

4. Forgógépek kiegyensúlyozatlansága, kiegyensúlyozása, tengelyeinek szintbeállítási problémái

A gépek meghibásodásával foglalkozó szakemberek statisztikai adatai szerint a forgó gépeknél a tönkremenetel többnyire kopás, illetve a kiegyensúlyozatlanság miatt áll elő. Ezeket a hibaokokat szorosan követi a tengelybeállítás hiányából, vagy a tengelykapcsolók valamely hibájából fakadó üzemzavar.

A gyakorlatban a gépek többnyire láncszerűen, sorban azaz gépcsoportban dolgoznak. Érdeemes tehát kiemelt figyelmet fordítani a szerelésre, a tengelybeállításokra, a kiegyensúlyozásra, mivel a gép helyes beállításába fektetett többletmunka a gép élete folyamán többszörösen megtérül.

Sok helyen előfordult, hogy a kitűnően megtervezett és jó minőségben legyártott gépek azért mentek tönkre, mert a szerelők "nem bajlódtak ilyen mellékes problémákkal." Ezeket a hiba előfordulási okokat elősegítették azok a vezetők, akik nem vallják magukénak azt a szemléletet, hogy 6 órai precíz munka 6 évi hibátlan működést eredményezhet, míg elhanyagolása esetén az egész gép 6 hónap alatt tönkremehet.

4.1. A kiegyensúlyozatlanság

A műszaki életben alternáló, vagy forgómozgást végző gépeknél gyakran fordul elő a kiegyensúlyozatlanság. Ez néha tudatos tervezés követelménye - pl.: rázóasztalok, vibrátorok, légkalapácsok - többnyire azonban spontán fellépő jelenség.

A kiegyensúlyozatlanság okozója lehet:

- anyaghiba
- helytelen csapágyazás
- hődeformáció
- kopás
- korrózió
- szerelési hiba
- tervezési, gyártási hiba.

A kiegyensúlyozatlanság következtében üzem közben olyan nagy nemkívánatos erők és nyomatékok léphetnek fel, amik kifárasztják, rövid időn belül tönkreteszik a berendezéseket. Ezeket az erőket és nyomatékokat tudatos kiegyensúlyozási intézkedésekkel egy elfogadható mérték alá lehet csökkenteni.

A forgó tömegek kiegyensúlyozásával kapcsolatban sokszor hélytelen mérési módszerekkel, próbálgatásokkal kísérik meg a kiegyensúlyozatlanságot javítani. Ez visszavezethető arra, hogy a kiegyensúlyozás elmélete, az alkalmazott matematika nem egyszerű, az eljárások és a kiegyensúlyozó készülékek alkalmazásához felkészült szakemberek szükségesek.

Forgó tömegek esetében a kiegyensúlyozatlanság alapvető oka a forgástengely és a tömeg tehetetlenségi főtengelyének nem megfelelő viszonya.

Egy szilárd test bármely tengely körül megforgatható, ez egy tetszőlegesen kijelölt forgástengely kialakítását tételezi fel. A forgástengely helye a tervezői szándékon, a legyártás és a szerelés pontosságán múlik.

Ha azt kívánjuk, hogy a test kiegyensúlyozottan forogjon e forgástengely körül, akkor a tengely helyzetének ki-választása nem történhet tetszőlegesen.

Minden szilárd testnek meghatározható ugyanis a súlypontja és a súlyponton áthaladó - legalább három - tehetetlenségi főtengely, melyek egymásra kölcsönösen merőlegesek. Ezek a tehetetlenségi főtengelyek azzal a kitüntetett jelentőséggel bírnak, hogy körülöttük megforgatva a testet, sem (*centrifugális*) erők, sem (*deviációs*) nyomatékok nem lépnek fel.

Ha tehát a forgástengely azonos az egyik tehetetlenségi főtengellyel, akkor a forgó tömeg tökéletesen ki van egyensúlyozva.

