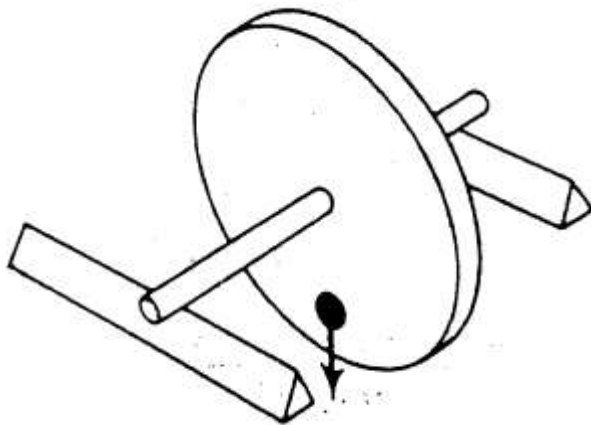


## Jafnvægisstilling

Massaójafnvægi (óbalans) er það kallað þegar massi öxuls eða hjóls sem snýst er ójafnt dreifður um snúningsásinn. Til að leiðrétta fyrir ójafnri dreifingu massans er framkvæmd aðgerð sem kallast jafnvægisstilling. Hún felst í því að bæta við, eða taka burt massa með það að markmiði að hjámiðjukraftar verði hverfandi. Jafnvægisstilling er orðinn mikilvægur þáttur við uppsetningu vélhluta því að með auknum snúningshraða og léttari vélum er meiri hætt á að hjámiðjukraftar valdi óþægindum og skaða. Talið er að um 60 - 80% af öllum vélabilunum eigi rætur sínar að rekja til ójafnvægis eða skekkju að einhverju leiti. Í jafnvægisstillingu er annars vegar talað um statískt ójafnvægi og hins vegar dynamískt eða hreyfifræðileg.

### Statískt ójafnvægi

Statískt ójafnvægi er það þegar hjámiðjan er í einu plani, en þá er hægt að greina hana með því að skoða hjólið í kyrrstöðu. Ef hjólinu sem er á mynd 1 er snúið frjálst leitar hjámiðjan alltaf niður vegna þyngdarkraftisins. Þetta er yfirleitt í þunnum hjólum því þegar hjólið hefur þykkt getur ójafnvægið verið eftir ásstefnu þrátt fyrir að hjólið sé í statisku jafnvægi eins og sést á mynd 2.



Mynd 1 Hjól í statisku ójafnvægi.

Ef við setjum massann  $m$  í fjarlægð  $r$  frá ásmiðju á þunnu hjóli sem er í jafnvægi og hefur massann  $M$  er hjólið í statisku ójafnvægi. Krafturinn frá massanum  $m$  leitast við að snúa hjólinu og ef ekkert snúningsvægi verkar á hjólið snýr krafturinn massanum niður. Ef hjólinu er snúið með hornhraðanum  $\omega$  verður hjámiðjukrafturinn vegna massans,

$$F = m r \omega^2$$

Á þessu sést að krafturinn eykst með auknum snúningshraða og því er auðveldara að greina statískt ójafnvægi í ás sem snýst með titringsmælingum. Ef hjámiðjan eða færslan á massamiðjunni er táknuð með  $e$ , er hægt að setja fram jöfnuna fyrir hjámiðjukraftinn á forminu,

$$F = M e \omega^2$$

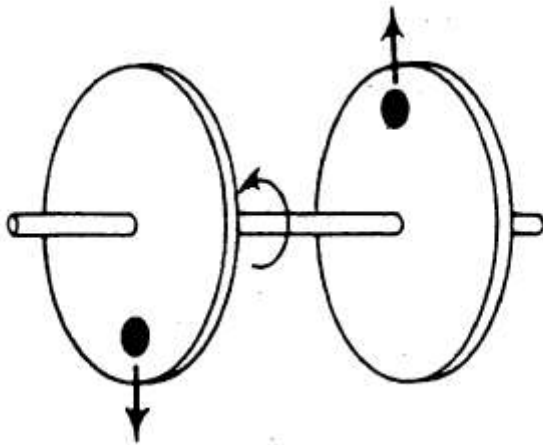
og hjámiðjuradís er skilgreindur með jöfnunni,

$$e = m r / M$$

Þegar talað er um disk eða þunnt hjól er átt við að hlutfallið á milli þvermáls og þykktar sé innan við 1/10 þ.e. að þykktin sé minna en einn tíundi af þvermálinu.

