályozók azonos és állítható **P** (arányos-), **I** (integráló-) és a zajok kiemelése miatt ritkábban alkalmazott **D** (differenciáló-) elemekből állnak, amelyek könnyen egységesíthetők bármilyen szabályozókra és ezért tipizálhatók [7]. A szabályozó elemek karbantartása egyszerű, és a meghibásodott elemek cseréje sem ütközik akadályokba.

Ezt az általánosan elterjedt, és a (szervo)hajtásokban gyakran alkalmazott szabályozási struktúrát a 6.48. ábrán mutatjuk be. Az alárendelési (kaszkád) elven működő szabályozás mindig tartalmaz egy legbelső áramszabályozó hurkot, amely alá van rendelve (jelen esetben) a fordulatszám-szabályozó huroknak. Amíg a szögsebesség hibajel elég nagy ahhoz, hogy a szögsebesség-szabályozó telítésbe kerüljön, addig az áram alapjel állandó és a maximálisan megengedett értékű (a korlát). A hajtott motor tehát állandó, maximális árammal üzemel pl. indítás, fékezés, terhelésvétel közben, vagyis a változás ideje a lehető legrövidebb lehet. Az így kialakított áramszabályozás előnye más áramkorlátozási eljárásokkal szemben az, hogy a rendszer azonnal, és nagyon érzékenyen reagál a legkisebb árameltérésre is (pl. különböző meghibásodások esetén).

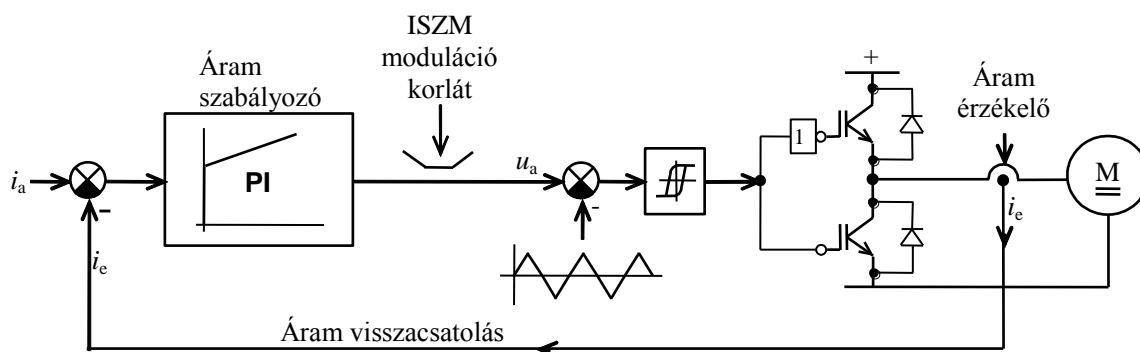
Végül (de nem mindig) a szabályozó tartalmazhat egy pozíciószabályozó hurkot, amelynek a fordulatszám-szabályozó hurok alá van rendelve: a pozíciószabályozó hurok állítja elő a fordulatszám-szabályozó hurok alapjelét. Három szabályozó huroknál többet általában nem használnak.

A szabályozási hurkok közül az áramszabályozó huroknak kell lennie a leggyorsabbnak, ezért jelenleg ezt a hurkot legtöbbször még analóg szabályozókkal oldják meg. A fordulatszám- és a leglassúbb pozíciószabályozási hurkokban már ma is igen nagy számban alkalmaznak mikroszámítógépeket, vagyis digitális úton megvalósított **P** és **I** szabályozókat.



6.48. ábra. Az alárendelési elven működő háromhurkos szabályozó blokkvázlata

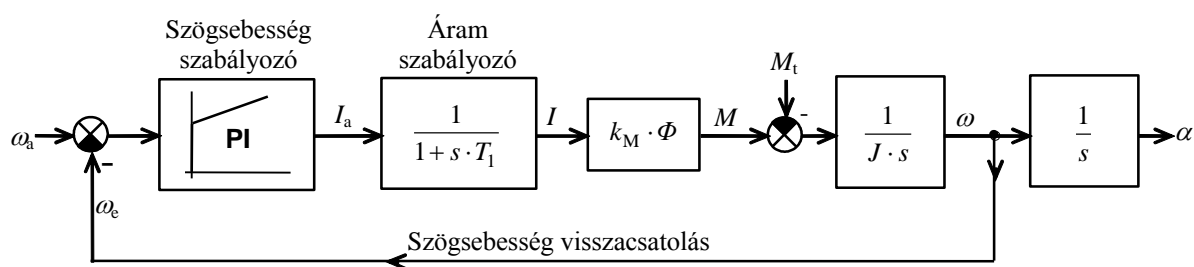
A továbbiakban a szabályozási hurok egy kicsit részletesebb felépítését egyenáramú hajtásokra (a szabályozott villamos gép kompenzált külső gerjesztésű egyenáramú gép, de ezzel teljesen egyenértékű pl. egy elektronikus kommutációjú motor is) mutatjuk be. A 6.49. ábrán egy ISZM szaggatós hajtás áramszabályozó hurokjának felépítését rajzoltuk fel.



6.49. ábra Impulzus-szélesség modulációs áramszabályozó hurok felépítése

Az áramszabályozó jóságának egyik meghatározó eleme az áramérzékelő. Áramérzékelőként nagyon gyakran Hall-szondás érzékelőket használnak (egy áramváltó gerjesztésegyensúlyát egy Hall-szonda segítségével szabályozzák); az érzékelő az egyen komponens mérésétől egészen 10...50 kHz-ig használható. Az érzékelt jelet összehasonlítjuk az áram alapjellel, és a hibajel kerül az áramszabályozó bemenetére. Az áramszabályozó Y_i átviteli függvényét úgy kell megválasztani, hogy minimális legyen a szabályozott i áram és az i_a áramalapjel közötti eltérés.

Ez a szokásos T_v villamos időállandójú motorokat feltételezve olyan **PI** típusú szabályozóval oldható meg, amelynél az integrálási időállandó 1...5 ms (servóhajtásokhoz tartozik a kisebb érték), vagyis a zárt áramszabályozó hurok átviteli függvényének törésponti frekvenciája kb. 1 kHz. Az áramszabályozó kimenete a feszültség-alapjel, amelyet háromszögjellel komparálunk, majd formálunk az ISZM előállításához. A formált jelek a teljesítménytranzisztorok meghajtó és védelmi áramköreinek bemeneti jelei.

