



4+1+3

Mjerenje obrtnog momenta

MJERENJE OBRTNOG MOMENTA I SNAGE

- Moment obrtanja djeluje na vratila, spojnice, doboše, zupčanike itd. Može da bude stacionaran tj. da se ne mijanja sa vremenom,
- $dM/dt = 0$ i nestacionaran da se mijenja sa promjenom vremena $M(t) \neq 0$.
- Mjerenjem dinamičkog obrtnog momenta dobija se **informacija o tome kakvo je opterećenje ispitivanog rotirajućeg dijela**, da li je ravnomjerno, periodično, impulsno ili kombinovano.
- Taj podatak je važan u slučaju dijagnosticiranja tj. određivanja tehničkog stanja sistema. Na osnovu rezultata mjerenja moći će se vršiti uklanjanje nastalih poremećaja.

Razlozi za mjerenje obrtnog momenta

- Drugi važan razlog mjerenja obrtnog momenta je **provjera postojećeg konstruktivnog rješenja rotirajućeg sistema.**
- Često je potrebno prije isporuke takvih proizvoda; pumpi, motora, ili bilo kojih konstrukcija koje sadrže rotirajuće dijelove, izvršiti mjerenje obrtnog momenta.
- **Posebna pažnja posvećuje se mjerenju obrtnog momenta na vratilima.** Moment **M** pomnožen sa ugaonom brzinom **ω** predstavlja mehaničku snagu koju vratilo prenosi

Primjeri mjerenja obrtnog momenta

- U visoko mehanizovanom društvu, obrtni momenat je jedna od najvažnijih mehaničkih veličina koje se mjere.
- Nije bitno mjerenje obrtnog momenta samo kod parnih turbina nominalnog momenta ili kod motora Formule 1 sa 1 do 2kNm pri 20.000o/min, **već u stvari kod svega gde imamo korištenje obrtnog kretanja.**
- Ima nebrojeno primjera primjene mjerenja obrtnog momenta; kod probnih stolova, praćenje i kontrole procesa u proizvodnji, kontrole kvaliteta, istraživanja i razvoja.
- U cilju optimizacije, postaje sve važnija tačnost izmjerenih vrijednosti, pouzdanost i ponovljivost rezultata. Naročito je to izraženo kod istraživanja i razvoja motora i prenosnika snage.
- Problemi vezani za energiju sa kojima se danas suočavamo, otvaraju vrata za nove primjene.

Principi rada uredjeja za mjerenje obrtnog momenta

- Postoje različiti metodi i postupci mjerenja obrtnog momenta i snage. Uređaji i mjerni sistemi koji se koriste za ove namjene rade na sljedećim principima:
 - **mehaničkom,**
 - **električnom,**
 - **optičkom itd.**
- Mjerenje obrtnog momenta najčešće se vrši pomoću tenzometarskih mjernih traka. Trake lijepe na elastični torzioni dinamometar. To je elastični dio koji se ugrađuje između motora i ulaznog vratila neke radne mašine.
- Ugradnja se vrši pomoću krutih spojnika koje omogućavaju radijalno i aksijalno podešavanje vratila. Ukoliko nije moguće u pogonskim uslovima izvršiti ugradnju ovakvih jedinica, tada se pristupa lijepljenju trake na elemente transmisije čime se postiže potpuna tačnost prenosa opterećenja.

Metode mjerenja obrtnog momenta

- **Proračun iz električne snage**

- ✚ Obrtni moment se može izračunati preko električne snage i brzine obrtanja. Sa današnjim instrumentima je lako izmjeriti oba parametra; ipak računski dobijen momenat ima poveću grešku, pošto rasipanje snage i stanje mašine imaju veliki uticaj.

- ✚ Oblasti gde se primenjuje ovaj metod su praćenje procesa, kao što su mješalice, mikseri meljači i slično, pošto je bitno merenje dodatnih veličina kao što je reaktivna snaga ili efikasnost. Bitna prednost ove metode je to što nije potrebna mehanička intervencija da bi se obavilo merenje.

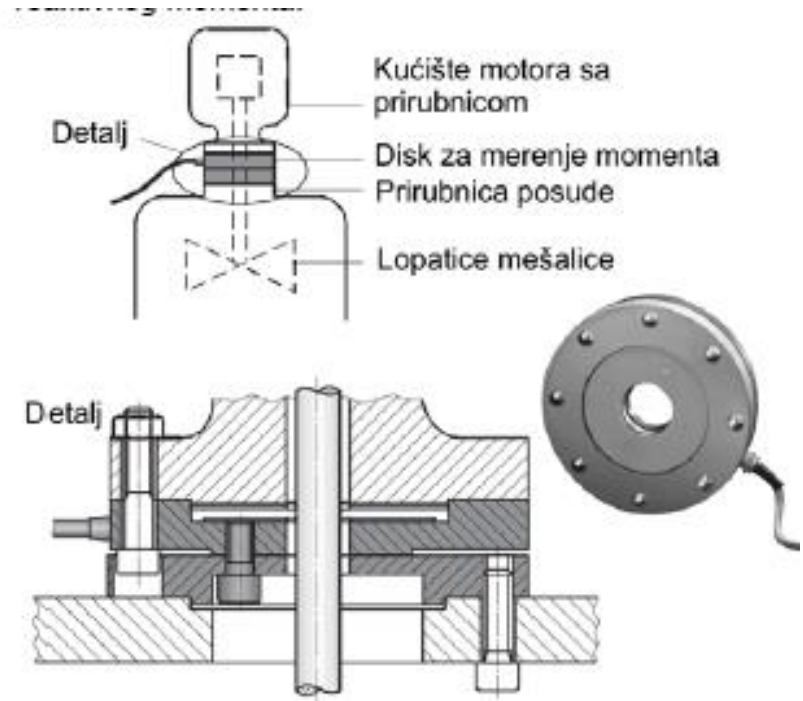
- Nesigurnost koja je vezana za ovakav način računskog mjerenja je nekoliko puta veća nego merenje sa senzorima i mjernim trakama.