A súlytalanság állapotában megforgatott testek - műholdak, vagy az űrhajóban elszabadult testek - ahol nincsenek "csapágy kényszererők" - ezen tengelyek körül forognak. Úgy is mondható, hogy a testek a tehetetlenségi főtengelyek körül "szeretnek" forogni.

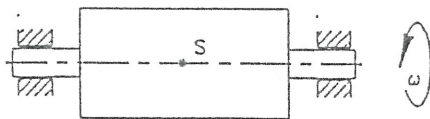
A kiegyensúlyozási műveletek során erre az állapotra kívánják a rendszert beállítani. A testre rákényszerített (megcsapágyazott) forgástengely általában a legcélratoróbb tervezői szándék ellenére sem esik egybe egyik tehetetlenségi főtengellyel sem. Tehát a kiegyensúlyozatlanság jellegét ennek a két tengelynek a kölcsönös viszonya határozza meg.

Kimondható tehát, hogy a tehetetlenségi főtengely a merev, vagy szilárd test immanens (benne rejlő, természetből következő) tulajdonsága, míg a forgástengelyt pedig a géptervezői szándék és a gyártási technológia határozza meg.

Ez a két tengely az alábbi geometriai viszonyban lehet egymással:

- egybeesés,
- párhuzamosság,
- súlyponti metsződés,
- súlyponton kívüli metsződés,
- kitérés.

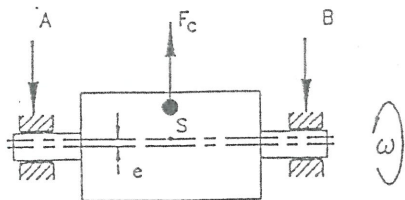
1.) **Egybeesés** (11.ábra) A forgástengely egybeesik valamelyik tehetetlenségi fő-tengellyel. Ez azt is jelenti, hogy átmegy a súlyponton a forgástengely. Ilyenkor a megforgatáskor sem erő, sem nyomaték nem lép fel, így a csapágyaknál sem kényszererők, sem nyomatékok nem jelentkeznek ez az ideális kiegyensúlyozottság esete.



$$F_c = 0; \quad M_D = 0$$

11. ábra
Az ideális kiegyensúlyozottság esete

2.) **Párhuzamosság** (12. ábra) A forgástengely párhuzamos az egyik tehetetlenségi főtengellyel. Ezen értelmezés szerint a két tengely között egy "e" távolság van. Ennek alapján meghatározható az a centrifugális erő, melynek reakcióit lényegében a csapágyak veszik fel.



$$F_c = m e \omega^2 \text{ [N]}$$

ahol: m = a test tömege (kg)
 ω = a forgás szögsebessége (1/s)

12. ábra
Párhuzamosság

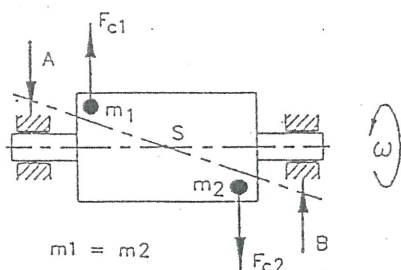
(A statikus kiegyensúlyozatlanság esete)

$$F_A = F_c \cdot \frac{a}{a+b} \text{ (N)} \quad F_B = F_c \cdot \frac{b}{a+b} \text{ (N)}$$

Ezek a reakcióerők fázisban vannak, deviációs nyomaték ilyenkor nem áll elő, $M_D = 0$. Az ilyen forgórész *statikusan kiegyensúlyozatlan*, melyet sokszor - pl: vibrátoroknál, rázópadoknál - szándékosan állítanak elő.

Megszüntetése tömegátrendezéssel - mégpedig egyetlen jól megválasztott helyen történő - tömeghozzáadással vagy elvétellel történhet. A statikus kifejezés jól utal arra is, hogy ezt az eljárást régen nagy lendítőkerekeknél megforgatás nélkül, vízszintes prizmákon végezték mindaddig, amíg a lendkerék bármilyen helyzetben egyensúlyban maradt.

