

KETTŐS ZSUGORGYŰRŰS KOMMUTÁTOROK ERŐJÁTÉKÁNAK SZÁMÍTÁSA

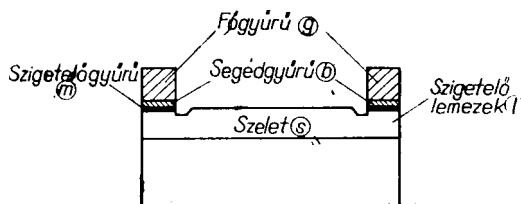
HUSZÁR ISTVÁN
A MŰSZAKI TUDOMÁNYOK KANDIDÁTUSA
GANZ VILLAMOSSÁGI MŰVEK, BUDAPEST

[Béérkezett 1966. június 20-án]

Nagyon igénybevett kommutátor esetén kettős zsugorgyűrűs kialakítást általánosan használnak villamos gépekben. A szilárdsági számítás azonban csak bizonyos közelítéssel lehetséges, az egész rendszert rugalmas elemekből felépített egységnek tekintve. Az erőviszonyokat egydimenziós rugórendszerként lehet meghatározni. A kidolgozott eljárás módot ad a szerkezet konstrukciós számítására. Figyelembe veszi a kommutátor üzemében előforduló összes állapotokat is.

I. Bevezetés

A dupla zsugorgyűrűs kommutátor felépítését az 1. ábra mutatja. A szeletek (s) között mikanit szigetelőlemezek (l) helyezkednek el. A kommutátorkoszorút szigetelőgyűrűn (m) felülő segédgyűrűk (b) fogják össze, illetve a megfelelő szorító erőt az egész rendszerre a főgyűrűk (g) fejtik ki [1].



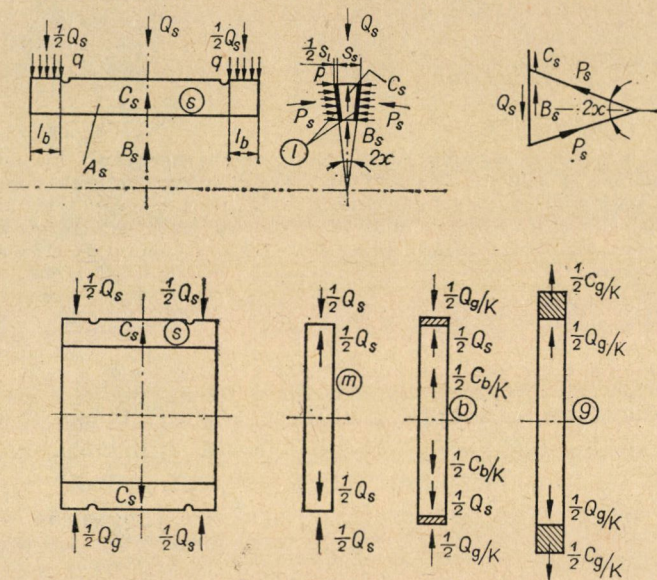
1. ábra

Két lépésben történik a kommutátor összeszerelése. Először a segédgyűrűt húzzák fel melegen; így a lehűlt zsugorgyűrű bizonyos előfeszítést hoz létre. Majd a segédgyűrű külső felületét megmunkálva a főgyűrűt helyezik rá ugyancsak meleg állapotban. Ez utóbbi a lehülés után a kommutátorrendszert zsugorkötés formájában szilárd mechanikai egységgé fogja össze.

A kommutátort a mechanikai számítás szempontjából hosszában is, keresztmetszetében is szimmetrikusnak tekintjük. Ezenkívül az agy hatásától eltekintünk, feltételezve, hogy mind radiálisan, mind hosszirányban a kommutátorkoszorú megtámasztása ideális, azaz nem befolyásolja a koszorú erőjátékát [2].

II. Erőviszonyok az ideális kommutátorban

Az erők szempontjából is szimmetrikusnak tekintjük a szerkezetet. Feltételezzük a szorítógyűrűk egyenletes felfekvését a koszorúra; az egyes szeletek közti boltozatnyomás eloszlását homogénnek vesszük. Az előbbieket értelmében a 2. ábra tünteti fel az egyes elemekre ható erőket.