Metode mjerenja obrtnog momenta preko poluge

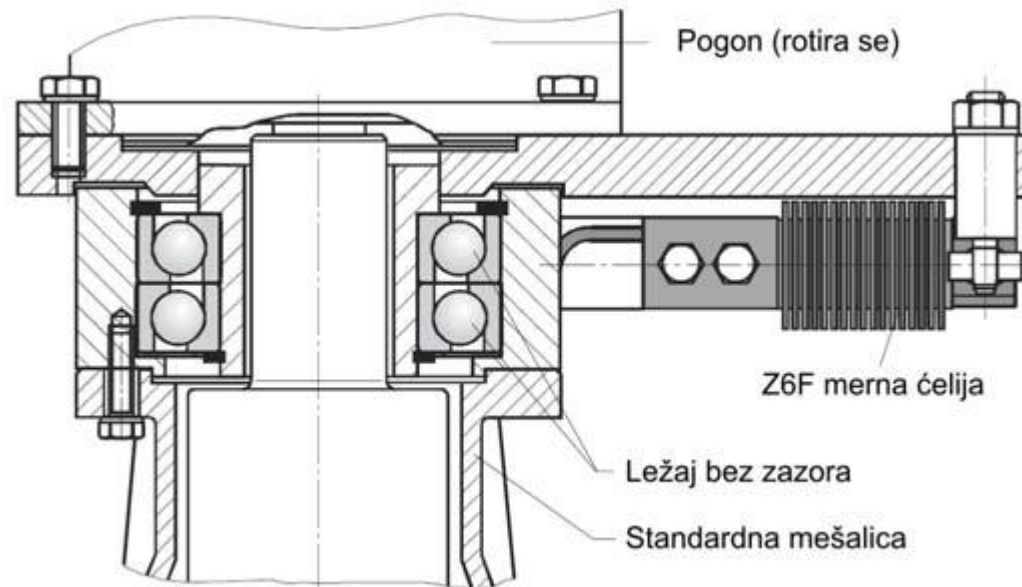
- **Merenje reaktivnog momenta preko poluge**
- Veoma česta metoda utvrđivanja snage je princip da je obrtni moment jednak reaktivnom momentu na poluzi.
- Slika prikazuje primer ovakvog merenja, gdje se na poluzi koristi davač sile sa odgovarajućim prihvatom, a moment čini proizvod izmjerene sile i kraka na kom se nalazi pretvarač-senzor . Problem kod ovog rješenja je potreba za kompleksnom mehanikom, kako bi se izbjegli uticaji prihvata senzora, termičke dilatacije poluge usljed promene temperature, i različiti režimi rada.

Primjer mjerenja obrtnog momenta

Slika prikazuje primer ovakvog merenja, gde se na poluzi koristi davač sile sa odgovarajućim prihvatom, a moment čini proizvod izmerene sile i kraka na kom se nalazi davač. Problem kod ovog rešenja je potreba za kompleksnom mehanikom, kako bi se izbegli uticaji prihvata senzora, termičke dilatacije poluge usled promene temperature, i različiti režimi rada.



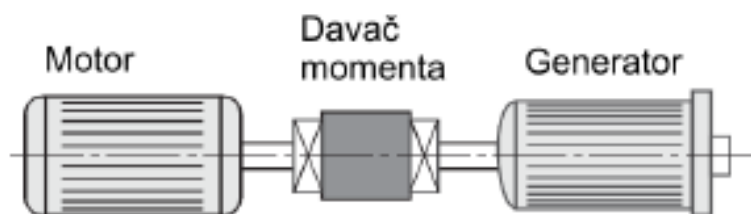
- Inercija velikih masa otežava dinamička mjerenja. Moment inercije deluje kao niskopojasni filter. To u nekim slučajevima može biti i prednost, kada nema potrebe za mjerenjem dinamike, pretvarač sile se ne izlaže dodatnim dinamičkim uticajima.
- Pored primjene kod probnih stolova za motore, prenosnika snage i spojnika, česta primjena je utvrđivanje viskoznosti supstance u svrhu kontrole procesa miješanja. U tom slučaju se motor oslanja u ležajevima, a obrtanje sprječava pretvarač sile, idejno rješenje je dato na slici:



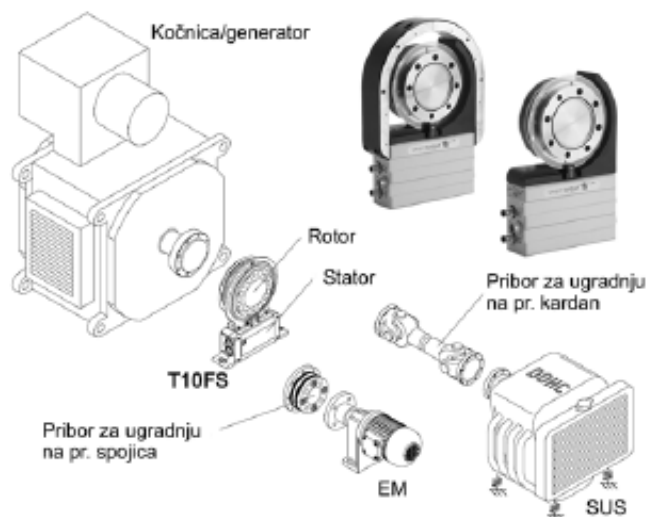
Osnovni kriterijumi za izbor pretvarača sile za ovu primjenu su:

- krutost (veća krutost daje više sopstvene frekvencije sistema, niža krutost daje veći ugib senzora pri opterećenj, što može biti korisno prilikom zaštite od preopterećenja)
- konstrukcija i gabariti
- smjer sile (istezanje i/ili pritisak)
- potrebna tačnost

Direktno mjerenje obrtnog momenta



Davač momenta se nalazi u pogonskom lancu



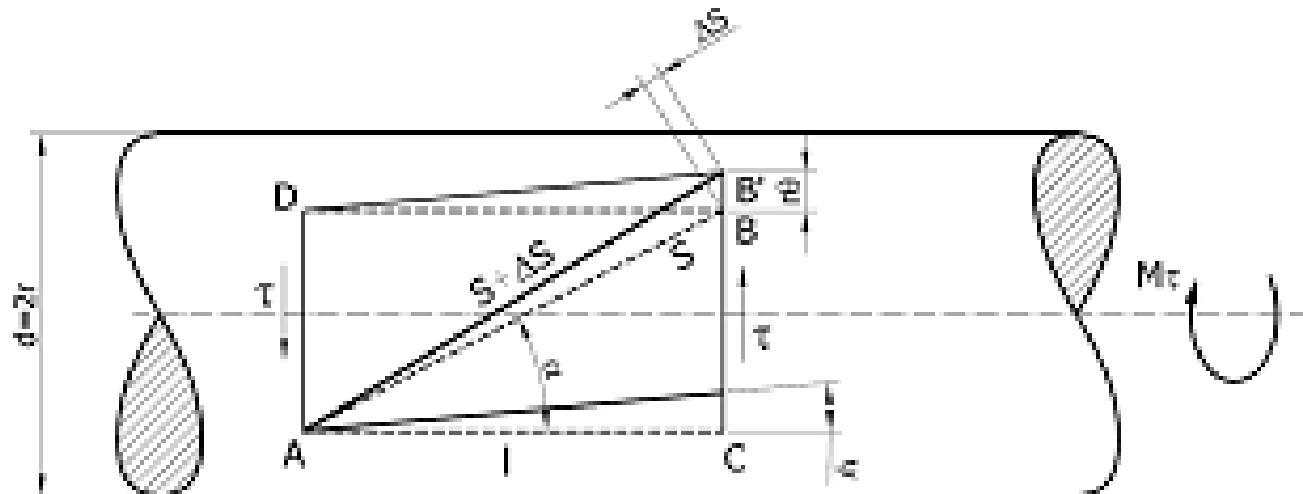
Fizički principi senzora mogu biti sledeći:

- hidraulični, pneumatski
- prevođenje elastične deformacije u kapacitivnost, induktivnost, otpornost, provodljivost ili fazu.