### Hreyfifræðilegt ójafnvægi

Hjólið á mynd 2 er í statísku jafnvægi, en þegar það snýst valda kraftarnir vægi sem myndar titring. Ef báðir hjámiðjukraftarnir á myndinni eru jafnvægisstilltir er hjólið í hreyfifræðilegu eða dynamísku jafnvægi. Hjól sem er í dynamísku jafnvægi er alltaf í statísku jafnvægi en það þarf ekki að gilda öfugt.



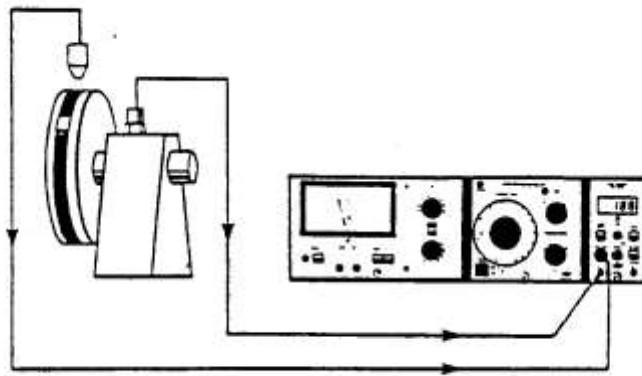
Mynd 2 Öxull í hreyfifræðilegu ójafnvægi.

Þegar framvæmd er jafnvægisstilling á hlut sem er í dynamísku ójafnvægi þarf alltaf að gera það miðað við tvö eða fleiri plön og það er eingöngu framkvæmanlegt með því að snúa hlutnum.

### Mælitæki

Til eru sérstakir stillibekkir sem notaðir eru til að jafnvægisstilla öxla og hjól. Það sem verið er að stilla er sett í eða ofan á legu sem tengd er við kraftnema, en hann er notaður til að mæla miðflóttarkraftinn í því plani sem hann er. Með þessum tækjum er hægt að mæla kraftinn nákvæmlega og í framhaldi af því að eyða honum með jafnvægisstillingu.

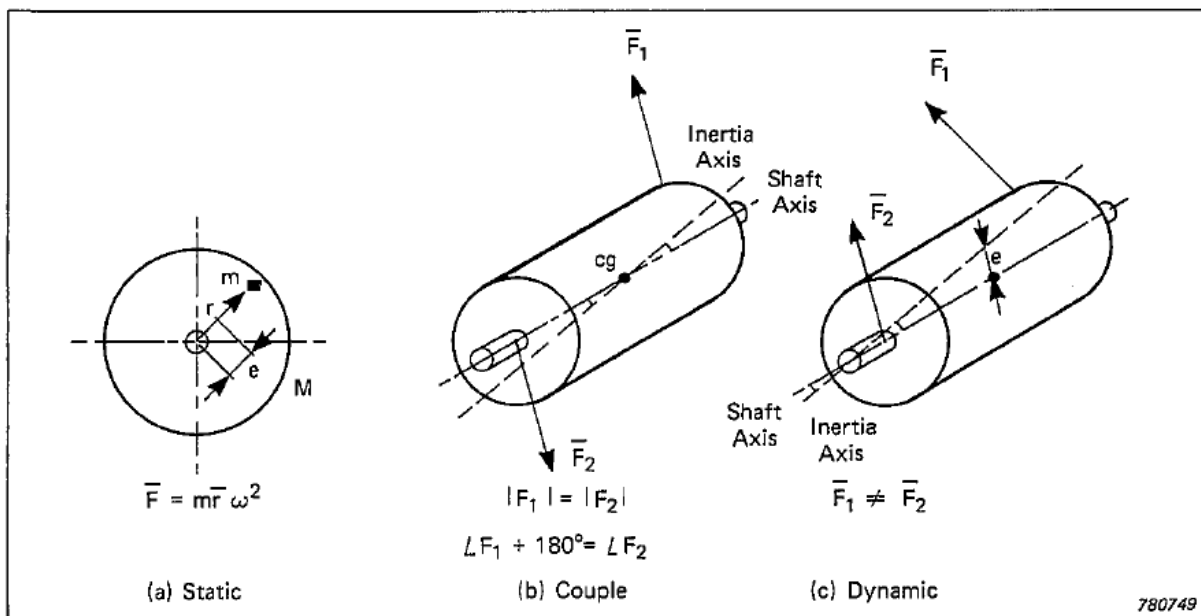
Þegar verið er að jafnvægisstilla hjól eða öxla sem eru í vélum eru yfirleitt notaðir titringismælar til að meta miðflóttarkraftinn. En athuga verður það að nemandi sem mælir titringinn, mælir ekki kraftinn beint, því frá kraftinum yfir að nemandi er ákveðin yfirfærsla og jafnframt taka legurnar