2. ábra

Egyetlen szeletre — hozzászámítva a két oldalon levő szigetelőlemezek felét is — hat a szigetelőgyűrű helyén átadódó radiális, az egész kerületen egyenletesen megoszlóan vett q erőrendszer, melynek eredőjét Q_s -sel jelöltük:

$$Q_s = 2 l_b (s_s + s_l) q. \quad (1)$$

Másrészt az oldalfelületeken (A_s) támad a p egyenletesen megoszlóan vett boltozatnyomás P_s eredővel:

$$P_s = A_s p. \quad (2)$$

Végül a forgáskor számítani kell a hosszirányban egyenletesen megoszló centrifugális erővel, melynek eredője egyetlen szeletre C_s . Az egész szelet egyensúlyát kifejező vektorábrából felírhatjuk:

$$Q_s - C_s = 2 P_s \sin \chi = B_s, \quad (3)$$

ahol B_s erőt boltozaterőnek nevezünk, mint a p boltozatnyomásból származó eredőt.

Az egész szeletkoszorú erőjátékát szintén ábránk szemlélteti. A külső terhelés most az egyes szeletekre működő sugárirányú Q_s erők rendszere, mely önmagában egyensúlyi erőrendszer. Célszerű bevezetni numerikus összegüket

$$Q = \sum K Q_s \quad (4)$$

formában, ahol K a szeletek számát jelenti. Hasonló egyensúlyi rendszert alkotnak a C_s centrifugális erők is, melyek algebrai összege

$$C = \sum K C_s \quad (5)$$

Ha bevezetjük a boltozaterők numerikus összegét

$$B = \sum K B_s \quad (6)$$

képlettel, akkor egyszerű összefüggést írhatunk fel a (3), (4), (5) és (6) alapján:

$$B = Q - C \quad (7)$$

Az ábra feltünteti a szigetelőgyűrű terhelését is. A kis tömegre való tekintettel a centrifugális erőt elhanyagolhatjuk. Mint látjuk, ismét egyszerű egyensúlyi erőrendszerrel állunk szemben.

A segédgyűrűre hatnak egyrészt a szigetelőgyűrűn át $1/2 Q_s$ radiális erők szeletenként, másrészt a főgyűrűvel való érintkezés helyén q_g egyenletesen megoszló nyomás, amelynek numerikus összege egy gyűrűre $1/2 Q_g$. Számítása történhet az (1) és (4) kifejezés értelmében

$$Q_g = K \sum 2 l_b (s_s + s_i) q_g \quad (8)$$

Végül a centrifugális erők megoszló rendszere, melynek algebrai összege az egész gyűrűre nézve $1/2 C_b$. Mindhárom erőrendszer önmagában egyensúlyi rendszert alkot. Ábránkon az egy szeletre eső erőket tüntettük fel, azaz.

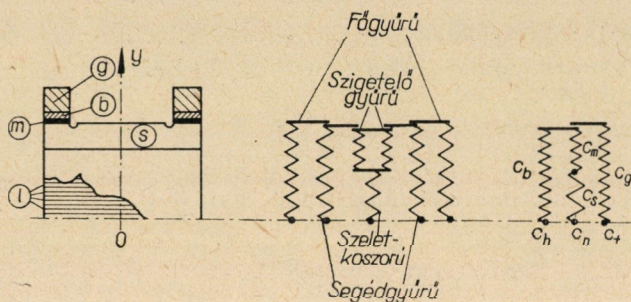
$$\frac{1}{K} \cdot \frac{Q_g}{2} \quad \text{és} \quad \frac{1}{K} \cdot \frac{C_b}{2}$$

értékeket.

Hasonlóan a főgyűrű terhelése a q_g megoszló terhelésből $1/2 Q_g$ és a centrifugális erőből $1/2 C_g$ numerikus erőt adó, különben egyensúlyban levő egyenletesen megoszló erőrendszerek.