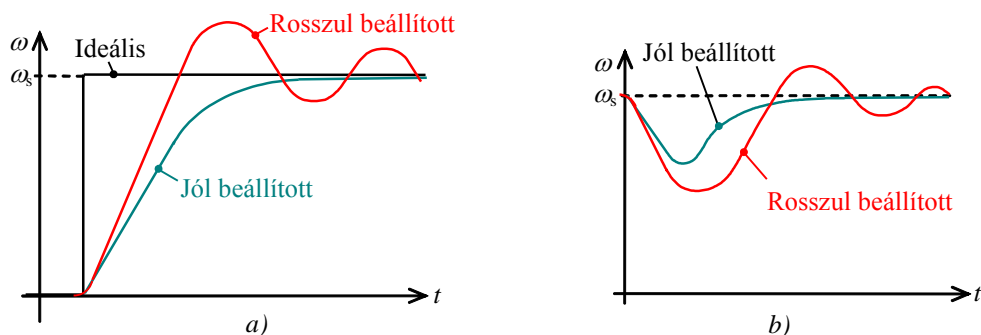


6.50. ábra A fordulatszám(szögsebesség)-szabályozás blokkvázlata

A helyesen beállított áramszabályozó hurok a külső fordulatszám-szabályozó hurok számára egytárolós tagnak számít $T_l = 1...5$ ms időállandóval. A fordulatszám-szabályozás blokkvázlatát a 6.50. ábrán rajzoltuk fel. A fordulatszám-szabályozókban leggyakrabban szintén **PI** típusú szabályozókat alkalmaznak. Az erősítés mértékét és az integrálás meredekségét az alkalmazás igényei határozzák meg. Nagyobb erősítéshez nagyobb sávszélesség és gyorsabb működés tartozik, az integrálási erősítés növelése pedig csökkenti

a szögsebesség-hibát állandósult állapotban. A beállításnál mindenképpen el kell kerülni a lengésekkel történő beállást.

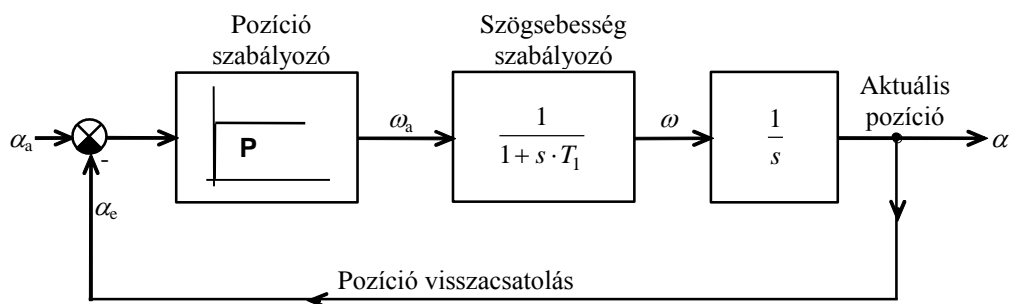
A beállítást fordulatszám alapjel-ugratással (6.51a ábra) és terhelésugratással (6.51b ábra) vizsgálhatjuk, a 6.51. ábra bemutatja a helyesen és a rosszul beállított fordulatszám-szabályozó esetén kapott szögsebesség válaszfüggvényeket.



6.51. ábra Szögsebesség időfüggvények

a) alapjel ugratás; b) terhelés ugratás esetén

A pozíciószabályozás lehet követő, ill. pontról-pontra pozicionálás. A követő szabályozásnál igény, hogy az aktuális pozíció előre megjósolhatóan kövesse az előírtat, és kiküszöbölje a terhelésváltozások hatását. A pontról-pontra pozicionálásnál általában nem előírt az a mód, ahogy a hajtás beáll a kívánt pozícióba, de követelmény a legrövidebb beállási idő, és sebességváltoztatási időfüggvény. A szabályozási módszertől függetlenül a pozíciószabályozási hurok szokásos blokkvázlata a 6.52. ábrán látható. Ebben a fordulatszám-szabályozó hurkot egységnyi erősítésű, egytárolós taggal közelítettük. A pozíciószabályozó általában egyszerű arányos szabályozó, a felnyitott hurok amplitúdó jelleggörbéje 2..3 Hz frekvenciánál metszi a szögsebesség tengelyt.



6.52. ábra A pozíció-szabályozás blokkvázlata




6.6. VILLAMOS FORGÓGÉPEK HŐVÉDELME.

A villamos gépek hővédelme alatt a szigetelt tekercsek védelmét túlterhelés-, vagy hűtés kiesése következtében fellépő hőtúlterheléssel szemben értjük, amely azonban magában foglalja az aszinkron gépek kalickás forgórészének védelmét is, nem terjed ki viszont más géprészek, (pl.: csapágyak hővédelmére. A tekercselések szigetelőanyagának öregedését a hőmérséklet jelentősen befolyásolja, a tapasztalat szerint 10 K hőmérsékletnövekedéssel a villamos szigetelőanyagok élettartama közel felére csökken.




Mivel a motorok káros melegeedésének lehetősége különböző okok miatt mindig fennáll, az elfogadható élettartam, az üzemelési megbízhatóság, a meghibásodás járulékos következményeinek (pl.: termelés kiesés) megelőzése csak megfelelő hővédelem alkalmazásával lehetséges.

A forgógépek meghibásodásának többféle oka lehet, melyeknek egyfajta csoportosítását adja a Westinghouse cég az alábbiak szerint:



Terhelésből származó hibák:

-  mechanikai túlterhelés tartós üzemben,
-  forgórész beragadása indításkor,
-  hosszú gyorsítási idő nagy tehetetlenségű terheléseknél.




Áramforrásból származó hibák:

-  feszültségcsökkenés, feszültség-kimaradás,
-  feszültség aszimmetria,
-  túlfeszültség.



Üzemvitelből származó hibák:

-  nagy kapcsolási gyakoriság,
-  gyors reverzálás.

Környezeti hatásból származó hibák:

-  túl nagy környezeti hőmérséklet,
-  hűtéselem maradás,
-  szennyezések, rezgések.


Vezetékekből származó hibák:

-  csatlakozó meglazulás, vezetékszakadás,
-  vezetékcsatlakozás meghibásodás.

A gépvédelmeknek mindezeket a (még nem is teljes) hibaforrásokat figyelnie kellene. A jelenleg ismert megoldások azonban egy vagy több károsodás kivédésére alkalmasak, tökéletes gépvédelem csak elméletileg lehetséges.

A hővédelem azon hibák ellen nyújt védelmet, ahol a hiba a tekercselés termikus terhelésének változásával jár, azaz a tekercselés túlmelegszik (pl.: névlegesnél nagyobb mechanikai túlterhelés, névlegesnél nagyobb vagy kisebb hálózati feszültség, feszültség aszimmetria, fáziskimaradás, magas környezeti hőmérséklet, hűtéselem maradás).

A hővédelmekkel szemben támasztott alapkövetelmények:

-  Akkor lépjen működésbe, amikor a védett rész hőmérséklete meghaladja a tartósan megengedett határértéket és a megszólalási hőmérséklet kisebb legyen mint a hővédelem megszólalására előírt határhőmérséklet.

- ✚ Ne okozzon felesleges üzemzavart, azaz ne lépjen működésbe olyan esetben, amikor a védett rész hőmérséklete tartósan nem haladja meg a megengedett határhőmérsékletet, akár lassú, akár gyors a hőmérsékletváltozás.
- ✚ A működés független legyen attól, hogy a káros melegedésnek mi volt a kiváltó oka.
- ✚ A védett rész hőmérsékletének a megengedett értékre csökkenése után tegye lehetővé a gép újraindítását és a hővédelem ismét működőképes, legyen.

