

RAD JUGOSLAVENSKE AKADEMIJE ZNANOSTI I UMJETNOSTI

KNJIGA 422

RAZRED ZA MATEMATIČKE, FIZIČKE, KEMIJSKE I TEHNIČKE ZNANOSTI
KNJIGA XXIX

TEHNIČKE ZNANOSTI SVEZAK 3

Urednik
Izv. član VLADIMIR MATKOVIĆ

JUGOSLAVENSKA AKADEMIJA ZNANOSTI I UMJETNOSTI

RAD
JUGOSLAVENSKE AKADEMIJE
ZNANOSTI I UMJETNOSTI

422

TEHNIČKE ZNANOSTI

SVEZAK 3



ZAGREB 1986

Naponska vaga za 10 kV i 2×5 g

Vojislav Bego

Prispjelo 27. svibnja 1985.

Prihvaćeno 26. lipnja 1985.

Nakon dugogodišnje orijentacije Zavoda za osnove elektrotehnike i električna mjerenja na precizna metrološka mjerenja, započeli su u proljeće 1978. godine radovi na razvoju naponske vage. Godine 1981. dovršena je i ispitana naponska vaga za 10 kV i uteg od 2 grama s cilindričnim elektrodama. Već kod te vage ostvarena je mogućnost dovodenja elektroda pod naponom u centrični položaj u kojem ne djeluju horizontalne elektrostatske sile i mogućnost vertikalnog pomicanja visokonaponskih elektroda za 50 mm kako bi se teško mjerljiva parcijalna derivacija dC/dz mogla nadomjestiti razlikom kapaciteta pri pomaku od 50 mm. Izvedeno je elastično ovješenoje etalonskog utega, koji se postepeno podiže posebnim podizačem. Pri tome se istodobno automatski povisuje napon između elektroda, tako da za vrijeme cijelog postupka zamjene težine utega elektrostatskom silom vaga ostaje praktički u ravnotežnom položaju. Time je bitno smanjena nesigurnost vaganja napona i svedena je na manje od 1 ppm.

Daljnjim teorijskim istraživanjima uočene su prednosti koje pruža pločasta izvedba elektroda ako se niskonaponska elektroda ovjesi pomoću dvije razmaknute vrpce. Time se ograničava utjecaj horizontalnih sila i dobiva povoljniji omjer između elektrostatske sile i težine ovješene elektrode. Koncem 1983. godine dovršena je naponska vaga za 10 kV i 10 grama s pločastim elektrodama kojom je ostvarena interna mjerna nesigurnost znatno ispod jedne milijuntinke. Sad se dovršava poboljšana verzija takve vage u kojoj se podizanje utega, te horizontalno i vertikalno pomicanje visokonaponske elektrode obavlja daljinski i automatski pomoću posebnoga zatvorenog hidrauličkog sistema.

U ovom su radu u sažetom obliku opisana teorijska istraživanja i analize na kojima se temeljio razvoj ovih naponskih vaga.

U drugom je poglavlju sažet pregled današnje mjerne nesigurnosti u određivanju jedinice jakosti struje strujnim vagama, pomoću Faradayeve konstante i žiromagnetskog omjera protona γ_p u slabom i jakome magnetskom polju. Rezultati se međusobno rasipaju znatno više od njihovih deklariranih mjernih nesigurnosti.

Treće poglavlje sadrži kratak pregled dosad realiziranih naponskih vaga.

U četvrtom poglavlju prikazan je osnovni princip ponderometrijskog izvođenja jedinice napona i analizirana su svojstva kapacitivnih pretvornika s promjenljivim razmakom između elektroda te onih s cilindričnim i pločastim elektrodama.

Peto poglavlje zahvaća teoriju polužne vage s dva para ovjesnih vrpca. Dani su izrazi za proračun osjetljivosti i pomaka

koje uzrokuju uzdužne i poprečne horizontalne sile i nepodudaranje gravitacijske sile etalonskog utega s vertikalnom elektrostatskom silom. Prikazano je automatsko održavanje ravnotežnog položaja pomoću povratne veze između otklona ovješene elektrode i napona na vagi. Opisan je i mehanizam za postepeno podizanje etalonskog utega.

U šestom je poglavlju proračun osnovnih dimenzija elektroda i njihovih zaobljenja kod kojih se postiže faktor iskorisćenja polja od 0,95. Proveden je i proračun mehaničke čvrstoće elektroda kojim se osigurava da se svijanjem elektroda zbog djelovanja elektrostatskih sila ne unose pogreške veće od 0,01 ppm. Analiziran je utjecaj nesavršenosti mehaničke obrade na mjerne rezultate. Opisana je metoda kojom se eksperimentalno utvrđuje razlika kapaciteta između elektroda kod istosmjerne i izmjenične struje zbog nečistoća na površini elektroda.

U sedmom poglavlju detaljno su analizirani uvjeti u kojima se napon može odrediti iz ukupne promjene kapaciteta između elektroda i pripadnoga vertikalnog pomaka bez ikakvih korekcija. Određeni su horizontalni pomaci ovješene elektrode pod naponom pri kojima su korekcije zbog horizontalne elektrostatske radnje zanemarive. Opisan je uređaj za daljinsko automatsko centriranje visokonaponske elektrode s mogućnošću njezina namještanja unutar nekoliko nanometara.

Osmo poglavlje obuhvaća kapacitivne pretvornike kojima se u naponskoj vagi mjere vertikalni i horizontalni otkloni ovješene i visokonaponske elektrode, a pomoću njih se mogu zapaziti pomaci reda jednog nanometra.

U devetom poglavlju nalazi se visokonaponsko djelilo za 10 kV složeno od 1000 jednakih otpornika s temperaturnim koeficijentom otpora nižim od 1 ppm, koji su tako raspoređeni da se pod naponom jednako griju. Predviđen je izvod za 10 V i 100 izvoda za padove napona od 100 V. Opisan je postupak baždarenja u hladnom stanju i pod naponom.

U radu iznijete analize pokazuju da se sve interne pogreške opisane naponske vage mogu održati ispod 0,1 ppm, tako da pogreška u određivanju jedinice napona praktički ovisi samo o vanjskim fizikalnim veličinama, kao što su: masa etalonskog utega, kapacitet upotrijebljenoga etalonskog kondenzatora, pomak elektrode, težno ubrzanje i još neki drugi činioci, ali od manjeg utjecaja. To potvrđuje pregled ostvarenih rezultata naponskim vagama ETF-a u desetom poglavlju. Mjerni rezultati od srpnja 1981. godine do lipnja 1985. godine dobiveni s dvije naponske vage različitih izvedbi, u nejednakim uvjetima i pomoću različitih mjernih postupaka, međusobno se vrlo dobro poklapaju. Uzevši u obzir težine rezultata dobiva se da srednja razlika između napona dobivenog pomoću dvije naponske vage ETF-a i $V_{7\text{-}B1}$ iznosi: 7,08 ppm. Standardna devijacija podataka ($V_{\text{ETF}} - V_{7\text{-}B1}$) izračunata iz razlika između pojedinačnih mjerenja i njihove srednje vrijednosti, iznosi samo 0,28 ppm. Prikazani su najvažniji pokusi što su omogućili ocjenu nesigurnosti dviju već dovršenih naponskih vaga i razlozi zbog kojih se očekuju još bolji rezultati s naponskom vagom u izgradnji. Teorijska razmatranja i brojna već provedena prethodna mjerenja pokazuju da se od nje može očekivati smanjenje mjerne nesigurnosti usporjedbe elektrostatske sile i težine utega na manje od 0,1 ppm. Slično vrijedi i za visokonaponsko djelilo. Dogovorena je pomoć PTB-a i NBS-a u baždarenju etalona mase, etalona kapaciteta, vertikalnog pomaka elektroda i lokalnog gravitacijskog ubrzanja kao i pouzdaniji prijenos napona. Tada se može očekivati da bi se jedinica napona volt mogla odrediti s nesigurnošću od 0,15 do 0,3 ppm, što bi bio vrlo značajan doprinos u boljem poznavanju elektromagnetskih jedinica.

1. UVOD

Na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu započeta su u Zavodu za osnove elektrotehnike i električna mjerenja istraživanja na razvoju naponske vage u proljeće 1978. godine. Početni eksperimenti na modelu potvrdili su prikladnost osnovnih zamisli pa je već 1981. godine dovršena i ispitana naponska vaga s cilindričnim elektrodama za 10 kV i uteg od 2 grama, kojoj je interna relativna mjerna nesigurnost bila blizu jedne milijuntinke. Daljnjim teorijskim istraživanjima uočene su prednosti koje pruža pločasta izvedba elektroda ako se na poseban način objesi niskonaponska elektroda, pa je koncem 1983. godine dovršena naponska vaga za 10 kV i uteg od 10 grama s pločastim elektrodama kojom je ostvarena interna mjerna nesigurnost ispod jedne milijuntinke.

Početna istraživanja na razvoju naponske vage bila su potaknuta željom da i naša znanstvena sredina pridonese poboljšanju točnosti određivanja osnovnih elektromagnetskih jedinica. Međutim, zbog relativno jednostavnog određivanja napona pomoću naponske vage, pogotovo ako se cijeli postupak »vaganja« dobro automatizira, otvara se mogućnost njezine upotrebe i kao sekundarnog etalona napona od 1 V do 10 kV istosmjerne i izmjenične struje. Takvo rješenje moglo bi korisno poslužiti u svakome bolje opremljenoj elektrotehničkom laboratoriju za baždarenje elektroničkih etalona napona, kalibratora i digitalnih voltmetara. Zbog toga su naša daljnja istraživanja usmjerena u tom pravcu, pa je u izgradnji gotovo potpuno automatizirana naponska vaga za 10 kV i uteg od 10 grama s pločastim elektrodama, koja će ovdje biti detaljnije opisana.

2. DOSADAŠNJA MJERNA NESIGURNOST U ODREĐIVANJU OSNOVNIH ELEKTROMAGNETSKIH JEDINICA

Osnovno svojstvo današnjega međudržavno prihvaćenog Međunarodnog sistema jedinica SI je njegova koherentnost. Nju je moguće ostvariti u području elektromagnetizma jedino tako da se osnovna elektromagnetska jedinica odredi izjednačivanjem istorodne mehaničke i elektromagnetske fizikalne veličine. Tako se primjerice strujnom vagom uspoređuje elektromagnetska sila s gravitacijskom silom etalonskog utega. Strujne vage bile su sve do u najnovije doba nepouzdaniji uređaji za određivanje jedinice jakosti električne struje. Mjerni rezultati ostvareni u posljednjih 25 godina pojedinim izvedbama strujnih vaga s obzirom na vrijednost pohranjenu u BIPM-u (Bureau International des Poids et Mesures), označeni s A_{76-B1} i njihove mjerne nesigurnosti prikazani su na slici 2.1 [1] ... [9]).

Naponskim vagama uspoređuje se elektrostatska sila s gravitacijskom silom etalonskog utega. Rezultati koje su dobili N. Elnekave i dr. s pločastim elektrodama i zaštitnim prstenom [11], te početni podaci što ih je dobio G. I. Slogget i dr. s tekućinskim elektrometrom [8] predočeni su također na slici 2.1.

Razvoj kvantne i atomske fizike ostvario je brojne nove mogućnosti ustanovljivanja elektromagnetskih jedinica i prirodnih konstanta.

Ovdje ćemo nabrojiti samo neke od njih. Mjerenja što ih je obavio Deslattes [6] u razdoblju od 1974. do 1980. godine pomoću optičke interferometrije i izotopske masene spektroskopije na silicijevim kristalima dala su ovu vrijednost za Avogadrovu konstantu:

$$N_A = 6,022\,097\,8 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} \quad (\text{nesigurnost oko } 1 \text{ ppm uz } P = 68 \text{ \%}).$$

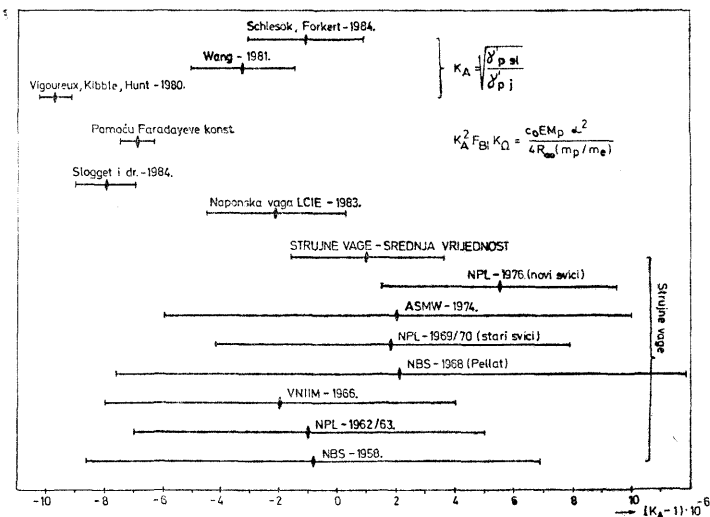
Slično je dobio i PTB. Ta se vrijednost čak za +8,8 ppm razlikuje od one koju je 1973. godine preporučila CODATA (International Council of Scientific Unions, Committee on Data for Science and Technology). Bower i Davis su 1980. godine za elektrokemijski ekvivalent srebra dobili:

$$E = 1,117\,966\,46 \text{ mg A}_{76\text{-BI}}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (\text{nesigurnost oko } 1 \text{ ppm}). \quad (2.1)$$

Budući da su Powell, Murphy i Gramlich 1982. godine utvrdili da molarna masa upotrebljavanog srebra iznosi 107,868 147 ($u \approx 1 \text{ ppm}$), za Faradayevu se konstantu dobiva:

$$F = 96486,03 \text{ A}_{76\text{-BI}} \cdot \text{s} \cdot \text{mol}^{-1}. \quad (2.2)$$

Mjerna nesigurnost tako određene Faradayeve konstante procjenjuje se na 1 ppm, a razlika od vrijednosti iz 1973. godine iznosi čak 15,2 ppm! Time za naboj elektrona e izlazi:



Sl. 2.1. Vrijednosti jedinice jakosti struje dobivene raznim metodama prema vrijednosti pohranjenoj u BIPM-u 1976. godine

$$c = \frac{F}{N_A} = 1,602\,199\,7 \cdot 10^{-19} \text{ C}, \quad (2.3)$$

što je za 6,6 ppm više od vrijednosti preporučene 1973. godine.

Vodeći računa o koherentnosti Međunarodnog sistema jedinica dolazi se do odnosa:

$$F_{BI} K_A K_{\Omega} = \frac{c E M_p \alpha^2}{4 R_{\infty} (m_p/m_e)}. \quad (2.4)$$

- K_A i K_{Ω} — omjer između realiziranih jedinica u BIMP-u i pravih njihovih vrijednosti ($A_{BI} = K_A A$; $\Omega_{BI} = K_{\Omega} \Omega$)
- E — realizirana recipročna vrijednost kvanta magnetskog toka $\frac{2e}{h} = E(\text{GHz}/V_{BI}) = E/K_A K$; $E = 483\,594 \text{ GHz (V)}$
- c — brzina svjetlosti ($299\,792\,458,0 \text{ m/s}$)
- M_p — molarna masa protona ($M_p = 10,012\,765 \cdot 10^{-4} \text{ kg}$)
- α — konstanta fine strukture ($\alpha = \frac{1}{2} \mu_0 e^2 c^2 / h = 7,297\,354\,86 \cdot 10^{-3}$, $\alpha = 0,16 \text{ ppm}$)
- R_{∞} — Rydbergova konstanta za beskonačnu masu ($R_{\infty} = \frac{m_e c \alpha^2}{2 h} = 10\,973\,731,521 \text{ m}^{-1}$); pomoću Dopplerove laserske spektroskopije (Hausch, 1974) i atomskog snopa (Armin, 1982) ostvarena je mjerna nesigurnost od samo 0,001 ppm
- m_p/m_e — omjer mase protona i elektrona ($m_p/m_e = 1836,152\,45$; $\alpha = 0,05 \text{ ppm}$)

Faktor K_{Ω} može se danas ustanoviti s relativno malom nesigurnošću od samo 0,1 ppm uz pomoć Thompson-Lampardova računskog etalona kapaciteta. Novije usporedbe nacionalnih etalona otpora kod pojedinih država, koje imaju taj računski etalon, s onima u BIMP-u (1976) pokazuju da bi trebalo uzeti $K_{\Omega} \approx 1 - 0,6 \cdot 10^{-6}$, pa ako se to skupa s ostalim navedenim konstantama uvrsti u izraz (2.4), dobiva se:

$$K_A = 1 - (6,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}, \quad (2.5)$$

što je također uvršteno u sliku 2.1.

Još je jedna mogućnost određivanja faktora K_A , i to pomoću omjera γ'_p (žiomagnetski omjer protona u H_2O) određenoga u slabome magnetskom polju (γ'_{pl}) i jakome magnetskom polju (γ'_{pj}). Naime, slaba magnetska polja postižu se pomoću vrlo pažljivo izrađenih svitaka protječnih strujom. Tu se magnetska indukcija u svitku izračunava na temelju njegovih dimenzija, broja zavoja, konstante μ_0 i struje koja protječe svitkom ($B = \mu_0 N_1 I$, gdje je N_1 broj zavoja po jedinici duljine). Zbog toga je:

$$\gamma'_{pl} = \gamma'_p K_A. \quad (2.6)$$

Za dobivanje jakih polja koristi se jezgrama od vrlo mekih magnetskih materijala. Tu se magnetska indukcija određuje mjereći silu F koju ona izaziva na vodičima protjecanima strujom I ($B = F/\tilde{I}$, gdje je l duljina vodiča u polju). Tu vrijedi:

$$\gamma'_{pi} = \gamma'_p/K_A. \quad (2.7)$$

Utvrđeno je da je žiromagnetski omjer γ'_p neovisan o magnetskoj indukciji pa se dijeljenjem izraza (2.6) sa (2.7) dobiva mogućnost određivanja faktora K_A :

$$K_A = \sqrt{\frac{\gamma'_{psl}}{\gamma'_{pi}}}. \quad (2.8)$$

Na osnovi mjerenja γ'_{pi} što su ih 1979. godine obavili Kibble i Hunt te mjerenja γ'_{psl} koja je 1980. godine proveo Vigoureux [4], dobiva se: $K_A = 1 - (9,73 \pm 0,57) \cdot 10^{-6}$. Mjerenja koja je učinio 1981. godine Wang [6] daju: $K_A = 1 - (3,27 \pm 1,8) \cdot 10^{-6}$. Još veće razlike pokazuju mjerenja o kojima su 1984. godine izvijestili Schlesok i Forkert [9]: $K_A = 1 - (1,1 \pm 2) \cdot 10^{-6}$.

Opisani današnji postupci realizacije ampera daju rezultate koji se znatno rasipaju (sl. 2.1), mnogo više nego što to pokazuju njihove deklarirane mjerne nesigurnosti. Očito je da kod nekih od njih nisu uočene sve djelujuće sistematske pogreške. Zbog toga se u vodećim metrološkim laboratorijima intenzivno radi na daljnjoj provjeri i usavršavanju postojećih, ali i na uvođenju novih postupaka, temeljenih na najnovijim dostignućima moderne fizike. Primjer neka bude otkriće kvantiziranoga Hallova otpora R_H (Klitzing, 1980), koji je u pogledu reproducibilnosti ravan Josephsonovu kvantu magnetskog toka:

$$R_H = \frac{h}{e^2 i} = \frac{25\,812,80}{i} \, \Omega \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (2.9)$$

Unapređenju točnosti pridonijet će sve bolje razumijevanje prirodnih pojava i njihove međusobne povezanosti. Evo nekih odnosa između prirodnih konstanta, utvrđenih u novije vrijeme, koji će pridonijeti točnijem određivanju elektromagnetskih jedinica i samih prirodnih konstanta [6]:

$$\alpha^{-1} = \frac{2}{\mu_0 c} \frac{\Omega_{LAB}}{\Omega} (R_H)_{LAB} \quad (2.10)$$

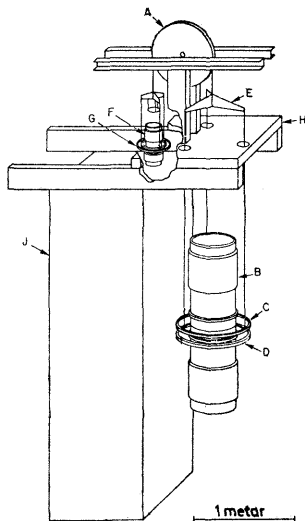
$$\alpha^{-2} = \frac{c}{4 R_\infty} \frac{1}{(\Omega_{LAB}/\Omega)} \frac{\mu'_p (2e/h)_{LAB}}{\mu_B \gamma'_{psl LAB}}. \quad (2.11)$$

Pri tome je μ'_p/μ_B magnetski moment protona iskazan Bohrovim magnetonom, koji se danas nalazi s mjernom nesigurnošću od 0,05 ppm. (Veličine s indeksom LAB određene su oslanjajući se na korištene etalone, a one bez indeksa nemaju pogreške.)

Primjer pokušaja koji se temelje na unapređenju već davno poznatih rješenja je strujna vaga koja se upravo dovršava u NBS (sl. 2.2.).

To je u biti poznata Pellatova vaga iz 1887. godine, no tehnološki mnogo savršenija, bitno većih dimenzija i u supravodljivom stanju, što će omogućiti da se postignu elektrodinamske sile reda od 10 N. Očekuje se mjerna nesigurnost reda 0,1 ppm [5], [7].

Sl. 2. 2 Nova strujna vaga NBS-a u izgradnji A — Okretni sistem vage izveden u obliku aluminijskog kotača ϕ 610x25 mm preko kojeg je prebačeno brončano uže. B — Nepomični glavni svici (u supravodljivom stanju) za dobivanje magnetskog polja. Izvedeni su u dvije suprotno motane sekcije tako da se u središnjoj ravni ostvaruje radijalno polje. Mali kompenzacijski svitak u sredini oblikuje polje tako da je njegova jakost obrnuto proporcionalna s radijusom. C — Pomični ovješeni svitak promjera 70 cm i kvadratičnog presjeka namota 1x1 cm. D — Svitak identično motan kao i svitak C ali fiksiran o referentnu masivnu ploču H. Ovaj svitak služi za identifikaciju nepoželjnih pomaka za magnetiziranje i ujedno je na njega učvršćen nepomični dio laserskog interferometra. E — Desni trokraki nosač, učvršćen na brončano uže, koji nosi ovješeni svitak i zdjelicu s etalonskim utegom. F i G — Pomoćne, umanjene kopije glavnih svitaka B i C ali izrađene za sobne temperature. One upravljaju gibanjem vage za vrijeme postupka mjerenja »brzina-napon«. H — Masivna ploča poduprta snažnim drvenim gredama. J — Noseci stup iz vapnenca.



O pokušajima na unapređenju naponskih vaga bit će riječi u idućem poglavlju.

3. PREGLED RAZVOJA NAPONSKIH VAGA

3.1. STARIJE IZVEDBE

Prvu nama poznatu naponsku vagu ostvario je davne 1834. godine W. Snow-Harris [12]. Tu se napon na donju izoliranu pločastu elektrodu dovodi iz ladjenske boce, a nastala se elektrostatska sila uravnotežava dodavanjem utega na zdjelicu obješenu o suprotnom kraku vage. Rješenje je, dodavanjem zaštitnog prstena, unaprijedio 1867. godine W. Thompson [13].

Prvu naponsku vagu s cilindričnim elektrodama razradili su E. Bisbat i R. Blondlot 1886. godine u dvije varijante, od kojih je druga manje osjetljiva na djelovanje horizontalnih elektrostatskih sila zbog posebnog načina ovješanja visokonaponske elektrode [14].

3.2. NOVIJE IZVEDBE THOMPSONOVE VAGE

Početkom ovog stoljeća ostvareno je mnoštvo rješenja koja su omogućavala »apsolutno« određivanje najčešće visokih napona istosmjerne i izmjenične struje za tadašnje prilike u vrlo visokoj točnosti, reda 0,01 %. Ipak se njima nije koristilo za realizaciju osnovnih elektromagnetskih jedinica uglavnom zbog tad nedovoljno stabilnih visokonaponskih izvora, nepouzdatih visokonaponskih djelila i nedovoljno točnih etalonskih kondenzatora. U tu su svrhu služile samo strujne vage. Prvi je Šveđanin R. Ohlön uočio kako je otkrićem Thompson-Lampardova računskog etalona kapaciteta ostvaren preduvjet da naponska vaga posluži kao pramjerilo napona [15]. U njegovu rješenju su na oba kraka jednokrake vage obješene pločaste elektrode sa zaštitnim prstenom. Primjenom povratne veze automatski se održava ravnoteža vage. Napon se određuje pomoću poznate težine utega, *izmjenjenog kapaciteta* između elektroda i njihova međusobnog razmaka. Koliko nam je poznato, ovo rješenje nije realizirano. N. Elnekave, A. Fau i F. Delahaye iz LCIE-a (Laboratoire Central des Industries Electrique, Pariz) izradili su naponsku vagu s pločastim elektrodama i zaštitnim prstenom [11], [16], [17]. Elektrode su od vrlo fino brušena taljenog kvarca, a ovješena elektroda ima promjer od 100 mm. Standardna devijacija pojedinačnih vaganja tom vagom (1983) iznosila je 12,6 ppm, a srednje vrijednosti iz 190 pojedinačnih mjerenja 0,95 ppm. Mjerna nesigurnost procijenjena je na 2,4 ppm. U njoj prevladavaju nesigurnosti u određivanju razmaka između elektroda (1,5 ppm) i rubnih efekata na ovješenoj elektrodi (1 ppm).

3.3. NAPONSKA VAGA ETL

Japanci T. Yamazaki, K. Shida i M. Kanno [18], [19], [20], [21] izradili su prvu naponsku vagu s pločastim elektrodama kod koje se vertikalno pomiču visokonaponske elektrode (metoda promjene elektrostatske energije). Tu se napon određuje iz poznate težine utega, promjene kapaciteta između elektroda zbog pomicanja visokonaponskih elektroda iz donjega u gornji položaj i iz mjerenja tog pomaka. Prednost tog rješenja je u tome što se pomak može mjeriti mnogo točnije nego razmak između elektroda, što je potrebno kod Ohlönove i LCIE vage. Koliko nam je poznato, dosad nisu objavljeni rezultati mjerenja tom vagom, navodno zbog teškoća s oklapanjem elektroda.

3.4. NAPONSKA VAGA NBS

Na razvoju naponske vage u NBS-u (National Bureau of Standards, Washington) radi već dugo godina F. K. Harris [22]. Njegova vaga ima jednu ovješenu cilindričnu elektrodu duljine 190 mm s unutrašnjim polumjerom od 93,955 mm i vanjskim od 97,980 mm. Izrađena od aluminija ima masu 2,35 kg, a izvedena od mjedi 5,47 kg. Visokonaponsku elektrodu tvore dva cilindra duljine 250 mm. Vanjski polumjer manjeg cilindra je 85,725 mm, a unutrašnji većega 107,415 mm.

Upotrijebljena je kilogramska vaga NBS br. 2, s tim što je razmak između nožastih ležajeva povećan na 75 mm. Obavljeni su pokusi s aluminijском elektrodom kod napona od 4020 V. Pri tom naponu dobiva se elektrostatska sila od 0,01 N pa se supstitucija provodi etalonskim utegom od 1 g, što znači da je omjer između težine ovjesene elektrode i elektrostatske sile čak 2350. Postignuta je rezolucija i stabilnost reda $1 \mu\text{g}$. Ako se umjesto aluminijske elektrode upotrijebi mjedena elektroda, može se zbog njezine veće težine priključiti napon od 9000 V i postići elektrostatska sila od 0,0491 N. Tad je omjer između težine ovjesene elektrode i elektrostatske sile nešto povoljniji i iznosi $5470/5 = 1094$. Kapacitet u gornjem i donjem položaju mjeri se mostom za mjerenje kapaciteta NBS tip 2 (autor: R. D. Cutkosky), s kojim se dobiva rezolucija od nekoliko stomilijuntinki.

Vrlo detaljnu analizu pogrešaka njegova rješenja proveo je M. E. Cage [23], koja je pokazala da zbog nekontroliranih horizontalnih pomaka ovjesene elektrode one mogu doseći od 5 do 20 ppm. Naime, F. K. Harris se oslanjao na vrlo preciznu obradu elektroda te nije prevideo mogućnost mjerenja horizontalnih pomaka ovjesene elektrode pod naponom, pa ni njihovo otklanjanje finim ugađanjem centričnog položaja pod naponom.

3.5. NAPONSKA VAGA ETF-ZAGREB ZA 10 kV i 2 g

Razvoj naponske vage na ETF-Zagreb započeo je u proljeće 1978. godine. Naponska vaga za 10 kV i 2 g s cilindričnim elektrodama dovršena je 1981. godine [II/2]. Vrlo mala standardna devijacija vaganja napona dobivena je ovim zahvatima (sl. 3.1.a i b):

- supstitucija gravitacijske sile etalonskog utega elektrostatskom silom provodi se polaganim podizanjem elastično ovjesenoga etalonskog utega; pri tome se automatski povisuje napon između elektroda tako da vaga ostaje stalno u ravnotežnom položaju, što bitno smanjuje utjecaj nesavršenosti ležajeva ili ovjesnih vrpca (poz. 19 na sl. 3.1);
- predviđeno je mjerenje horizontalnih pomaka i zakretanja ovjesene elektrode pomoću vrlo osjetljivih kapacitivnih pretvornika što skupa s finim mehanizmom za centriranje elektroda omogućuje da se praktički izbjegnu dodatni pomaci ovjesene elektrode pod naponom (poz. 11, 13, 14, 28 i 29 na sl. 3.1);
- vertikalni otkloni ovjesene elektrode mjere se također pomoću vrlo osjetljivoga kapacitivnog pretvornika u povratnoj vezi s izvorom napona priključenim na elektrode, što omogućuje da se ravnotežni položaj vage održava unutar nekoliko nanometara (poz. 15 na sl. 3.1);
- oklapanje elektroda tako je provedeno da je parcijalna derivacija kapaciteta priključenoga na napon, po vertikalnom pomaku ovjesene elektrode, potpuno jednaka parcijalnoj derivaciji kapaciteta između visokonaponske i mjerne elektrode po vertikalnom pomaku visokonaponske elektrode, što je prijeko potrebno da bi se mogao primijeniti integrirajući postupak (odjeljak 4.4.1);

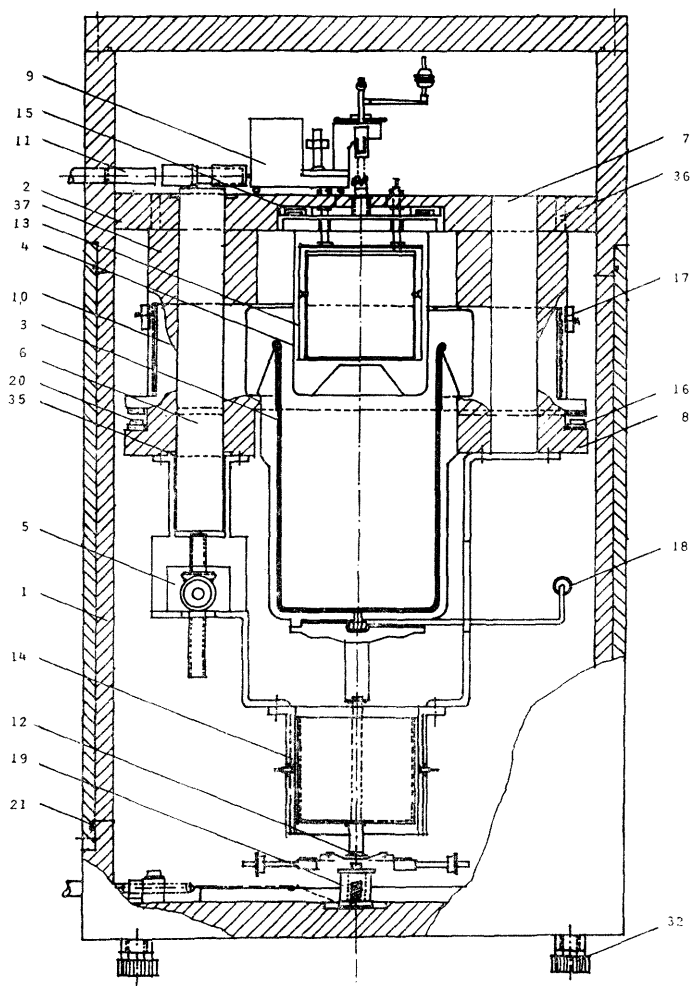
— vaga je smještena u trostrukom kućištu termostatanome na $\pm 0,001^\circ\text{C}$. Unutrašnje je kućište zabrtvljeno i ispunjeno suhim dušikom.

3.6. NAPONSKA VAGA ETF-ZAGREB ZA 10 kV i 10 g S PLOČASTIM ELEKTRODAMA

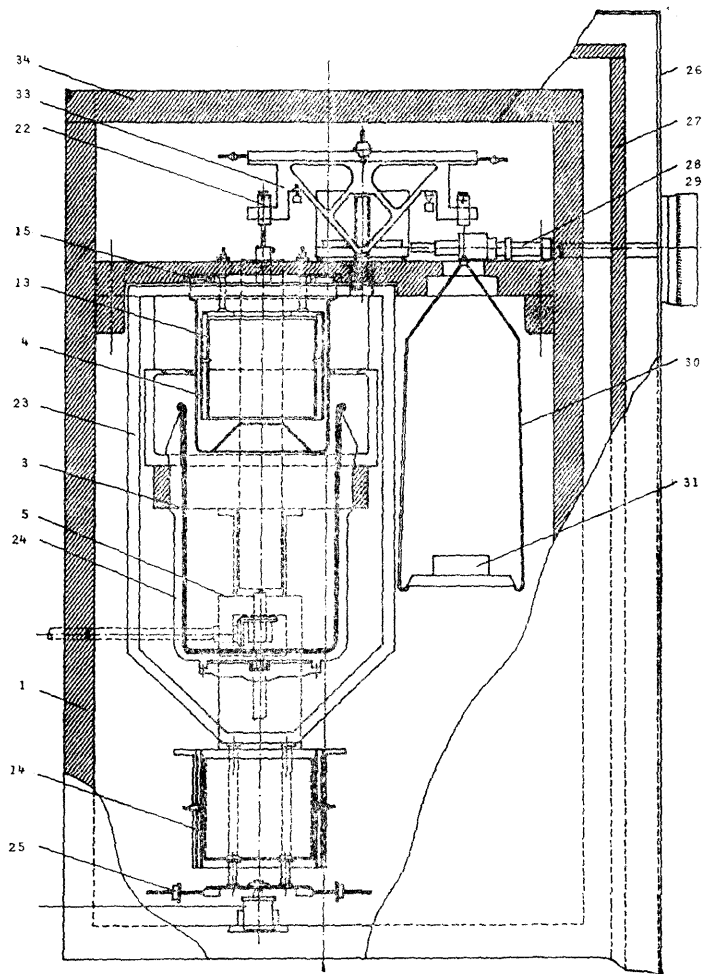
Kod izvedbe naponske vage s cilindričnim elektrodama bilo je potrebno spustiti težište ovješene elektrode što niže i dodatno povećati njezinu težinu, kako bi se dobilo da vaga ne pobjegne iz centričnog položaja zbog djelovanja horizontalnih elektrostatskih sila. U ovoj izvedbi elektrode su pločaste i ovješene dvjema tankim vrpčama međusobno znatno razmaknutima pa horizontalne sile ne mogu vagu izbaciti iz centričnog položaja [11/9]. Zbog toga nije bilo potrebno dodatno povećati težinu elektroda. Tako je dobiven znatno povoljniji omjer između elektrostatske sile i težine ovješene elektrode, što vaganje čini preciznijim. To je ujedno omogućilo da se u kućištu čak nešto manjem od onoga kod vage s cilindričnim elektrodama dobije pet puta veća elektrostatska sila. Predviđena su dva etalonska utega po 5 grama i odvojeno napajanje prednje i stražnje grupe elektroda. To omogućuje sedam raznih kombinacija vaganja i znatno povećava pouzdanost cjelokupnog postupka vaganja.

Sl. 3.1.a i b — Legenda:

1 — zabrtvljeno unutrašnje kućište vage od tvrdog aluminijsa; 2 — nosiva (referentna) ploča vage; 3 — visokonaponska elektroda VN; 4 — niskonaponska elektroda ZV; 5 — mehanizam za vertikalno podizanje VN-elektrode; 6 — osovina za vertikalno podizanje VN-elektrode; 7 — osovina za sprečavanje radijalnih pomaka u Y-smjeru VN-elektrode; 8 — nosač mjerke 5 i 50 mm; 9 — nosač glavnog ležaja mehaničke vage i uređaja za aretiranje; 10 — nosač visokonaponske elektrode u kojem je kruto nabijena osovina 6; 11 — mikrometar za pomicanje ZV-elektrode u X radijalnom smjeru; 12 — mjerni uteg $m_E = 2\text{ g}$; 13 — kapacitivni pretvornik gornjeg indikatora pomaka za X-smjer; 14 — kapacitivni pretvornik donjeg indikatora pomaka za X-smjer; 15 — kapacitivni pretvornik za mjerenje aksijalnih pomaka zavješene elektrode; 16 — kapacitivni pretvornici za baždarenje položaja $z = 0$ i $z = 50\text{ mm}$ pomoću mjerki 50 mm; 17 — linijski kapacitivni davač za memoriranje položaja $z = 0$ i $z = 50\text{ mm}$; 18 — visokonaponski kabel za 10 kV; 19 — mehanizam za podizanje utega $m_E = 2\text{ g}$; 20 — čelična mjerka 5 mm; 21 — prednji poklopac unutrašnjeg kućišta; 22 — zavjesište; 23 — nosivi okvir donjih kapacitivnih pretvornika, utega za balansiranje i utega m_E ; 24 — izolacijski oklop VN-elektrode; 25 — utezi za balansiranje (otklanjanje nagiba) zavješene elektrode; 26 — vanjsko kućište od tvrdog aluminijsa; 27 — srednje kućište od tvrdog aluminijsa; 28 — mikrometar za pomicanje ZV-elektrode u Y-smjeru; 29 — skala mikrometra za pomicanje ZV-elektrode u Y-smjeru; 30 — zdjelica za taru i utege od 2 g; 31 — protutuž zavješena na desnom kraku vage; 32 — nožice za ugađanje nagiba osovine 6; 33 — krak (poluga) precizne mehaničke vage; 34 — gornji poklopac unutrašnjeg kućišta vage; 35 — teflonski ležaj osovine za vertikalno vođenje VN-elektrode; 36 — otvor za prolazak laserske zrake pri baždarenju davača 17; 37 — nepomični stalak vage



Sl. 3.1.a Naponska vaga ETF-Zagreb za 10 kV i 2 g s cilindričnim elektrodama — pogled s prednje strane



Sl. 3.1.b Naponska vaga ETF-Zagreb za 10 kV i 2 g s cilindričnim elektrodama -
pogled s bočne strane

3.7. NAPONSKA VAGA PTB

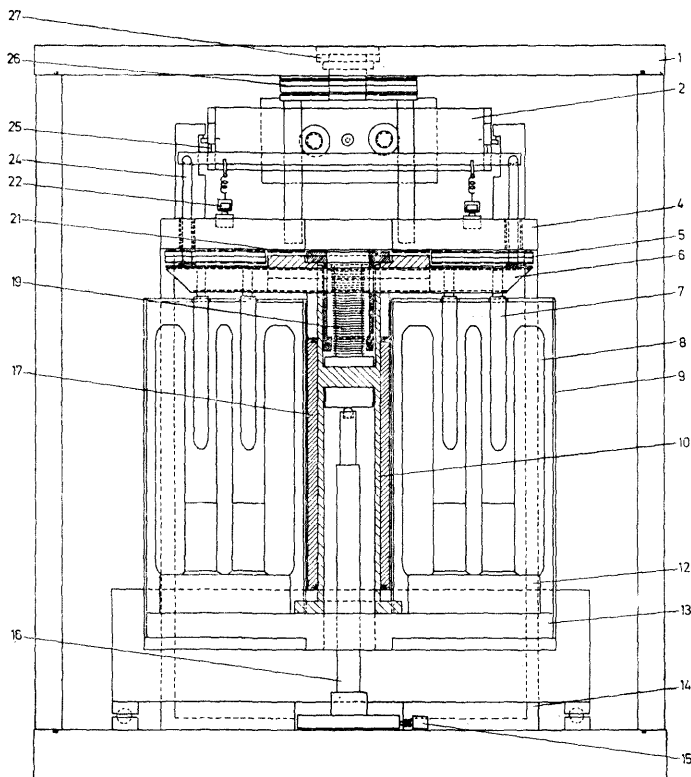
U suradnji s ETF-Zagreb dovršava se u PTB-u (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig) naponska vaga za 10 kV i 2 g s cilindričnim elektrodama [24], [25], [26], [27]. Tu se stup za vođenje visokonaponske elektrode nalazi unutar ovješene elektrode pa je bilo potrebno dodati zaštitnu elektrodu. Očekuje se da će mjerna nesigurnost određivanja napona iznositi 0,34 ppm. U tome nesigurnost poznavanja mase sudjeluje sa 0,25 ppm, gravitacijske konstante sa 0,025 ppm, gustoće suhog dušika sa 0,02 ppm, gustoće utega sa 0,01 ppm, usporedba sila sa 0,125 ppm, pomaka (50 mm) sa 0,06 ppm, razlike kapaciteta sa 0,1 ppm, dodatnoga pomoćnog napona sa 0,05 ppm, transfera napona sa 0,02 ppm, usporedbe s transferom napona 0,01 ppm i omjera djelila sa 0,15 ppm. Vanjski promjer ovješene elektrode je 126 mm, a unutrašnji visokonaponske 142 mm. Visina vage bez oklopa i postolja je 1210 mm. Udaljenost od ovjesišta do etalonskog utega je 792 mm.

3.8. NAPONSKA VAGA ETF-ZAGREB U IZGRADNJI

(sl. 3.2.a i b)

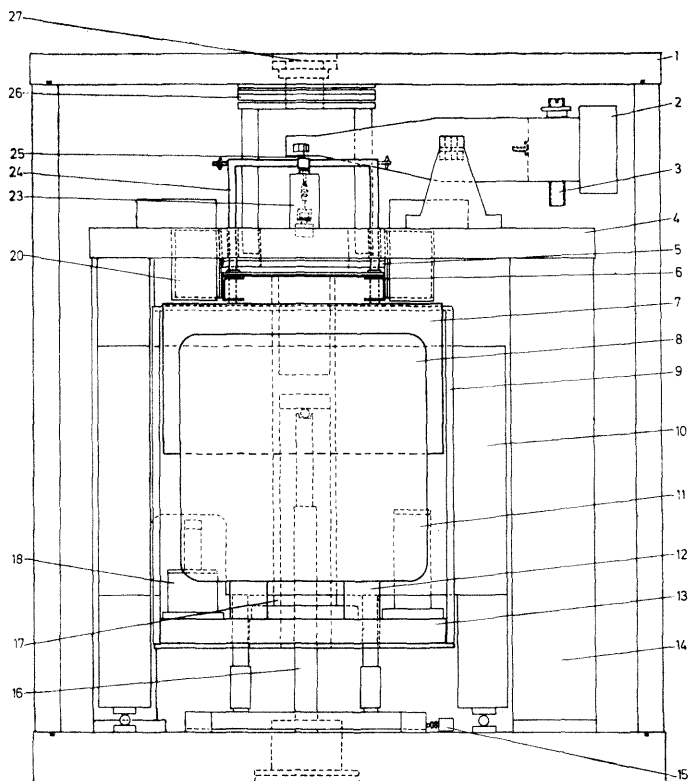
Naponska vaga ETF-Zagreb za 10 kV i 2×5 g, koja se upravo dovršava poboljšana je izvedba već opisane naponske vage u odjeljku 3.6. Predviđena su ova bitnija poboljšanja:

- povećana je duljina kraka mehaničke vage od 70 na 120 mm, što će oko tri puta povećati njezinu osjetljivost;
- ugađanje centričnog položaja ovješene elektrode provodi se finim horizontalnim pomicanjem visokonaponskih elektroda;
- ugađanje centričnog položaja ovješene elektrode, podizanje i spuštanje etalonskih utega, vertikalno pomicanje visokonaponske elektrode i aretiranje ovješene sustava neće se provoditi pomoću osovine koje prolaze kroz zabrtvljeno kućište, već uz pomoć elektronički upravljanih hidrauličkih sistema. To će omogućiti potpunu automatizaciju vaganja. Osim toga očekuje se da će se time bitno smanjiti poremećaji ravnotežnog položaja vage do kojih je dolazilo ručnim okretanjem zabrtvljenih osovine. Hidrauličko upravljanje provodit će se posebnim postupkom bez pokretnih mehaničkih dijelova;
- mehanički su ojačane ovješene i visokonaponske elektrode;
- predviđena su dodatna mjerenja vertikalnih pomaka sustava za vođenje visokonaponskih elektroda pomoću odgovarajućih kapacitivnih pretvornika;
- pojačana je toplinska izolacija triju kućišta kako bi se još više smanjio temperaturni gradijent u vagi;
- razrađen je novi postupak izrade ovješene elektrode.



Sl. 3.2.a Naponska vaga ETF-Zagreb za 10 kV i 2×5 g u izgradnji — pogled s prednje strane (perspektivna skica na strani 115)

1 — zabrtvljeno unutrašnje kućište vage od aluminija (srednje na kojem je ogrijevni namot i vanjsko kućište s toplinskim izolacijama nisu prikazani na slici); 2 — mehanička vaga; 3 — vijak za ugađanje osjetljivosti naponske vage; 4 — nosiva (referentna) ploča vage; 5 — nepomične elektrode kapacitivnih pretvornika za mjerenje otklona vage i fino ugađanje ravnotežnog položaja, referentni kondenzatori pretvornika; 6 — nosivi okvir ovješene elektrode s uzemljenim elektrodama za mjerenje otklona; 7 — pozlaćene ovješene elektrode; 8 — pozlaćene visokonaponske elektrode; 9 — oklop mehanički povezan s visokonaponskim elektrodama; 10 — tijelo vage koje se može horizontalno pomicati; 11 — osovina koja sprečava zakretanje visokonaponskih elektroda; 12 — izolatori visokonaponskih elektroda; 13 — ploča koja nosi visokonaponske elektrode; 14 — noge koje nose

Sl. 3.2.b Naponska vaga ETF-Zagreb za 10 kV i 2×5 g u izgradnji — bočni pogled

referentnu ploču 4; 15 — hidraulički mehanizam za horizontalno pomicanje visokonaponskih elektroda; 16 — hidraulički mehanizam za vertikalno pomicanje visokonaponskih elektroda; 17 — vodeća osovina visokonaponskih elektroda; 18 — elektronička libela koja mjeri nagib visokonaponskih elektroda; 19 — kapacitivni pretvornik koji mjeri vertikalne pomake visokonaponskih elektroda, s reflektorom za laserske zrake; 20 — nepomične elektrode za mjerenje horizontalnih pomaka obješene elektrode i tijela 10 prema referentnoj ploči 4; 21 — kapacitivni pretvornik za mjerenje vertikalnih pomaka tijela 10; 22 — etalonski utezi od 5 g s mehanizmom za njihovo podizanje; 23 — hidraulički mehanizam za aretiranje obješene elektrode; 24 — nosač obješene elektrode s utezima za balansiranje; 25 — ovjesne vrpce obješene elektrode; 26 — kapacitivni pretvornik za mjerenje vertikalnih pomaka poklopca; 27 — okno za laserske zrake i ležište interferometra

4. OPĆENITO O PONDEROMETRIJSKOM IZVOĐENJU JEDINICE NAPONA

4.1. OSNOVNI PRINCIP

Prema Međunarodnom sistemu jedinica SI osnovna jedinica za područje elektromagnetizma jest jedinica jakosti električne struje, amper. Njezina definicija: »Amper je ona stalna električna struja koja prolazeći dvama paralelnim, ravnim, neizmjereno dugačkim vodičima, zanemarivo malena kružnog presjeka, razmaknutim 1 metar u vakuumu, uzrokuje između njih silu od $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru duljine« nije očito prikladna za doslovnu realizaciju. Osim toga, način na koji je ona definirana bitno je drukčiji od onoga kako su definirane osnovne jedinice mehanike: metar, sekunda i kilogram. Dok su one definirane neovisno jedna o drugoj, amper se definira pomoću sve te tri jedinice. Tako je postupljeno zbog brojnih principijelnih i povijesnih razloga u koje ovdje nećemo zalaziti [28]. Napomenimo samo da je takvom definicijom ampera zapravo propisana vrijednost prirodne konstante μ_0 (permeabilnost vakuuma), jer iz te definicije izravno izlazi:

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \quad (4.1)$$

Zbog toga je moguće da se izvedene jedinice elektromagnetizma farad i om mogu danas proizvesti s bitno manjom relativnom mjernom nesigurnošću nego osnovna jedinica amper. Postupak njihova dobivanja prikazan je na slici 4.1. Slično tome se i izvedena jedinica volt dobiva izravno, što pruža mogućnost da se i ona ustanovi točnije od osnovne jedinice ampera. Pri tome se definicija jedinice napona koja glasi: »Volt je električni napon između dviju točaka homogenoga žičanog vodiča kojim prolazi stalna električna struja od 1 ampera, a utrošena snaga između ovih dviju točaka iznosi 1 vat« pokazuje jednako tako nepraktična za doslovnu realizaciju kao i definicija ampera. Prikladnije se pri tome sa stajališta točnosti koristiti pretvorbom mehaničke u električnu energiju u kapacitivnom pretvorniku kao što je to naponska vaga.

Na osnovi zakona o održanju energije bit će suma mehaničke radnje $F \cdot ds$ zbog pomaka elektrode za ds u smjeru sile F i promjene električne energije dW_e jednaka nuli:

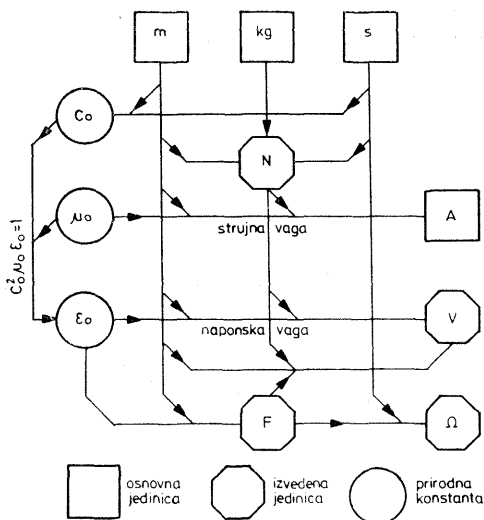
$$F ds + dW_e = 0. \quad (4.2)$$

Ako elektrode nisu priključene na izvor napona, ostat će nepromijenjen naboj Q u pretvorniku pa će promjena energije dW_e iznositi:

$$dW_e = d\left(\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C}\right) = -\frac{1}{2} \frac{Q^2}{C^2} dC = -\frac{1}{2} U^2 dC. \quad (4.3)$$

Ako su elektrode priključene na stalan napon U , promjena će električne energije biti:

$$dW_e = d\left(\frac{1}{2} CU^2\right) + U dQ = \frac{1}{2} U^2 dC - U^2 dC = -\frac{1}{2} U^2 dC, \quad (4.4)$$



Sl. 4. 1. Prikaz izvođenja jedinica struje i napona pomoću strujne i naponske vage

dakle jednako kao i u izrazu (4.3), pa se za oba slučaja dobiva uvrštavanjem u (4.2):

$$F ds = \frac{1}{2} U^2 dc$$

ili:

$$U = \sqrt{2 F \frac{ds}{dC}} \quad (4.5)$$

Iz izraza se uočava da se napon može ustanoviti iz poznate sile F i parcijalne derivacije dC/ds , a za jedno i drugo nije potrebna realizirana jedinica jakosti struje amper.

Danas se još uvijek sila F najtočnije dobiva pomoću gravitacijske sile etalonskog utega uzevši pri tome u obzir i uzgon zraka ili plina u kojem se uređaj nalazi:

$$F = m_E g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right). \quad (4.6)$$

Tu je: m_E masa etalonskog utega, g je težno ubrzanje, ρ_a gustoća zraka ili plina, a ρ_m je gustoća etalonskog utega.

Budući da će se u daljnjim razmatranjima vertikalna os u kojoj djeluje gravitacijska sila označavati sa z , to iz jednadžbi (4.5) i (4.6) izlazi:

$$U = \sqrt{2mg(1 - \rho_n/\rho_m)} \frac{dz}{dC}. \quad (4.7)$$

Pri tome se masa etalonskog utega iznosa npr. 10 g može danas odrediti, koristeći se vrhunskim dometima mjeriteljstva, s relativnom mjernom nesigurnošću od 0,1 ppm, a težno ubrzanje g s nesigurnošću od samo 0,01 ppm [II/10]. Dalje se pažljivim mjerenjem gustoće utega i plina može izraz u zagradama $(1 - \rho_n/\rho_m)$ odrediti s mjernom nesigurnošću od otprilike 0,05 ppm, što sve zajedno, bez derivacije dC/dz , daje mjerne nesigurnost od samo: $\frac{1}{2} \sqrt{0,1^2 + 0,01^2 + 0,05^2} = 0,056$ ppm. To je

mnogostruko manje od mjerne nesigurnosti uz koju se danas određuje jedinica jakosti struje i napona (≈ 5 ppm), pa je očito da pri određivanju jedinice napona U pomoću izraza (4.7) najveće teškoće stvaraju preostala veličina u tom izrazu dC/dz te osjetljivost i ponovljivost postupka usporedbe elektrostatske sile s težinom utega.

4.2. OPTIMALNI OBLIK KAPACITIVNOG PRETVORNIKA

Prema dosad iznesenome, treba odabrati takav oblik kapacitivnog pretvornika da se što bolje udovolji ovim zahtjevima:

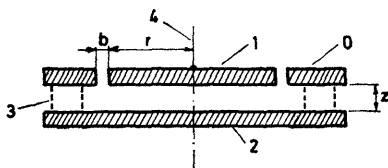
- a) da se derivacija dC/dz može što točnije odrediti, npr. s mjernom nesigurnošću manjom od 1 ppm;
- b) da se omogućiti supstitucija težine utega elektrostatskom silom uz stalno održavanje vage u ravnotežnom položaju;
- c) da se postigne što manji omjer između težine F_0 elektrode ovješene o krak vage i djelujuće elektrostatske sile F_e ;
- d) da se osigura stabilan rad ovješene elektrode kako ne bi došlo do njezina bježanja iz centričnog položaja zbog djelovanja horizontalnih sila;
- e) da bude moguće brtvljenje pretvornika i njegovo punjenje neutralnim plinom.

Poznate su ove izvedbe pretvornika: s promjenljivim razmakom između elektroda, s promjenljivom djelujućom površinom elektroda koje su cilindričnog ili pločastog oblika. Razmotrit ćemo redom kako nabrojene izvedbe udovoljavaju spomenutim zahtjevima.

4.3. PRETVORNICI S PROMJENLJIVIM RAZMAKOM IZMEĐU ELEKTRODA

(sl. 4.2)

Takvu je izvedbu sa zaštitnim prstenom prvi izradio W. Thompson, a u novije vrijeme R. Ohlon te N. Elnekave i dr. iz LCIE-a.



Sl. 4.2. Kapacitivni pretvornik s promjenljivim razmakom između elektroda; 0 — uzemljeni zaštitni prsten; 1 — ovješena elektroda; 2 — visokonaponska elektroda, 3 — izolatori; 4 — ovjes

4.3.1. Derivacija dC/dz

Uz zanemarene rubne efekte izlazi:

$$C = \varepsilon \frac{r^2 \pi}{z} \quad (4.8)$$

$$\frac{dC}{dz} = -\frac{\varepsilon r^2 \pi}{z^2} = -\frac{C}{z}. \quad (4.9)$$

Elektrostatska sila između elektroda nije, dakle, stalna, već se mijenja obrnuto proporcijalno razmaku z .

Premda se nastoji postići što manji razmak b između ovještene i zaštitne elektrode (kod naponske vage LCIE iznosi 0,15 mm), ipak rubni efekti nisu zanemarivi. Uzevši ih u obzir prema približnom izrazu [29], dobiva se:

$$C = \varepsilon \pi \left[\frac{(2r + b)^2}{4z} - \frac{2(2r + b)}{\pi} \right] (\beta \operatorname{tg} \beta + \ln \cos \beta) \quad (4.10)$$

pri čemu je $\beta = \arctg b/2z$. Budući da je $b < 2z$, možemo u ovim općim razmatranjima uzeti $\beta \approx b/2z$, odnosno $\beta \operatorname{tg} \beta = b^2/4z^2$, a $\ln \cos \beta \approx -b^2/8z^2$, pa uvrstivši u (4.10) izlazi:

$$C \approx \frac{\varepsilon \pi}{4z} \left[(2r + b)^2 - \frac{(2r + b)b^2}{\pi z} \right]. \quad (4.11)$$

Označimo: $y(z) = z C(z)$, pa će biti:

$$\frac{dC}{dz} = - \left(1 - \frac{y'(z)}{C(z)} \right) \frac{C(z)}{z} = - \left[1 - \frac{\varepsilon (2r + b)b^2}{4z^2 C(z)} \right] \frac{C(z)}{z}. \quad (4.12)$$

Za primjer ćemo uzeti dimenzije kakve su kod naponske vage LCIE: $2r = 0,1001$ m, $b = 0,15 \cdot 10^{-3}$ m, $z = 0,01$ m, pa se dobiva: $C = 6,988\,678$ pF, a derivacija iznosi:

$$\frac{dC}{dz} = - (1 - 7,144 \cdot 10^{-6}) \frac{6,988\,678}{0,01} = -698,862\,8 \text{ pF/m}.$$

Kod $U = 10$ kV dobiva se elektrostatska sila:

$$F_e = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{dz} = 0,034\,943 \text{ N.}$$

Iz primjera vidimo da bi se derivacija dC/dz mogla odrediti na dva načina:

- da se najvećom mogućom točnošću izmjere dimenzije $2r$, b i z pa se pomoću izraza (4.10) i (4.12) izračuna dC/dz ; tu bi se za postizanje mjerne nesigurnosti od 0,1 ppm morao npr. srednji promjer $2r$ izmjeriti s nesigurnošću od samo 5 nm, a slično tome i ostale dimenzije, što je i uz najbolju mjernu opremu neostvarljivo;
- da se izmjeri samo razmak z , a kapacitet C i $y(z) = z C(z)$ izmjere se odgovarajućim mjernim mostom oslanjajući se na kapacitivne etalone baždarene pomoću računskoga Thompson-Lampardova kapaciteta. Tako je postupio LCIE. Razmak z između zaštitne i visokonaponske elektrode ostvarili su pomoću vrlo fino brušenih kvarcnih uložaka, a ovješenu elektrodu održavaju u istoj ravnini sa zaštitnom elektrodom mjereći poravnatost njihovih rubova posebnim interferencijskim postupkom. Uza sve to nesigurnost mjerenja razmaka $z = 10$ mm iznosi oko 30 nm ili 3 ppm, što je i razumljivo jer je riječ o mjerenju razmaka između dviju ipak nesavršenih površina. Zbog sličnih razloga mjerna nesigurnost pri određivanju izraza $[1 - y(z)/C(z)]$ iznosi oko 2 ppm.

Ukupna nesigurnost u određivanju dC/dz kod naponske vage LCIE, prema njihovim navodima, iznosi $\sqrt{3^2 + 2^2} = 3,6$ ppm ili, reducirano na mjereni napon: $3,6/2 = 1,8$ ppm.

4.3.2. Supstitucija težine utega elektrostatskom silom

Kod naponske vage LCIE ne održava se vaga pri supstituciji u stalnoj ravnoteži. Zbog toga je i rasipanje pojedinačnih vaganja znatno (oko 12 ppm). Ipak bi se i tu mogla vaga održati u stalnoj ravnoteži ako bi se predvidjelo daljinsko dovodenje zaštitne elektrode u ravninu ovješene elektrode, daljinsko postepeno podizanje etalonskog utega i automatsko ugađanje napona između elektroda, što je očito vrlo teško ostvariti.