III. Helyettesítő rúgórendszer

Statikailag határozatlannak számít a kommutátorrendszer, amelynek megoldását a deformációk figyelembevételével tudjuk előállítani. Ezért célszerű a könnyebb áttekintés miatt is bevezetni olyan egyenértékű rugórendszert, amely éppen a deformációk és az erők szempontjából egyenértékű az eredeti kommutátorrendszerrel.



3. ábra

Mivel a deformációk sugárirányúak és teljes körszimmetriával számolhatunk, lehet egydimenziós rugórendszerrel helyettesíteni a kommutátort úgy, hogy az origót a szerkezet középpontjában választjuk meg. Az egyenértékűség fennáll akkor, ha bármely alkatrész sugárirányú $-y$ irányú deformációja megegyezik az eredeti, illetve a helyettesítő rendszerben azonos körülmények között. Válasszuk vonatkoztatási alapnak a Q terhelést, azaz a segédgyűrűk és a szeletkoszorú között fellépő erőt. Akkor a fentiek szerint csak azt kell megkövetelni, hogy

$$y = c Q \quad (9)$$

kifejezés szerint számított deformációban a c rugóállandó az eredeti terhelésnek megfelelő pozitív állandó legyen. Ezt úgy érjük el, hogy az eredeti terhelésnek megfelelő deformációt kiszámítjuk és a képlet szerinti alakra hozzuk, amely egyúttal a rugóállandó meghatározásának alapja.

A 3. ábra feltünteti a kommutátort helyettesítő rugórendszert. A szerelés első fázisának végén a szeletkoszorú (c_s) és a szigetelőgyűrű nyomott, a segédgyűrű húzott rugónak számít. Ennek felel meg a rugóvázat középső része. A szerelés második fázisában felhúzott főgyűrű húzott alkatrész, melyet húzott rugóként a két külső ág szemléltet. Egyszerűsíteni is lehet a rendszert, összekapcsolva az egyes rugókat, azaz parallel rugóként kezelve a szigetelőréteget (c_m), a segédgyűrűket (c_b) és a főgyűrűket (c_g).

IV. Az erőjáték számítása

A kommutátor üzemét tekintve az alábbi körülményekre kell figyelemmel lennünk. A szereléskor az egyes szeleteket a szorítógyűrűkkel szilárd rendszerré alakítják, létrehozva a szükséges szorító erőt a boltozatnyomás formájában. Üzemben az áramterhelés, a kefesúrlódás és az egész gép felmelegedése következtében a kommutátor jelentősen felmelegszik. A szeletek rézanyaga a tőle hő szempontjából is szigetelt agy- és szorítógyűrűkhöz képest lényegesen nagyobb hőmérsékletűvé válik. Könnyű belátni, hogy a felmelegedés kapcsán az erőviszonyok megváltoznak, a boltozatnyomás megnő. Mivel pedig a gép forog, a centrifugális erővel is számolni kell, amely viszont a koszorút lazítani igyekszik, tehát a boltozatnyomást csökkenti. A teljes értékű szilárdsági vizsgálat elvégzésére a fentiek szerint tehát követni kell az álló hideg állapotot, amely a szerelés befejeztével valósul meg; az álló meleg állapotot, amely az üzemben levő gép leállításakor következik be; a forgó hideg állapotot, amely a hidegen induló gépet jellemzi; üzemi állapotot, amely a gép tartós üzemében fordul elő.

1. Álló hideg állapot

Feltételezzük, hogy a szeletkoszorú összefogását megvalósító és csupán a technológia szempontjából szükséges segédgyűrűk méretre megmunkált állapotban állnak rendelkezésre, azaz a szerelés első fázisát lezártnak tekinthetjük. Ezzel az egyszerűsítéssel hidaljuk át azt a nehézséget, amely a szerelés első fázisának egyes lépéseinél az erőviszonyok követését jelenti. Az egyszerűsítést a segédgyűrű alárendelt szerepe (beleértve a további állapotokhoz összehasonlítva csekély erőhatásokat is) teszi lehetővé.

Segédgyűrű szerelése: Ha a kommutátor minden alkatrésze a rugalmas zónában van, akkor a szerelés első fázisának véghelyzetét a 4. ábra szerinti elvi kiindulásból származtathatjuk le, felhasználva a 3. ábrán bemutatott egyszerűsített sémát.