Mynd 3 Mælitæki fyrir jafnvægisstillingu (Brüel & Kjær).

sem halda ásnúnum uppi, hluta af kraftinum. Yfirfærslan frá öxlinum yfir í neman er háð tíðninni og því er mikilvægt að hafa sama snúningshraða og álag þegar jafnvægisstilling fer fram.

Til að staðsetja hjámiðjuna þarf að tengja útslagið við ákveðinn fastan punkt á öxlinum. Það er gert með svokölluðum merkigjafa (e. Trigger) sem gefur púls á hverjum hring, þegar skilgreindur núllpunktur fer fram hjá nemanum sjá mynd 3. Síðan er krafturinn þ.e. staðsetning og stærð, áætlaður með hröðunar-, hraða- eða færslunema ásamt fasahorninu við núllpunktinn. Útslagið á snúningstíðninni í tíðnirófinu er notað til að meta stærð kraftsins en til að fá það fram þarf að gera tíðnigreiningu á merkinu með t.d. FFT aðferðinni.



Mynd 4 Ójafnvægi

## Flokkun og leyfileg hjámiðja

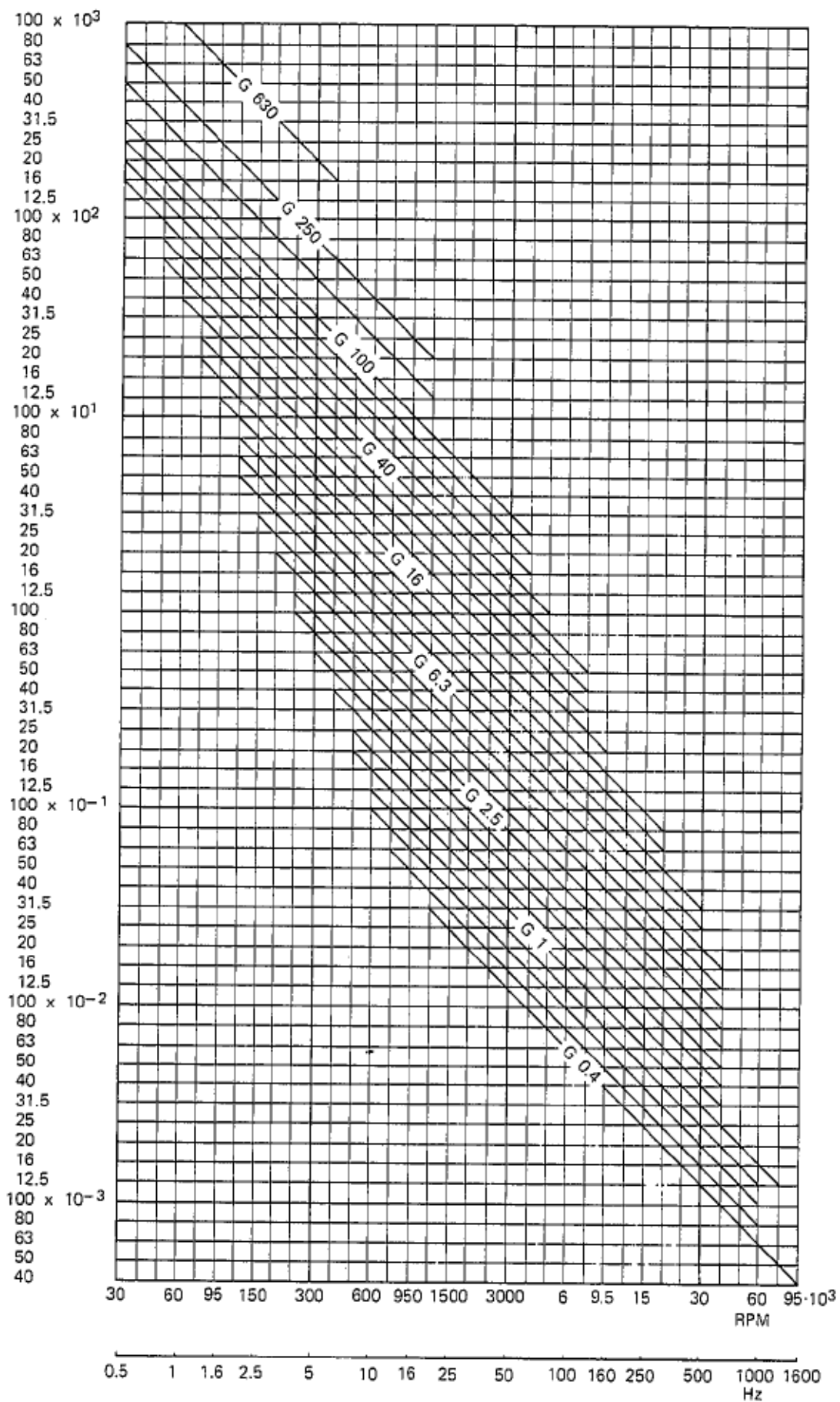
Þegar framkvæmd er jafnvægisstilling er fyrsta skrefið að athuga hvort hjámiðjan veldur alvarlegum titringi. Það er forsendan fyrir því að hægt sé að nota titringsmælingar við jafnvægisstillingu að hjámiðjan sé ráðandi titringsvaldur. Til eru staðlar sem segja til um kröfur um nákvæmni við stillinguna. Dæmi um slíkan staðal er ISO 1940,

