

Izboljšana metoda kalibracije etalonov kapacitivnosti na sekundarnem nivoju

Miha Kokalj¹, Borut Pinter¹, Rado Lapuh^{1,2}, Matjaž Lindič¹, Boštjan Voljč¹

¹SIQ – Slovenski inštitut za kakovost in meroslovje

²MIRS – Urad RS za meroslovje

miha.kokalj@siq.si, borut.pinter@siq.si, rado.lapuh@siq.si

Abstract

Purpose of this article is to present improved method for calibration of working capacitance standards. Working capacitance standards, used in calibration laboratories for calibration on the secondary level, are presented. Working capacitance standards were calibrated using capacitance bridge GR 1615A. Capacitance bridge was analyzed in detail and main factors that contribute to measuring uncertainty were discussed.

In main part of this article, new method for calibration of working capacitance standards, using transformer ratio bridge, is presented. Mathematical model of the measurement and uncertainty sources are explained.

Measuring results for new calibration method are presented. Obtained results were compared to results of comparable calibration laboratories. Calibration capabilities with previous and new method were compared.

1 Uvod

Dosedanje merilne zmogljivosti merjenja kapacitivnosti niso zadovoljevale potreb v meroslovnem laboratoriju SIQ, zato smo v ta namen razvili novo metodo kalibracije etalonov kapacitivnosti. Merilne negotovosti smo določili po metodi GUM [1, stran 21, 22].



Slika 1: Delovni etalon kapacitivnosti

Nova metoda zahteva zelo podrobno in celovito analizo vseh prispevkov merilne negotovosti. V tem članku so predstavljeni merilni postopki za kalibracijo

delovnih etalonov kapacitivnosti (Slika 1) pri frekvenci 1 kHz. Postopke smo razvili z uporabo opreme, ki je na voljo v meroslovnem laboratoriju SIQ.

Transformatorski mostič za merjenje kapacitivnosti in faktorja disipacije je najpogostejša naprava za kalibracijo etalonov kapacitivnosti na sekundarnem nivoju meroslovnih laboratorijev. Vse kalibracije smo izvedli v 3-terminalnem načinu, ker ta priključitev omogoča doseganje najnižjih negotovosti pri uporabljeni opremi.

2 Kalibracijski postopek

2.1 Kalibracijska priključitev

Za kalibracijo etalonov kapacitivnosti smo uporabili kalibrirani transformatorski mostič GR 1615A (Slika 2), ki omogoča 3-terminalni priklop. Etalon kapacitivnosti smo povezali na mostič s 3-terminalno priključitvijo. Uporabili smo dva kratka BNC kabla dolžine 15 cm. S tem smo zagotovili fiksno geometrijo priključnih vezi. To je zagotovilo večjo ponovljivost meritev in s tem nižjo merilno negotovost tipa A.



Slika 2: Mostič za merjenje kapacitivnosti

Etalon kapacitivnosti smo uravnovesili z internimi etaloni kapacitivnosti tako, da smo dobili ravnovesno stanje oz. ničelni odklon detektorja na mostiču. Odčitek ravnovesnega stanja je bil rezultat neznane vrednosti etalona kapacitivnosti. Kalibracije so bile izvedene pri frekvenci 1 kHz in pri nivoju 30 V. Pri teh nastavitvah ima uporabljeni mostič najboljše merilne zmogljivosti.

2.2 Matematični model meritve

Pred postopkom uravnovešanja je bilo na mostiču potrebno nastaviti generatorsko napetost, občutljivost detektorja in območje merjenja. Nato je sledilo uravnovešanje s spreminjanjem delilnega razmerja na internih etalonih kapacitivnosti. Vsi nastopajoči parametri pri postopku uravnovešanja se lahko povežejo v matematični model meritve kapacitivnosti C_S [2, stran 39], ki se zapiše kot (1):

$$C_S = M(N_1 C_{N_n} + N_2 C_{N_{n+1}} + N_3 C_{N_{n+2}} + N_4 C_{N_{n+3}} + N_5 C_{N_{n+4}} + N_6 C_{N_{n+5}}) + k_{temp} + k_u + k_l + k_n + k_{res}, \quad (1)$$

pri čemer je:

- M - množilni faktor, ki se spreminja glede na merilni doseg,
- N - transformatorsko razmerje n -tega internega etalona kapacitivnosti C_{N_n} v ravnovesnem stanju,
- C_{N_n} - kalibrirana vrednost n -tega internega etalona kapacitivnosti,
- k_{temp} - korekcija kapacitivnosti C_S zaradi temperaturnega lezenja internih etalonov kapacitivnosti,
- k_u - korekcija kapacitivnosti C_S zaradi občutljivosti detektorja,
- k_l - korekcija kapacitivnosti C_S zaradi časovnega lezenja internih etalonov kapacitivnosti,
- k_n - korekcija kapacitivnosti C_S zaradi odčitka, ko na mostič ni povezan etalon kapacitivnosti,
- k_{res} - korekcija kapacitivnosti C_S zaradi ločljivosti merilnega mostiča.

2.3 Zagotavljanje sledljivosti

Sledljivost kalibracije delovnih etalonov kapacitivnosti na sekundarnem nivoju je zagotovljena s kalibracijo mostiča. Mostič ima vgrajene etalone kapacitivnosti, ki jih je mogoče umeriti. Umerjanje poteka tako, da se najprej umeri interni etalon kapacitivnosti z nominalno vrednostjo 100 pF. To je bilo zagotovljeno z etalonskim kondenzatorjem proizvajalca Andeen Hagerling 11A, nominalne vrednosti 100 pF. Ta kondenzator je bil kalibriran v italijanskem nacionalnem meroslovnem inštitutu INRIM z merilno negotovostjo 2 μ F/F. Umerjanje poteka tako, da kalibrirani kondenzator priključimo na mostič, prikazovalnik na mostiču pa nastavimo na kazanje 100,0000 pF. Nato toliko časa nastavljam internemu etalonu kapacitivnosti nominalne vrednosti 100 pF, da dobimo ničelni odklon na mostiču. V tem primeru sta kapacitivnosti internega in zunanega etalona nastavljeni na isti vrednosti. Ostali etaloni kapacitivnosti v mostiču so bili umerjeni z uporabo transformatorskih razmerij 10:1. Umerjanje poteka tako, da umerjenemu etalonu kapacitivnosti nominalne vrednosti 100 pF spreminjamo transformatorsko razmerje in tako prenašamo umerjeno vrednost na vse ostale etalone kapacitivnosti v mostiču. Kalibracija merilnega mostiča za merjenje kapacitivnosti je sicer kompleksen postopek, ki je opisan v obsežnem dokumentu. Postopek kalibracije mostiča je bil razvit v meroslovnem laboratoriju SIQ.

2.4 Izračun merilne negotovosti

Pravilen matematični model meritve je osnova za izračun merilne negotovosti [2, stran 40 do 44]. Merilni mostič ima 8 internih etalonov kapacitivnosti naslednjih nominalnih vrednosti: 1000 pF, 100 pF, 10 pF, 1 pF, 100 fF, 10 fF, 1fF in 100 aF, kot je podano v tabeli 1.

Interni etaloni kapacitivnosti	[pF]
C ₁	1000
C ₂	100
C ₃	10
C ₄	1
C ₅	0,1
C ₆	0,01
C ₇	0,001
C ₈	0,0001

Tabela 1: Interni etaloni kapacitivnosti

Odčitek na mostiču C_S se vedno dobi z uporabo kompleta šestih internih etalonov kapacitivnosti, ki so določeni glede na merilni doseg. Torej obstajajo tri kombinacije uporabe kompleta šestih internih etalonov kapacitivnosti, in sicer od C_1 do C_6 , od C_2 do C_7 ali od C_3 do C_8 .