Kiinduláskor a rugórendszer két oldala között

$$Y_{*0} = r_y - r_n \quad (10)$$

méretkülönbség áll fenn. A szerelés első fázisának véghelyzetében a gyűrű és a szeletkoszorú között fellépő Q_{*0} erő hatására áll elő a vázolt egyensúlyi állapot, amelynél az egyes rugóágak deformációja

$$\eta_{*0} = c_h Q_{*0}, \quad \text{ill.} \quad y_{*0} = c_n(Q_{*0}). \quad (11)$$

Az ábra alapján tehát

$$Y_{*0} = \eta_{*0} - y_{*0} = cQ_{*0}, \quad (12)$$

bevezetve a

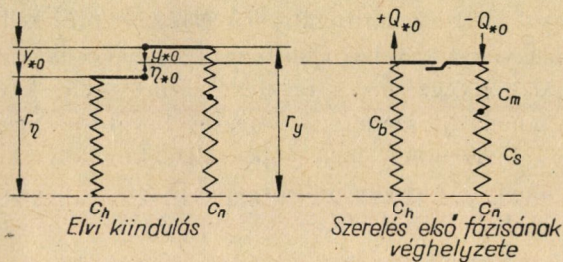
$$c = c_h + c_n \quad (13)$$

jelölést, azaz

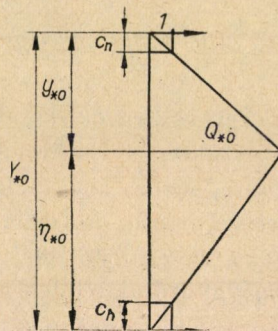
$$Q_{*0} = \frac{1}{c} Y_{*0}. \quad (14)$$

A boltozaterő (7) alapján

$$B_{*0} = Q_{*0}. \quad (15)$$



4. ábra



5. ábra

Az erőviszonyokat grafikusán is szemléltethetjük (5. ábra). Az Y_{*0} távolságra felmérjük a rugóállandókat, azaz az egységnyi erőhöz tartozó elmozdulásokat, majd ezek végében egységnyi távolságra kijelölt pontokon át rajzolunk ferde egyeneseket. A metszéspont jelöli ki a rugórendszer egyensúlyi állapotát, megadva egyúttal Q_{*0} erőt is. Az ábrán levő arányosság alapján azonnal felírható

$$\eta_{*0} = Q_{*0} c_h \quad \text{és} \quad y_{*0} = -Q_{*0} c_n,$$

illetve

$$Y_{*0} = \eta_{*0} - y_{*0} = cQ_{*0},$$

amint ezt a számítás megadta.

*

A segédgyűrű hatására fellépő erőhatásokat a következőképén határozhatjuk meg a szerelés első fázisának végén. Feltételezzük, hogy a segédgyűrűben éppen a folyáshatár lép fel. Ennél nagyobb feszültséggel valóban nem is számíthatunk. Ideálisan rugalmas-képlékeny anyagként véve ugyanis ekkor további terhet nem tud felvenni, hanem képlékenyen deformálódik. Vékony gyűrűként kezelve ebben a határesetben

$$\sigma_F = \frac{d_b q_{*0}}{2 h_b} \quad (16)$$

a 12. ábra jelöléseivel. Ebből viszont a radiálisan fellépő megoszló terhelés

$$q_{*0} = \frac{2 h_b}{d_b} \sigma_F. \quad (17)$$

A megfelelő eredő tehát az (1) alapján egyetlen szeletre

$$Q_{s*0} = 4 \frac{l_b h_b}{d_b} (s_s + s_l) \sigma_F, \quad (18)$$

illetve a (4)-ből az egész szeletkoszorúra

$$Q_{*0} = 4\pi \frac{l_b h_b}{d_b} d_l \sigma_F, \quad (19)$$

ugyanis

$$K(s_s + s_l) = d_l \pi. \quad (20)$$

Ismerve Q_{*0} értékét, meghatározható B_{*0} , másrészt Y_{*0} szerelési fedés és az ennek megfelelő szerelési hőmérséklet.