en hann gildir fyrir öxla og hjól sem eru með snúningshraða sem er lægri en fyrsti hættni hraðinn (critical speed). Í staðlinum er sett upp tafla 1 sem flokkar mismunandi öxla og hjól eftir kröfum um jafnvægið.

*Tafla 1 Flokkun og gráða*

Flokkar	Gráða
Sveifarásar í stórum hæggengum vélum	630
Sveifarásar fyrir hraðgengar fjögura strokka vélar	250
Sveifarásar fyrir hraðgengar sex strokka vélar	100
Bílhjól, driföxlar og sveifarásar í bílvélum	40
Öxlar sem eru ekki nálægt hætnum hraða	16
Blásarar og viftur, svinghjól og almennir vélhlutir	6.3
Túrbínuhjól og öxlar, rafmótorar	2.5
Litlir rafmagnsmótorar, sérstaklega þýðgengi	1.0
Mælitæki	0.4

Hver flokkur hefur síðan kennilínu á línuritinu eins og sýnt er á mynd 4 en hún segir til um leyfilega hjámiðju sem fall af snúningshraða. T.d. fyrir hjól sem er í blásara, þ.e. flokkur 6.3, sem snýst 3000 snún/min (50 Hz) og er 50 kg að þyngd, má hjámiðjan vera  $e = 20 \text{ g mm/kg}$ .



Mynd 4 Leyfileg hjámiðja eftir flokkum (g mm/kg)

## Sýnidæmi

Jafnvægisstilla á rafala á vatnsaflsvél í Búrfelli sem er 56 000 kg og snýst 300 snún/min (5 Hz). Radíus rafalans er  $r = 1570$  mm.

### 1. Flokkun

Fyrst þarf að ákvarða í hvaða flokk öxullinn eða hjólið er. Rafalahjólið er samkvæmt töflu 1 í flokki 2,5

### 2. Gráða og leyfilegur hjámiðjuradíus

Flokkurinn segir til um hámarks hjámiðjuradíus  $e_H$  eins og fram kemur á myndinn á næstu síðu. Fyrir almenna vélhluti er algengast er að nota gráðu 6,3 fyrir vélhluti.

Fyrir rafalann í vatnsaflsvélinn er flokkur 2.5 notaður, og snúningshraðinn 300 snún/min (5 Hz) og  $M = 56\,000$  kg að þyngd, má samkvæmt mynd 4 hjámiðjan vera  $e_H = 80$  g mm/kg.

### 3. Prufuþyngd eða viðmiðunarmassi

Út frá hámarks hjámiðjuradíus  $e_H$  er viðmiðunarmassi fundinn. Hámarkshjámiðjumassi er samkvæmst staðlinum,

$$m_H = e_H M / r$$

þar sem  $M$  er massi hjólsins og  $r$  er radíus út í staðsetningu massans.