A hővédelmi rendszerek alapvetően kétféleképpen csoportosíthatók:

Az érzékelés jellege szerint:

- ✚ közvetett érzékelésűek, amelyek a motorban végbement folyamatokat a motor áramával arányos hőmérséklet formájában képezik le (pl. áramrelék, ikerfémes hőrelék, áramjeladóról működtetett elektronikus készülékek),
- ✚ közvetlen érzékelésűek, amelyek a védett géprész hőmérsékletét érzékelik (pl. termisztoros, beépített bimetallos kapcsolók stb.).

Felépítésük szerint:

- ✚ elektromechanikus,
- ✚ elektronikus.

6.6.1. Közvetett áramérzékelésen alapuló védelmek

6.6.1.1. Olvadó biztosítók

Az olvadó biztosítók jelleggörbéjük alapján nem tudják megfelelően ellátni a forgógépek hővédelmét, csak zárlatvédelem céljára alkalmasak.

6.6.1.2. Bimetallos hővédelmi relék

A bimetallos túlterhelésvédelmi relék a legelterjedtebben alkalmazott motorvédelmi eszközök. A termobimetallok jellemzője, hogy kihajlásuk jelleggörbéje a motorok melegedési jelleggörbéjéhez hasonló. A bimetallos hőrelében a két különböző hőtágulási együtthatójú összehegesztett fémalkatrész deformációja-, kihajlása-, vagy elfordulása adja a motorárammal arányos jelet. A kihajlott bimetallos lemezek háromfázisú esetben közös kioldószerkezetre hatnak, amely a védelem működtetését megvalósítja. A jelenlegi, új konstrukciók már fáziskimaradásra is érzékenyek, valamint hőkompenzáló elemet tartalmaznak, amely a környezeti hőmérséklet kioldásra gyakorolt hatását is figyelembe veszi.

A termikus túlterhelés védelmi relék előnyei:

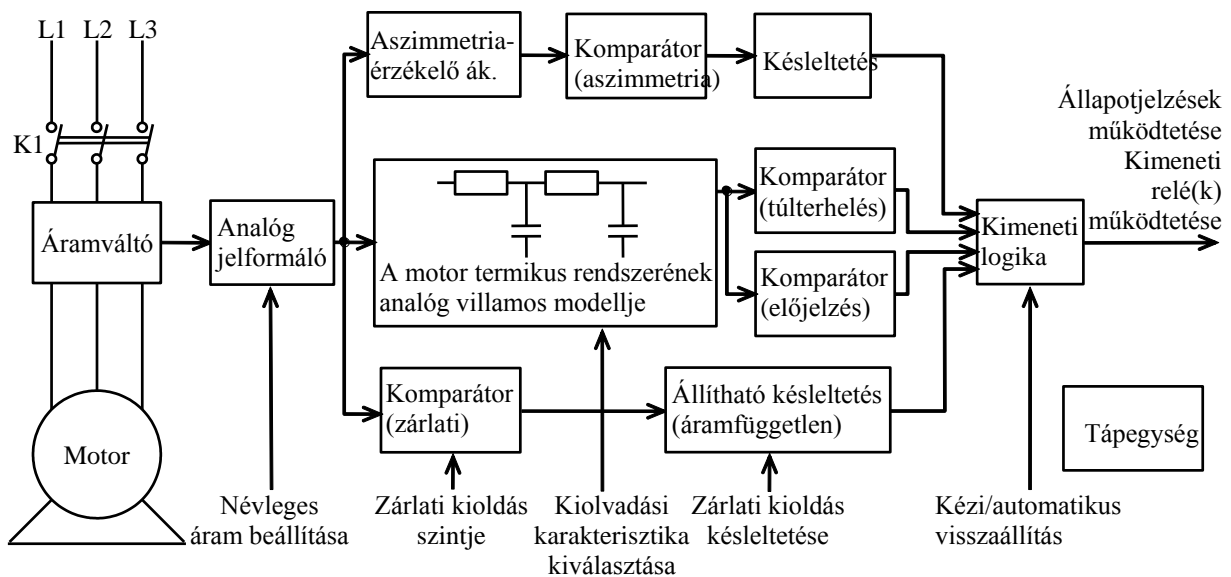
- ✚ három fázisnál minden vezetékekben ellenőrzi az áramot,
- ✚ árambeállító skála segítségével a védelem illeszthető az adott motor névleges áramához,
- ✚ jó védelmet nyújt tartós túlterhelések esetén,

- üzemszerűen fellépő, rövididejű túláramok nem vezetnek kioldáshoz,
- egy fázis kimaradása esetén megfelelő védelmet nyújt,
- széles környezeti hőmérséklet-tartományban (-25 0C-tól +55 0C-ig) működik,
- kedvező ár,
- felszerelése, üzemeltetése, cseréje nem igényel különösebb szakértelmet.

Hátrányként jelentkezik, hogy a hőrelé egy időállandós rendszerként viszonylag pontatlanul közelíti a gépek több időállandós összetett rendszerét.

6.6.1.3. Elektronikus hőmás modell

A félvezetős technika fejlődése lehetőséget nyújt olyan hőmás modellek kialakítására, amelyek a termikusan viszonylag jól követik a védett gép termikus viszonyait. Így az áram és a környezeti hőmérséklet érzékelésével igen jól lehet szimulálni a tekercselés hőmérsékletét. A hőáramhálózatos modellnek ellenállásokból, kondenzátorokból és áramgenerátorokból álló analóg villamos hálózat feleltethető meg, a kritikus hőmérsékletet a hálózat valamely pontján mérhető feszültséggel reprezentálhatjuk. Az analóg modell legalább két időállandós, ahol az egyik hőkapacitás a vastestnek, a másik a rézgombolyításnak felel meg. A fejlődés további foka, hogy az elektronikus védőrelé már analóg szimulációs hálózatot sem tartalmaz, de a hálózat leíró egyenleteit egy mikroprocesszor folyamatosan oldja meg, ami valós idejű digitális szimulációt jelent. A járulékos védelmi funkciókat (pl.: fázis-kimaradást, stb.) be lehet építeni a programba. Az analóg motorvédő szimulátor blokkvázlatát a 6.53. ábrán láthatjuk.



6.53. ábra Analóg motorvédő szimulátor blokkvázlata

6.6.2. Közvetlen hőérzékelésű, beépített hőérzékelővel működő hővédelmi rendszerek

A leghatásosabb hővédelem akkor érhető el, ha közvetlenül a védendő géprész hőmérsékletét hőérzékelő beépítésével érzékeljük, és ez közvetve, vagy közvetlenül beavatkozik a gép működtetésébe, mielőtt még a megengedett határhőmérséklet kialakulna. A hővé-

delem céljára beépített hőérzékelőknek általában meghatározott működési hőmérsékletük van, ezt beépítés után nem lehet megváltoztatni. A beépített hővédelmi rendszerekre vonatkozó követelmények szabványban (MSZ EN60034-11) vannak rögzítve.