4.3.3. Omjer F_e/F_g

Elektrostatska sila po jedinici površine ovješene elektrode iznosi:

$$f_e = \frac{F_e}{S}, \quad (4.13)$$

a tu je S površina ovješene elektrode. Budući da je:

$$F_e = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon \cdot S}{z^2} = \frac{1}{2} E^2 \epsilon S,$$

pri čemu je E jakost polja između elektroda, uvrštavanjem u (4.13) dobiva se:

$$f_e = \frac{1}{2} E^2 \epsilon. \quad (4.14)$$

Ako je d debljina ovješene elektrode, a ρ je njezina gustoća, onda će za njezinu težinu po jedinici površine biti $f_o = \rho d g$, pa omjer f_o/f_e iznosi:

$$\frac{f_o}{f_e} = \frac{2 \rho d g}{\epsilon E^2}. \quad (4.15)$$

Kod naponske vage LCIE ostvareno je: $d = 0,01$ m, $\rho = 2070$ kg/m³, $g = 9,81$ m/s² i $E = 1000$ kV/m, pa se dobiva: $f_o/f_e = 45,87$. Da bi se dobio omjer F_o/F_e , treba omjer f_o/f_e pomnožiti omjerom između ukupne mase ovješene elektrode s dijelovima za ovješanje i mase same elektrode:

$$\frac{F_o}{F_e} = \frac{f_o}{f_e} k = \frac{2 \rho d g k}{\epsilon E^2} \quad (4.16)$$

Omjer k kod vage LCIE iznosi: $k = 1,84$, pa će biti $F_o/F_e = k f_o/f_e = 1,84 \cdot 45,87 = 84,4$, što je relativno povoljno.

4.3.4. Stabilnost

Na djelić površine $r d a dr$ (sl. 4.3) djeluje elektrostatska sila:

$$dF = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon r da dr}{(z + r \gamma \cos a)^2} \quad (4.17)$$

i elektrostatski moment dM s obzirom na os y :

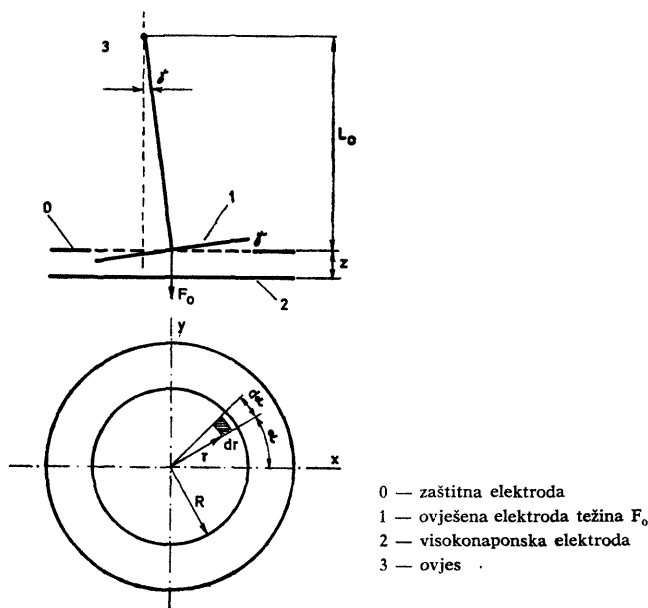
$$dM = dF r \cos a = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon r^2 \cos a}{(z + r \gamma \cos a)^2} da dr.$$

Ukupni moment zbog nagiba ovješene elektrode za kut γ iznosi:

$$M_\gamma = \frac{1}{2} U^2 \epsilon \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r^2 \cos a}{z^2 [1 + (r \gamma \cos a)/z]^2} da dr.$$

Za mali kut γ vrijedi:

$$\begin{aligned} M_\gamma &\approx \frac{1}{2} U^2 \epsilon \int_0^{2\pi} \int_0^R \frac{r^2 \cos a}{z^2} \left[1 - \frac{2r \gamma \cos a}{z} + 3 \left(\frac{r \gamma \cos a}{z} \right)^2 - \dots \right] da dr \approx \\ &\approx - \frac{U^2 R^4 \epsilon \pi}{4 z^3} \gamma = - \frac{U^2 C R^2}{4 z^2} \gamma. \end{aligned} \quad (4.18)$$



Sl. 4.3. Određivanje elektrostatskog momenta M_y uzrokovanog nagninjanjem ovještene elektrode za kut γ

Ako je već u beznaponskom stanju ovješena elektroda nagnuta za kut γ_0 , onda će se pod naponom pojaviti električni moment koji će je nastrojati još više zakrenuti. Tome će se suprotstaviti protumoment M_0 koji stvara težina F_0 , pa će pri nekom nagibu biti uspostavljena ravnoteža (sl. 4.4. i 4.5):

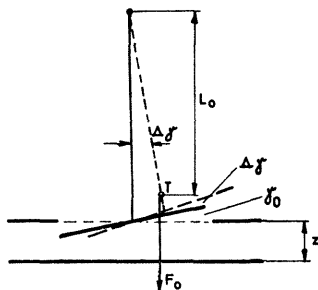
$$F_0 L_0 \Delta\gamma - \frac{U^2 R^4 \varepsilon \pi}{4 z^3} (\gamma_0 + \Delta\gamma) = 0$$

ili:

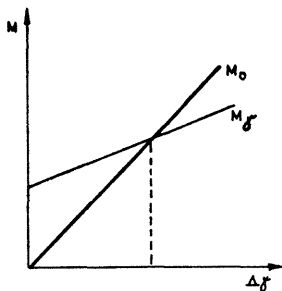
$$\Delta\gamma = \frac{\gamma_0}{\frac{4 F_0 L_0 z^3}{U^2 R^4 \varepsilon \pi} - 1} = \frac{\gamma_0}{\frac{2 F_0 L_0 z}{F_0 R^2} - 1} \quad (4.19)$$

Za stabilan rad potrebno je da $4 F_0 L_0 z^3 / U^2 R^4 \varepsilon \pi$ bude veće od 1, što nije teško ostvariti. Primjerice, kod naponske vage LCIE dobiva se

$\Delta \gamma = \gamma_0 / (677 L_0 - 1)$. Tako za $L_0 = 0,5$ m izlazi $\Delta \gamma \approx 0,003 \gamma_0$, što znači da djelovanjem napona nastaje praktički zanemarivo dodatno naginjanje ovješene elektrode.



Sl. 4.4.



Sl. 4.5.

4.3.5. Brtvljenje

Za naponsku vagu LCIE nije predviđena mogućnost brtvljenja, međutim, ako bi se ostvarili zahtjevi iz odjeljka 4.3.2, moglo bi se zabrtviti vagu uz ne baš jednostavne zahvate.

4.4. PRETVORNICI S CILINDRIČNIM ELEKTRODAMA

(sl. 4.6)

Cilindrične elektrode prvi su upotrijebili E. Bishat i R. Blondlot 1886. godine, a nakon njih F. K. Harris i NBS. Takav oblik imala je naša prva naponska vaga (sl. 3.1), a i naponska vaga koja se sad izrađuje u PTB-u. Moguće su razne njezine varijante, od kojih su dvije prikazane na slici 4.6.

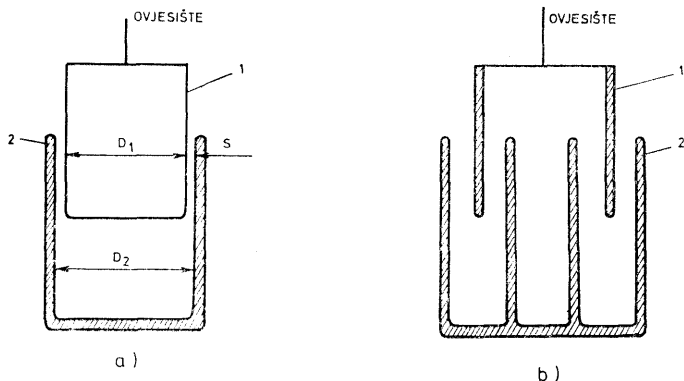
4.4.1. Derivacija dC/dz i njezina zamjena sa $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$

Derivacija dC/dz za cilindrične elektrode prema slici 4.6.a iznosi:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{2 \pi \epsilon}{\ln D_g/D_1} = \frac{\pi \epsilon D_{sr}}{s [1 + s^2/3D_{sr}^2 + s^4/5D_{sr}^4 + \dots]} \approx \frac{\pi \epsilon D_{sr}}{s}. \quad (4.20)$$

Pri tome je D_{sr} srednji promjer elektroda $D_{sr} = (D_1 + D_2)/2$.

Odstupanje od izraza (4.20) pojavljuje se zbog nesavršene obrade elektroda i, eventualno, zbog utjecaja dna visokonaponske elektrode. Ako



Sl. 4.6. Kapacitivni pretvornik s cilindričnim elektrodama: a) jednocilindrična visokonaponska elektroda, b) dvocilindrična visokonaponska elektroda

su promjeri D_1 i D_2 određeni s relativnom nesigurnošću $u_1 = \Delta D_1/D_1$ i $u_2 = \Delta D_2/D_2$, onda relativna nesigurnost derivacije dC/dz pojedinačno iznosi:

$$u_{(dC/dz)_{D_1}} = \frac{u_1}{\ln D_2/D_1} \approx \frac{\Delta D_1}{2s} \left(1 + \frac{s}{D_1} \right) \quad (4.21)$$

$$u_{(dC/dz)_{D_2}} = -\frac{u_2}{\ln D_2/D_1} \approx -\frac{\Delta D_2}{2s} \left(1 - \frac{s}{D_2} \right), \quad (4.22)$$

a tu je s razmak između elektroda. Želimo li ustanoviti derivaciju dC/dz iz dimenzija elektroda, onda kod $s = 7$ mm već nesigurnost od samo 1,4 nm u određivanju promjera D_1 uzrokuje nesigurnost derivacije od 0,1 ppm. Slično vrijedi i za promjer D_2 . Te su tolerancije mnogostruko manje od onih što se danas ostvaruju primjenom vrhunske tehnologije, pa se očito ni ovdje ne može dC/dz odrediti iz izmjerenih dimenzija elektroda u točnosti koja bi zadovoljila današnje zahtjeve metrologije.

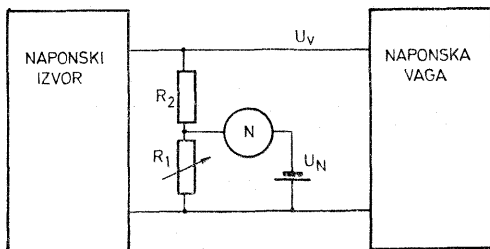
Neosporno je ovdje oblik elektroda mnogo nepovoljniji za određivanje kapaciteta iz izmjerenih dimenzija nego kod Thompson-Lampardova računskog etalona kapaciteta. Zbog toga se može očekivati mnogo bolja točnost ako se kapacitet između elektroda mjeri odgovarajućim mjernim mostom oslanjajući se na Thompson-Lampardov etalon kapaciteta ili pomoću njega izbaždareni pouzdani sekundarni etalon kapaciteta. No u izraz za ustanovljivanje napona (4.7) ne ulazi kapacitet između elektroda, već njegova derivacija po vertikalnom pomaku, a ona se ne može naći zadovoljavajuće točno ni uz upotrebu najpreciznijih mostova za mjerenje kapaciteta. Jer, trebalo bi mjeriti vrlo male pro-

mjene kapaciteta i pripadne vrlo male pomake elektroda. To je s mjerneg stajališta vrlo nepovoljno. Bit će zato potrebno bitno preinačiti pokus vaganja, tako da se u izrazu za određivanje napona pojave dovoljno velike promjene kapaciteta i pomaka, koje će se onda izmjeriti sa zadovoljavajućom mjernom nesigurnošću. Pretpostavimo zato da smo pri vaganju napona omogućili postepenu znatnu promjenu vertikalnog razmaka z između elektroda od nekoga početnog razmaka z_1 do konačnog razmaka z_2 . Mijenja li se razmak z , mijenjat će se ponešto i derivacija dC/dz , ovisno o preciznosti izrade elektroda, što će poremetiti ravnotežu vage. Nju ćemo ponovno uspostaviti najbolje automatskim ugađanjem napona priključenoga između elektroda na odgovarajući iznos U_N . Taj ćemo napon preko vrlo točnoga otporničkog djelila usporediti s naponom U_N sekundarnog etalona napona, koji želimo izbaždariti pomoću naponske vage (sl. 4.7). Pri nultom otklonu osjetljivog indikatora N , što se postiže ugađanjem otpora R_1 , bit će (to je rješenje primijenjeno kod naponske vage ETF-a, no moguća su i razna druga rješenja):

$$U_N = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_V = K_z U_V \quad (4.23)$$

pa se uvrštavanjem u (4.7) dobiva:

$$m \cdot g \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_m} \right) = \frac{1}{2} \frac{U_N^2}{K_z^2} \frac{dC}{dz} \quad (4.24)$$



Sl. 4.7. Princip određivanja napona sekundarnog etalona napona U_N pomoću naponske vage

Ako se razmak z između elektroda postepeno mijenja i pri tome se istodobno ugađa napon U_V , tako da vaga bude stalno u ravnoteži, i otpor R_1 , tako da nulindikator N bude stalno u nultom položaju, onda integriranjem jednadžbe (4.24) izlazi:

$$\int_{z_1}^{z_2} K_z^2 dz = \frac{U_N^2}{2m \cdot g (1 - \rho_n / \rho_m)} \int_{C_1}^{C_2} dC = \frac{U_N^2}{2m \cdot g (1 - \rho_n / \rho_m)} (C_2 - C_1) \quad (4.25)$$

Tu su C_d i C_g kapaciteti između elektroda pri razmaku z_g i z_d . Izraz postaje pregledniji ako uvedemo srednju efektivnu vrijednost omjera K_z :

$$K^2 = \frac{1}{z_g - z_d} \int_{z_d}^{z_g} K_z^2 dz \quad (4.26)$$

pa će nakon uvrštavanja u (4.25) biti:

$$U_N = K \sqrt{2m_{EG} \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \frac{z_g - z_d}{C_g - C_d}}. \quad (4.27)$$

Taj je izraz vrlo prikladan za točno određivanje napona U_N jer se uz omjer K i težinu etalonskog utega u njemu nalazi još samo vrlo dobro mjerljiv pomak $z_g - z_d$ i razlika kapaciteta $C_g - C_d$. Kod naponske vage ETF-Zagreb s cilindričnim elektrodama pomak $z_g - z_d$ iznosi 50 mm, što se suvremenim laserskim metodama može izmjeriti s mjernom nesigurnošću od 5 nm (0,1 ppm), a $C_g - C_d$ iznosi 20 pF, što se također danas mjeri s mjernom nesigurnošću od 0,1 ppm.

Napominjemo još da izraz (4.27) vrijedi uz pretpostavku da na ovješenu elektrodu djeluje samo elektrostatska sila koja leži na istom pravcu kao i gravitacijska sila etalonskog utega, o čemu će biti više riječi u 7. poglavlju.

Posebnu pažnju treba posvetiti oklapanju elektroda jer je elektrostatska sila razmjerna promjeni ukupnog kapaciteta pod naponom po vertikalnom pomaku ovještene elektrode. Taj ukupni kapacitet tvori kapacitet visokonaponske elektrode 2 prema ovješenoj elektrodi 1 i ostalim (uzemljenim) dijelovima u blizini visokonaponske elektrode. Označimo li taj kapacitet sa $C_{2/1-0}$, a pomake ovještene elektrode za z_1 , treba u izrazu (4.7) umjesto dC/dz uvrstiti:

$$\frac{\partial C_{2/1-0}}{\partial z_1}.$$

Međutim, pomičući visokonaponsku elektrodu i mjereći kapacitet u donjem i gornjem položaju između visokonaponske i mjerne elektrode (bez kapaciteta između visokonaponske elektrode i uzemljenih dijelova), dobiva se integral derivacije $\partial C_{2/1}/\partial z_2$. Prema tome, da bi integrirajući postupak bio ispravan, prijeko je potrebno ostvariti [11/2]:

$$\frac{\partial C_{2/1-0}}{\partial z_1} = \frac{\partial C_{2/1}}{\partial z_2} \quad (4.28)$$

4.4.2. Supstitucija težine utega elektrostatskom silom

Da bi se postigla što pouzdanija supstitucija težine etalonskog utega elektrostatskom silom, pogodno je da obje djeluju na isti krak vage i točno u istoj vertikali. Pouzdanost se bitno poboljšava ako je etalon-

ski uteg elastično ovješena i ako se polagano podiže posebnim podizačem. Istodobno se automatski povisuje napon između elektroda, tako da je za vrijeme cijelog postupka zamjene težine utega elektrostatskom silom vaga praktički u ravnotežnom položaju. Slično tome može se stalno održavati ravnoteža vage i pri promjeni vertikalnog pomaka z . Time su izbjegnute neponovljivosti u ležajevima ili pojave histereze u tankim vrpčama na kojima visi krak vage i ovješena elektroda. Takav je postupak prvi put primijenjen na naponskoj vagi ETF za 10 kV i 2 g s cilindričnim elektrodama, te je postignuto da se za vrijeme cijeloga tog postupka ovješena elektroda ne otkloni više od $1 \mu\text{m}$.

4.4.3. Omjer F_0/F_e

Zbog pomaka $z_g - z_d$ u izrazu (4.27) koji omogućuje da se derivacija dC/dz zamijeni dobro mjerljivim odnosom $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$, ali i zbog nužnog preklapanja elektroda z_p u donjem položaju i nadvišenja z_n ovještene elektrode u gornjem položaju, potrebno je da visina ovještene elektrode bude $z_g - z_d + z_p + z_n$. Uz debljinu d stijenki ovještene elektrode bit će njezina težina bez dna i pribirnice:

$$F_0 = D_1 \pi (z_g - z_d + z_p + z_n) k d \varrho g. \quad (4.29)$$

Pri tome je k faktor kojim se uzima u obzir povećanje težine ovještene elektrode zbog težine njezina dna, pribirnice i raznih pomoćnih dijelova. Prema izrazu (4.20) za elektrostatsku se silu F_e dobiva:

$$F_e \approx \frac{U^2 \pi \epsilon D_{sr}}{2 s} \approx \frac{1}{2} E^2 s \pi \epsilon D_1 \quad (4.30)$$

pa je omjer F_0/F_e :

$$F_0/F_e \approx \frac{2 \varrho g d k}{\epsilon E^2} \frac{z_g - z_d + z_p + z_n}{s}. \quad (4.31)$$

Tu je omjer F_0/F_e veći za faktor $(z_g - z_d + z_p + z_n)/s$ nego u izrazu (4.16). Taj faktor kod naponske vage ETF za 10 kV i 2 g iznosi čak $110/7 = 15,7$. Ipak je sama njezina ovješena elektroda gotovo dva puta lakša nego kod LCIE-a zato što se zbog okruglog oblika i manjih zahtjeva na kvalitetu obrade mogla upotrijebiti elektroda s vrlo tankim stijenkama, gdje je d samo 0,35 mm (28 puta manje nego kod vage LCIE). Za tu vagu prema izrazu (4.31) omjer F_0/F_e iznosi ($\varrho = 2700 \text{ kg/m}^3$, $E = 1,43 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ i $k = 4$):

$$\frac{F_0}{F_e} = \frac{2 \cdot 2700 \cdot 9,81 \cdot 0,35 \cdot 10^{-3}}{8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 1,43^2 \cdot 10^{12}} 15,7 \cdot 4 = 64,3.$$

O ukupnoj težini ovještene elektrode, koju je trebalo bitno povećati radi postizanja stabilnog rada, bit će više riječi u idućem poglavlju.

4.4.4. Stabilnost

Pri potpuno simetričnom rasporedu elektroda rezultirajuća radijalna elektrostatska sila ravna je nuli. Međutim, ako su elektrode ekscentrične, djelovat će rezultirajuća radijalna sila koja će nastojati tu ekscentričnost još više povećati. Tome će se suprotstaviti težina ovješene elektrode, i to efikasnije što je masa ovješene elektrode veća, a njezino težište niže. Da bi se to izračunalo, valja poznavati promjenu kapaciteta ovisno o horizontalnom pomaku. Za raspored prema slici 4.8. kapacitet po jedinici duljine iznosi:

$$C_1 = \frac{2 \pi \epsilon}{\ln \left[(u_1 + \sqrt{u_1^2 - 1}) / (u_2 + \sqrt{u_2^2 - 1}) \right]}, \quad (4.32)$$

pri čemu su:

$$\begin{aligned} u_1 &= \frac{R_2^2 - R_1^2 - x^2}{2 R_1 x} = \frac{2 R_1 s + s^2 - x^2}{2 R_1 x}; \quad u_2 = \frac{R_2^2 - R_1^2 + x^2}{2 R_2 x} = \\ &= \frac{2 R_1 s + s^2 + x^2}{2 R_2 x}. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Za vrlo male pomake x vrijedi:

$$\begin{aligned} u_1 + \sqrt{u_1^2 - 1} &\approx \frac{2 R_1 s + s^2 - x^2}{2 R_1 x} + \frac{2 R_1 s + s^2 - x^2}{2 R_1 x} \\ [1 - 2 R_1^2 x^2 / (2 R_1 s + s^2)^2] &= \frac{2 R_1 s + s^2 - x^2}{R_1 x} [1 - R_1^2 x^2 / (2 R_1 s + s^2)^2]. \end{aligned}$$

Slično se dobiva za u_2 pa nakon uvrštavanja u (4.32) i uređenja izlazi:

$$C_1 = \frac{2 \pi \epsilon}{\ln(R_2/R_1)} \left[1 + \frac{x^2}{s^2} \frac{1}{(2 + s/R_1) \ln(R_2/R_1)} \frac{s}{R_1} \right]. \quad (4.34)$$

Za $s \ll R_1$ izraz u uglastim zagradama iznosi: $1 + \frac{x^2}{2 s^2}$ pa će konačno biti:

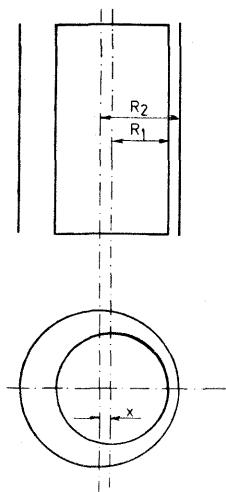
$$C_1 = \frac{2 \pi \epsilon}{\ln(R_2/R_1)} \left[1 + \frac{x^2}{2 s^2} \right]. \quad (4.35)$$

Radijalna sila po jedinici duljine je:

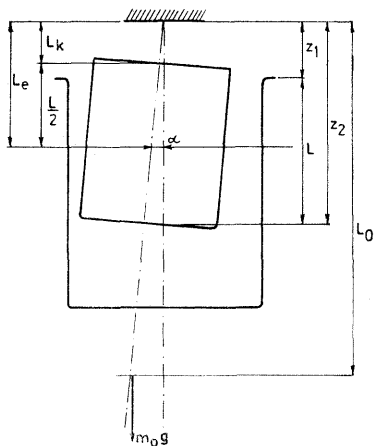
$$F_{1x} = \frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C_1}{\partial x} = U^2 \frac{\pi \epsilon}{\ln(R_2/R_1)} \frac{x}{s^2}. \quad (4.36)$$

Budući da vertikalna elektrostatska sila za $x = 0$ iznosi $F_{z0} = U^2 \pi \epsilon / \ln(R_2/R_1)$, dobiva se:

$$F_{1x} = F_{z0} \frac{x}{s^2}. \quad (4.37)$$



Sl. 4.8.



Sl. 4.9.

Ako se pri centričnom položaju ($x = 0$) ovješena elektroda otkloni za vrlo mali kut α , djelovat će elektrostatski moment (oznake prema sl. 4.9):

$$M_e = F_{z0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{z^2}{s^2} \alpha \, dz = \frac{1}{3} F_{z0} \frac{z_2^3 - z_1^3}{s^2} \alpha. \quad (4.38)$$

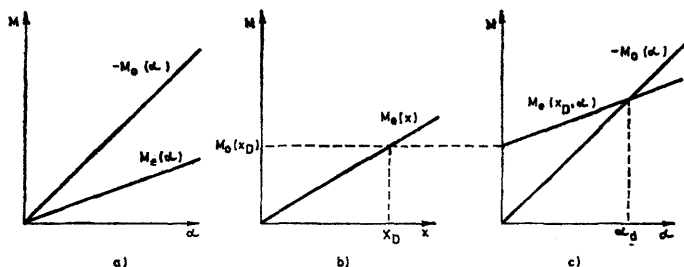
Protumoment će stvoriti težina ovjese elektrode (sl. 4.10.a):

$$M_0 = -m_0 g L_0 \alpha = -F_0 L_0 \alpha. \quad (4.39)$$

Iz jednadžbi (4.38) i (4.39) izvodi se uvjet za stabilan rad:

$$\frac{F_0}{F_{z0}} > \frac{1}{3} \frac{s}{L_0} \frac{z_2^3 - z_1^3}{s^3}. \quad (4.40)$$

Preciznost vaganja elektrostatske sile F_{z0} povećava se smanjujući omjer F_0/F_{z0} . Zato ćemo razmotriti kako se taj omjer može što više smanjiti. Radi toga preuredit ćemo izraz (4.40). Razmak $z_2 - z_1$ ovisi o odabranome vertikalnom hodu visokonaponske elektrode $z_g - z_d$ i o preklapanju elektroda z_p u donjem položaju:



Sl. 4.10. Grafičko određivanje stabilnog položaja ovješene elektrode: a) elektrostatski moment i protumoment ovisno o α , b) elektrostatski moment ovisno o x , c) konstrukcija stabilnog otklona α_D za ekscentričnost x_D

$$L = z_2 - z_1 = z_R - z_d + z_p. \quad (4.41)$$

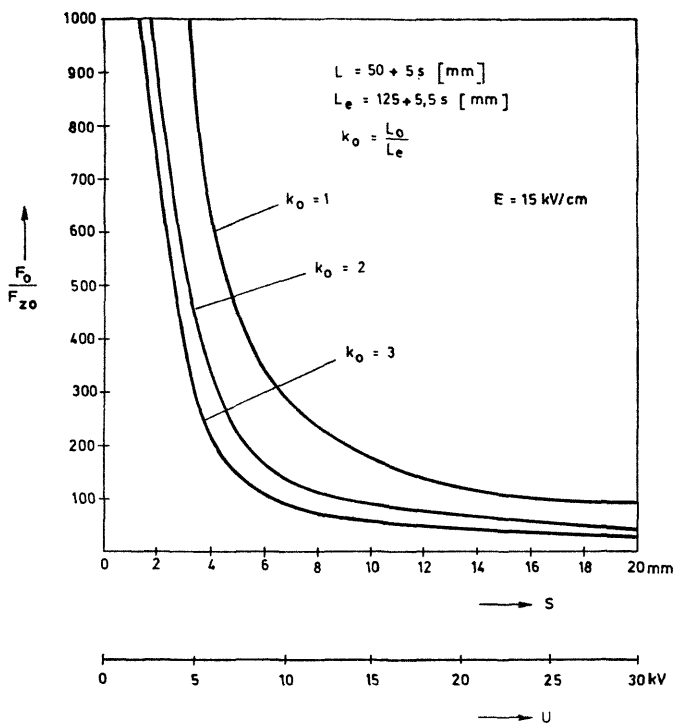
Prema odjeljku 4.4.1. izlazi: $z_R - z_d = 50$ mm, a prema 6. poglavlju dobiva se: $z_p = 5 - 6,5$ s. Radi mogućnosti dobrog oklapanja elektroda potrebno je da u gornjem položaju visokonaponske elektrode bude gornji rub ovješene elektrode barem za 3s iznad nje. Iz konstrukcijskih razloga bit će potrebno da ovjesište niskonaponske elektrode bude otprilike $L_k = 100$ mm iznad njezina gornjeg ruba. Iz spomenutoga i oznaka na slici 4.9. izlazi: $L = 50 + 5s$, $L_e = 125 + 5,5s$, pa ako se to uvrsti u izraz (4.40), nakon uređenja bit će:

$$\frac{F_0}{F_{z_0}} > \frac{L}{L_0} \frac{L_e^2 - L^2/12}{s^2} = \frac{50 + 5s}{L_0} \frac{(125 + 5,5s)^2 - (50 + 5s)^2/12}{s^2}. \quad (4.42)$$

U općim razmatranjima dopušteno je zanemariti posljednji član u brojniku (pogreška oko 2%), a duljinu L_0 prikazati pomoću duljine L_e , odnosno $L_0 = k_0 L_e$, gdje će k_0 biti veće od 1, pa je:

$$\frac{F_0}{F_{z_0}} > \frac{L L_e}{k_0 s^2} = \frac{(50 + 5s)(125 + 5,5s)}{k_0 s^2}. \quad (4.43)$$

Granični omjer F_0/F_{z_0} smanjuje se uz povećanje razmaka s između elektroda pa je zbog toga povoljnije odabrati veći radni napon U . Kod naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 2 g odabrano je $s = 7$ mm, $L = 85$ mm, $L_e = 140$ mm i $L_0 = 400$ mm ($k_0 = 400/140 = 2,86$), zato granični omjer iznosi: $F_0/F_{z_0} = 84,9$. Da bi se osigurala zadovoljavajuća stabilnost, bilo je potrebno odabrati omjer $F_0/F_{z_0} = 150$, a tome odgovara ukupna masa ovješene elektrode od 300 g. To je čak 2,3 puta više od omjera izračunatoga prema izrazu (4.31), a da nije spušteno težište ovješene elektrode (sl. 3.1), bilo bi potrebno još nekoliko puta povećati njezinu masu.



Sl. 4.11. Granični omjer težine ovješene elektrode i elektrostatske sile ovisno o razmaku s između elektroda iznad kojeg se dobiva stabilan rad

Ako ovješenoje niskonaponske elektrode odstupa od centričnog položaja za x_D , nastupit će njezino naginjanje za kut α . Tad odstupanje od centričnog položaja ovisno o z iznosi:

$$x = x_D + z \operatorname{tg} \alpha. \quad (4.44)$$

Zbog toga nastaje elektrostatski moment:

$$\begin{aligned} M_{e(\alpha, x_D)} &= \frac{F_{zo}}{s^2} \int_{z_1}^{z_2} (x_D + z \operatorname{tg} \alpha) \cdot z \, dz = \\ &= \frac{F_{zo}}{s^2} \left[\frac{1}{2} x_D (z_2^2 - z_1^2) + \frac{1}{3} (z_2^3 - z_1^3) \operatorname{tg} \alpha \right]. \end{aligned} \quad (4.45)$$

Taj će moment u stacionarnom stanju biti jednak momentu što ga stvara težina ovješene elektrode, pa se iz toga nalazi kut α . Nakon uređenja dobiva se:

$$\alpha_{(x_D)} = \frac{z_2^2 - z_1^2}{2 F_o L_o s^2 / F_{zo} - 2 (z_2^3 - z_1^3) / 3} \cdot x_D = k_D x_D. \quad (4.46)$$

Da bi se ovješena elektroda održavala u centričnom položaju odgovarajućim ugađanjem, kao što je to predviđeno kod naponske vage ETF-a (sl. 3.1. i 3.2), potrebno je omogućiti mjerenje kuta $\alpha_{(x_D)}$ i mjerenje dodatnog otklona ovješene elektrode pod naponom na prikladnoj udaljenosti L_i ispod ovjesišta. Tu će dodatni otklon x_i biti:

$$x_i = \alpha_{(x_D)} L_i = k_D L_i x_D \quad (4.47)$$

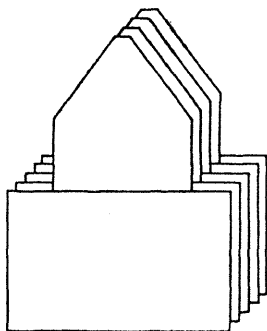
Ako se upotrijebe osjetljivi indikatori, može se odabrati $k_D L_i = 0,1 - 0,2$, što znači da će dodatni otklon ovješene elektrode iznositi od 10 do 20 % ekscentričnosti koja ga je uzrokovala. O tome će biti više riječi u 7. poglavlju.

4.4.5. Brtvljenje

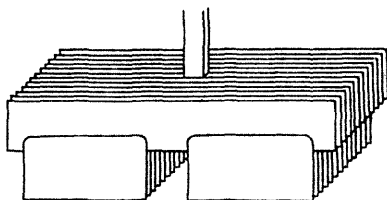
Da bi se omogućio rad s vagonom koja je potpuno zatvorena, termostatisana i napunjena suhim dušikom, morala bi sva potrebna upravljanja biti daljinska. To je ostvareno kod naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 2 g, gdje se podizanje etalonskog utega, ugađanje centričnog položaja, vertikalno pomicanje visokonaponske elektrode i aretiranje vage provodi uz pomoć šest zabrtvljenih upravljačkih osovin (sl. 3.1).

4.5. PRETVORNICI S PLOČASTIM ELEKTRODAMA

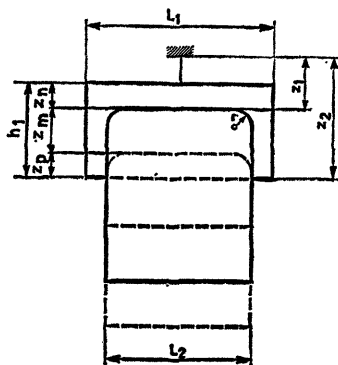
Pločaste elektrode upotrijebili su T. Yamazaki i dr. iz ETL (sl. 4.12) i V. Sienknecht iz PTB (sl. 4.13). Druga naponska vaga ETF-a Zagreb također ima pločaste elektrode (sl. 3.2. i 4.14).



Sl. 4.12. Pločaste elektrode naponske vage ETL



Sl. 4.13. Pločaste elektrode prve naponske vage PTB



Sl. 4.14. Pločaste elektrode naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 10 g dovršene 1983. godine

Japanska i njemačka izvedba međusobno se prije svega razlikuju u tome što prva ima uže ovješene elektrode od visokonaponskih, a kod druge je upravo obrnuto. U prvoj izvedbi može se uz istu elektrostatsku silu postići manja masa ovješene elektrode, a druga omogućuje postizanje veće mehaničke krutosti jer se kod nje ovješene elektrode mogu međusobno povezati na krajevima i u sredini. Obje izvedbe imaju nepovoljan omjer između težine elektroda i elektrostatske sile jer kod njih nisu poduzete posebne mjere da se smanji djelovanje horizontalnih elektrostatskih sila. Kod izvedbe ETF-Zagreb za 10 kV i 10 g s pločastim elektrodama prvi put je primijenjeno razmaknuto ovješeno elektroda (odjeljak 3.6) pa je horizontalne elektrostatske sile ne mogu izbaciti iz ravnotežnog položaja. Zbog toga nije bilo kod nje potrebno dodatno povećati masu elektroda. Dapače, bilo je svrsishodno poduzeti sve moguće mjere kako bi se njezina masa smanjila i postigao što manji omjer između težine elektroda F_0 i elektrostatske sile F_e . To je razlog da će ovdje biti više riječi o optimiranju tog omjera.

4.5.1. Derivacija dC/dz i njezina zamjena sa $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$

Derivacija dC/dz ovdje iznosi:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{\varepsilon L_{ef}}{s} \quad (4.48)$$

pri čemu je L_{ef} ukupna efektivna duljina uzdužnog prekrivanja ovješanih i visokonaponskih elektroda. Nju će biti vrlo teško točno proračunati zbog složenosti pojava na rubovima elektroda. Tu će, slično kao i kod cilindričnog oblika elektroda, biti potrebno preinačiti postupak vaganja tako da se u izrazu (4.7) derivacija dC/dz može zamijeniti omjerom $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$, jer se *taj omjer može eksperimentalno vrlo točno odrediti* (odjeljak 4.4.1). Ipak će u fazi konstruiranja biti potrebno barem na nekoliko promila proračunati derivaciju dC/dz . O tome će se više naći u 6. poglavlju.

4.5.2. Supstitucija težine utega elektrostatskom silom

Supstitucija se može i ovdje provesti vrlo fino tako da se vaga praktički ne zanije, kako je to već opisano u odjeljku 4.4.2. Pokazuje se da je ovdje prikladno upotrijebiti dva etalonska utega jer je radi brojnih konstrukcijskih prednosti bolje podijeliti elektrode u dvije simetrične grupe između kojih se nalazi sistem za vođenje (sl. 3.2). U simetrali jedne i druge grupe nalazi se pripadni etalonski uteg. Time se dobiva sedam raznih kombinacija vaganja, što povećava pouzdanost supstitucije.

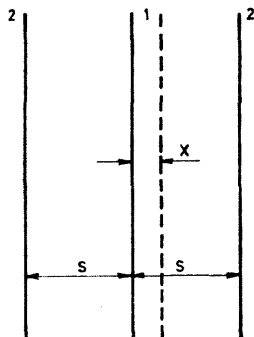
4.5.3. Omjer F_0/F_e i izbor dimenzija elektroda

Omjer F_0/F_e ovisit će o izboru karakterističnih dimenzija elektroda prikazanih na slici 4.14, te o prikladnim konstrukcijskim rješenjima. No pri izboru tih karakterističnih dimenzija bit će potrebno voditi računa i o više drugih zahtjeva. Ovdje ćemo nabrojiti neke od njih.

- a) Maksimalna jakost električnog polja kod istosmjernoga radnog napona ne smije prekoračiti iznos koji osigurava pouzdan rad naponske vage bez ikakvih parcijalnih izbijanja. Prema iskustvu odabrana je jakost dva puta manja od probojne čvrstoće suhog dušika ($E_m = 15$ kV/cm).
- b) Radi mogućnosti određivanja napona integracijskim postupkom opisanim u odjeljku 4.4.1, treba omogućiti dovoljno veliku duljinu uvlačenja ovješene elektrode u visokonaponsku elektrodu. Kod naponskih vaga ETF-Zagreb odabrana je duljina 50 mm (z_m na sl. 4.14), koja se danas može odrediti s mjernom nesigurnošću od 0,1 ppm. Da bi mjerni postupak bio što jednostavniji, poželjno je da se na toj duljini elektrostatska sila ne mijenja više od npr. $1 \cdot 10^{-4}$.
- c) Postupak vaganja napona i mjerenja kapaciteta između elektroda lakše je provesti ako su manje promjene kapaciteta pri horizontalnim pomacima ovješene elektrode. Za pločasti kondenzator s jednom ovješenom elektrodom između dvije visokonaponske (sl. 4.15), kapacitet ovisno o horizontalnom pomaku, uz zanemarenje rubnih efekata, iznosi:

$$C = \epsilon S \left(\frac{1}{s+x} + \frac{1}{s-x} \right) = \frac{2\epsilon S}{s} \frac{1}{1-x^2/s^2} = C_{x=0} \left(1 + \frac{x^2}{s^2} + \frac{x^4}{s^4} + \dots \right) \quad (4.49)$$

Tu je x horizontalni pomak od središnjeg položaja, s razmak između elektroda, a S je jednostrana površina preklapanja elektroda.



Sl. 4.15. Pločasta ovješena elektroda između dvije visokonaponske elektrode

Prema tome će relativna promjena kapaciteta biti:

$$\Delta C_r \approx \frac{x^2}{s^2}. \quad (4.50)$$

S obzirom na to povoljno je da razmak između elektroda bude što veći. Ako je $s = 7$ mm, tad pomak elektroda od $1 \mu\text{m}$ izaziva relativnu promjenu kapaciteta od samo 0,02 ppm, što već zadovoljava.

- d) Površinske pojave na elektrodama uzrokuju ovisnost njihova kapaciteta o frekvenciji [II/15]. Ta je ovisnost obrnuto razmjerna razmaku između elektroda pa je i zbog toga povoljno da on bude što veći.
- e) Integracijski postupak određivanja napona zahtijeva da parcijalna derivacija ukupnog kapaciteta pod naponom po vertikalnom pomaku ovješene elektrode bude potpuno jednaka derivaciji kapaciteta između visokonaponske i mjerne elektrode po pomaku visokonaponske elektrode (odjeljak 4.4.1). To će se ostvariti ako su uzemljeni dijelovi sasvim daleko, ako su potpuno zakriljeni jednom od elektroda ili ako se vertikalno pomiču skupa s jednom od elektroda. Izvedbeno se pokazalo najpogodnijim rješenje u kojem se uzemljeni oklop i visokonaponske elektrode skupa pomiču.

S obzirom na izložene zahtjeve razmotrit će se optimalni omjer F_0/F_e . Ako bi se ovješene elektrode izradile od punog materijala, opadao bi omjer F_0/F_e sa smanjenjem razmaka između elektroda, što nije povoljno s obzirom na izneseno u točkama c) i d), a ne bi se na taj način postigao ni malen iznos omjera. Povoljniji omjer F_0/F_e dobiva se šupljim ovješenim elektrodama. Da bi se postigla dvostruka elektrostatska sila, smjestit će se svaka ovješena elektroda između dviju visokonaponskih, pa se uz zanemarenje rubnih efekata dobiva:

$$F_e = U^2 \varepsilon \frac{L_1}{s} = E_m^2 \eta^2 L \varepsilon s. \quad (4.51)$$

Tu je η faktor iskorištenja polja, a L_1 ukupna duljina elektroda. Težina ovješenih elektroda iznosi:

$$F_0 = L_1 g \varrho (z_m + k_1 s) d_0 (2 + k_2 s). \quad (4.52)$$

z_m — razmak između gornjeg i donjeg položaja visokonaponske elektrode: $z_m = z_g - z_d$; prema točki b) bit će $z_m \approx 50$ mm

k_1 — $(z_n + z_p)/s$ (sl. 4.14), za odabrano η taj je omjer konstantan, a brzo raste ako se želi postići veće η ; za $\eta = 0,95$ i primjenu Bordina profila na rubovima elektroda dobiva se $k_1 = 10 \text{ m}^{-1}$

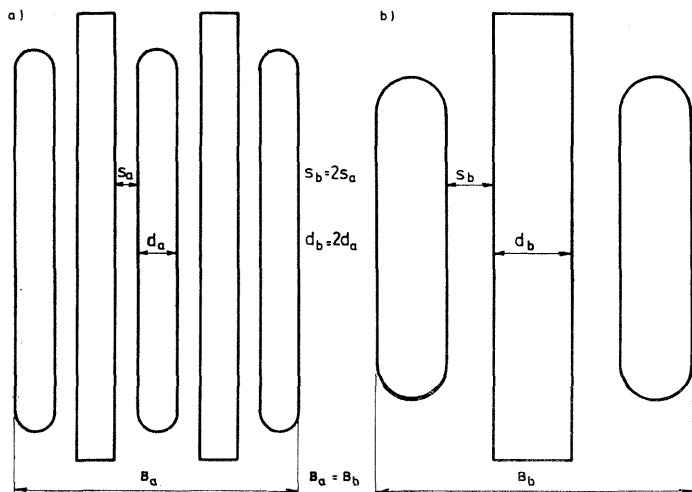
d_0 — debljina uzdužnih stijenki elektroda

k_2 — faktor kojim se uzima u obzir masa poprečnih stijenki elektroda što služe za njezino ukrućenje; njihova masa ovisi o debljini elektrode d , a ona opet za određeno η o razmaku s ; za $\eta = 0,95$ dobiva se primjenom Bordina profila: $d = 1,7 s$. [30] Ako se pregradne stijenke debljine d_0 postave otprilike svakih 20 mm i ako se još s faktorom 2 uzmu u obzir horizontalne stijenke na vrhu i dnu ovješene elektrode, bit će $k_2 = 2 \cdot 1,70/0,02 = 170 \text{ m}^{-1}$

ϱ — gustoća materijala od kojeg je izrađena ovješena elektroda

Već je napomenuto da je izborom faktora iskorištenja polja η određen omjer između debljine elektroda d i njihova međusobnog razmaka s . Poveže li se to s izrazom (4.51), dobiva se da horizontalna površina koju zauzimaju elektrode ovisi o F_e , F_0 i η , ali ne ovisi o razmaku s . Tako

ćemo s elektrodama prema sl. 4.16.a i b, koje praktički zauzimaju jednaku površinu, dobiti jednaku elektrostatsku silu premda se razmaci između njihovih elektroda razlikuju u omjeru 1 : 2.



Sl. 4.16. Tlocrt pločastih elektroda koje daju jednaku elektrostatsku silu

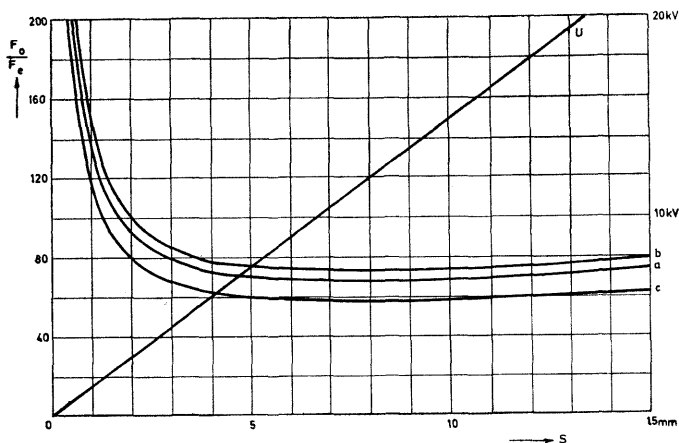
To znači da će za njihovo međusobno učvršćenje i ovješanje trebati mehanička konstrukcija podjednake težine F_{mk} . Na osnovi toga i izraza (4.51) i (4.52) izlazi:

$$\frac{F_o}{F_e} = \frac{g \rho d_o (z_m + k_1 s) (2 + k_2 s)}{\epsilon E_m^2 \eta^2 s} + \frac{F_{mk}}{F_e} \quad (4.53)$$

Na slici 4.17. prikazan je taj omjer ovisno o razmaku s za ovješenu elektrodu od pozlaćenog aluminija debljine od 0,6 mm, pozlaćenoga kaširanog vitroplasta debljine od 1 mm i za elektrode od lijevane epoksidne smole također debljine od 1 mm. Kod svih izvedbi postiže se najmanja vrijednost omjera F_o/F_e pri naponu od otprilike 10 kV.

4.5.4. Stabilnost

U izvedbi s pločastim elektrodama opasne su za stabilnost samo poprečne horizontalne elektrostatske sile. Tu se pomoću izraza (4.49) dobiva:



Sl. 4.17. Ovisnost omjera F_o/F_e i napona između elektroda povezano s njihovim razmakom s za $F_{mk}/F_e = 20$, $E_m = 15$ kV/cm, $\eta = 0,95$, $k_1 = 10$ i $k_2 = 170$: a) $\rho = 2500$ kg/m³ i $d_o = 0,6$ mm, b) $\rho = 1800$ kg/m³ i $d_o = 1$ mm, c) $\rho = 1300$ kg/m³ i $d_o = 1$ mm

$$F_x = \frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C}{\partial x} = U^2 \cdot C_{x=0} \cdot \frac{x}{s^2}. \quad (4.54)$$

Poprečna sila po jedinici visine iznosi:

$$F_{x1} = F_{z0} \frac{2x}{s^2} \quad (4.55)$$

Vidi se da su tu dva puta veće sile nego prema izrazu (4.37), koji vrijedi za cilindrične elektrode. Zbog toga će za stabilan rad trebati dvostruko veća težina ovješanih elektroda od one prema izrazu (4.40):

$$\frac{F_o}{F_{z0}} > \frac{2}{3} \frac{s}{L_o} \frac{z_2^3 - z_1^3}{s^3}. \quad (4.56)$$

Za utvrđivanje graničnog omjera iznad kojeg se dobiva stabilan rad i ovdje će poslužiti slika 4.11. ako se vrijednosti za F_o/F_{z0} pomnože s dva. Tako se za $s = 7$ mm i $k_0 = 1$ dobiva iz te slike: $F_o/F_{z0} > 2 \cdot 284 = 568$. To je otprilike deset puta više nego prema krivulji c na slici 4.17. pa bi se barem za toliko morala povećati masa ovješene elektrode ili dodatnim zahvatima spustiti njezino težište. Zbog toga je kod napon-

ske vage ETF-Zagreb s pločastim elektrodama (odjeljak 3.6) prvi put primijenjeno ovješeno pomoću dvije razmaknute vrpce. Izborom razmaka između njih i njihovom duljinom ostvaruje se optimalna osjetljivost na poprečne horizontalne sile bez ikakva dodatnog povećanja mase ovješene elektrode.

4.6. IZBOR OSNOVNE KONCEPCIJE NAPONSKE VAGE U IZGRADNJI NA ETF-ZAGREB

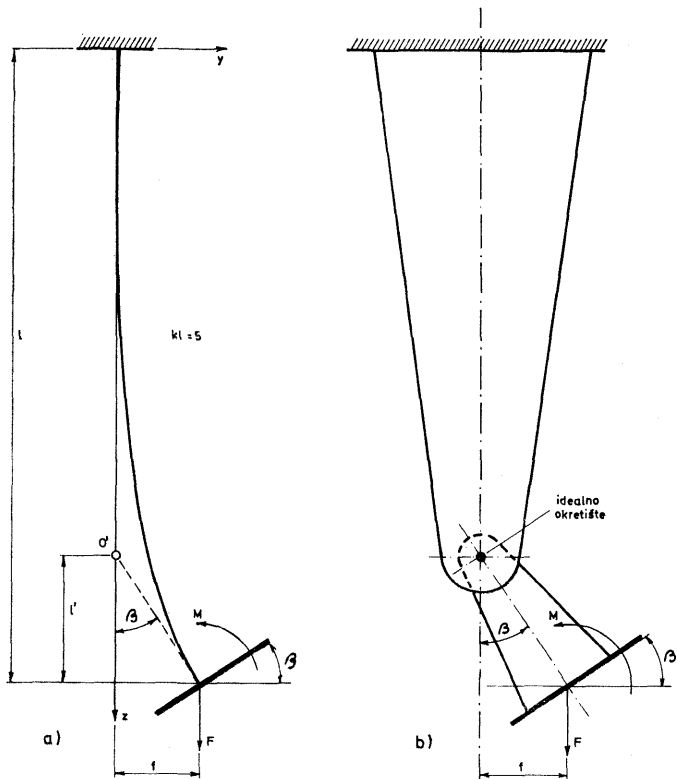
Razmatranja u ovom poglavlju pokazala su da se u današnjim tehničkim i mjernim mogućnostima dade derivacija dC/dz barem za jedan red točnije ustanoviti pomoću kapacitivnih pretvornika s promjenljivom djelujućom površinom nego s pretvornicima s promjenljivim razmakom između elektroda. Osim toga, njihova pločasta izvedba s razmaknutim dvostrukim ovješanjem, koja je prvi put upotrijebljena na naponskoj vagi ETF za 10 kV i 10 g (odjeljak 3.6), osigurava stabilan rad bez dodatnog povećanja mase ovješene elektrode. Zato se njome postiže povoljan omjer između elektrostatske sile i težine ovješene elektrode. Premda općenita razmatranja iznijeta u ovom poglavlju daju prednost upravo ovom rješenju, ipak su za konačnu ocjenu i izbor bile potrebne daljnje temeljite teorijske i eksperimentalne provjere svakog i najsitnijeg detalja osnovne koncepcije. To se posebno odnosi na teorijske i praktične probleme povezane s realizacijom dvostrukog ovješanja, o čemu će biti više riječi u 5. poglavlju, na dimenzioniranje elektroda (6. poglavlje) i na održavanje ravnotežnog i centričnog položaja ovješene elektrode (7. i 8. poglavlje).

5. POLUŽNA VAGA S OVJESNIM VRPCAMA

Radi lakšeg održavanja centričnog položaja niskonaponske elektrode, o čemu će biti više riječi, upotrijebljena je kod naponske vage za 10 kV i 10 g polužna vaga s ovjesnim vrpčama, a ne ona s nožastim ležajevima. Budući da se pri tome zahtijeva ekstremno mala mjerna nesigurnost »vaganja« napona, potrebno je detaljno razmotriti mogućnosti koje pruža takvo rješenje. Zbog toga će se detaljnije analizirati uvjeti za postizanje optimalne osjetljivosti i ponovljivosti te ponašanje rješenja pri djelovanju horizontalnih elektrostatskih sila. Pokazat će se pri tome da su radi obuzdavanja djelovanja tih horizontalnih sila potrebna dva para ovjesnih vrpca: jedan, na kojem su ovješeni krakovi vage, i drugi, koji nosi niskonaponsku elektrodu, pa će se odvojeno razmatrati ponašanje jednoga i drugog para vrpca.

5.1. OVJEŠENJE KRAKOVA VAGE

Krakovi su vage ovješeni dvjema tankim vrpčama pa su zato one napete silom F , koja je ravna ukupnoj težini krakova vage, protuutega i ovješene elektrode. Ako vaga nije u ravnoteži, djeluje na njih još i moment M (sl. 5.1). Zbog toga diferencijalna jednadžba elastične linije glasi:



Sl. 5.1. a) Moment M djeluje na vrpcu napetu silom F , b) nadomjesni mehanizam za $kl \gg 1$

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{1}{EJ} [M - (f - y) F]. \quad (5.1)$$

Uz $y(0) = 0$ i $y'(0) = 0$ dobiva se rješenje:

$$y(z) = \frac{M}{F} \frac{\operatorname{ch} kz - 1}{\operatorname{ch} kl}, \quad (5.2)$$

pri čemu je:

$$k = \sqrt{\frac{F}{EJ}}. \quad (5.3)$$

Otklon donjeg kraja vrpce u smjeru osi y iznosi:

$$f = \frac{M}{F} \frac{\operatorname{ch} kl - 1}{\operatorname{ch} kl} \approx \frac{M}{F}. \quad (5.4)$$

Tangenta koja dodiruje elastičnu krivulju u njezinu donjem kraju nagnuta je prema osi z za kut β . Tangens tog kuta dobiva se deriviranjem izraza (5.2):

$$\operatorname{tg} \beta = \left(\frac{dy}{dz} \right)_{z=1} = \frac{kM}{F} \operatorname{th} kl = \frac{M}{\sqrt{FEJ}} \operatorname{th} (l \sqrt{F/EJ}), \quad (5.5)$$

odnosno:

$$M = \frac{\sqrt{FEJ}}{\operatorname{th} (l \sqrt{F/EJ})} \operatorname{tg} \beta \quad (5.6)$$

Povoljno je da moment M bude što manji, a to će se ostvariti upotrebom vrlo tankih vrpca. Zbog toga će biti $l \sqrt{F/EJ} \gg 1$, odnosno $\operatorname{th} (l \sqrt{F/EJ}) \approx 1$, pa se izraz (5.6) pojednostavljuje:

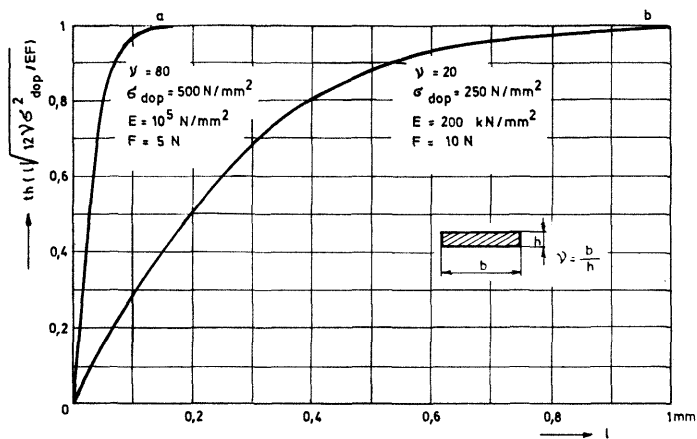
$$M \approx \beta \sqrt{FEJ}. \quad (5.7)$$

Donji kraj vrpce okomito je uklješten na krak vage, pa je kut β ujedno i nagib kraka vage prema horizontalnoj osi y (sl. 5.1). Tangenta na donji kraj elastične krivulje siječe os z u točki O' na udaljenosti l' (sl. 5.1) koja iznosi:

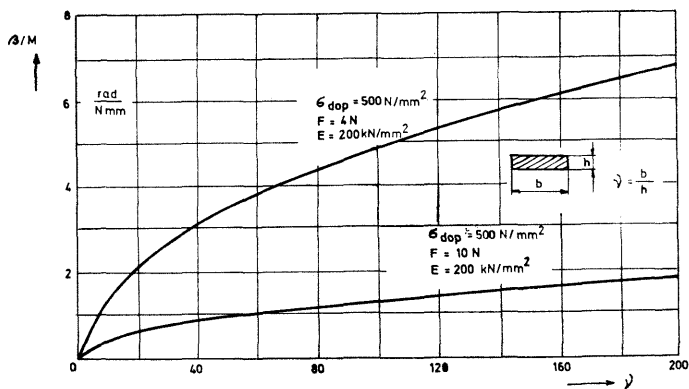
$$l' = \frac{f}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{\operatorname{ch} kl - 1}{k \operatorname{sh} kl} \approx \frac{1}{k}. \quad (5.8)$$

Vidi se da duljina l' ovisi samo o konstantama k i kl , a ne i o momentu M , što znači da je točka O' na slici 5.1.a okretište kraka vage. Zbog toga se može djelovanje vrpce predložiti kako je to prikazano na slici 5.1.b. Budući da će se upotrijebiti vrlo tanke vrpce, bit će l' manje od jedne desetinke milimetra.

Nastojat ćemo postići što veću osjetljivost vage, a to prema izrazu (5.6) znači što veći omjer $\beta/M = \operatorname{th} (l \sqrt{F/EJ})/\sqrt{FEJ}$. Uz zadano dopušte-



Sl. 5.2. Ovisnost izraza $th \left(\frac{1}{\sqrt{12 \sigma_{dop}^2 / EF}} \right)$ o dužini vrpce l



Sl. 5.3. Ovisnost omjera β/M o omjeru γ

no naprezanje σ_{dop} vrpce može se taj omjer povećati izborom tankih, a širokih vrpca. Označi li se omjer između debljine i širine vrpce sa ν , dobiva se uvrštavanjem u (5.6):

$$\frac{\beta}{M} = \sigma_{\text{dop}} \sqrt{\frac{12 \nu}{F^3 E}} \cdot \text{th} (l \sqrt{12 \nu \sigma_{\text{dop}}^2 / EF}). \quad (5.9)$$

Na slici 5.2. predočena je ovisnost izraza $\text{th} (l \sqrt{12 \nu \sigma_{\text{dop}}^2 / EF})$ o duljini vrpce l za dva gotovo granična slučaja. Iz te slike uočava se da praktički već kod duljine $l = 0,5$ mm taj izraz poprima vrijednost 1. Zbog toga će se umjesto jednadžbe (5.9) moći redovito upotrijebiti jednostavniji izraz:

$$\frac{\beta}{M} = \sigma_{\text{dop}} \sqrt{\frac{12 \nu}{F^3 E}}. \quad (5.10)$$

Slika 5.3. sadrži ovisnost omjera β/M o omjeru ν za nekoliko karakterističnih vrijednosti za σ_{dop} , F i E . Iz te slike vidi se da se mogu za β/M postići vrijednosti od nekoliko rad/Nmm, čime će se postići potpuno zadovoljavajuća osjetljivost (7. poglavlje).