Viðmiðunarmassinn er síðan á bilinu 2 – 10 sinnum  $m_H$

$$m_T = 10 m_H$$

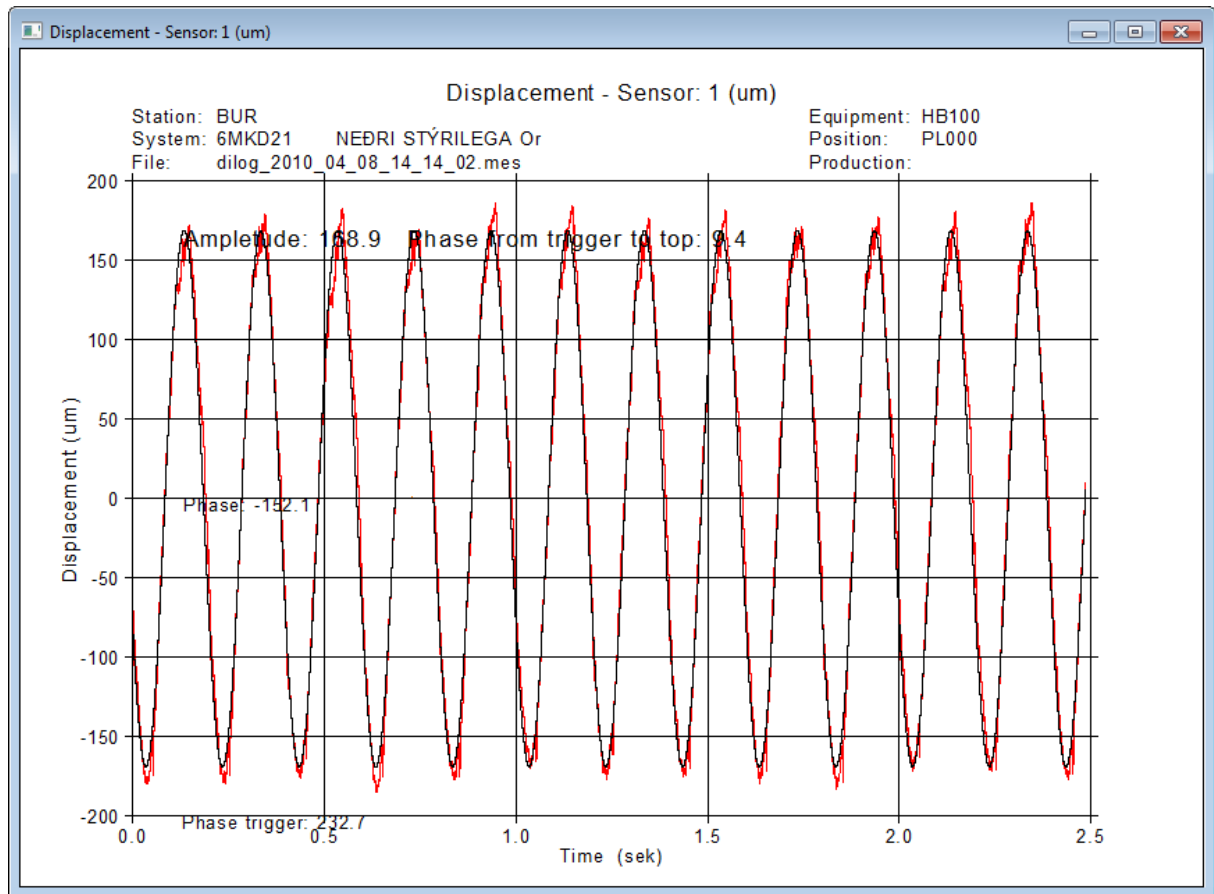
Ef radíus út í massann er  $r = 1570$  mm er viðmiðunarmassinn þegar miðað er við 2 sinnum hjámiðjumassa,

$$m_T = 2 e_H M / r$$

$$m_T = 2 \cdot 80 \cdot 56000 / 1570 = 5700 \text{ gr.}$$

#### 4. Mæling án viðmiðunarmassa

Mæling án viðmiðunarmassa:



Mynd 4.1 Mælingar á hjámiðjuútslagi og gráðu frá merki.