Az érzékelőket a villamos gép állórész tekercselésének hosszmenti hőmérséklet-eloszlásának megfelelően a horonyban, vagy a tekercsfejnél lehet elhelyezni. A hőérzékelő kiválasztásánál figyelembe kell venni annak hőtehetetlenségét, valamint azt, hogy a beépítési helynél a villamos szigetelés miatt a hőérzékelésben (különösen gyors melegedésnél) hőmérséklet lemaradás tapasztalható. Ennek mértéke az ún. csatolási időállandó értékétől és a tekercs melegedési sebességétől függ.

A csatolási időállandó szempontjából kis tömegük miatt a termisztoros hőérzékelők a legkedvezőbbek. A termisztorok nagy ellenállású, nem lineáris hőmérsékleti tényezőjű, félvezető, kerámia ellenállások. Megkülönböztetünk:

- NTK termisztor: az egész működési tartományon belül monoton csökkenő az ellenállása, vagyis nagy negatív hőmérsékleti tényező jellemzi.

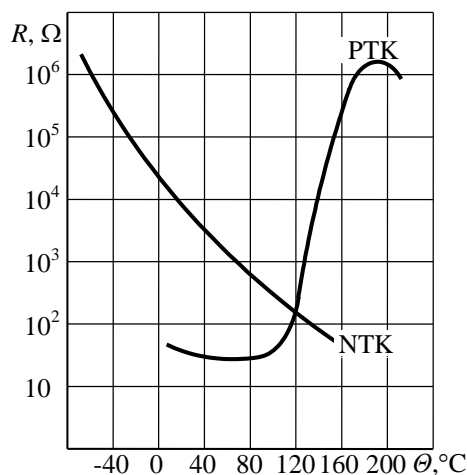
- PTK termisztor: az ellenállásuk a működési hőmérsékleti tartományuk jellegzetes korlátozott szakaszán erősen növekedő jellegű, ebben a hőmérsékleti tartományban az ellenállás hőmérsékleti tényezője nagy pozitív érték, ezen a hőmérsékleti tartományon kívül az ellenállásnak kis negatív hőmérsékleti tényezője van.

A termisztorok ellenállásának változását a hőmérséklet függvényében a 6.54. ábrán láthatjuk.

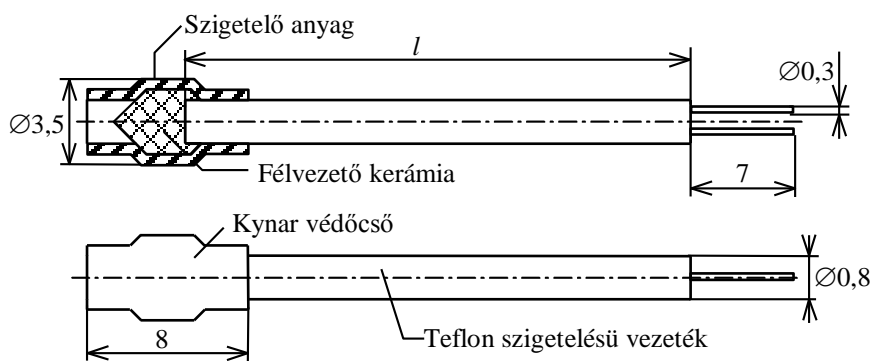
A villamos gépek esetén általában a pozitív hőfok-karakterisztikájú félvezető érzékelőket használják, amelyek ellenállása a működési hőmérséklet elérésekor több nagyságrenddel megnő, és ez a változás

a hőérzékelő körhöz csatlakozó készülékben egy kapcsolási műveletet eredményez. A motorvédelemhez kifejlesztett PTM termisztorok névleges működési hőmérséklete 10 °C-os lépcsőkben változik 70...170 °C között. Az érzékelési időállandó néhány másodperc, ami nagyteljesítményű gépek túlmelegedés elleni védelmére is alkalmassá teszi. Az érzékelővel működtetett áramkörök tervezésénél figyelembe kell venni, hogy az érzékelő kis méretei miatt kicsi a disszipációs tényező, ezért az önmelegedés elkerülésére kis mérőfeszültséget (2...3 V) kell alkalmazni. A 6.55. ábrán bemutatunk egy miniatűr motorvédő termisztor kialakítást. A termisztorokat csak erősítővel együtt működtethetjük.

Olyan esetekben, amikor a tekercsszigetelés vastagsága a hőcsatolást jelentősen lerontja (és emiatt a gyors melegedésnél a hőmérséklet lemaradás megnő), akkor ennek kompenzálására olyan hőérzékelő szondát kell kialakítani, amelynél a termisztor mellé egy kis fűtőellenállás is be van építve, amelyet a motor főáramkörébe kötött áramváltóról táplálnak.



6.54. ábra Termisztorok ellenállásának változása

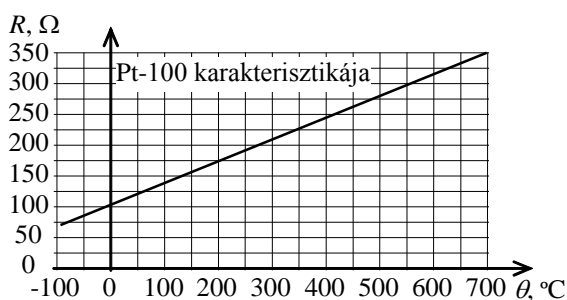


6.55. ábra PTM-M típusú motorvédő termisztor.

Hővédelem céljára alkalmasak még az ún. mikrobimetáll kapcsolók is, melyeknek tömege és így csatlakozási időállandója nagyobb, mint a termisztoroké. Emiatt gyors melegeedés esetén csak korlátozott védelmet nyújtanak.

A hőmérséklet elmaradás kompenzációjára ennél a megoldásnál is szokták alkalmazni a beépített fűtőellenállást.

Nagyfeszültségű gépeknél gyakran alkalmazzák a horonyba beépített ellenállás hőérzékelőt. Általában Pt-100-as jelű platina huzalból készült érzékelőt használnak, amelynek ellenállása a hőmérséklettel arányosan nő. A 6.56. ábrán láthatjuk a Pt-100-as ellenállás hőérzékelő jelleggörbáját a hőmérséklet függvényében



6.56. ábra A Pt-100-as érzékelő jelleggörbéje

Az állórész tekercselésbe beépített hőérzékelők a forgórészre vonatkozóan csak közvetett hővédelmet jelentenek. Állórészkritikus gépek esetén ez a védelem megfelelő lehet a forgórészre is, forgórészkritikus gépeknél azonban ez a védelem (különösen gyors melegeedéseknél) nem nyújt kielégítő védelmet. A forgórész közvetlen hővédelmének egyik megoldása lehet a hőérzékelőnek a

forgórész tekercselésbe történő beépítése, ilyenkor a hőérzékelő jelét induktív úton juttatják el a hővédő készülékhez.