5.2. OVJEŠENJE NISKONAPONSKE ELEKTRODE

Ovješena elektroda visi na dvije tanke razmaknute vrpce opterećene težinom ovještene elektrode. Kad se krak vage zakrene za kut β , nastaje njihovo savijanje kako je to prikazano na slici 5.4, pa će diferencijalna jednadžba njihove elastične linije biti:

$$\frac{d^2 y}{dz^2} = \frac{1}{E J} (y - f) F. \quad (5.11)$$

Budući da je $y(0) = 0$, a $y'(0) = \text{tg} \beta$, jer traka uklještena na krak vage, bit će rješenje ove diferencijalne jednadžbe:

$$y(z) = \frac{\text{tg} \beta}{k} [\text{sh } kz - \text{th } kl (\text{ch } kz - 1)], \quad (5.12)$$

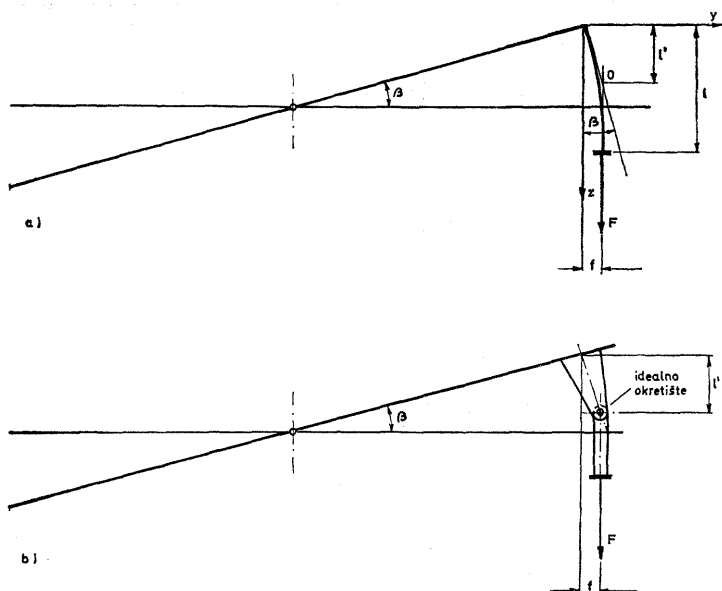
pri čemu je $k = \sqrt{\frac{F}{E J}}$.

Otklon donjeg kraja vrpce iznosi ($z = l$):

$$f = \frac{\text{tg} \beta}{k} \text{th } kl \approx \frac{\text{tg} \beta}{k} \quad (5.13)$$

Zbog svijanja vrpce djeluje na krak vage moment:

$$M = y''_{(z=0)} E J = -\sqrt{FEJ} \text{tg} \beta \text{th } kl \approx -\sqrt{FEJ} \beta. \quad (5.14)$$



Sl. 5.4. a) Ovješanje niskonaponske elektrode, b) nadomjesni mehanizam

Tangenta koja dodiruje elastičnu liniju vrpce u njezinu gornjem kraju, siječe vertikalu na kojoj djeluje sila F u točki O' (sl. 5.4) na udaljenosti l' :

$$l' = \frac{f}{\operatorname{tg} \beta} = \frac{1}{k} \operatorname{th} kl \approx \frac{1}{k}. \quad (5.15)$$

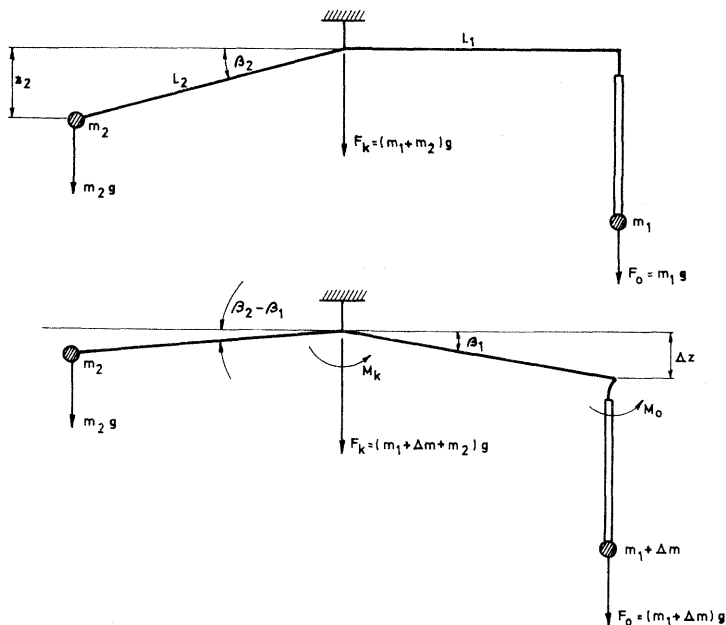
Vidimo da ta duljina ne ovisi o otklonu β kraka vage, već samo o konstantama k i kl . To ujedno znači da bi se dobilo jednako djelovanje kad bi se upotrijebila vrpca bez ikakve krutosti ako bi njezino hvatište bilo niže za duljinu l' (sl. 5.4.b).

Budući da su se ovdje dobili praktički jednaki izrazi za moment M i duljinu l' , kao i kod vrpca koje služe za ovješanje krakova vage, to se u pogledu njihova smanjivanja možemo poslužiti razmatranjima u odjeljku 5.1.

5.3. OSJETLJIVOST JEDNOKRAKE VAGE S VRPCAMA

Za raspored prema slici 5.5.a bit će ostvarena ravnoteža kad je $L_1 m_1 = L_2 m_2 \cos \beta_2$, ili:

$$m_1 = \frac{L_1}{L_2} m_2 \cos \beta_2. \quad (5.16)$$



Sl. 5.5. a) Vaga u nultom položaju, b) otklon zbog dodavanja mase Δm

Ako se masi m_1 doda mnogo manja masa Δm , uspostaviti će se ravnoteža kod nekog otklona β_1 . Tada će vrijediti:

$$L_1 (m_1 + \Delta m) g \cos \beta_1 - M_0 - M_k = L_2 m_2 g \cos(\beta_2 - \beta_1). \quad (5.17)$$

Pri tome su M_k i M_0 protumomenti što ih stvaraju vrpce na kojima je ovješan krak vage, odnosno masa m_1 . Uređenjem se dobiva:

$$\Delta m = \frac{L_2}{L_1} m_2 \sin \beta_2 \operatorname{tg} \beta_1 + \frac{M_0 + M_k}{L_1 g \cos \beta_1} \quad (5.18)$$

Tu je: $L_2 \sin \beta_2 = z_2$, $\Delta z = L_1 \sin \beta_1 \approx L_1 \beta_1$ i $\tan \beta_1 \approx \Delta z / L_1$, a momenti M_k i M_0 prema izrazima (5.7) i (5.14) iznose: $M_k = \sqrt{F_k E_k J_k} \cdot \Delta z / L_1$ i $M_0 = \sqrt{F_0 E_0 J_0} \cdot \Delta z / L_1$ (gdje je to potrebno radi jasnoće, upotrebljavat će se u daljnjem tekstu indeks k za veličine povezane s vrpčama koje nose krak vage, a indeks 0 s vrpčama koje nose ovješenu elektrodu). Uvrštavanjem u (5.18) bit će:

$$\Delta m = \left(\frac{z_2 m_0}{L_1^2} + \frac{\sqrt{F_k E_k J_k}}{L_1^2 g} + \frac{\sqrt{F_0 E_0 J_0}}{L_1^2 g} \right) \cdot \Delta z. \quad (5.19)$$

Definirajmo osjetljivost naponske vage kao odnos između vertikalnog otklona ovještene elektrode Δz i mase Δm koja dodana ovješenoj elektrodi pri uravnoteženju vage izaziva taj otklon:

$$S = \Delta z / \Delta m, \quad (5.20)$$

pa se nakon uvrštavanja u izraz (5.19) odmah dobiva:

$$S = \frac{g L_1^2}{z_2 m_0 g + \sqrt{F_0 E_0 J_0} + \sqrt{M_k E_k J_k}}. \quad (5.21)$$

U okolnostima kad su upotrijebljene dvije vrpce za ovješeno krakova vage i dvije vrpce na kojima visi ovješena elektroda, bit će F_0 težina ovještene elektrode, F_k zbroj težina ovještene elektrode, protutege i krakova, a J_0 i J_k su zbroj momenata tromosti vrpca koje nose ovješenu elektrodu, odnosno krakove vage.

Zelimo li postići osjetljivost vaganja napona reda od 0,01 ppm, bit će potrebno da se kod naponske vage s etalonskim utegom od 10 g može zapaziti otklon koji izaziva promjena mase za 0,2 μ g. Primjenom vrlo osjetljivih kapacitivnih pretvornika već se uočavaju pomaci od otprilike 2 nm, pa iz toga izlazi da valja ostvariti osjetljivost reda 10 m/kg. Uvrsti li se taj zahtjev u izraz (5.21), dobiva se uz $L_1 = 0,12$ m:

$$z_2 m_0 g + \sqrt{F_0 E_0 J_0} + \sqrt{F_k E_k J_k} = 0,014 \text{ Nm}. \quad (5.22)$$

Zbog nesavršenosti ovjesnih vrpca, osobito zbog njihove mehaničke histerese, bilo bi poželjno da njihov udio u tom izrazu bude što manji (sumandi pod korijenom). Kako je to prikazano u odjeljku 5.1, može se izborom vrlo tankih, čvrstih vrpca postići da njihov udio u tom izrazu bude oko 10 %.

5.4. DJELOVANJE UZDUŽNIH HORIZONTALNIH ELEKTROSTATSKIH SILA

Supstitucijski postupak određivanja elektrostatske sile usporedbom s gravitacijskom silom etalonskog utega zahtijeva da obje djeluju u istoj vertikali. Zbog toga će biti potrebno da se horizontalne elektrostatske sile svedu na iznose koji neće poremetiti točnost usporedbe. Njihove iznose možemo naći uglavnom na dva načina: mjerenjem kapa-

citeta između ovješene i visokonaponske elektrode ovisno o horizontalnim pomacima ili mjerenjem dodatnih horizontalnih pomaka koji se pojavljuju pri uključivanju na napon. Drugi se način pokazao eksperimentalno jednostavnijim i pouzdanijim pa će se ovdje razmatrati kakve pomake ovješene elektrode izazivaju uzdužne horizontalne sile i koliko ti pomaci utječu na točnost određivanja napona pomoću vage s tankim vrpčama.

5.4.1. Uzdužna horizontalna sila djeluje na donjemu slobodnom kraju vrpce

Neka na donji kraj vrpce osim vertikalne sile F djeluje još i horizontalna uzdužna sila F_y u smjeru kraka vage (sl. 5.6). Uz oznake na toj slici diferencijalna jednadžba elastične linije vrpce glasi:

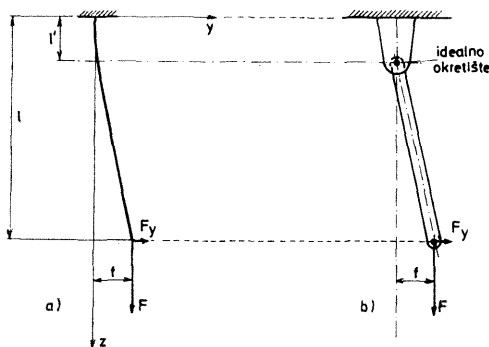
$$\frac{d^2y}{dz^2} = \frac{1}{EJ} [F_y (l - z) - F(f - y)]. \quad (5.23)$$

Uz $y(0) = 0$ i $y'(0) = 0$ dobiva se rješenje:

$$y(z) = \frac{F_y}{F} \left(z - \frac{\text{th } kl + \text{sh } kz - \text{th } kl \text{ ch } kz}{k} \right), \quad (5.24)$$

pri čemu je $k = \sqrt{\frac{F}{EJ}}$. Otklon donjeg kraja vrpce bit će ($z=l$):

$$f = \frac{F_y}{F} \left(l - \frac{\text{th } kl}{k} \right) \approx \frac{F_y}{F} \left(l - \frac{1}{k} \right). \quad (5.25)$$



Sl. 5.6. a) Horizontalna sila F_y djeluje na vrpцу napetu silom F , b) nadomjesni mehanizam

Razmotrimo dva ekstremna slučaja. Za vrlo krutu vrpce bit će kl vrlo malo pa razvojem $(th\ kl)/k$ u red dobivamo: $1 - k^{2/3}/3 + \dots$

Uvrštavanjem u jednadžbu (5.25) izlazi:

$$f = \frac{F_y l^3}{3 E J},$$

što je poznati izraz za uklješteni štap opterećen na slobodnom kraju silom F_y koja je na njega okomita.

Drugi ekstremni slučaj, bliži prilikama u vagi, vrlo je tanka vrpca ($kl \rightarrow \infty$). Tad je $th\ kl \approx 1$, pa će biti:

$$f = \frac{F_y}{F} \left(1 - \frac{1}{k}\right) \approx 1 \frac{F_y}{F},$$

odnosno traka se postavlja u smjeru rezultirajuće sile $\bar{F}_y + \bar{F}$. Tangenta koja dodiruje donji kraj vrpce ima nagib:

$$y'(z)_{z=1} = \frac{F_y}{F} (1 - ch\ kl + th\ kl\ sh\ kl) = \frac{F_y}{F} (1 - sch\ kl). \quad (5.26)$$

Tangenta siječe vertikalnu os na udaljenosti l' od gornjeg kraja vrpce (sl. 5.6):

$$l' = 1 - \frac{f}{y'(z)_{z=1}} = 1 - \left(1 - \frac{th\ kl}{k}\right) / (1 - sch\ kl) \approx \frac{1}{k}. \quad (5.27)$$

Zbog svijanja vrpce izazvanoga djelovanjem horizontalne sile F_y nastaje dodatni moment na krak vage, koji kvari ravnotežu vage i uzrokuje pogrešku vaganja. On iznosi:

$$M_p = F_y l - F f = F_y \frac{th\ kl}{k} \approx \frac{F_y}{k} = F_y l'. \quad (5.28)$$

5.4.2. Uzdužna horizontalna sila djeluje na donjem uklještenom kraju ovjesne vrpce (sl. 5.7)

Zbog djelovanja uklještenja bit će tangenta na donjem kraju vrpce vertikalna ako je i uklještenje zadržalo horizontalni položaj. Da bi to bilo moguće, potrebno je da uklještenje djeluje na vrpce momentom M koji će svinuti vrpce za jednaki kut kao i horizontalna sila, ali sa suprotnim predznakom. Zato uz pomoć izraza (5.5) i (5.26) izlazi:

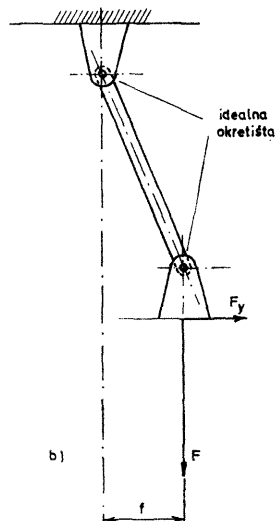
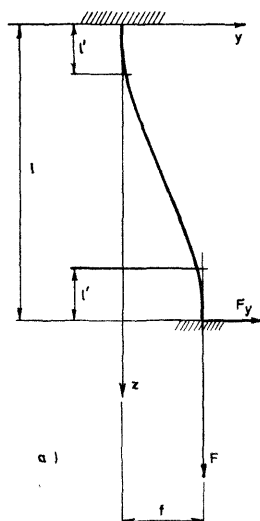
$$M = \frac{F_y (1 - sch\ kl)}{k\ th\ kl} = \frac{F_y}{k} th\ \frac{kl}{2} \approx F_y l'. \quad (5.29)$$

Pomak f će ovdje biti razlika između pomaka koji izaziva horizontalna sila prema jednadžbi (5.25) i moment M prema izrazu (5.4):

$$f = \frac{F_y}{F} \left(l - \frac{\text{th } kl}{k} \right) - \frac{M}{F} \frac{\text{ch } kl - 1}{\text{ch } kl}.$$

Nakon uređenja dobiva se:

$$f = \frac{F_y}{F} \left(l - \frac{2 \text{th} \left(\frac{kl}{2} \right)}{k} \right) \approx \frac{F_y}{F} \left(l - \frac{2}{k} \right) = \frac{F_y}{F} (l - 2l') = \frac{F_y}{F} l''. \quad (5.30)$$

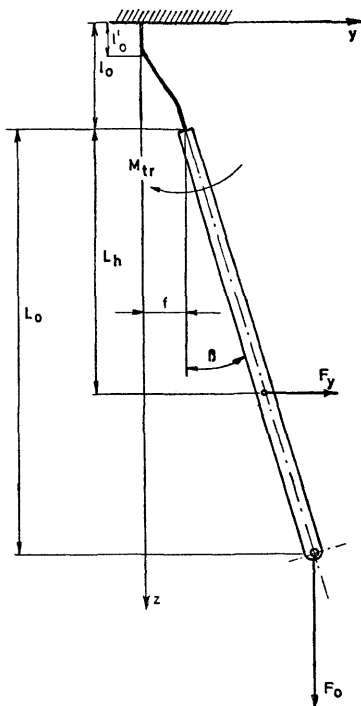


Sl. 5.7. a) Uzdužna horizontalna sila F_y djeluje na donji kraj ukliještene vrpce opterećene silom F , b) nadomjesni mehanizam

Ovdje će svijanje vrpce izazvati dodatni moment na krak vage u iznosu:

$$M_p = F_y l - F f - M = \frac{F_y}{k} \text{th} \left(\frac{kl}{2} \right) \approx \frac{F_y}{k} \approx F_y l'. \quad (5.31)$$

5.4.3. Uzdužna horizontalna sila djeluje ispod donjega uklještenog kraja vrpca koje nose ovješenu elektrodu (sl. 5.8)



Sl. 5.8.

Ovdje na donji kraj vrpce djeluju sile F_0 i F_y te moment $F_y L_h - F_0 L_0 \beta$. Sila F_y zakrenut će donji kraj vrpce za kut β_h , koji prema izrazu (5.26) iznosi $\beta_h \approx \operatorname{tg} \beta_h = (1 - \operatorname{sch} kl) F_y / F_0$. Moment $F_y L_h - F_0 L_0 \beta$ zakrenut će donji kraj trake za kut $(\beta - \beta_h)$, što prema izrazu (5.7) zahtijeva moment u vrpce iznosa $M_{vr} = (\beta - \beta_h) \sqrt{FEJ}$. Budući da je suma momenata na donjem kraju vrpce jednaka nuli, bit će:

$$F_y L_h - F_0 L_0 \beta - (\beta - \beta_h) \sqrt{FEJ} = 0$$

i nakon uređenja:

$$\beta = \frac{F_y}{F_o} \frac{L_h + (1 - \text{sch kl})/k}{L_o + 1/k} \approx \frac{F_y}{F_o} \cdot \frac{L_h + l_o'}{L_o + l_o'} \quad (5.32)$$

Pomak donjeg kraja vrpce dobiva se zbrajanjem pomaka koje izaziva sila F_y prema izrazu (5.25) i moment M_{vr} prema izrazu (5.4). Nakon uređenja nastaje:

$$f \approx \frac{F_y}{F_o} [l_o - l_o' (2 - L_h/L_o)]. \quad (5.33)$$

Svijanje vrpce izazvat će dodatni moment na krak vage u iznosu:

$$M_p = F_y l_o - F_o f + M_{vr} = F_y l_o - F_y [l_o - l_o' (2 - L_h/L_o)] + \\ + \frac{F_y}{F_o} \left[\frac{L_h + l_o'}{L_o + l_o'} - (1 - \text{sch kl}) \right] \sqrt{F_o R_o J_o}.$$

Poslije uređenja i uzevši $\text{sch kl} \approx 0$, izlazi:

$$M_p = F_y l_o' \left(2 - \frac{L_o + l_o' L_h/L_o}{L_o + l_o'} \right). \quad (5.34)$$

Kako je $l_o' \ll L_o + L_h$, dobiva se $M_p \approx F_y l_o'$ jednako kao i pomoću izraza (5.28) i (5.31).

5.4.4. Djelovanje uzdužnih horizontalnih sila na vrpce koje nose krakove vage

Uzdužne horizontalne sile na ovješenu elektrodu uzrokovat će i uzdužni pomak donjeg kraja vrpca što nose krakove vage. Budući da su i one ukliještene na oba kraja, dobiva se taj pomak uz pomoć izraza (5.30). Taj pomak izaziva dodatni moment koji kvira ravnotežu vage. Može se on izračunati služeći se izrazom (5.31).

5.4.5. Ukupni dodatni moment zbog djelovanja uzdužnih horizontalnih sila i njegovo određivanje

Uzdužne elektrostatske sile na ovješenu elektrodu uzrokovat će svijanje ovjesnih vrpca koje nose ovješenu elektrodu i krakove vage, a time i dodatne momente koji kvare točno mjerenje vertikalne elektrostatske sile. Elektrostatske uzdužne sile djeluju znatno ispod donjeg kraja vrpca, pa će se njihov ukupni dodatni moment računati prema izrazima (5.31) i (5.34):

$$M_{py} = F_y \left[l_k' + l_o' \left(2 - \frac{L_o + l_o' L_h/L_o}{L_o + l_o'} \right) \right] = F_y k_M. \quad (5.35)$$

Da bi se uzdužno centrirala ovješena elektroda i time izbjegle uzdužne elektrostatske sile, mjerit će se njezini uzdužni pomaci pod naponom

pomoću posebnoga kapacitivnog pretvornika smještenoga za duljinu L_i ispod donjeg kraja ovjesnih vrpca. Prema izrazima (5.30), (5.32) i (5.33) dobiva se za otklon ovještene elektrode u visini tog pretvornika ova vrijednost:

$$f_i = \frac{F_y}{F_k} (l_k - 2l'_k) + \frac{F_y}{F_o} [l_o - l'_o (2 - L_h/L_o)] + \frac{F_y}{F_o} \frac{L_h + l'_o}{L_o + l'_o} L_i = F_y k_f. \quad (5.36)$$

Iz jednadžbi (5.35) i (5.36) nastaje:

$$M_{py} = \frac{k_M}{k_f} f_i. \quad (5.37)$$

Koeficijenti k_M i k_f računski se i eksperimentalno dovoljno točno nalaze pa se time dobiva pouzdan način određivanja momenta M_{py} koji uzrokuje pogrešku vaganja vertikalne elektrostatske sile.

Razmotrimo još koliki se pomaci f_i smiju dopustiti, a da relativna pogreška u određivanju vertikalne elektrostatske sile ne prekorači zbog toga $5 \cdot 10^{-8}$. Da bi se udovoljilo tom zahtjevu, valja da omjer između momenta M_{py} i momenta koji stvara elektrostatska sila: $m_E g L_i$ bude manji od $5 \cdot 10^{-8}$. Iz toga izlazi:

$$f_i < 5 \cdot 10^{-8} k_f m_E g L_i / k_M. \quad (5.38)$$

Tako za: $l_k = 2$ mm, $l'_k = 0,06$ mm, $F_k = 20$ N, $F_o = 8$ N, $l_o = 10$ mm, $l'_o = 0,06$ mm, $L_h = 180$ mm, $L_i = 100$ mm i $L_o = 130$ mm dobivamo:

$$\begin{aligned} k_f &= \frac{2 - 2 \cdot 0,06}{20} + \frac{10 - 0,06(2 - 180/130)}{8} + \frac{180 + 0,06}{8(130 + 0,06)} 100 = \\ &= 0,094 + 1,245 + 17,305 = 18,645 \text{ mm/N}, \\ k_M &= 0,06 + 0,06 \left(2 - \frac{130 + 0,06 \cdot 180/130}{130 + 0,06} \right) = 0,06 + 0,06 = 0,12 \text{ mm} \\ M_{py} &= \frac{0,12}{18,645} f_i = 6,44 \cdot 10^{-3} f_i \text{ Nmm}. \end{aligned}$$

Iz tih brojčanih podataka, koji odgovaraju realnim odnosima u naponskoj vagi ETF-84, vidi se da bi se u približnom računu momenta M_{py} mogle računati veličine k_f , k_M i M_{py} pomoću ovih izraza:

$$k_M \approx l'_k + l'_o; k_f \approx (l_o + L_h L_i / L_o) / F_o; M_{py} \approx \frac{(l'_k + l'_o) F_o}{l_o + L_h L_i / L_o} f_i. \quad (5.39)$$

Masa etalonskog utega iznosi 10 g, a duljina kraka vage $L_i = 120$ mm, pa se uvrštavanjem u (5.38) dobiva:

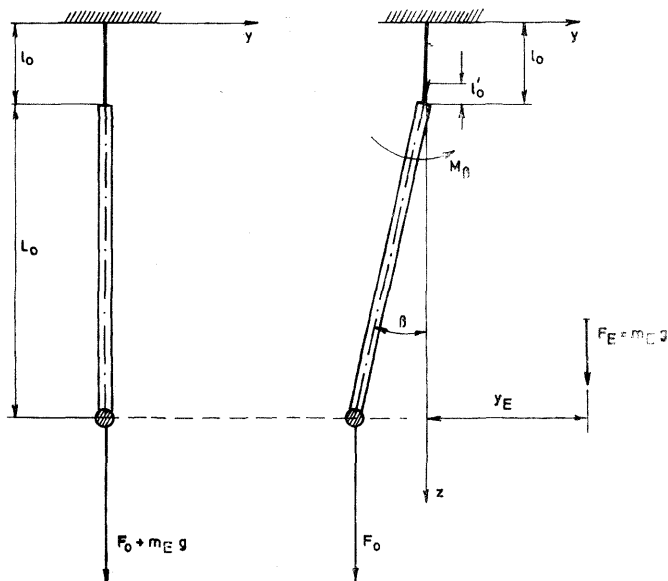
$$\begin{aligned} f_i &< 5 \cdot 10^{-8} \cdot 18,645 \cdot 0,01 \cdot 9,81 \cdot 120 / 0,12 \\ f_i &< 92 \text{ nm}. \end{aligned} \quad (5.40)$$

Prema našim dosadašnjim iskustvima, može se upotrebom osjetljivog kapacitivnog pretvornika i finih mehanizama za centriranje elektroda smanjiti f_i na otprilike 20 nm, tako da su zanemarive pogreške zbog dodatnog momenta M_{py} . Te su pogreške otklonjive i drukčijim postupcima (odjeljak 7.3.4).

5.4.6. Uzdužna zakretanja ovješene elektrode pri zamjeni elektrostatske sile težinom etalonskog utega

Kod supstitucije gravitacijske sile etalonskog utega elektrostatskom silom nastojat ćemo da one djeluju u istoj vertikali. Ako, međutim, budu te vertikale međusobno uzdužno razmaknute za y_E , nastat će uzdužno zakretanje ovješene elektrode za kut β (sl. 5.9).

Pri tome će se donji kraj ovjesne vrpce također zakrenuti za kut β , a za to je prema izrazu (5.7) potreban moment: $M_\beta = \sqrt{F_0 E J} \beta$. Pretpostavi



Sl. 5.9. a) Niskonaponska elektroda težine F_0 i etalonski uteg mase m_E ovješeni na krak vage, b) gravitacijska sila etalonskog utega $m_E g$ zamijenjena elektrostatskom silom $F_E = m_E g$ uzdužno pomaknutom od nje za y_E

li se da se pri tim malim pomacima ne mijenja položaj vertikalne elektrostatske sile, dobiva se uz oznake na slici 5.9 ova jednadžba momenta:

$$M_{\beta} = \sqrt{F_0 E J} \beta = M_E g y_E - F_0 (L_0 + l'_0) \beta \quad (5.41)$$

ili:

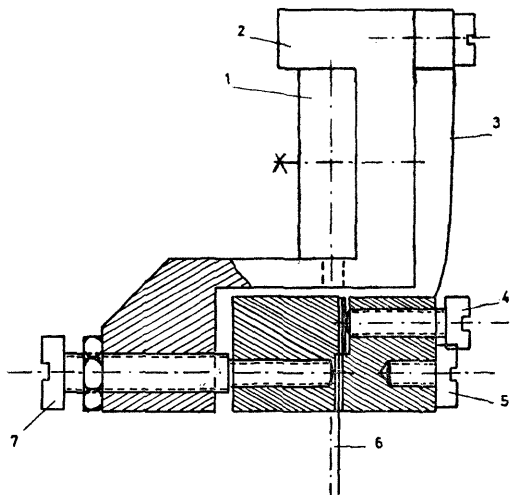
$$\beta = \frac{m_E g y_E}{\sqrt{F_0 E J} + F_0 (L_0 + l'_0)} \approx \frac{m_E g y_E}{F_0 (L_0 + 2l'_0)} \quad (5.42)$$

Ovjesna je vrpca najviše svinuta na svome donjem kraju, gdje stvara i najveći moment: $M = \sqrt{F_0 E J} \beta$. Na gornjem kraju ona je neznatno svinuta pa je tu njezin moment: $M_{\beta g} = E J y''$ (o) vrlo malen. Budući da je $y(z)$ dano izrazom (5.2), za njegovu drugu derivaciju dobivamo:

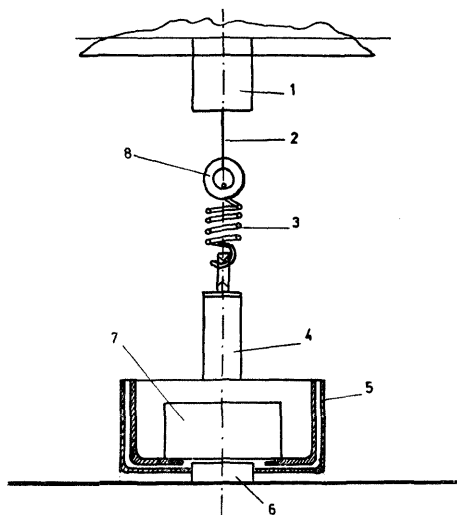
$$y''(z) = \frac{M}{F_0} k_0^2 \frac{\operatorname{ch} k_0 z}{\operatorname{ch} k_0 l_0}, \quad (5.43)$$

pa će nakon uređenja biti:

$$M_{\beta g} = \frac{\sqrt{F_0 E J}}{\operatorname{ch} k_0 l_0} \beta. \quad (5.44)$$



Sl. 5.10. Mehanizam za uzdužno fino pomicanje etalonskog utega: 1 — spojna letva ovješena na krakove vage; 2 — jaram; 3 — plosnato pero; 4 — vijak za pritezanje niti na kojoj visi etalonski uteg; 5 — vijak za pritezanje pera 3; 6 — nit na kojoj visi etalonski uteg; 7 — vijak s narezom M2×0,25 i M1,4×0,2 za ugađanje uzdužnog pomaka



Sl. 5.11. Ovjesište etalonskog utega: 1 — mehanizam za uzdužno pomicanje etalonskog utega; 2 — ovjesna nit; 3 — pero; 4 — košara; 5 — zračno prigušenje; 6 — podizač utega; 7 — etalonski uteg; 8 — prsten

Za $k_0 = 17,3 \text{ mm}^{-1}$ i $l_0 = 10 \text{ mm}$ dobiva se $ch k_0 l_0 = ch 173 = 3,4 \cdot 10^{73}$, tako da je moment $M_{\beta g}$ zbilja potpuno zanemariv.

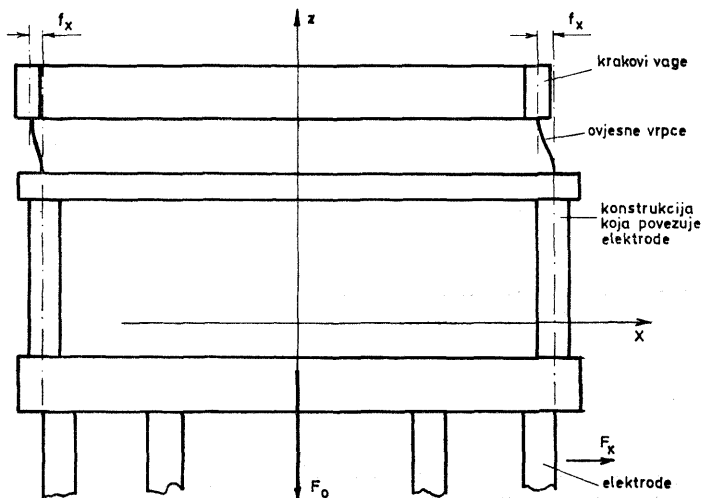
Pokazuje se da ugađanje y_E na dovoljno malen iznos nije pogodno ostvariti uzdužnim pomicanjem visokonaponskih elektroda (vidi odjeljak 7.3.4), pa valja predvidjeti mogućnost finoga uzdužnog ugađanja ovjesišta etalonskog utega. Moguće rješenje je na slici 5.10, gdje se jednim punim okretajem vijka $M2 \times 0,25$ dobiva uzdužni pomak ovjesišta etalonskog utega za $50 \mu\text{m}$. Osim toga, košaru s etalonskim utegom treba ovjesiti pomoću vrlo tanke vrpce kako se, zbog nejednakog nasjedanja etalonskog utega na košaru, ne bi pojavio nedopustivi uzdužni pomak njegove gravitacijske sile (odjeljak 5.8).

5.5. DJELOVANJE POPREČNIH HORIZONTALNIH ELEKTROSTATSKIH SILA

Zbog pločaste izvedbe elektroda, poprečne elektrostatske sile strmo rastu s odstupanjem od centričnog položaja, mnogo strmije od uzdužnih, pa će biti potrebne posebne mjere da se osigura stabilan rad vage. Povećanje mase ovjesene elektrode i spuštanje njezina težišta

nije povoljno zbog gubitka osjetljivosti, a i zbog konstrukcijskih razloga. Zato se kao prihvatljivo rješenje nameće izvedba gdje su niskonaponska elektroda i krakovi vage ovješeni pomoću dva para vrpca. Izborom duljine vrpca i njihovim međusobnim razmakom može se po volji ostvariti optimalna osjetljivost na poprečne horizontalne elektrostatske sile. Razmotrit će se najprije slučaj kad su vrpce pomoću kojih su ovješeni krakovi vrlo kratke ($l_k \approx 0$), tako da se mogu zanemariti uzdužni i poprečni pomaci njihova donjeg kraja. Nakon toga će se razmatranje provesti bez tog zanemarenja.

5.5.1. Djelovanje poprečnih horizontalnih sila uz $l_k \approx 0$

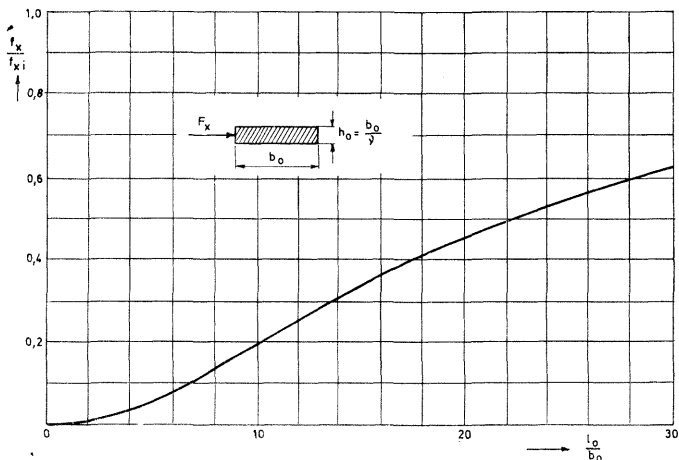


Sl. 5.12. Djelovanje poprečnih horizontalnih sila

Pretpostavi li se da su vrpce koje nose krakove vage vrlo kratke ($l_k \approx 0$) i da su krakovi vage potpuno kruti, djelovanje horizontalnih poprečnih elektrostatskih sila svest će se na poprečno svijanje vrpca koje nose ovješenu elektrodu (sl. 5.12). Budući da su oba kraja tih vrpca ukliještena, dobiva se poprečni pomak njihova donjeg kraja prema izrazu (5.30):

$$f_x = \frac{F_x}{F_0} \left[l_0 - \frac{2 \operatorname{th} \left(\frac{k_{ox} l_0}{2} \right)}{k_{ox}} \right] = \frac{F_x}{F_0} (1 - 2 l_{ox}) = \frac{F_x}{F_0} l_{ox}'' \quad (5.45)$$

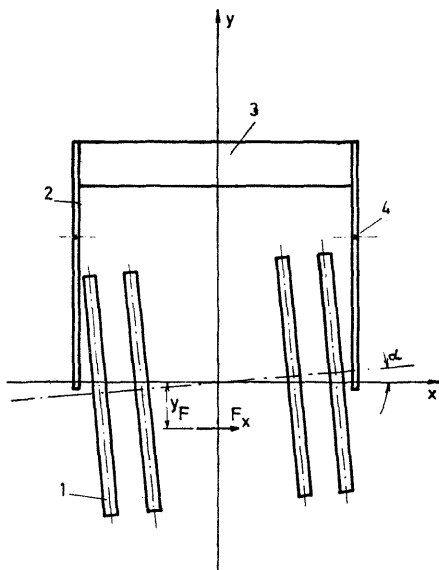
Zbog ovješavanja pomoću dviju razmaknutih vrpca zadržat će pri tome ovješena elektroda vertikalni položaj, kao što je to prikazano na slici 5.12.



Sl. 5.13. Omjer između progiba f_x prema izrazu (5.45) i progiba idealno savitljive vrpce $f_{xi} = F_x l_0 / F_0$ ovisno o omjeru širine vrpce b_0 i njezine duljine l_0 , ako je opterećena sa 500 N/mm² i ima modul elastičnosti $E = 200$ kN/mm²

Budući da se ovdje sviđa šira stranica trake, to će se drugi sumand u uglatim zagradama izraza (5.45) moći zanemariti tek kod vrlo dugih traka (sl. 5.13). Izraz (5.45) vrijedi samo kada poprečna sila djeluje točno na pravcu što prolazi kroz obje ovjesne vrpce. Međutim, ako poprečna sila djeluje na nekome drugom paralelnom pravcu koji je uzdužno pomaknut za duljinu y_F , nastat će zakretanje ovješanih elektroda (sl. 5.14).

Kako se djelovanje takve poprečne sile može svesti na učinak sile koja leži na pravcu što prolazi kroz obje ovjesne vrpce i na djelovanje momenta $M = F_x y_F$, razmotrit će se odvojeno slučaj kad u horizontalnoj ravni djeluje na elektrode samo moment M . Tad će na jednu vrpce djelovati uzdužna sila iznosa M/B , gdje je B razmak između vrpca, a na drugu sila istog iznosa, ali suprotnog predznaka. Uzdužni pomak donjeg kraja vrpca možemo i ovdje naći pomoću izraza (5.30), no kako se pri tome sviđa uža stranica vrpce, bit će faktor k bitno veći (označit ćemo ga sa k_{0v}):



Sl. 5.14. Horizontalna poprečna sila F_x djeluje ekscentrično na ovješene elektrode: 1 — ovješene elektrode; 2 — krakovi vage; 3 — protutež; 4 — ovješenje krakova

$$f_y = \frac{2M}{BF_0} \left[l_0 - \frac{2 \operatorname{th} \left(\frac{k_{oy} l_0}{2} \right)}{k_{oy}} \right] = \frac{2M}{BF_0} [l_0 - 2l'_{oy}] = \frac{2M}{BF_0} l''_{oy} \quad (5.46)$$

Tu je l''_{oy} duljina idealne vrpce bez ikakve krutosti koja daje jednak pomak kao i upotrijebljene vrpce duljine l_0 .

Zbog pomaka donjeg kraja jedne vrpce za $+f_y$, a druge za $-f_y$ zakrenut će se ovješena elektroda za kut α_0 :

$$\alpha_0 = \frac{4M}{F_0 B^2} \left[l_0 - \frac{2 \operatorname{th} \left(\frac{k_{oy} l_0}{2} \right)}{k_{oy}} \right] = \frac{4M}{F_0 B^2} [l_0 - 2l'_{oy}] = \frac{4M}{F_0 B^2} l''_{oy} \quad (5.47)$$

Kako je to već obrazloženo (odjeljak 4.4.1), potrebno je horizontalne sile i momente, a time i otklone koje oni izazivaju, svesti na takve iznose da ne remete točnost vaganja. Zato će biti potrebno predvidjeti

mehanizme za poprečno pomicanje visokonaponskih elektroda uzduž dvaju pravaca ugađanja udaljenih od poprečne simetrale za $+\frac{1}{2}y_u$, odnosno $-\frac{1}{2}y_u$. Osim toga bit će potrebno mjeriti, pomoću odgovarajućih indikatora, horizontalne pomake ovješene elektrode također uzduž dva pravca udaljena od poprečne simetrale za $+\frac{1}{2}y_i$, odnosno $-\frac{1}{2}y_i$. Radi što bržeg pronalaženja centričnog položaja u kojem nema dodatnih otklona pod naponom izazvanih horizontalnim elektrostatskim silama, bilo bi poželjno da se dodatni otkloni koje je pokazao desni indikator dadu otkloniti pomoću desnog sistema za ugađanje položaja visokonaponskih elektroda, a otkloni lijevog indikatora pomoću lijevog mehanizma. Ili, da pomaci dobiveni desnim mehanizmom ne uzrokuju otklone lijevog indikatora, i obrnuto. Izborom duljine i omjera stranica ovjesne vrpce to se postiže, o čemu će biti više riječi u 7. poglavlju. Tu će se razmotriti i izbor optimalne ovisnosti dodatnih pomaka o veličini poprečnih horizontalnih sila i momenata.

5.5.2. Djelovanje poprečnih horizontalnih sila kad je $l_k \neq 0$

Radi konstrukcijskih razloga potrebno je da vrpce koje nose krakove vage imaju odgovarajuću duljinu l_k . Zbog toga horizontalna poprečna elektrostatska sila F_x , koja djeluje na pravcu što prolazi kroz ovjesišta ovješene elektrode, uzrokuje zakretanje krakova vage za kut α_{kF} (sl. 5.15):

$$\alpha_{kF} = \frac{4 F_x L_1}{F_k B^2} \left[l_k - \frac{2 \operatorname{th} \left(\frac{k_{ky} l_k}{2} \right)}{k_{ky}} \right] \approx \frac{4 F_x L_1}{F_k B^2} [l_k - 2l'_{ky}] = \frac{4 F_x L_1}{F_k B^2} l''_{ky} \quad (5.48)$$

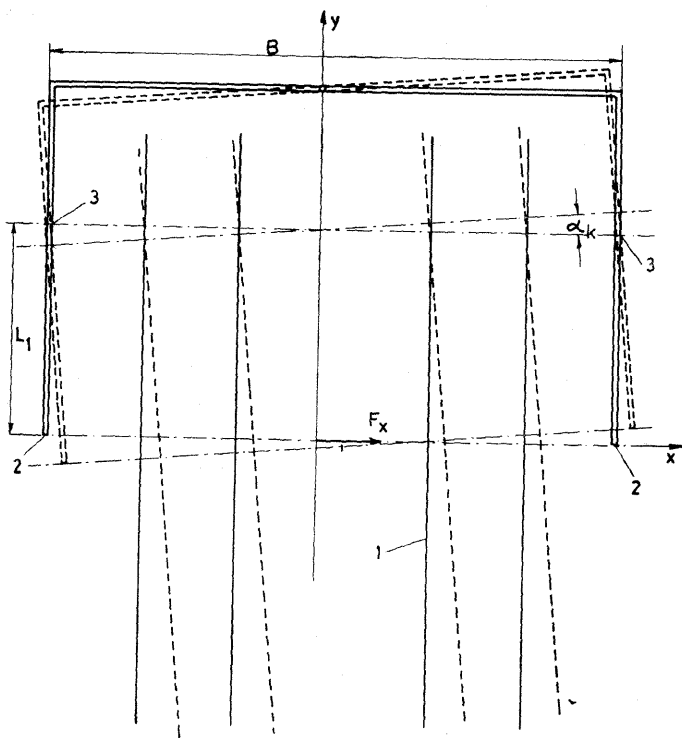
Tu se vrpce koje nose krakove vage svijaju preko svoje tanje stranice pa je $k_{ky} = \sqrt{F_k/EJ_{ky}}$ relativno veliko, tako da je drugi član u uglastim zgradama gotovo zanemariv ($l_k \approx l''_{ky}$). Moment u horizontalnoj ravnini koji djeluje na ovješene elektrode ujedno zakreće i krakove vage za kut α_{kM} :

$$\alpha_{kM} = \frac{4 M}{F_k B^2} \left[l_k - \frac{2 \operatorname{th} \left(\frac{1}{2} k_{ky} l_k \right)}{k_{ky}} \right] \approx \frac{4 M}{F_k B^2} [l_k - 2l'_{ky}] \approx \frac{4 M}{F_k B^2} l''_{ky} \quad (5.49)$$

Više o tome naći će se u 7. poglavlju.

5.6. UTJECAJ NEPODUDARANJA GRAVITACIJSKE SILE ETALONSKOG UTEGA I ELEKTROSTATSKE SILE U POPREČNOM SMJERU

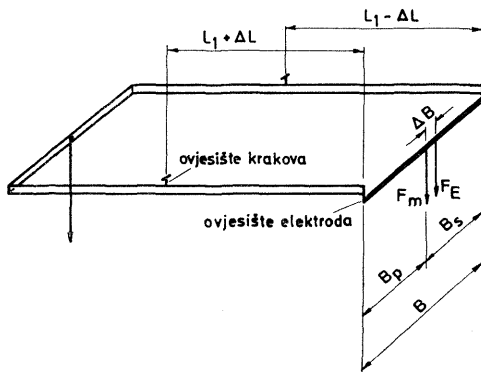
Pretpostavimo da težina etalonskog utega F_m djeluje na udaljenost B_p od prednjeg ovjesišta, odnosno na udaljenosti $B_s = B - B_p$ od stražnjeg



Sl. 5.15. Zakretanje krakova vage i ovješanih elektroda zbog sile F_x (crtkano):
 1 — ovještene elektrode; 2 — krakovi vage; 3 — ovjesišta krakova pomoću vrpca
 dužine l_k

ovjesišta (sl. 5.16). Tad u ravnoteži, uz $L_{1p} = L_1 + \Delta L$ i $L_{1s} = L_1 - \Delta L$, izlazi rezultirajući moment etalonskog utega M_m :

$$\begin{aligned} M_m &= F_m \frac{B - B_p}{B} (L_1 + \Delta L) + F_m \frac{B_p}{B} (L_1 - \Delta L) = \\ &= \frac{F_m (B L_1 + B \Delta L - 2 B_p \Delta L)}{B} \end{aligned} \quad (5.50)$$



Sl. 5.16. Elektrostatska sila F_E i gravitacijska sila etalonskog utega poprečno razmaknute za ΔB

Neka elektrostatska sila $F_E = F_m$ ne djeluje u istoj vertikali kao F_m , već pomaknuto poprečno za ΔB . Tad njezin rezultirajući moment iznosi:

$$\begin{aligned} M_E &= F_E \frac{B - B_p - \Delta B}{B} (L_1 + \Delta L) + F_E \frac{B_p + \Delta B}{B} (L_1 - \Delta L) = \\ &= F_E (B L_1 + B \Delta L - 2 B_p \Delta B \Delta L - 2 \Delta B \Delta L) / B. \end{aligned} \quad (5.51)$$

Zbog odstupanja ΔL i ΔB dobiva se, dakle, relativna pogreška:

$$\delta_{LB} = \frac{M_E - M_m}{M_m} = - \frac{2 \Delta B \Delta L}{B L_1 + B \Delta L - 2 B_p \Delta L} \approx - \frac{2 \Delta B \Delta L}{B L_1} \quad (5.52)$$

Na primjer, za $B = 260$ mm i $L_1 = 120$ mm, $\Delta B = 0,1$ mm i $2 \Delta L = 2 \mu\text{m}$ bit će relativna pogreška: $\delta_{LB} = 0,1 \cdot 0,002 / 260 \cdot 120 = 6,4 \cdot 10^{-9} = 0,0064$ ppm. Iz tog se primjera uočava da neće biti teško svesti tu pogrešku na neznatni iznos. Predviđeno je fino ugađanje duljine krakova, a njihova se jednakost može u svako doba provjeriti jer su tu dva etalon-

ska utega iznad lijeve i desne polovice elektroda. Time se dobiva sedam raznih kombinacija vaganja, što ujedno omogućuje i provjeru jednakosti krakova.

Toleranciju od 0,1 mm za razmak B_p i B_s neće biti teško održati odgovarajućom obradom pripadnih dijelova i ugađanjem ovjesišta etalonskih utega pomoću prikladnih kalibara.

5.7. UGAĐANJE I ODRŽAVANJE RAVNOTEŽNOG POLOŽAJA

Prije zatvaranja vage i punjenja dušikom ugađa se ravnotežni položaj i osjetljivost mehaničke vage pomoću za to namijenjenih vijaka na protuutegu. Nakon što se vaga zatvori i ispunji dušikom, moguće je da se poremeti njezina ravnoteža zbog promjene uzgona i neujednačenih volumena ovješene elektrode i protuutega. Poslije dužeg vremena također može, zbog oksidacijskog djelovanja preostalog kisika, u vagi nastati promjena mase ovješених dijelova. Zato je i nakon zatvaranja vage potrebno osigurati fino naknadno ugađanje njezina ravnotežnog položaja. Poslije supstitucije težine utega elektrostatskom silom održava se ravnoteža vage povratnom vezom između njezina otklona i napona koji je priključen između njezinih elektroda.

Pri mjerenju kapaciteta između elektroda, zbog elektrostatskih sila što ih stvara napon potreban pri tom mjerenju, poremetila bi se ravnoteža vage pa se tad njezin ravnotežni položaj automatski održava naponom priključenim na posebnu pomoćnu elektrodu. O tome će se naći više u ovom poglavlju.

5.7.1. Pomoćni napon za daljinsko ugađanje ravnotežnog položaja vage

Pomoćni napon U_p priključuje se između posebne elektrode učvršćene na referentnu ploču i uzemljene pomoćne elektrode na ovješenoj elektrodi (poz. 5. i 6 na sl. 3.2). Time se stvara elektrostatska sila:

$$F_p = \frac{1}{2} U_p^2 \frac{C}{z}, \quad (5.53)$$

a tu su C i z kapacitet i razmak između navedenih elektroda. Iznos napona U_p odabire se s obzirom na očekivanu razliku uzgona u zraku i dušiku koja iznosi:

$$\Delta F_u = g \cdot \Delta \rho \cdot \Delta V, \quad (5.54)$$

Pri tome je $\Delta \rho$ razlika u gustoćama zraka i dušika, a ΔV je razlika u volumenu ovješених dijelova i reduciranog volumena krakova vage i protuutega. Tako, ako se volumeni izjednače na 2‰ ili na otprilike $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$, a razlika u gustoćama zraka i dušika iznosi $0,2 \text{ kg/m}^3$, dobivamo: $\Delta F_u \approx 20 \cdot 10^{-6} \text{ N}$. Da bi se kompenzirala ta promjena uzgona, bit će prema izrazu (5.53) uz $C = 40 \text{ pF}$ i $z = 0,001 \text{ m}$ potreban napon $U_p = \sqrt{2 \Delta F_u z / C} = 31,6 \text{ V}$. Radi sigurnosti odabrana je maksimalna vrijednost tog napona 100 V , s tim da se ona može vrlo fino ugađati od 50 do 100 V (sl. 5.17). Jednom ugođena vrijednost tog napona ne smije iza-

zvati za vrijeme supstitucijskog postupka promjenu sile veću od 0,02 ppm mjerene elektrostatske sile vage, što znači da relativne promjene tog napona ne smiju prekoračiti $\Delta U_p/U_p \leq 0,02 \cdot 10^{-6} \cdot \text{mgz}/U_p^2 C = 4 \cdot 10^{-6}$ za $U_p = 100$ V. To se postiže vrlo dobro stabiliziranim elektroničkim izvorima istosmjernog napona.

Tim naponom povećava se osjetljivost mehaničke vage jer se otklanjanjem ovješene elektrode iz ravnotežnog položaja prema gore povećava njezina elektrostatska sila, pa time i njezin otklon, a pri njezinu otklanjanju prema dolje je obratno. Rezultirajuća osjetljivost bit će $S_{\Sigma} (S + S_u)$, gdje je S dan izrazom (5.21), a S_u iznosi:

$$S_u = - \frac{z^2 g}{U_p^2 C} \quad (5.55)$$

Za napon $U_p = 100$ V, $C = 40$ pF i $z = 0,001$ m dobiva se $S_u = -24,5$ m/kg.

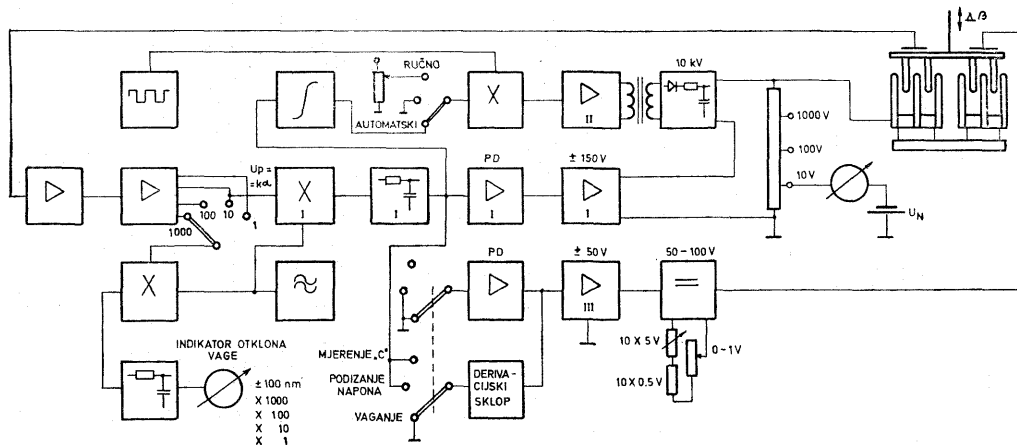
Vijcima za ugađanje osjetljivosti S po volji se namješta i postiže da rezultirajuća osjetljivost bude opet 10 m/kg kako je to odabrano u odjeljku 5.3.

5.7.2. Održavanje ravnotežnog položaja pri podizanju napona i pod naponom od 10 kV

Titrajno vrijeme mehaničke vage, kad su na nju ovješeni etalonski utezi od 2x5 g, a nije priključen nikakav napon, bit će:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}} \quad (5.56)$$

pri čemu je J moment tromosti, a D direkcioni moment. Kod naše nove naponske vage bit će: $J = 0,021$ kg m², a $D = gL_1^2/S = 9,81 \cdot 0,12^2/10 = 0,0141$ Nm/rad, gdje je S osjetljivost koja prema odjeljku 5.3. iznosi 10 m/kg, a L_1 je duljina krakova vage, pa izlazi: $T_0 = 7,7$ s. Prigušenje je samo zračno pa je stepen prigušenja manji od 0,1. Pri supstituciji težine etalonskih utega elektrostatskom silom vrlo se polagano posebnim podizačem podiže najprije jedan pa drugi uteg, koji su elastično zavješeni. Istodobno se automatski povisuje napon između elektroda kako je to opisano u odjeljku 4.4.2. Elektronički sklop kojim se to provodi prikazan je na slici 5.17. Otklon vage nastao pri podizanju utega pretvara se u njemu proporcionalni napon $U_p = Ka$ i odmah preko brzog pojačala I za ± 150 V privodi elektrodama pa nastala elektrostatska sila smanjuje otklon vage. Iz regulacijskih razloga nije povoljno to brzo pojačalo izvesti za napone više od otprilike ± 150 V, zato se potrebnih 10 kV dobiva preko integratora i visokonaponskog pojačala II. Cijeli postupak povišenja napona na puni iznos traje nekoliko minuta, a da pri tome otkloni ovješene elektrode ne premaše $1 \mu\text{m}$. Time se bitno smanjuju pojave histereze u ovjesnim vrpčama, kojih bi bilo mnogo više pri naglom uključivanju napona. Kad se napon povisuje, a zatim pri njegovu održavanju poželjno je postići aperiodski odziv koji će se



Sl. 5.17. Blokovska shema sklopa za automatsko održavanje ravnoteže vage, I i II — sklopovi za dobivanje napona do 10 kV i automatsko održavanje ravnoteže vage pri podizanju napona i pod naponom od 10 kV, III — sklopovi za: a) fino ugađanje ravnoteže vage dok su na nju ovješeni etalonski utezi; b) automatsko održavanje ravnoteže vage pri mjerenju kapaciteta; c) ispomoć pri podizanju napona

dobiti ako stepen prigušenja vage pod naponom s_u bude ravan jedinici. Uz zanemarenje članova trećeg i viših redova to će se ostvariti kad je:

$$s_u = \frac{s + \tau K A C_u T T_0}{\sqrt{1 + K C_u A}} \quad (5.57)$$

Pri tome je K konstanta kapacitivnog pretvornika otklona vage ($K = U_{p/a}$, u V/rad), A istosmjerno pojačanje sklopova označenih na slici 5.17. s I, a C_u je naponska osjetljivost same vage, koja je razmjerna omjeru priključenog napona U i nazivnog napona vage $U_n = 10$ kV:

$$C_u = \frac{2 m_E g L_1}{D U_n^2} U, \quad (5.58)$$

T je vremenska konstanta proporcionalno derivirajućeg sklopa I. Ako je ona tako odabrana da se kod 10 kV postigne $s_u = 1$, smanjit će se stepen prigušenja kod $U = 100$ V nešto više od deset puta zbog ovisnosti konstante C_u o naponu na vagi. Zato je ostvarena mogućnost prigušenja sistema i naponom iz brzog pojačala III za ± 50 V priključenoga na pomoćnu elektrodu ovješene sustava. Djelovanjem tih povratnih veza smanjuje se prirodno titrajno vrijeme cijelog sustava, te pri vaganju napona kad su uključena samo pojačala I i II, dobivamo:

$$T_{0u} = \frac{T_0}{\sqrt{1 + K C_u A}} \quad (5.59)$$

Kod naše naponske vage je: $C_u = 2 m_E g L_1 / D U_n = 1,67 \cdot 10^{-4}$ rad/V pa se uz $K \cdot A = 5 \cdot 10^6$ V/rad dobiva $T_{0u} = T_0 / 28,9 = 0,27$ s.

Dosadašnjim je izvedbama ovog sklopa postignuto da otkloni ovještene elektrode kod napona od 10 kV ne premašuju nekoliko nanometara. Pri tome je stabilnost srednje vrijednosti napona na vagi ispod 0,2 ppm, a odstupanja njegovih trenutnih vrijednosti ovise o veličini vibracija podloge na koju je vaga montirana i znatno su manja noću i nedjeljom.

5.8. UREĐAJ ZA PODIZANJE ETALONSKIH UTEGA

Očekivanu vrlo malu mjernu nesigurnost vaganja napona mogla bi onemogućiti pojava mehaničke histereze u tankim vrpčama na kojima vise krakovi vage i ovješena elektroda. Vrlo kvalitetnim vrpčama mehanička histereza ne prekoračuje $1 \cdot 10^{-4}$ njihova otklona. Ovdje ćemo radi sigurnosti računati s čak stotinu puta većom histerezom i nastojati da ona ne izazove pogreške u vaganju napona veće od $2 \cdot 10^{-8}$. Iz toga prema izrazu (5.7) izlazi da za vrijeme cijelog postupka vaganja napona njezini otkloni ne smiju premašiti iznos:

$$\alpha_{\max} \leq \frac{2 \cdot 10^{-8} \cdot m_E g L_1}{10^{-2} [2 \sqrt{F_0 E_0 J_0} / 2 + 2 \sqrt{F_k E_k J_k} / 2]} \quad (5.60)$$

Tako za vrpce upotrijebljene u našoj vagi izraz u uglastim zgradama iznosi 1,6 Nmm pa se za $\alpha_{\max}$ dobiva 14,7 μrad , odnosno za najveći otklon ovješene elektrode 14,7 $\cdot 10^{-6} \cdot 0,12 = 1,76 \mu\text{m}$. Da bi se izbjegli veći otkloni od navedenoga, služi već opisani postupak postepenog podizanja elastično ovješene utega i napona koji se dobiva iz sporoga integrirajućeg pojačala, za napon do 10 kV, u seriji s brzim pojačalom za napone do 150 V. Zbog toga je potrebno da nagli pomaci pri podizanju utega budu takvi da ih još može svladati brzo pojačalo. Tu su dva posebno zavješena etalonska utega, svaki po 5 g, pa kad se potpuno podigne prvi uteg, bit će napon na vagi 10/ $\sqrt{2}$ kV, a nakon podizanja i drugog utega 10 kV. Pri tome bi nagli vertikalni pomak utega Δz izazvao promjenu napona ΔU :

$$\Delta U = \frac{U_n^2}{4U} \frac{\Delta z}{z_0}. \quad (5.61)$$

U izrazu je U napon vage u tom trenutku, U_n nazivni napon vage (10 kV), a z_0 je istežanje ovješena zbog težine etalonskog utega od 5 g. Da bi vaga pri tome ipak ostala u ravnoteži, potrebno je da ΔU bude manji od napona koji može dati brzo pojačalo (150 V). Iz toga izlazi, uz $z_0 = 2000 \mu\text{m}$:

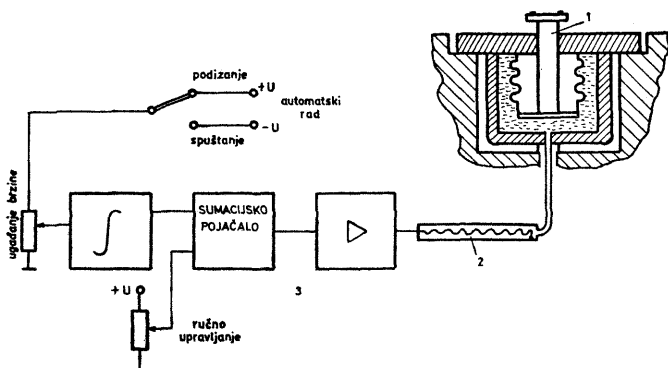
$$\Delta z \leq 0,012 (U + 150/2) \mu\text{m}. \quad (5.62)$$

Za $U = 0$ bit će najveći mogući pomak koji još može svladati brzo pojačalo 0,9 μm , a kod $U = 10$ kV čak 120 μm . To znači da će biti potreban vrlo fini mehanizam za polagano podizanje utega bez trzaja i skokova. Budući da se najteži zahtjevi postavljaju kod $U = 0$, ima mogućnosti da se tad ravnoteža vage održava i pomoću brzog pojačala III za ± 50 V (sl. 5.17) u seriji sa stabiliziranim istosmjernim izvorom za napone od 50 do 100 V koji su priključeni na pomoćnu elektrodu. Oni sami mogu svladati brze pomake utega koji ne prekoračuju 3 μm .