Za parametre, ki so v enačbi (1) med seboj povezani z operacijo množenja, se merilna negotovost spreminja glede na koeficiente občutljivosti ci , ki se izračunajo s parcialnimi odvodi. Faktorji občutljivosti nam povedo, kolikšen je prispevek merilne negotovosti določenega parametra zaradi soodvisnosti z drugimi parametri. Koeficiente občutljivosti ci izračunamo po enačbah (2, 3, 4 in 5). Primeri enačb veljajo za merilni doseg, kjer so uporabljeni interni etaloni kapacitivnosti od C_1 do C_6 , ko sta torej indeksa j in n od 1 do 6.

$$ci_M = \frac{\partial C_S}{\partial M} = \sum_{n=1}^{j=6} N_j C_{N_n} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^6 ci_{N_j} = \sum_{j=1}^6 \frac{\partial C_S}{\partial N_j} = \sum_{n=1}^6 C_{N_n} \quad (3)$$

$$\sum_{n=1}^6 ci_{C_{N_n}} = \sum_{n=1}^6 \frac{\partial C_S}{\partial C_{N_n}} = \sum_{j=1}^6 N_j \quad (4)$$

Parcialni odvodi po koeficientih k_{temp} , k_u , k_l , k_n in k_{res} so enaki 1, saj samostojno nastopajo v enačbi (1).

$$ci_{k_{temp}} = ci_{k_u} = ci_{k_l} = ci_{k_n} = ci_{k_{res}} = 1 \quad (5)$$

2.5 Prispevki k merilni negotovosti

Opisna razlaga vseh prispevkov negotovosti je informacija, ki pojasnjuje izvor določene merilne negotovosti. Opis tudi pojasnjuje sledljivost kalibracije do primarnega etalona [2, stran 42 do 44].

Negotovost tipa A ($uA(C_s)$)

Kapacitivnost C_s je bila izračunana kot srednja vrednost desetih odčitkov na mostiču. Standardna negotovost meritve je bila določena kot standardna deviacija srednje vrednosti desetih izmerkov. Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na normalno.

Množilni faktor (M)

Množilni faktor je določen glede na izbiro merilnega dosega. Njegova negotovost izhaja iz kalibracijskega certifikata merilnega mostiča in je podana s faktorjem pokritja 2. Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na normalno.

Transformatorsko razmerje j -tega položaja ročice (N_j)

N_j je trenutno stanje ročice za nastavljanje transformatorskega razmerja. Njegova negotovost znaša $5 \cdot 10^{-6} \cdot N_j$ in izhaja iz kalibracijskega certifikata merilnega mostiča in je podana s faktorjem pokritja 2. Verjetnostna porazdelitev negotovosti je bila ocenjena na normalno.

Kapacitivnost n -tega internega etalona kapacitivnosti (C_{Nn})

Vrednosti internih etalonov kapacitivnosti in njihove negotovosti so bile pridobljene iz kalibracijskega certifikata merilnega mostiča. Negotovosti so bile podane s faktorjem pokritja 2. Verjetnostna porazdelitev negotovosti je bila ocenjena na normalno.

Korekcija kapacitivnosti C_s zaradi temperaturnega lezenja (k_{temp})

Korekcija kapacitivnosti zaradi temperaturnega lezenja je bila določena na 0 F. Negotovost je bila določena s strani proizvajalca oz. iz specifikacij merilnega mostiča, ki določa negotovost $5 (\mu\text{F}/\text{F})/^\circ\text{C}$. Kalibracija etalonov kapacitivnosti je bila opravljena v laboratorijskih pogojih, kjer je bila temperatura kontrolirana. Temperaturno nihanje v laboratoriju je bilo manj kot $\pm 1^\circ\text{C}$. Negotovost je bila tako določena na $5 \mu\text{F}/\text{F}$ izmerjene vrednosti kapacitivnosti C_s . Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na pravokotno.

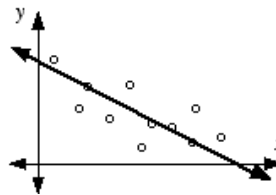
Korekcija kapacitivnosti C_s zaradi občutljivosti detektorja (k_u)

Korekcija se nanaša na nepopolno ravnovesje mostiča, ko je sicer detektor na minimalni možni vrednosti in je mostič v ravnovesju. Korekcija je določena na 0 F z negotovostjo 30 aF. To izhaja iz specifikacij proizvajalca. Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na pravokotno.

