

MERENJE NEKIH FIZIČKIH VELIČINA PROMENOM KAPACITETA

Ing. Svetozar Milević

Savremena tehnička proizvodnja zahteva visoku preciznost obrade pojedinih delova. Sa druge strane, pri masovnoj proizvodnji sve veća je potreba za uvođenjem automatske kontrole, čime se smanjuje cena krajnjeg proizvoda. Problem visoke preciznosti uz automatsku kontrolu proizvoda dobro se rešava primenom savremenih elektronskih uređaja za kontrolu mera.

Ovde će biti opisan jedan takav uređaj, zasnovan na principu promene kapaciteta. Njegova primena je mnogostrana u više raznih oblasti. On omogućuje kontrolu dimenzija ravnih i rotacionih delova sa tolerancijom manjom od jednog mikrona. Uz pomoć oscilografa otkriva greške ekscentričnosti koje nastaju zbog neuravnoteženosti masa kod brzih obrtnih delova. Takođe može poslužiti za detektovanje i merenje i drugih veličina kao: potresa, hrapavosti materijala, temperature, pritiska, termičkih širenja i t.d.

U svim slučajevima merenja zadržan je princip da deo mernog uređaja sa primerkom koji se meri, i vazдушnim međuslojem, obrazuje kondenzator, čiji se kapacitet menja u saglasnosti sa promenama na primerku. Ova promena kapaciteta može se onda dalje na različite načine kontrolisati i poslužiti kao indikator promene mere ili položaja primerka. Tačnost, koja se pri tome može postići zavisi u prvom redu od konstrukcije samog mernog kondenzatora. Posmatrajmo takav kondenzator sa vazдушnom dielektrikom debljine l , koji obrazuju dve ravne provodne pločice površine S . Njegov je kapacitet

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{4\pi l}$$

Promena kapaciteta sa rastojanjem pločica je

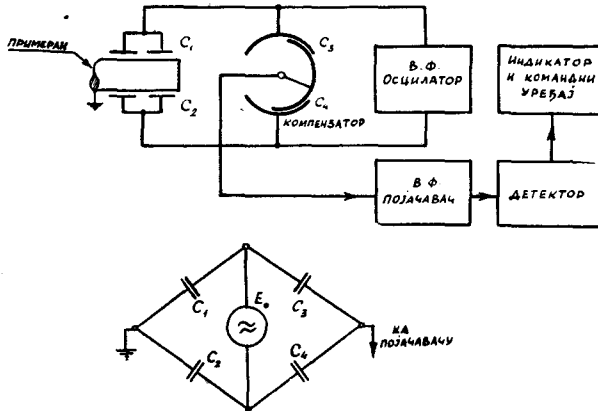
$$\frac{dC}{dl} = -\frac{\epsilon_0 \cdot S}{4\pi l^2}$$

ili

$$\frac{dC}{C} = -\frac{dl}{l}$$

Maksimalna vrednost ovog diferencijalnog količnika je ograničena konstruktivnim faktorima: dozvoljenom veličinom pločica (maksimalno C) i neravninama materijala (minimalno l).

Jedno dobro rešenje kontrole promene kapaciteta predstavlja kapacitivni most. Elektronski deo takvog uređaja sastoji se od jednog oscilatora pogodne visoke frekvencije, koji je priključen u dijagonalu mosta. Sam most se sastoji od četiri kondenzatora koje u slučaju kontrole napr. rotacionog dela, obrazuje sonda sa samim primerkom i kompenzacionim kondenzatorom (Sl. 1). U drugoj



Sl. 1

dijagonali mosta je priključen pojačavač sa detektorom i indikatorom. Pri tačnoj meri primerka podesi se kompenzacionim kondenzatorom ravnoteža mosta tj.

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{C_3}{C_4}$$

Svako odstupanje od željene dimenzije merenog dela, izaziva onda poremećaj ravnoteže mosta, što znači da se na ulazu pojačavača pojavi visokofrekventni napon, čija je veličina u izvesnim granicama srazmerna odstupanju mere. Pojačan i detektovan ovaj napon se vodi u indikator ili uređaj za zaustavljanje mašine, ukoliko je odstupanje prešlo dozvoljenu granicu. Samom konstrukcijom mernog kapaciteta (sonde) načinjeno je $C_1 \neq C_2$, kako se ne bi desilo da most ostane u ravnoteži pri jednakim promenama kapaciteta C_1 i C_2 .