3.) **Súlyponti metsződés** (13. ábra)



$$m_1 = m_2$$

13. ábra
Súlyponti metsződés

A forgástengely a súlypontban metszi az egyik tehetetlenségi főtengelyt, hajlásszögük α . Ebben az esetben ugyan centrifugális erő nem lép fel, a test statikusan kiegyensúlyozott; megforgatás azonban egy deviációs nyomatékot hoz létre, melyet a csapágyakon fellépő erőpár tart egyensúlyban

(A dinamikus kiegyensúlyozatlanság első esete)

A nyomaték nagysága és a csapágyreakciók a következőképpen számíthatók:

$$M_D = (\Theta_z - \Theta_x) \omega^2 \sin \alpha \cos \alpha \text{ (Nm)}$$

ahol: Θ_z = a "z" tengelyre

Θ_x = az "x" tengelyre számított tehetetlenségek (Ns^2m)

α = a két tengely hajlásszöge

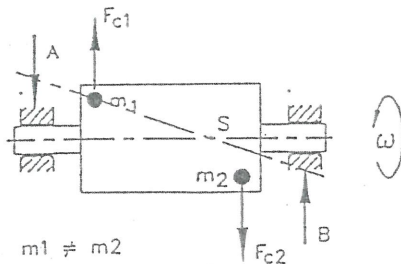
A keletkező körbefogó reakcióerők erőpárt alkotnak, melyek nagysága:

$$F_A = F_B = \frac{M_D}{a+b} \text{ (N)}$$

Ebben az esetben $F_c = 0$, azaz a rendszerben a centrifugális erő nem lép fel.

A kiegyensúlyozatlanság ez esetben forgatás közben áll elő, speciális esetükben "tiszta nyomaték kiegyensúlyozatlanság"-ról van szó. Egyszerűen belátható, hogy itt legalább két síkban - mégpedig lehetőleg minél távolabbi síkban - kell tömegátcsoportosítást végrehajtani. A tömegélvétel, vagy hozzáadás egyenlő mértékben egymással szembenfekvő, tehát 180° -os szöget bezáró helyeken történik.

4.) Súlyponton kívüli metsződés (14. ábra)



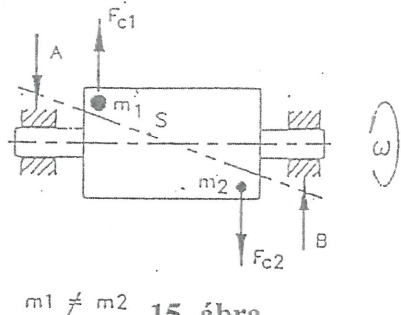
A forgástengely és az egyik tehetetlenségi főtengely egy síkban van, de nem a súlyponton metszik egymást. Ebben az esetben mind az F_C , mind az M_D fellép, kiszámításukra és a reakcióerők meghatározására egyszerű összefüggés nem adható meg. Az ilyen rendszer kvázi statikusan kiegyensúlyozatlan.

14. ábra

A kvázi-statikusan kiegyensúlyozatlan forgórész

(A dinamikus kiegyensúlyozatlanság második esete)

5.) Kitérés (15. ábra)



15. ábra
Kitérés

Ebben a helyzetben a forgástengely és a tehetetlenségi főtengely kitérő, ez a legáltalánosabb eset. Ezekben az esetekben tulajdonképpen egyszerre van jelen párhuzamossági, illetve szögeltérés. Így a csapágyakon megjelenő kényszererők már nem lesznek egy síkban és nem is lesznek egyforma nagyságok.