Főgyűrű szerelése: A viszonyokat egyszerűen tudjuk követni, ha a 6. ábra szerint a szerelés első fázisának véghelyzetéből és a még fel nem húzott főgyűrűből álló elvi kezdeti sémából indulunk ki. Most a két rugó között Y_0 méretkülönbség áll fenn. A szerelés második fázisának végén a két rendszer között fellépő Q_{g_0} erő hatására áll be az egyensúlyi állapot, miközben a rugókon létrejön

$$\eta_0 = c_+ Q_{g_0}, \quad \text{ill.} \quad y_0 = c_-(Q_{g_0}) \quad (21)$$

elmozdulás úgy, hogy

$$Y_0 = \eta_0 - y_0 = c_\Sigma Q_{g_0}, \quad (22)$$

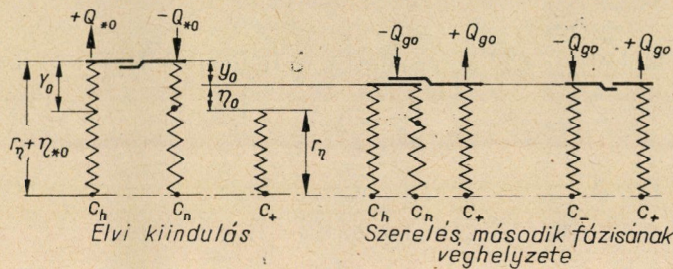
ahol

$$c_\Sigma = c_+ + c_-. \quad (23)$$

Végül is

$$Q_{g0} = \frac{1}{c_{\Sigma}} \cdot Y_0. \quad (24)$$

Külön kell meghatározni c_{-} rugóállandót a (21) összefüggés adta definíció alapján, figyelembe véve, hogy a szeletkoszorú és a segédgyűrű egy előfeszített rendszert alkot a (4), illetve az 5. ábra szerint. Ha erre külső erőként



6. ábra

működik $-Q_{g0}$ terhelés, akkor a Q_{*0} erővel terhelt rugóágak feszítése megváltozik. A húzott részen Q_{b0} -ra csökken az erő, a nyomott részen pedig $Q_{b0} + Q_{g0}$ -ra növekszik.

A 7. ábra szerint ez a három erő valóban egyensúlyi erőrendszert jelent. A rugódiagramba berajzolhatjuk Q_{b0} értékét y_0 méretváltozás segítségével, amellyel egyidejűleg a nyomott szakaszt terhelő erő is kiadódik, azaz $Q_{b0} + Q_{g0}$. Természetesen a szerkesztés történhet közvetlen Q_{g0} alapján is, mégpedig az ábrából leolvasható módon. Feltételeztük egyébként, hogy a segédgyűrű továbbra is húzott marad.

Egyszerű arányosságból kapjuk Q_{b0} értékét az ábrából

$$Q_{b0} = Q_{*0} \frac{\eta_{*0} - |y_0|}{\eta_{*0}}. \quad (25)$$

A Q_{g0} terhelés kapcsán előálló deformáció az ábrából kivehető. Egyszerű arányosságokat írhatunk fel:

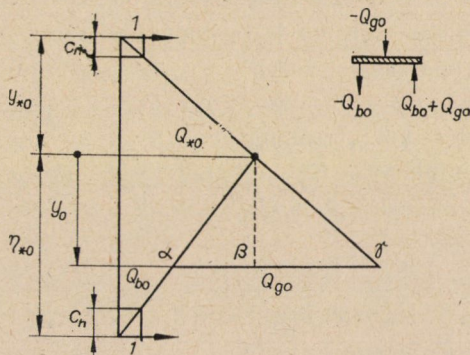
$$|y_0| : \alpha\bar{\beta} = c_h \quad \text{és} \quad |y_0| : \beta\bar{\gamma} = c_n,$$

ahonnan

$$\alpha\bar{\beta} = Q_{g0} = |y_0| \left(\frac{1}{c_n} + \frac{1}{c_h} \right) = \frac{|y_0|}{c_{-}}$$