Mjerenje obrtnog momenta pomoću mjernih traka

- Mjerenje obrtnog momenta najčešće se vrši pomoću mjernih traka. Na površini vratila koja su opterećena momentom uvijanja javljaju se najveći tangencijalni naponi.
- Objašnjenje principa mjerenja deformacija vratila opterećenog na uvijanje prikazano je na slici 7.1.
- Mjerna traka dužine $\mathbf{AB} = \mathbf{S}$ zalijepi se pod uglom α u odnosu na ono vlakno vratila koje je najviše udaljeno od ose. Nakon dejstva momenta uvijanja traka promijeni dužinu tako da se od dužine \mathbf{S} poveća na $\mathbf{S} + \Delta\mathbf{S} = \mathbf{AB}'$, pri čemu lijevi dio trake ostaje nepomičan. Dva presjeka na međusobnom rastojanju l uvijaju se za ugao Φ

Mjerenje obrtnog momenta pomoću mjernih traka



Slika 7.1. Mjerenje deformacija vratila opterećenog momentom uvijanja

Analiza mjerenja obrtnog momenta pomoću mjernih traka

$$\theta = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_0} \dots \dots \dots (7.1)$$

gdje je:

M_t – moment uvijanja (torzije),

G – modul klizanja,

I_0 – polarni moment inercije presjeka.

Tačka B kraja trake nakon uvijanja pomjerila se u položaj B' i opisala luk $r \cdot \theta$. Iz trougla $\Delta ABB'$ po kosinusnoj teoremi slijedi:

$$(S + \Delta S)^2 = S^2 + r^2 \cdot \theta^2 - 2 \cdot S \cdot r \cdot \theta \cdot \cos(\theta_0 + \alpha) \dots \dots \dots (7.2)$$

Nakon kvadriranja dobije se:

$$S^2 + 2S\Delta S + \Delta S^2 = S^2 + r^2 \cdot \theta^2 + 2 \cdot S \cdot r \cdot \theta \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots (7.3)$$

Poslije zanemarivanja malih veličina višeg reda dobije se:

$$2S\Delta S = r \cdot \theta \cdot S \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots (7.4)$$

Dilatacija mjerne tačke može se napisati u obliku:

$$\varepsilon = \frac{\Delta S}{S} = r \cdot \theta \cdot \frac{\sin \alpha}{S} = \frac{r \cdot M_t \cdot l}{S \cdot G \cdot I_0} \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots (7.5)$$

Kako je $S = \frac{l}{\cos \alpha}$, dobije se:

Dilatacija dobivena mjerenjem obrtnog momenta pomoću mjernih traka

$$\varepsilon = \frac{M_1}{2 \cdot G \cdot W_0} \cdot \sin 2\alpha \dots\dots\dots(7.6)$$

gdje je:

$W_0 = I_p/r$ – polarni otporni moment inercije poprečnog presjeka

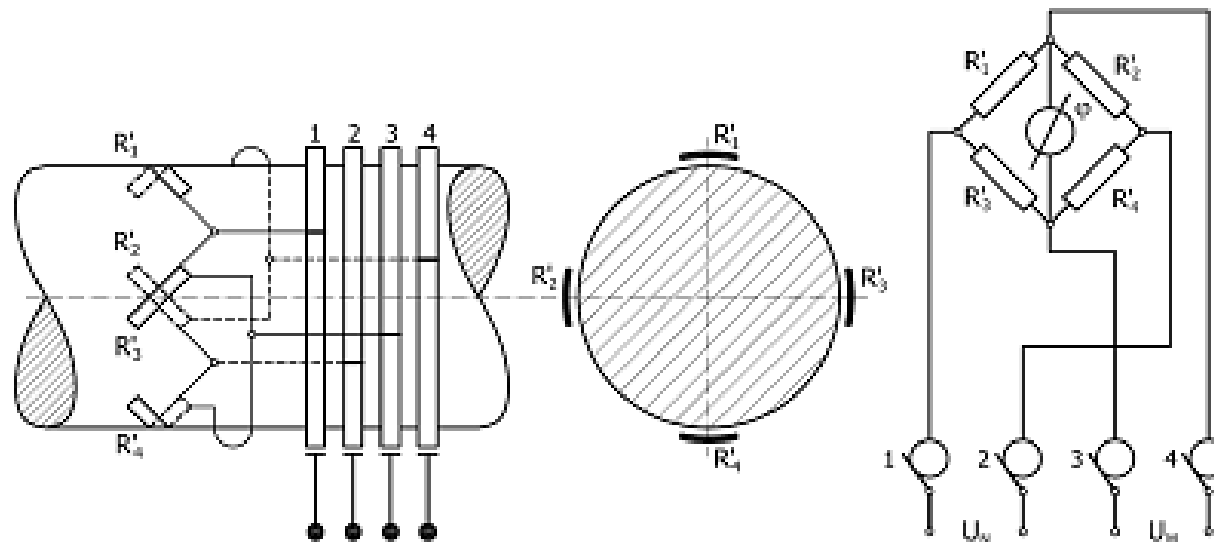
Veličina $\sin 2\alpha$ ima maksimalnu vrijednost +1 za $\alpha = 45^\circ$ i 225° i vrijednost -1 za $\alpha = 135^\circ$ i 315° .

Maksimalna dilatacija je:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{M_1}{2 \cdot G \cdot W_0} \dots\dots\dots(7.7)$$

Wheatstonov most za mjerenje obrtnog momenta

Na slici 7.2. šematski je prikazano povezivanje mjernih traka sa kliznim prstenovima kao i Wheatstone-ov most za mjerenje obrtnog momenta. Četiri mjerne trake zalijepljene su pod uglovima 45° , 135° , 225° i 315° . Prilikom uvijanja dvije mjerne trake R_2 i R_3 se izdužuju, a trake R_1 i R_4 skraćuju.



Slika 7.2. Mjerni sistem za mjerenje obrtnog momenta:
a) raspored mjernih traka, b) mjerni Wheatstone-ov most

Svaka traka ima otpor R i relativnu promjenu otpora $R_r = \frac{\Delta R}{R}$.

Mjerni most čine četiri aktivne trake, a mjerna sprega je ujedno i temperaturno kompenzirana. Izlazni napon koji se mjeri je:

Veze kliznih prstenova i vratila

$$U_M = U_N \frac{R \cdot (1 + R_r)}{2 \cdot R} - \frac{R \cdot (1 - R_r)}{2 \cdot R} = U_N \cdot R_r \quad \dots\dots\dots(7.8)$$

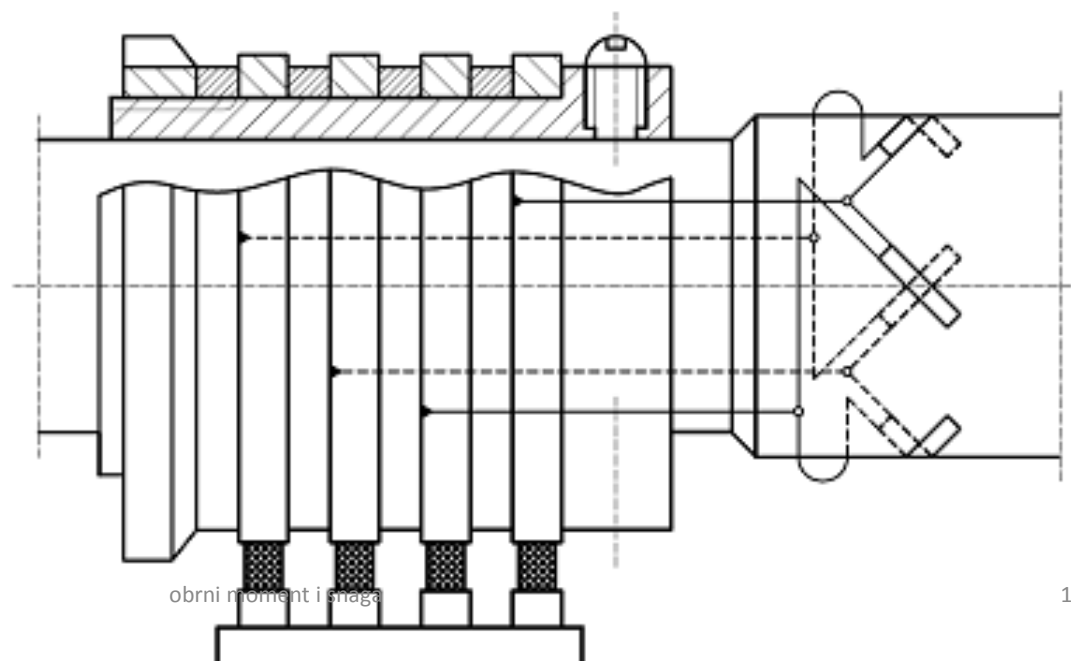
Ako se uvede oznaka za faktor mjernih traka $K=R_r / \varepsilon$ dobije se napon:

$$U_M = K \cdot \varepsilon \cdot U_N \quad \dots\dots\dots(7.9)$$

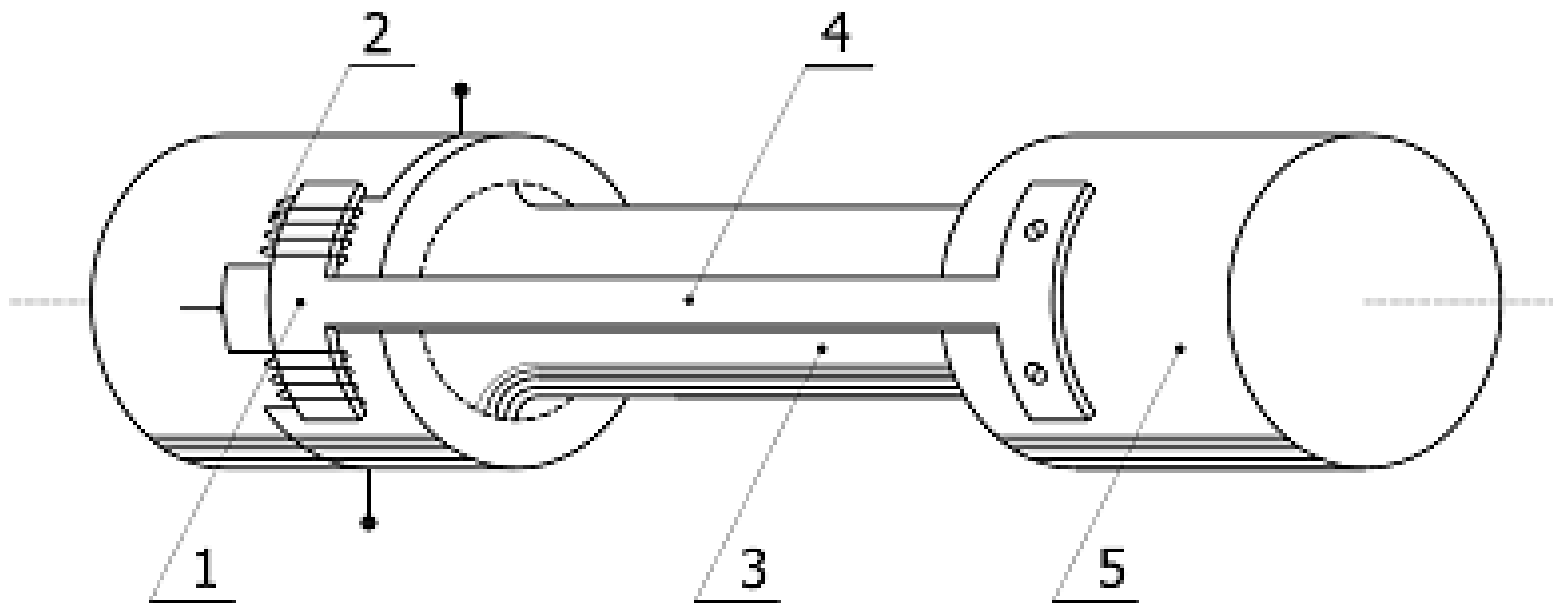
Na osnovu izvedenog izraza za računanje deformacije ε i izmjenog napona izračuna se moment uvijanja:

$$M_t = 2 \cdot G \cdot W_0 \cdot \varepsilon_{\max} = \frac{2 \cdot G \cdot W_0 \cdot U_M}{K \cdot U_N} = K_M \cdot U_M \quad \dots\dots\dots(7.10)$$

Klizni prstenovi, slika 7.3., treba da imaju što manji spoljašnji prečnik zbog smanjenja obodne brzine, trenja i zagrijavanja na mjestu kontakta. Oni se međusobno, a veza kliznih prstenova i vratila se postiže pomoću čaure od izolacionog materijala. Između kliznih prstenova postavljaju se odstojne čaure, slika 7.3.



Mjerenje obrtnog momenta pomoću induktivnog senzora



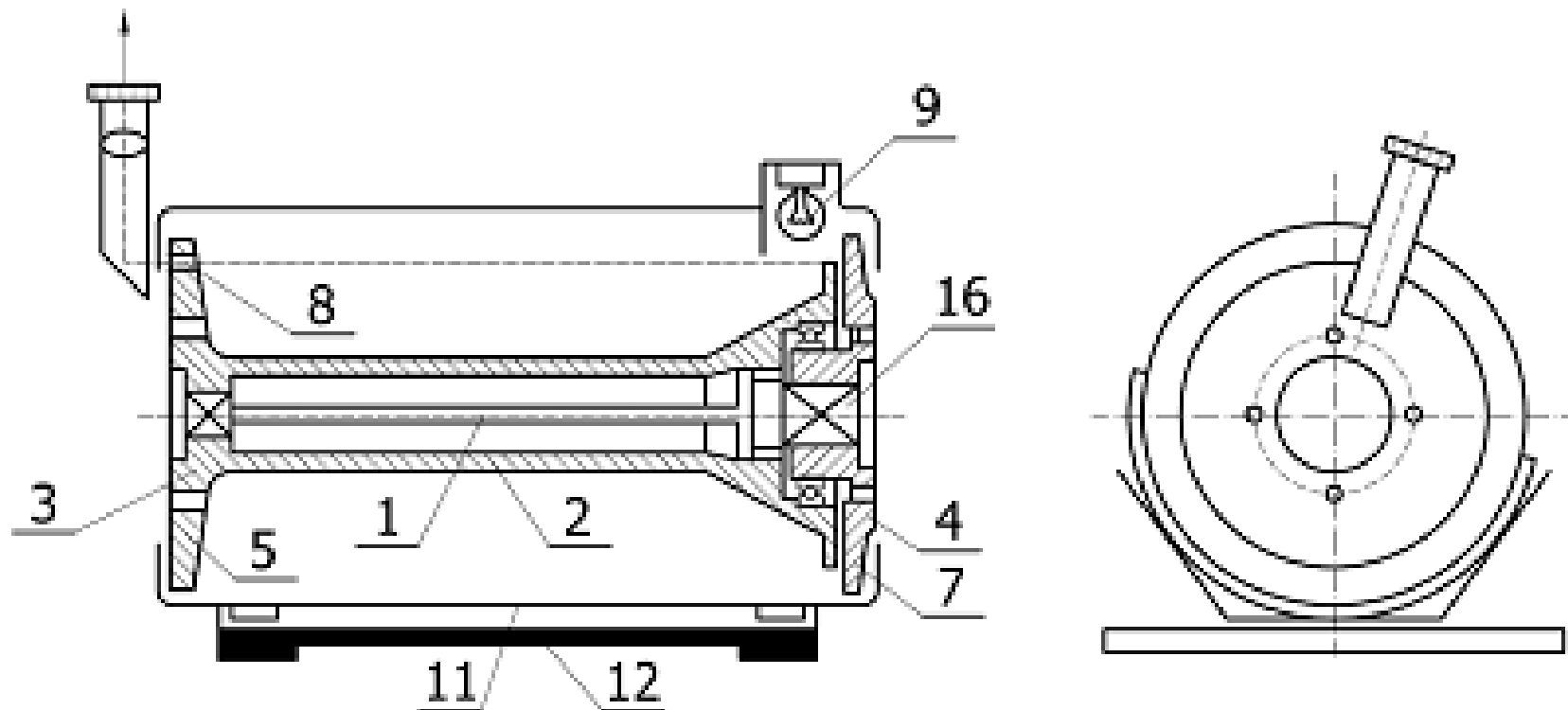
Slika 7.4. Torziometar : 1-jezgro, 2-kalem, 3-torzioni elastični element, 4-nosač jezgra, 5-vratilo