(A dinamikus kiegyensúlyozatlanság harmadik esete)

A kiegyensúlyozás ezeknél is legalább két síkban történhet, a hozzáadott, vagy elvett tömegek nagysága azonban nem lesz egyenlő és nem is szembenfekvő helyeken kell a kiegyensúlyozást elvégezni. Az ilyen rendszer dinamikus kiegyensúlyozatlan. Az erők, a nyomatékok és a reakcióerők meghatározására ennél a rendszerénél sem állnak rendelkezésre egyszerű összefüggések. A kiegyensúlyozás az erre a célra kiterjesztett ún. kiegyensúlyozó gépekkel és eljárásokkal történik.

Összefoglalva:

Az első eset tökéletes kiegyensúlyozást, a második eset a statikusan kiegyensúlyozatlanságot mutatja, melynél a kiegyensúlyozás módszere is statikus lehet.

A harmadik, negyedik és az ötödik esetekben a tengelyek eltérését csak a dinamikus kiegyensúlyozás szüntetheti meg.

5. A kiegyensúlyozás

A kiegyensúlyozás olyan eljárás, ahol a forgó test tömeg eloszlását változtatják meg oly módon, hogy ezzel a csapágyakat terhelő periodikusan erőket a legkisebb értékre szorítják.

A kiegyensúlyozás két részfeladatból áll:

- a kiegyensúlyozatlanság mérése
- a kiegyensúlyozatlanság megszüntetése.

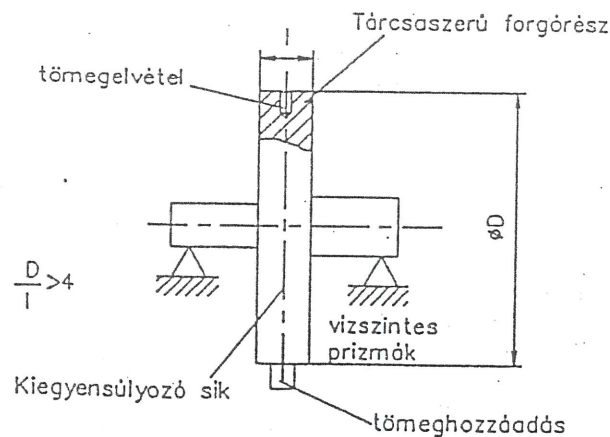
Kétféle kiegyensúlyozási mód lehetséges:

- statikus kiegyensúlyozás
- dinamikus kiegyensúlyozás.

5.1. A statikus kiegyensúlyozás

Mint ahogy arra az elnevezés is utal, ezt a műveletet általában nyugalmi helyzetben, statikus körülmények között lehet elvégezni. A tárcsaszzerű forgórészek tengelyét vízszintes prizmára helyezve a kiegyensúlyozást addig folytatják, míg a tárcsa bármilyen helyzetben nyugalomba hozható.

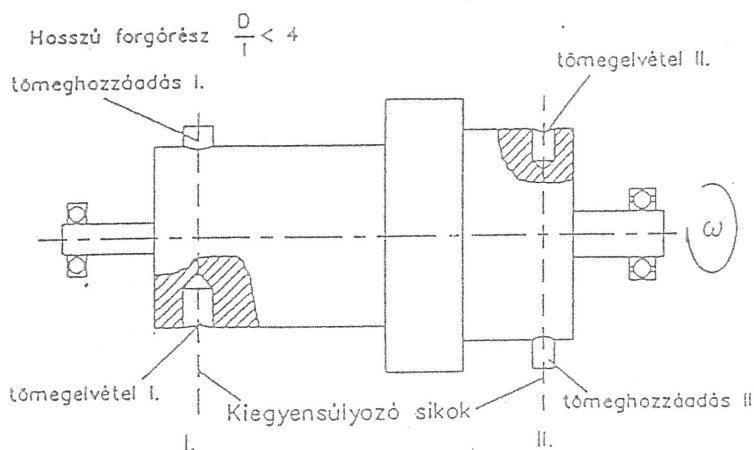
A kiegyensúlyozás történhet tömeg elvételével és tömeg hozzáadásával. A cél az, hogy a megváltoztatott tömegeloszlású tárcsa tehetetlenségi főtengelye egybe essen a forgástengellyel. A tömeg elvétel, vagy hozzáadás egyetlen kiegyensúlyozó síkban megoldható.