Korekcija kapacitivnosti C_s zaradi časovnega lezenja internih etalonov kapacitivnosti (k_t)

Časovno lezenje kapacitivnosti internih etalonov je bila določena na osnovi analize razlik med kalibriranimi vrednostmi etalonov kapacitivnosti iz vseh kalibracijskih certifikatov. Vrednost lezenja je bila ocenjena na 0 F. Negotovost lezenja je bila izračunana kot linearna prilagoditev vrednosti kapacitivnosti iz vseh kalibracijskih certifikatov, kot prikazuje skica na

sliki 3. Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na pravokotno.



Slika 3: Linearno prilagajanje

Korekcija kapacitivnosti C_s zaradi odčitka, ko na mostič ni povezan etalon kapacitivnosti (k_n)

Ničelna korekcija je drugačna za različne merilne priključitve. Ničelna korekcija pri 3-terminalni priključitvi je enaka 0 F z merilno negotovostjo, ki je bila pridobljena v kalibracijskem certifikatu za merilni mostič. V 2-terminalni priključitvi mora biti ničelna korekcija vedno izmerjena in upoštevana pri končni meritvi. Verjetnostna porazdelitev negotovosti je bila ocenjena na pravokotno.

Korekcija kapacitivnosti C_s zaradi ločljivosti na mostiču (k_{res})

Ločljivost se nanaša na zadnji digit na prikazovalniku mostiča. Korekcija je bila ocenjena na 0 F z merilno negotovostjo polovico ločljivosti (6). Verjetnostna porazdelitev je bila ocenjena na pravokotno.

$$u_{k_{res}} = \frac{k_{res}}{2}. \quad (6)$$

2.6 Skupna merilna negotovost

Skupna merilna negotovost u_{C_s} (7) je bila izračunana na podlagi enačbe (1):

$$u_{C_s} = \sqrt{(uA_{C_s})^2 + \left(\frac{uM \cdot c_{iM}}{2}\right)^2 + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{uN_j \cdot c_{iN_j}}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^6 \left(\frac{uC_{N_n} \cdot c_{iC_{N_n}}}{2}\right)^2 + \frac{(uk_{temp})^2}{3} + \frac{(uk_u)^2}{3} + \frac{(uk_t)^2}{3} + \frac{(uk_n)^2}{3} + \frac{(uk_{res})^2}{3}}. \quad (7)$$

3 Rezultati

Z novo razvitim postopkom kalibracije etalonov kapacitivnosti smo ovrednotili merilno negotovost pri merjenju kapacitivnosti pri frekvenci 1 kHz [2, stran 45 do 51]. V meroslovnem laboratoriju SIQ uporabljamo delovne etalone kapacitivnosti, ki so bili kalibrirani tudi v NIST (National Institute of Standards and Technology, USA) in v NPL (National physical laboratory, UK). Oglejmo si primerjalni tabeli (Tabela 2 in 3) kalibracij pri frekvenci 1 kHz, kjer je podana izmerjena srednja vrednost (C_{SIQ} , C_{NIST} oz. C_{NPL}) in izračunana merilna negotovost (U_{SIQ} , U_{NIST} oz. U_{NPL}) etalonov kapacitivnosti za sedem različnih nominalnih vrednosti kapacitivnosti C_{nom} .

C _{nom}	C _{SIQ}	U _{SIQ}	C _{NIST}	U _{NIST}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
1	0,99985	0,00004	0,99988	0,00002
10	9,99867	0,00016	9,99895	0,00020
100	99,9907	0,0015	99,9918	0,0020
1000	1000,016	0,016	1000,016	0,020

Tabela 2: Primerjava kalibracij med SIQ in NIST

C _{nom}	C _{SIQ}	U _{SIQ}	C _{NPL}	U _{NPL}
[nF]	[nF]	[nF]	[nF]	[nF]
10	9,9995	0,0002	9,9994	0,0003
100	99,986	0,002	99,985	0,003
1000	999,95	0,1	999,98	0,05

Tabela 3: Primerjava kalibracij med SIQ in NPL

Kalibracije vseh nominalnih vrednosti so med seboj ekvivalentne po faktorju DE [2, stran 49 do 50].