Eftir mælingu er snúningshraðinn settur inn við Balancing hnappinn og síðan er ýtt á hann. W-W1 er notað til að staðsetja toppinn.

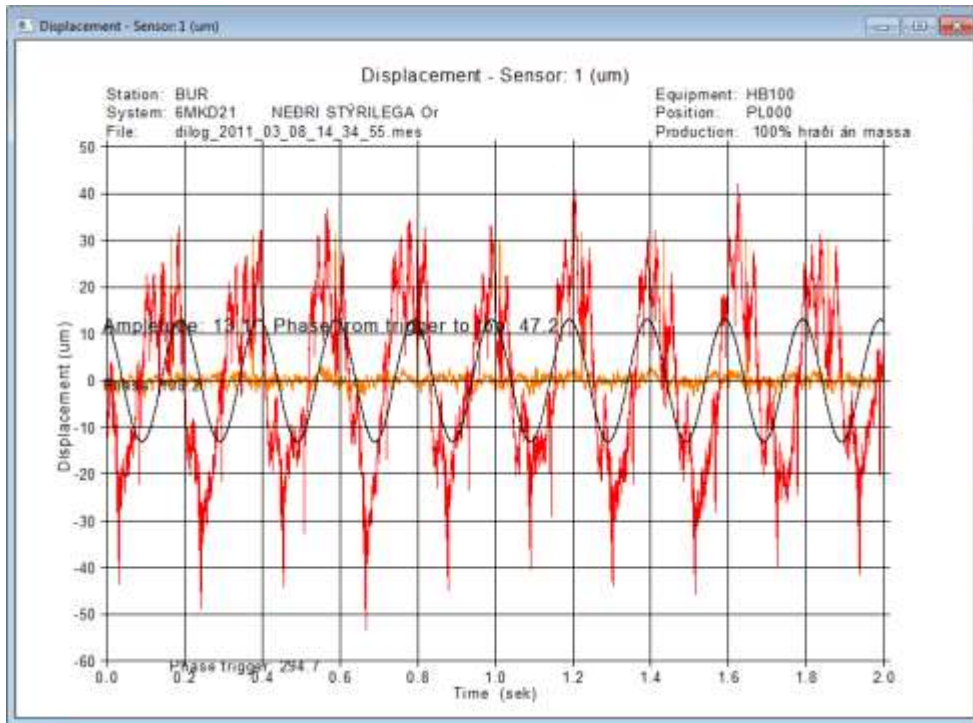
Útslag: 168,9 um

Frá trigger í top: 9°

## 5. Mæling með viðmiðunarmassa

Viðmiðunarmassinn er settur  $180^\circ$  frá toppi miðað við Trigger eða:

$$180^\circ - 9^\circ = 171^\circ \text{ frá Trigger merki.}$$



Mynd 6 Mæling á hjámiðjuútslagi með viðmiðunarmassa

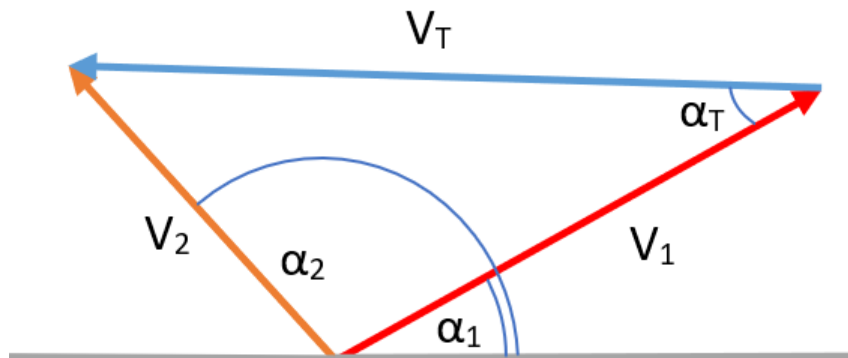
Mæling með viðmiðunarmassa gefur,

Útslag: 13,1 um

Gráða:  $259 - 128 = 131^\circ$



## 6. Útreikningar á viðmiðunarmassa og horni



$$V_1 = \begin{bmatrix} V_1 \cos(\alpha_1) \\ V_1 \sin(\alpha_1) \end{bmatrix}$$

$$V_2 = \begin{bmatrix} V_2 \cos(\alpha_2) \\ V_2 \sin(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