Nakon višegodišnjih istraživanja razvijen je hidraulički uređaj (sl. 5.18) ispunjen uljem za daljinsko električki upravljano podizanje utega. To se postiže regulacijom struje ogrjevnog namota smještenoga u tanku cijevčicu male vremenske konstante. Zbog zagrijavanja povećava se volumen ulja i polagano se isteže mali brončani mijeh koji podiže uteg. Takav način ovješena i podizanja utega ima još jednu prednost. Ako se uteg mase m_E ne postavi točno u sredinu zdjelice mase m_z , nego npr. udesno za Δy , otklonit će se zdjelica ulijevo za $k \Delta y$, gdje je $k = m_E / (m_E + m_z)$, tako da će uteg nasjesti na podizač udesno za $(1 - k) \Delta y$. Kod idućeg podizanja nasjest će on za $(1 - k)^2 \Delta y$ udesno, pa će nakon nekoliko podizanja zauzeti praktički centrični položaj, i to prije što je k bliže jedinici, odnosno što je zdjelica lakša.

5.9. UTJECAJ TEMPERATURE I VIBRACIJA

Toplinsko rastežanje krakova mehaničke vage zbog promjene temperature njezina okoliša, nastalo za vrijeme supstitucije težine etalonskog utega elektrostatskom silom, uzrokuje pogrešku u određivanju vrijednosti mjerenog napona. Ona je razmjerna nastaloj razlici tempe-



Sl. 5.18. Hidraulički uređaj za daljinsko podizanje etalonskog utega: 1 — podizač etalonskog utega (sl. 5.11) učvršćen na miješ potiskivan uljem; 2 — cjevčica s ogrjevnim namotom; 3 — elektronički sklop koji omogućuje ručno, poluautomatsko ili potpuno automatsko podizanje i spuštanje utega

perature između dijela kraka na kojem visi ovješena elektroda i dijela na kojem je učvršćen protuuteg. Označimo tu temperaturnu razliku s $\Delta\theta$ pa će biti:

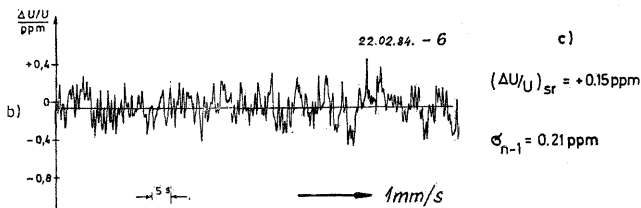
$$p = \frac{m_o}{2 m_E} \Delta\theta \alpha_{AL}. \quad (5.63)$$

pri čemu je m_o ukupna masa ovjeshene elektrode. Za $m_E = 10$ g, $m_o = 800$ g i $\alpha_{AL} = 23 \cdot 10^{-6}/K$ pogrešku od $1 \cdot 10^{-8}$ u određivanju napona uzrokuje već promjena razlike temperature od samo 11 μK . Dosadašnja iskustva pokazuju da promjene razlike temperature ne premašuju tu vrijednost zbog učinka ekstremno osjetljivog regulatora temperature vage, trima dobro izoliranim kućištima i masivnim krakovima vage.

U dosadašnjem radu najviše je poteškoća u postizanju ekstremno male mjerne nesigurnosti vaganja napona izazvao nepovoljni smještaj naponske vage u podrumskim prostorijama armiranobetonske zgrade Elektrotehničkog fakulteta u Zagrebu, koja se nalazi u neposrednoj blizini željezničke i tramvajske pruge. Budući da nije bilo moguće izgraditi posebne temelje za naponsku vagu, ukopane u zemlju, na nju se nesmanjenim intenzitetom prenose vibracije dizala i drugih strojeva, tako da se povoljni uvjeti za najpreciznija mjerenja postižu samo noću i nedjeljom. Ipak su i u takvim uvjetima ostvarena ekstremno mala rasipanja pojedinačne supstitucije od samo 0,2 ppm mjerenog napona (sl. 5.19), što reducirano na ukupnu masu ovjeshenu na krak vage čini rasipanje od samo 0,003 ppm. To je rasipanje koje danas može ostvariti samo nekoliko vrhunskih vaga za mjerenje prakilograma, i to u bitno povoljnijim seizmičkim uvjetima.

a)

Red.br. i	1	2	3	4	5	6	7	8
$(\Delta U/U)_{i-1}/\text{ppm}$	0	+0.47	+0.29	+0.39	-0.10	-0.06	+0.06	+0.17



Sl. 5.19. Provjera ponovljivosti vaganja napona naponskom vagom ETF-Zagreb 10 kV, 10 g (odjeljak 3.6) obavljena 22. 2. 1984. prema shemi spoja na slici 4.7. sa sekundarnim etalonom napona U_N — Fluke 731 B: a) kod stalnog položaja visokonaponskih elektroda ($z = 0,025$ m) supstitucija napona provedena je uzastopce osam puta; očitane srednje vrijednosti relativnih odstupanja mjerenog napona uz pomoć nulindikatora N prikazane su tablicom; b) zapis mjernog rezultata (otklona nulindikatora) pod rednim brojem $i = 6$; c) srednja vrijednost svih očitavanja iz tablice a) i standardno odstupanje pojedinačnih vrijednosti

6. DIMENZIONIRANJE ELEKTRODA NAPONSKE VAGE S PLOČASTIM ELEKTRODAMA

Da bi se pristupilo dimenzioniranju elektroda, valja prije svega odabrati napon između elektroda, iznos elektrostatske sile, vertikalni pomak visokonaponskih elektroda i osnovni raspored elektroda.

a) Izbor napona vage U_v

Prema analizi u odjeljku 4.5.3. pokazuje se da je za postizanje povoljnog omjera između težine elektroda i njihove elektrostatske sile prikladan napon od otprilike 10 kV. Radi što točnije usporedbe sa sekundarnim etalonom napona prema slici 4.7. poželjan je omjer $U_v/U_N = 1000 \pm 100$ ppm, pa ako se kao sekundarni etalon napona upotrijebi deset termostatisiranih Westonovih ćelija, dobivamo $U_v = 10181$ V. Ako se upotrijebi elektronički etalon napona 10 V, bit će $U_v = 10\,000$ V. Višemjesečno ispitivanje etalona 732 A DC Reference Standard tvornice Fluke kod nas i u PTB-u pokazala su da je njegova mjesečna stabilnost reda $1 \cdot 10^{-7}$. Zbog njegova malog unutrašnjeg otpora pojednostavljuje se oklapanje sklopa za usporedbu. Osim toga, ako se odabere napon vage $U_v = 10$ kV, dobivaju se uz pomoć visokonaponskog djelila zaokruženi iznosi napona u skokovima po 100 V, što je prikladno pri baždarenju elektroničkih kalibratora i digitalnih voltmetara. To su razlozi što je odabran napon vage od 10 kV ± 100 ppm.

b) Izbor elektrostatske sile

Elektrostatska se sila određuje izjednačavanjem s gravitacijskom silom etalonskog utega. Nesigurnost tog postupka ovisi o nesigurnosti poznavanja mase etalonskog utega, pa je bolje odabrati utege veće mase kod kojih je ta nesigurnost manja (rel. nesig. poznavanja mase od 1 g deset je puta veća nego kod 1 kg [31]). Poželjno je također da se masa utega upotrijebljenih u vagi poklapa unutar npr. ± 100 ppm s nekom od standardiziranih vrijednosti za etalonske utege, kako se ne bi povećala nesigurnost pri njegovu baždarenju. Ako se još vodi računa o izvedbenim i konstrukcijskim zahtjevima, pokazuje se da dolaze u obzir utezi od 1, 2, 5 i 10 g. Na slici 6.1. prikazani su tlocrti naponskih vaga s utezima od 2x1, 2x2 i 2x5 g. Pri tome su njihove visine praktički jednake tako da je volumen unutrašnjosti naponske vage s dva utega od po pet grama samo 1,7 puta veći od volumena vage za 2x1 g. Zato je naponska vaga ETF s pločastim elektrodama izvedena za utege od 2x5 g. Gustoća upotrijebljenih utega iznosi: $\rho_m = 7914 \text{ kg/m}^3$, a za gustoću plina ρ_a u kojem se nalazi vaga uzet ćemo konvencionalnu vrijednost $1,2 \text{ kg/m}^3$. Ona se po potrebi mijenja promjenom tlaka p u vagi. Težno ubrzanjem na mjestu naponske vage ETF-Zagreb iznosi $9,806\,630 \text{ m/s}^2$, pa prema (4.6) za elektrostatsku silu F_e dobivamo:

$$F_e = m \cdot g \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) = 0,01 \cdot 9,806\,630 (1 - 1,2/7914) = 0,098\,051\,4 \text{ N.} \quad (6.1)$$

Time je prema izrazu (4.27) ujedno definirana vrijednost kvocijenta $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$:

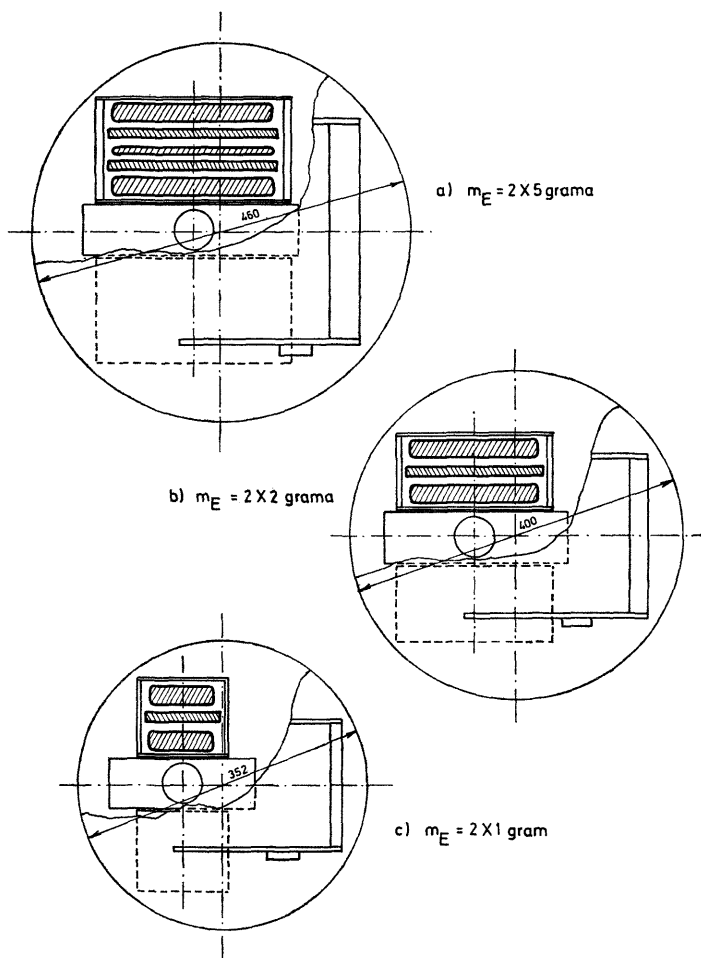
$$\frac{C_g - C_d}{z_g - z_d} = \frac{2 F_e}{U^2} = \frac{2 \cdot 0,098\,051\,4}{10\,000^2} = 1961,03 \text{ pF/m.} \quad (6.2)$$

c) Vertikalni pomak visokonaponskih elektroda

Kod naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 2 g određivao se pomak pomoću mjerki od 50 mm. Kod naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 2x5 g određivat će se taj pomak ili izravno pomoću lasera ili uz pomoć internog uređaja koji mjeri točno samo pomake u skokovima po jedan milimetar. Njega je potrebno izbaždariti pomoću lasera. Za određivanje napona valja prema izrazu (4.27) još izmjeriti razliku kapaciteta $C_g - C_d$. Mjerenje te razlike bilo bi pojednostavljeno i točnije ako bi ta razlika iznosila 100 pF, koliko ima i etalon kapaciteta. Pri tome odstupanja od ± 100 ppm ne bi uzrokovala dodatne teškoće. Prema izrazu (6.2) izlaze ove karakteristične vrijednosti:

Red. br.	$\frac{z_g - z_d}{\text{mm}}$	$\frac{C_g - C_d}{\text{pF}}$
1	50	98,051 4
2	50,993 66	100
3	51	100,012 4

Iz podataka je očito da se izborom pomaka od 51 mm dobiva mogućnost njegova mjerenja pomoću internog uređaja, a da pri tome razlika



Sl. 6.1. Tlocrti naponskih vaga s pločastim elektrodama s utezima od $2 \times 1 \text{ g}$, $2 \times 2 \text{ g}$ i $2 \times 5 \text{ g}$

kapaciteta odstupa samo za 124 ppm od kapaciteta etalonskog kondenzatora. Zbog toga je odabrano:

$$z_g - z_d = 51 \text{ mm.} \quad (6.3)$$

d) Osnovni raspored elektroda

Elektrode su podijeljene u dvije grupe između kojih je sustav za vođenje visokonaponskih elektroda, što je iz konstrukcijskih razloga vrlo povoljno. Svaka se grupa sastoji od dvije niskonaponske i tri visokonaponske elektrode (sl. 6.1.a). Točno iznad njihova središta ovješeni su etalonski utezi od 5 g, tako da u istoj vertikali djeluje elektrostatska sila F_e i gravitacijska sila etalonskog utega.

U nastavku bit će određen razmak između elektroda tako da maksimalna jakost električnog polja ne premaši 15 kV/cm, što je otprilike 50 % probojne čvrstoće dušika pri tlaku od 1 bara. Proračunat će se rubni profil elektroda i sve dimenzije prikazane na slici 6.2.

6.1. RAZMAK s IZMEĐU ELEKTRODA

Ako se izborom profila završetka elektrode ostvari faktor iskorištenja polja $\eta = 0,95$, onda se za razmak s između elektroda pri naponu $U = 10$ kV i dopuštenoj maksimalnoj jakosti električnog polja E_m od 15 kV/cm dobiva:

$$s = \frac{U}{\eta E_m} = \frac{10}{0,95 \cdot 15} = 0,7018 \text{ cm, zaokruženo } 0,7 \text{ cm.}$$

Pri izmjeničnome sinusnom naponu od 10 kV bit će jakost električnog polja $E_m = 15 \cdot \sqrt{2} = 21,2$ kV.

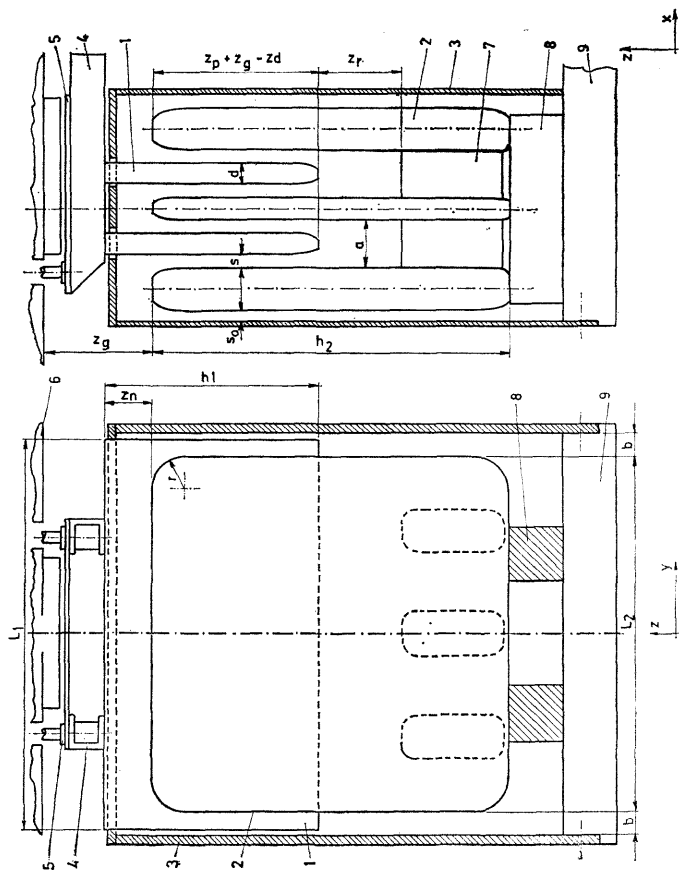
6.2. PROFIL ZAVRŠETKA NISKONAPONSKE I VISOKONAPONSKE ELEKTRODE

Završetak se elektroda izvodi tako da na njima ne poraste jakost električnog polja više od 5 %. Nesimetrični $\pi/2$ Bordin-profil [III/10] osigurava jednaku jakost polja na cijeloj elektrodi za raspored prema slici 6.3.

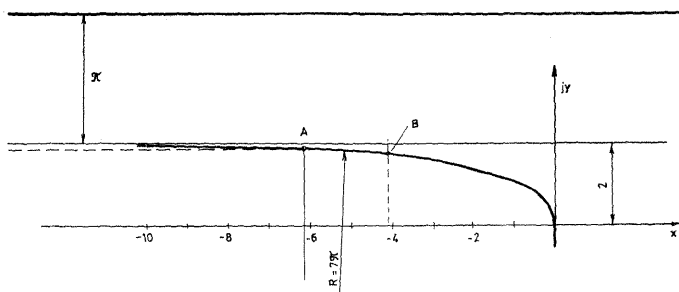
Analički izraz za taj profil u parametarskom obliku je:

$$\begin{aligned} x &= 2 \left[\sin \psi - \ln \operatorname{tg} \left(\frac{\psi}{2} + \frac{\pi}{4} \right) \right] & \psi &= 0 \dots \frac{\pi}{2} \\ y &= 2(1 - \cos \psi). \end{aligned} \quad (6.4)$$

Prikazani nesimetrični $\pi/2$ Bordin profil vrijedi kad se samo s jedne strane profila nalazi ravnina, dok se u rasporedu prema slici 6.2. profil nalazi između dviju paralelnih ravnina. Zbog toga će se pojaviti odstupanje u jakosti električnog polja na vrhu profila. Ocjenjujemo da ta



Sl. 6.2. Elektrode i oklop naponske vage ETF-84 — visokonaponske elektrode u gornjem položaju (legenda na str. 73)



Sl. 6.3. Nesimetrični Bordin profil

odstupanja neće biti znatna i da će rezultirati smanjenjem jakosti polja na vrhu profila. Zato ćemo vrh elektrode izvesti u obliku nesimetričnog $\pi/2$ Bordina profila. Osim toga trebat će izvršiti korekciju Bordina profila u onom dijelu gdje se y asimptotski približava vrijednosti 2, i to zbog izvedbenih razloga. Taj ćemo dio nadomjestiti dijelom valjka određenog polumjera, odnosno na uglovima dijelom kugline kalote. Polumjer tog valjka, odnosno kugle tako će se odabrati da ne bude povećanja jakosti električnog polja za više od 5%. Najveća jakost E_m električnog polja određuje se za valjak uspoređen s ravninom prema izrazu [30]:

$$E_m = \frac{U}{s} f_v$$

$$f_v = \frac{p^2 - 1}{2p \ln p}, \quad p = \frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 - 1}, \quad (6.5)$$

a za kuglu prema ravnini vrijedi:

$$E_m = \frac{U}{s} f_k$$

$$f_k = \frac{1}{4} \left[\frac{2s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{2s}{r} + 1\right)^2 + 8} \right]. \quad (6.6)$$

Sl. 6.2. Elektrode i oklop naponske vage ETF-84: 1 — ovješene elektrode; 2 — visokonaponske elektrode; 3 — oklop; 4 — okvir koji povezuje ovješene elektrode; 5 — pomoćna elektroda za mjerenje orklona; 6 — referentna ploča; 7 — odstojnici između visokonaponskih elektroda; 8 — izolatori visokonaponskih elektroda; 9 — ploča koja nosi visokonaponske elektrode i može se skupa s njima vertikalno pomicati

U tablici 6.1. prikazani su iznosi faktora f dobiveni pomoću izraza (6.5) i (6.6) za razne omjere s/r . Oni su otprilike dva puta veći za kuglu i ravninu nego za valjak i ravninu.

TABLICA 6.1.
Faktor f za valjak i ravninu (f_v) te za kuglu i ravninu (f_k)

$\frac{s}{r}$	0,02	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,7	1	2
f_v	1,007	1,017	1,033	1,050	1,066	1,098	1,162	1,224	1,315	1,605
f_k	1,013	1,034	1,068	1,103	1,139	1,212	1,366	1,527	1,781	2,666

Iz tih izraza očito je da valja odabrati polumjer valjka $R_v = 7s$ i polumjer kugle $R_k = 14s$ ako se želi da faktor f bude manji od 1,05.

Kod ovješene elektrode koja je duža od visokonaponske elektrode, ne moraju njezini bočni rubovi biti profilirani pa se kod nje može dio Bordina profila s polumjerom zakrivljenosti većim od $7s$ nadomjestiti valjkom polumjera $7s$ (dio od A do B na sl. 6.3). Analitičkim putem dobivaju se za $s = \pi$ koordinate točke B: $x_B = -4,191$ i $y_B = 1,819$, gdje Bordin profil upravo postiže polumjer zakrivljenosti $R = 21,967 \approx 7\pi$. Koordinate središta zakrivljenosti pri tome iznose: $x_C = -6,183$ i $y_C = -20,058$. To znači da će profilirani dio prijeći u ravni dio kod $x = -x_C = -6,183$ pa koordinate točke A iznose: $x_A = -6,183$ i $y_A = R - y_C = 21,967 - 20,058 = 1,909$. Kako je kod naše naponske vage $s = 7$ mm, potrebno je navedene vrijednosti pomnožiti faktorom $7/\pi$, tako da je duljina profiliranog dijela elektrode $7x_{A/\pi} = 7 \cdot 6,183/\pi \approx 13,8$ mm.

Kod visokonaponskih elektroda moraju se osim njihovih gornjih rubova profilirati i njihovi bočni rubovi, koji se također nalaze u jakome električnom polju. Zato je na njihovim uglovima potrebno asimptotski dio Bordina profila nadomjestiti kuglastom površinom polumjera $14s$, pa tad za koordinate točke B na slici 6.3. dobivamo: $x_B = -5,348$ i $y_B = 1,898$, a za koordinate točke A: $x_A = -7,346$ i $y_A = 1,949$. Zbog toga je profilirani dio visokonaponskih elektroda duži nego kod ovješених elektroda. Duljina mu je: $7,346 \cdot 7/\pi \approx 16,3$ mm. Pri izboru debljine ravnog dijela elektrode trebalo je još voditi računa i o potrebnoj mehaničkoj čvrstoći (odjeljak 6.7) pa je za sve ovješene elektrode i srednje visokonaponske elektrode odabrana debljina 12 mm, a za vanjske visokonaponske 24 mm.

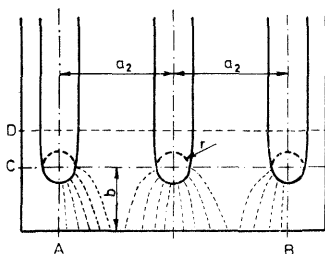
6.3. PRORAČUN DULJINE L_2 VISOKONAPONSKE ELEKTRODE

Duljinu L_2 valja tako odabrati da se prema izrazu (6.2) dobije: $(C_g - C_0)/(z_g - z_0) = \partial C/\partial z = 1961,03$ pF/m. U tu svrhu će se najprije proračunati kapacitet ruba visokonaponske elektrode prema ovješenoj elektrodi i oklopu. Vrh tog profila može se u približnom računu nadomjestiti valjkom. Tad se kapacitet tog vrha, za dio gdje se između visokonaponskih elektroda ne nalazi ovješena elektroda, izračunava pre-

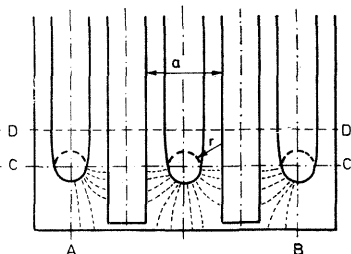
ma izrazu za proračun kapaciteta rešetke [33]. Prema oznakama na slici 6.4 za jedinični kapacitet jednog vrha izlazi:

$$C_{v1} = \frac{2\pi\epsilon}{\pi \frac{2b}{a_2} + \ln \frac{a_2}{2\pi r}}. \quad (6.7)$$

Budući da vanjska elektroda sudjeluje s polovicom tog iznosa kapaciteta, treba kod šest visokonaponskih elektroda računati sa osam takvih kapaciteta.

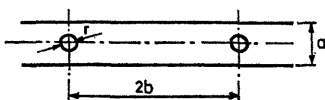


Sl. 6.4. Nadomjesna shema za kapacitet vrha visokonaponske elektrode kad se između njih ne nalazi ovješena elektroda



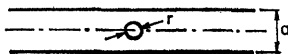
Sl. 6.5. Nadomjesna shema za kapacitet vrha visokonaponske elektrode kad je između njih ovješena elektroda

Ako su između visokonaponskih elektroda ovješene elektrode (sl. 6.5), tad se kapacitet vrha visokonaponske elektrode prema ovješenoj elektrodi ispod pravca C—C i prema oklopu od A do B nalazi pomoću izraza za kapacitet okruglog vodiča između dviju ravnina koje su s jedne strane zatvorene trećom ravninom (sl. 6.6) i izraza za kapacitet okruglog vodiča između dviju ravnina (sl. 6.7) [33].



$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln \left[\frac{2a}{\pi r} \operatorname{th} \frac{\pi b}{a} \right]}$$

Sl. 6.6. Kapacitet po jedinici duljine dvaju okruglih vodiča između dvije ravnine



$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{2a}{\pi r}}$$

Sl. 6.7. Kapacitet po jedinici duljine jednog okruglog vodiča između dvije ravnine

Prema tim izrazima izvodi se jedinični kapacitet jednog vrha:

$$C_{v2} = \frac{2 \pi \varepsilon}{\ln \left[\frac{2a}{\pi r} \operatorname{th} \left(\frac{\pi b}{a} \right) \right]} - \frac{1}{2} \frac{2 \pi \varepsilon}{\ln \frac{2a}{\pi r}} \quad (6.8)$$

I tu valja računati za šest visokonaponskih elektroda s osam takvih kapaciteta. Tako je kod naponske vage ETF-Zagreb: $a_2 = 38$ mm, $b = 19,6$ mm, $r = 4,6$ mm i $a = 26$ mm, pa za C_{v1} i C_{v2} dobivamo uvrštavanjem:

$$C_{v2} = 22,33 \text{ pF/m.} \quad C_{v1} = 15,83 \text{ pF/m;} \quad (6.9)$$

Zakrivljeni dio jedne visokonaponske elektrode od C do D na slikama 6.4 i 6.5 ima prema ovješanim elektrodama jedinični kapacitet C_{v3} od 28,84 pF/m. Budući da je prema izrazu (6.2) ukupno potrebno 1961,03 pF/m, bit će:

$$8 \left(\frac{\varepsilon L'_2}{s} + C_{v3} + C_{v2} - C_{v1} \right) = \frac{\partial C}{\partial z} = 1961,03 \text{ pF/m,} \quad (6.10)$$

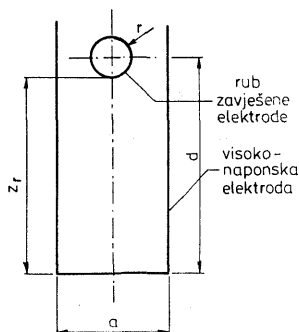
pri čemu je L'_2 širina ravnog dijela visokonaponske elektrode. Uvrštavanjem vrijednosti C_{v3} i C_{v1} iz (6.9) i uz $s = 6,96$ mm dobivamo $L'_2 = 164,9$. Budući da zakrivljeni dio visokonaponske elektrode ima širinu od $2 \times 16,3$ mm, ukupna je širina visokonaponske elektrode $L_2 = 198$ mm.

U homogenom polju bez rubnih efekata za istu derivaciju kapaciteta po vertikalnom pomaku bila bi potrebna duljina:

$$L_{2\text{et}} = \frac{s}{8 \varepsilon} \frac{dC}{dz} = \frac{6,96}{8 \cdot 8,854} 1961,03 = 192,7 \text{ mm.} \quad (6.11)$$

6.4. ODREĐIVANJE RAZMAKA z_r

(sl. 6.8)



Sl. 6.8. Donji rub ovješene elektrode nadomješten valjkom polumjera r na udaljenosti d od spojišta visokonaponskih elektroda

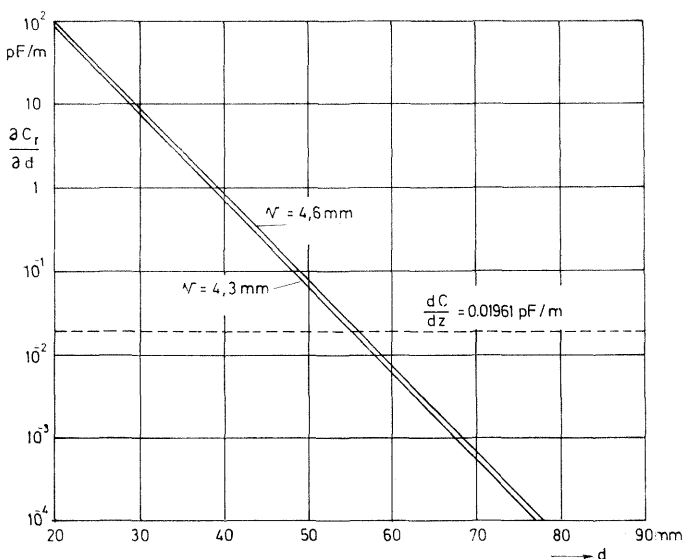
Razmak z_r odabire se tako da relativna promjena derivacije dC/dz ne bude veća od otprilike 10^{-5} . Zbog toga ćemo izračunati kapacitet vrha ovješene elektrode prema dvije visokonaponske elektrode koje su međusobno spojene pločom. Vrh ovješene elektrode nadomješta se valjkom polumjera r (sl. 6.8). Kapacitet između elektroda tad iznosi [33]:

$$C_r = \frac{2 \pi \epsilon l}{\ln \left[\frac{2a}{\pi r} \operatorname{th} \left(\frac{\pi d}{a} \right) \right]} = \frac{2 \cdot 8,854 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 0,1927}{\ln \left[\frac{2 \cdot 26}{\pi \cdot 4,6} \operatorname{th} \left(\frac{\pi d}{26} \right) \right]} \text{ pF} \quad (6.12)$$

Derivacija ovog izraza po razmaku d bit će (sl. 6.8):

$$\frac{\partial C_r}{\partial d} = \frac{C_r^2}{a \epsilon l \operatorname{sh} (2 \pi d/a)} \quad (6.13)$$

Potrebno je da ta derivacija bude otprilike 10^5 puta manja od derivacije dC/dz koja prema izrazu (6.2) iznosi 1961,03 pF/m.

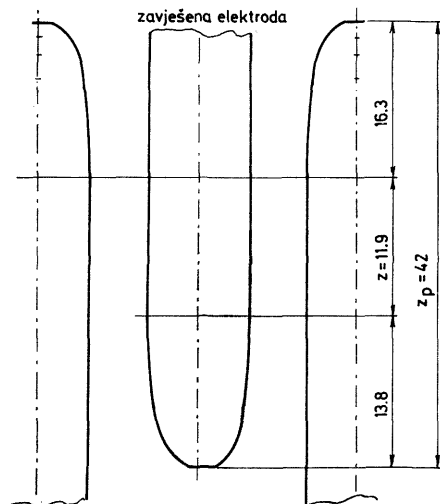


Sl. 6.9. Derivacija kapaciteta C_r prema rasporedu na slici 6.7 po razmaku d ($l = 4 \cdot 0,1927 = 0,7708 \text{ m}$; $a = 26 \text{ mm}$)

Iz slike 6.9 očito je da bi taj uvjet bio ispunjen kod razmaka $d = 55$ mm ili, računato od vrha elektrode, $55 - 4,3 = 51,7$ mm. Budući da su visokonaponske elektrode međusobno učvršćene kratkim ulošcima, a ne punom pločom, opravdano je taj razmak uzeti nešto manjim.

6.5. PREKRIVANJE ELEKTRODA U DONJEM POLOŽAJU VISOKONAPONSKE ELEKTRODE

Na prijelazu iz profilnog dijela u ravni dio elektroda faktor f iznosi 1,025, odnosno 1,05 za ugao visokonaponske elektrode (odjeljak 6.2). Kako ugao elektrode sudjeluje samo s 19 posto u ukupnoj duljini ruba, možemo računati sa srednjim faktorom f od otprilike 1,015.

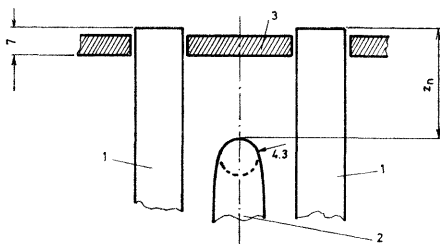


Sl. 6.10. Prekrivanje elektroda u donjem položaju visokonaponske elektrode

Treba odrediti takav razmak z_p (sl. 6.10) da u njegovoj sredini postignemo faktor $f = 1,000\,01$ ili manje, kako bi se ostvarilo što konstantnije dC/dz . Prema [34] faktor $f = 1,015$ imamo kod pločastog kondenzatora kad je $x = -0,668$ s, gdje je s razmak između elektroda. Da bi se postiglo $f = 1,000\,01$, mora x biti $-1,832$ s, odnosno u našem primjeru mora z iznositi: $z = (1,833 - 0,668) \cdot 7 = 8,16$ mm ili više. Odabrano je 11,9 mm pa z_p iznosi: $z_p = 16,3 + 11,9 + 13,8 = 42$ mm.

6.6. ODREĐIVANJE RAZMAKA z_n

Razmak z_n odabire se tako da jakost polja na rubu visokonaponske elektrode ne premaši 15 kV/cm. Budući da se između gornje ravnine ovješene elektrode (sl. 6.11) i visokonaponske elektrode nalazi uzemljeni poklopac oklopa debljine 5 mm i zbog sigurnosti razmak od 2 mm između tog oklopa i gornje ravnine ovješene elektrode, dakle ukupno 7 mm, treba u proračunu jakosti polja računati s razmakom: $z_n - 7$ mm.



Sl. 6.11. Određivanje razmaka z_n : 1 — ovješene elektrode; 2 — visokonaponska elektroda; 3 — poklopac oklopa

Ako se odabere $z_n - 7 = 19$ mm, prema izrazu (6.5) bit će:

$$p = \frac{19}{4,3} + 1 + \sqrt{\left(\frac{19}{4,3} + 1\right)^2 - 1} = 10,74$$

$$f = \frac{10,74^2 - 1}{2 \cdot 10,74 \ln 10,74} = 2,24$$

ili:

$$E_m = \frac{U}{s} f = \frac{10}{1,9} \cdot 2,24 = 11,8 \text{ kV/cm.}$$

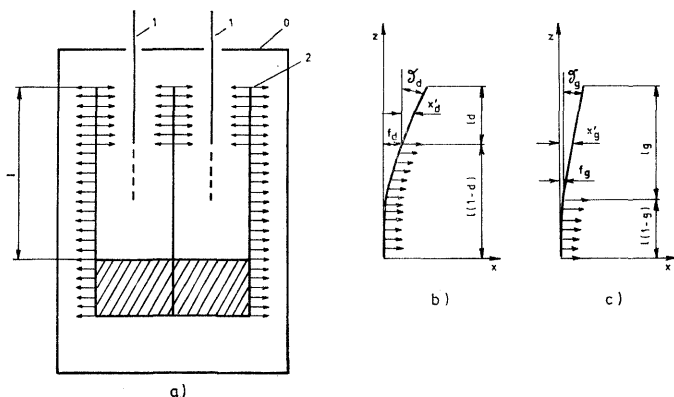
Ta je jakost polja 21 % manja od dopuštene, što će se uzeti kao rezerva zbog približnog proračuna.

6.7. UTJECAJ SAVITLJIVOSTI ELEKTRODA I OKLOPA

Mjerenje razlike kapaciteta $C_g - C_d$ u izrazu (4.27) potrebno je provesti kod potpuno jednakih razmaka elektroda međusobno i prema kućištu kao i kod »vaganja« napona. Uzrok neispunjavanja tog zahtjeva mogu biti savijanja koja nastaju djelovanjem elektrostatskih sila jer su one u omjeru kvadrata napona veće kod »vaganja« napona nego kod mjerenja kapaciteta. (Mjerenje kapaciteta provodi se s naponom od 100 do 300 V, a vaganje napona kod 10 000 V, pa omjer kvadrata napona iznosi od 10^4 do 10^8). Zbog toga je potrebno izračunati i po potrebi eksperimentalno provjeriti koliko iznose savijanja elektroda i oklopa te kolike pogreške one izazivaju u određivanju napona.

6.7.1. Savijanje visokonaponskih elektroda zbog djelovanja elektrostatskih sila (sl. 6.12)

Zbog simetričnog rasporeda na srednju visokonaponsku elektrodu djeluju jednake elektrostatske sile na obje njezine strane pa nema njezina savijanja. Na vanjske visokonaponske elektrode djeluju elektrostatske sile s jedne strane prema oklopu, a s druge strane prema ovješenoj elektrodi. Pretpostavimo najprije da je razmak između visokonaponskih elektroda i oklopa jednak razmaku između ovješениh i visokonaponskih elektroda. U tom slučaju međusobno se poništava djelovanje elektrostatskih sila ondje gdje se elektrode međusobno prekrivaju (sl. 6.12.b i c), pa za progib f_d u donjem položaju visokonaponske elektrode



Sl. 6.12. Savijanje visokonaponske elektrode: 1 — ovješena elektroda; 2 — visokonaponska elektroda; 0 — oklop

- a) Shematski prikaz djelovanja elektrostatskih sila na visokonaponsku elektrodu
 b) Savijanje desne visokonaponske elektrode u njezinu donjem položaju
 c) Savijanje desne visokonaponske elektrode u njezinu gornjem položaju

izlazi prema [41] i oznakama na slici 6.12:

$$f_d = \frac{F_1 l^3 (1-d)^3}{8 E J_1} \quad \vartheta_d = \frac{F_1 l^2 (1-d)^2}{6 E J_1} \quad (6.14)$$

pri čemu je F_1 omjer elektrostatske sile i širine elektrode, l slobodna visina visokonaponske elektrode ukliještene na njezinu dnu, E modul elastičnosti materijala elektrode, a J_1 je njezin moment tromosti. Za srednji progib x_d dijela visokonaponske elektrode koji je prekriven ovje-

šenom elektrodom i mjerodavan je za proračun promjene kapaciteta između elektroda, dobiva se:

$$x'_d = f_d + \theta l d/2 = \frac{F_1 l^3}{E J_1} [(1-d)^3/8 + (1-d)^2 d/12]. \quad (6.15)$$

Budući da je $F_1 = pl(1-d)$, gdje je p omjer elektrostatske sile i ploštine, nakon uvrštavanja i uređenja bit će:

$$x'_d = \frac{p l^4}{24 E J_1} [(3-d)(1-d)^3]. \quad (6.16)$$

Slično tome za srednji progib u gornjem položaju visokonaponske elektrode izlazi:

$$x'_g = \frac{p l^4}{24 E J_1} [(3-g)(1-g)^3]. \quad (6.17)$$

Zbog tih progiba nastat će pogreška pri određivanju napona pomoću izraza (4.27) jer pri mjerenju kapaciteta C_g i C_d odgovarajućim mjernim mostom neće biti tog progiba. Ako kapacitet vanjskih elektroda po jedinici visine označimo s C_l , onda promjene kapaciteta zbog progiba iznose:

$$\Delta C_g = -C_l l g x'_g/s \quad (6.18)$$

$$\Delta C_d = -C_l l g x'_d/s. \quad (6.19)$$

U izrazu (4.27) za određivanje napona nalazi se pod korijenom u nazivniku razlika ukupnog kapaciteta između elektroda u gornjem i donjem položaju $C_g - C_d$, pa je relativna pogreška u određivanju napona:

$$p'(U) = \frac{1}{2} \frac{\Delta C_g - \Delta C_d}{C_g - C_d} = - \frac{g x'_g - d x'_d}{4s(g-d)}. \quad (6.20)$$

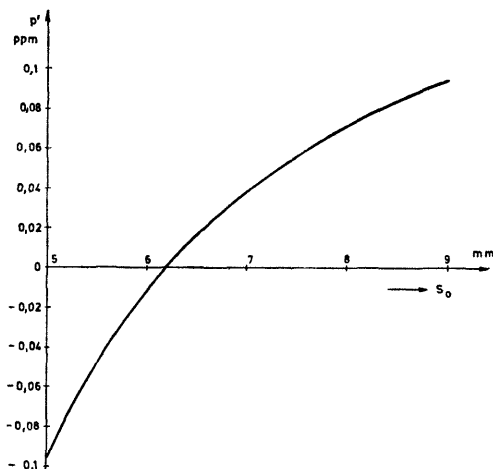
Tako za $s = 7$ mm i $U_v = 10\,000$ V elektrostatski pritisak iznosi: $p = U_v^2 \epsilon / 2s^2 = 9,035$ N/m²; za elektrode debljine 24 mm od aluminija ($E = 70\,000$ N/mm² i $l = 140$ mm bit će: $pl^4/24EJ_1 = 9,035 \cdot 10^{-6} \cdot 140^4 \cdot 12/24 \cdot 70\,000 \cdot 24^3 = 1,79$ nm; za $g = 0,69$ i $d = 0,33$ dobiva se: $x'_g = 0,12$ nm i $x'_d = 1,44$ nm. Pogreška u mjerenju napona iznosi:

$$p'(U) = - \frac{0,69 \cdot 0,12 - 0,33 \cdot 1,44}{4 \cdot 7 \cdot 10^{-6}(0,69 - 0,33)} = + 0,039 \text{ ppm.}$$

Ako je razmak između oklopa i visokonaponske elektrode $s_o \neq s$, djelovat će na vanjsku površinu elektrode elektrostatski pritisak $U^2 \epsilon / 2 s_o$ umjesto $U^2 \epsilon / 2 s$, pa će prema [41] i uz pomoć izraza (6.17) nakon uređenja za srednji progib vanjske visokonaponske elektrode u gornjem i donjem položaju (indeksi g i d) biti:

$$x'_d = \frac{U^2 \epsilon}{48 E J_1} \left[\frac{1}{s^2} (3-d)(1-d)^3 - \left(\frac{1}{s_o^2} - \frac{1}{s_o^3} \right) (8-6d+d^3/2) \right] \quad (6.21)$$

$$x'_g = \frac{U^2 \varepsilon}{48 E J_1} \left[\frac{1}{s^2} (3 - g) (1 - g)^3 - \left(\frac{1}{s^2} - \frac{1}{s_o^2} \right) (8 - 6g + g^3/2) \right]. \quad (6.22)$$



Sl. 6.13. Ovisnost relativne pogreške određivanja napona o razmaku s_o između oklopa i vanjskih visokonaponskih elektroda

Na slici 6.13 predočena je relativna pogreška određivanja napona izračunata pomoću izraza (6.21), (6.22) i (6.20) za podatke iz prethodnog primjera. Pogreška je ravna nuli kod $s_o = 6,19$ mm, što nije moguće odabrati zbog prevelike jakosti električnog polja (17 kV/cm) između oklopa i vanjske visokonaponske elektrode, pa je najpovoljnije moguće rješenje razmak jednak onome između elektroda.

Opisani proračun pogreške u određivanju napona zbog savijanja vanjskih visokonaponskih elektroda pod djelovanjem elektrostatskih sila proveden je uz pretpostavku da je donji kraj elektroda idealno ukliješten. Međutim, u stvarnosti će ipak doći do savijanja donjeg kraja elektroda za neki vrlo mali kut θ zbog elastičnosti uložaka koji održavaju razmak između elektroda. Neka je njihov moment tromosti J , a efektivna duljina c . Tad srednji progibi u donjem i gornjem položaju iznose:

$$x''_d = pL_{2ef} c l^3 (1 - d)^2 (1 - d/2)/2 E J \quad (6.23)$$

$$x''_g = pL_{2ef} c l^3 (1 - g)^2 (1 - g/2)/2 E J, \quad (6.24)$$

pri čemu je L_{2ef} efektivna širina elektroda ($L_{2ef} = 192,7$ mm).

Uvrste li se x_d'' i x_g'' u izraz (6.20), dobit će se pogreška u određivanju napona zbog nesavršenog uklještenja donjeg kraja vanjskih visokonaponskih elektroda. Za već navedeni primjer uz $c = 44$ mm izlazi $x_d'' = 0,71$ nm, $x_g'' = 0,12$ nm i $p''(U) = 0,015$ ppm. Prema tome će ukupna pogreška zbog savijanja vanjskih visokonaponskih elektroda pod djelovanjem napona za navedeni primjer biti:

$$p(U) = p'(U) + p''(U) = +0,039 + 0,015 = 0,054 \text{ ppm.}$$

Radi usporedbe izračunat ćemo koliko elektrostatske sile utječu na promjenu dimenzija cilindričnih elektroda. Ako je cilindrična ovješena elektroda od aluminija debljine stijenki $d_0 = 1$ mm i promjera $D_1 = 100$ mm, onda uz $p = 9,035 \cdot 10^{-6}$ N/mm² dobivamo povećanje njezina promjera $\Delta D_1 = p D_1^2 / 2 d_0 E = 9,035 \cdot 10^{-6} \cdot 100^2 / 2 \cdot 1 \cdot 70\,000 = 0,65$ nm. Zbog toga prema izrazu (4.21) nastaje relativna promjena derivacije dC/dz od $\Delta D_1 / 2s = 0,65 \cdot 10^{-6} / 2 \cdot 7 = 0,046$ ppm, a pogreška u određivanju napona dva puta je manja.

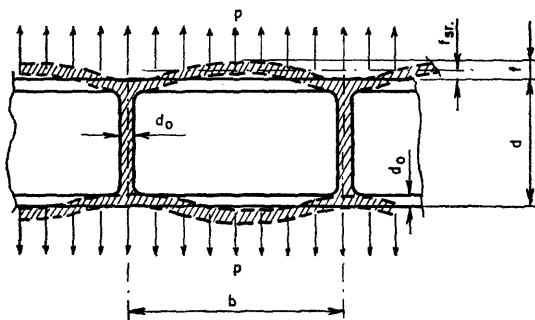
6.7.2. Savijanje stijenki ovještene elektrode

Pod djelovanjem elektrostatskih sila svijaju se prema vani tanke stijenke ovještene elektrode (sl. 6.14). Prema [41] progib u sredini između dviju pregrada iznosi:

$$f' = \frac{p b^4}{384 E J_1} \quad (6.25)$$

Za promjenu kapaciteta mjerodavan je srednji progib f_{sr} , a on je ovdje: $f_{sr} = f \cdot 8/15$, pa izlazi:

$$f'_{sr} = \frac{p b^4}{720 E J_1} \quad (6.26)$$



Sl. 6.14. Savijanje stijenki ovještene elektrode

Tako se za $b = 20$ mm, $d_0 = 1$ mm, $p = 9,035 \cdot 10^{-6}$ N/mm² i $E = 50\,000$ N/mm² dobiva $J_1 = d_0^3/12 = 1/12$ i prema izrazu (6.26): $f'_{sr} = 0,48$ nm. Elektrostatske sile istegnute će i poprečne stijenke ovještene elektrode, što također smanjuje razmak između elektroda. To će smanjenje biti:

$$f'' = \frac{p b d}{2 E d_0}. \quad (6.27)$$

U prikazanom primjeru uz $d = 12$ mm dobiva se $f'' = 0,02$ nm. Do progiba f' i f'' dolazi samo kod vaganja napona, a ne i pri mjerenju kapaciteta C_g i C_d , pa će zbog toga izmjerena razlika kapaciteta biti manja od one koja stvarno djeluje kod vaganja napona. Budući da se razlika kapaciteta $C_g - C_d$ nalazi u izrazu (4.27) u nazivniku i pod korijenom, to uzrokuje relativnu pogrešku u određivanju napona:

$$p(U) = \frac{f' + f''}{2 s}. \quad (6.28)$$

U našem primjeru njezin je iznos: $p(U) = (0,48 + 0,02) \cdot 10^{-6}/2 \cdot 7 = 0,036$ ppm.

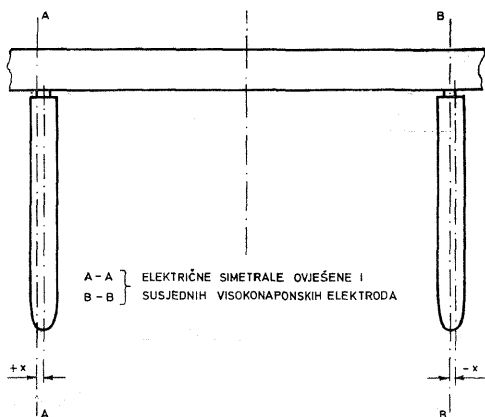
6.7.3. Savijanje ovješanih elektroda zbog ekscentričnosti

Vaganje napona provodi se pri položaju ovješanih elektroda u kojem je rezultirajuća horizontalna elektrostatska sila ravna nuli. Pri tome će ipak na pojedine elektrode djelovati veće ili manje horizontalne sile, ovisno o preciznosti mehaničke izrade. Tako, ako jedna elektroda odstupa od centričnog položaja za $+x$, a druga za $-x$, bit će rezultirajuća horizontalna sila ravna nuli, a na elektrode će djelovati elektrostatska sila F_x (sl. 6.15), koja prema jednadžbi (4.54) iznosi:

$$F_x = \frac{U_v^2 C x}{s^2}. \quad (6.29)$$

Pretpostavimo da je $x = 0,1$ mm, što nije teško ostvariti, pa se tad uz $C = 50$ pF i $s = 7$ mm dobiva $F_x = 0,0102$ N. Savijanje ovješene elektrode zbog te elektrostatske sile uzrokovat će promjenu kapaciteta između elektroda samo kod vaganja napona, ali ne i pri mjerenju kapaciteta C_g i C_d . Zato je potrebno da same ovještene elektrode i okvir koji ih međusobno povezuje budu dovoljno mehanički kruti.

Moment tromosti u poprečnom smjeru za ovještenu elektrodu prema slici 6.14. i uz njezinu širinu od 220 mm, iznosi: $J = 17\,568 d_0 - 3504 d_0^2 + 254 d_0^3 - 6d_0^4$. Pri $d_0 = 1$ mm dobiva se $J = 14\,312$ mm⁴. Ako elektrostatska sila zbog ekscentričnosti x djeluje na kraku l od vrha elektrode, doći će prema [41] do progiba: $f'_x = F_x l^3/3EJ$. Uz $l = 53$ mm izlazi: $f'_x = 0,0102 \cdot 53^3/3 \cdot 70\,000 \cdot 14\,312 = 0,5$ nm i zbog toga relativna promjena kapaciteta od: $(0,5 \cdot 10^{-6}/7)^2 = 5,1 \cdot 10^{-15}$, što je sasvim zanemarivo. No stvarni će progib biti veći od izračunatoga zbog elastičnosti



Sl. 6.15. Savijanje ovješениh elektroda zbog ekscentričnosti

učvršćenja elektrode na okvir i elastičnosti samog okvira. Zato će se odvojeno izračunati progib koji nastaje samo zbog elastičnosti okvira. Ako je b razmak između elektroda koje su ekscentrične, a J_0 moment tromosti okvira, onda progib f_x'' prema [41] iznosi:

$$f_x'' = \frac{F_x b l^2}{2 E J_0} \quad (6.30)$$

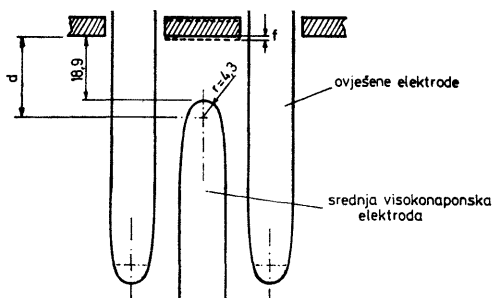
Za $J_0 = 6933 \text{ mm}^4$ (U-profil dimenzija 20×15 i debljine 1 mm) i $b = 236 \text{ mm}$ dobiva se $f_x = 0,0102 \cdot 236 \cdot 53^2 / 2 \cdot 70\,000 \cdot 6933 = 7 \text{ nm}$. Taj progib uzrokovat će relativnu promjenu kapaciteta od $(7 \cdot 10^{-6} / 7)^2 = 1 \cdot 10^{-12}$, što je također sasvim zanemarivo.

Ostaje još elastičnost učvršćenja ovještene elektrode na okvir, a to je najbolje eksperimentalno provjeriti mjereći progib izazvan poznatom silom.

6.7.4. Savijanje poklopca oklopa

Poklopac je oklopa prorezan kako bi kroz njega mogle proći ovještene elektrode (sl. 6.16). Zbog toga je dio poklopca koji se nalazi iznad srednje visokonaponske elektrode mogao biti učvršćen samo na krajevima međusobno udaljenima 228 mm.

Prema izrazu (6.13) derivacija kapaciteta po razmaku d za $d = 23,8 \text{ mm}$ i $r = 4,3 \text{ mm}$ iznosi: $\partial C / \partial d = 54,97 \text{ pF/m}$ po metru duljine, odnosno za efektivnu duljinu visokonaponske elektrode $l = 192,7 \text{ mm}$ dobiva se



Sl. 6.16. Savijanje srednjeg dijela poklopca oklopa

10,6 pF/m. Budući da je kod »vaganja« napona poklopac uzemljen, na njegov srednji dio djeluje elektrostatska sila:

$$F_o = \frac{1}{2} U_v^2 \frac{dC}{dz} = \frac{1}{2} 10^8 \cdot 10,6 \cdot 10^{-12} = 0,53 \text{ mN.} \quad (6.31)$$

Ta će sila izazvati progib srednjeg dijela poklopca koji je ukliješten samo na krajevima. Prema [41] srednja će vrijednost tog progiba biti:

$$f_{sr} = \frac{F_o l^3}{720 E J}. \quad (6.32)$$

Za poklopac od kaširanoga pozlaćenog vitroplasta debljine 5 mm bit će $E = 50\,000 \text{ N/mm}^2$, a $J = 26 \cdot 5^3/12 = 270,8 \text{ mm}^4$, pa se dobiva $f_{sr} = 0,53 \cdot 10^{-3} \cdot 228^3/720 \cdot 70\,000 \cdot 270,8 = 0,46 \text{ mm}$. Zbog tog pomaka nastat će promjena kapaciteta između visokonaponske elektrode i poklopca od $2 \cdot f_{sr} \cdot dC/dz = 2 \cdot 0,46 \cdot 10^{-9} \cdot 10,6 \cdot 10^{-12} = 0,98 \cdot 10^{-20} \text{ F}$, što je sasvim zanemarivo. Osim toga, ta je promjena kapaciteta jednaka u gornjem i donjem položaju visokonaponske elektrode pa već i zbog toga ne uzrokuje pogrešku. Napominjemo još da će taj progib uzrokovati i promjenu kapaciteta između visokonaponske i ovješene elektrode, no zbog malog progiba od samo 0,46 mm bit će ta promjena neznatna i jednaka u gornjem i donjem položaju, pa neće biti uzrokom pogrešci u određivanju napona.

6.7.5. Savijanje uže bočne stijene oklopa

Premda su visokonaponske elektrode mehanički povezane s oklopom i skupa s njim se pomiču, ipak se pri tome mijenja jakost elektrostatske sile između užih bočnih stijena oklopa i visokonaponskih elektroda ovisno o tome koliko se one prekrivaju s ovješanim elektro-

dama. Zbog toga se razlikuju progibi bočnih stijena oklopa u gornjem i donjem položaju visokonaponskih elektroda, što uzrokuje pogrešku u određivanju napona. Razlika progiba izračunat će se iz promjene elektrostatske sile kad između visokonaponskih elektroda zađu ovješene elektrode:

$$F_y = \frac{1}{2} U_v^2 \left[\left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_g - \left(\frac{\partial C}{\partial y} \right)_d \right]. \quad (6.33)$$

Tu je $\partial C / \partial y$ derivacija kapaciteta između visokonaponskih elektroda i uže bočne stijene oklopa po pomaku stijene oklopa u smjeru osi y . Prema izrazu (6.13) dobivamo $(\partial C_1 / \partial y)_g = 112,5$ pF/m po metru duljine brida visokonaponske elektrode, a deriviranjem izraza (6.7) po b izводи se:

$$\left(\frac{\partial C_1}{\partial y} \right)_d = \frac{4 \pi^2 \varepsilon}{a \left(\pi \frac{2b}{a} + \ln \frac{a}{2 \pi r_0} \right)^2}. \quad (6.34)$$

Za $a = 0,03$ m, $b = 0,0193$ m i $r_0 = 0,0043$ izlazi: $(\partial C_1 / \partial y)_d = 737,2$ pF/m. Duljina brida visokonaponske elektrode od $3 \times 0,05$ m uvrštavanjem u izraz (6.33) daje:

$$\Delta F_y = \frac{1}{2} 10^3 (112,5 - 737,2) \cdot 3 \cdot 0,05 \cdot 10^{-12} = -4,69 \text{ mN}.$$

Kod naponske vage ETF-84 uža bočna stijena ima slobodne dimenzije $126 \times 247 \times 5$ mm. Njezin donji rub čvrsto je pritegnut na ploču koja nosi visokonaponske elektrode (sl. 6.2, poz. 3), a ostali su rubovi također dobro pritegnuti na druge stijene oklopa. Ipak ćemo njezin progib radi sigurnosti proračunati pretpostavivši da su čvrsto ukliješteni samo njezin donji i gornji rub, pa prema [41] vrijedi:

$$f < \frac{F l^3}{192 E J} = \frac{4,69 \cdot 10^{-3} \cdot 247^3 \cdot 12}{192 \cdot 50\,000 \cdot 126 \cdot 5^3} = 5,6 \text{ nm}.$$

Taj pomak uzrokovat će promjenu kapaciteta između oklopa i elektroda u iznosu: $\Delta C = f \cdot (\partial C / \partial y)_g < 5,6 \cdot 10^{-9} \cdot 112,5 \cdot 10^{-12} \cdot 0,1 \cdot 3 \cdot 4 = 756 \cdot 10^{-21}$ F, što u odnosu na razliku kapaciteta $C_g - C_d = 100$ pF čini samo 0,007 56 ppm. Budući da je račun proveden uz vrlo nepovoljne pretpostavke, možemo smatrati da je taj utjecaj zanemariv.