Kalickás forgórészű gépeknél ismeretes még a hősugárzás érzékelővel ellátott hővédelmi rendszer.

A hővédelmi rendszerek hatásossága általában a beszerzési árukkal arányban van, ezért a kiválasztásnál döntő szempont a védett gép értéke és a termelésből való kiesés következménye is. Nagy értékű gépek esetén a hőmérsékletet érzékelik és ellenőrzik a gép hornyaiban, a tekercsfejekben minden fázisban, valamint mérik a csapágyak és a hűtőközeg be- és kimeneti hőmérsékletét is.

6.7. VILLAMOS GÉPEK ÜZEMELTETÉSE SZÁMPÉLDÁK

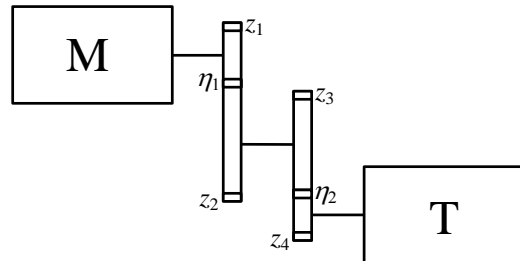
6.7.1 Számpélda. A 6.57. ábrán látható elrendezés szerint a hajtómotor kétfokozatú fogaskerékes hajtóművön keresztül hajtja a terhelőgépet.

A terhelés adatai:

$J_T=3,24 \text{ kgm}^2$, $M_T=98 \text{ Nm}$, $n_T=325 \text{ 1/min}$. A közlőmű fogaskerekeinek fogszáma $z_1=16$, $z_2=42$, $z_3=21$, $z_4=36$, a közbenső tengely tehetetlenségi nyomatéka $J_k=0,3 \text{ kgm}^2$, az áttételek hatásfoka $\eta_1 = \eta_2 = 90 \%$. A terhelést állandó dinamikai nyomaték mellett ($M_d = \text{áll.}$) $t_i=7 \text{ s}$ alatt kell indítani.

Határozzuk meg:

- A motor tengelyére redukált forgató és tehetetlenségi nyomatékok;
- A motor nyomatékát és teljesítményét;
- Az indításhoz szükséges nyomatékok, teljesítményt, és rajzoljuk fel változásukat az idő függvényében.



6.57. ábra. Fogaskerekes hajtómű

Megoldás:

- a) A redukáláshoz ismernünk kell az áttételeket és azok négyzetét:

$$i_1 = \frac{z_2}{z_1} = \frac{42}{16} = 2,63 \quad \text{és} \quad i_1^2 = 6,89,$$

$$i_2 = \frac{z_4}{z_3} = \frac{36}{21} = 1,71 \quad \text{és} \quad i_2^2 = 2,94.$$

A redukált nyomaték amikor a motor hajt:

$$M_{TR}^{\uparrow} = \frac{M_T}{i_1 \cdot i_2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{98}{2,63 \cdot 1,71 \cdot 0,9^2} = 26,9 \text{ Nm}.$$

A redukált tehetetlenségi nyomaték:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_k}{i_1^2 \cdot \eta_1} + \frac{J_T}{i_1^2 \cdot i_2^2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2} = \frac{0,3}{6,89 \cdot 0,9} + \frac{3,24}{6,89 \cdot 2,94 \cdot 0,9^2} = 0,25 \text{ kgm}^2.$$

- b) Állandósult állapotban a motor nyomatéka $M_M^{\uparrow} = M_{TR}^{\uparrow} = 26,9 \text{ Nm}$; fordulatszáma:

$$n_M = i_1 \cdot i_2 \cdot n_T = 2,63 \cdot 1,71 \cdot 325 \cong 1462 \text{ 1/min}.$$

A teljesítmény:
$$P_M^{\uparrow} = \frac{M_M^{\uparrow} \cdot n_M}{9550} = \frac{26,9 \cdot 1462}{9550} = 4,12 \text{ kW}.$$

Egy négyfólusú aszinkron motort választva, amelynek teljesítménye $P_n=5,5 \text{ kW}$ és fordulatszáma 1465 1/min a feladat megoldható. A névleges nyomaték:

$$M_n = \frac{P_n}{n_n} \cdot 9550 = \frac{5,5}{1465} \cdot 9550 = 35,8 \text{ Nm}.$$

Katalógus alapján a forgórész tehetetlenségi nyomatéka $J_M = 0,8 \text{ kgm}^2$.

c) Az indításnál a dinamikai nyomaték:

$$M_d^\uparrow = M_{Mi}^\uparrow - M_{TR}^\uparrow = J_\Sigma \cdot \frac{\Delta\omega_M}{\Delta t_i},$$

ahol $\omega_M = n_M/9,55 = 1465/9,55 = 153,4 \text{ r/s}$ és

$$J_\Sigma = J_M + J_R^\uparrow = 0,8 + 0,25 = 1,05 \text{ kgm}^2 = 1,05 \text{ Ws}^3.$$

Így a dinamikai nyomaték:

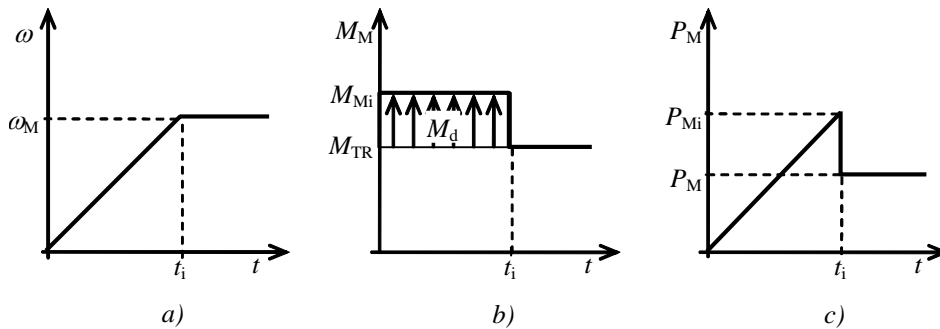
$$M_d^\uparrow = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_M}{t_i} = \frac{1,05 \cdot 153,4}{7} = 23 \text{ Nm}.$$

Indítás alatt a motor nyomatéka:

$$M_{Mi}^\uparrow = M_d^\uparrow + M_{TR}^\uparrow = 23 + 26,9 \cong 50 \text{ Nm}.$$

A legnagyobb motorteljesítmény:

$$P_{Mi}^\uparrow = \frac{M_{Mi}^\uparrow \cdot n_M}{9550} = \frac{50 \cdot 1465}{9550} = 7,67 \text{ kW}.$$



6.58. ábra A motor szögsebessége-, nyomatéka- és teljesítménye az indítás alatt

A motor szögsebességének, nyomatékának és teljesítményének változását az indítás alatt a 6.58. ábra mutatja.

6.7.2 Számpélda. Egy emelőmű vázlatos elrendezése látható az 6.59. ábrán. A motor csigahajtáson keresztül forgatja a kötéldobot.