Objašnjenje mjerenja torziometrom obrtnog momenta

- Induktivni pretvarač za mjerenje obrtnog momenta zove se torziometar. Torzometar prikazan na slici 7.4. sastoji se od jezgra kod kog je jedna strana slobodna, a druga čvrsto vezana za vratilo 5.
- Na slobodnom kraju jezgra 1 namotani su kalemi 2. Usljed uvijanja elastičnog dijela vratila 3 induktivni pretvarač koji ima četiri kalema povezana u Wheatstone-ov most djeluje kao diferencijalni transformator dovodeći do neravnoteže mosta.
- Usljed obrtanja javlja se napon direktno proporcionalan obrtnom momentu i registruje se na registracionom instrumentu.

Mjerenje obrtnog momenta mehaničkim torziometrom sa stroboskopskim indikatorom

- Za mjerenje obrtnog momenta koji djeluju na centrifugalnim pumpama, ventilatorima, kompresorima i elektromotorima koriste se tenziometri sa stroboskopom.
- Tenzometri se postavljaju između pogona i izvršnog mehanizma. Elastični dio torziometra prenosi obrtni moment zbog čega se uvija.
- Na osnovu ugla uvijanja računa se obrtni moment.
- Ovakva vrsta torziometra koristi se za mjerenje konstantnih obrtnih momenata. Na slici 7.5. prikazana je jedna konstrukcija torziometra.

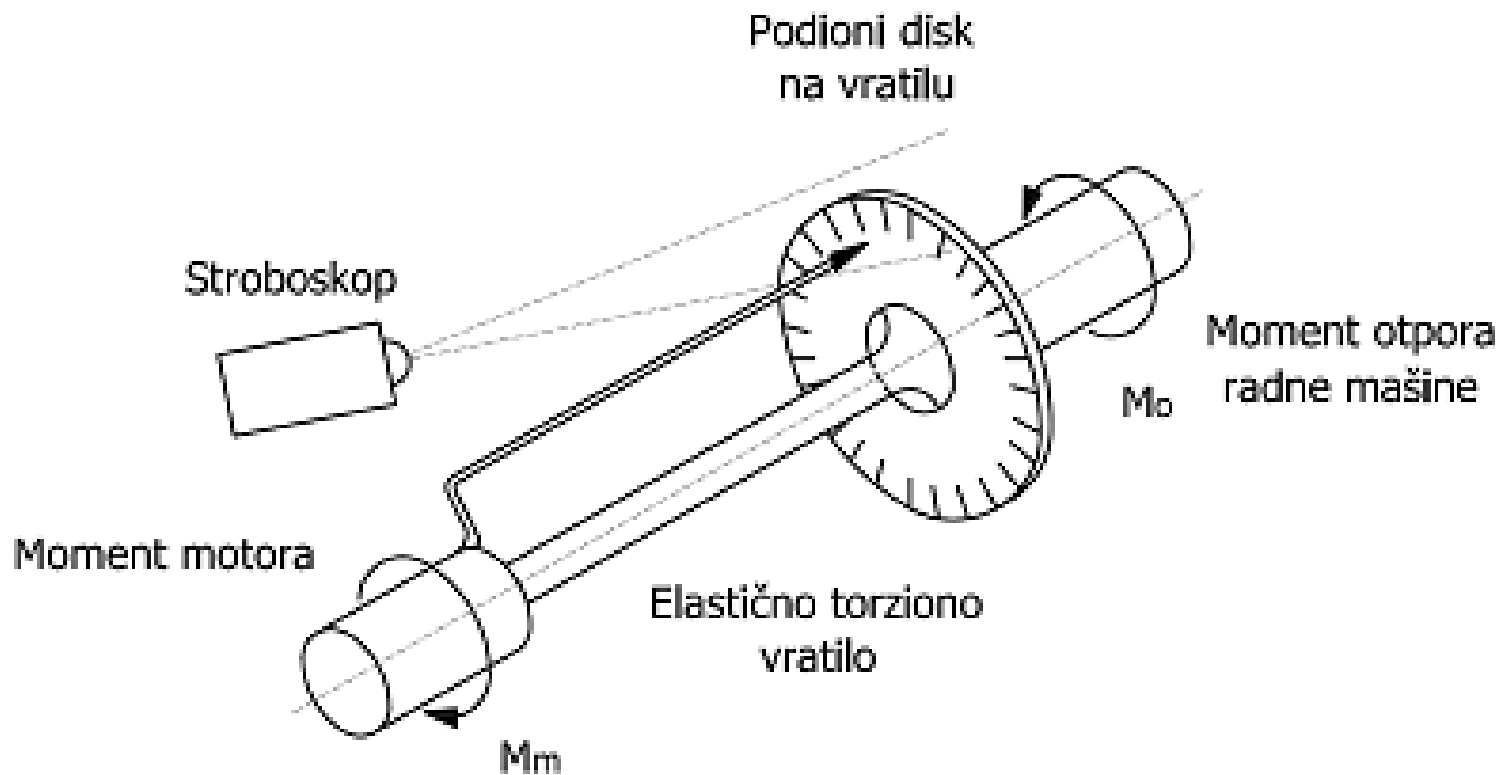


Slika 7.5. Konstrukcija torziometra sa stroboskopskim očitavanjem:
 1-elastični štap, 2-cijev, 3,4-prirubnice, 5,6,7- diskovi, 8-aksijalni prorez,
 9-sijalice, 10-optika, 11-oklop, 12-postolje

Objašnjenje rada torziometra

- Elastični štap 1 smješten je u cijevi 2, na čijem kraju je prirubnica 3, a na suprotnom kraju je prirubnica 4, za koju je vezan drugi kraj elastičnog štapa.
- Uvijanje štapa je ograničeno na taj način što su štap i cijev djelimično nazubljeni.
- Pomoću prirubnice 4, torziometar se spaja sa vratilom radne mašine.
- Na obodu diska 7 urezana je skala, a ispod njega je disk 6 na kome se nalazi indeks.
- Nasuprot indeksa na disku 5 postoji uski aksijalni prorez 8 kroz koji se može posmatrati položaj indeksa u odnosu na skalu.
- Za osvjetljenje indeksa koristi se sijalica 9, a očitavanje se vrši pomoću optičkog sistema 10.