6.7.6. Savijanje šire bočne stijene oklopa

Naponskoj vagi ETF-84 slobodne dimenzije šire bočne stijene oklopa su: $2 \times 228 \times 247$ mm. Budući da se uz nju na udaljenosti od 7 mm nalazi visokonaponska elektroda, to elektrostatski pritisak iznosi: $p = U_v^2 \varepsilon / 2 s^2 = 9,035 \cdot 10^{-6}$ N/mm². Rubovi su dobro pritegnuti na ploču koja nosi visokonaponske elektrode i na ostale stijene oklopa pa možemo progib u njezinoj sredini računati prema izrazu za ukliještenu ploču [41]:

$$f = C_1 \frac{p b^4}{E h^3} \quad (6.35)$$

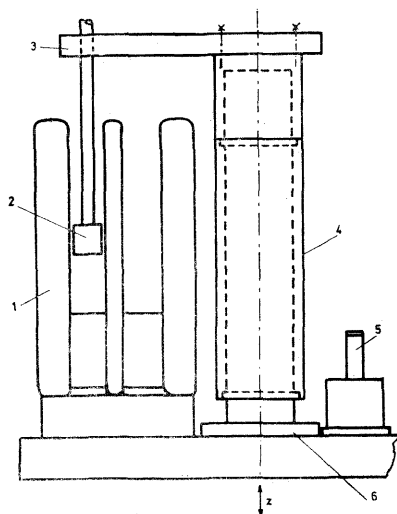
Za omjer stranica $247/228 = 1,083$ dobiva se $C_1 = 0,016$, pa će biti: $f = 0,016 \cdot 9,035 \cdot 10^{-6} \cdot 228^4/50\,000 \cdot 2^3 = 0,977 \mu\text{m}$. Taj je progib praktički sasvim jednak u gornjem i donjem položaju visokonaponske elektrode pa neće uzrokovati pogrešku u određivanju napona.

Oklop je izrađen od dvostruko kaširanoga pozlaćenog vitroplasta, a unutrašnja njegova metalizirana površina podijeljena je na dva dijela, od kojih je jedan stalno uzemljen, a drugi se za vrijeme mjerenja kapaciteta povezuje s ovješenoj elektrodom. Od širih bočnih stijena povezuje se s ovješenoj elektrodom dio koji ima kapacitet prema visokonaponskim elektrodama od $72,36 \text{ pF}$. Taj dio nalazi se uz sam rub stijene pa su njegovi srednji progibi otprilike pet puta manji od progiba u sredini stijene (oko $0,2 \mu\text{m}$), što uzrokuje promjenu njegova kapaciteta od: $72,36 \cdot 0,2/7000 = 0,00207 \text{ pF}$. Radi pojave histereze u materijalu stijena moguće su neponovljivosti tog progiba kad se povisuje i snizuje napon, a to bi moglo povećati nesigurnost u mjerenju razlike kapaciteta $C_g - C_d = 100 \text{ pF}$. Tako, ako je između mjerenja kapaciteta C_g i C_d bio povisivan napon i ako se pri tome pojavila histereza od samo 1% , dobila bi se pogreška u mjerenju razlike $C_g - C_d$ u iznosu: $0,00207 \cdot 0,001/100 = 0,02 \text{ ppm}$. Zbog toga valja pojave histereze pažljivo eksperimentalno istražiti.

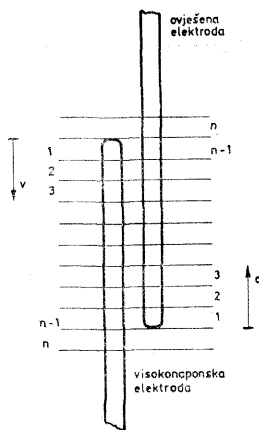
6.8. TOLERANCIJE SUSTAVA ELEKTRODA

6.8.1. Razmaci između elektroda

U uvodu ovom poglavlju izneseni su razlozi zbog kojih je poželjno da se s etalonskim utezima od $2 \times 5 \text{ g}$ postigne ravnoteža vage kod $10\,000 \text{ V}$ u tolerancijama od $\pm 100 \text{ ppm}$. Da bi se to ostvarilo, bilo je potrebno da se omjer efektivne duljine elektroda i razmaka između njih održi u tolerancijama od $\pm 200 \text{ ppm}$. Iz toga proistječu tolerancije za efektivnu duljinu elektroda: $\Delta L_{\text{ef}} \approx \pm 2/\sqrt{2} \cdot 10^{-4} \cdot L_{\text{2ef}} = \pm 0,028 \text{ mm}$, a za razmak između elektroda: $\Delta s \approx \pm 2/\sqrt{2} \cdot 10^{-4} \cdot s = \pm \sqrt{2} \cdot 10^{-4} \cdot 7 = \pm 0,00099 \text{ mm}$. Postizanje jedne i druge tolerancije zahtijeva vrhunsku strojnu obradu, kod prve zbog krivuljnog oblika rubova, a kod druge zbog tolerancija čak manjih od $1 \mu\text{m}$. O tome se vodilo računa pri konstruiranju sustava elektroda, te je odlučeno da se razmaci između susjednih visokonaponskih elektroda ostvare pomoću tri brušena uloška koja se mogu naknadno dotjerivati prema rezultatima mjerenja. Navedene tolerancije treba održati i pri vertikalnom pomicanju elektroda za 51 mm . Osim toga valja osigurati simetriju lijeve i desne polovice elektroda u vrlo uskim tolerancijama, dobro ujednačiti razmake prema oklopu itd., što je sve zahtijevalo ne samo opsežnu tehnološku pripremu i razradu već i razvoj mnoštva posebnih mjernih postupaka i naprava. Primjera radi ovdje ćemo samo pokazati kako se u toku montaže provjerava vertikalnost vodeće osovine te paralelnost i okomitost visokonaponskih elektroda (sl. 6.17). Na nosivu ploču učvrš-



Sl. 6.17. Mjerenje vertikalnosti i paralelnosti osovine i visokonaponskih elektroda: 1 — visokonaponska elektroda; 2 — kapacitivni pretvornik; 3 — ugodivi stalak; 4 — vodeće tijelo s ležajima; 5 — elektronička libela; 6 — osovina s nosivom pločom koja se vertikalno pomiče



Sl. 6.18. Podjela elektroda na dionice

čena je vrlo osjetljiva elektronička libela, izrađena u Zavodu, kojom se mogu zapaziti promjene nagiba manje od $1 \cdot 10^{-6}$ radijana. Zatim su uz visokonaponske elektrode postavljeni kapacitivni pretvornici, učvršćeni na tijelo vage, s rezolucijom od 20 nm, što omogućuje mjerenje i najmanjih odstupanja pri podizanju ploče s elektrodama. Slično mjerenje provodi se i na ovješanim elektrodama tako da se unaprijed mogu odrediti naponske karakteristike vage i provesti eventualna dotjerivanja. Neka su tako na dionicama 1, 2, ..., n dobivena relativna odstupanja $v_1, v_2, \dots, v_n$ na visokonaponskoj elektrodi (sl. 6.18) i relativna odstupanja $o_1, o_2, \dots, o_n$ na ovješenoj elektrodi od prikladno odabranog razmaka između elektroda s . Tad ukupni kapacitet $n-1$ dionica iznosi:

$$C_{n-1} = \frac{\varepsilon L_{ef} \Delta z}{s} \left(\frac{1}{1 + v_{n-1} + o_1} + \frac{1}{1 + v_{n-2} + o_2} + \dots + \frac{1}{1 + v_1 + o_{n-1}} \right) \approx$$

$$\approx \frac{\varepsilon L_{ef} \Delta z}{s} \left(n-1 - \sum_{i=1}^{n-1} v_i - \sum_{i=1}^{n-1} o_i + \sum_{i=1}^{n-1} v_i^2 + \sum_{i=1}^{n-1} C_i^2 + 2 \sum_{i=1}^{n-1} o_i v_{n-1} \right)$$

Za n dionica dobiva se:

$$C_n = \frac{\varepsilon L_{ef} \Delta z}{s} \left(n - \sum_{i=1}^n v_i - \sum_{i=1}^n o_i + \sum_{i=1}^n v_i^2 + \sum_{i=1}^n o_i^2 + 2 \sum_{i=1}^n o_i v_{n+1-i} \right)$$

Oduzmemo li od druge jednadžbe prvu i podijelimo s Δz , bit će:

$$\frac{C_n - C_{n-1}}{\Delta z} = \frac{\varepsilon L_{ef}}{s} \left(1 - v_n - o_n + v_n^2 + o_n^2 + 2 \sum_{i=1}^n o_i v_{n+1-i} - 2 \sum_{i=1}^{n-1} o_i v_{n-i} \right)$$

Približno vrijedi: $v_{n+1-i} = v_{n-i} + v'_{n-i} \Delta z$, pa se dobiva:

$$\frac{C_n - C_{n-1}}{\Delta z} = \frac{\varepsilon L_{ef}}{s} \left(1 - v_n - o_n + v_n^2 + o_n^2 + 2o_n v_1 + 2\Delta z \sum_{i=1}^{n-1} o_i v'_{n-i} \right) \quad (6.36)$$

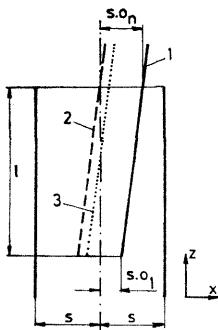
Omjer $(C_n - C_{n-1})/\Delta z$ gotovo je jednak parcijalnoj derivaciji dC/dz pa se može unaprijed ustanoviti napon vage u tom položaju elektroda i provesti dodatna ugađanja ako su prevelika odstupanja od željenog iznosa. Neki karakteristični primjeri odstupanja od idealnog oblika prikazani su u tablici 6.2.

6.9. POJAVE NA POVRŠINAMA ELEKTRODA

Prema izrazima (4.27) i (7.4) potrebno je za određivanje mjerenog napona izmjeriti razliku kapaciteta između elektroda u njihovu gornjem i donjem položaju: $C_g - C_d$. Mjerenje te razlike kapaciteta provest će se iz mjernih razloga izmjeničnom strujom frekvencije od 1000 Hz, a vagom se mjere prije svega istosmjerni naponi, pa valja razmotriti ovisnost kapaciteta između elektroda o frekvenciji. Poznato je da su površinske pojave na elektrodama preciznih zračnih kondenzatora uzrok ovisnosti njihova kapaciteta i faktora gubitaka o frekvenciji. Značaj tih pojava pri realizaciji preciznih kondenzatora, posebno onih koji služe za vezu između istosmjernje i izmjenične struje, rano je uočen [34] — [38]. Vrlo su zanimljiva mjerenja frekvencijske ovisnosti kapaciteta koja je s vrhunskom preciznošću proveo B. D. Inglis [38] na posebno konstruiranim pločastim kondenzatorima s ugodivim razmakom između njihovih elektroda. Ta mjerenja pokazuju da i nakon vrlo intenzivnoga ultrazvučnog čišćenja elektroda i vakuumiranja ostaje na njima tanak dielektrični sloj organskog karaktera koji kod razmaka između elektroda od 0,25 mm uzrokuje promjenu kapaciteta od $16 \cdot 10^{-7}$ pri promjeni frekvencije od 11 Hz do 52 kHz. Ta relativna promjena svedena na razmak od npr. 7 mm iznosila bi samo $0,6 \cdot 10^{-7}$. Mjerenja su provedena posebnim vrlo preciznim transformatorskim mostom namijenjenim usporedbi nazivno jednakih kapaciteta reverzirajućim postupkom. No ni takav mjerni postupak nije omogućio mjerenja ispod 11 Hz s potrebnom mjernom mesigurnošću, pa ipak ostaje otvoreno pitanje kolika je razlika u kapacitetu takvih kondenzatora kod istosmjerne struje od onoga kod

Tablica 6.2.

Karakteristični primjeri odstupanja elektroda od idealnog oblika



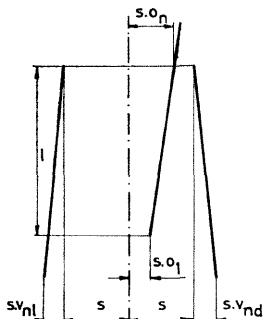
1. primjer

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{2 \varepsilon L_{ef}}{s} (1 + o_n^2) \quad \text{za ovješenu elektrodu u položaju 1}$$

$$\left(\frac{\partial C}{\partial z} \right)_{\min} = \frac{2 \varepsilon L_{ef}}{s} \quad \text{za ovješenu elektrodu u položaju 2}$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{2 \varepsilon L_{efl}}{s^2} (o_l + o_n) \quad \text{za ovješenu elektrodu u položaju 1}$$

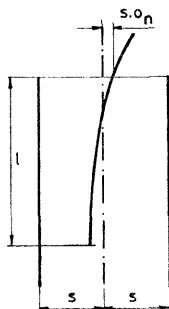
$$\frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad \text{za ovješenu elektrodu u položaju 3}$$



2. primjer

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{2 \varepsilon L_{ef}}{s} \left[1 - \frac{v_{nl} + v_{nd}}{2} + o_n^2 + \frac{v_{nl}^2 + v_{nd}^2}{2} - \right. \\ \left. - o_l (v_{nl} + v_{nd}) - (v_{nl} + v_{nd}) (o_n - o_l) \right]$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\varepsilon L_{efl}}{s^2} \left(o_l + o_n + \frac{v_{nl} - v_{nd}}{2} \right)$$



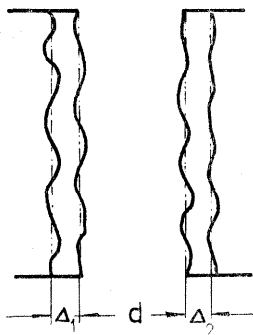
3. primjer

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{2 \varepsilon L_{ef}}{s} (1 + o_n^2)$$

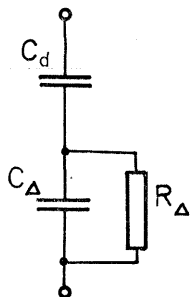
11 Hz. Da bi se to ustanovilo, razvijena je posebna mjerna metoda [II/15] koja omogućuje mjerenje opisanih pojava praktički kod istosmjernje struje, što će biti detaljno opisano.

6.9.1. Teorija površinskih pojava na elektrodama

Površina metalnih elektroda u električkom pogledu je nadomjestiva idealnim vodičem prekrivenim tankim dielektričnim slojem što ga tvore apsorbirani plinovi, pare, tekućine, prašina ili oksidi [38], [39] i [40]. Površina takvih elektroda shematski je prikazana na slici 6.19, a pojednostavljenu nadomjesnu shemu kondenzatora s takvim elektrodama sadrži slika 6.20, gdje je dielektrični sloj na obje elektrode nado-



Sl. 6.19. Površina elektroda pločastog kondenzatora: Δ_1 , Δ_2 — srednje debljine dielektričnog sloja; d — srednji razmak između dielektričnih slojeva



Sl. 6.20. Nadomjesna shema pločastog kondenzatora s uniformnim dielektričnim slojevima

mješten kapacitetom C_Δ i otporom R_Δ . Pretpostavi li se da su dielektrični slojevi frekvencijski i naponski neovisni, te da im je vremenska konstanta $T_\Delta = \epsilon_\Delta \varrho_\Delta$ jednaka, tad uz $C_\Delta \gg C_d$ kapacitet i konduktancija kombinacije iznose:

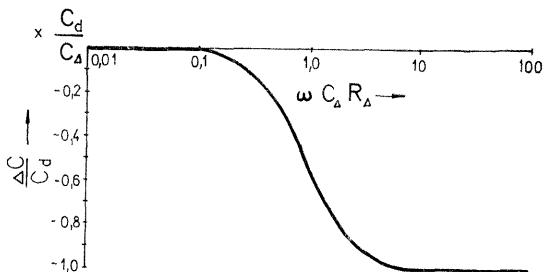
$$C = C_d \cdot \left[1 - \frac{C_d (C_d + C_\Delta) R_\Delta^2 \omega^2}{1 + R_\Delta^2 (C_d + C_\Delta)^2 \omega^2} \right] \approx C_d \cdot \left[1 - \frac{C_d}{C_\Delta} \frac{(\omega C_\Delta R_\Delta)^2}{1 + (\omega C_\Delta R_\Delta)^2} \right]$$

$$C = C_d \left[1 - \frac{C_d}{C_\Delta} \frac{(\omega T_\Delta)^2}{1 + (\omega T_\Delta)^2} \right] \quad (6.37)$$

$$G = C_d^2 \frac{\omega^2 R_\Delta}{1 + R_\Delta^2 (C_d + C_\Delta)^2 \omega^2} C_d \frac{\omega^2 R_\Delta}{1 + (\omega C_\Delta R_\Delta)^2} = C_d \frac{\omega^2 R_\Delta}{1 + (\omega T_\Delta)^2} \quad (6.38)$$

Promjena kapaciteta C ovisno o frekvenciji predočena je na slici 6.21. Za $\omega T_\Delta \gg 1$ dobiva se $C = C_d (1 - C_d/C_\Delta)$, pa tad relativna razlika u kapacitetu kod izmjenične i istosmjerne struje iznosi:

$$p = \frac{C_d (1 - C_d/C_\Delta) - C_d}{C_d} = -\frac{C_d}{C_\Delta}. \quad (6.39)$$



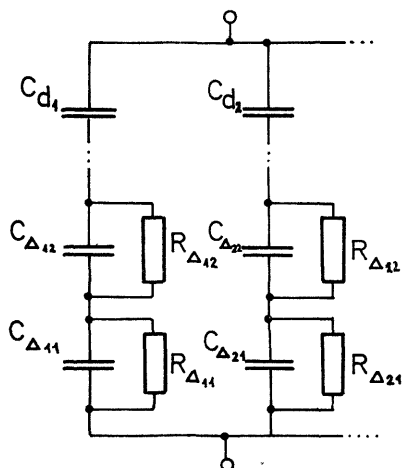
Sl. 6.21. Relativne promjene kapaciteta pločastog kondenzatora s uniformnim dielektričnim slojem ovisno o frekvenciji

Za očekivati je da vremenska konstanta dielektričnog sloja neće biti jednaka na obje elektrode i da će na istoj elektrodi biti područja i dijelova slojeva s različitim vremenskim konstantama. Tad nadomjesna shema poprima složeniji oblik (sl. 6.22).

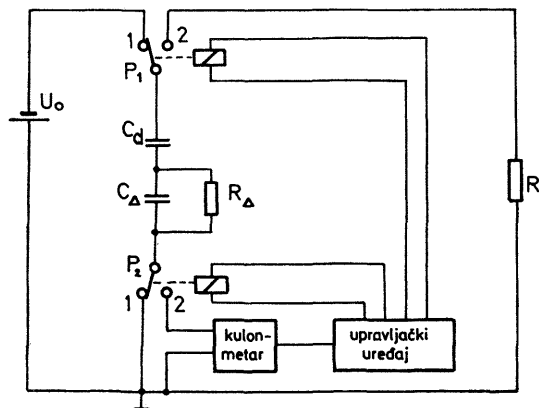
Dok su se prema nadomjesnoj shemi (sl. 6.20) promjene kapaciteta odvijale praktički unutar jedne frekvencijske dekade (sl. 6.21), ovdje se one mogu odvijati unutar više dekada, ovisno o tome koliko se međusobno razlikuju pojedine vremenske konstante.

6.9.2. Princip mjerenja razlike u kapacitetu kod istosmjerne i izmjenične struje pomoću kulonmetra

Princip mjerenja pojednostavljeno je prikazan na slici 6.23. Tu je pločasti zračni kondenzator s elektrodama prekrivenima tankim slojem predočen kapacitetima C_d i C_Δ i otporom R_Δ , gdje je $C_\Delta \gg C_d$. Elektrode se najprije priključuju na istosmjerni napon U_0 (preklopke P_1 i P_2 u položaju 1) i drže se na tom naponu sve dok se postigne stacionarno stanje. Tad će na kapacitetu C_d vladati napon U_0 , a na kapacitetu C_Δ neće biti napona jer je premošćen otporom R_Δ . Zatim se preklopka P_1 prebacuje u položaj 2 i time kapacitet C_d naglo izbija preko otpora R . Pri tome se naglo nabija kapacitet C_Δ suprotnim polaritetom, sve dok se naponi na oba kapaciteta praktički izjednače, a napon na otporu R smanji se gotovo na nulu. Tad se i preklopka P_2 prebaci u položaj 2 i time se uključi kulonmetar. Zbog polaganog pražnjenja kapaciteta C_Δ



Sl. 6.22. Nadomjesna shema pločastog kondenzatora s neuniformnim dielektričnim slojevima



Sl. 6.23. Principijelna shema mjerenja razlike u kapacitetu kod istosmjerne i izmjenične struje

preko otpora R_Δ dolazi do daljnjega, ali sada vrlo sporog, pražnjenja kapaciteta C_Δ preko otpora R i kulonmetra.

Uz oznake: $\delta = \frac{C_\Delta}{C_\Delta} \ll 1$, $T = C_\Delta R$, $T_\Delta = R_\Delta C_\Delta$ i $\tau = T/T_\Delta \ll 1$,

analitički izraz za napon na kapacitetu C_Δ glasi:

$$u_\Delta = U_0 (Ae^{-\alpha t} + Be^{-\beta t}), \quad (6.40)$$

gdje je:

$$A = \frac{1 - \delta - \tau}{2 \sqrt{(1 + \delta + \tau)^2 - 4\tau}} + \frac{1}{2} \approx 1 - \delta,$$

$$B = \frac{\tau + \delta - 1}{2 \sqrt{(1 + \delta + \tau)^2 - 4\tau}} + \frac{1}{2} \approx \delta$$

$$\alpha(\beta) = \frac{1 + \delta + \tau}{2T} \left[1 \pm \sqrt{1 - \frac{4}{(1 + \delta + \tau)^2}} \right], \quad \alpha \approx \frac{1}{T}, \quad \beta \approx \frac{1}{T_\Delta}.$$

Uvrštavanjem približnih izraza za A , B , α i β u izraz (6.40) dobiva se:

$$u_\Delta = U_0 \left[(1 - \delta) e^{-\frac{t}{T}} + \delta e^{-\frac{t}{T_\Delta}} \right] \approx U_0 \left(e^{-\frac{t}{T}} + \delta e^{-\frac{t}{T_\Delta}} \right). \quad (6.41)$$

Budući da samo drugi sumand u izrazu sadrži veličine δ i T_Δ , koje želimo izmjeriti, to je radi postizanja što veće mjerne osjetljivosti i točnosti poželjno da se kulonmetar pomoću preklopke P_2 uključi tek nakon vremena t_k , kad se prvi sumand smanjio npr. na $1 \cdot 10^{-8}$ ili:

$$e^{-\frac{t_k}{T}} \leq 1 \cdot 10^{-8} \quad \text{ili} \quad t_k \geq 18,4 T. \quad (6.42)$$

Ako se odgovarajućim izborom otpora R postigne npr. $T = 5 \cdot 10^{-6}$ s, što nije teško, to onda daje: $t_k \geq 18,4 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \approx 0,1$ ms.

Radi što pouzdanijeg određivanja omjera $\delta = C_\Delta/C_\Delta$ povoljno je da pri uključivanju kulonmetra član e^{-t_k/T_Δ} u izrazu (6.41) bude približno jednak jedinici. Za $e^{-t_k/T_\Delta} \geq 0,98$ dobiva se uz pomoć izraza (6.42):

$$t_k \leq 0,02 T_\Delta \quad \text{i} \quad T \leq 0,001 T_\Delta \quad (6.43)$$

Uz npr. $T = 5 \mu\text{s}$ potrebno je da T_Δ bude veće od 5 ms.

Iz predočenih izraza očito je da će kulonmetar, uključen u trenutku t_k , a isključen nakon što je proces izbijanja u potpunosti dovršen, izmjeriti naboj:

$$Q_k = C_\Delta u_{\Delta k} = C_\Delta U_0 \delta e^{-\frac{t_k}{T_\Delta}} \approx C_\Delta U_0 \delta = U_0 C_\Delta^2 / C_\Delta. \quad (6.44)$$

Ako je još pri mjerenju kapaciteta izmjeničnom strujom bilo $\omega T_\Delta \gg 1$, dobit će se, prema izrazima (6.39) i (6.44), za relativnu razliku u kapacitetu kod izmjenične i istosmjerne struje jednostavan izraz:

$$p = - \frac{C_d}{C_\Delta} = \frac{Q_k}{U_0 C_d} \quad (6.45)$$

Zahtjev da bude $\omega T_\Delta \gg 1$ bit će pri mjerenju kapaciteta s 1000 Hz ispunjen ako je T_Δ veće od otprilike 2 ms. Tad je ωT_Δ veće od 12,6, pa se s pogreškom manjom od 0,6 % može upotrijebiti izraz (6.39).

Opisanom metodom dale bi se mjeriti i pojave sa znatno manjom vremenskom konstantom od 5 ms ako bi se još više smanjilo vrijeme T , te ako bi se umjesto jednostavnog izraza (6.45) upotrijebio izraz (6.41). Međutim, tad već mogu poslužiti i izmjenične metode za određivanje frekvencijske ovisnosti kapaciteta. Ipak, za prethodno izvrsno očišćene elektrode to neće biti potrebno jer uvodno opisana mjerenja izmjeničnom strujom pokazuju da pojave s vremenskom konstantom manjom od nekoliko milisekunda neznatno utječu na kapacitet između elektroda.

6.9.3. Osjetljivost mjernog postupka

Ako u izraz (6.45) uvrstimo $U_0 = Ed$, gdje je E jakost električnog polja, a d razmak između elektroda, te uz $C_d = \epsilon_0 S/d$ (S je površina elektroda), dobiva se:

$$Q_k = p \epsilon_0 S E. \quad (6.46)$$

Za $p = 1$ ppm, $E = 20\,000$ V/cm i $S = 200$ cm² bit će:

$$Q_{kl} = 3542 \cdot 10^{-16} \text{ As/ppm}. \quad (6.47)$$

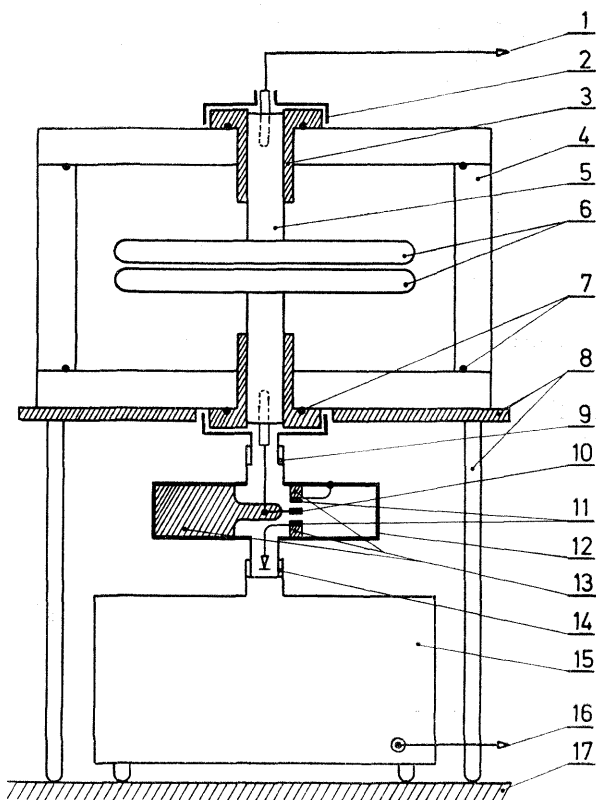
Za mjerenje naboja Q_k upotrijebljen je elektrometar tvornice Keithley, model 642, kojemu 1 digit na najosjetljivijem području znači $1 \cdot 10^{-16}$ As, pa se uz poseban oprez, koji je potreban pri mjerenju tako malih naboja, može pouzdano mjeriti p znatno manje od 0,1 ppm.

6.9.4. Izolacija priključka na kulonmetar

Osnovna je teškoća u realizaciji opisane metode izoliranje onog dijela mjernog sklopa koji je izravno povezan s ulazom kulonmetra. To je i razumljivo jer je potrebno mjeriti ekstremno male iznose naboja u vremenskom intervalu od mnogo desetaka ili čak mnogo stotina sekunda. Ako npr. parazitna struja iznosi samo 10^{-16} A, a vrijeme integriranja 500 s, onda se prema izrazu (6.47) već dobiva pogreška od 0,14 ppm. Ulazni otpor spomenutog kulonmetra iznosi čak $10^{16} \Omega$ i ostvaren je primjenom safirnih izolatora, pa bi bilo poželjno da se tako kvalitetno izolira i dio mjernog kruga priključen na njegov ulaz, kako bi se zaštitio od parazitnih naboja i struja. Prema slici 6.23. to se odnosi na izolaciju donje elektrode prema kućištu, te izolaciju preklopke P_2 između njezinih kontakata i prema kućištu. Taj dio bit će potrebno ujedno dobro termički i elektrostatski oklopiti.

6.9.5. Mjerni rezultati

Opsežna mjerenja ovom metodom proveli su J. Butorac i G. Gašljević u Physikalisch Technische Bundesanstalt, Braunschweig 1983. go-



Sl. 6.24. Uređaj za mjerenje površinskih pojava na elektrodama: 1 — priključak na preklopu P_1 ; 2 — oklop priključka; 3 — izolacijski uložak od teflona; 4 — kućište; 5 — nosač elektrode; 6 — izmjenjive elektrode; 7 — brtva; 8 — stalak; 9 — BNC-provodnik; 10 — pomični kontakt releja P_2 ; 11 — nepomični kontakti; 12 — bakarni oklop releja P_2 ; 13 — nosač kontakta od teflona; 14 — utičnica; 15 — priključna kutija kulonmetra; 16 — priključak na pokazni dio kulonmetra; 17 — stol

dine na posebno izrađenoj mjernom uređaju (sl. 6.24). Mjerenja pokazuju da se elektrode moraju vrlo fino polirati i vrlo pažljivo očistiti ultrazvukom i sredstvima za čišćenje. Tad razlika u kapacitetu kod izmjenične i istosmjerne struje, svedena na prilike u našoj naponskoj vagi, iznosi manje od 0,1 ppm.

7. PRIJELAZ OD dC/dz NA $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$

7.1. OPĆI IZRAZ

U odjeljku 4.4.1. prikazano je koje se sve prednosti postižu ako se u izrazu za određivanje napona $U = \sqrt{2F/(dC/dz)}$ teško mjerljiva parcijalna derivacija dC/dz zamijeni omjerom $(C_g - C_d)/(z_g - z_d)$, pa je izveden izraz (4.27). Međutim, pri izvođenju tog izraza pretpostavljeno je da na ovješenu elektrodu djeluje samo vertikalna elektrostatska sila koja leži na istom pravcu kao i gravitacijska sila etalonskog utega. Da bi se toj pretpostavci što bolje udovoljilo, omogućeno je osjetljivo mjerenje horizontalnih pomaka ovješene elektrode i fino daljinsko centriranje visokonaponskih elektroda. Ipak se odstupanja od centričnog položaja neće moći u potpunosti izbjeći pa valja razmotriti koliki je njihov utjecaj na točnost određivanja napona. Pretpostavimo zato da na ovješenu elektrodu osim vertikalne elektrostatske sile F_m , u smjeru osi z , koja je ravna gravitacijskoj sili etalonskog utega m_{eg} smanjenoj za uzgon: $F_m = m_{eg}(1 - \rho_n/\rho_m)$, djeluju još horizontalne sile F_x i F_y te momenti M_x , M_y i M_z . Neka je, dalje, pri vertikalnom pomicanju visokonaponskih elektroda za dz došlo još i do pomaka dx , dy , $d\beta$ i $d\gamma$. Tad se iz zakona o održanju energije, a u skladu sa znakovima u odjeljku 4.4.1. i 5.5. dobiva:

$$F_m dz + F_x dx + F_y dy + M_x d\alpha + M_y d\beta + M_z d\gamma = \frac{1}{2} U_N^2 dC = \frac{1}{2} \frac{U_N^2}{K_z^2} dC. \quad (7.1)$$

Zbog nesavršenosti elektroda mijenjat će se omjer djelila K_z ovisno o vertikalnom pomaku visokonaponskih elektroda i do 100 ppm, pa integriranjem od donjeg položaja z_d do gornjeg položaja z_g , nakon uređenja, izlazi:

$$F_m \int_{z_d}^{z_g} K_z^2 \left(1 + \frac{F_x x'}{F_m} + \frac{F_y y'}{F_m} + \frac{M_x \alpha'}{F_m} + \frac{M_y \beta'}{F_m} + \frac{M_z \gamma'}{F_m} \right) dz = \frac{1}{2} U_N^2 (C_g - C_d), \quad (7.2)$$

pri čemu je: $x' = dx/dz$, $y' = dy/dz$, $\alpha' = d\alpha/dz$, $\beta' = d\beta/dz$ i $\gamma' = d\gamma/dz$. Ako se podijeli lijeva i desna strana jednadžbe (7.2) sa $z_g - z_d$, njezina će lijeva strana biti kvadrat srednje efektivne vrijednosti omjera K_z , koji ćemo označiti s K :

$$K^2 = \frac{1}{z_g - z_d} \int_{z_d}^{z_g} K_z^2 \left[1 + \frac{F_x x'}{F_m} + \frac{F_y y'}{F_m} + \frac{M_x \alpha'}{F_m} + \frac{M_y \beta'}{F_m} + \frac{M_z \gamma'}{F_m} \right] dz \approx$$

$$\approx \left[\frac{1}{z_g - z_d} \int_{z_d}^{z_g} K_z^2 dz \right] \left[1 + \frac{(F_x x')_{sr}}{F_m} + \frac{(F_y y')_{sr}}{F_m} + \frac{(M_\alpha \alpha')_{sr}}{F_m} + \frac{(M_\beta \beta')_{sr}}{F_m} + \frac{(M_\gamma \gamma')_{sr}}{F_m} \right] \quad (7.3)$$

Omjer K može se ustanoviti grafičkom ili numeričkom integracijom iz izmjerene ovisnosti omjera K_z o vertikalnom pomaku visokonaponskih elektroda uzevši pri tome u obzir i korekcijski član u desnim uglastim zagradama izraza (7.3), pa će vrijednost mjerenog napona biti:

$$U_N = K \sqrt{2 m_E g \left(1 - \frac{\varrho_a}{\varrho_m} \right) \frac{z_g - z_d}{C_g - C_d}} \quad (7.4)$$

Postupak određivanja napona bi se pojednostavnio, a poboljšala bi se i točnost mjerenja napona, ako bi korekcijski član u izrazu (7.3) bio ravan jedinici ili ako ne bi od nje odstupao više od otprilike $2 \cdot 10^{-8}$, što bi se moglo zanemariti. Zbog toga valja razmotriti kako se korekcijski član može računski i eksperimentalno naći i u kojim uvjetima njegovo odstupanje od jedinice postaje zanemarivo. Pri tome je prikladno skupa razmotriti članove $F_x x'/F_m$ i $F_\alpha \alpha'/F_m$ jer ih oba uzrokuje horizontalna elektrostatska sila u smjeru osi x , a jednako tako skupa i članove $F_y y'/F_m$ i $F_\beta \beta'/F_m$, koji nastaju zbog djelovanja elektrostatske sile u smjeru osi y .

7.2. KOREKCIJSKI ČLANOVI $(F_x x')_{sr}/F_m$ i $(M_\alpha \alpha')_{sr}/F_m$

7.2.1. Otkloni ovješene elektrode zbog sile F_x i momenta M_α

Pretpostavimo da visokonaponska elektroda u beznaponskom stanju odstupa od centričnog položaja u poprečnom smjeru za x_v , te da je ujedno prema njemu zakrenuta za kut α_v . Kad se elektrode priključe na napon, pojavit će se u vezi s tim odstupanjima elektrostatske sile koje će ovješenu elektrodu zbog njezina elastičnog ovješena još više odmaknuti od centričnog položaja. Označimo poprečni pomak koji nastaje zbog svijanja ovjesnih vrpca ovješene elektrode sa x_o , a zbog svijanja vrpca na kojima vise krakovi vage sa x_k . Zakretanje ovješene elektrode zbog zakretanja njezina ovjesišta označimo sa α_o , a zbog zakretanja ovjesišta krakova sa α_k . Pri tome će zakretanje α_k izazvati poprečni pomak ovješene elektrode za $L_1 \alpha_k$, gdje je L_1 duljina krakova vage, kao što se to uočava iz slike 5.15. Mehaničke sile i momente koje uzrokuju ti pomaci možemo izračunati pomoću izraza (5.45), (5.47), (5.48) i (5.49). Zbog odstupanja od centričnog položaja u poprečnom smjeru za $x_v + x_o + x_k + L_1 \alpha_k$ nastaje prema izrazu (4.54) elektrostatska sila:

$$F_x = U^2 C \frac{x_v + x_o + x_k + L_1 \alpha_k}{s^2} \quad (7.5)$$

a zbog odstupanja od centričnog položaja za kut $\alpha_v + \alpha_o + \alpha_k$ elektrostatski moment:

$$M_\alpha = U^2 C \frac{a_1^2 (\alpha_v + \alpha_o + \alpha_k)}{12 s^2}, \quad (7.6)$$

pri čemu je a_1 efektivna duljina ovješene elektrode. U stacionarnom stanju bit će u ravnoteži električne i mehaničke sile i momenti pa se iz toga izvode jednadžbe:

$$U^2 C \frac{a_1^2 (\alpha_v + \alpha_o + \alpha_k)}{12 s^2} = \frac{\alpha_o B^2}{4 l_{oy}'' m_o g} \quad (7.7)$$

$$\frac{U^2 C}{12 s^2} [a_1^2 (\alpha_v + \alpha_o + \alpha_k) + 12 (x_v + x_o + x_k + L_1 \alpha_k) L_1] = \frac{\alpha_k B^2}{4 l_{ky}''} m_k g \quad (7.8)$$

$$\frac{U^2 C}{s^2} (x_v + x_o + x_k + L_1 \alpha_k) = \frac{x_o}{l_{ox}''} m_o g = \frac{x_k}{l_{kx}''} m_k g. \quad (7.9)$$

Rješavanjem tih jednadžbi dobivaju se pomaci x_o , x_k i kutovi α_o i α_k , no izrazi su složeni i nisu pregledni pa ih ovdje nećemo navesti. Mnogo jednostavniji izrazi bit će ako se pretpostavi da su vrpce na kojima visi ovješena elektroda znatno dulje od onih kojima su ovješeni krakovi, kako je to i odabrano u našim izvedbama. Tad se, uz $l_{ky}'' = l_{kx}'' = 0$, odnosno $\alpha_k = x_k = 0$, iz jednadžbi (7.7) i 7.9) dobiva:

$$x_o = \frac{x_v}{\frac{m_o g}{l_{ox}''} \frac{s^2}{U^2 C} - 1} = k_x x_v \quad (7.10)$$

$$\alpha_o = \frac{\alpha_v}{\frac{B^2 m_o g}{l_{oy}''} \frac{3 s^2}{U^2 C a_1^2} - 1} = k_\alpha \alpha_v. \quad (7.11)$$

7.2.2. Ugađanje centričnog položaja

Kako je to u odjeljku 5.5.1. obrazloženo, moguće je radi centriranja visokonaponskih elektroda njihovo poprečno pomicanje uzduž dva pravca ugađanja koji su od poprečne simetrale elektroda udaljeni za $+\frac{1}{2} y_u$, odnosno $-\frac{1}{2} y_u$ (sl. 7.1). Pri tome se postavljaju vrlo teški zahtjevi.

Potrebni su vrlo mali pomaci od nekoliko nanometara pa do najviše nekoliko mikrometara, pri čemu se ne smiju izazvati ni najmanje vibracije kako se ne bi poremetila ravnoteža vage. Rješenje otežava i to što su elektrode u zabrtvljenom kućištu koje mora biti izvršno termostatirano. Nakon višegodišnjih istraživanja i eksperimentiranja pro-

nađeno je zadovoljavajuće rješenje pomoću zatvorenoga hidrauličkog sistema koji na jednom kraju ima mali mijeh, a na drugome vrlo tanku, dobro hladenu cjevčicu malog promjera u kojoj je ogrjevna žica. Pomoću potenciometra namješta se napon koji odgovara željenom pomaku i uspoređuje s naponom iz kapacitivnog pretvornika koji mjeri pomak visokonaponske elektrode. Razlika tih dvaju napona privodi se vrlo osjetljivoj elektroničkoj pojačalu što ugađa struju grijanja ogrjevnice žice, a time i volumen ulja u hidrauličkom sistemu, sve dok nestane ta razlika u naponima. Na osnovi male vremenske konstante cjevčice s ogrjevnom žicom, vrijeme je namještanja znatno manje od jedne minute, a namještanje teče bez ikakvih trzaja.

Centrični položaj visokonaponske elektrode ugađa se tako da se ona pomiče sve dotle dok ovješena elektroda zauzme isti položaj kao i u beznaponskom stanju. Da bi to ugađanje brže teklo, poželjno je da pomaci ovještene elektrode, mjereni na jednom pravcu ugađanja, ovise samo o pomacima visokonaponske elektrode na tome istom pravcu. Da bi se odredilo kad će to biti ostvareno, označimo pomake ovještene i visokonaponske elektrode na lijevom pravcu ugađanja indeksom L, a na desnom indeksom D, pa je:

$$x_v = \frac{x_L + x_D}{2}, \quad x_o = \frac{x_{oL} + x_{oD}}{2}, \quad \alpha_v = \frac{x_L - x_D}{y_u}, \quad \alpha_o = \frac{x_{oL} - x_{oD}}{y_u} \quad (7.12)$$

Uvrštenjem u izraze (7.10) i (7.11) nastaje:

$$x_{oL} = \frac{k_x + k_\alpha}{2} x_L + \frac{k_x - k_\alpha}{2} x_D \quad (7.13)$$

$$x_{oD} = \frac{k_x + k_\alpha}{2} x_D + \frac{k_x - k_\alpha}{2} x_L. \quad (7.14)$$

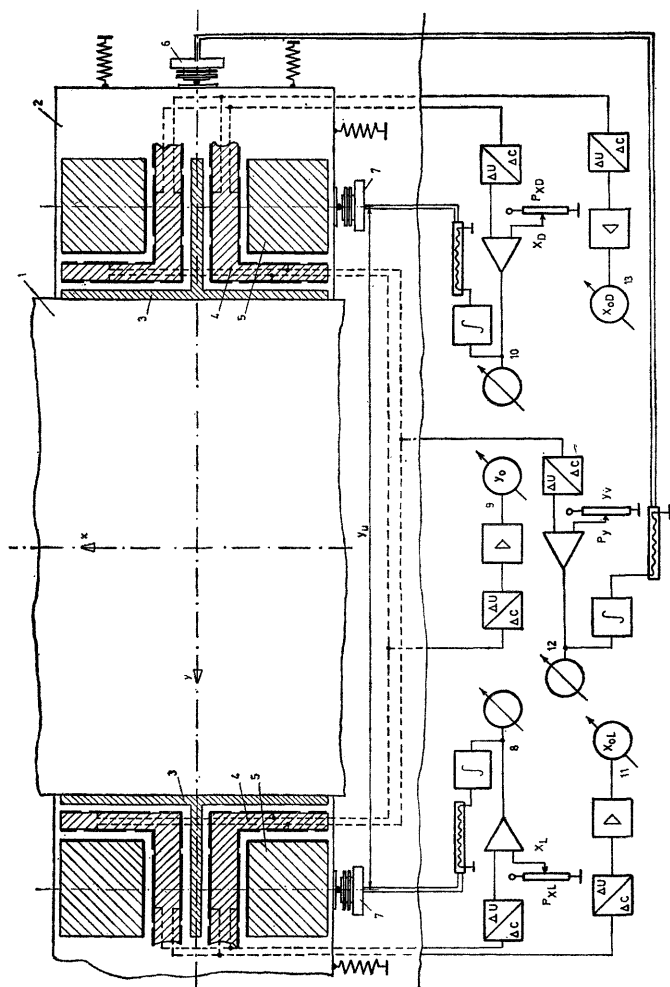
Vidi se da je za postizanje neovisnog ugađanja potrebno ostvariti $k_x = k_\alpha$, jer tad vrijedi:

$$x_{oL} = k_x x_L = k_\alpha x_L, \quad x_{oD} = k_x x_D = k_\alpha x_D. \quad (7.15)$$

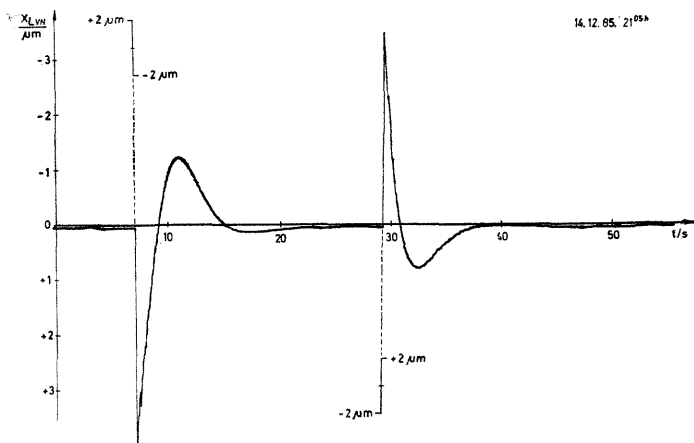
Iz izraza (7.10) i (7.11) izlazi da će se $k_x = k_\alpha$ postići kad bude:

$$\frac{l''_{oy}}{l''_{ox}} = \frac{3 B^2}{a_1^2}. \quad (7.16)$$

Tako se za $B = 220$ mm i $a_1 = 198$ mm dobiva $l''_{oy}/l''_{ox} = 3,7$. Iz slike 5.13. može se ustanoviti da se taj omjer ostvaruje uz pomoć tanke vrpce koja uz opterećenje od 500 N/mm² ima omjer duljine i širine $l_o/b_o = 12,7$. Uvrsti li se izraz (7.16) u izraze (7.10) i (7.11), te uzevši još u obzir da je $C = (C_g - C_d)(z_p - z)/(z_g - z_d) \approx \frac{dC}{dz}(z_g + z) = 2 F_m(z_p + z)/U^2$, nakon sređenja dobiva se:



Sl. 7.1.a. Sustav za mjerenje i ugađanje horizontalnog položaja elektroda (legenda na strani 193)



Sl. 7.1.b. Odziv sklopa 8 za ugađanje horizontalnog položaja lijeve strane visokonaponskih elektroda na naglo pomicanje kliznika potencijometra P_{XL} za $4 \mu\text{m}$

Legenda sl. 7.1.a:

1 — elektroda za mjerenje vertikalnih otklona ovještene elektrode na kojoj je i učvršćena (poz. 6 na sl. 3.2); 2 — tijelo vage koje se može horizontalno pomicati (poz. 10 na sl. 3.2); 3 — elektrode za mjerenje horizontalnih pomaka ovještene elektrode na kojoj su i učvršćene; 4 — elektrode za mjerenje horizontalnih pomaka ovještene elektrode i tijela vage prema referentnoj ploči na kojoj su i učvršćene; 5 — elektrode za mjerenje horizontalnih pomaka tijela na kojem su i učvršćene; 6 — mijeh za potiskivanje tijela 2 u smjeru osi y; 7 — mijehovi za potiskivanje tijela 2 u smjeru osi x; 8 — sklop za ugađanje horizontalnog položaja lijeve strane tijela 2 u smjeru osi x; 9 — sklop za mjerenje horizontalnih otklona ovještene elektrode u smjeru osi y; 10 — sklop za ugađanje horizontalnog položaja desne strane tijela 2 u smjeru osi x; 11 — sklop za mjerenje horizontalnih otklona lijeve strane ovještene elektrode u smjeru osi x; 12 — sklop za ugađanje otklona tijela 2 u smjeru osi y; 13 — sklop za mjerenje otklona desne strane ovještene elektrode u smjeru osi x

$$k_v = k_z = \frac{1}{\frac{F_0}{2 F_m} \frac{s^2}{l_{ox}'' (z_p + z)} - 1} \quad (7.17)$$

U točnijem računu ipak se mora uzeti u obzir da duljina vrpca nije ravna nuli, pa tad otklone ovještene elektrode treba računati iz jednadžbi (7.7), (7.8) i (7.9). No da bi se i o njihovu djelovanju dobila zornija slika, pretpostavimo sada da je duljina vrpca na kojima visi ovješena elektroda jednaka nuli. Tad će iz jednadžbe (7.8) biti:

$$\alpha_k = \frac{a_1^2 \alpha_v + 12 x_v L_1}{\frac{3 B^2 s^2}{U^2 C_0} \frac{m_k g}{l_{ky}''} - a_1^2 - 12 L_1^2} = \frac{a_1^2 \alpha_v + 12 x_v L_1}{k_k} \quad (7.18)$$

Dalje se, uz pomoć izraza (7.12), dobiva:

$$x_{0L} = \frac{2 L_1 + y_u}{2 k_k} \left[\left(6 L_1 + \frac{a_1^2}{y_u} \right) x_L + \left(6 L_1 - \frac{a_1^2}{y_u} \right) x_D \right] \quad (7.19)$$

$$x_{0D} = \frac{2 L_1 - y_u}{k_k} \left[\left(6 L_1 + \frac{a_1^2}{y_u} \right) x_L + \left(6 L_1 - \frac{a_1^2}{y_u} \right) x_D \right]. \quad (7.20)$$

Tu su otkloni na desnoj strani bliže ovjesištu krakova vage uvijek manji od onih na lijevoj strani, u omjeru $(2 L_1 - y_u)/(2 L_1 + y_u)$, pa se ne postiže neovisno ugađanje. Ipak, ako se odaberu dovoljno kratke vrpce, neće se bitno usporiti postupak ugađanja.

7.2.3. Određivanje korekcijskog člana $(F_x x')_{sr}/F_m$

Iz otklona ovještene elektrode može se ustanoviti koliko je pod naponom njezino odstupanje od centričnog položaja u poprečnom smjeru. Označimo to odstupanje sa x , pa se tada iz izraza (7.12) dobiva:

$$x = x_0 + x_v \approx \frac{x_{0L} + x_L + x_{0D} + x_D}{2} \quad (7.21)$$

Iz otklona ovještene elektrode x_{0L} i x_{0D} mogu se eksperimentalno, ili iz izraza (7.17) ili iz točnijih izraza (7.7), (7.8) i (7.9), ustanoviti otkloni visokonaponske elektrode x_L i x_D , pa je:

$$x = K_{sL} x_{0L} + K_{sD} x_{0D} \quad (7.22)$$

Zbog odstupanja x djelovat će u poprečnom smjeru prema izrazu (4.54) elektrostatska sila $F_x = U^2 C x / s^2$. Tu je C kapacitet između elektroda, koji ovisno o položaju visokonaponske elektrode z iznosi: $(C_g - C_0)/(z_p + z)/(z_g - z_d)$.

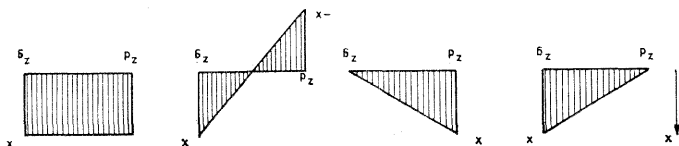
U računu, jer je riječ o proračunu vrlo malih pogrešaka, možemo uzeti da je $(C_g - C_0)/(z_g - z_0) \approx dC/dz$ pa se za silu F_x dobiva:

$$F_x = \frac{2 F_m (z_0 + z) x}{s^2}. \quad (7.23)$$

Vaganje napona provodi se u jednakim razmacima Δz i pri tome se mjere otkloni ovješene elektrode x_{0L} i x_{0D} iz kojih se može, prema izrazu (7.22) izračunati pomak x . Iz i -tog i $i+1$ mjerenja dobivamo $x' \approx (x_{i+1} - x_i)/\Delta z$ i srednju vrijednost odstupanja $(x_i + x_{i+1})/2$, a iz ukupno n mjerenja od z_d do z_g izlazi nakon sredjenja srednja vrijednost izraza $(F'_x x)_{sr}/F_m$:

$$\frac{(F'_x x)_{sr}}{F_m} = \left[x_n^2 + \frac{z_p}{z_g - z_d} (x_n^2 - x_0^2) - \frac{1}{n} (x_0 x_1 + \dots + x_{i-1} x_i + \dots + x_{n-1} x_n) \right] \frac{1}{s^2}, \quad (7.24)$$

pri čemu su x_n i x_0 odstupanja od centričnog položaja u gornjem i donjem položaju visokonaponske elektrode. Na slici 7.2. neki su karakteristični slučajevi kad odstupanje linearno raste, linearno pada, mijenja predznak i kad je konstantno:



$$\frac{(F'_x x)_{sr}}{F_m} = \frac{5}{3} \left(\frac{x}{s} \right)^2 \quad - \frac{2}{3} \left(\frac{x}{s} \right)^2 \quad \frac{2}{3} \left(\frac{x}{s} \right)^2 \quad 0$$

Sl. 7.2. Omjer $(F'_x x)_{sr}/F_m$ za karakteristične primjere poprečnoga relativnog odstupanja od centričnog položaja uz $z_0 = z_g - z_d$; x — poprečno odstupanje od centričnog položaja; s — razmak između visokonaponske i ovješene elektrode

Najnepovoljniji se pokazuje prvi primjer, u kojem se dobiva $(F'_x x)_{sr}/F_m = 10^{-8}$ kad je $\frac{x}{s} = 0,77 \cdot 10^{-4}$, odnosno $x = 0,54 \mu\text{m}$ za $s = 7$ mm.

Pri tome će otkloni ovješene elektrode biti višestruko manji ovisno o iznosu faktora K_{xL} i K_{xD} , kako to proistječe iz izraza (7.22), pa radi sigurnosti valja nastojati da otkloni ovješene elektrode pod naponom ne premaše pedesetak nanometara.

7.2.4. Određivanje korekcijskog člana $(M_\alpha \alpha')_{sr}/F_m$

Postupak izračunavanja ovoga korekcijskog člana vrlo je sličan prethodnome. Iz zakretanja ovješene elektrode u horizontalnoj ravni za kut α_0 pri njezinu uključivanju na napon može se eksperimentalno, ili iz izraza (7.17) ili iz točnijih izraza (7.7), (7.8) i (7.9) odrediti njezino kutno odstupanje od centričnog položaja α . Prema izrazu (7.6) elektrostatski moment tad će iznositi:

$$M_\alpha = U^2 C \frac{\alpha a_1^2}{12 s^2} = \frac{F_m (z_p + z)}{6 s^2} \alpha. \quad (7.25)$$

Iz n mjerenja obavljenih u jednakim razmacima Δz dobivaju se podaci za x_{0L} i x_{0D} i iz toga se izračunava α pa nakon sličnog postupka kao u prethodnom poglavlju izlazi:

$$\frac{(M_\alpha \alpha')_{sr}}{F_m} = \left[\alpha_n^2 + \frac{z_p}{z_g - z_d} (\alpha_n^2 - \alpha_0^2) - \frac{1}{n} (\alpha_0 \alpha_1 + \dots + \alpha_i \cdot \alpha_{i+1} + \dots + \alpha_{n-1} \cdot \alpha_n) \right] \frac{\alpha^2}{12 s^2}, \quad (7.26)$$

Da bi se korekcijski član dobio manji od 10^{-8} , potrebno je da odstupanje od centričnog položaja ovješene elektrode ne prekorači otprilike 5μ rad, odnosno da zbog djelovanja napona razlika u odklonima njezine lijeve i desne strane ne bude veća od otprilike 100 nm.

7.3. KOREKCIJSKI ČLANOVI

$$\frac{(F_y y')_{sr}}{F_m} \text{ i } \frac{(M_\beta \beta')_{sr}}{F_m}$$

Idući su uzroci zakretanja ovješene elektrode u uzdužnom smjeru:

- vertikalna elektrostatska sila i gravitacijska sila etalonskog utega ne djeluje u istoj vertikali;
- nejednaki razmaci između elektroda na njihovu lijevom i desnom kraju;
- nejednaki bočni razmaci ovješene elektrode prema oklopu i visokonaponskoj elektrodi. Razmotrit ćemo ih odvojeno.

7.3.1. Vertikalna elektrostatska sila i gravitacijska sila etalonskog utega ne djeluje u istoj vertikali

Zbog nesavršene mehaničke obrade neće biti potpuno jednaki razmaci između elektroda na lijevoj i desnoj strani od vertikale u kojoj djeluje težina etalonskog utega, a neće biti jednake ni duljine tih strana. To će uzrokovati uzdužno odstupanje rezultirajuće vertikalne elektrostatske sile od vertikale u kojoj djeluje težina utega za y_e (odjeljak 5.4.6). Ono uz zanemarenje rubnih efekata iznosi:

$$y_E = \int_{y_1}^{y_d} \frac{y \, dy}{s_y} \bigg/ \int_{y_1}^{y_d} \frac{dy}{s_y}. \quad (7.27)$$

Tu je s_y razmak između elektroda na udaljenosti y od vertikale u kojoj djeluje težina etalonskog utega, a y_1 i y_d su udaljenosti lijevog i desnog kraja visokonaponske elektrode od te vertikale. Ako srednji razmak između elektroda na lijevoj strani iznosi s_{ls} , a na desnoj s_{ds} , onda približno vrijedi:

$$y_E \approx \frac{s_{ls} - s_{ds}}{8s} L. \quad (7.28)$$

Tako se za $s_{ls} - s_{ds} = 1 \, \mu\text{m}$, $s = 7 \, \text{mm}$ i $L = 198 \, \text{mm}$ dobiva $y_E = 3,5 \, \mu\text{m}$. Odstupanje y_E uzrokovat će zakretanje ovješene elektrode za kut β , kako je to obrazloženo u odjeljku 5.4.6, a zbog toga i pogrešku u vaganju napona izazvanu svijanjem ovjesnih vrpca. Za uzeti brojčani primjer bit će ta pogreška potpuno zanemariva.

7.3.2. Horizontalna uzdužna sila zbog nejednake debljine ovješanih elektroda na njihovu lijevom i desnom kraju

Ako debljina ovješanih elektroda nije jednaka na njihovoj lijevoj i desnoj strani, i to osobito na njihovim rubovima, mijenjat će se kapacitet između elektroda s uzdužnim pomakom ovješene elektrode. Zbog toga nastaje uzdužna horizontalna sila $F_{hk} = \frac{1}{2} U^2 \cdot dC/dy$. Ako je srednja razlika između debljine na desnom i lijevom kraju ovješanih elektroda Δd_k , onda nastaje uzdužna horizontalna sila razmjerna duljini preklapanja elektroda $4(z_p + z)$ pa se dobiva:

$$F_{hk} = \frac{1}{2} U^2 \varepsilon \cdot 4(z_p + z) \frac{\Delta d_k}{s^2} = \frac{F_m (z_p + z)}{2 L_{\text{ef}}} \Delta d_k. \quad (7.29)$$

Pri tome je F_m vertikalna elektrostatska sila, L_{ef} efektivna širina visokonaponskih elektroda (odjeljak 6.3), a $\Delta d_k = \Delta d_k/s$ je relativna razlika između debljina na desnom i lijevom kraju ovješanih elektroda.