16. ábra
Statikus kiegyensúlyozás

5.2. A dinamikus kiegyensúlyozás

Ebben az esetben a kiegyensúlyozatlan forgórészt kiegyensúlyozó gépen kell megforgatni, és majd kell a kiegyensúlyozás helyeit és mértékét meghatározni. Ilyenkor a forgórészhez legalább két különböző kiegyensúlyozó síkban kell hozzányúlni, minél távolabb esnek ezek a síkok, annál kisebb tömeg elvételével, vagy hozzáadásával lehet a megfelelő kiegyensúlyozást elérni.



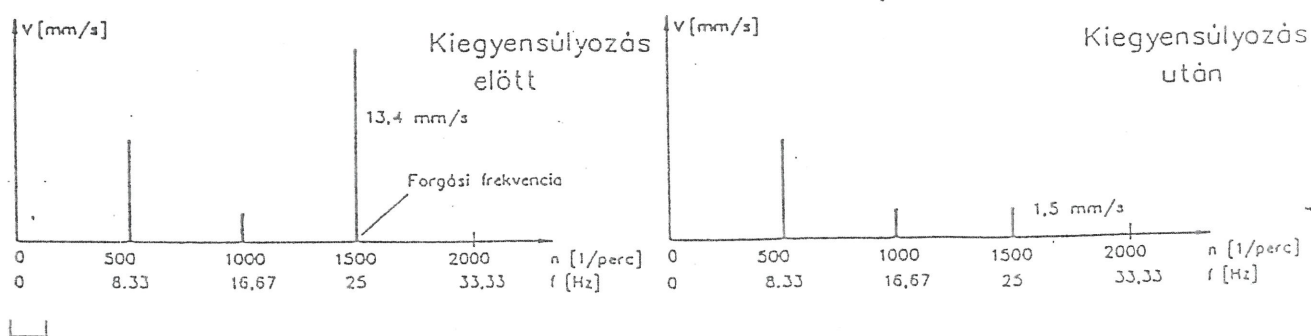
A kiegyensúlyozó gépek kivitele sokféle lehet, a legközismertebb ezek közül a gépkocsi kerekek kiegyensúlyozására szolgáló berendezés. A gépkocsi keréknél a felni két pereme biztosítja a kiegyensúlyozó síkokat - ez egyben a legnagyobb távolságot adó lehetőség - itt a kiegyensúlyozást vesealakú ólom súlyokkal, tehát tömeg hozzáadásával oldják meg.

17. ábra
Dinamikus kiegyensúlyozás végrehajtása

5.3. Kiegyensúlyozás rezgésméréssel

A statikus és dinamikus kiegyensúlyozatlanságból származó erők és nyomatékok, a forgó test csapágyainál körbenforgó erőhatásokat keltenek. Ennek következtében a csapágyaknál elvégzett rezgésmérés - a forgási frekvenciának megfelelő helyen - kiegyensúlyozatlanság jelenlétére utaló rezgéseket mutat ki. Ha a rezgések a két csapágyon fázisban vannak - azaz a reakcióerők egyirányúak - akkor a kiegyensúlyozatlanság statikus, ha a rezgések fázisa eltérő, akkor III., IV. vagy V. kiegyensúlyozatlansági esettel állunk szemben.

A fáziseltérés 180° -os értéke nyomaték- kiegyensúlyozatlanságra utal. A rezgések tágassága a reakcióerők nagysága mellett a rendszer merevségétől is függ - egy rendszeren belül azonban a rezgésamplitudó mértékéből jól lehet következtetni a kiegyensúlyozatlanság nagyságára.