A csigahajtás és a terhelés adatai: a csiga bekezdéseinek száma $b=2$, a csigakerék fogszáma $z=36$, a hatásfok $\eta = 70 \%$, a kötél Dob átmérője $D=250 \text{ mm}$, a deformációs tényező $\mu = 0,1$, a csigakerék és a dob együttes tehetetlenségi nyomatéka $J_D=3,2 \text{ kgm}^2$ az emelendő ill. süllyesztendő súly $G=5 \text{ kN}$, a sebességek $v_e=0,7$ ill. $v_s=0,4 \text{ m/s}$.

Határozzuk meg:

- a) A hajtómotor tengelyére redukált forgató és tehetetlenségi nyomatékokat emelés ill. süllyesztés esetén.

- b) Az egyenértékű nyomatékokat a motornál ha az emelőmű S3 üzemtípusban dolgozik, ahol a viszonylagos bekapcsolási idők $bi_e=40\%$ és $bi_s=50\%$, a hűtési redukciós tényező álló állapotban $\alpha_k = 0,3$; a ciklusidő $T_c=50$ s.

Megoldás

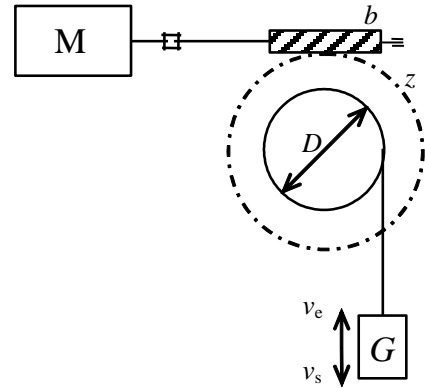
a) A csigahajtás áttétele: $i = \frac{z}{b} = \frac{36}{2} = 18,$

amelynek négyzete: $i^2=324$.

A dob szögsebessége emelés ill. süllyesztés esetén

$$\omega_{De} = \frac{v_e}{R_D} = \frac{0,7}{0,125} = 5,6 \text{ r/s}, \text{ illetve}$$

$$\omega_{Ds} = \frac{v_s}{R_D} = \frac{0,4}{0,125} = 3,2 \text{ r/s}.$$



6.59. ábra Csigahajtásos emelőmű

A motor szögsebességei és fordulatszámjai:

$$\omega_M^{\uparrow} = i \cdot \omega_{De} = 18 \cdot 5,6 = 100,8 \text{ r/s};$$

és $n_M^{\uparrow} = \omega_M^{\uparrow} \cdot 9,55 = 100,8 \cdot 9,55 = 963 \text{ 1/min};$

illetve $\omega_M^{\downarrow} = i \cdot \omega_{Ds} = 18 \cdot 3,2 = 57,6 \text{ r/s};$

és $n_M^{\downarrow} = \omega_M^{\downarrow} \cdot 9,55 = 57,6 \cdot 9,55 = 550 \text{ 1/min}.$

A redukált sugár és négyzete:

$$\rho = \frac{v_e}{\omega_M^{\uparrow}} = \frac{v_s}{\omega_M^{\downarrow}} = \frac{R_D}{i} = \frac{0,125}{18} = 0,00694 \text{ m} \quad \text{és} \quad \rho^2 = 0,482 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2.$$

A redukált nyomaték emelésnél ill. süllyesztésnél:

$$M_{TR}^{\uparrow} = G \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu)}{\eta} = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,00694 \cdot \frac{(1+0,1)}{0,7} = 54,5 \text{ Nm}, \text{ és}$$

$$M_{TR}^{\downarrow} = G \cdot \rho \cdot \frac{\eta}{(1+\mu)} = 5 \cdot 10^3 \cdot 0,00694 \cdot \frac{0,7}{1,1} \cong 22,1 \text{ Nm}.$$

A redukált tehetetlenségi nyomatékok:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_D}{i^2 \cdot \eta} + m \cdot \rho^2 \cdot \frac{(1+\mu)}{\eta} = \frac{3,2}{324 \cdot 0,7} + \frac{5 \cdot 10^3}{9,81} \cdot 0,482 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{1,1}{0,7},$$

$$J_R^{\uparrow} = 0,014 + 0,039 = 0,053 \text{ kgm}^2.$$

és $J_R^{\downarrow} = \frac{J_D}{i^2} \cdot \eta + m \cdot \rho^2 \cdot \frac{\eta}{(1+\mu)} = \frac{3,2}{324} \cdot 0,7 + \frac{5 \cdot 10^3}{9,81} \cdot 0,482 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,7}{1,1},$

$$J_R^{\downarrow} = 0,007 + 0,016 = 0,023 \text{ kgm}^2.$$

- b) Az S3 üzemtípusnál most jelöljük t_b -vel az állandó terhelésű szakaszt, t_k -val az üzemszünet idejét, így a ciklusidő $T_c = t_b + t_k$.

Emelésnél a viszonylagos bekapcsolási idő:

$$bi = \frac{t_b}{t_b + t_k} = \frac{t_b}{T_c} = 0,4, \quad \text{ahol} \quad T_c = 50 \text{ s.}$$

Innen: $t_b = 0,4 \cdot 50 = 20 \text{ s},$ illetve $t_k = 30 \text{ s}.$

A hűtési redukciós tényező miatt a redukált ciklusidő

$$T'_c = t_b + \alpha_k \cdot t_k = 20 + 0,3 \cdot 30 = 29 \text{ s},$$

így az egyenértékű nyomaték:

$$M_e^\uparrow = \sqrt{\frac{(M_{TR}^\uparrow)^2 \cdot t_b}{T'_c}} = \sqrt{\frac{54,5^2 \cdot 20}{29}} \cong 45,3 \text{ Nm}.$$

Süllyesztésnél a viszonylagos bekapcsolási idő:

$$bi = \frac{t_b}{50} = 0,5 \quad \text{innen} \quad t_b = 25 \text{ sec} \quad \text{és} \quad t_k = 25 \text{ s}.$$

A redukált ciklusidő: $T'_c = t_b + \alpha_k \cdot t_k = 25 + 0,3 \cdot 25 = 32,5 \text{ s}.$

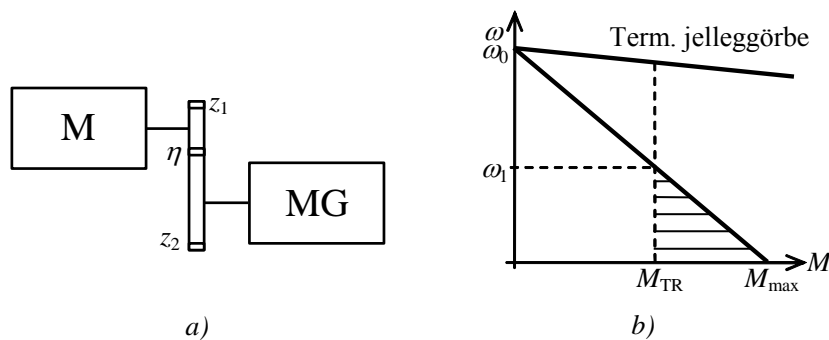
Az egyenértékű nyomaték:

$$M_e^\downarrow = \sqrt{\frac{(M_{TR}^\downarrow)^2 \cdot t_b}{T'_c}} = \sqrt{\frac{22,1^2 \cdot 25}{32,5}} \cong 19,4 \text{ Nm}.$$

Tehát a motor kiválasztásánál az emelés egyenértékű nyomatékát és fordulatszámát kell figyelembe venni.