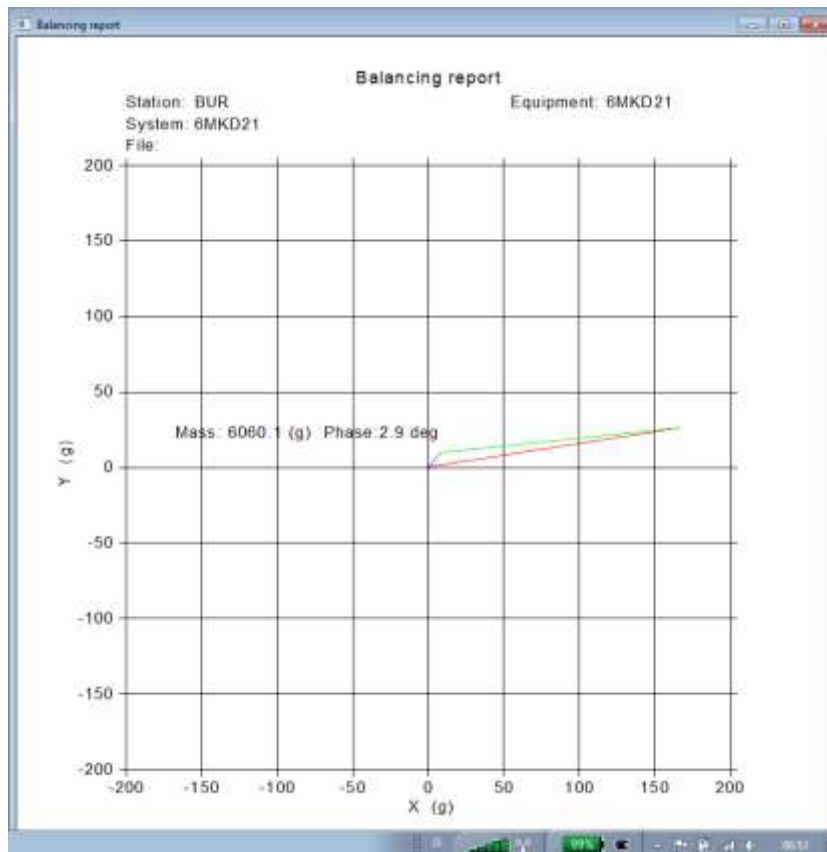
$$V_T = V_2 - V_1$$

Síðan þarf að vinna  $\alpha_T$  og  $V_T$

$$V_T = \sqrt{(V_2 \cos \alpha_2 - V_1 \cos \alpha_1)^2 + (V_2 \sin \alpha_2 - V_1 \sin \alpha_1)^2}$$

$$\alpha = \tan^{-1}((V_2 \sin \alpha_2 - V_1 \sin \alpha_1) / (V_2 \cos \alpha_2 - V_1 \cos \alpha_1))$$

Balness Measurement Unit					
Station: BUR		Description: 6MKD21		Equipment: 6MKD21	
Mass	Plane 1	Amplitude 1	Phase 1	Amplitude 2	Phase 2
	None:	169	9		
	Plane 1:	13	47		
	Plane 2:				
<div>Balance</div> <div>Quit</div>					



Mynd 7 Reiknuð hjámiðja og leiðrétting.

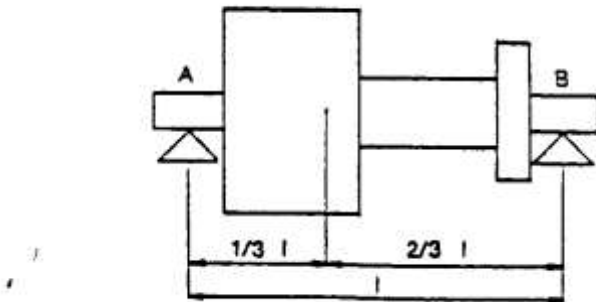
Niðurstaðan er að að breyta massanum:

Flytja massann um : 3°

Leiðréttingarmassinn á að vera : 6060 gr.