18. ábra
A kiegyensúlyozás eredményének kimutatása rezgésanalízis segítségével

A 18. ábra egy ventilátor csapágyrezgéseinek analizisét mutatja kiegyensúlyozás előtt és után. Jól látható, hogy az üzemi fordulatszámnak megfelelő frekvenciánál jelentkező rezgésösszetevő amplitúdója a kiegyensúlyozással jelentősen csökken.

A rezgésmérés azonban nem csupán a kiegyensúlyozatlanság jelenlétének és mértékének kimutatására alkalmas, hanem segítségével a kiegyensúlyozás is elvégezhető.

Egy forgó tömeg kiegyensúlyozatlanságát jól jellemzi az alábbi összefüggés:

$$U = q r \quad [\text{kg m}] \text{ vagy } [\text{g mm}]$$

ahol: q : a kiegyensúlyozatlanságot okozó tömeg

r : a kiegyensúlyozatlanságot okozó tömeg távolsága a forgástengelytől

U : az abszolút kiegyensúlyozatlanság.

A fajlagos kiegyensúlyozatlanság:

$$e = \frac{U}{m}$$

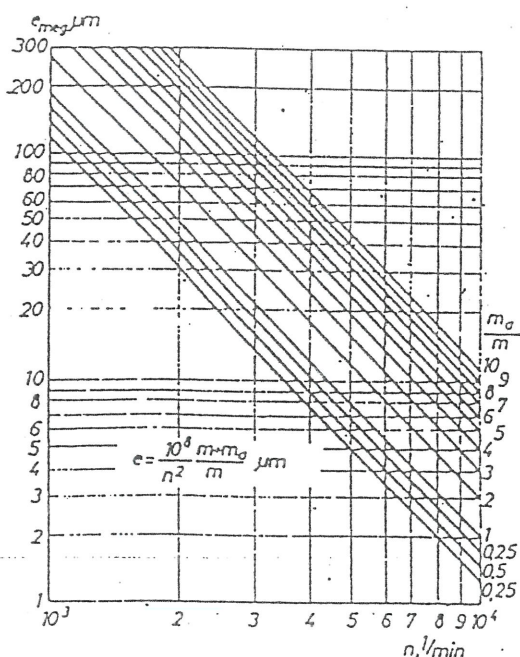
ahol: m : a forgó tömeg nagysága

e : a súlypont távolsága a forgástengelytől.

Különböző tömegű és eltérő fordulatszámú forgórészek kiegyensúlyozatlanságának összehasonlítására a tömegközéppont sebességét szokták megadni.

$$v_e = e \omega \quad [\text{m/s}] \quad v_e = e \cdot \omega$$

Egy forgó tömeg tökéletesen sohasem egyensúlyozható ki. A megengedhető maradó kiegyensúlyozatlanságra nézve különböző ajánlások, táblázatok és diagramok léteznek, lásd. pl. az általános gépgyártásra érvényes nomogramot a 19. ábrán. A megengedhető maradó kiegyensúlyozatlanság kiszámítására alkalmas az alábbi összefüggés:



$$e_{\text{mcg}} = \frac{10^8}{n^2} \frac{m + m_a}{m} \left[\mu\text{m} \right]$$

ahol: n : a forgórész fordulatszáma [f/p]

m : a forgórész tömege [kg]

m_a : az állórész tömege [kg]

Ebben az esetben $e < e_{\text{mcg}}$ -nél a gép gyorsulás rezgésének amplitúdója kisebb, mint 1 m/s. Ha egy gépnél $e > e_{\text{mcg}}$ valamilyen kiegyensúlyozási intézkedésre feltétlenül szükség van. Egy ilyen lehetséges módszer az ún. "Hárompontos közelítő" módszer, mely egy egyszerű rezgésmérő segítségével határozza meg a kiegyensúlyozó tömeg helyét és nagyságát.

19. ábra

Megengedhető kiegyensúlyozatlanság a gépészetben