Ebből viszont, figyelembe véve a (21) összefüggést

$$c_- = \frac{c_h c_n}{c_h + c_n} \quad (26)$$

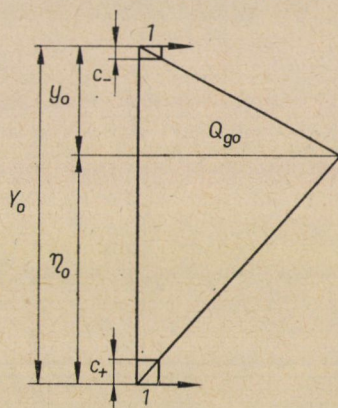


7. ábra

Ismerve a c_- eredő rugóállandót, az egész rendszerre a megfelelő rugódiagramot fel lehet rajzolni (8. ábra). Ez közvetlen szolgáltatója Q_{g0} értékét.

A szerelés végállapotában az egyes elemeket terhelő erők tehát a következők:

- A főgyűrűknél $S_{g0} = Q_{g0}$;
- a segédgyűrűknél $S_{b0} = Q_{b0} < Q_{*0}$;
- a szeletkoszorúnál $Q_0 = (Q_{g0} + Q_{b0}) > Q_{*0}$.



8. ábra

2. Üzemi állapot

Célszerű a kérdést két részletben tárgyalni. Először a segédgyűrű viszonyait tisztázzuk, majd a főgyűrűt is számításba vesszük:

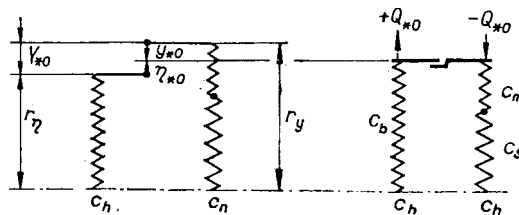
Segédgyűrűvel szerelt kommutátorkoszorú: Ha a koszorút és a segédgyűrűt különválasztva képzeljük el üzemi állapotban, akkor a köztük levő méretkülönbség nem felel meg a szerelési Y_{*0} értéknek, mivel az alkotó elemek felmelegednek üzem közben, másrészt a forgás miatt is deformálódnak. Jelöljük a segédgyűrű melegedés okozta szabad tágulást sugárirányban η'_* -vel, a forgás okozta szabad elmozdulást pedig η''_* -val. Hasonlóan a koszorúra ezek a deformációk y' és y'' (lásd a 9. ábrát). Az így értelmezett méretkülönbség szabad állapotban tehát

$$Y_* = (r_y + y' + y'') - (r_\eta + \eta'_* + \eta''_*). \quad (28)$$

Vagy forma szerint is különválasztva a méretkülönbség egyes komponenseit

$$Y_* = (r_y - r_\eta) + (y' - \eta'_*) + (y'' - \eta''_*) = Y_{*0} + Y_{*\Delta t} + Y_{*c}, \quad (29)$$

ahol Δt a melegedésre, c a forgásra utal.



9. ábra

A különválasztva képzelt rendszert egyesítve a 9. ábra szerinti állapot áll elő, azaz fellép Q_* erő, miközben a két rugóvég elmozdul η_* , illetve y_* értékkel

$$\eta_* = c_h Q_* \quad \text{és} \quad y_* = c_n (-Q_*). \quad (30)$$

Az ábra szerint tehát

$$Y_* = \eta_* - y_* = c Q_*, \quad (31)$$

vagyis

$$Q_* = \frac{1}{c} Y_* . \quad (32)$$

Szétválaszthatjuk az egyes hatásokat, ha bevezetjük a

$$Q_* = Q_{*0} + Q_{*dl} + Q_{*c} \quad (33)$$

jelölést, ahol az egyes tagok a szerelés, a melegedés és a forgás hatását külön-külön vesszük figyelembe, azaz

$$\begin{aligned} y' = 0 = \eta'_* & \quad \text{és} & \quad y'' = 0 = \eta''_* & \quad \text{esetén} & \quad Y_{*0} = cQ_{*0}; \\ r_y - r_\eta = 0 & \quad \text{és} & \quad y'' = 0 = \eta''_* & \quad \text{esetén} & \quad Y_{*dl} = cQ_{*dl}; \\ r_y - r_\eta = 0 & \quad \text{és} & \quad y' = 0 = \eta'_* & \quad \text{esetén} & \quad Y_{*c} = cQ_{*c} . \end{aligned} \quad (34)$$