Uređaj ima dobru stranu da je tačnost merenja nezavisna od event. promene frekvencije oscilatora. Sem toga on se lako podešava pomoću kompenzatora. Tačnost merenja je reda jednog mikrona pa i veća. Ipak, krupan nedostatak ovoga principa je jednosmerno pokazivanje greške na indikatoru, bilo da se radi o pozitivnim ili negativnim odstupanjima od mere, tj. ne pokazuje pravac odstupanja. Sem toga na tačnost merenja utiče promena amplitude VF oscilatora, što znači da on mora biti stabilizovan.

Drugi način kontrole veličine kapaciteta je preko frekvencije. U tom slučaju merni kondenzator je sastavni deo oscilatornog kola jednog oscilatora, tako da se njegove promene odražavaju u promenama frekvencije oscilovanja oscilatora. Ovaj princip nema nedostatke prethodnog, jer se pri promeni smeru greške u meri ispitivanog primerka, menja i smer frekventne devijacije oscila-

tora. Frekventna devijacija može se posredstvom diskriminatora pretvoriti u proporcionalni jednosmerni napon, pozitivnog i negativnog znaka, i dovesti na instrument za indikaciju. Da bi odredili domen tačnosti merenja ovom metodom, i faktore od kojih ona zavisi, formirajmo, kao i malopre, diferencijalni količnik promene frekvencije oscilatora i promene rastojanja pločica, kao nezavisno promenljive. Neka je rezonantna frekvencija oscilatornog kola, kao i celog oscilatora

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C+C_1)}} \quad (1)$$

gde je

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{4\pi l} \quad (2)$$

kapacitet mernog kondenzatora, C_1 ukupni parazitni kapacitet veza, kapaciteta za korekciju itd. Zamenom vrednosti (2) u izraz (1) imamo

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{\epsilon_0 S}{4\pi l} + C_1\right)}} \quad (3)$$

Deferenciranjem nalazimo

$$\frac{df_r}{dl} = \frac{\epsilon_0 \cdot S}{(4\pi l)^2 \left(\frac{\epsilon_0 S}{4\pi l} + C_1\right) \sqrt{L\left(\frac{\epsilon_0 S}{4\pi l} + C_1\right)}} \quad (4)$$

Zamenom oznaka iz formula (1), (2) i (3) možemo izraz (4) napisati u obliku

$$\frac{df_r}{dl} = \frac{f_r \cdot C}{2l(C+C_1)} \quad (5)$$

Kako se vidi ovde je veličina promene frekvencije u funkciji promene debljine dielektrika zavisna još i od usvojene frekvencije oscilatora. Napišimo ovaj izraz u konačnom obliku i rešimo ga po Δl .

$$\Delta l = \frac{2l(C+C_1)}{f_r \cdot C} \cdot (\Delta f_r) \quad (6)$$

U slučaju kada je merni kapacitet znatno veći od parazitnog kapaciteta veza i korekcionog kapaciteta, tj. kada je $C \gg C_1$, možemo približno pisati

$$\Delta l \approx 2l \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_r}\right).$$

Odavde jasno izlazi da je pri nekom datom rastojanju pločica, minimalna merljiva veličina zavisna samo od odnosa

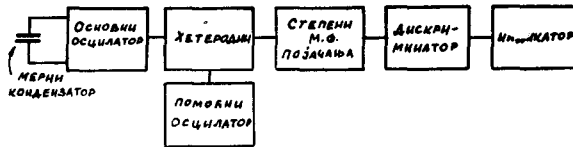
$$\frac{\Delta f}{f_r}$$

što znači od karakteristika i konstrukcije diskrimanatora. Uzmimo najčešći slučaj konstrukcije diskriminatora sa dve diode. Pri usvojenoj frekvenciji oscilatora od napr. 5 MHz. linearni deo karakteristike diskriminatora obuhvataće devijaciju od približno ± 100 KHz. Ako smatramo da je čitljivost na indikatorskom instrumentu dobra još pri 10 puta manjoj devijaciji tj. za $\Delta f = \pm 10$ KHz., onda je minimalna promena mere koja se može uočiti

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \cdot \frac{10}{5000} = 0,004$$

ili pri rastojanju pločica mernog kondenzatora od 1 mm, moguće je dakle meriti promene od 4 mikrona.