Ta sila djeluje na udaljenosti $L_{hk} = \frac{1}{2} z$ od ovješanja pa nastaje moment M_{hk} , koji će zakrenuti ovješenu elektrodu za kut β :

$$\beta = \frac{M_{hk}}{F_0 L_0} = \frac{F_m (z_p + z) (2 L_{hk} - z)}{2 L_{\text{ef}} F_0 L_0} \Delta d_k. \quad (7.30)$$

Tu je F_0 težina ovješene elektrode, a L_0 je udaljenost njezina težišta od ovjesišta. Pri vertikalnom podizanju visokonaponske elektrode od z_d do z_g nastat će djelovanjem ovog momenta radnja:

$$W_{hk} = \int_{z_d}^{z_g} M_{hk} \beta' dz. \quad (7.31)$$

Korekcije zbog djelovanja spomenutog momenta bit će zanemarive ako ta radnja bude otprilike $2 \cdot 10^8$ puta manja od radnje vertikalne elektrostatske sile na putu od z_d do z_g . Nakon sređivanja i uz neka dopuštena zanemarenja bit će:

$$\frac{W_{hk}}{F_m (z_g - z_d)} = \frac{(2 L_{hk} - z_g + z_d)^2 F_m}{16 L_{2ef}^2 F_0 L_0} \left[z_p + \frac{1}{2} (z_g - z_d) \right] \Delta d_{kr}^2 \quad (7.32)$$

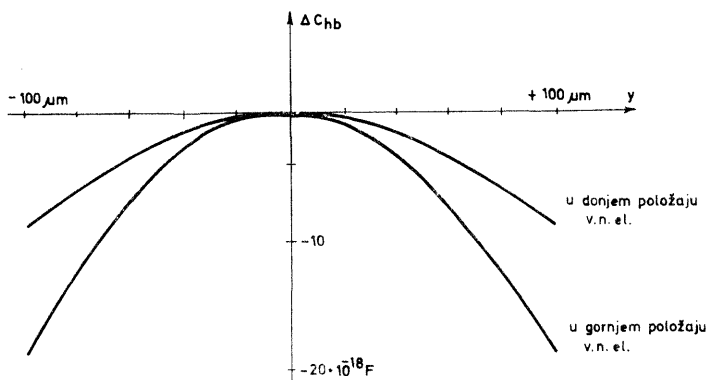
Tako za $L_{hk} = 0,2$ m, $L_{2ef} = 0,193$ m, $z_g - z_d = 0,051$ m, $z_p = 0,042$ m, $F_0 L_0 = 1,5$ Nm i $F_m = 0,1$ N taj omjer iznosi $0,0009 \Delta d_{kr}^2$, što znači da srednja razlika debljine ovješanih elektroda na njihovom lijevom i desnom kraju ne smije prekoračiti $\Delta d_{kr} \leq \sqrt{2 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0009} = 4,7 \cdot 10^{-3}$ ili $\Delta d_{kr} \leq 4,7 \cdot 10^{-3} \cdot 7000 \leq 33 \mu\text{m}$. Kod $\Delta d_{kr} = 33 \mu\text{m}$ iznositi će prema izrazu (7.30) kut β u donjem položaju $6,8 \mu\text{rad}$, a u gornjem $13,1 \mu\text{rad}$. Uzdužnim ugađanjem ovjesišta etalonskog utega prema slici 5.10. može se postići da u donjem položaju visokonaponskih elektroda bude: $\beta_d = (6,8 - 13,1)/2 = -3,15 \mu\text{rad}$, a u gornjemu: $\beta_g = (13,1 - 6,8)/2 = +3,15 \mu\text{rad}$. Tad će indikator uzdužnih pomaka ovještene elektrode prema odjeljku 5.4.5. izmjeriti pomake $f_{id} = \beta_d L_i = -3,15 \cdot 10^{-6} \cdot 0,1 = -0,315 \mu\text{m}$ i $f_{ig} = \beta_g L_i = 3,15 \cdot 0,1 = +0,315 \mu\text{m}$. Ti su pomaci više od tri puta veći od otklona prema izrazu (5.40) pa nije ispunjen uvjet da moment zbog svijanja ovjesnih vrpca bude $5 \cdot 10^{-8}$ momenta koji stvara vertikalna elektrostatska sila. Ipak se zbog toga neće pojaviti pogrešno vaganje napona jer će se tu međusobno poništiti pogreške u donjem i gornjem položaju visokonaponskih elektroda. Osim toga pretpostavili smo da će Δd_{kr} iznositi $33 \mu\text{m}$, a dobrom se obradom elektroda postiže da on bude i desetak puta manji. Zbog svega toga bit će pogreške uzrokovane ovim momentom potpuno zanemarive.

7.3.3. Nejednaki bočni razmaci ovještene elektrode prema oklopu i visokonaponskoj elektrodi

Da bi se izbjegle uzdužne horizontalne sile, nije dovoljno da razmaci između elektroda budu potpuno jednaki. Potrebno je još i da međusobne udaljenosti bočnih rubova ovještene, visokonaponske elektrode i oklopa budu ujednačene na lijevoj i desnoj strani. Kapacitet između elektroda u tom je položaju najveći pa zbog uzdužnih odstupanja nastaju horizontalne elektrostatske sile koje nastoje vratiti ovješenu elektrodu u taj položaj. Proračun tih sila vrlo je složen i ovdje ćemo iznijeti samo rezultate dobivene računski i eksperimentalno. Kod naše nove naponske vage mijenja se kapacitet visokonaponske elektrode prema ovješenoj elektrodi i oklopu ovisno o uzdužnim pomacima ovještene elektrode prema izrazu (sl. 7.3):

$$\Delta C_{11} = -20 \cdot 10^{-9} (z_p + z) y^2, \quad (7.33)$$

pri čemu je y odstupanje od centričnog položaja.



Sl. 7.3.

Horizontalna elektrostatska sila koja nastoji vratiti ovješenu elektrodu u centrični položaj iznosi kod napona $U = 10$ kV:

$$F_{hb} = \frac{1}{2} U^2 \frac{d(\Delta C_{hb})}{dy} = -2(z_p + z)y. \quad (7.34)$$

Sila F_{hb} djeluje na udaljenost $(L_{hb} - z/2)$ od ovjesišta i uzrokuje moment $F_{hb}(L_{hb} - z/2)$ koji će zakrenuti ovješenu elektrodu za kut:

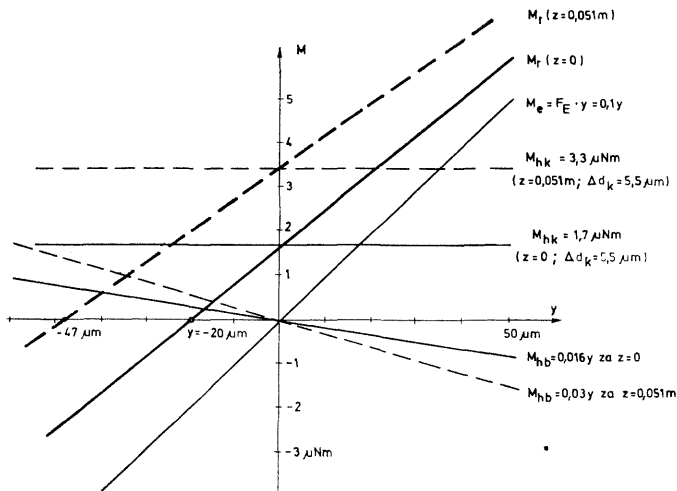
$$\beta = - \frac{(z_p + z)(2L_{hb} - z)}{F_0 L_0} y. \quad (7.35)$$

Tako se za: $L_{hb} = 0,2$ m, $z_p = 0,042$ m, $F_0 L_0 = 1,5$ Nm i $y = 100 \mu\text{m}$ dobiva u donjem položaju $\beta_d = -1,1 \mu\text{rad}$, a u gornjem $\beta_g = -2,2 \mu\text{rad}$, dakle znatno manje nego u primjeru iz odjeljka 7.3.2. premda smo pretpostavili pretjerano velik pomak y . Zbog toga se očito njegov utjecaj može potpuno otkloniti postupkom opisanim u odjeljku 7.3.2.

7.3.4. Otklanjanje utjecaja uzdužnih horizontalnih elektrostatskih sila

Utjecaj uzdužnih horizontalnih sila ne može se izbjeći postupkom koji smo primijenili kod poprečnih sila. Razlog je tome što uzdužno zakretanje ovješene elektrode izaziva i ekscentrična vertikalna elektrostatska sila $F_e = mg$. Obrazloženje pruža slika 7.4, gdje su prikazani svi elektrostatski momenti koji uzdužno zakreću ovješenu elektrodu.

To je moment vertikalne elektrostatske sile F_e razmjeran njezinu uzdužnom odstupanju od centričnog položaja: $M_e = F_{ey}$ (odjeljak 7.3.1), moment M_{hk} zbog nejednakog razmaka između elektroda na njihovu lijevom i desnom kraju (odjeljak 7.3.2), te moment zbog nejednakih bočnih razmaka M_{hb} .



Sl. 7.4. Uzdužni elektrostatski momenti na ovješenu elektrodu ovisno o uzdužnom pomaku y visokonaponskih elektroda

Njihov rezultirajući moment M_r , za primjer na slici 7.4, ravan je nuli kod $y = -20 \mu\text{m}$ za $z = 0$, odnosno kod $y = -47 \mu\text{m}$ za $z = 0,051 \text{ m}$, premda pri tome djeluje horizontalna elektrostatska sila. Ona iznosi $10 \mu\text{N}$ za $z = 0$, odnosno $27 \mu\text{N}$ za $z = 0,051 \text{ m}$. Pri podizanju visokonaponskih elektroda ta će sila izvršiti radnju koja približno iznosi: $(10 + 27) \cdot (47 - 20) / 2 \cdot 10^{-12} = 500 \cdot 10^{-12} \text{ Nm}$. Ta horizontalna radnja uzrokovat će pogrešku u određivanju napona: $500 \cdot 10^{-12} / 2 F_m (z_g - z_i) = 500 \cdot 10^{-12} / 2 \cdot 0,1 \cdot 0,051 = 0,05 \text{ ppm}$.

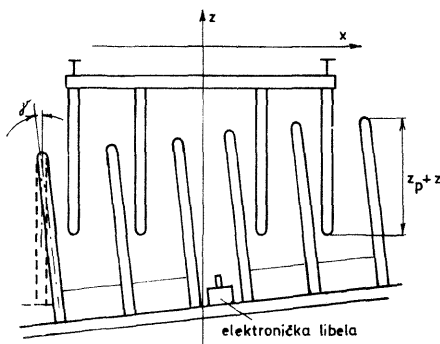
Zato je bolje dopustiti male uzdužne pomake ovještene elektrode i ugađanjem uzdužnog položaja etalonskog utega postići da ti otkloni u donjem i gornjem položaju visokonaponskih elektroda budu podjednaki, ali suprotna predznaka. Time se potpuno poništava djelovanje ionako vrlo malih momenata koje uzrokuje svijanje ovjesnih vrpca.

7.4. KOREKCIJSKI ČLAN $\frac{(M_\gamma \gamma')_{sr}}{F_m}$

Ako su visokonaponska i ovješena elektroda međusobno nagnute za kut γ (sl. 7.5), djeluje elektrostatski moment M_γ :

$$M_\gamma = U^2 C_0 \frac{\gamma (z_p + z)^2}{12 s^2} \quad (7.36)$$

pri čemu je $C_0 = \varepsilon \cdot 8 L_{zel} (z_p + z)/s$ ukupni kapacitet između elektroda.



Sl. 7.5.

Budući da je vertikalna elektrostatska sila $F_m = \frac{1}{2} U^2 \cdot 8 \varepsilon L_{zel}/s$, uvrštavanjem se dobiva:

$$M_\gamma = F_m \frac{\gamma (z_p + z)^3}{6 s^2} \quad (7.37)$$

Već je spomenuto da se vaganje napona provodi u jednakim razmacima Δz i pri tome, pomoću vrlo osjetljive elektroničke libele, mjere nagibi visokonaponskih elektroda. Iz i -tog i $i+1$ mjerenja dobiva se $\gamma' = (\gamma_{i+1} - \gamma_i)/\Delta z$ i srednji nagib $(\gamma_{i+1} + \gamma_i)/2$, pa za srednju vrijednost korekcijskog člana $(M_\gamma \gamma')_{sr}/F_m$ iz ukupno n mjerenja nakon uređenja izlazi:

$$\frac{(M_\gamma \gamma')_{sr}}{F_m} = \frac{1}{12 s^2 n \Delta z} \sum (z_p + z_i)^3 \cdot (\gamma_{i+1}^2 - \gamma_i^2) \quad (7.38)$$

Za $\gamma = \gamma_d + Kz$ i $z_p = 0,82 (z_g - z_d)$ vrijedi:

$$\frac{(M_\gamma \gamma')_{sr}}{F_m} = \frac{K(z_g - z_d)^3}{6 s^2} [2,63 \gamma_d + 1,76 K(z_g - z_d)] \quad (7.39)$$

Tako se za: $K = \gamma_d = 10^{-5}$, što se daje ostvariti, te uz $(z_g - z_d) = 0,051$ m i $s = 0,007$ m, dobiva: $(M \gamma')_{s/F_m} = 1,23 \cdot 10^{-10}$, dakle potpuno zanemarivo.

7.5. MJERENJE RAZLIKE KAPACITETA U GORNJEM I DONJEM POLOŽAJU VISOKONAPONSKIH ELEKTRODA ($C_g - C_d$)

Razlika kapaciteta $C_g - C_d$ jedna je od sedam veličina koje u izrazu (7.4) izravno sudjeluju u određivanju vrijednosti mjenog napona U_x . Njezina mjerna nesigurnost ovisi o jednakosti kapaciteta C_g i C_d pri vaganju napona i pri njihovu mjerenju odgovarajućim mjernim mostom, o nesigurnosti tog mjernog mosta i nesigurnosti upotrijebljenog etalona kapaciteta.

7.5.1. Održavanje jednakosti kapaciteta $C_g - C_d$ pri vaganju napona i mjerenju kapaciteta

Mjerenje kapaciteta između elektroda obavlja se neposredno prije i poslije postupka vaganja napona u donjem i gornjem položaju visokonaponskih elektroda. Ipak će neizbježni vrlo mali vertikalni, uzdužni i poprečni pomaci Δz , Δy i Δx te zakretanje elektroda $\Delta \alpha$, $\Delta \beta$ i $\Delta \gamma$ između postupka mjerenja kapaciteta i vaganja napona uzrokovati pogrešku u određivanju napona koja, uz zanemarenje zakretanja $\Delta \gamma$, iznosi:

$$p = \frac{1}{2(z_g - z_d)} \left\{ \Delta z_g - \Delta z_d + (z_p + z_g - z_d) \frac{\Delta x_g^2}{s^2} - z_p \frac{\Delta x_d^2}{s^2} - 20 \cdot 10^{-9} \cdot \right. \\ \left. \cdot [(z_p + z_g - z_d) \Delta y_g^2 - z_p \Delta y_d^2] + \frac{L_2^2}{12 s^2} [(z_p + z_g - z_d) \alpha_g^2 - z_p \alpha_d^2] \right\}, \quad (7.40)$$

Tu smo indeksima d i g označili veličine u donjem, odnosno gornjem položaju visokonaponskih elektroda. Dosadašnja iskustva pokazuju da je u izrazu neusporedivo najveći udio razlika $\Delta z_g - \Delta z_d$ jer već $\Delta z = 5$ nm unosi pogrešku od 0,05 ppm. Zbog toga su i poduzete posebne mjere da se visokonaponska i ovješena elektroda održe u oba pokusa na jednakoj visini (odjeljci 5.7. i 8.6.). Svi pomaci i zakreti elektroda mjere se pomoću vrlo osjetljivih kapacitivnih pretvornika pa se njihovim uvrštavanjem u izraz (7.40) može naći korekcija izmjerene razlike kapaciteta, no najčešće to nije potrebno zbog njihovih vrlo malih vrijednosti.

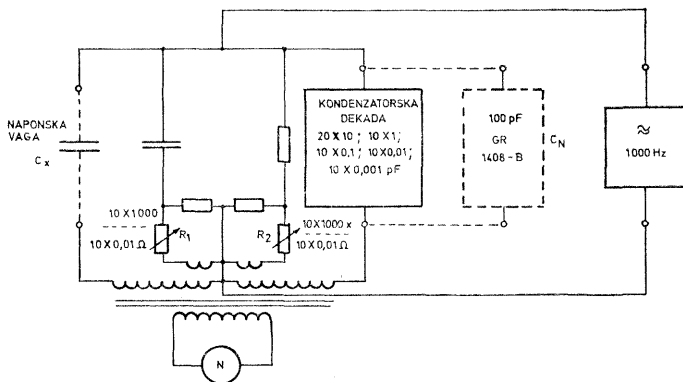
Pogrešku u mjerenju razlike $C_g - C_d$ izaziva i promjena temperature $\Delta \theta$ između vaganja napona i mjerenja kapaciteta. Visokonaponske elektrode i nosači elektroda su od aluminija ($\alpha_L = 23 \cdot 10^{-6}/K$), a ovješena je elektroda od epoksidne smole ($\alpha_s = 50 \cdot 10^{-6}/K$) pa promjena temperature $\Delta \theta$ uzrokuje pogrešku u određivanju napona, ako se izuzme utjecaj promjene prekrivanja elektroda (odjeljak 8.6.3):

$$p = \frac{1}{2} \left[\frac{d \alpha_s - (2s + d) \alpha_L}{2s} + \alpha_L \right] \Delta \vartheta, \quad (7.41)$$

a tu je d debljina ovješene elektrode. Tako za $\Delta \vartheta = 0,001$ K i $d = 12$ mm ta pogreška iznosi $+0,012$ ppm. Termostatiranjem se održava temperatura u unutrašnjosti vage u mnogo užim granicama od $\pm 0,001$ K pa je ta pogreška redovno zanemariva.

7.5.2. Mjerenje razlike kapaciteta ($C_g - C_d$)

U dosadašnjim mjerenjima razlike kapaciteta upotrebljavao se posební samokalibrirajući most za mjerenje kapaciteta [II/13], [II/14] i [I/9], kojim je ostvarena mjerna nesigurnost reda 0,1 ppm. Sad je u izgradnji induktivni most kojim se želi postići još manja nesigurnost [I/10]. Sastoji se od diferencijalnog transformatora omjera 1:1 s mogućnošću ugađanja od $\pm 10^{-4}$ i baterije ultratermostatiranih kondenzatora punjenih suhim dušikom s dekadama 20×10 pF, 10×1 pF, $10 \times 0,1$ pF, $10 \times 0,01$ pF i $10 \times 0,001$ pF. Razlika kapaciteta $C_g - C_d$ mjeri se tako da se u donjem položaju visokonaponskih elektroda uspostavi ravnoteža ugađanjem kapaciteta baterije kondenzatora i omjera diferencijalnog transformatora (sl. 7.6). Njegov se omjer može fino ugađati unutar 100 ppm pomoću precizne deкаде R_1 , a fazni pomak dekadom R_2 .



Sl. 7.6. Pojednostavljena shema induktivnog mosta za mjerenje $C_g - C_d$

U gornjem položaju visokonaponskih elektroda spaja se paralelno bateriji kondenzatora etalonski kondenzator kapaciteta 100 pF, pa kako razlika $C_g - C_d$ iznosi također 100 pF, dobiva se ravnoteža samo finim ugađanjem diferencijalnog transformatora. Time je izbjegnuto mnoštvo

odvojaka na diferencijalnom transformatoru i omogućena je izravna usporedba razlike kapaciteta $C_g - C_a$ s etalonskih kondenzatorom.

Kao etalon kapaciteta služi kondenzator tvornice General Radio tip 1408-B s taljenim kvarcom kao dielektrikom i elektrodama od zlata, koji su hermetički zatvoreni u posudi ispunjenoj suhim dušikom. Temperaturni koeficijent mu iznosi 12 ppm/K, a kut gubitaka manje od $1 \cdot 10^{-5}$. Stalna temperatura održava se pomoću zračnog ultratermostata u granicama užitim od $\pm 0,01$ K. Godišnja stalnost njegova kapaciteta je reda 0,1 ppm. Bio je baždaren više puta u NBS-u, PTB-u i LCIE-u, a planira se njegovo uključivanje u kružnu međunarodnu usporedbu etalona kapaciteta.

8. KAPACITIVNI PRETVORNICI ZA MJERENJE POMAKA

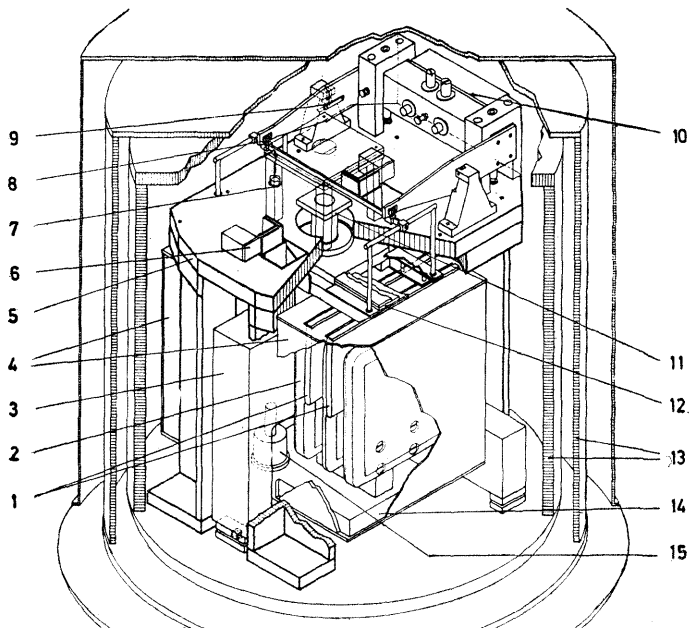
8.1. ZAHTJEVI

Pri projektiranju i realizaciji naponske vage nastojali smo njezine interne pogreške svesti na zanemariv iznos, reda nekoliko stotinki ppm, tako da za određivanje napona može poslužiti jednostavni izraz (7.4), bez ikakvih dodatnih korekcija. Da bi to bilo moguće, prije je potrebno održati ovješenu elektrodu u potpuno istom položaju pri vaganju napona i pri mjerenju kapaciteta $C_g - C_a$. Za to su potrebna vrlo osjetljiva mjerila pomaka koja neće proizvesti dodatne sile i zagrijavanja. Najprikladnijima pokazali su se kapacitivni pretvornici pomaka. Oni rade bez gubitaka, a njihove elektrostatske sile mogu se svesti na neznatan iznos. Njihova osjetljivost na nečistoće, prašinu, vlagu i temperaturu ovdje neće doći do izražaja jer će se zbog naponske vage, koja je i sama kapacitivni pretvornik, održavati upravo idealni uvjeti za njihov rad. Zbog tih razloga upotrijebljeni su u našoj naponskoj vagi kapacitivni pretvornici ne samo za mjerenje otklona ovještene elektrode već i za interno mjerenje: vertikalnih pomaka visokonaponske elektrode, vertikalnih pomaka stalka koji drži visokonaponsku elektrodu i poklopca na kojem se nalazi laserski interferometar. Upotrijebit ćemo ih i za mjerenje tlaka u vagi, horizontalnosti, te za razna mjerenja pri montaži i početnim ugađanjima. Redom ćemo iznijeti kakvim zahtjevima moraju udovoljiti ti pretvornici da njihov pojedinačni utjecaj na mjernu nesigurnost određivanja napona ne bude veći od 0,01 ppm. Nabrojat ćemo i ostale njihove karakteristike.

Smještaj navedenih pretvornika u naponskoj vagi ETF u izgradnji prikazan je na slikama 3.2 i 8.1.

8.1.1. Kapacitivni pretvornik za mjerenje vertikalnih pomaka ovještene elektrode

Ovaj pretvornik služi za mjerenje otklona ovještene elektrode i nalazi se u povratnoj vezi s naponom priključenim na visokonaponske elektrode u postupku vaganja napona (sl. 5.17) ili, kada su ovješeni etalonski utezi, u povratnoj vezi s naponom za fino ugađanje ravnotežnog položaja koji je priključen između ovještene elektrode i posebnih pomoćnih elektroda. Ako želimo u skladu s uvodno postavljenim zahtje-



Sl. 8.1. Perspektivna skica naponske vage ETF-Zagreb za 10 kV i 2×5 g u izgradnji, 1 — Četiri pločaste uzemljene elektrode (dvije srijeda a dvije straga) ovještene o krakove vrlo osjetljive vage; 2 — visokonaponske pločaste elektrode koje se mogu daljinski vertikalno pomicati 54 mm pomoću hidrauličkog uređaja (ne vidi se na slici) i održavati u potrebnom položaju unutar nekoliko nanometara; 3 — tijelo koje služi za vertikalno vođenje visokonaponskih elektroda a može se daljinski horizontalno pomicati radi dovođenja elektroda u centralni položaj; 4 — uzemljeni oklop koji je mehanički povezan s visokonaponskim elektrodama; 5 — stol koji nosi mehaničku vagu a kruto je povezan s kućištem vage; 6 — pomoćne elektrode za mjerenje horizontalnih pomaka ovješених i visokonaponskih elektroda s nesigurnošću od nekoliko nanometara; 7 — elastično ovješeni etalonski uteg od 5 g koji se može daljinski polagano podignuti; 8 — ovjesište uzemljenih elektroda; 9 — ovjesište krakova vage; 10 — protutuget s vijcima za ugađanje ravnoteže i osjetljivosti vage; 11 — reflektor lasera za mjerenje vertikalnih pomaka visokonaponskih elektroda, učvršćen na nazubljenu elektrodu kapacitivnog pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka visokonaponskih elektroda; 12 — pomoćne elektrode koje služe za mjerenje horizontalnih pomaka ovješених i visokonaponskih elektroda i elektrode za fino ugađanje ravnoteže vage pomoćnim naponom; 13 — trostruko kućište od kojih je unutrašnje zabrtvljeno i ispunjeno suhim dušikom a na srednjem se nalazi grijaći namot; kućišta su međusobno dobro toplinski izolirana što skupa s osjetljivim regulatorom omogućava održavanje stalne temperature u unutrašnjosti vage unutar 1 mK; 14 — ploča koja nosi visokonaponske elektrode 2 i oklop 4 a učvršćena je na vodeću osovinu; 15 — elektrostatska libela za daljinsko mjerenje nagiba ploče 14

vima ostvariti osjetljivost vaganja napona od 0,01 ppm, onda je prema odjeljku 5.3. potrebno omogućiti zapažanje pomaka ovješene elektrode od otprilike 2 nm. S druge strane, pri vertikalnom pomicanju visokonaponskih elektroda za $z_g - z_d$ i mjerenja kapaciteta $C_g - C_d$ potrebno je da ovješena elektroda ostane u istom položaju. Želimo li da njezini neizbježni vertikalni pomaci ne izazovu veću pogrešku od 0,01 ppm, onda ti pomaci moraju biti manji od:

$$\Delta z_1 \leq \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot 10^{-8} (z_g - z_d) = \sqrt{2} \cdot 10^{-8} \cdot 0,051 = 0,72 \cdot 10^{-9} \text{ m}, \quad (8.1)$$

dakle čak manji od 1 nanometar.

Budući da između mjerenja kapaciteta C_g i C_d može proteći više sati, potrebno je prema tome da u tome vremenskom razdoblju bude stabilnost nultog položaja pretvornika reda 1 nm.

Iz izloženoga proistječe i zahtjev na povratnu vezu između kapacitivnog pretvornika i napona na visokonaponskim elektrodama, odnosno napona za fino ugađanje ravnotežnog položaja. Ona mora biti tako projektirana da osigura održavanje srednje vrijednosti ravnotežnog položaja unutar 1 nm.

Osim ovih ekstremno malih pomaka trebat će u pripremnoj fazi, npr. pri ručnom ugađanju ravnotežnog položaja polužne vage i ugađanju njezine osjetljivosti, mjeriti i znatno veće pomake pa su određeni ovi mjerni opsezi: 0,1 μm , 1 μm , 10 μm i 100 μm . Budući da su to samo pomoćna mjerenja, mogu se pri tome dopustiti pogreške i od nekoliko postotaka, tako da će najteži zahtjev ipak biti postizanje višesatne stabilnosti srednje vrijednosti nultog položaja reda jednog nanometra i mogućnosti zapažanja tako malog pomaka.

Napon priključen između elektroda kapacitivnog pretvornika, od kojih je jedna na ovješenoj elektrodi, a druga na postolju, djelovat će određenom elektrostatskom silom na ovješenu elektrodu. Za vrijeme cijelog postupka vaganja napona i mjerenja kapaciteta C_g i C_d promjena te sile ΔF ne smije prema uvodno postavljenom zahtjevu izazvati pogrešku u određivanju napona veću od 0,01 ppm, ili:

$$\Delta F \leq 2 \cdot m_g \cdot 10^{-8} = 2 \cdot 0,01 \cdot 9,81 \cdot 10^{-8} \approx 2 \cdot 10^{-9} \text{ N}. \quad (8.2)$$

Dva su moguća osnovna uzroka promjeni te elektrostatske sile: vertikalni pomak ovješene elektrode i promjena napona napajanja kapacitivnog pretvornika. Budući da je promjena elektrostatske sile pretvornika razmjerna odstupanju od nultog položaja, prvi će uzrok utjecati samo na osjetljivost vage S , a ne i na pogrešku određivanja napona. Promjena napona napajanja uzrokovat će promjenu elektrostatske sile pretvornika, pa ako se pretpostavi stabilnost napona napajanja $\Delta U_r = 0,5 \cdot 10^{-3}$, što nije teško ostvariti, onda za dopuštenu elektrostatsku silu pretvornika F_v , uz pomoć izraza (8.2), izlazi:

$$F_v \leq \frac{\Delta F}{2 \Delta U_r} = \frac{2 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 2 \mu\text{N}. \quad (8.3)$$

Na pokazivanje pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka ovješene elektrode mogu utjecati eventualni horizontalni pomaci i zakretanje ovješene elektrode, no oni će zbog centriranja ovješene elektrode biti redovito mnogostruko manji od $1 \mu\text{m}$, odnosno od 10^{-3} rad. Zbog toga je dovoljno da pomaci i zakretanje u navedenim iznosima ne uzrokuju veću promjenu pokazivanja kapacitivnog pretvornika za vertikalne pomake od 1 nm.

8.1.2. Kapacitivni pretvornici za mjerenje horizontalnih pomaka

Prema odjeljku 7.2.2 (sl. 7.1), pomoću kapacitivnih pretvornika mjere se poprečni pomaci ovješene elektrode prema referentnoj nepomičnoj ravni uzduž dva paralelna pravca međusobno razmaknuta za y_0 . Na istim tim pravcima mjere se poprečni pomaci tijela vage prema referentnoj ravni. Osim toga se mjere uzdužni pomaci ovješene elektrode i tijela također prema referentnoj ravni. Kako proistječe iz odjeljka 7.2. i 7.3, trebalo bi pri tome da mjerna nesigurnost iznosi oko 10 nm, a da bi se omogućila razna baždarenja i ugađanja, trebat će više mjernih opsega. Dosadašnja iskustva upućuju na to da je za pokazni instrument klase 1,5 najbolje odabrati mjerne opsege od 0,2 i $2 \mu\text{m}$, s tim što se njegov multi položaj može ugađati pomoću potenciometra s tisuću podjela u granicama od $\pm 10 \mu\text{m}$ kod manjega mjernog opsega, a kod većega u granicama od $\pm 100 \mu\text{m}$. Tu nema teškoća da se upotrijebe pretvornici s jednom pomičnom elektrodom između dvije nepomične elektrode. Kod pomaka ovješene elektrode valja voditi računa o tome da promjena elektrostatskih sila pretvornika ne premaši $10 \mu\text{N}$.

8.1.3. Interno mjerenje pomaka $z_g - z_d$

Prema izrazu (6.3) razmak $z_g - z_d$ iznosi 51 mm i mjeri se pomoću odgovarajućega laserskog uređaja. U tu svrhu na poklopcima kućišta nalaze se odgovarajući otvori i postolje za montažu interferometra. No, da bi se omogućilo korištenje naponskom vagom i bez vrlo skupoga preciznog laserskog uređaja, služi u tu svrhu posebni kapacitivni pretvornik, koji jednom izbaždaren može poslužiti ne samo za mjerenje pomaka $z_g - z_d$ već i za snimanje ovisnosti napona vage o vertikalnim pomacima visokonaponske elektrode u koracima od 1 mm.

Spomenuti razmak danas se mjeri najnovijim digitaliziranim laserskim uređajima s mjernom nesigurnošću od 6 nm, odnosno 0,12 ppm. Budući da se razmak $z_g - z_d$ nalazi pod korijenom u izrazu za određivanje napona (7.4), njegov će udio u nesigurnosti određivanja napona iznositi $0,12/2 = 0,06$ ppm. Razumljivo je da se pri računanju tog razmaka internim uređajem, baždarenim laserskim interferometrom, neće dobiti bolja mjerna nesigurnost. Međutim, ako se želi da se ona zbog toga ne pogorša i ako se želi izbjeći mnogostruko ponavljanje pokusa, treba da razlučivanje i ponovljivost internog uređaja budu reda jednog nanometra. Zbog istih razloga ne smije utjecaj temperature i eventualnih horizontalnih pomaka premašiti također jedan nanometar. Ispunjenje tako oštarih zahtjeva poželjno je i zato što se pomoću tog pretvor-

nika, u povratnoj vezi s hidrauličkim uređajem za vertikalno pomicanje visokonaponske elektrode, osigurava stalnost njihova vertikalnog položaja pri mjerenju kapaciteta. Da bi se udovoljilo tim zahtjevima, potrebno je da najmanji mjerni opseg pokazanog instrumenta bude npr. 50 nm. Iz praktičnih razloga dobro je da se pomoću preklopke mogu ti opsezi proširiti 10, odnosno 100 puta.

8.1.4. Mjerenje vertikalnih pomaka dijelova vage

Razmak $z_g - z_d$ u izrazu (7.4) označava relativni vertikalni pomak visokonaponske elektrode prema ovješenoj elektrodi, pa se samo po sebi nameće rješenje da se vertikalni pomak visokonaponske elektrode i otklon ovještene elektrode mjere prema zajedničkoj referentnoj ravlini. Međutim, iz konstrukcijskih i praktičnih razloga prikladnije je učvrstiti laserski interferometar na poklopac unutrašnjeg kućišta, koje je robustno i vrlo dobro termostatirano, što osigurava njegov stalan razmak prema referentnoj ravlini. Ipak, da bi se omogućio uvid i u najmanje eventualne pomake između njih i dobila veća pouzdanost u mjerenju razmaka $z_g - z_d$, služi posebni kapacitivni pretvornik koji mjeri pomake između referentne ravnine i poklopca unutrašnjeg kućišta. Poželjno je da višesatna stabilnost nultog položaja i razlučivanje i tog pretvornika budu reda jednog nanometra.

Interni pretvornik za mjerenje pomaka $z_g - z_d$ učvršćen je na tijelo koje služi za vertikalno vođenje visokonaponskih elektroda i daje se fino horizontalno pomicati da bi se ostvario centrični položaj elektroda. Ni najpreciznijim mehaničkim rješenjima ne mogu se pri tome izbjeći vertikalni pomaci tog tijela od desetak nanometara pa se i tu kapacitivnim pretvornikom mjere njegovi vertikalni pomaci prema referentnoj ravlini.

Vertikalni pomaci izmjereni pomoću ta dva pretvornika pribrajaju se pomaku izmjerenom pretvornikom opisanim u prethodnom poglavlju pa se postavljaju podjednaki zahtjevi na njihovu mjernu nesigurnost. Zato su za sva tri pretvornika odabrani jednaki mjerni opsezi.

8.1.5. Kapacitivna libela

Naginjanje visokonaponskih elektroda pri njihovu vertikalnom pomicanju uzrokuje, kako se to vidi iz izraza (7.38), pogrešku u određivanju napona. Ona je zanemiva ako ti nagibi ne premašuju 10 mikroradijana, pa za provjeru toga treba na pomično postolje ugraditi libelu koja će omogućiti daljinsko mjerenje njegova nagiba u poprečnom i uzdužnom smjeru s mjernom nesigurnošću od nekoliko mikroradijana. Zbog toga je odabran mjerni opseg njezina pokaznog instrumenta od $\pm 100 \mu\text{rad}$, s time što se njegov nulti položaj ugađa potencijetrom s tisuću podjeljaka unutar $\pm 10^{-3}$ radijana.

8.1.6. Kapacitivni manometar

Pri određivanju napona prema izrazu (7.4) valja poznavati gustoću plina ρ_a u kojem se nalazi naponska vaga. Pogreška u tome uzrokuje relativnu pogrešku napona:

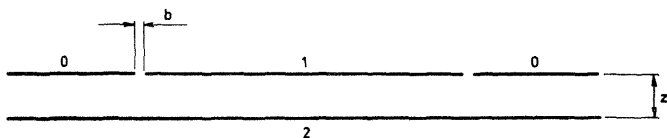
$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\varrho_a}{2 \varrho_m (1 - \varrho_a/\varrho_m)} \cdot \frac{\Delta \varrho_a}{\varrho_a} \quad (8.4)$$

Tako, želimo li da relativna pogreška u određivanju napona zbog netočnog poznavanja gustoće plina bude $2 \cdot 10^{-8}$, onda je uz $\varrho_a = 1,2 \text{ kg/m}^3$ i $\varrho_m = 7900 \text{ kg/m}^3$ potrebno da $(\Delta \varrho_a/\varrho_a)$ bude manje od 0,026 %. Budući da je gustoća plina razmjerna tlaku, treba da pogreška u mjerenju tlaka bude manja od 0,026 %, što je vrlo težak zahtjev. Tlak p_a plina u vagi bit će samo nešto veći od vanjskoga tlaka, pa kako je vaga potpuno zabrtvljena i termostatisirana, dozvoljen je uski mjerni opseg manometra. Odabran je mjerni opseg pokaznog instrumenta od ± 1 milibara s tim da se njegov multi položaj ugađa pomoću potenciometra od tisuću podjeljaka unutar ± 10 milibara. Pomoću preklapke dobiva se još ± 5 stepeni po 10 mbara.

8.2. KAPACITIVNI PRETVORNICI POMAKA S PROMJENLJIVIM RAZMAKOM IZMEĐU JEDNE NEPOMIČNE I JEDNE POMIČNE ELEKTRODE

8.2.1. Ovisnost kapaciteta o razmaku između elektroda

Radi dobivanja linearnih odnosa obično se jedna elektroda, najčešće nepomična, izvodi sa zaštitnim prstenom (sl. 8.2). Tad se kod kružnog



Sl. 8.2. 1 — nepomična elektroda, 2 — pomična elektroda, 0 — zaštitni prsten

oblika elektroda može kapacitet između elektroda 1 i 2 izračunati pomoću izraza (4.10) ili (4.11). Ako je elektroda 1 pravokutnog ili bilo kojega drugog oblika, kapacitet između elektroda 1 i 2 za $b < z$ iznosi:

$$C \approx \frac{\varepsilon (S + S_s/2)}{z} \left(1 - \frac{S_s}{S + S_s/2} \cdot \frac{b}{4 \pi z} \right). \quad (8.5)$$

Pri tome je S_s površina izolacijske staze širine b i ona je mnogo manja od površine elektrode S . Iz izraza (8.5) uz dopuštena zanemarenja dobiva se:

$$z = \frac{\varepsilon (S + S_s/2)}{C} - \frac{S_s}{S + S_s/2} \cdot \frac{b}{4 \pi}. \quad (8.6)$$

Izolacijska staza može se izvesti u širini b od 0,1 do 0,2 mm pa nije teško ostvariti da površina S_s bude sto ili više puta manja od površine elektrode S . Tad je drugi član u izrazu (8.6) manji od jednog mikrometra.

8.2.2. Linearnost

Da bi se dobio što jednostavniji mjerni sklop, poželjna je linearna ovisnost kapaciteta o pomaku z . Kako se on nalazi u nazivniku izraza (8.5), bit će tom zahtjevu to bolje udovoljeno što je pomak Δz manji od razmaka z . Razvojem u red izraza (8.5) dobiva se:

$$\Delta C = -\frac{C_0}{1-k} \left[\frac{\Delta z}{z} (1-2k) - \left(\frac{\Delta z}{z} \right)^2 (1-3k) + \left(\frac{\Delta z}{z} \right)^3 (1-4k) - \dots \right] \approx -C_0 \frac{\Delta z}{z} (1-k), \quad (8.7)$$

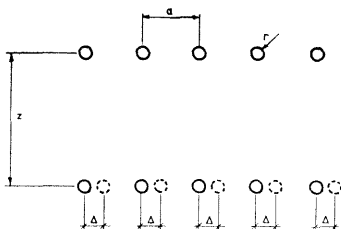
pri čemu je C_0 kapacitet između elektroda kod $\Delta z = 0$, a k omjer $S_s b / (S + S_s/2) 4\pi z$. Ako se koristi samo prvim članom izraza, odnosno pretpostavi linearna ovisnost između ΔC i Δz , nastaje pogreška:

$$p \approx \frac{\Delta z}{z} (1-k) \approx \frac{\Delta z}{z}. \quad (8.8)$$

Iz predočenih izraza uočava se da je za $\Delta z \ll z$ relativna promjena kapaciteta razmjerna relativnoj promjeni razmaka između elektroda. Tako, ako je $z = 1$ mm, onda pomak $\Delta z = 1$ nm uzrokuje relativnu promjenu kapaciteta od 1 ppm, što se već sigurno može izmjeriti kod kapaciteta od nekoliko pikofarada. Zbog toga je ovakav raspored elektroda posebno prikladan za mjerenje vrlo malih pomaka, a tad će odstupanje od linearnosti prema izrazu (8.8) biti potpuno zanemarivo.

8.2.3. Utjecaj horizontalnih pomaka kod hrapavih i valovitih elektroda

Kod savršeno ravnih elektroda u rasporedu prema slici 8.2. horizontalni pomak, koji je višestruko manji od širine zaštitne elektrode, ne bi izazvao nikakvu promjenu kapaciteta između elektroda 1 i 2. Međutim, ako su elektrode hrapave, valovite ili međusobno nagnute, može horizontalni pomak utjecati na promjenu kapaciteta. Pretpostavimo najprije da su obje elektrode valovite i da se ispupčenja pojavljuju u jednakim malim razmacima a . U približnom računu vrhovi se tih ispup-



Sl. 8.3.

čenja nadomještaju valjcima (sl. 8.3) i kapacitet između elektroda izračunava se služeći se izrazom za kapacitet između dviju rešetki, koji po jedinici površine iznosi:

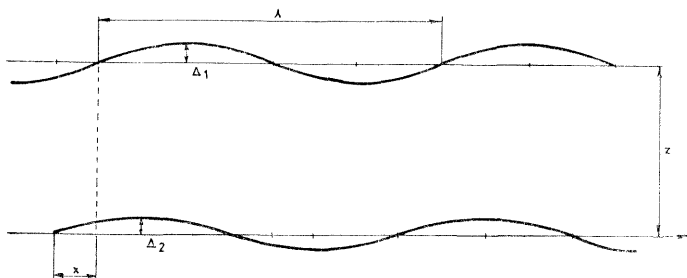
$$C_1 = \pi \epsilon \left/ \left[1 n \frac{z}{r} + 1 n \frac{\text{sh}(\pi z/a)}{\pi z/a} \right] \right. a. \quad (8.9)$$

Za $r = a/2$ i $z \gg a$ dobiva se $C_1 = \epsilon/z$, što je poznati izraz za jedinični kapacitet pločastog kondenzatora s razmakom z između elektroda. Pomakne li se jedna rešetka horizontalno za Δ , jedinični će kapacitet biti:

$$C_{1\Delta} = \pi \epsilon \left/ \left\{ 1 n \frac{\sqrt{z^2 + \Delta^2}}{r} + \frac{\infty}{1} \frac{1}{2} 1 n \left[\left(1 + \frac{\Delta}{n a} \right)^2 + \left(\frac{z}{n a} \right)^2 \right] \left[\left(1 - \frac{\Delta}{n a} \right)^2 + \left(\frac{z}{n a} \right)^2 \right] \right\} \right. a \quad (8.10)$$

Relativne promjene kapaciteta $\Delta C_{1r} = (C_{1\Delta} - C_1)/C_1$, zbog horizontalnih pomaka za $z = 1$ mm i a do 0,05 mm, izračunate pomoću izraza (8.9) i (8.10), neznatne su i ne prelaze 0,1 ppm. Tome odgovara vertikalni pomak od samo 0,1 nm, što je potpuno zanemarivo. Možemo pretpostaviti da bi se podjednake promjene kapaciteta dobile ako bi elektrode imale ispupčenja svakih 0,05 mm i ako bi udubljenja bila otprilike jednako tolika, što nije teško ostvariti jer se to već postiže s razredom hrapavosti 10 prema JUS M.A1.1.026-1965. Radi veće sigurnosti ipak je bolje da površine elektroda budu razreda hrapavosti od 2 do 4 (fino brušene i polirane).

Za elektrode s blago valovitim površinama i valnom duljinom mnogo većom od razmaka između elektroda z , nije prikladan prethodni proračun. Tu je bolje njihove površine prikazati pomoću sinusoida (sl. 8.4). Ako su njihove amplitude Δ_1 i Δ_2 mnogo manje od razmaka z , odnosno $a_1 = \Delta_1/z$ i $a_2 = \Delta_2/z$ mnogo manji od jedan, kapacitet između elektroda približno iznosi:



Sl. 8.4.

$$C = C_0 \left(1 + \frac{1}{2} \partial_1^2 + \frac{1}{2} \partial_2^2 - \partial_1 \partial_2 \cos 2\pi x/\lambda \right). \quad (8.11)$$

Pri tome je C_0 kapacitet kondenzatora s ravnim elektrodama, a x pomak između sinusoida na gornjoj i donjoj elektrodi. Tu će horizontalni pomak Δ uzrokovati relativnu promjenu kapaciteta:

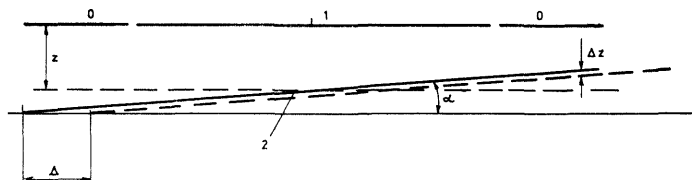
$$\Delta C_r = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \partial_1 \partial_2 \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} x \right). \quad (8.12)$$

Ona je najveća kad je $\sin(2\pi x/\lambda) = 1$ i iznosi:

$$\Delta C_r = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} \partial_1 \partial_2. \quad (8.13)$$

Ako se i ovdje zahtijeva da horizontalni pomak od 0,01 mm ne izazove relativnu promjenu kapaciteta veću od one koju uzrokuje vertikalni pomak od 1 nm, tad je uz $z = 1$ mm potrebno da ΔC_r bude manje od $1 \cdot 10^{-6}$, odnosno $\partial_1 \partial_2 < 10^{-4} \lambda/2\pi$. Tome će biti udovoljeno ako je npr. $\partial_1 = \partial_2 = 0,01$ ($\Delta_1 = \Delta_2 = 0,01$ mm) i $\lambda < 6,28$ mm, što se postiže kad je barem jedna elektroda fino brušena.

8.2.4. Utjecaj horizontalnih pomaka kod nagnutih elektroda



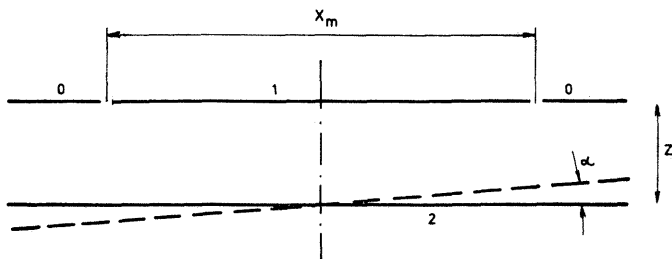
Sl. 8.5. Promjena kapaciteta zbog horizontalnog pomaka donje nagnute elektrode za Δ

Pri horizontalnom pomicanju za Δ donje naponske elektrode 2 (sl. 8.5), promijenit će se srednji razmak z između nje i mjerne elektrode za $\Delta z = \Delta \operatorname{tg} \alpha$. Tu će relativna promjena kapaciteta biti:

$$\Delta C_r = - \frac{\Delta \operatorname{tg} \alpha}{z}. \quad (8.14)$$

Jednaku relativnu promjenu kapaciteta izazvao bi vertikalni pomak iznosa $-\Delta \operatorname{tg} \alpha$, pa uz $\Delta = 0,01$ mm treba da $\operatorname{tg} \alpha$ bude manje od 10^{-4} ako se želi da se time ne uzrokuje veća pogreška od 1 nm. Zbog toga treba finim brušenjem obraditi površinu elektrode 2 i pomoću osjetljive libele dovesti je u što točniji horizontalni položaj. Dosadašnja naša iskustva pokazuju da se takvim postupkom $\operatorname{tg} \alpha$ smanjuje ispod 10^{-5} .

8.2.5. Utjecaj nagninjanja pomične elektrode

Sl. 8.6. Promjena kapaciteta zbog nagninjanja jedne elektrode za kut α

Ako se kod kondenzatora s pravokutnim elektrodama jedna elektroda nagne za vrlo mali kut α (sl. 8.6), promijenit će se njihov kapacitet, uz zanemarenje rubnih efekata, od C_0 na C :

$$C \approx C_0 \left(1 + \frac{\alpha^2 x_m^2}{12 z^2} \right). \quad (8.15)$$

Kod kružnih elektroda bit će ($x_m = D$):

$$C = C_0 \left(1 + \frac{\alpha^2 D^2}{16 z^2} \right). \quad (8.16)$$

Takvu promjenu kapaciteta izazvao bi kod pravokutnih elektroda vertikalni pomak $\Delta y = \alpha^2 x_m^2 / 12 z$, a kod kružnih vertikalni pomak $\Delta z = D^2 \alpha^2 / 16 z$. Primjerice, za $x_m = 100$ mm i $z = 1$ mm nagninjanje pomične elektrode izazvalo bi pogrešku u mjerenju vertikalnog pomaka od 1 nm ako je $\alpha = \sqrt{12 z \Delta z / x_m^2} = 3,5 \cdot 10^{-5}$, što jer preciznom izradom ostvarivo.

8.2.6. Elektrostatske sile

Uz zanemarenje rubnih efekata elektrostatska će sila između elektroda iznositi:

$$F_p = \frac{1}{2} U^2 \frac{\epsilon S}{z^2} = \frac{1}{2} U^2 \frac{C}{z}. \quad (8.17)$$

Kod pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka ovještene elektrode ne smije prema izrazu (8.3) ta sila prekoračiti $2 \mu\text{N}$. Odaberemo li napon napajanja $U = 7$ V, razmak $z = 1$ mm i $F_0 = 1 \mu\text{N}$, onda iz izraza (8.17) izlazi kapacitet pretvornika $C = 2 z F_0 / U^2 \approx 40$ pF. Struja kroz kapacitet pretvornika pri frekvenciji $f = 10\,000$ Hz tad iznosi: $U C \omega =$

$= 7 \cdot 40 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \pi \cdot 10^4 = 17,6 \mu\text{A}$, pa kako želimo uočiti promjene otklona ovještene elektrode od otprilike 1 nm, odnosno $\Delta z/z = 10^{-6}$, potrebno je da osjetljivost indikatora bude oko 200 pA po dijelu skale. To se izborom vrlo osjetljivih i selektivnih elektroničkih sklopova može danas ostvariti.

Kod kapacitivnih pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka tijela vage i vertikalnih pomaka poklopca kućišta prema referentnoj ravni praktički nije ograničena sila F_p zbog velike mehaničke krutosti mjernih predmeta.

8.2.7. Referentni kondenzator

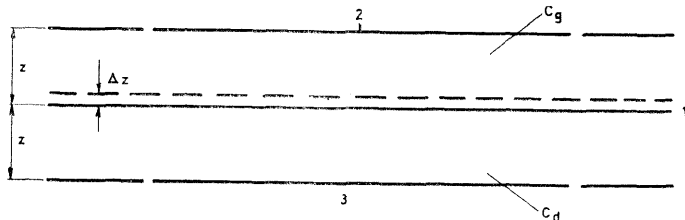
Prema odjeljku 8.2.2. pomak od 1 nm uzrokuje relativnu promjenu kapaciteta reda 1 ppm. Tako malu promjenu kapaciteta moguće je izmjeriti uspoređujući kapacitet pretvornika s kapacitetom pouzdanoga referentnog kondenzatora. Pri tome stalnost njegova kapaciteta barem u toku jednog ciklusa mjerenja mora očito biti bolja od 1 ppm. To se najjednostavnije ostvaruje ako je i referentni kondenzator smješten u unutrašnjem kućištu naponske vage, koje je izvrsno termostatirano i ispunjeno suhim dušikom. Još je bolje kad je nepomična elektroda pretvornika ujedno i elektroda referentnog kondenzator.

8.3. KAPACITIVNI PRETVORNIK POMAKA S PROMJENLJIVIM RAZMAKOM IZMEĐU SREDNJE I DVIJU VANJSKIH ELEKTRODA

8.3.1. Ovisnost razlike kapaciteta o pomaku

Kod ovog pretvornika pomična pločasta elektroda nalazi se u sredini između dviju nepomičnih elektroda (sl. 8.7). Razliku kapaciteta između gornje i pomične elektrode C_g i kapaciteta između donje i pomične elektrode C_d dobivamo služeći se izrazima i oznakama iz odjeljka 8.2.2:

$$C_g - C_d = \frac{2 C_g}{1 - k} \left[\frac{\Delta z}{z} (1 - 2k) + \left(\frac{\Delta z}{z} \right)^3 (1 - 4k) + \dots \right] \approx 2 C_g \frac{\Delta z}{z}. \quad (8.18)$$



Sl. 8. 7. Kapacitivni pretvornik s pomičnom elektrodom 1 između gornje elektrode

Vidi se da su ovdje promjene kapaciteta dva puta veće, a bolja je i linearnost. Ako se koristi samo prvim članom izraza, odnosno pretpostavi linearna ovisnost između $C_k - C_d$ i pomaka Δz , nastaje pogreška:

$$p \approx -\left(\frac{\Delta z}{z}\right)^2 (1 - 2k). \quad (8.19)$$

Ako je $(\Delta z/z) = 0,01$, iznositi će ovdje ta pogreška 0,01 %, dok se prema izrazu (8.8) dobiva 1 %.

8.3.2. Utjecaj horizontalnih pomaka i naginjanja

Redovno se ispupčenja hrapavost i valovitost na gornjoj i donjoj površini pomične elektrode neće tako podudarati da bi se njihovo djelovanje na kapacitet između elektroda međusobno poništilo. Zato možemo uzeti da će oni podjednako utjecati kao i kod pretvornika s jednom nepomičnom elektrodom (odjeljak 8.2.3). Uz pomičnu elektrodu nagnutu za kut α povećat će se zbog horizontalnog pomaka Δ kapacitet C_k prema izrazu (8.14) za $C_k \Delta \operatorname{tg} \alpha / z$, a kapacitet C_d smanjit će se za isti iznos. Zbog toga će se razlika $C_k - C_d$ promijeniti za $2 C_k \Delta \operatorname{tg} \alpha / z$, što će prema izrazu (8.18) uzrokovati pogrešku u mjerenju vertikalnog pomaka u iznosu $p = \Delta \operatorname{tg} \alpha$, dakle jednako kao i kod pretvornika s jednom nepomičnom elektrodom.

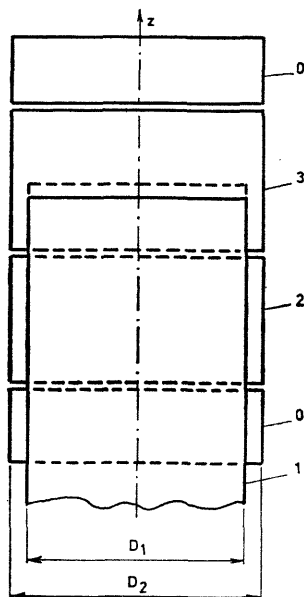
8.3.3. Elektrostatske sile

Kad se pomična elektroda nalazi točno u sredini između dviju nepomičnih elektroda, rezultirajuća elektrostatska sila ravna je nuli. Tek kad se one odmaknu od tog položaja za Δz , pojavljuje se prema izrazu (4.54) elektrostatska sila iznosa: $F = U^2 C \Delta z / z^2$. Za $U = 7$ V, $C = 10$ pF, $z = 1$ mm i $\Delta z = 100$ nm dobiva se $F = 49$ pN, dakle mnogo manje nego u primjeru iz odjeljka 8.2.6.

8.3.4. Usporedba s pretvornicima s jednom nepomičnom elektrodom

Iz ovih razmatranja uočava se da pretvornik s dvije nepomične elektrode ima dva puta veću osjetljivost, bolju linearnost i stvara vrlo male elektrostatske sile, a na njegovu točnost podjednako utječe hrapavost, valovitost i naginjanje pomične elektrode kao i kod pretvornika s jednom nepomičnom elektrodom. Osim toga, kod njega nije potreban referentni kondenzator pa ćemo ga upotrijebiti svugdje gdje to ne uzrokuje veće izvedbene teškoće. Takvi su pretvornici kod naponske vage upotrijebljeni za mjerenje horizontalnih pomaka ovješene elektrode i tijela naponske vage. Iz konstrukcijskih razloga mjere se vertikalni pomaci ovješene elektrode, tijela vage i poklopca unutrašnjeg kućišta pomoću pretvornika s jednom nepomičnom elektrodom.

8.4. KAPACITIVNI PRETVORNICI POMAKA S PROMJENLJIVOM DJELUJUĆOM POVRŠINOM IZMEĐU ELEKTRODA



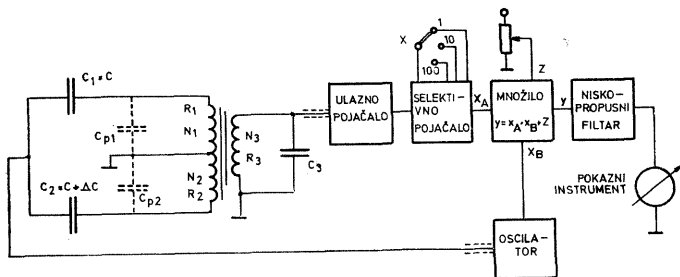
Sl. 8.8. Kapacitivni pretvornik s promjenljivom površinom između elektroda: 1 — pomična elektroda; 2 — nepomična elektroda referentnog kondenzatora; 3 — nepomična elektroda kondenzatora s promjenom kapaciteta razmjernom vertikalnom pomaku; 0 — zaštitna elektroda

Primjenjuju se izvedbe s pločastim ili cilindričnim elektrodama kao na slici 8.8. Tu je kapacitet između pomične elektrode 1 i nepomične elektrode 2 stalan te služi kao referentni kondenzator, a kapacitet je između pomične elektrode 1 i nepomične elektrode 3 razmjernan vertikalnom pomaku z .

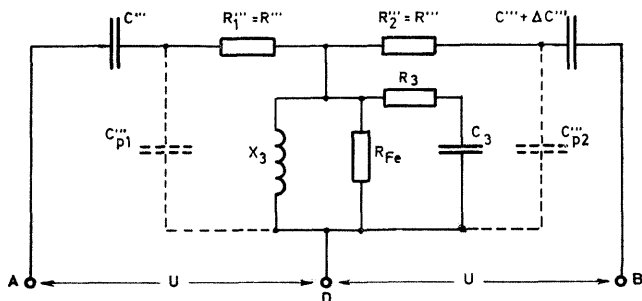
8.5. MJERNI SKLOP

Mjerni sklop treba da omogući pouzdano mjerenje vrlo malih odstupanja dvaju kapaciteta od omjera 1 : 1. Za to su posebno prikladni sklopovi koji na ulazu imaju diferencijalni transformator s tercijarnim namotom (sl. 8.9). Prednost takva ulaza u usporedbi s drugim mogućim rješenjem, a to su razne varijante Wheatstoneova mosta za izmjenične struje, lakše je uočljiva ako se razmotri njegova nadomjesna shema (sl. 8.10). Tu se referentni omjer 1 : 1 ne ostvaruje omjerom impedancija

kao kod mosnog spoja, već omjerom broja zavoja, što osigurava neusporedivo veću vremensku nepromjenljivost. Osim toga, time se smanjuje iznos impedancije na koju je priključena indikatorska dijagonala što ovdje iznosi $1/2 C \omega j$



Sl. 8.9. Blok-shema kapacitivnog pretvornika



Sl. 8.10. Nadomjesna shema diferencijalnog transformatora s tercijskim namotom (''' oznaka za veličine reducirane na tercijsnu stranu)

Također je povoljno to što je sredina primarnog namota transformatora ili uzemljenja ili je na punom naponu oscilatora ako je uzemljeno spojište kapaciteta C_1 i C_2 . To je s obzirom na okapanje povoljnije nego u mosnom spoju gdje indikatorska grana ne može biti izravno spojena ni s jednim krajem oscilatora.