Konstrukcija torziometra sa stroboskopskim očitavanjem



Slika 7.6. Princip rada torziometra sa stroboskopom

Očitavanje izmjerenih vrijednosti na stroboskopu

- Očitavanje mjerene vrijednosti vrši se na principu stroboskopskog efekta, slika 7.6. Oznake na skali mogu se raspoznati bez obzira na obrtanje diskova.
- Gledanjem kroz prorez indeks i skala se vide u jednom trenutku pri svakom obrtanju diskova, tj. vidi se samo bljesak.
- Kako se bljesak javlja pri svakom obrtanju stvara se utisak mirne slike. Za brojeve obrtaja vratila manje od 600 u minuti slika treperi. I pored toga brzina obrtanja kao i njen smjer mogu biti proizvoljni, vodeći računa da naprezanja diskova usljed centrifugalne sile ne prekorače dozvoljenu granicu.

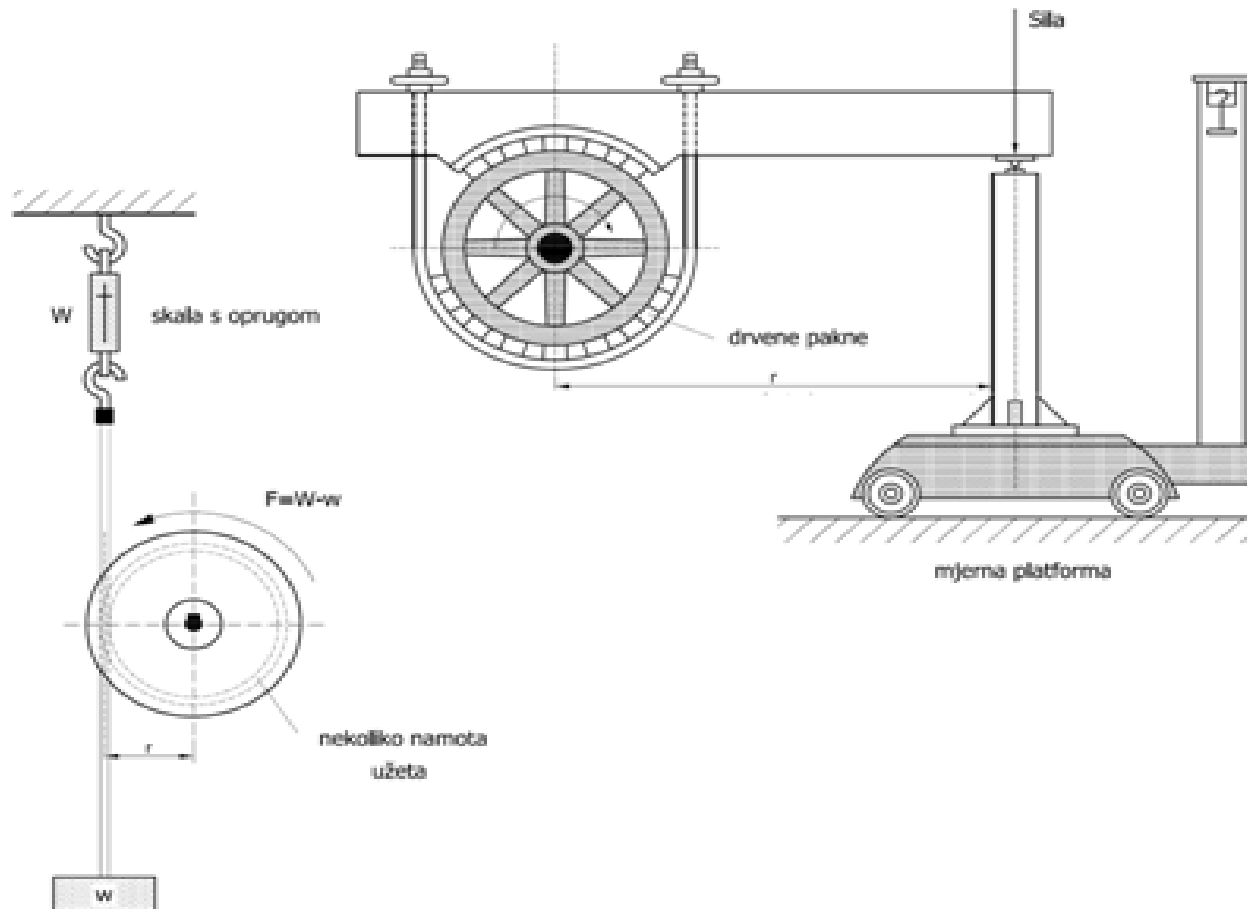
Kalibracija torziometara

- Kalibracija torziometra vrši se pomoću dvije poluge koje se učvršćuju na prirubnice 3 i 4 čiji se suprotni krajevi opterećuju jednakim tegovima.
- Dužina poluge pomnožena sa teretom daje veličinu momenta koji opterećuje elastični štap.
- Prateća dokumentacija svakog torziometra je dijagram kalibracije koji pokazuje zavisnost obrtnog momenta i ugla uvijanja štapa. Ugaona brzina mjeri se pomoću tahometra.
- Na osnovu izmjerenog momenta pomoću torziometra i ugaone brzine pomoću tahometra može se odrediti snaga $P = M \cdot \omega$.
- Tačnost torziometra iznosi $\pm 0,5\%$ za opterećenje do polovine punog opterećenja predviđenog za dati elastični štap.
- Za opterećenje od četvrtine do polovine punog opterećenja tačnost mjerenja je $\pm 1\%$. U kompletu za mjerenje postoji nekoliko elastičnih štapova različitih prečnika od kojih svaki ima svoj opseg mjerenja.
- Mjerenje se vrši onim štapom kod kog je opterećenje između polovine i punog opterećenja.