Természetesen, a boltozaterő a (7) alapján most

$$B_* = Q_* - C . \quad (35)$$

A viszonyokat grafikusán is lehet szemléltetni. Változatlanul érvényesek — értelemszerűen — a szerelésnél mondottak, tehát a szerkesztés az 5. ábrához hasonló. Mindössze az a különbség, hogy a szerelésre jellemző 0 index elmarad.

Főgyűrűvel szerelt kommutátorkoszorú: Kiindulásnak tekinthetjük most a segédgyűrűvel szerelt koszorút forgó-meleg állapotban, valamint a különválasztva képzelt főgyűrűt ugyancsak forgó-meleg állapotban. Ez utóbbi a gyártási r mérettel szemben $r + \eta' + \eta''$ mérettel rendelkezik. A 10. ábra szerint a méretkülönbség Y , amely az ismét egyesítve gondolt rendszernél a fellépő Q_g erő hatására eltűnik, miközben az egyes rugóágak elmozdulnak

$$\eta = c_+ Q_g \quad \text{és} \quad y = c_- (-Q_g) \quad (36)$$

értékkel [lásd a (21) összefüggést], fennáll most is a (22) kifejezéshez hasonlóan

$$Y = \eta - y = c_\Sigma Q_g , \quad (37)$$

$$Q_g = \frac{1}{c_\Sigma} Y . \quad (38)$$

A segédgyűrűket terhelő radiális erő ugyanakkor a 7. ábra szerint — elhagyva a 0 indexeket — Q_b erő, amelyre

$$Q_b = Q_* \frac{\eta_* - |y|}{\eta_*} . \quad (39)$$

A koszorú terhelése viszont

$$Q = Q_g + Q_b. \quad (40)$$

Az egyes hatásokat ismét külön lehet választani a (34) szerint.

A fellépő boltozaterő a (7) szerint

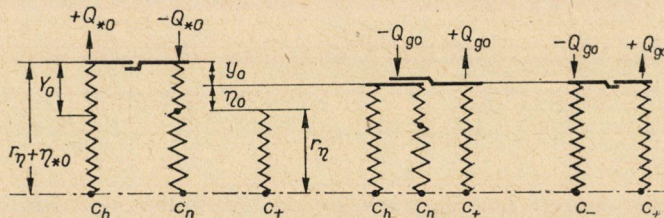
$$B = Q - C. \quad (41)$$

A segédgyűrűket terhelő eredő erő

$$S_b = Q_b + C_b. \quad (42)$$

A főgyűrűk terhelése pedig

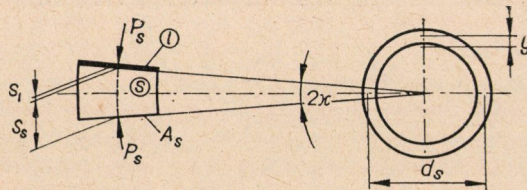
$$S_g = Q_g + C_g. \quad (43)$$



10. ábra

Álló meleg állapot

Az előbbieket szerint járhatunk el, csupán az a különbség, hogy a forgás okozta deformációs tagot el kell hagyni, azaz η'' , y'' , η'' helyébe zérus kerül.



11. ábra

A felmelegedéskor számításba veendő szabad deformációkat az egyes alkatrészek Δt_i hőmérsékletemelkedésével számíthatjuk ki. A szeletkoszorú

tágulása sugárirányban a Δk kerületváltozából

$$y' = \frac{1}{2\pi} \Delta k = \frac{1}{2\pi} K(\alpha_s s_s \Delta t_s + \alpha_l s_l \Delta t_l), \quad (44)$$

felhasználva a 11. ábra jelöléseit.