Znatno veća osetljivost instrumenta može se postići sa istim principom, uvođenjem heterodina. Frekvencija lokalnog oscilatora, razlikuje se u tom slučaju od frekvencije osnovnog oscilatora za iznos međufrekvencije. Sam pomoćni oscilator ima stabilnu frekvenciju, tako da se svako odstupanje u frekvenciji osnovnog oscilatora prenosi i na međufrekvenciju. Iza poslednjeg međufrekventnog stepena, koji je ujedno i limiter, sledi onda diskriminator sa instrumentom za indikaciju. Blok šema takvog uređaja data je na sl. 2.



Sl. 2

Prednost ovakve koncepcije odmah je jasna. Sa gledišta diskriminatora osnovna fekvencija je znatno niža, dok je veličina frekventne devijacije ostala ista. Ovo nam omogućava da postignemo znatno veću vrednost odnosa $\frac{f_r}{\Delta f_r}$, a time i osetljivost. Sa najčešćim vrednostima za faktor dobrote osc. kola diskriminatora od 120 do 140 i međufrekvencije od 450 do 480 KHz. lako se postiže pun linearni deo karakteristike diskriminatora za devijaciju od svega $\pm 2,5$ KHz. Dalja prednost ovog sistema je, da zahvaljući limiteru izlazni napon na diskriminatoru ne zavisi od eventualnih promena amplituda oscilovanja bilo kojeg od oscilatora. Uzimajući brojne podatke kao i u pređašnjem primeru, i zadržavajući i ovde da je čitljiva devijacija 10 puta manja od punog linearnog opsega, tj. $\pm 0,25$ KHz. nalazimo najmanju merljivu promenu

$$\Delta l = 2 \cdot 1 \cdot \frac{0,25}{5.000} = 0,1 \text{ mikron.}$$

Kako se vidi osetljivost je ovde znatno povećana. Odmah pada u oči da su u pogledu stabilnosti oscilatora ovde postavljeni vrlo strogi uslovi. Dalje povećanje osetljivosti instrumenta zavisno je zaista samo od ostvarene stabilnosti oscila-

tora. To naročito važi za osnovni oscilator, koji u principu ima promenljivu frekvenciju te ne može biti stabilisan kvarcom.

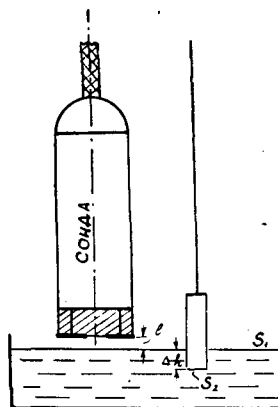
Na jednom ostvarenom ovakvom instrumentu izrađenom u Elektronskoj Laboratoriji Zavoda za Fiziku, na pomenutom principu postignuta je osetljivost instrumenta veća od jednog mikrona. Međutim pokazalo se da su stabilnost frekvencije obaju oscilatora kao i konstrukcija samog mernog kondenzatora, osnovni problemi na koje se mora obratiti najveća pažnja.

Pri baždarenju instrumenta ovako visoke preciznosti javljaju se takođe izvesne teškoće, jer se on ne može porediti sa nekim mehaničkim merilom. Stoga je baždarenje izvedeno na sledeći način: Sonda u kojoj je smešten osnovni oscilator postavljena je iznad suda sa elektrolitom, tako da su pločice mernog kondenzatora bile na rastojanju l od nivoa tečnosti u sudu (Sl. 3) Slobodna površina tečnosti u sudu je poznata i iznosi S_1 . Ako se sada u sud uroni metalni valjak sa površinom bazisa S_2 , tečnost u sudu će se podići, odnosno rastojanje l će se smanjiti za iznos

$$\Delta l = \frac{S_2}{S_1} \cdot \Delta h$$

gde je Δh dubina uronjenog dela valjka. Kako se odnos $\frac{S_2}{S_1}$ može načiniti proizvoljno mali (u posmatranom slučaju iznosio je 1:1000) to se mereći visinu Δl uronjenog dela metalnog valjka u mm., dobije povišenje nivoa tečnosti Δl u mikronima. Na ovaj način lako se postižu promene nivoa i manje od jednog mikrona. Sam merni kapacitet na sondi obrazovale su pri tome dve međusobno izolovane metalne pločice, postavljene u istoj ravni, koje su sa površinom elektrolita obrazovale redno spojene kapacitete (Sl. 3).