U početnim razmatranjima zanemarit ćemo utjecaj kapaciteta prema oklopu, označenih za C_{p1} , C_{p2} i C_3 , i utjecaj ulazne impedancije električnog sklopa. Tada se, nakon uređenja, za napon na izlazu iz tercijskog namota dobiva:

$$U_{CD} = U \frac{AC}{2C} \frac{N_3}{N_1} \left/ \left(1 - \frac{X_C'''}{2X_3} - \frac{X_C'''}{2R_{Fe}} j - \frac{R'''}{2X_3} j + \frac{R'''}{2R_{Fe}} \right) \right. \quad (8.20)$$

Postigne li se rezonancija između mjerenih kapaciteta i induktiviteta namota ($1 - X_C'''/2X_3 + R'''/2R_{Fe} \approx 1 - X_C'''/2X_3 = 0$), bit će:

$$U_{CD} = \frac{U \frac{AC}{C} \frac{N_1}{N_3} C \omega R_{Fe} j}{1 + RC \omega / \tan \delta} \approx U \frac{AC}{C} \frac{N_1}{N_3} C \omega R_{Fe} j, \quad (8.21)$$

a tu je $\tan \delta$ faktor gubitka u jezgri pri malim indukcijama. Otpor R_{Fe} izražava gubitke u jezgri i on se ovdje zbog vrlo malih indukcija može za feritne jezgre odrediti iz izraza:

$$R_{Fe} = \mu_0 \mu_i \omega N_3^2 S_e / l_e \tan \delta = A_L N_3^2 \omega / \tan \delta. \quad (8.22)$$

Pri tome je μ_i početna permeabilnost, S_e/l_e omjer efektivnog presjeka i efektivne duljine magnetskih silnica, koji ovisno o veličini jezgre iznosi od $1 \cdot 10^{-3}$ do $4 \cdot 10^{-3}$ m, a A_L je uobičajena oznaka za induktivitet feritne jezgre s jednim zavojem. Kod frekvencije reda 10 kHz omjer $\tan \delta / \mu_i$ iznosi od 1 do $3 \cdot 10^{-6}$. Uvrštavanjem u izraz (8.21) nastaje:

$$\begin{aligned} U_{CD} &= \frac{AC}{C} U N_1 N_3 C \omega^2 \mu_0 \mu_i S_e / l_e \tan \delta = \\ &= \frac{AC}{C} U N_1 N_3 C \omega^2 A_L / \tan \delta = \frac{AC}{C} U k. \end{aligned} \quad (8.23)$$

Napon U_{CD} razmjernan je produktu broja zavoja $N_1 N_3$ pa se uz zadan ukupan broj zavoja koji se dadu smjestiti u prozor jezgre dobiva maksimalna vrijednost tog produkta kod $N_3 = 2 N_1$.

Na osnovi opisane upotrebe pojave rezonancije i prilagođenja impedancija postiže se faktor k u izrazu (8.23) čak znatno veći od jedinice. Tako za $N_3 = 2 N_1 = 1000$ zavoja, $C = 10$ pF, $\tan \delta / \mu_i = 2 \cdot 10^{-6}$, $S_e/l_e = 2 \cdot 10^{-3}$ i $\omega = 2 \pi \cdot 10\,000$ izlazi $k = 24,8$. Izraz (8.23) dobiven je uz pretpostavku da je ostvarena rezonancija, odnosno da je $X_3 \approx X_C'''/2$. Budući da je $X_3 = A_L N_3^2 \omega$, a $X_C''' = N_3^2 / N_1^2 C \omega$, odnosno $A_L = 1/2 C N_1^2 \omega^2$, to će ovdje biti $A_L = 50,7 \cdot 10^{-6}$, što nije moguće postići sa standardnim feritnim jezgrama, kod kojih A_L ne premašuje $20 \cdot 10^{-6}$ H. Tu nam može pomoći kapacitet C_3 , koji se i onako ne da izbjeći jer je tercijarni namot transformatora povezan s elektroničkim sklopom preko oklopljenog kabela koji ima kapacitet i do 100 pF po metru duljine. Ako je omjer $X_{C3}/X_3 = \nu$, onda reaktancija njihove paralelne kombinacije X_p iznosi: $j X_3 \nu / (\nu - 1)$, pa će npr. za $\nu = 1,2$ biti: $X_p = 6 X_3$. Tad je potrebno šest puta manje A_L pa je u našem primjeru $A_L = 8,45 \cdot 10^{-6}$ H, što je već ostvarivo sa standardnim feritnim jezgrama. U ovom primjeru dobivamo $C_3 = 1/\nu A_L N_3^2 \omega^2 = 25,0$ pF. Međutim, kad su pretvornici udaljeni nekoliko metara od elektroničkih sklopova, bit će kapaci-

citet kabela i nekoliko stotina pikofarada, a ni kapaciteti na primarnoj strani C_{1p} i C_{p2} nisu neznatni pa za dobivanje rezonancije prema dosad iznesenome valja ostvariti ovaj omjer broja zavoja:

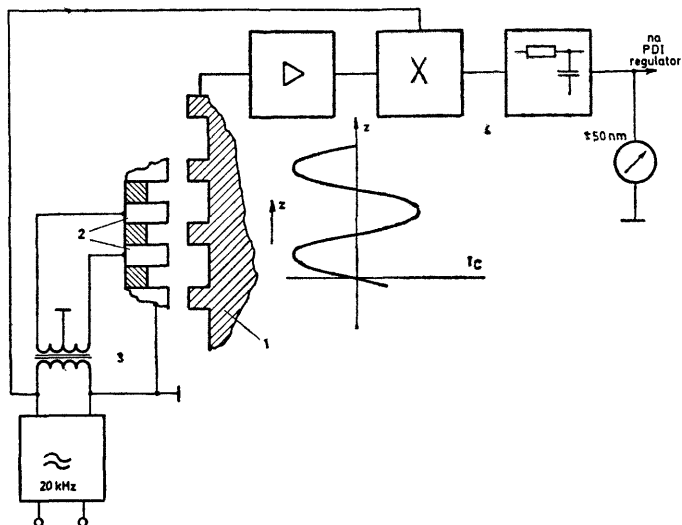
$$\left(\frac{N_1}{N_3}\right)^2 = \frac{C_3(\nu - 1)}{2C - (C_{p1} + C_{p2}) \cdot (\nu - 1)} \quad (8.24)$$

Tako za $C = 10$ pF, $C_3 = 400$ pF, $C_{p1} = C_{p2} = 50$ pF i $\nu = 1,1$ izlazi $N_1/N_3 = 2$, pa ako je ukupan broj zavoja N kao i u prethodnom primjeru ($N = 2000$), bit će ovdje umnožak $N_1 N_3 = 800 \cdot 400 = N^2/10$, a u prethodnom smo primjeru dobili $1000 \cdot 500 = N^2/8$. Zbog toga će ovdje konstanta k biti u omjeru $8/10$ manja, a time i napon U_{ep} . Veći produkt $N_1 N_3$ dobio bi se manjim omjerom ν , no time se smanjuje stabilnost sklopa pa je za izbor optimalnog omjera potrebna detaljnija analiza [1/5].

U dosadašnjim razmatranjima zanemaren je utjecaj ulazne impedancije elektroničkog sklopa. Ako se upotrijebe kvalitetna operacijska pojačala s naponskim ulazom, dobiva se ulazna impedancija mnogostruko veća od otpora R_{Fe} pa je zanemarivanje njezina utjecaja potpuno opravdano. Budući da otpor R_{Fe} u našim primjerima iznosi nekoliko megaoma, treba odabrati pojačala s malim strujnim šumom, npr. takva kod kojih je efektivna vrijednost šuma $0,01$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$, a efektivna vrijednost naponskog šuma 15 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Tad će efektivna vrijednost napona šuma na izlazu iz pojačala iznositi nekoliko mikrovolt, što je praktički zanemarivo prema naponu od nekoliko stotina mikrovolt koji pojačalo daje već pri pomaku od samo 1 nm. No uz izvrsna svojstva novijih operacijskih pojačala dobiva se povoljno rješenje i sa strujnim ulazom operacijskog pojačala. Koristeći se i ovdje pojavom rezonancije prema izrazima (8.21) i (8.22) izlazi da struja koja ulazi u pojačalo iznosi: $I_p = U \Delta C \omega N_1/N_3$. Tu je povoljnije odabrati veći omjer zavoja N_1/N_3 , npr. 100 ili 200 , i upotrijebiti operacijska pojačala s malim naponskim šumom, kojima efektivna vrijednost naponskog šuma iznosi npr. 4 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$. Tad se jednako tako dobiva mogućnost pouzdanog mjerenja nanometarskih pomaka.

8.6. KAPACITIVNI PRETVORNIK ZA MJERENJE VERTIKALNIH POMAKA VISOKONAPONSKIH ELEKTRODA

Vrlo teškim zahtjevima koji se postavljaju pri mjerenju vertikalnih pomaka visokonaponske elektrode od 0 do 51 mm (odjeljak 8.1.3) praktički nije moguće udovoljiti pomoću dosad opisanih kapacitivnih pretvornika. Nakon dugotrajnih istraživanja i eksperimentiranja pronađena je posebna izvedba pretvornika koja je u potpunosti ispunila postavljene zahtjeve. Njezina principijelna shema prikazana je na slici 8.11. Nazubljena cilindrična elektroda od nemagnetskog čelika 1 mehanički je povezana s visokonaponskom elektrodom vage i prolazi između prstenastih elektroda 2 priključenih na sekundarni namot transformatora 3 s uzemljenom sredinom. Kad se pojedini zub elektrode 1 nađe točno u sredini između elektroda 2 , ne teče kroz nju kapacitivna struja, a

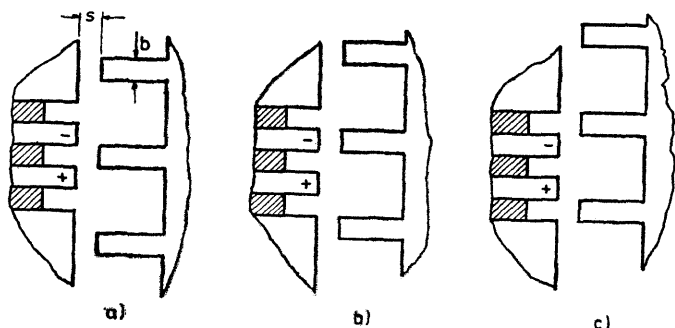


Sl. 8.11. Principijelna shema kapacitivnog pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka visokonaponske elektrode: 1 — nazubljena cilindrična elektroda; 2 — prstenaste elektrode; 3 — transformator za napajanje; 4 — indikator kapacitivnih struja

kad se on nađe na istoj visini s jednom od tih elektroda, bit će kapacitivne struje najveće. Ti karakteristični položaji između elektroda predloženi su na slici 8.12. Pomoću vrlo osjetljivog indikatora kapacitivnih struja 4 moći će se vrlo pouzdano ustanoviti položaj nazubljene elektrode u kojem nema kapacitivnih struja. Dimenzije elektroda tako su odabrane da je vertikalni razmak između nultih položaja upravo 1 mm. Da bi se ostvarila očekivana mjerna nesigurnost, trebalo je voditi računa o mnoštvu utjecajnih faktora. Ovdje će se redom iznijeti samo neki od njih.

8.6.1. Održavanje stalnih dimenzija i površinskog stanja nazubljene cilindrične elektrode

Nazubljena je elektroda izrađena od kvalitetnoga nemagnetskog i nerđajućeg čelika. Posebnim postupkom obrade u alatnici Tvornice telekomunikacijskih uređaja »Nikola Tesla«, Zagreb obrađeni su zubi nazubljene elektrode unutar tolerancije od $\pm 1 \mu\text{m}$. To su praktički krajnje mogućnosti koje se danas ostvaruju vrhunskom strojnom obradom. Daljnje povećanje točnosti moguće je jedino izravnim baždare-



Sl. 8.12. Karakteristični položaji nazubljene elektrode: a) i c) položaji u kojima nema kapacitivnih struja u nazubljenoj elektrodi; b) položaj u kojem su kapacitivne struje maksimalne

njem cijelog uređaja pomoću laserskog interferometra. Tad bi se primjenom njihovih najboljih izvedbi danas postigla mjerna nesigurnost manja od 10 nm. Da bi se mogli što dulje koristiti podacima takva baždarenja, moraju karakteristike kapacitivnog pretvornika biti što stalnije. Njihove promjene mogu prije svega uzrokovati promjene temperature u unutrašnjosti vage i taloženje nečistoća na površini elektroda.

Temperaturni koeficijent elektroda iznosi 11 ppm/K, a temperatura unutrašnjosti vage održava se znatno ispod ± 1 mK, pa se zbog toga razmak između krajnjih zubi nazubljene elektrode ne mijenja više od $51 \cdot 10^6 \cdot 11 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 0,56$ nm, što je zanemarivo.

Prije zatvaranja vage čiste se svi dijelovi sredstvima za čišćenje i ultrazvukom. Nakon zatvaranja unutrašnjost se najprije vakuumira, a zatim se puni suhim dušikom preko filtra za otklanjanje vlage i mehaničkih nečistoća. Osim toga su svi dijelovi u unutrašnjosti vage vrlo fino obrađeni i polirani, nisu upotrijebljena nikakva sredstva za podmazivanje koja bi mogla isparavati, pa je mogućnost stvaranja naslaga nečistoća na površinama ovih i svih drugih elektroda svedena na najmanju moguću mjeru. To je razlog da u dosadašnjim mjernjima nisu uočene promjene karakteristika ovog pretvornika.

8.6.2. Utjecaj međusobnog odstupanja vertikalna nazubljene i visokonaponskih elektroda

Kako se to zapaža iz slike 3.2, vertikalna simetrala nazubljene elektrode poklapa se s vertikalnom simetralom visokonaponskih elektroda. Ipak, zbog mehaničkih nesavršenosti, pretpostavimo da su te simetrale međusobno razmaknute u poprečnom smjeru za Δx , a u uzdužnome za Δy , te da je pri podizanju visokonaponskih elektroda iz donjega u gornji položaj došlo do njihova zakretanja u poprečnom smjeru za α_g —

— a_d i u uzdužnom smjeru za $\beta_g - \beta_d$. Tad relativna pogreška u mjerenju pomaka $z_g - z_d$ iznosi:

$$p = \frac{1}{z_g - z_d} [(a_g - a_d) \Delta x + (\beta_g - \beta_d) \Delta y] \quad (8.25)$$

Tako se za $a_g - a_d = \beta_g - \beta_d = 10^{-5}$ i $\Delta x = \Delta y = 0,1$ mm dobiva 0,039 ppm ili, svedeno na relativnu pogrešku u mjerenju napona, $0,039/2 = 0,02$ ppm. Stvarne su vrijednosti manje od ovdje pretpostavljenih pa je pogreška zanemariva.

8.6.3. Utjecaj temperaturnih produljenja za vrijeme postupka vaganja

U izrazu za izračunavanje napona (7.4) razlika $z_g - z_d$ znači promjenu vertikalnog preklapanja visokonaponske i ovješene elektrode u njihovu gornjem i donjem položaju. Pomoću kapacitivnog pretvornika, međutim, mjeri se pomak nazubljene elektrode prema njezinim prstenastim elektrodama. Da bi takvo mjerenje promjene preklapanja bilo točno, potrebno je da se od prelaska iz donjega u gornji položaj ne promijene dimenzije dijelova koji povezuju ta dva pomaka. Pretpostavimo da standardna devijacija temperature tih dijelova za vrijeme postupka vaganja iznosi $\Delta \vartheta$ i da su točno izmjereni pomaci između ovješene elektrode i referentne ravnine te razmaci između tijela i referentne ravnine pomoću posebnih kapacitivnih pretvornika (odjeljak 8.1.4). Tad relativna nesigurnost u određivanju razmaka $z_g - z_d$ zbog utjecaja promjene temperature iznosi:

$$u_\nu = \frac{\Delta \vartheta}{z_g - z_d} \sqrt{l_p^2 \alpha_p^2 + l_n^2 \alpha_n^2 + l_{os}^2 \alpha_{os}^2 + l_i^2 \alpha_i^2 + l_v^2 \alpha_v^2 + l_s^2 \alpha_s^2} \quad (8.26)$$

pri čemu se pod korijenom redom nalaze duljine i pripadni temperaturni koeficijenti prstenaste i nazubljene elektrode, osovine, izolatora, visokonaponske i ovješene elektrode. Ako se u izraz uvrste vrijednosti naše naponske vage, dobiva se uz $\Delta \vartheta = 0,1$ mK nesigurnost od 0,013 ppm u mjerenju duljine, što je zanemarivo.

Posebnu pažnju valja obratiti zagrijavanju osovine zbog trenja u njezinim ležajevima, koje je potrebno, što je moguće više, smanjiti. Olakšavajuća je okolnost u tome što se visokonaponske elektrode podižu u koracima od 1 ili 2 mm sa stankama za mjerenje, pa ima vremena da se osovina ohladi. Ipak je, radi sigurnosti, u unutrašnjoj strani osovine ugrađeno osjetilo za vrlo točno mjerenje njezine temperature.

8.6.4. Osjetljivost i stabilnost sklopa za mjerenje pomaka

U položaju b prstenaste i nazubljene elektrode (sl. 8.12) teče u nju kapacitivna struja:

$$I_C = U \omega \varepsilon \pi^2 D \left[\frac{1}{\ln(1 + 3,4 \text{ s/b})} - \frac{1}{\ln 2 \sqrt{5 + 2 \text{ s/b} + b^2/\text{s}^2}} \right] \quad (8.27)$$

Tu je U napon prema zemlji, D vanjski promjer uzemljene elektrode, a s/b je omjer između raspora i debljine prstenaste elektrode (sl. 8.12). Za $U = 100$ V, $D = 25$ mm, $s/b = 1$ i $\omega = 2\pi \cdot 5000$ bit će struja od $0,88 \mu\text{A}$. Pri prolasku kroz nulu dobiva se osjetljivost:

$$S \approx \frac{2\sqrt{2}\pi}{\lambda} I_c, \quad (8.28)$$

pri čemu je λ korak zubi nazubljene elektrode (sl. 8.12). Budući da je $\lambda = 0,002$ m, dobiva se $S = 4$ mA/m ili 4 pA po jednom nanometru, što se već dobro zapaža osjetljivim elektroničkim sklopom i pri tome se dade osigurati da njegov posmak nebi jače utjecao na nulti položaj.

Posebno valja pripaziti na to da se vremenski ne mijenja omjer napona jedne i druge polovice sekundarnog namota transformatora koji napaja prstenaste elektrode. Pretpostavimo da se napon samo jedne polovice namota promijenio od U na $U + \Delta U$. To će izazvati pomak nultog položaja Δz koji približno iznosi:

$$\Delta z = \frac{\lambda}{4\pi} \cdot \frac{\ln(1 + 3,4 s/b) + \ln 2 \sqrt{5 + 2 s/b + b^2/s^2}}{\ln(1 + 3,4 s/b) - \ln 2 \sqrt{5 + 2 s/b + b^2/s^2}} \cdot \frac{\Delta U}{U} \quad (8.29)$$

Ako i ovdje želimo da Δz ne premaši jedan nanometar, onda je uz $\lambda = 0,002$ m potrebno da $\Delta U/U$ bude manje od 0,7 ppm. To je težak zahtjev, koji se ipak može ispuniti odgovarajućom izvedbom sekundarnog namota transformatora. Tu mnogo pomaže ako se žice obiju polovica sekundarnog namota motaju jedna uz drugu.

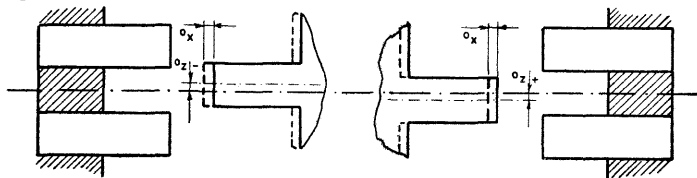
8.6.5. Utjecaj horizontalnih pomaka nazubljene elektrode

Ako bi nazubljena i prstenaste elektrode bile idealno izrađene, nulti položaj pretvornika ne bi se mijenjao zbog eventualnih horizontalnih pomaka nazubljene elektrode nastalih npr. trošenjem ležajeva. Zato se nastojalo da se, s jedne strane, najpažljivijom obradom elektroda što više približi njihovu idealnom obliku, a, s druge strane, da se odgovarajućim vođenjem osovine na koju su učvršćene visokonaionske i nazubljena elektroda smanje horizontalni pomaci na najmanju moguću mjeru. Da bi se ustanovilo koliko nesavršenosti izrade utječu na nesigurnost u određivanju vertikalnog pomaka, računski su analizirana razna karakteristična odstupanja od idealnog rasporeda. Većina njih dade se svesti na odstupanje prikazano na slici 8.13, gdje je zamišljeno da je nazubljena elektroda zakošena prema horizontalnoj osi za $\{z_0\} \mu\text{m}$. Složeni proračun pokazuje da tad horizontalni pomaci $\{x_0\} \mu\text{m}$ i $\{y_0\} \mu\text{m}$ uzrokuju pomak nultog položaja u iznosu:

$$\Delta z = 0,001 \frac{z_0}{\mu\text{m}} \sqrt{x_0^2 + y_0^2}. \quad (8.30)$$

Za $z_0 = x_0 = y_0 = 1 \mu\text{m}$ bit će pomak nultog položaja pretvornika od $0,0016 \mu\text{m}$, što je zanemarivo, a dade se ostvariti vrlo pažljivom izradom

elektroda i sistema za vođenje. Slično se tome dobiva i za razne druge mehaničke nepravilnosti, što pokazuje da se tolerancije zubi nazubljene i prestenastih elektroda moraju održati unutar $\pm 1 \mu\text{m}$.



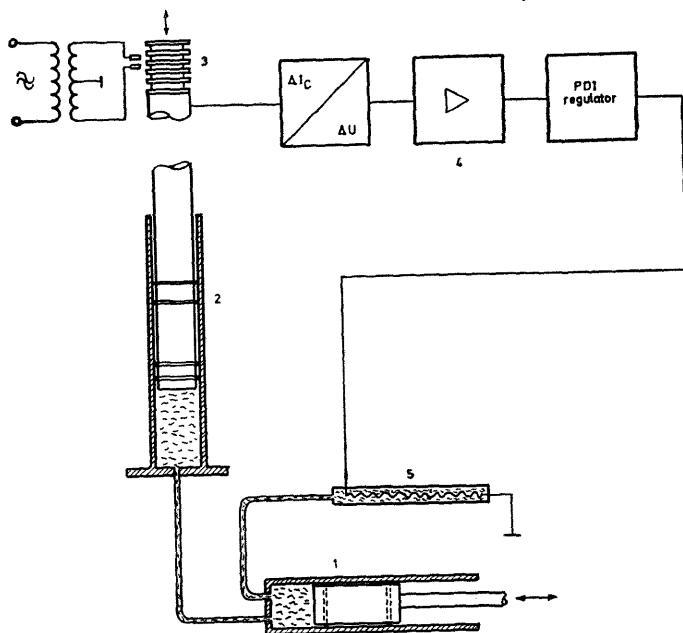
Sl. 8.13. Zakošenje zuba nazubljene elektrode za $\pm z_0$

8.6.6. Održavanje visokonaponskih elektroda na nultom položaju pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka

Vertikalno pomicanje visokonaponskih elektroda za 51 mm ostvaruje se pomoću zatvorenog hidrauličkog sistema (sl. 8.14). Očekuje se da će se tim rješenjem bitno smanjiti vibracije pri pomicanju elektroda, koje nije bilo moguće izbjeći u dosadašnjim izvedbama za zupčanim pogonom preko zabrtvljene osovine. Time se ujedno smanjuje, u omjeru presjeka klipa prema presjeku dovodne cijevi, sila na dno kućišta i omogućuje upravljanje vagonom iz udaljenosti. No, ovim rješenjem nije samo po sebi osigurano održavanje visokonaponskih elektroda na točno određenom položaju, pogotovo ne u granicama od nekoliko nanometara, kako je to prema odjeljku 8.1.3. potrebno pri mjerenju kapaciteta između elektroda vage. Tu bi već promjena temperature ulja u pumpi, koja se nalazi u termostatisiranom kućištu vage, od samo 1 mK uzrokovala vertikalni pomak od otprilike 70 nm. Da bi se ti pomaci izbjegli, služi automatsko održavanje nultog položaja na ovaj način. Na hidrauličku pumpu priključena je tanka, dobro hladena cjevčica, malog promjera, u kojoj je ogrjevna žica. U blizini nultog položaja pretvornika uključuje se automatsko održavanje nultog položaja kojim se automatski ugađa ogrjevna struja sve dok se postigne nulti položaj. Vremenska konstanta cjevčice s ogrjevnom žicom bitno je manja nego ostalih dijelova hidrauličkog sistema tako da se promjenama volumena mjezinu ulja održava stalan volumen cijele količine ulja u sistemu, a time i nulti položaj (sl. 8.14.b).

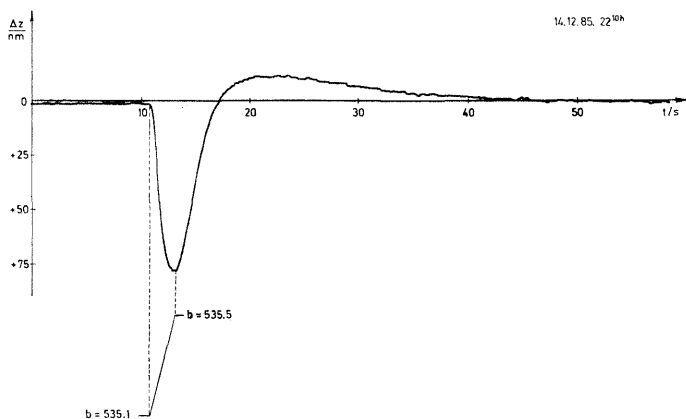
9. VISOKONAPNSKO OTPORNIČKO DJELOLO

Naponskom se vagonom izravno dobiva poznati napon od 10 kV pa je potrebno djelilo kojim će se taj napon smanjiti na iznose koji služe pri baždarenju sekundarnih etalona napona, kalibratora i digitalnih voltmetara. Zbog toga je tu otporničko djelilo za 10 kV, s odvojcima svakih 100 V i posebnim odvojkom za 10 V. Točnost napona na tim odvojcima, pogotovo na onima za 10, 100 i 1000 V, trebalo bi da bude



Sl. 8.14.a. Blokovska shema sklopa za održavanje visokonaponskih elektroda na stalnoj visini: 1 — hidraulička pumpa; 2 — podizač visokonaponskih elektroda; 3 — nazubljena elektroda kapacitivnog pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka visokonaponskih elektroda; 4 — regulacijski sklop; 5 — cjevčica s ogrjevnom žicom

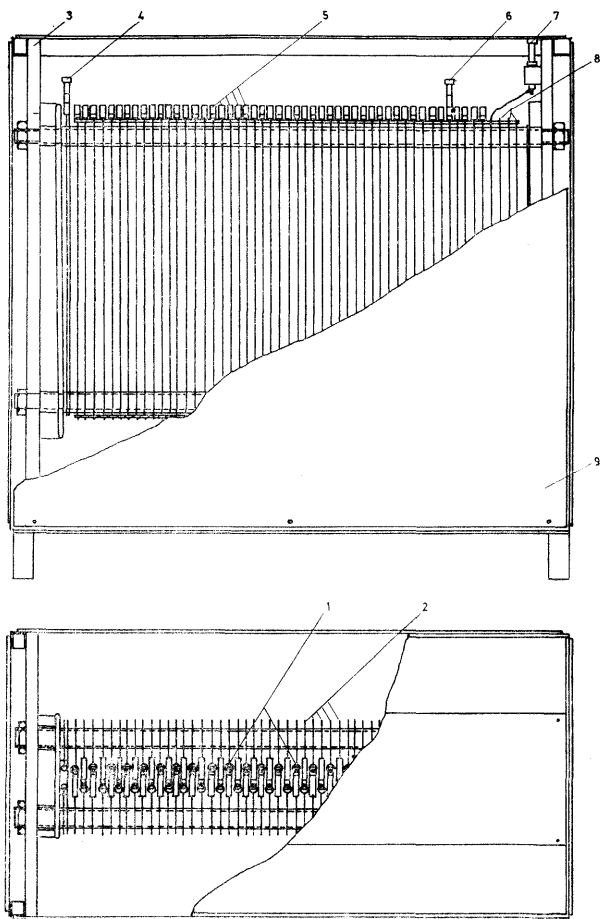
što bliže točnosti napona same vage, što je zahtjev koji nije lako ostvariti. Današnje najbolje izvedbe mjernih otpornika imaju godišnju stabilnost reda nekoliko milijuntinki, pa je točnost omjera otpora reda 0,1 ppm ostvariva jedino uz redovito korištenje posebnim postupcima baždarenja djelila. Da cijeli postupak određivanja napona pomoću naponske vage zbog toga ne izgubi na praktičnosti, treba nastojati da postupak baždarenja djelila ne bude suviše složen i dugotrajan, te da ga nije potrebno često ponavljati. Tom zahtjevu prilagođeno je cjelokupno rješenje našega otporničkog djelila.



Sl. 8. 14.b. Odziv sklopa za održavanje visokonaponskih elektroda na stalnoj visini na nagli pomak klipa hidrauličke pumpe 1 za 40 μm

9.1. IZVEDBA DJELILA

Djelilo se sastoji od tisuću jednakih otpornika po 2000 Ω od izaomske žice promjera od 0,06 mm. Po deset takvih otpornika namotano je na jednu, tankim slojem laka izoliranu bakrenu cijev promjera od 14 mm. Žica se pri namatanju nateže određenom silom, a nakon namatanja fiksira se lakom, tako da je čvrsto mehanički povezana s bakrenom cijevi. Kod zagrijavanja nateže bakrena cijev izaomsku žicu i kompenzira njezin temperaturni koeficijent otpora. Dugogodišnjim istraživanjima [I/3], [III/31] dobiven je na ovaj način rezultirajući temperaturni koeficijent otpora manji od 1 ppm/K sa standardnom devijacijom ispod 0,5 ppm/K. Po dvije takve namotane bakrene cijevi tijesno su umetnute u jednu aluminijsku cijev s dva rashladna rebra (sl. 9.1). Aluminijske su cijevi potpuno zabrtvljene i na gornjem kraju imaju priključke i otpornike s potencimetrima u Whiteovu spoju za fino ugađanje otpora. Aluminijske cijevi s rebrima za hlađenje poslagane su jedna uz drugu; razmak između njih održavaju teflonski prstenovi, a međusobno ih povezuju četiri teflonska svornika na krajevima učvršćena na dvije jake izolacijske ploče. Takvim načinom učvršćenja izbjegnuli su paraziti izolacijski otpori između pojedinih otpornika i zemlje, ili visokonaponske stezaljke, koji bi mogli unositi pogrešku pri baždarenju djelila. Djeluju samo vrlo veliki izolacijski otpori spojeni paralelno svakome pojedinom otporniku, koji na jednaki način djeluju pri mjerenju napona i pri baždarenju. Osim toga, takvim rasporedom otpornika osigurano je jednako hlađenje svakog otpornika, a da ne bi

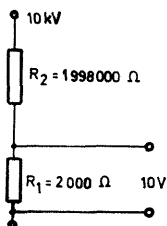


Sl. 9.1. Visokonaponsko otporno djelilo za 10 kV: 1 — zabrtvljena aluminijska cijev u kojoj su žičani otpornici namotani na bakrene cijevi; 2 — rashladna rebra; 3 — izolacijska ploča; 4 — izvod za 10 kV; 5 — potenciometri za fino ugađanje; 6 — izvod za 1 kV; 7 — izvodi za 100 i 10 V; 8 — bakreni otpornici; 9 — kućište

otpornici na krajevima djelila bili bolje hlađeni od ostalih, dodane su još tri aluminijske cijevi s rebrima u kojima su otpornici od bakrene žice, grijani jednakom snagom kao i svi ostali otpornici. Oni ujedno služe za mjerenje temperature djelila, pa kako se izvedbeno razlikuju od izaomskih otpornika samo po tome što je kod njih izaomska žica zamijenjena bakrenom jednakog promjera i duljine, može se pomoću njih u svakom trenutku pouzdano odrediti temperatura izaomskih otpornika.

9.2. POGREŠKA DJELILA

Odredit će se pogreška djelila za omjer 1 : 1000, koji se najčešće susreće (sl. 9.2). Omjer djelila smo dosad označavali prema izrazu (4.23) sa $K_z = R_1/(R_1 + R_2)$. Ovdje ćemo se iz praktičkih razloga koristiti nje-



Sl. 9.2.

govom recipročnom vrijednosti: $n = 1/K_z = (R_1 + R_2)/R_1$. Otpornici R_1 i R_2 bit će podložni starenju i utjecaju temperature i odstupat će za neki mali iznos od nazivnih vrijednosti R_{1n} i R_{2n} , pa je:

$$n = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = \frac{R_{1n}(1 + \Delta_1 + \alpha_1 \vartheta_1) + R_{2n}(1 + \Delta_2 + \alpha_2 \vartheta_2)}{R_{1n}(1 + \Delta_1 + \alpha_1 \vartheta_1)}. \quad (9.1)$$

Pri tome su Δ_1 i Δ_2 relativna odstupanja otpornika R_1 i R_2 od nazivnih vrijednosti pri referentnoj temperaturi, α_1 i α_2 njihovi temperaturni koeficijenti otpora, a ϑ_1 i ϑ_2 su srednje razlike njihove temperature i referentne temperature. Označimo još sa $n_n = (R_{1n} + R_{2n})/R_{1n}$ i sa $m = 1 - 1/n_n = 0,999$, pa nakon dopuštenih zanemarenja dobivamo:

$$n = n_n [1 + m (\Delta_2 - \Delta_1 + \alpha_2 \vartheta_2 - \alpha_1 \vartheta_1)]. \quad (9.2)$$

Relativna nesigurnost omjera n prema tome iznosi:

$$u_n = m \sqrt{u_{\Delta_2 - \Delta_1}^2 + \alpha_2^2 u_{\vartheta_2}^2 + \alpha_1^2 u_{\vartheta_1}^2 + \vartheta_2^2 u_{\alpha_2}^2 + \vartheta_1^2 u_{\alpha_1}^2} \quad (9.3)$$

Razmotrit ćemo odvojeno pojedine sumande tog izraza. $u_{\Delta_2 - \Delta_1}$ je relativna nesigurnost poznavanja omjera otpora $(R_1 + R_2)/R_1$ kod refe-

rentne temperature. Taj omjer odedujemo pomoću Hamonova djelila na neopterećenom djelilu pri referentnoj temperaturi, pa nesigurnost ovisi prije svega o osjetljivosti mjernog sklopa i stalnosti referentne temperature. U dobrim uvjetima može iznositi manje od 0,1 ppm, no o tome će biti više riječi u odjeljku 9.3.

Sumandi $\alpha_2 u_{\theta_2}$ i $\alpha_1 u_{\theta_1}$ razmjerni su nesigurnostima u_{θ_2} i u_{θ_1} u određivanju nadtemperatura otpornika R_1 i R_2 . Konstrukcijskim rješenjima kratko opisanima u odjeljku 9.1. nastojala se što bolje ujednačiti temperatura bakrenog otpornika koji služi za mjerenje nadtemperature s temperaturama otpornika u djelilu. Provedene su i brojne eksperimentalne provjere raspodjele temperature u djelilu, koje pokazuju da se njihove temperature mogu ujednačiti numutar 0,2 K, pa uz α_1 i α_2 manje od 0,5 ppm ovi sumandi ne premašuju 0,1 ppm. Kod djelila koje je upravo u izgradnji nastojat će se te vrijednosti još smanjiti.

Sumandi $\theta_2 u_{\alpha_2}$ i $\theta_1 u_{\alpha_1}$ razmjerni su nadtemperaturama θ_2 i θ_1 otpornika i nesigurnosti u poznavanju temperaturnih otpornih koeficijenata α_1 i α_2 otpornika. Nadtemperature θ_1 i θ_2 podjednake su i u trajnom radu djelila iznose 4 K. Koeficijenti α_1 i α_2 određuju se eksperimentalno za svaki pojedini otpornik s mjernom nesigurnošću manjom od 0,1 ppm/K pa ovi sumandi iznose oko $0,1 \cdot 4 \approx 0,4$ ppm i najviše utječu na nesigurnost omjera djelila. Međutim, ima mogućnost da se iznos ovih sumanada bitno smanji. Konstrukcijskim zahvatima ostvarena je vrlo dobra toplinska povezanost izaomske žice s bakrenim cjevčicama na koje se ona namata i s aluminijskim cijevima u koje se ulazu otpornici. Zbog toga nadtemperatura otporne žice kod povišenja napora sporo raste, i kad se postigne puni napon na vagi, ne prelazi 1 K. Tad vrijednost ovih sumanada iznosi oko $0,1 \cdot 1 = 0,1$ ppm. Daljnje promjene omjera n mogu se pratiti pomoću same naponske vage s mjernom nesigurnošću koju ona sama pruža, te uzeti u obzir i korekcijom. Dapače, ekstrapolacijom mogu se odrediti promjene omjera djelila i za vrijeme povisivanja napona, i time smanjiti nesigurnost od 0,1 ppm.

9.3. MJERENJE OMJERA NEOPTEREĆENOG DJELILA

Mjerenje omjera djelila u neopterećenom stanju, pri referentnoj temperaturi, provodi se pomoću Hamonova djelila, koje se prije vrlo pažljivo ugodi kod omjera 1 : 1, a onda prespoji na omjer 1 : 10, što je poznati način dobivanja omjera 1 : 10 s vrlo malom nesigurnošću, reda $1 \cdot 10^{-8}$. Pri mjerenju omjera visokonaponskog djelila (sl. 9.3) spojeni su skupa donji krajevi obaju djelila, a gornji kraj Hamonova djelila redom se priključenje na izvode za 100, 1 000 i 10 000 V. Pri tome se grana s nul-instrumentom spoji redom na stezaljke za 10, 100 i 1000 V i ugada se otpor R_d na donjem kraju visokonaponskog djelila na vrijednost kod koje je nulindikatore bez otklona. Te će se vrijednosti redom označiti sa R_{dI} , R_{dII} i R_{dIII} i pomoću njih odrediti vrijednost otpora R_{d1000} kod koje je omjer djelila upravo 1 : 1000:

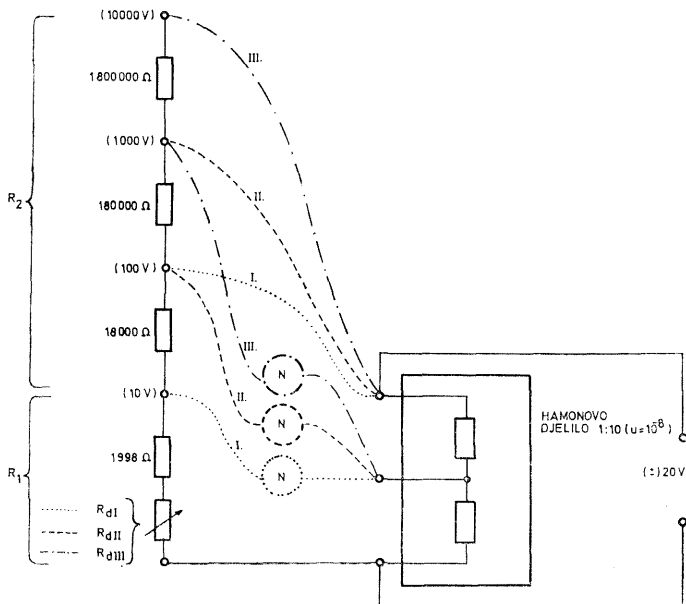
$$R_{d1000} = \frac{R_{dI} + 0,1 R_{dII} + 0,01 R_{dIII}}{1,11} \quad (9.4)$$

Pri tome valja voditi računa o otporu spojnih vodova, stalnosti referentne temperature, utjecaju termonapona i osjetljivosti sklopa. Ako je napon napajanja U , tad kod relativnog odstupanja od nazivnog omjera $1 : 10$ za δ , dobivamo na nulindikatu otpora R_i napon:

$$\Delta U = \frac{\delta}{10 [1 + 9 (R_i + R_{IH})/10 R_i]} U. \quad (9.5)$$

Tako se za $U = 20 \text{ V}$ i R_i mnogo veći od otpora donjeg dijela visokonaponskog djelila R_1 i donjeg dijela Hamonova djelila R_{IH} kod $\delta = 0,1$ ppm dobiva $0,2 \mu\text{V}$, što se dobro zapaža na osjetljivom nulindikatu.

Budući da u dijelu visokonaponskog djelila za 10 V već jedan miliom uzrokuje promjenu omjera od $0,5 \text{ ppm}$, nije sasvim pouzdano ugađati njegov otpor pomoću serijski dodane otporničke dekade kao što je to zbog jednostavnosti predočeno na slici 9.3. Umjesto toga se kod naponske vage ETF-84 otpor ugađa pomoću dekade od $10 \times 100 \Omega \dots 10 \times$



Sl. 9.3. Baždarenje visokonaponskoga otpornog djelila pomoću Hamonova djelila

$\times 0,001 \Omega$ koja je spojena u seriju s otporom od $62\,747,5 \Omega$ i skupa s njim paralelno otporu $2065,313 \Omega$. Time se dobiva mogućnost finog ugađanja otpora od $1999,5 \Omega$ do $2000,5 \Omega$, a ujedno je praktički otklonjen utjecaj promjena prijelaznog otpora preklopki dekad.

9.4. MJERENJE OMJERA OPTEREĆENOG DJELILA

Premda se na osnovi opisanog mjerenja omjera neopterećenog djelila u odjeljku 9.3, i praćenja promjene omjera djelila zbog zagrijanja, pomoću same naponske vage može utvrditi omjer djelila s nesigurnošću manjom od $0,1$ ppm, ipak se radi postizanja veće sigurnosti omjer djelila mjeri i pod opterećenjem, i to na dva načina.

U prvom načinu provjerava se omjer djelila u stacionarnom stanju kod napona od 10 kV tako da se redom uspoređuje napon od 1 kV, izoliranoga vrlo stabilnog elektroničkog izvora, s naponima djelila između odvojaka za $0, 1, 2, \dots, 10$ kV. Ako su pri tome redom dobivene razlike napona $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_{10}$, onda omjer ukupnog otpora djelila, naprama otporu dijela na kojem se dobiva 1 kV, iznosi:

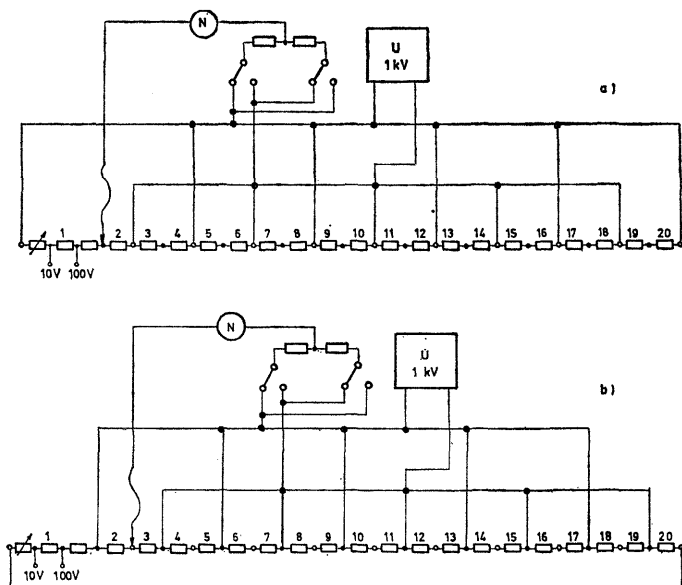
$$n_{10/1 \text{ kV}} = \frac{10 + \sum_{i=1}^{10} \Delta U_i \cdot 10^{-3}}{1 + \Delta U_1 \cdot 10^{-3}}. \quad (9.6)$$

Dalje se može također pod naponom izmjeriti omjer napona na odvojkju za 1 kV i odvojkju za 100 V, te omjer napona na odvojkju 100 V i 10 V, npr. pomoću Kelvin-Varleyeva djelila tvornice Fluke tipa 720 A, te tako dobiti podatke za određivanje omjera $1:1000$. Da bi se takvo mjerenje provelo, potreban je posebni transformator za $220/220$ V izoliran za 10 kV s otporom izolacije izoliranog namota većim od $10^{14} \Omega$, što je izvedivo.

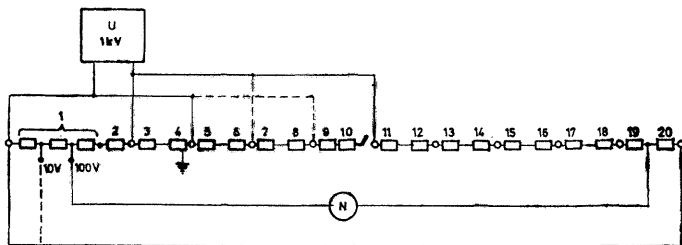
U drugom načinu to nije potrebno jer se paralelnim spajanjem otpornika djelila dobiva mogućnost njihovog zagrijavanja nazivnom snagom pri naponu napajanja od 1 kV (sl. 9.4). Tu treba provesti dvostruki broj mjerenja. U spoju prema slici 9.4.a izmjere se pomoću nulindikатора (ili ugađanjem K. V.-djelila) razlike napona $D_{2/1}, D_{4/3}, D_{6/5}, \dots, D_{20/19}$, dobivene priključivanjem tog djelila omjera $1:1$ paralelno pojedinim otpornicima visokonaponskog djelila za 1 kV. Nakon toga se napon od 1 kV priključi na odvojke za $500, 1500, 2500, \dots, 9500$ V i izmjere se razlike napona koje ćemo označiti sa $D_{1/20}, D_{3/2}, \dots, D_{19/18}$. Omjer $n_{10/1}$ tad iznosi:

$$n_{10/1} = 10 + 10^{-3} [18 D_{1/20} + 16 D_{20/19} + 14 D_{19/18} + 12 D_{18/17} + \dots \\ \dots - 14 D_{5/4} - 16 D_{4/3} - 18 D_{3/2}] \quad (9.7)$$

Pri tome je metodom najmanjih kvadrata uzeto u obzir da je jedno mjerenje prekobrojno. Da bi se taj postupak mogao primijeniti, potrebno je da otpor izolacije između rebara za hlađenje bude veći od $10^{12} \Omega$, što je osvarivo.



Sl. 9.4. Baždarenje omjera 10 000/1000 V visokonaponskog djelila koji je u tu svrhu paralelno spojen (dionice djelila za nazivni napon od 500 V prikazane su kao jedan otpor)



Sl. 9.5. Baždarenje omjera djelila 1000/100 V

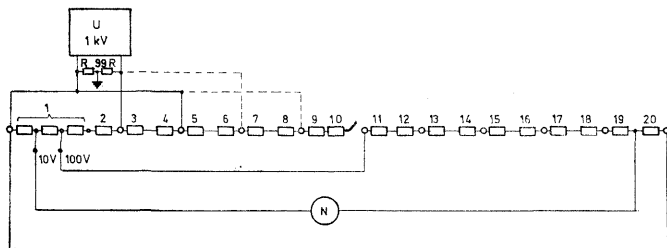
TABLICA 9.1

BAZDARENJE VISOKONAPONSKOG DJELILA 1000Q/1000/100/10 V

MJEŠTO: Čosić Zrinka					
DATUM: 30.10.1985.					
TEMP.OKOLINE: 21.8 °C TEMP.VN-DJEL.: 20.88°C NAPON DJEL.: 200.0 V					
1	2	3	4	5	6
Rbr.	P1 pol I	P1 pol II	r(i+1,i)	S(i)	r(i, sr)
otp.	$\Delta U(i+1,1)$	ΔV	$\left[\frac{\mu\text{V}}{\text{ppm}} \right]$	$\left[\frac{\mu\text{V}}{\text{ppm}} \right]$	$\left[\frac{\mu\text{V}}{\text{ppm}} \right]$
1	-90.0	-490.0	-6.26	-0.20	8.363
2	320.0	-70.0	2.04	-0.10	2.101
3	-190.0	-580.0	-8.16	-0.10	4.139
4	470.0	100.0	5.24	0.10	-4.023
5	180.0	-180.0	-0.46	0.20	1.215
6	310.0	-50.0	2.14	0.20	0.753
7	4.0	-340.0	-3.82	0.36	2.891
8	320.0	-80.0	1.94	-0.20	-0.931
9	410.0	40.0	4.04	0.10	1.007
10	-80.0	-500.0	-6.26	-0.40	5.045
11	360.0	-10.0	3.04	0.10	-1.217
12	40.0	-320.0	-3.26	0.20	1.821
13	240.0	-140.0	0.54	0.00	-1.441
14	570.0	200.0	7.24	0.10	-0.903
15	-440.0	-820.0	-13.06	0.00	6.335
16	-120.0	-520.0	-6.86	-0.20	-6.727
17	1230.0	860.0	20.44	0.10	-13.589
18	-240.0	-640.0	-9.26	-0.20	6.849
19	-130.0	-510.0	-6.86	0.00	-2.413
20	1100.0	710.0	17.64	-0.10	-9.275
Σ	4264.0	-3340.0	0.00	0.00	0.000
$a = (\Sigma(2) + \Sigma(1)) / 20 = 46.2 \text{ } [\mu\text{V}]$ $b = (\Sigma(3) - \Sigma(2)) / 20 = -380.2 \text{ } [\mu\text{V}]$					
$n(10/1) = -(r1 + r2) = -10.464 \text{ } [\text{ppm}]$					
$\Delta n(p) = \Sigma(6) \cdot (11 \div 19) = -11.285 \text{ } [\text{ppm}]$ $S = J(\Sigma(S(i)) * 2 / 19) = 0.185$					

(*) $r(i+1,i) = 2/U * ((2)+(3)-a)$ $S(i) = 2/U * ((3)-(2)-b)$

Podaci su u datotekama: VAGAU10.DAT VAGAI10.DAT VAGAK10.DAT



Sl. 9.6. Baždarenje omjera djelila 100/10 V

U ovom spoju djelilo je nazivno opterećeno kad se priključi napon od 1000 V. Međutim, ako se priključi napon 100 V, bit će njegovo zagrijavanje sto puta manje pa se dobiva pogreška djelila praktički jednaka onoj u neopterećenom stanju, kao i pomoću Hamonova djelila (odjeljak 9.3). To pruža mogućnost da se provjeri pouzdanost obaju postupaka.

Budući da su ovim postupkom međusobno vrlo točno uspoređeni svi otpornici za nazivni napon od 500 V, dobiva se pomoću deset tih otpornika pouzdano djelilo za omjer 1 : 10, što će poslužiti za baždarenje omjera 1000/100 V (sl. 9.5) i omjera 100/10 V (sl. 9.6). Rezultati tako provedenog baždarkenja svrstani su u tablici 9.1.

10. PREGLED OSTVARENIH I OČEKIVANIH NESIGURNOSTI NAPONSKIH VAGA ETF-a

Kako je uvedno spomenuto, na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu dovršena je 1981. godine naponska vaga s cilindričnim elektrodama za 10 kV i uteg od 2 g, koncem 1983. godine dovršena je vaga s pločastim elektrodama za 10 kV i utege od 2×5 g, a u jesen 1985. godine započeta su završna ispitivanja poboljšane izvedbe naponske vage također za 10 kV i 2×5 g. Razmatranja u prethodnim poglavljima pokazuju da njihove pogreške možemo podijeliti u dvije osnovne skupine. U prvu uvrstili ćemo one zbog nepouzdanog priključka na Međunarodni sistem jedinica koji se ostvaruje preko mase m_E etalonskog utega i njegove gustoće, lokalnog gravitacijskog ubrzanja g , kapaciteta etalonskog kondenzatora, interferencijskog uređaja za baždarenje pomaka $z_E - z_A$ i mjerenog etalona napona. U drugu skupinu svrstat ćemo pogreške i nesigurnosti koje unosi mjerna oprema izrađena na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu (interne pogreške), a to je sama naponska vaga kao pretvornik električne u mehaničku radnju, visokonaponsko djelilo, most za mjerenje kapaciteta i sva ostala pripadna mjerna i regulacijska oprema.

U prethodnim poglavljima analizirano je više od četrdeset uzroka pogrešaka iz ove skupine i dani su broječni podaci koji odgovaraju stvar-

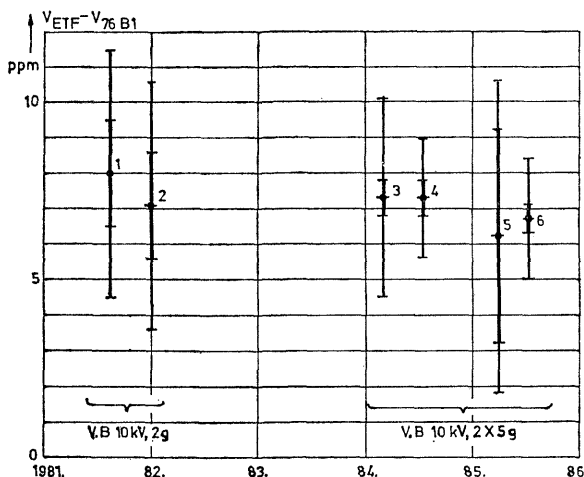
nom stanju u izvedenim naponskim vagama. Na osnovi tih analiza, provjerenih brojnim pokusima, bilo je moguće odrediti parcijalne i ukupnu mjernu nesigurnost naponskih vaga izrađenih na ETF-u, što je prikazano u tablici 10.1, gdje su navedene i očekivane nesigurnosti nove naponske vage u izgradnji, te razlike jedinice napona dobivene naponskim vagama ETF-a prema jedinici $V_{76 \text{ HI}}$. Te razlike s pripadnim nesigurnostima prikazane su i na slici 10.1. Tu je debljom crtom predložena nesigurnost zbog nesavršenosti same vage i visokonaponskog djelila (interna nesigurnost), a tanjom crtom ukupna nesigurnost, gdje je još uključena nesigurnost zbog nepouzdanog priključka na Međunarodni sistem jedinica, koju ćemo nazvati »vanjska nesigurnost«. Kod mjerenja obavljenih u povoljnim uvjetima prevladava utjecaj vanjske nesigurnosti. Tako je kod mjerenja pod rednim brojem 6 vanjska nesigurnost

TABLICA 10.1

Parcijalne i ukupna relativna nesigurnost naponskih vaga ETF-a reducirane na mjereni napon

Utjecajni parametar	N. vaga 10 kV, 2 g		Naponska vaga 10 kV, 2×5 g, 1982.				N. vaga u izgr. 10 kV, 2×5 g.	
	1	2	3	4	5	6	7	8
	1981. srpanj Zagreb	1981. prosinac Zagreb	1984. veljača Zagreb	1984. srpanj Zagreb	1985. ožujak Beograd	1985. lipanj Beograd	1986. srpanj (Zg-PTB- NBS)	1987. NBS
I	m_F	1,5	0,3 ₅	0,3 ₅	0,6	0,6	0,1 ₅ —0,2 ₅	0,1—0,2
	g	1	0,3	0,3	0,5	0,1	0,1—0,2	0,0 ₃
	$C_K - C_{-1}$	1,2 ₅	1,2 ₅	0,7 ₇	0,7 ₇	2,5	0,9 ₅	0,0 ₅ —0,1
	$z_K - z_{-1}$	1,7 ₅	1,7 ₅	2,2 ₇	0,4	1	0,4 ₅	0,2—0,4
	ϱ_a	0,3 ₇	0,3 ₇	0,3 ₇	0,3 ₇	1	0,4 ₃	0,0 ₅ —0,0 ₅
	ϱ_m	0,3 ₇	0,3 ₇	0,0 ₅	0,0 ₅	0,0 ₇	0,0 ₅	0,0 ₁ —0,0 ₅
II	U_{tr}	1,2	1,2	1,2	1,2	1	0,3—0,5	0,0 ₂
	$\sqrt{\sum u_{pl}^2}$	3,1	3,1	2,7 ₅	1,6	3,1 ₅	1,6	0,4 ₁ —0,7 ₃
	omjer djelila	1,2 ₅	1,2 ₅	0,4	0,4	2	0,3	0,0 ₅ —0,1
	vaga- nje	0,9	0,9	0,3	0,3	2,3	0,2 ₅	0,2 ₅ —0,1
	$\sqrt{\sum u_{pII}^2}$	1,5	1,5	0,5	0,5	3	0,4	0,1 ₁ —0,1 ₄
	$\sqrt{\sum u_{pl+II}^2}$	3,5	3,5	2,8	1,7	4,4	1,7	0,4 ₃ —0,7 ₄
$V_{ETF} - V_{76 \text{ HI}}$	+8,0	+7,1	+7,3	+7,3	+6,2	+6,7		

1 — Mjereno pri 23 °C u zraku; pomak od 50 mm određen pomoću graničnih mjerki. U mjerni rezultat nisu uvedene korekcije zbog horizontalnih pomaka elektrode reda od nekoliko mikrometara. 2 — Mjereno kod 23 °C u zraku; pomak od 50 mm određen pomoću graničnih mjerki. 3 — Mjereno kod 23 °C u dušiku; pomak od 50 mm određen pomoću graničnih mjerki. 4 — Mjereno pri 20 °C u zraku; pomak od 50 mm određen pomoću lasera HP-5536-A. 5 — Mjereno u zraku pri 23,8 °C; pomak od 50 mm određen pomoću lasera HP-5536-A; mjerenje obavljeno u vrlo lošim uvjetima. 6 — Mjereno kod 23 °C u dušiku; pomak od 50 mm određen pomoću lasera HP-5536-A. 7 i 8 — Mjerenje planirano uz baždarenje etalona u PTB-u i NBS-u.



Sl. 10.1. Relativne razlike jedinice napona dobivene naponskom vagom ETF za 10 kV i 2 g i naponskom vagom ETF za 10 kV i 2×5 g prema jedinici $V_{76 BI}$ (Tanja crta označava ukupnu nesigurnost, a deblja nesigurnost zbog nesavršenosti naponske vage i visokonaponskog djelila.) 1 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2 g u Zagrebu u lipnju 1981. kod 23 °C u zraku. 2 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2 g u Zagrebu u prosincu 1981. kod 23 °C u zraku. 3 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2×5 g u Zagrebu u veljači 1984. u dušiku kod 23 °C. 4 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2×5 g u Zagrebu u srpnju 1984. kod 20 °C u zraku. 5 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2×5 g u Beogradu u ožujku 1985. kod 23,8 °C u zraku (mjerni uvjeti vrlo loši — trešenje i velike promjene temperature okoline). 6 — Mjerenje obavljeno naponskom vagom ETF za 10 kV i 2×5 g u Beogradu u lipnju 1985. pri 23 °C u dušiku.

čak četini puta veća od interne. Uzrok je tome slaba opremljenost naših laboratorija, uključujući i Savezni zavod za mjere i dragocene kovine, te njihova slaba povezanost s inozemnim metrološkim ustanovama. Ipak se rezultati dobiveni s dvije naponske vage različitih izvedbi, ispitanih u nejednakim uvjetima pomoću različitih mjernih postupaka, međusobno vrlo dobro poklapaju. Uzevši u obzir težine rezultata dobiva se da srednja razlika između napona dobivenog pomoću dvije naponske vage ETF-a i $V_{76 BI}$ iznosi:

$$V_{ETF} - V_{76 BI} = 7,08 \text{ ppm.} \quad (10.1)$$

Standardna devijacija podatka ($V_{ETF} - V_{76 BI}$) izračunata iz razlika između pojedinačnih mjerenja i njihove srednje vrijednosti iznosi samo

0,28 ppm. Ako se ona izračuna iz procijenjenih standardnih devijacija pojedinačnih rezultata, dobiva se 1 ppm, što navodi na zaključak da su one prestrogo ocijenjene.

Kod nove naponske vage očekuje se interna nesigurnost od 0,07 do 0,14 ppm i ukupna nesigurnost od 0,15 do 0,3 ppm, ako se obave planirana baždarenja etalona u PTB-u i NBS-u. Usporedi li se ta nesigurnost i već ostvarene nesigurnosti naponskih vaga ETF-a s nesigurnostima postignutima drugim rješenjima (sl. 2.1), dobiva se uvid u vrijednost rezultata ostvarenih na ETF-u.

U nastavku bit će prikazani neki važniji pokusi što su omogućili ocjenu nesigurnosti dovršene naponske vage za 10 kV i 2×5 g i razlozi zbog kojih se očekuju još bolji rezultati s naponskom vagom u izgradnji.