A segédgyűrű tágulása sugárirányban

$$\eta'_s = \frac{1}{2} \alpha_b d_b \Delta t_b. \quad (45)$$

A főgyűrű tágulása sugárirányban

$$\eta'_l = \frac{1}{2} \alpha_g d_g \Delta t_g. \quad (46)$$

Forgó hideg állapot

Ismét csak az a különbség, hogy a melegedés okozta deformációkat elhagyjuk, azaz η'_s , y' , η'_l helyébe zérust írunk az összefüggéseinkbe.

A forgáskor számítandó centrifugális erők a következők:

A szeletkoszorú esetében

$$\begin{aligned} C &= K \left(\frac{\gamma_s}{g} A_s s_s \right) \frac{d_s}{2} \omega^2 + K \left(\frac{\gamma_l}{g} A_s s_l \right) \frac{d_s}{2} \omega^2 = \\ &= K \frac{A_s}{2g} (\gamma_s s_s + \gamma_l s_l) d_s \omega^2, \end{aligned} \quad (47)$$

ahol γ_s , ill. γ_l a szelet, ill. a szigetelés fajsúlya.

A segédgyűrűk esetében

$$C_b = 2 \left(\frac{\gamma_b}{g} A_b d_b \pi \right) \frac{d_b}{2} \omega^2 = \frac{G_b}{2g} d_b \omega^2. \quad (48)$$

A főgyűrűk esetében

$$C_g = \frac{G_g}{2g} d_g \omega^2, \quad (49)$$

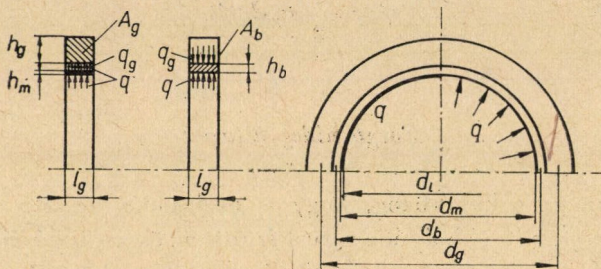
ahol G_b és G_g a két-két gyűrű együttes súlyát jelenti.

A forgáskor számítandó szabad elmozdulások a sugár irányában:

$$\begin{aligned} \text{a szeletkoszorúnál} \quad y'' &= c_s C; \\ \text{a segédgyűrűknél} \quad \eta'' &= c_b C_b; \\ \text{a főgyűrűknél} \quad \eta'' &= c_g C_g. \end{aligned} \quad (50)$$

V. A rugóállandók

Közelítéssel feltételeztük, hogy a szeletek közt ébredő p nyomás egyenletesen megoszló terhelést jelent, akárcsak a gyűrű helyén fellépő q erőrendszer [2].



12. ábra

c_s számítása : a 11. ábra alapján a szeletkoszorú rugóállandója

$$c_s = \frac{K}{4 \pi^2 A_s} \left(\frac{s_s}{E_s} + \frac{s_l}{E_l} \right). \quad (51)$$

c_m számítása : a 12. ábra szerint a két szigetelőgyűrű együttes rugóállandója

$$c_m = \frac{h_m}{2 \pi E_m l_g d_m}. \quad (52)$$

c_g számítása : a 12. ábra szerint a két zsigorgyűrű együttes rugóállandója

$$c_g = \frac{d_g^2}{8 \pi E_g d_m A_g}, \quad (53)$$

ahol A_g egy gyűrű keresztmetszetének területét jelenti.

c_b számítása : az előbbi szerint járhatunk el értelemszerűen, ti. vékony gyűrűként kezeljük a segédgyűrűt. A két segédgyűrű együttes rugóállandója

$$c_b = \frac{d_b^2}{8\pi E_b d_m A_b}, \quad (54)$$

ahol A_b egy gyűrű keresztmetszetét jelenti.

IRODALOM

1. Hütte IV. A., Elektrotechnik. W. Ernst & Sohn, Berlin 1957.
2. HUSZÁR I.: Egyszeres zsugorgyűrűs kommutátorok erőjátékának számítása. *MTA VI. Oszt. Közl.* 39 (1967).