6.6.3. Számpélda. Az 6.60a ábrán látható elrendezés szerint egyfokozatú fogaskerék áttételen hajtja a motor a terhelést. A hajtógép csúszógyűrűs aszinkron motor a következő adatokkal:

$P_n = 17 \text{ kW}$, $2p = 4$, $J_M = 0,3 \text{ Ws}^3$, $n_n = 1450 \text{ 1/min}$. A terhelés adatai: $M_T = 200 \text{ Nm} = \text{áll.}$, $J_T = 2,5 \text{ Ws}^3$. Az áttételnél $z_1 = 17$, $z_2 = 40$, a hatásfok $\eta = 92 \%$.



6.60. ábra Egyfokozatú fogaskerék áttételen keresztül hajtott terhelés

Határozzuk meg:

- A névleges indítási időállandót.
- Ellenállással történő indítás esetén az első fokozat elektromechanikai időállandóját, indítási idejét, és azt szögsebességet, melyre az első fokozatnál a rendszer felgyorsul, ha a maximális nyomaték $M_{\max} = 1,4 M_n$.

Megoldás:

a) A motor névleges nyomatéka és szögsebessége:

$$M_n = \frac{P_n}{n_n} \cdot 9550 = \frac{17}{1450} \cdot 9550 = 112 \text{ Nm} = 112 \text{ Ws},$$

$$\omega_n = \frac{n_n}{9,55} = \frac{1450}{9,55} = 151,8 \text{ r/s}.$$

A névleges indítási időállandó:

$$T_{\text{in}} = \frac{J_M \cdot \omega_n}{M_n} = \frac{0,3 \cdot 151,8}{112} = 0,407 \text{ s}.$$

b) Gyorsításnál az egész rendszer tehetetlenségi nyomatékát ismernünk kell, a redukált tehetetlenségi nyomaték, ha $i = z_2 / z_1 = 40 / 17 = 2,36$:

$$J_R^{\uparrow} = \frac{J_T}{i^2 \cdot \eta} = \frac{2,5}{2,36^2 \cdot 0,92} = 0,49 \text{ Ws}^3,$$

azaz: $J_{\Sigma} = J_M + J_R^{\uparrow} = 0,3 + 0,49 = 0,79 \text{ Ws}^3.$

A motor ideális üresjárási fordulatszáma:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ 1/min} \quad \text{és} \quad \omega_0 = \frac{n_0}{9,55} = \frac{1500}{9,55} = 157,1 \text{ r/s}.$$

Az első fokozat jelleggörbáját az $\omega - M$ koordináta rendszerben lineárisnak feltételezve az egyenes egyenlete ha $M_{\max} = 1,4 \cdot 112 = 156,8 \text{ Nm}$ (lásd 6.60b ábrát):

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_0}{M_{\max}} \cdot M = 157,1 - \frac{157,1}{156,8} \cdot M \cong 157,1 - M$$

Az ω_1 szögsebesség az első fokozat jelleggörbájének és a redukált nyomatéknak a metszéspontjánál alakul ki. A redukált nyomaték:

$$M_{\text{TR}}^{\uparrow} = \frac{M_T}{i \cdot \eta} = \frac{200}{2,36 \cdot 0,92} = 92,1 \text{ Nm}.$$

Így $\omega_1 = 157,1 - 92,1 = 65 \text{ r/s}.$

Az elektromechanikai időállandó lineáris dinamikai nyomatéknál, ahol:

$$M_{d0} = M_{\max} - M_{\text{TR}}^{\uparrow} = 156,8 - 92,1 = 64,7 \text{ Nm},$$

$$T_m = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_1}{M_{d0}} = 0,79 \cdot \frac{65}{64,7} = 0,79 \text{ s}.$$

Az első fokozathoz tartozó indítási idő:

$$t_{i1} \cong 4 \cdot T_m = 4 \cdot 0,79 = 3,16 \text{ s}.$$

6.7.4. Számpélda. Egy aszinkron motor **S1** üzemi névleges adatai: $U_n=3 \times 380 \text{ V}$, $I_n=8,8 \text{ A}$, $P_n=4 \text{ kW}$, $\cos \varphi=0,83$ és $M_b/M_n=2,8$.

Feladat:

Határozzuk meg, hogy mennyi az **S2** üzemi teljesítmény $t_{ü}/T=0,8$ mellett, ha a névleges üzemben az összes veszteség $2/3$ -a a tekercsveszteség és $1/3$ -a a vasveszteség. A vasveszteség redukciós tényezője $k_v=0,5$.

Megoldás:

A felvett teljesítmény:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = 1,73 \cdot 380 \cdot 8,8 \cdot 0,83 = 4807 \text{ W},$$

a veszteség:

$$P_{wn} = P_1 - P_n = 4807 - 4000 = 807 \text{ W}.$$

A tekercsveszteség ill. a vasveszteség:

$$P_{tn} = \frac{2}{3} \cdot P_{wn} = \frac{2}{3} \cdot 807 = 538 \text{ W}, \quad \text{ill.} \quad P_{vn} = \frac{1}{3} \cdot P_{wn} = \frac{1}{3} \cdot 807 = 269 \text{ W}.$$

A rövid idejű és az állandó üzemi mértékadó veszteségek aránya:

$$\sigma = \frac{P'_{wr}}{P'_{wn}} = \frac{1}{1 - e^{-t_u/T}} = \frac{1}{1 - e^{-0,8}} = 1,82,$$

és

$$\xi = \sqrt{\sigma + k_v \cdot (\sigma - 1) \cdot \frac{P_{vn}}{P_{tn}}} = \sqrt{1,82 + 0,5 \cdot (1,82 - 1) \cdot \frac{269}{538}} \cong 1,42$$

Az S2 üzemi teljesítmény:

$$P_{S2} = \xi \cdot P_n = 1,42 \cdot 4,0 = 5,68 \text{ kW}.$$

6.7.5. Számpélda. Egy egyenáramú motor **S5** üzemtípusban a 6.61. ábrán látható nyomatékkal hajtja a terhelést. Az üzemtípus adatai:

$t_i=5 \text{ s}$, $t_s=30 \text{ s}$, $t_f=8 \text{ s}$, $t_k=20 \text{ s}$, a nyomatékok $M_i=100 \text{ Nm}$, $M_s=60 \text{ Nm}$, $M_f=-60 \text{ Nm}$, $M_k=0 \text{ Nm}$, álló állapotban a hűtési redukciós tényező $\alpha_k=0,3$.