Prony kočnica-apsorpcioni dinamometar

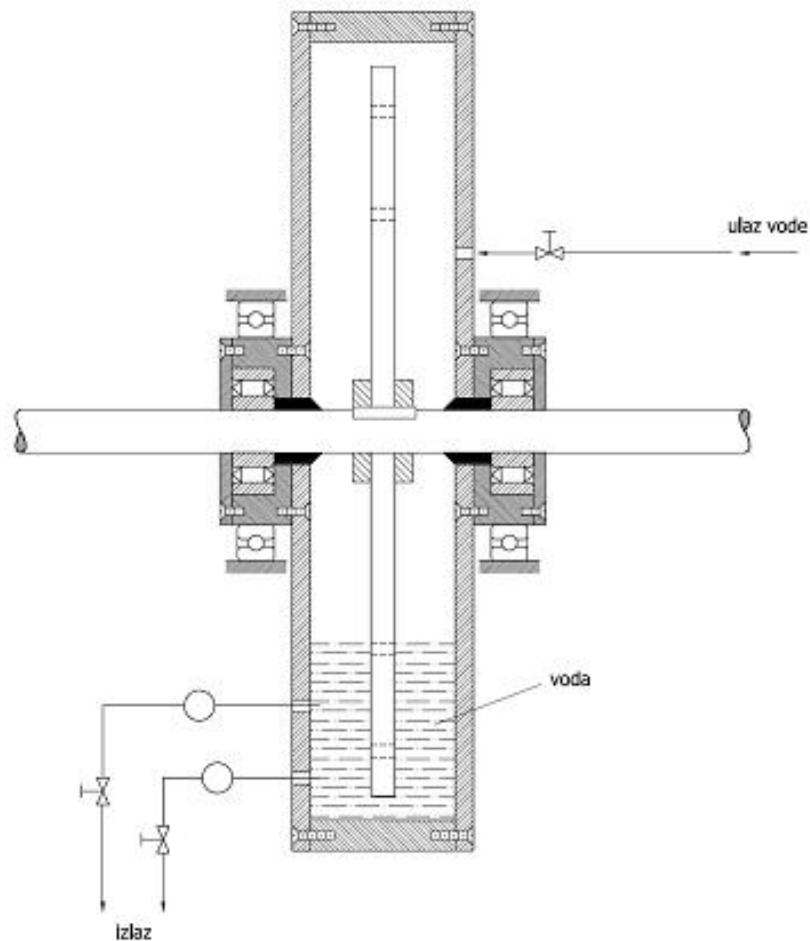
- Najjednostavniji tip apsorpcionog dinamometra je prony kočnica, koje su razvijene na čistoj frikciji (trenju) preko kog se konvertuje mehanička energija u toplotu.
- Postoji više tipova prony kočnica, dva su prikazana na slici 7.7.
- Drugi tip dinamometra funkcioniše na sličnim principima a **to je vodena kočnica**, koja koristi trenje u fluidu, koja usljed toga u fluidu razvija toplotu na račun ulazne mehaničke energije.
- Najjednostavniji primjer dinamometra sa kočanjem vodom je prikazan na slici 7.8.
- Kapacitet je funkcija dva faktora a to su brzina i nivo fluida (vode).
- Apsorpcija snage je aproksimativno funkcija kvadrata brzine, a apsorpcija na određenoj brzini može biti kontrolirana podešavanjem nivoa fluida (vode).

Mjerenje momenta mehaničkim dinamometrima



Slika 7.7. Dva tipa prony kočnice

Dinamometar – vodena kočnica

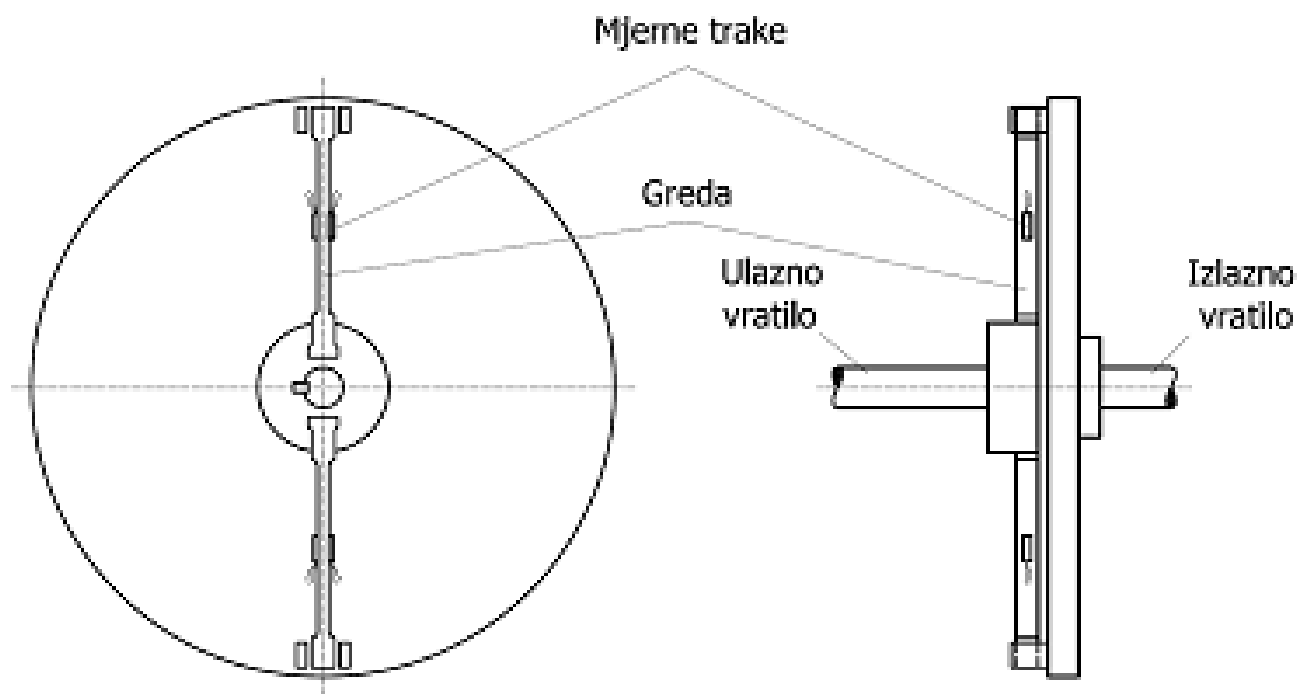


Slika 7.8. Presjek tipične vodene kočnice
obrni moment i snaga

Dobivanje obrtnog momenta

- Mjerenjem sile na poznatom poluprečniku, obrtni moment može se dobiti iz izraza:
- $T = F \cdot r$
- Ako je poznata ugaona brzina, snaga je definisana relacijom:
- $P = 2 \cdot T \cdot \pi \cdot \omega$
- gdje su:
- T – obrtni moment
- F – sila mjerena na poluprečniku r
- P – snaga
- ω – broj obrtaja u sekundi

Transmisioni dinamometar



Slika 7.9. Transmisioni dinamometar sa gredom i mjernim trakama za mjerenje obrtnog momenta

Transmisioni dinamometri

- Transmisioni dinamometri se mogu smatrati pasivnim uređajima. Postoje različiti tipovi transmisionih dinamometara. Različiti tipovi se koriste kod zupčastih sklopova, te kod remenih i lančanih prenosnika.
- Osnovu transmisionih dinamometara čini elastična epruveta koja je kalibrirana za određena naprezanja. Dinamometri ovog tipa su dostupni u izvedbama od 12 do 3500 Nm.
- Transmisioni dinamometar sa gredom i mjernim trakama za mjerenje obrtnog momenta prikazan je na slici 7.9.
- Ovaj tip dinamometara je osjetljiv na promjene temperature.