U koliko se instrument koristi za kontrolu mera pri izradi okruglih delova, pločice mernog kondenzatora načine se koncentričnim sa samim primerkom. Kontrola osovine motora, i drugih delova koji se obrću velikim brzinama, mora se vršiti pri samom pogonu, jer se često dešava da usled neuravnoteženosti masa osovina „baca“, izlazi iz svog normalnog položaja u radu. U takvim slučajevima kapacitet koji obrazuju pločice mernog kondenzatora sa samom osovinom periodično menja svoju vrednost. Time se u stvari vrši frekventna modulacija osnovnog oscilatora, koja se na izlazu diskriminatora pojavljuje kao odgovarajući naizmenični napon sa frekvencijom koja odgovara broju obrta osovine u sekundi. Ovaj naizmenični napon može se posmatrati i meriti ako se na izlaz diskriminatora priključi oscilograf.

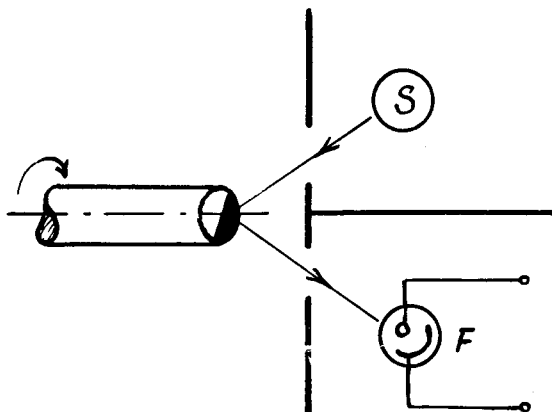


Sl. 3

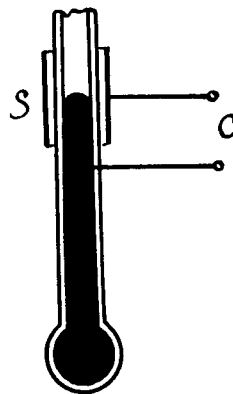
Ponekad je od važnosti da se tačno utvrdi ugaoni položaj tj. mesto neuravnoteženosti. Za ovu svrhu koristi se oscilograf sa kružnom vremenskom bazom. Vremenska baza se sinhronizuje sa brzinom obrtanja osovine koja se ispituje. Jedan od načina sinhronizacije vidi se na sl. 4. Na kraj osovine

čija je jedna polovina obojena tamno, pada zrak iz svetlosnog izvora S , i odbija se na fotočeliju F . Pri rotaciji osovine, naizmenično se menja intenzitet osvetljaja fotočelije, a pojačan napon sa njenih krajeva koristi se za sinhronizaciju. Zastor katodne cevi nosi ugaonu podelu, a ispitivana osovina tzv. „marker“, uz čiju se pomoć sa samog oscilograma odmah može lokalizovati tačno mesto ekscentriciteta.

Sa pogodnom konstrukcijom mernog kondenzatora može se lako kontinualno kontrolisati temperatura, u toku dužeg vremenskog perioda. U tom slučaju živa termometra i cilindrična metalna obloga S (Sl. 5) obrazuju merni kapacitet. Pri nekoj željenoj temperaturi, odnosno nivou žive, podesi se da je



Sl. 4



Sl. 5

izlazni napon na diskriminatoru ravan nuli. Svaka promena temperature javlja se onda kao proporcionalni napon, pozitivan ili negativan, koji može da se ubeležava na registratoru, upotrebi za signalizaciju, ili pokretanje nekog drugog uređaja. Na sličan način mogu se kod živinog manometra kontrolisati vrlo male promene pritiska i beležiti ih.

Ako se kao jedna obloga mernog kondenzatora koristi tečnost, kao u navedenom slučaju baždarenja, instrument dobro služi i kao registrator potresa.

U savremenoj proizvodnji automatska kontrola debljine pri izradi folija, hartije, zatim kontrola debljine raznih premaza, boja i t.d. pretstavlja samo neke od brojnih primera mnogostrane primene instrumenta na bazi promene kapaciteta.

SUMMARY

**THE MEASUREMENTS OF SOME PHYSICAL QUANTITIES
BY THE CHANGE OF A CAPACITY**

Several methods of measuring the small displacements by the capacitance change of a condenser are described. In the first method the value of capacitance is controlled by the bridge. In the other methods the measured capacitance is the part of an oscillatory circuit.

Thus the change of the capacitance value causes a frequency change of the circuit. It is found that this incremental frequency could be measured either directly with a discriminator or by means of the heterodine or local oscillator. The later method results in an extremely high sensitivity. In such a way the lengths and displacements as small as 10^{-5} cm or less can be measured.

Finally this method describes some measurements of other quantities, such as temperature, pressure etc.