### Mæling í tveimur plönum

Þegar framkvæmd er jafnvægisstilling í tveimur plönum er byrjað á því að skilgreina mæliplönin. Plönin eru valin þar sem hægt er að staðsetja prufu- og leiðréttingarmassa, en þau þurfa ekki að vera á sama stað og mælipunktarnir. Yfirleitt eru mælipunktarnir fyrir hröðunarmælingar staðsettir við legurnar. Ef öxullinn er samhverfur þ.e. að radíal legukraftar eru jafn stórir eru viðmiðunarmassinn skipt jafnt á plönin. Í dæminu um blásarahjólið þar sem hjámiðjan var  $e = 20 \text{ mm g/kg}$  verða kröfurnar um hjámiðju í hvorri legu  $e_1 = e_2 = 10 \text{ mm g/kg}$ .



Mynd 8 Skipting hjámiðju fyrir ósamhverfan ás.

Þegar öxull eða hjól er ósamhverfa, ráðast hjámiðjukröfurnar af fjarlægð massamiðju frá enda legu eins og sýnt er á mynd 8.

Þegar öxlar eða hjól eru jafnvægisstillt í tveimur plönum, er byrjað á því að mæla útslag og fasa í báðum plönum án prufumassa. Þessi mæling gefur tvo vigra sem kallast  $V_{10}$  og  $V_{20}$ . Síðan er settur viðmiðunar- eða prufumassi í plan 1 og mælt, en það gefur  $V_{11}$  og  $V_{21}$ . Að lokum er sambærilegur prufumassi settur á plan 2 án þess að hafa massa í plani 1. Þessi mæling gefur vigrana  $V_{12}$  og  $V_{22}$ .

Nú er markmiðið að eyða vigrunum  $V_{10}$  og  $V_{20}$  og er það gert með því að breyta mössunum í plönun 1 og 2 í samræmi við  $Q_1$  og  $Q_2$  þar sem,

$$\begin{aligned} Q_1 (V_{11} - V_{10}) + Q_2 (V_{12} - V_{10}) &= -V_{10} \\ Q_1 (V_{21} - V_{20}) + Q_2 (V_{22} - V_{20}) &= -V_{20} \end{aligned}$$

og með því að einangra  $Q_1$  og  $Q_2$  fæst

$$\begin{aligned} Q_1 &= \{ -V_{10} - Q_2 (V_{12} - V_{10}) \} / \{ V_{11} - V_{10} \} \\ Q_2 &= \{ V_{11} (V_{11} - V_{10}) - V_{10} (V_{21} - V_{20}) \} / \{ (V_{21} - V_{20}) (V_{12} - V_{10}) - (V_{22} - V_{20}) (V_{11} - V_{10}) \} \end{aligned}$$

Vigrarnir  $Q_1$  og  $Q_2$  gefa stærð og stefnu massanna sem jafnvægisstilla hjólið.

$$M_1 = |Q_1| M_{\text{prufa}} \quad \alpha_1 = \angle Q_1$$

$$M_2 = |Q_2| M_{\text{prufa}} \quad \alpha_2 = \angle Q_2$$

Jafnvægisstilling á raflahjólí í tveimur plönum þar sem notast er við 2.5 kg prufumassa.

Prufumassinn í plani 1 staðsettur við viðmiðunarpunktinn.

Í plani 2 er hann settur +90 frá viðmiðunarpunktinum.

The screenshot shows the 'Balness Measurement Unit' window. It has a menu bar with 'Exit' and 'Help'. Below the title bar, there are fields for 'Station' (set to 'BUR'), 'Description', 'System' (set to '2MED10'), and 'Equipment' (set to '2MED10'). The main area is divided into sections for 'Mass', 'Plane 1', and 'Plane 2'. Under 'Mass', there are input fields for 'None', 'Plane 1', and 'Plane 2', all set to '2.5'. Under 'Plane 1', there are input fields for 'Amplitude 1' (7.2), 'Phase 1' (238), 'Amplitude 2' (13.5), and 'Phase 2' (296). Under 'Plane 2', there are input fields for 'Amplitude 1' (4.9), 'Phase 1' (114), 'Amplitude 2' (9.2), and 'Phase 2' (347). At the bottom, there are 'Balance' and 'Quit' buttons.

Mass	Plane 1	Plane 2		
None	Amplitude 1	Phase 1	Amplitude 2	Phase 2
None	7.2	238	13.5	296
Plane 1	4.9	114	9.2	347
Plane 2	4.0	79	12.0	292

Niðurstöður sýna að massinn í plani eitt á að vera 2.9 kg og færast um 50° en massinn í plani 2 á að vera 2.8 kg og færast um -82°.