Mjerenje snage pomoću kočnica

- Mjerenje snage vrši se:

- transmisionim i

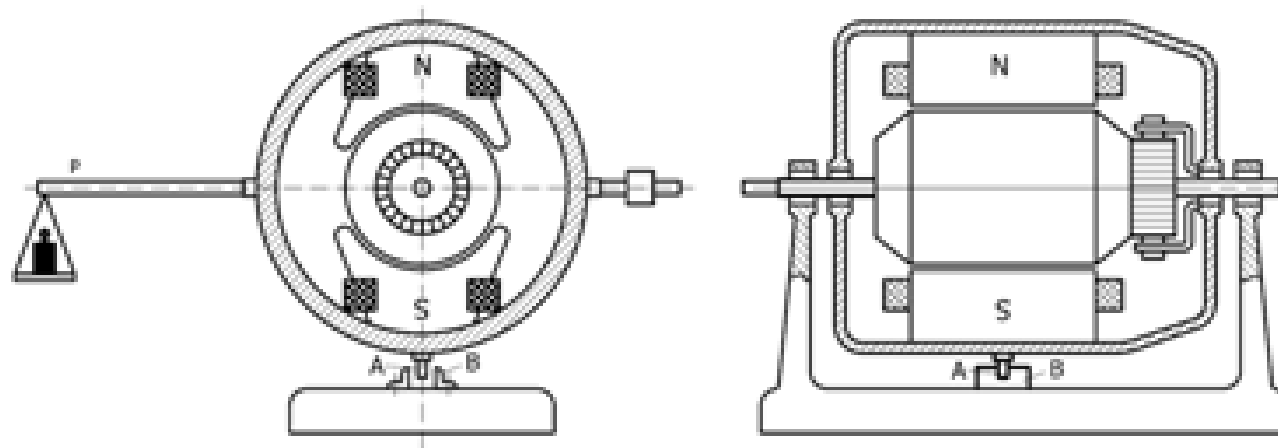
- apsorpcionim metodama

- Prethodno navedene metode mjerenja obrtnog momenta i preko njega preračunavanja snage spadaju u transmisione metode.

Metoda mjerenja snage pomoću kočnica spada u apsorpcione metode.

- Zavisno od toga da li se radi o energetske mašinama kao što su turbine, motori sa unutrašnjim sagorijevanjem, ili o radnim mašinama kao što su pumpe, ventilatori, kompresori, mašina se prilikom određivanja obrtnog momenta pogoni ili koči.

Električna kočnica-elektrodinamometar

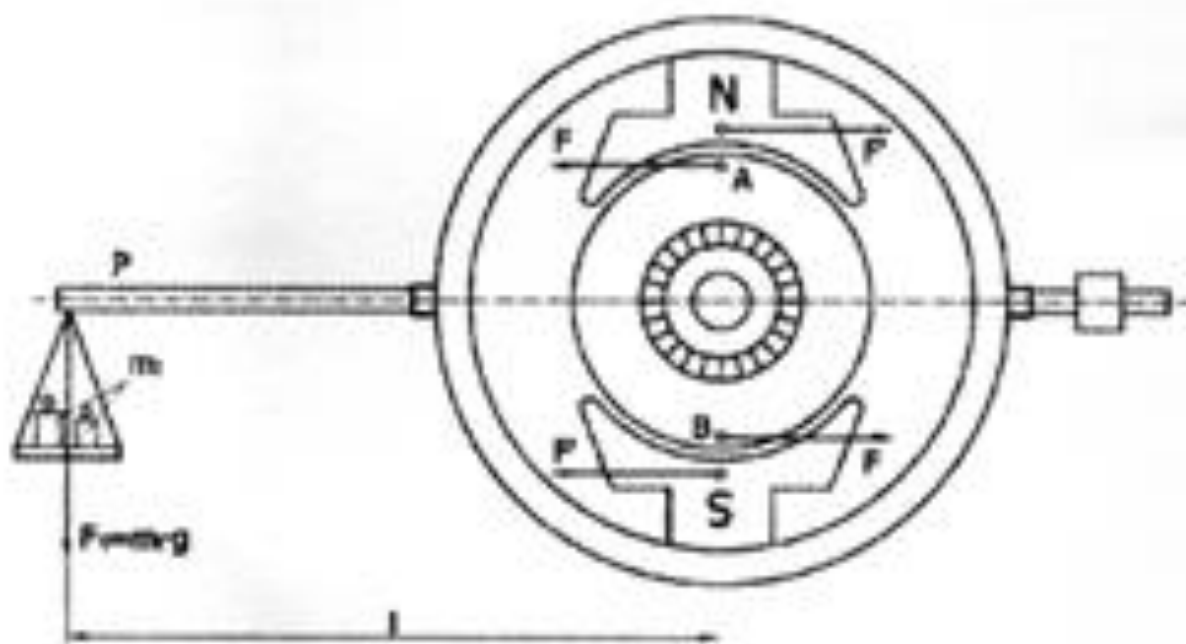


Slika 7.10. Elektrodinamometar

Princip rada elektrodinamometra

- **Za mjerenje snage motora najčešće se koriste električne kočnice tzv. elektrodinamometri.**
- Na slici 7.10. prikazan je elektrodinamometar kod kojeg je rotor oslonjen na dva ležišta u postolju.
- Stator se zajedno sa polovima oslanja na vratilo preko dva kotrljajuća ležaja tako da se oko vratila može zakretati, odnosno njihati. Ograničenje zakretanja postiže se graničnicima A i B na postolju.
- Za stator su vezane dvije poluge. Na kraju jedne poluge nalaze se tegovi za uspostavljanje ravnoteže prije mjerenja.

Mjerenje snage pomoću kočnice



Slika 7.11. Sile u elektrodinamometru kada radi kao generator

Mjerenje snage motora

- Prilikom mjerenja korisne snage ispitivanog motora, elektrodinamometar radi kao generator.
- Rotor se pri obrtanju, slika 7.11, obrće, a tegovima mase m_t uspostavlja se ravnoteža.
- U provodnicima A i B rotora usljed djelovanja magnetnih polova stvara se struja I .
- Provodnici presijecaju magnetno polje pa se javljaju sile F - F , koje obrazuju spreg suprotnog djelovanja u odnosu na obrtanje.
- Sile reakcije F' - F' obrazuju spreg suprotnog smjera koji nastoji da zakrene stator.
- Moment motora jednak je vrijednosti momenta sila F' - F' i iznosi:

Mjerenje snage motora

- $M = F_t \cdot l$
- gdje je:
- F_t – sila tegova
- l – udaljenost sile od ose vratila
- Snaga motora može se odrediti nakon što se izmjeri broj obrtaja n odnosno ugaona brzina ω .

$$P = M \cdot \omega = \frac{2\pi}{60} g \cdot m_t \cdot l \cdot n$$

- Vrijednost snage izračunate prema navedenom izrazu treba uvećati za iznos gubitaka trenja u ležištima vratila i ventilacionih gubitaka. Dodatne vrijednosti gubitaka se odrede i kao konstante pridodaju izmjerenim vrijednostima za svako pojedinačno mjerenje.

Ostali načini mjerenja snage i momenta

- Mjerenje pojedinačnih veličina vrši se ponaosob jednim instrumentom.
- Međutim za mjerenje snage ili stepena iskorištenja, koji su po prirodi proizvod ili količnik dvije mehaničke veličine koristi se složenija oprema ili više uređaja.
- **Tako npr. za mjerenje snage treba odrediti obrtni moment i broj okretaja tj. moraju se izmjeriti dvije nezavisne veličine i naći njihov proizvod.**