10.1. POKUS PONAVLJANJA ZAMJENE TEŽINE UTEGA ELEKTROSTATSKOM SILOM

Ovaj pokus obavljen je više puta na naponskoj vagi za 10 kV i 2 g i onoj za 10 kV i 2×5 g (ETF-82) pa je kod prve dobivena standardna devijacija od 0,5 ppm, a kod druge od oko 0,2 ppm (sl. 5.19). Rasipanje rezultata ovdje uzrokuju:

- vibracije postolja (odjeljak 5.9);
- utjecaj histereze ovjesnih vrpca (odjeljak 5.8);
- utjecaj nestalnosti napona napajanja kapacitivnih pretvornika za mjerenje otklona vage i ugađanje ravnoteže vage (odjeljak 5.7.1);
- klizanje elektroničkog indikatora za mjerenje otklona vage i nestalnost vage;
- temperature promjene duljine kraka vage — odjeljak 5.9, izraz (5.63);
- temperature promjene dimenzija elektroda;
- nejednako nasjedanje etalonskog utega na košaru — odjeljak 5.4.6. i 5.8, izraz (5.62);
- promjene omjera visokonaponskog djelila zbog promjene njegove temperature (odjeljak 9.3; veći dio te promjene može se uzeti u obzir korekcijom);
- nestalnost etalona napona U_N ;
- klizanje elektroničkog nulindikatora za usporedbu napona U_N i pada napona na donjem dijelu djelila (odjeljak 4.4.1, sl. 4.7).

Analize u navedenim odjeljcima i brojni eksperimenti pokazuju da su glavni uzroci rasipanja vibracije postolja, histereza ovjesnih vrpca, koja ovisi o veličini otklona vage pri zamjeni težine utega elektrostatskom silom i promjena omjera djelila. Utjecaj ostalih uzroka praktički je sasvim zanemariv.

10.2. BAŽDARENJE VISOKONAPONSKOG DJELILA

Visokonaponsko djelilo za naponsku vagu ETF-82 ispitivalo se i baždariilo kontinuirano u toku 1983. i 1984. godine [II/16] i [II/23], i to:

- u neopterećenom stanju pomoću Hamonova djelila (odjeljak 9.3);
- u zagrijanom stanju dobivenom priključivanjem djelila na nazivni napon; kad se postigne stacionarna temperatura, isključi se napon i mjeri omjer pomoću Hamonova djelila; postupkom ekstrapolacije dobiva se omjer djelila u zagrijanom stanju;
- u zagrijanom stanju djelila dobivenoga pomoću posebnog grijača postavljenoga ispod otpornika djelila;
- praćenjem promjene omjera djelila zbog zagrijavanja pomoću same naponske vage.

Analiza dobivenih rezultata upućuje na to da se tim postupcima u povoljnim okolnostima postiže nesigurnost određivanja omjera djelila u zagrijanom stanju od 0,2 ppm.

10.3. POKUS VAGANJA NAPONA

Pokus vaganja napona koji uz poznati omjer djelila služi za određivanje faktora K u izrazu (7.3) ponovljen je više puta s obje dovršene naponske vage. Primjer takva jednog vaganja s naponskom vagom ETF-82 za 10 kV i 2×5 g prikazan je u tablici 10.2. i na slici 10.2, gdje su upotrijebljene ove oznake:

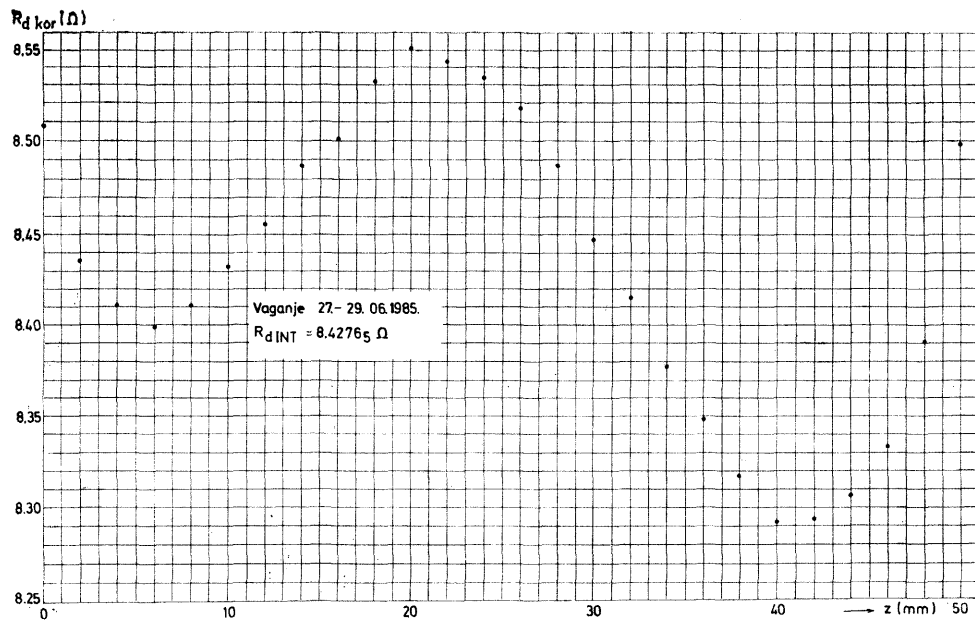
- z — vertikalni pomak visokonaponske elektrode
- θ_{dj} — temperatura djelila mjerena bakrenim otpornikom jednako opterećenim kao otpornici djelila
- y — uzdužni otkloni ovještene elektrode prije, vaganja za njegovo vrijeme i poslije njega (odjeljak 7.22)
- x_L — poprečni otkloni (u smjeru osi x) ovještene elektrode na lijevoj strani prije vaganja, za njegovo vrijeme i poslije njega (odjeljak 7.2.2)
- x_D — poprečni otkloni (u smjeru osi x) ovještene elektrode na desnoj strani prije vaganja, za njegovo vrijeme i poslije njega (odjeljak 7.2.2.)
- U_z — napon između pomoćnih elektroda za automatsko ugađanje ravnoteže vage prije vaganja i poslije toga (5.7.1)
- R_d — otpor dekadre dodan donjenaponskom djelu djelila (odjeljak 4.4.1, sl. 4.7)
- ΔR_d — korekcija otpora R_d zbog zagrijavanja djelila
- R_{dkor} — korigirani iznos otpora dodanoga donjonaponskom dijelu djelila

Kod ovog pokusa rasipanje pojedinačnih rezultata izazivaju svi uzročnici koje smo već istaknuli u odjeljku 10.1. Osim njih pri određivanju faktora K — odjeljak 7.1, izraz (7.3), moguće su još i druge pogreške u samoj naponskoj vagi (bez visokonaponskog djelila) koje uzrokuju:

- poprečni pomaci ovještene elektrode — odjeljak 7.2.3, izraz (7.24);
- zakretanje ovještene elektrode u horizontalnoj ravnini — odjeljak 7.2.4, izraz (7.26);
- uzdužni pomaci ovještene elektrode — odjeljak 7.3;

TABLICA 10.2
Mjerenje napona $U(z)$

(1)	(2)	(3)			(4)			(5)			(6)		(7)	(8)	(9)
z mm	φ °C	y μm			x _L μm			x _D μm			U _z V	R _d Ω	ΔR _d mΩ	R _{kor.} Ω	
50	23,28	49,5	48,8	49,3	40,55	40,47	40,55	71,4	71,37	71,4	173,36	173,36	8,495	+3,3	8,4983
48	24,60	49,0	48,3	48,9	40,2	40,2	40,21	70,12	70,13	70,15	175,56	175,61	8,391	-0,7	1,3903
46	21,86	48,7	47,9	48,5	39,17	39,19	39,18	69,37	69,38	69,4	175,87	175,52	8,333	-0,1	1,3321
44	22,08	48,6	47,8	48,5	37,66	37,67	37,67	68,76	68,78	68,79	175,56	175,41	8,306	+0,5	1,065
42	23,76	48,9	48,1	48,8	37,4	37,44	37,45	66,83	66,84	66,86	174,26	174,37	8,289	+4,5	1,2935
40	23,18	48,9	48,0	48,8	36,21	36,21	36,21	65,78	65,82	65,82	174,92	174,92	8,289	+3,1	1,2921
38	23,95	48,8	48,0	48,6	36,0	36,1	36,0	64,57	64,61	64,6	174,58	174,6	8,312	+4,9	1,3166
36	22,95	48,4	47,6	48,2	33,98	34,03	33,99	63,48	63,43	63,49	173,83	173,97	8,346	+2,5	1,3425
34	24,00	48,4	47,7	48,4	33,58	33,66	33,62	62,1	62,07	62,05	174,1	173,91	8,372	+5,1	1,3771
32	22,90	48,1	47,3	48,1	32,57	32,63	32,61	61,07	61,03	61,1	173,89	173,74	8,412	+2,4	1,4144
30	23,40	47,7	46,7	47,5	31,02	31,02	31,0	60,48	60,38	60,49	174,59	174,15	8,443	+3,6	1,4466
28	22,63	47,9	47,1	47,8	29,83	29,88	29,84	60,42	60,38	60,43	173,71	173,67	8,479	+1,8	1,4808
26	23,63	47,3	46,5	47,2	28,67	28,78	28,7	59,27	59,88	59,9	174,66	174,52	8,513	+4,2	1,5192
24	22,47	48,1	47,3	48,1	28,06	28,12	28,03	58,12	58,12	58,13	174,1	174,03	8,533	+1,4	1,5344
22	22,39	48,4	47,6	48,2	25,73	25,73	25,75	58,21	57,98	58,03	175,56	175,44	8,542	+1,2	1,5432
20	22,54	48,2	47,4	48,2	24,95	24,97	24,99	57,4	57,41	57,41	172,96	173,0	8,549	+1,6	1,5506
18	23,71	47,1	46,3	47,1	23,98	24,01	24,02	56,47	56,5	56,5	174,63	174,31	8,527	+4,4	1,5314
16	22,67	48,2	47,4	48,2	22,92	22,9	22,96	55,3	55,3	55,33	173,77	173,78	8,503	+1,9	1,5049
14	23,73	47,1	46,2	47,0	22,08	22,07	22,12	54,53	54,58	54,53	174,7	173,91	8,482	+4,4	1,4864
12	22,44	48,3	47,5	48,2	22,24	22,23	22,23	53,93	53,1	53,98	173,87	173,64	8,452	+1,3	1,4533
10	23,87	47,0	46,3	47,1	21,72	21,77	21,74	52,52	52,66	52,57	174,58	173,94	8,427	+4,8	1,4318
8	22,63	48,2	47,4	48,2	21,31	21,29	21,33	50,39	50,45	50,44	173,49	173,42	8,408	+1,8	1,4108
6	23,51	46,8	46,1	46,7	20,6	20,6	20,6	49,91	50,02	49,93	174,33	173,6	8,396	+3,9	1,3999
4	22,64	48,2	47,4	48,1	21,31	21,26	21,3	46,43	46,45	46,47	172,57	172,68	8,409	+1,8	1,4108
2	23,87	46,3	45,6	46,1	24,18	24,22	24,22	42,62	42,63	42,64	173,78	173,6	8,431	+4,8	1,4358
0	23,73	46,1	45,2	45,7	24,92	22,92	22,9	43,99	43,12	43,15	173,38	172,98	8,502	+4,4	8,5064
Δp = - 41,6 mbar															R _{airT} =
Mjerio: <i>Intorae</i>															



Sl. 10.2. Ovisnost otpora R_{dkor} o pomaku z (promjeni otpora R_{dkor} od $+0,01\Omega$ odgovara promjena napona vage od -5 ppm)

- naginjanje visokonaponske elektrode — odjeljak 7.4, izraz (7.38);
- svijanje ovješene elektrode pod naponom zbog ekscentričnosti u poprečnom smjeru — odjeljak 6.7.3, izrazi (6.29) i (6.30);
- svijanje visokonaponskih elektroda pod naponom — odjeljak 6.7.1, izrazi (6.20), (6.23) i (6.24);
- svijanje stijenki ovješene elektrode pod naponom — odjeljak 6.7.2, izraz (6.28);
- neujednačenost duljine krakova vage i poprečno odstupanje težine utega i elektrostatske sile — odjeljak 5.6, izraz (5.52);
- uzdužno svijanje ovjesnih traka (odjeljci 5.4.5. i 5.4.6);
- pojava ionizacije na visokonaponskim elektrodama;
- pogreške pri integraciji faktora K_z — izrazi (4.26) i (7.3);
- nesigurnost u određivanju gustoće utega i plina — odjeljak 8.1.6;
- promjene napona napajanja kapacitivnih pretvornika za mjerenje horizontalnih otklona ovješene elektrode — odjeljak 8.1.2.

O nesigurnostima u poznavanju mase etalonskog utega m_E , lokalne gravitacijske konstante g i omjera $(z_g - z_d)/(C_g - C_d)$, koje također utječu na faktor k , bit će poslije riječi.

Prema analizama i numeričkim primjerima u navedenim odjeljcima izlazi da su sve ovdje nabrojene sistematske pogreške praktički sasvim zanemarive, osim pogreške zbog svijanja visokonaponskih elektroda, koja se ipak može dobrim dijelom uzeti u obzir pomoću korekcije, pa ostaje samo nesigurnost u određivanju te korekcije, koja kod vage ETF-82 iznosi 0,25 ppm. Uvjet je da se pažljivim radom održi centrični položaj ovješene elektrode pod naponom i mjerenja provedu u dobro termostatisanoj prostoriji i na vrlo mirnom postolju.

U primjeru prikazanom tablicom 10.2. dodatni poprečni otkloni ovješene elektrode pod naponom na lijevoj i desnoj strani ne premašuju $0,1 \mu\text{m}$ pa je korekcija zbog horizontalne radnje prema izrazima (7.24) i (7.26) potpuno zanemariva. Uzdužni otkloni ovješene elektrode pod naponom nisu dobro ugođeni i u prosjeku iznose $0,75 \mu\text{m}$. Ipak je i tu korekcija zbog horizontalne radnje prema odjeljku 7.3.4. zanemariva, a jednako tako i moment zbog svijanja ovjesnih traka u uzdužnom smjeru (odjeljak 5.4.6).

Zbog spomenutih razloga standardna devijacija točaka na krivulji koja prikazuje ovisnost otpora R_d o pomaku z (sl. 10.2) u povoljnim je uvjetima jednaka kao i kod pokusa opisanoga u odjeljku 10.1, odnosno oko 0,2 ppm. Budući da se mjereni napon izračunava iz srednje vrijednosti od 26 mjerenja, to je njezin udio u nesigurnosti vaganja napona samo $0,2/\sqrt{26} = 0,04$ ppm. Zato nesigurnost koja je posljedica nesavršenosti same naponske vage ETF-82 iznosi u povoljnim uvjetima oko 0,25 ppm, koliko je i nesigurnost korekcije zbog svijanja visokonaponskih elektroda pod naponom.

Srednja vrijednost dodatnog otpora R_d određuje se numeričkom integracijom podatka iz 26 vaganja u koracima od 2 mm uzduž vertikalnog pomaka VN-elektroda od $z_g = 50$ mm do $z_d = 0$ mm. Tu ćemo primijeniti postupak pomoću klizećeg polinoma trećeg stupnja [III/38], koji unosi zanemarivo malenu pogrešku i za ovaj slučaj glasi:

$$R_{dv} = \frac{1}{25} \left[\frac{1}{3} R_{d1} + \frac{31}{24} R_{d2} + \frac{5}{6} R_{d3} + \frac{25}{24} R_{d4} + R_{d5} + \dots + R_{d22} + \right. \\ \left. + \frac{25}{24} R_{d23} + \frac{5}{6} R_{d24} + \frac{31}{24} R_{d25} + \frac{1}{3} R_{d26} \right]. \quad (10.2)$$

Za primjer u tablici 10.1. dobiva se: $R_{dv} = 8,4276 \Omega \pm 0,12 \text{ m}\Omega$.

Pomoću Hamonova djelila određen je prema izrazu (9.4) otpor R_{d1000} kod kojeg je omjer djelila upravo 1 : 1000. pa se nakon uređenja i uz dopuštena zanemarenja dobiva:

$$K = \left[1 + 0,999 \frac{R_{dv} - R_{d1000}}{R_{10} + R_{d1000}} \right] 10^{-3}. \quad (10.3)$$

U uzetom primjeru iznosilo je $R_{d1000} = 5,3821 \Omega \pm 0,6 \text{ m}\Omega$ a $R_{10} = 1990,63 (1 \pm 2 \cdot 10^{-4}) \Omega$, pa će faktor K biti:

$$K = 0,001\,001\,524\,3 (1 \pm 0,4 \cdot 10^{-6}).$$

10.4. MJERENJE OMJERA $(z_R - z_d)/(C_R - C_d)$

Vertikalni pomak $(z_R - z_d)$ mjeri se u naponskoj vagi ETF-81 kapacitivnim pretvornikom s nazubljenom pomičnom elektrodom (odjeljak 8.6), koji je baždaren više puta laserskim mjernim sustavom HP 5526-A, vlasništvom Saveznog zavoda za mjerenje. Razlika kapaciteta u gornjem i donjem položaju mjeri se pomoću samokalibrirajućeg mosta za mjerenje kapaciteta MEC-5 [II/13], [II/14], [III/24], [I/9].

Na nesigurnost određivanja ovog omjera, osim nesigurnosti laserskog sustava i etalona kapaciteta, o kojem će biti riječi, utječu još:

- pogreška zbog nagiba mjerila duljine prema vertikali koja iznosi $\frac{1}{2} (1 - \cos \delta) \approx \delta^2/4$; uz $\delta = 2 \cdot 10^{-4}$ pogreška je 0,01 ppm;
- odstupanje vertikala nazubljene elektrode i visokonaponskih elektroda — odjeljak 8.6.2, izraz (8.25);
- temperaturna produljenja za vrijeme postupka mjerenja — odjeljak 8.6.3, izraz (8.26);
- nestalnost i neosjetljivost elektroničkog sklopa za mjerenje pomaka (odjeljak 8.6.4);
- horizontalni pomaci nazubljene elektrode — odjeljak 8.6.5, izraz (8.30);
- nečistoće na površini visokonaponske i ovješene elektrode (odjeljak 6.9);
- promjene dimenzija elektroda između vaganja i mjerenja kapaciteta;
- pomaci elektroda između vaganja i mjerenja kapaciteta;

- promjene dielektričnosti ovisno o tlaku i temperaturi plina u vagi;
- nesigurnost mosta za mjerenje kapaciteta (0,2 ppm).

Zbog vrlo dobro termostatisane i zabrtvljene vage te precizne mehaničke izvedbe pokazuje se da su svi spomenuti utjecaji u naponskoj vagi ETF-82 zanemarljivi, osim nesigurnosti samokalibrirajućeg mosta (0,2 ppm) i, u manjoj mjeri, utjecaja nečistoća (manje od 0,1 ppm).

10.5. NESIGURNOST ETALONA MASE

Etalonski utezi koji su upotrijebljeni u naponskim vagama ETF-a baždareni su više puta:

- 16. 6. 1981. izvršena je u Saveznom zavodu za mjere usporedba dvogramskih utega ETF-a s etalonima Zavoda;
- 26. 6. 1981. isti su dvogramski utezi baždareni u laboratorijima PTB-a;
- 5. 3. 1982. izvršena je usporedba dvogramskih i desetgramskih utega ETF-a s etalonima Saveznog zavoda;
- 11. 3. 1982. baždarena su dva dvogramska i dva desetgramska utega u PTB-u;
- 26. 4. 1983. ponovno su baždarena dva dvogramska i dva desetgramska utega u PTB-u;
- 26. 10. 1983. u Saveznom zavodu uspoređeni su etaloni od 2, 5 i 10 g ETF-a s etalonima Zavoda;
- 18. 4. 1984. ponovljena je usporedba utega od 2, 5 i 10 g u Saveznom zavodu.

Na osnovi tih baždarkenja i njihove analize ocijenjene su nesigurnosti utega upotrebljivanih u naponskim vagama ETF-a i one su unijete u tablicu 10.1. smanjene dva puta jer se njihova masa m_E nalazi pod korijenom u izrazu za određivanje napona (7.4).

10.6. GRAVITACIJSKO UBRZANJE g

Lokalno gravitacijsko ubrzanje određeno je na temelju podataka što ih »Jedinstvena međunarodna gravimetrijska mreža« (JGSN 71) navodi za najbližu točku. Ta je vrijednost preračunata na koordinate naponske vage uz pomoć korekcijske formule kojom se uzima u obzir zakrivljenost Zemlje u pravcu sjever — jug, visinske razlike i utjecaj konfiguracije tla [II/10], [II/18], [III 40], pa je za smještaj naponske vage na ETF-u dobiveno:

$$g_{ETF} = 9,806\,630 (1 \pm 0,4 \cdot 10^{-6}) \text{ m/s}^2. \quad (10.4)$$

Nesigurnost od 0,4 ppm, kojom je to ubrzanje određeno, daleko je od današnjih vrhunskih mogućnosti, koje iznose čak oko 0,01 ppm.

10.7. NESIGURNOST BAŽDARENJA KAPACITIVNOG PRETVORNIKA ZA MJERENJE VERTIKALNOG POMAKA VISOKONAPONSKE ELEKTRODE ($z_g - z_d$)

Baždarenje kapacitivnog pretvornika za mjerenje vertikalnih pomaka (odjeljak 8.6) obavljeno je više puta u toku 1983. i 1984. godine pomoću laserskoga mjernog sustava HP 5526-A, vlasništva Saveznog zavoda za mjere, i pomoću dva čelična etalona od 50 mm, klase 00 baždarena u Laboratoriju za mjerenje duljina na FSB-u u Zagrebu. Za laserski sustav proizvođač garantira točnost $\pm 0,5$ ppm ± 20 nm, a čelični su etaloni baždareni s nesigurnošću ± 30 nm, tako da je baždarenje kapacitivnog pretvornika bilo moguće obaviti s nesigurnošću 0,8 ppm [III/29], [III/34], [III/36], što je ipak znatno slabije od današnjih vrhunskih mogućnosti, koje su oko 0,1 ppm.

10.8. NESIGURNOST BAŽDARENJA ETALONA KAPACITETA

Kao etaloni kapaciteta upotrijebljeni su kondenzatori tvornice General Radio tip 1408-B kapaciteta od 100 pF (odjeljak 7.5.2) i tip 1408-A kapaciteta od 10 pF i 100 pF, koji su baždareni više puta, što je prikazano na slici 10.3. Nesigurnost novijih baždarenja tih etalona više-struko su lošije od 0,1 ppm, koliko može danas postići NBS u svojim laboratorijima.

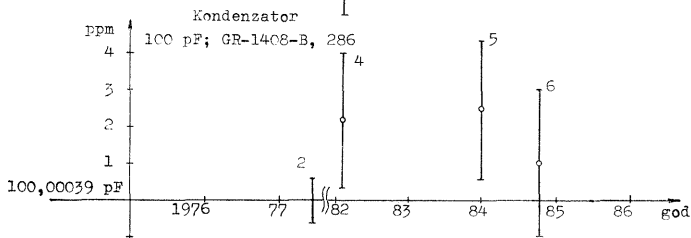
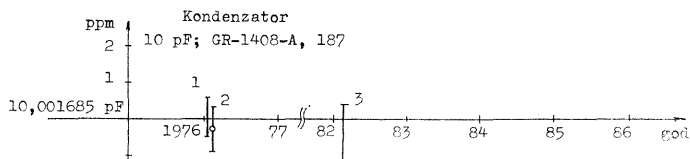
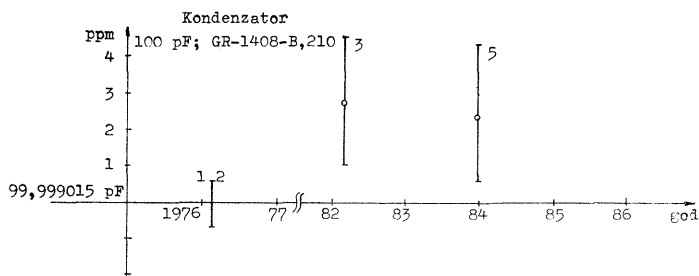
10.9. NESIGURNOST PRIJENOSA NAPONA

Naponskim vagama ETF-a određuje se SI-jedinica volt pa je za njihovo uključivanje u slična nastojanja u svijetu prijeko potrebno osigurati pouzdan prijenos napona u BIPM ili u vrhunske metrološke laboratorije koje su s njim pouzdano povezane. Za to danas služi Josephsonov izvor napona koji naša zemlja danas nema. Zbog toga smo nastojali što pouzdanije izbaždariti naponski etalon ETF-a od deset Westonovih elemenata u ultratermostatu, proizvodnje Guildline, br. 31840. Rezultati tih baždarenja i pripadne nesigurnosti prikazani su na slici 10.4, što pokazuje da je prijenos napona u posljednjim godinama obavljen s nesigurnošću 1 ppm. To je mnogo lošije od današnjih vrhunskih mogućnosti, koje su 0,02 ppm. Ujedno je to i naša najslabija karika u povezivanju s Međunarodnim sistemom jedinica.

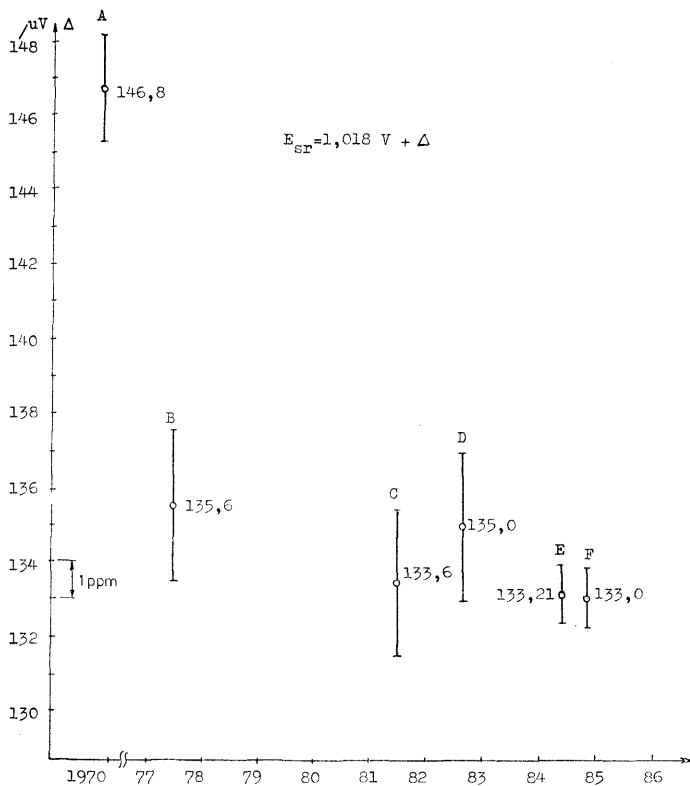
10.10. OČEKIVANA NESIGURNOST NAPONSKE VAGE ETF-84

Na osnovi iskustava stečenih s dvije dovršene naponske vage i opsežnih teorijskih razmatranja, koja su jednim dijelom prikazana u ovom radu, razrađena je konstrukcija nove naponske vage ETF-84 takoder za 10 kV i 2×5 g (sl. 3.2. a i b, te sl. 8.1). U njoj su uvedena mnoga poboljšanja. Ovdje ćemo nabrojiti samo neka:

— Krakovi mehaničke vage produženi su od 70 na 120 mm, što će povećati osjetljivost vaganja.



Sl. 10.3. Baždarenje etalonskih kondenzatora GR-1408. 1. Baždarenje u NBS-u, 2. Baždarenje u General Radio (GR), 3. Baždarenje u PTB-u, 4. Baždarenje na ETF-u mostom MEC-4 pomoću etalona baždarenih pod 3., 5. Usporedba na ETF-u pomoću mosta MEC-5, 6. Baždarenje u LCIE-u



Sl. 10.4. Srednje vrijednosti EMS grupnog etalona napona ETF Zagreb (proizvodnja »Guildline« br. 31840), A — Prema atestu Guildline; B — prema atestu Saveznog zavoda na osnovi jugoslavenske usporedbe; C — prema usporedbi s PTB-om pomoću DC Transfer Standarda Fluke 731-B; D — prema usporedbi s PTB-om pomoću prenosive grupe W. ćelija; E — prema usporedbi s grupom Saveznog zavoda; F — prema usporedbi s PTB-om pomoću DC Transfer Standarda Fluke 732-A

- Upotrijebljene su znatno tanje ovjesne vrpce, a to će oko sedam puta smanjiti parazitne momente zbog njihova savijanja.
- Ovješena elektroda višestruko je kruća i bolje učvršćena na noseći okvir.
- Vanjske visokonaponske elektrode dvostruko su deblje kako bi utjecaj njihova savijanja bio neznatan.
- Uvedeno je daljinsko hidrauličko ugađanje centričnog položaja elektroda s termičkim upravljanjem.
- Uvedeno je daljinsko hidrauličko vertikalno pomicanje visokonaponske elektrode i mjernih utega.
- Uvedeno je daljinsko hidrauličko aretiranje ovještene elektrode.
- Pojačana je termička izolacija između kućišta.
- U visokonaponsko djelo ugrađeni su otpornici s temperaturnim koeficijentom od 0,5 ppm/°C i razvijena je nova metoda za baždarenje djelila u hladnom i toplom stanju.
- Poboľšani su elektronički sklopovi za mjerenje otklona vage, horizontalnih pomaka ovještene elektrode, tijela vage, vertikalnih pomaka visokonaponske elektrode itd.

Teorijska razmatranja i brojna prethodna mjerenja pokazuju da bi se uz ova poboljšanja moglo očekivati smanjenje mjerne nesigurnosti usporedbe elektrostatske sile i težine utega na manje od 0,1 ppm. Slično vrijedi i za visokonaponsko djelo. Dogovoreno je ispitivanje u PTB-u i NBS-u, gdje bi se koristilo vrhunskim mogućnostima u baždarenju etalona mase, poznavanju lokalnoga gravitacijskog ubrzanja, baždarenju vertikalnog pomaka elektroda i etalona kapaciteta te njihovu pouzdanu vezu s naponom u BIPM. Tad se mogu očekivati nesigurnosti navedene u stupcima 7 i 8 tablice 10.1, iz kojih izlazi da bi se jedinica napona volt mogla odrediti s nesigurnošću od 0,15 do 0,3 ppm, što bi bio vrlo koristan doprinos u boljem poznavanju elektromagnetskih jedinica.

LITERATURA

(osim one koju su objavili suradnici na naponskoj vagi ETF — Zagreb)

- [1] *** Recommended Consistent Values of the Fundamental Physical Constants, 1973, CODATA Bulletin No 11, December 1973.
- [2] E. R. Cohen, B. N. Taylor, The 1973 Least-Squares Adjustment of the Fundamental Constants, J. Phys. Chem. Ref. Data 2 (1973) 4, 663—734.
- [3] B. N. Taylor, Is the Present Realization of the Absolute Ampere in Error? Metrologia 12 (1978), 81—83.
- [4] P. Vigoureux, Note on Realization of the Ampere, CPEM, Boulder, Colorado, USA (1982), A-5.
- [5] P. T. Olsen i dr., The Realization of the Ampere NBS, IEEE Trans. Instrum. Meas. vol. IM-29, 4 (1980), 234—237.
- [6] E. R. Cohen, V. S. Tuninsky, The 1983 Adjustment of the Fundamental Physical Constants and Analysis of Discrepant Data, 8th International CODATA Conference, Jachranka, Poland (1982), 48.
- [7] P. T. Olsen i dr., The NBS Absolute Ampere Experiment, CPEM, Delft, The Netherlands (1984), 28—29.
- [8] G. J. Sloggett i dr., Absolute Determination of the Volt Using a Liquid Electrometer, CPEM, Delft, The Netherlands (1984), 35—36.

- [9] W. Schlesok, J. Forkert, A New Determination of the Ampere and the Gyromagnetic Ratio γ_p in Low and High Magnetic Field, CPEM, Delft, The Netherlands (1984), 27.
- [10] M. E. Cage i dr., A test of the Quantum Hall Effect as a Resistance Standard, CPEM, Delft, The Netherlands (1984), 198—199.
- [11] N. Elnekave, A. Fau, Determination absolue du volt et du coefficient $2 e/h$ an LCIE, Com. Consultat. d'Electricité, 16^e Session (1983) Doc. CCE/83—2.
- [12] W. Snow Harris, On some Elementary Laws of Electricity, Philosophical Trans. Roy. Soc. London (1834) Part II, 213—245.
- [13] W. Thomson, Report on Electrometers and Electrostatic Measurements, Rep. 37th Meeting British Assoc. for the Advanc. of Sci., Dundee (1867) 489—512.
- [14] E. Bishat, R. Blondlot, Sur un électromètre absolu, à indications continues, C. R. hebdom. des Séances Acad. Sci. 102 (1886), S. 753—756.
- [15] R. Ohlson, An Electrostatic Method for the Absolute Measurement of Voltage, Metrologia 3 (1967) 3, 33—37.
- [16] N. Elnekave, A. Fau, F. Delahayé, Evaluation provisoire du coefficient $2 e/h$ à partir de la détermination absolue du volt, Bull. BNM 7 (1976), 3—8.
- [17] A. Fau, Determination absolue du volt, Bull. BNM 36 (1979), 9—12.
- [18] T. Yamazaki, K. Shida, M. Kanno, Absolute Measurement of Voltage by an Electrostatic Energy-Changing Method, IEEE Trans. Instrum. Meas., 21 (1972), 372—375.
- [19] H. Hirayama i dr., 10-kV High-Accuracy DC Voltage Divider, IEEE Trans. Instrum. Meas., 23 (1974) 4, 314—317.
- [20] T. Yamazaki, M. Kobayashi, K. Shida, Note sur la mesure absolue du volt, Com. Consultat. d'Electricité, 14^e Session (1975) Doc. CCE/75—19.
- [21] T. Yamazaki, M. Kobayashi, Present Status of Absolute Volt Measurement in ETL, Com. Consultat. d'Electricité, 15^e Session (1978), Doc. CCE/78—12.
- [22] F. K. Harris, Progress Report on the NBS Absolute Volt Experiment, Com. Consultat. d'Electricité, 13^e Session (1972), Doc. CCE/72—7.
- [23] M. E. Cage, An Analysis of the Effects of Dynamic and Static Forces Present in the NBS SI Volt Experiment NBS, DC 20234, 206 str.
- [24] V. Sienknecht, Darstellung der elektrischen Spannungseinheit Volt, PTB-Bericht E-12, 1978, 47—72.
- [25] V. Sienknecht, P. Klitzmann, Die Gleichgewichtslagen der pendelnd auf gehängten Messelektrode einer Spannungswaage, PTB-Mitteilungen, vol. 90 (1980), 14—19.
- [26] V. Sienknecht, T. Funck, Determination of the SI Volt at the PTB, CPEM, Delft, The Netherlands (1984), 222.
- [27] V. Sienknecht, T. Funck, Determination of the SI Unit an the PTB, članak pripremljen za IEEE (1984).
- [28] M. Brezinščak, Mjerenje i računanje u tehnici i znanosti, Tehnička knjiga, Zagreb 1971.
- [29] G. Zichner, Absolute Kapazitätsnormale, Archiv für Technisches Messen, Z 131—1 (1933).
- [30] H. Prinz, Hochspannungsfelder, R. Oldenbourg Verlag München 1969.
- [31] M. Kochsiek, Fortschritte bei der Darstellung der Masseskaale, PTB-Mitteilungen 89 (1979) 6, 421—424.
- [32] Z. Haznadar, Teoretska elektrotehnika — Elektromagnetska teorija i polja, Liber, Zagreb 1972.
- [33] T. Bosanac, Teoretska elektrotehnika I, Tehnička knjiga, Zagreb 1973.
- [34] A. V. Astin, Measurement of relative and true power factors of air capacitors, J. Res. Nat. Bur. Stand., vol. 21, str. 425—456, 1938.
- [35] W. B. Kouwenhoven and E. L. Lotz, Absolute power factor of air capacitors, A. I. E. E. Trans., vol. 57, str. 766—772, 1938.
- [36] A. V. Astin, Nature of energy losses in air capacitors at low frequencies, J. Res. Nat. Bur. Stand., vol. 22, str. 673—695, 1939.
- [37] C. G. Koops, The Measurement of very small phase displacements, Philips Tech. Rev., vol. 5, str. 300—308, 1940.
- [38] B. D. Inglis, Frequency Dependence of Electrode Surface Effects in Parallel-Plate Capacitors, I. E. E. Transactions on Instr. and Measurement, vol. 24, No. 2, June 1975, str. 133—150.
- [39] C. A. Mead, Anomalous capacitance of thin dielectric structures, Phys. Rev., vol. 6, str. 545—546, 1961.

- [40] H. Y. Ku and F. G. Ullman, Capacitance of thin dielectric structures, J. Appl. Phys., vol. 35, str. 265–267, 1964.
- [41] Inženjersko tehnički priručnik u šest knjiga, Izdavačko poduzeće »Rad«, Beograd, 1966.

LITERATURA

(radovi koje su objavili suradnici na naponskoj vagi ETF-Zagreb)

I. Doktorati i magisteriji

- [I/1] B. Handžiski: Doprinos mjerenju napona naponskom vagom, magistarski rad, ETF Zagreb, 1980.
- [I/2] J. Butorac: Naponska vaga 10 kV, 2 g, magistarski rad, ETF Zagreb, 1980.
- [I/3] S. Milun: Problematika komparatora napona i izvora na osnovi Josephsonova efekta i Westonovih etalonskih članaka, doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1980.
- [I/4] D. Vujević: Prilozi problematici održavanja naponskog etalona, doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1982.
- [I/5] G. Gašljević: Most za mjerenje aksijalnih pomaka naponske vage, magistarski rad, ETF Zagreb, 1983.
- [I/6] B. Handžiski: Radijalni i aksijalni pomaci mjernih elektroda naponske vage 10 kV, 2 g, doktorska disertacija na ocjeni (predano komisiji za doktorate ETF-a u Zagrebu 7. 5. 1984)
- [I/7] J. Butorac: Mjerna nesigurnost naponske vage 10 kV, 10 g, doktorska disertacija u radu.
- [I/8] Lj. Nikoloski: Problematika preciznog otpornog visokonaponskog djelila za napon 10 kV, doktorska disertacija u radu (tema prihvaćena na Znanstveno-nastavnom vijeću ETF-a u Zagrebu dne 17. 9. 1983)
- [I/9] R. Dragović: Otporni most za mjerenje kapaciteta u vrhunskoj točnosti, doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1985.
- [I/10] B. Ferković: Samokalibrirajući induktivni most za mjerenje malih kapaciteta u vrhunskoj točnosti, dok. diser. u radu.

II. Objavljeni radovi

- [II/1] V. Bego, D. Vujević, J. Butorac, D. Markovinović, M. Boršić: Kompenzator za usporedbu etalona napona, Zbornik radova JUKEM 1978, 16 str.
- [II/2] V. Bego: Naponska vaga, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 87–107.
- [II/3] J. Butorac: Ispitivanje precizne vage 250 g, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 108–115.
- [II/4] B. Handžiski: Utjecaj radijalnih sila na stabilnost naponske vage 10 kV, 2 g, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 117–133.
- [II/5] B. Handžiski, J. Butorac, V. Bego: Mjerenje kapaciteta mjernih elektroda naponske vage 10 kV, 2 g, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 134–145.
- [II/6] G. Gašljević: Regulacija ravnotežnog položaja naponske vage, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 148–155.
- [II/7] J. Butorac, B. Handžiski, V. Bego: Rezultati mjerenja naponskom vagom 10 kV, 2 g, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 158–169.
- [II/8] J. Butorac: Procjena mjerne nesigurnosti naponske vage 10 kV, 2 g, Zbornik radova JUKEM 1980, I svezak, str. 170–182.
- [II/9] V. Bego: Naponska vaga kao primarni i sekundarni etalon napona od 1 V do 10 kV, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 469–479.
- [II/10] M. Brezinščak: Neki mjeriteljski problemi naponske i strujne vage na razini nesigurnosti $\pm 1 \cdot 10^{-6}$, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 480–493.
- [II/11] J. Butorac, B. Handžiski: Rezultati mjerenja naponskom vagom 10 kV, 2 g nakon rekonstrukcije 1981. godine, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 494–505.
- [II/12] B. Handžiski, J. Butorac: Mjerenje pomaka mjernih elektroda naponske vage, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 506–513.

- [II/13] V. Bego: Samokalibrirajući most za mjerenje kapaciteta, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 514—523.
- [II/14] R. Dragović: Analiza mjerne nesigurnosti mosta za mjerenje kapaciteta naponske vage, Zbornik radova JUKEM 1982, str. 524—533.
- [II/15] V. Bego: Mjerenje površinskih pojava na elektrodama zračnih kondenzatora pomoću kulonmetra, Zbornik radova JUKEM, 1982.
- [II/16] Lj. Nikoloski: Ispitivanje visokonaponskog djelila naponske vage, Zbornik radova JUKEM, 1982.
- [II/17] G. Gašljević: Diferencijalni transformator za mjerenje otklona naponske vage, Zbornik radova JUKEM, 1982.
- [II/18] M. Brezinščak: Nekaj metroloških problemov v zvezi z napetostno tehniko na stopnji regotovosti $1 \cdot 10^{-6}$, Elektrotehniški vestnik 1983, Vol. 50, br. 4, str. 191—197.
- [II/19] V. Bego, J. Butorac, G. Gašljević: Naponska vaga 10 kV, 2×5 g s nesigurnošću ispod $0,5 \cdot 10^{-6}$, Strojarstvo 27 (1985) 2, Zagreb 1985, str. 73—77.
- [II/20] V. Bego, J. Butorac, B. Handžiski: Voltage Balance with an Uncertainty below 0,5 ppm, CPEM (Conference Precision Electromagnetic Measurement), Delft 1984, str. 37—38.
- [II/21] V. Bego, J. Butorac, G. Gašljević: Messungen von Oberflächenerscheinungen an Elektroden von Luftkondensatoren mittels Coulombmeter, rukopis pripremljen za objavljivanje u PTB Mitteilungen, Braunschweig 1984.

III. Interni elaborati

- [III/1] V. Bego, J. Butorac: Naponska vaga, elaborat ETF Zagreb OEM-E-08/78, 1978, 80 str.
- [III/2] V. Bego, D. Vujević, J. Butorac, D. Markovinović, M. Boršić: Kompenzator za usporedbu etalona napona, elaborat ETF Zagreb OEM-E-07/78, 1978, 55 str.
- [III/3] V. Bego: Proračun i konstrukcija termostatisane i zabrtvljene naponske vage, elaborat ETF Zagreb, 1980, 350 str.
- [III/4] V. Bego: Naponska vaga na ETF Zagreb kao zamjena za strujnu vagu, znanstveni kolokvij na ETF Zagreb, 1980.
- [III/5] J. Butorac: Početna iskustva u radu s naponskom vagom, elaborat ETF Zagreb OEM-E-05/80, 1980, 40 str.
- [III/6] V. Bego, J. Butorac, D. Matić: Dokumentacija naponske vage 10 kV, 2 g, elaborat ETF Zagreb OEM-E-02/80, 1980, 50 str.
- [III/7] J. Butorac, B. Handžiski: Ispitivanje vage 10 kV, 2 g, elaborat ETF Zagreb OEM, 1980, 80 str.
- [III/8] J. Butorac, B. Handžiski, G. Gašljević: Mjerenja s naponskom vagom 10 kV, 2 g nakon rekonstrukcije 1981. godine, elaborat ETF Zagreb OEM, 1981, 95 str.
- [III/9] J. Butorac: Analiza mjernih rezultata ostvarenih naponskom vagom 10 kV, 2 g, elaborat ETF Zagreb OEM, 1982, 40 str.
- [III/10] V. Bego & Co.: Konstrukcijska dokumentacija naponske vage 10 kV, 10 g, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 210 str.
- [III/11] V. Bego: Proračun mehaničke vage s vrpcama, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 30 str.
- [III/12] V. Bego i suradnici: Sustav za horizontalno ugađanje ovješene elektrode, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 21 str.
- [III/13] V. Bego, K. Poljančić: Uređaj za ispitivanje ovjesnih vrpca i ispitivanje uzoraka, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 15 str.
- [III/14] V. Bego, J. Butorac, N. Golić: Konstrukcija i izvedba modela ovješene elektrode, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 30 str.
- [III/15] V. Bego: Utjecaj nagiba između visokonaponske i ovješene elektrode, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 18 str.
- [III/16] V. Bego: Tolerancije elektroda za mjerenje vertikalnih pomaka ovješene elektrode, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 24 str.
- [III/17] V. Bego: Razvoj metode za mjerenje vertikalnih pomaka s pomoću nabijene elektrode, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 25 str.
- [III/18] V. Bego, S. Bobeta: Uređaj za ovješanje i podizanje utega od 5 g, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 25 str.
- [III/19] V. Bego: Eksperimentalno određivanje horizontalne radnje, elaborat ETF Zagreb OEM, 1983, 35 str.

- [III/20] V. Bego: Korekcija omjera K., elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 16 str.
- [III/21] V. Bego: Proračun rubnih kapaciteta ovisne elektrode, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 18 str.
- [III/22] V. Bego, J. Butorac, K. Poljančić: Razvoj i izvedba elektroničke libele, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 25 str.
- [III/23] V. Bego, K. Poljančić: Elektronički manometar, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 23 str.
- [III/24] V. Bego, R. Dragović: Izvedba mosta MEC-5 za mjerenje kapaciteta naponske vage, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 18 str.
- [III/25] R. Dragović, J. Butorac: Ispitivanje mosta MEC-5, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 80 str.
- [III/26] J. Butorac, G. Gašljević: Šestokanalni termometar za mjerenje i regulaciju temperature naponske vage, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 31 str.
- [III/27] J. Butorac, G. Gašljević: Ispitivanje utjecaja nečistoća na površinama metalnih elektroda pločastog kondenzatora, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 34 str.
- [III/28] J. Butorac: Eksperimentalna provjera sastavnica mjernog rezultata naponske vage 10 kV, 10 g, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 75 str.
- [III/29] B. Handžiski, J. Butorac: Baždarenje uređaja za mjerenje i upravljanje naponskom vagom 10 kV, 10 g, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 64 str.
- [III/30] Lj. Nikolski: Temperaturni utjecaji na točnost određivanja omjera VN-djelila, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 48 str.
- [III/31] S. Milun: Izbor parametara za izradu ultrapreciznih otpornika od 20 k Ω , elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 37 str.
- [III/32] J. Butorac, M. Crnković, B. Handžiski, K. Poljančić: Ispitivanje mehaničkih karakteristika naponske vage, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983, 42 str.
- [III/33] V. Bego: Selbstkalibrierende Messbrücke für Kapazitätssmessungen, prijevod članka ad II/13 na njemački jezik.
- [III/34] V. Bego, J. Butorac, B. Handžiski, G. Gašljević, K. Poljančić, Lj. Nikolski: Izvještaj o ispitivanju naponske vage 10 kV, 10 g na Elektrotehničkom fakultetu u Zagrebu, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1983.
- [III/35] V. Bego, J. Butorac: Pregled pogrešaka naponske vage, elaborat ETF Zagreb OEEM, 1984, 90 str.
- [III/36] J. Butorac, B. Handžiski: Rezultati mjerenja s naponskom vagom 10 kV, 10 g od oktobra 1983. do februara 1984., elaborat ETF Zagreb OEEM, 1984, 120 str.
- [III/37] V. Bego: Analiza mogućnosti poboljšanja točnosti naponske vage za 10 kV i 2×5 g, elaborat ETF Zagreb, 1984, 60 str.
- [III/38] V. Bego: Određivanje integrala metodom aproksimacije, Elektrotehnički fakultet (rad za znanstveni projekt »Mjerna tehnika«), Zagreb 1984, 18 str.
- [III/39] V. Bego: Hidrauličko upravljanje naponskom vagom, Elektrotehnički fakultet (rad za znanstveni projekt »Mjerna tehnika«), Zagreb 1984, 37 str.
- [III/40] M. Breznićak: Težno ubrzanje u naponskoj vagi, elaborat ETF Zagreb, OEEM 1984, 18 str.
- [III/41] V. Bego: Konstrukcijska dokumentacija naponske vage ETF-84, Elaborat ETF Zagreb OEEM, 1984, 430 str.
- [III/42] V. Bego: Metoda samokalibracije visokonaponskog otpornog djelila, Elektrotehnički fakultet (rad za znanstveni projekt »Mjerna tehnika«), Zagreb 1985, 32 str.

DJELOMIČNI POPIS OZNAKA UPOTREBLJAVANIH U FORMULAMA

A_L	induktivitet jezgre s jednim zavojem	C	kapacitet
B	magnetska indukcija	C_{11}	kapacitet između elektroda u donjem položaju
B	razmak između krakova vage	C_g	kapacitet između elektroda u gornjem položaju

C_r	kapacitet ruba elektrode	M_y	elektrostatski moment koji zakreće ovješenu elektrodu oko osi y
C_u	naponska osjetljivost vage	N	broj zavoja
C_1	kapacitet po jedinici duljine	N_A	Avogadrova konstanta
$C_{z/1}$	kapacitet između visokonaponske i ovještene elektrode	P	vjerojatnost
$C_{z/1-4}$	kapacitet visokonaponske elektrode prema ovješnoj elektrodi i oklopu	Q	električni naboj
D	direkcionni moment	R	djelatni otpor
D	promjer	R_1	otpor donjeg dijela visokonaponskog djelila
D_{sr}	srednji promjer	R_2	otpor gornjeg dijela visokonaponskog djelila
E	jakost električnog polja	S	presjek, površina
E	modul elastičnosti	S	osjetljivost
E_m	dopuštena maksimalna jakost električnog polja	T	titrajno vrijeme
F	sila	U	efektivna vrijednost napona
F	Faradayeva konstanta	U_a	nazivni napon
F_e	vertikalna elektrostatska sila	U_v	napon vage
F_k	težina kojom su opterećene vrpce koje nose krakove vage	U_N	napon etalona napona
F_m	težina etalonskog utega umanjena za uzgon	U_D	pomoćni napon za ugađanje ravnoteže vage
F_o	težina ovještene elektrode	W	energija
F_{zo}	vertikalna elektrostatska sila u centričnom položaju elektroda	X	reaktancija
		Z	impedancija
F_x	sila u smjeru osi x	a_1	efektivna duljina ovještene elektrode pri proračunu njenog horizontalnog zakretanja razmak između elektroda (sl. 6.2)
F_y	sila u smjeru osi y	a	
I	efektivna vrijednost struje	c	brzina svjetlosti
J	moment tromosti	d	debljina elektrode
K	srednja vrijednost omjera visokonaponskog djelila pri vaganju — izrazi (4.26) i (7.3)	d_o	debljina stijenke ovještene elektrode
K_z	omjer visokonaponskog djelila kod vertikalnog razmaka visokonaponskih elektroda z	e	naboj elektrona
L_h	udaljenost hvatišta horizontalne sile od ovjesišta	f	progib vrpce
L_1	udaljenost indikatora otklona od ovjesišta	f_e	plošna gustoća elektrostatske sile
L_o	udaljenost težišta ovještene elektrode od ovjesišta	f_o	težina ovještene elektrode po jedinici površine
L_1	duljina krakova vage na kojima visi ovješena elektroda, duljina ovještene elektrode	g	ubrzanje sile teže
L_2	duljina visokonaponske elektrode	h	Planckova konstanta
$L_{2\text{ ef}}$	efektivna duljina visokonaponske elektrode	h_1	visina ovještene elektrode
M	moment	h_2	visina visokonaponske elektrode
M_a	elektrostatski moment koji zakreće ovješenu elektrodu oko osi z	k	konstanta vrpce — izraz (5.3)
$M\beta$	elektrostatski moment koji zakreće ovješenu elektrodu oko osi x	l	duljina vrpce
		l_k	duljina vrpca što nose krakove vage
		l_o	duljina vrpce što nose ovješenu elektrodu
		l'	udaljenost okretišta napete vrpce (sl. 5.1)
		l''	nadomjesna duljina napete vrpce — izraz (5.30)

l''_{ox}, l''_{oy}	nadomjesne duljine napetih vrpca što nose ovješenu elektrodu u smjeru osi x, odnosno y — izrazi (5.45) i (5.46)	α, α_d	vertikalni razmak između referentne ravnine i gornjeg ruba visokonaponske elektrode u donjem položaju
l''_{kx}, l''_{ky}	nadomjesne duljine napetih vrpca što nose krakove vage u smjeru osi x, odnosno y — izrazi (5.48), (7.8) i (7.9)	z_g	vertikalni razmak između referentne ravnine i gornjeg ruba visokonaponske elektrode u gornjem položaju
m	masa	z_m	razlika ($z_g - z_d$) (sl. 4.14)
m_E	masa etalonskog utega	z_n	vertikalni razmak između gornjih rubova ovještene i visokonaponske elektrode u gornjem položaju (sl. 4.14)
m_k	masa što je nose vrpce s kojima su ovješeni krakovi vage	z_p	prekrivanje ovještene i visokonaponske elektrode u donjem položaju
m_o	masa ovještene elektrode	z_r	vertikalni razmak između donjeg ruba ovještene elektrode i uložaka koji spajaju visokonaponske elektrode (sl. 6.8)
n	recipročna vrijednost omjera visokonaponskog djelila	α	otkloni prema osi x (sl. 5.15); indeksi o i v za ovješenu i visokonaponsku elektrodu, a k za krakove vage
p	relativna pogreška	α	temperaturni koeficijent rastezanja
P	omjer elektrostatske sile elektrode i njene ploštine (odjeljak 6.7)	β	otkloni prema osi z u smjeru osi y (sl. 5.8 i 5.9), otklon mehaničke vage
r	polumjer, radijus zakrivljenosti	γ	otkloni prema osi z u smjeru osi x (sl. 7.5)
s	razmak između elektroda	ε	dielektričnost
s	stepen prigušenja	η	faktor iskorištenja električnog polja
t	vrijeme	θ	temperatura
u	mjerna nesigurnost	ϱ_a	gustoća zraka ili plina
x	odstupanje elektroda od centričnog položaja u smjeru osi x	ϱ_m	gustoća utega
x_{oL}, x_{oD}	otkloni ovještene elektrode pod naponom u smjeru osi x na lijevoj, odnosno desnom kraju	σ	specifično naprezanje
x_L, x_D	odstupanje visokonaponskih elektroda u smjeru osi x na lijevoj odnosno desnom kraju od centričnog položaja	σ_{dop}	najveće dopušteno specifično naprezanje
y_u	razmak simetrala kapacitivnih pretvornika za mjerenje horizontalnih pomaka ovještene i visokonaponskih elektroda u smjeru osi x	ν	omjer širine i debljine vrpce
		ν	omjer reaktancija X_{Cs}/X_s (odjeljak 8.5)

SUMMARY

Voltage Balance 10 kV and 2×5 g

Vojislav Bego

After many years of dealing with precise electromagnetic measurements, the Department for Electrical Engineering and Electrical Measurements at the Faculty of Electrical Engineering, University of Zagreb, started the development of a voltage balance in the spring of 1978. In the year 1981 they made and tested the voltage balance for 10 kV and a 2 g weight with cylindrical electrodes. Already

this balance had two important characteristics: the high voltage electrode could be put into a central position where horizontal electrostatic forces are not active, and the possibility of achieving a vertical displacement of the high voltage electrode of 50 mm, in order to have the partial derivation dC/dz , which is difficult to measure, replaced by the difference of capacitance at displacement of 50 mm. Realised was also the elastic suspension of the standard weight which could be very fine continuously raised with the help of a special raising device. At the end of the year 1983 the work on the voltage balance for 10 kV and 10 g whole procedure of substituting the weight of the weight by electrostatic force, the voltage balance remains in equilibrium. Thus the uncertainty of voltage measurement was reduced to less than 1 ppm.

In further theoretical research found were the advantages of plate electrodes in case, when the earthed electrode is suspended by means of two distanced strips. With this the influence of the horizontal forces was reduced, and achieved was also a better ratio of the electrostatic forces versus weight of suspended electrode. At the end of the year 1983 the work on the voltage balance for 10 kV and 10 g with plate electrodes was completed; the internal uncertainty was significantly under 1 part per million.

Presently it has been worked on the improved version of such a voltage balance, where the raising of the weight, the horizontal and the vertical displacement of the high voltage electrode are carried out through the automatic remote control by means of a special closed hydraulic system.

In this paper summarized are the theoretical research and the analyses on which the development of the voltage balance was based.

In the second chapter given is a survey of the existing uncertainty of measurement when determining the current unit by means of a current balance with help of Faraday's constant and the gyromagnetic ratio of the proton γ in a low and high magnetic field. The distortion of results is grater than it can be noticed from the declared uncertainties of the measurement.

In the third chapter presented is a short survey of voltage balances which have been produced until now.

In the fourth chapter presented is the basic principle of the ponderometrical determination of voltage unit and analysed are the characteristics of the capacitance transducers with changeable distance between the electrodes. Discussed are also the characteristics of transducers with cylindrical and plate electrodes.

The fifth chapter deals in more details with the theory of beam balance with two pairs of suspension strips. Given are the expressions for the calculation of the sensitivity and displacement, caused by the longitudinal and transversal horizontal forces as well as noncorresponding of the gravity force of the standard weight to vertical electrostatic force. Described is the automatic maintaining of the equilibrium through a feedback control between the displacing of the suspended electrode and voltage on the balance. Described is also the mechanism for gradual raising of the weight.

In the sixth chapter presented is the calculation of the size of electrodes and their edges, where the utilization factor of the field is 0,95. Presented is also the calculation of mechanical strenght of electrodes necessary to assure the bending of electrodes because of electrostatic forces, does not make an error grater than 0,01 ppm. Analysed is the influence of imperfection of mechanical treatment upon the measurement. Described is the method through which the differences of the capacitance between the electrodes by alternating and direct current, because of surface-effects on metal electrodes, can be experimentally determined.

In the eight chapter described are capacitance transducers used on the voltage voltage can be determined from the total change of the capacitance between the electrodes and the belonging vertical displacement without any correction. Defined are the horizontal displacements of the suspended electrode under the voltage, where the corrections because of the horizontal electrostatic works can be neglected. Described is also the device for the automatic remote centring of the high voltage electrode with the possibility of very fine adjustment to within a few nanometers.

In the eight chapter described are capacitance transducers used on the voltage balance for measurement of vertical and horizontal deviation of the suspended

and high voltage electrode with which the displacements of order of a few nanometers can be measured.

In the ninth chapter described is a high voltage divider for 10 kV composed of 1000 equal resistors with temperature coefficient of resistance less than 1 ppm. They are positioned in such a way, that when under current, they get equally heated. Foreseen is an output for 10 V and 100 intermediate connections for voltages of 100 V. Presented is the calibrating procedure in cold state and under current.

The analyses presented in the paper show, that all internal errors of the described voltage balance can be reduced under 0,1 ppm, so that the error in determination of the voltage unit depends only on the external physical quantities like: mass of the standard weight, the capacitance of the standard capacitor, the displacement of 50 mm, the gravity acceleration and some others, but of minor importance. This confirms the review of the results achieved on ETF volt balances in 10-th chapter. The measurement results obtained in the period from July 1981 to June 1985 with two volt balances of different design in various conditions and with the help of different measurement procedures correspond very well. Taking into consideration the weights of each result, the mean difference between the volt determined by means of two ETF volt balances and V_{76-B1} equals $+7,08$ ppm. The standard deviation of the differences ($V_{ETF} - V_{76-B1}$) calculated from single measurement results and their mean value is only 0,28 ppm.

The most important experiments enabling the estimation of uncertainty of two completed volt balances as well as the reasons for expecting even better results with the new volt balance in completion are presented in

Theoretical considerations and numerous measurement results show that from the new balance we can expect a decrease of uncertainty when comparing the electrostatic force and the weight to less than 0,1 ppm. Similar can be said for H—V divider. The support of PTB and NBS in calibration of the mass and capacitance standards, in measurement of the vertical displacements of the electrodes and the local gravitational acceleration as well as a more reliable transfer of voltage has been determined. Thus, one can expect that the volt unit could be realised with an uncertainty of 0,15 to 0,3 ppm. This would present a significant contribution to better determination of electromagnetic units.