Feladat: Határozzuk meg a motor egyenértékű nyomatékát.

Megoldás:

Az indítás és fékezés alatt a hűtési redukciós tényező értéke – mivel nincs külön megadva – az álló és az állandósult szögsebesség közötti átlag legyen:

$$\alpha_i = \alpha_f = \frac{\alpha_k + \alpha_s}{2} = \frac{0,3+1}{2} = 0,65.$$

a) Az egyenértékű nyomaték a bekapcsolási időre vonatkoztatva:

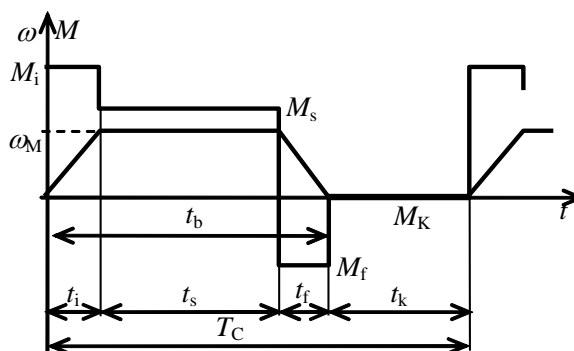
$$M_e(t'_b) = \sqrt{\frac{M_i^2 \cdot t_i + M_s^2 \cdot t_s + M_f^2 \cdot t_f}{\alpha_i \cdot t_i + \alpha_s \cdot t_s + \alpha_f \cdot t_f}} = \sqrt{\frac{100^2 \cdot 5 + 60^2 \cdot 30 + (-60)^2 \cdot 8}{0,65 \cdot 5 + 1 \cdot 30 + 0,65 \cdot 8}} = 69,7 \text{ Nm}.$$

b) A teljes ciklusidőre vonatkoztatott egyenértékű nyomaték esetén csak a nevezőben van eltérés, a redukált ciklusidő:

$$\begin{aligned} T'_c &= \alpha_i \cdot t_i + \alpha_s \cdot t_s + \alpha_f \cdot t_f + \alpha_k \cdot t_k = \\ &= 0,65 \cdot 5 + 1 \cdot 30 + 0,65 \cdot 8 + 0,3 \cdot 20 = \\ &= 44,45 \text{ s} \end{aligned}$$

A nyomaték:

$$M_e(T'_c) = \sqrt{\frac{186800}{44,45}} = 64,8 \text{ Nm}.$$



6.61. ábra S5 típusú terhelés

A két nyomaték között nincs jelentős különbség azzal, hogy csak a bekapcsolási üzemidőre vonatkoztatunk, a biztonságosabb kiválasztásra törekszünk.

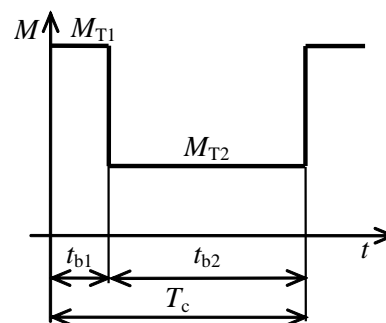
6.7.6. Számpélda. Egy munkagép nyomaték szükséglete S6-os üzemtípus esetén a 6.62. ábrán látható, az ábra jelölése szerinti adatok:

$$M_{T1}=80 \text{ Nm}, M_{T2}=19 \text{ Nm}, t_{b1}=20 \text{ s}, t_{b2}=50 \text{ s}.$$

Feladat:

Határozzuk meg a hajtómotornak választott aszinkron gép kiválasztásához szükséges egyenértékű nyomatékot, a motor billenő/névleges nyomatékviszonya $M_b/M_n=2,0$.

Megoldás:



6.62. ábra Nyomatékigény (S6 üzemtípus)

A motor S6-os üzemben állandóan forog közel névleges fordulatszámmal, ezért $\alpha = 1$ és $T_c = T'_c = t_{b1} + t_{b2} = 20 + 50 = 70 \text{ s}$.

Az egyenértékű nyomaték:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_{T1}^2 \cdot t_{b1} + M_{T2}^2 \cdot t_{b2}}{T_c}} = \sqrt{\frac{80^2 \cdot 20 + 19^2 \cdot 50}{70}} = 45,7 \text{ Nm}.$$

A munkagép legnagyobb nyomatékigénye és az egyenértékű nyomaték aránya:

$$\frac{M_{T1}}{M_e} = \frac{80}{45,7} = 1,75 < 2,0.$$

Tehát a választott aszinkron motor esetén nyomaték szempontjából nincs szükség túlméretezésre.

6.8. ELLENŐRZŐ KÉRDÉSEK ÉS FELADATOK

1. Ismertesse a kialakult hajtástípusokat!
2. Rajzolja fel az ω - M koordináta rendszerben a hajtás negyedeket!
3. Osztályozza a motor- és a terhelőnyomatékokat!
4. Mit jelent az aktív illetve passzív nyomaték?
5. Ismertesse a terhelőnyomatékok redukálási szabályait!
6. Ismertesse a tehetetlenségi nyomatékok redukálási szabályait!
7. Ismertesse a forgó mozgások mozgásegyenletét, hatásvázlatát!
8. Mi az ω - M koordináta rendszerben egy munkapont stabilitásának feltétele?
9. Ismertesse a mozgásegyenlet megoldását $M_d(\omega) = \text{áll.}$ esetén!
10. Definiálja a T_{in} névleges időállandó fogalmát!
11. Ismertesse a mozgásegyenlet megoldását $M_d(\omega) = \text{lin.}$ esetén!
12. Definiálja a T_m elektromechanikai időállandó fogalmát!
13. Ismertesse a mozgásegyenlet megoldását $M_d(\omega) = \text{tetszőleges}$ esetén!
14. Ismertesse a villamos gépeknél előforduló építési alakokat!
15. Mit jelent az IPXY védettség fokozat?
16. Milyen szigetelési osztályokat ismer?
17. Ismertesse a villamos gépek melegedési folyamatát!
18. Ismertesse a villamos gépek hűlési folyamatát!
19. Ismertesse a villamos gépek hűtési lehetőségeit!
20. Milyen üzemtípusokat ismer? Részletezze az S1, S2 a üzemtípusokat!
21. Milyen üzemtípusokat ismer? Részletezze a szakaszos üzemtípusokat (S3, S4, S5)!
22. Milyen üzemtípusokat ismer? Részletezze a folyamatos működésű üzemtípusokat!
23. Ismertesse az állandó üzemű gépek kiválasztási módszereit!
24. Ismertesse a rövid idejű üzemű gépek kiválasztási módszerét!
25. Ismertesse a szakaszos üzemű gépek kiválasztási módszereit!
26. Ismertesse a szabályozott villamos hajtások általános felépítését!
27. Ismertesse az alárendelt áramszabályozóval rendelkező fordulatszám szabályozás felépítését!
28. Ismertesse a szabályozási blokkvázlatokat!
29. Milyen hővédelmeket ismer villamos gépeknél?