Rezultate kalibracij etalonov kapacitivnosti na sekundarnem nivoju smo primerjali z rezultati, dobljenimi v NIST in NPL. Ugotovili smo, da so naši postopki ustrezni, saj se rezultati kalibracij delovnih etalonov kapacitivnosti SIQ skladajo z NIST in NPL.

Na podlagi opisanih postopkov so bile pripravljene nove kalibracijske in merilne zmogljivosti CMC, ki so bile poslone v regionalno presojo v okviru EURAMET za objavo CMC v bazi KCDB.

Kapacitivnost C (Nominalna vrednost)	Stare vrednosti CMC v [μ F/F]	Predlagane nove vrednosti CMC v [μ F/F]
1 pF	1300	30
10 pF	100	15
100 pF	100	7
1000 pF	100	15
10 nF	100	15
100 nF	100	20
1000 nF	120	100

Tabela 4: Izboljšane merilne zmogljivosti v meroslovnem laboratoriju SIQ

Postopki so prestali akreditacijsko presojo in se redno uporabljajo pri kalibraciji etalonov kapacitivnosti v meroslovnem laboratoriju SIQ. V tabeli 4 so zbrani stari in predlagani CMC-ji. Merilna zmogljivost je bila izboljšana pri vseh delovnih etalonih kapacitivnosti.

4 Zaključek

Na podlagi analize mostiča in terminalnih priključitev smo razvili matematični model meritve kapacitivnosti, ovrednotili merilne negotovosti nastopajočih

parametrov in izračunali skupno merilno negotovost merjenja kapacitivnosti na mostiču. Postopek smo opisali v dokumentu za merjenje kapacitivnosti, ki je bil potrjen s strani akreditacijske presoje.

Izboljšane kalibracijske zmogljivosti smo dosegli s podrobno analizo delovanja mostiča za merjenje kapacitivnosti. Preden smo izvedli kalibracije etalonov kapacitivnosti, je bilo potrebno kalibrirati mostič. Razvili in opisali smo postopek za kalibracijo mostiča, ki je bil potrjen s strani akreditacijske presoje. Postopek kalibracije mostiča je tako obsežen, da v tem članku ni bil predstavljen, vendar pa predstavlja osnovo za dosežene rezultate.

Vse CMC vrednosti so bile določene po opisanih postopkih, razen za primer kalibracije etalona kapacitivnosti nominalne vrednosti 100 pF. Merilni mostič ima možnosti priklopa zunanjega etalona kapacitivnosti, zato smo kalibracijo etalona kapacitivnosti nominalne vrednosti 100 pF izvedli s primerjavo z zunanjim etalom kapacitivnosti nominalne vrednosti 100 pF, ki smo ga uporabili tudi za kalibracijo internih etalonov kapacitivnosti v mostiču. Tak način kalibracije prinaša nižjo merilno negotovost, kot pri uporabi internih etalonov kapacitivnosti. Uporabljen zunanji etalon kapacitivnosti ima nižjo negotovost od notranjih etalonov kapacitivnosti. Ta način kalibracije je smiselno uporabiti samo v primeru, ko imamo na razpolago zunanji etalon kapacitivnosti, ki ima enako nominalno vrednost, kot merjeni kondenzator. Poleg tega mora biti zunanji etalon kapacitivnosti kalibriran z nižjo negotovostjo, kot jo imajo interni etaloni kapacitivnosti v merilnem mostiču. V tem primerju je takšna kalibracija smiselna.

Merilni postopki po novi metodi so bili priznani s strani akreditacijske presoje in pričakujemo, da bodo kmalu objavljeni v podatkovni bazi KCDB, kar pomeni, da bodo ti merilni postopki priznani na svetovnem nivoju.

Literatura

- [1] EURAMET project 1011, DFM Denmark, NPL United Kingdom, PTB Germany, Metrology - in short, 3rd edition, July 2008.
- [2] Miha Kokalj, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Univerzitetno diplomsko delo: Kalibracija etalonov kapacitivnosti na najvišjem meroslovnem nivoju, Ljubljana 2011

Izboljšana metoda kalibracije etalonov kapacitivnosti na sekundarnem nivoju

Miha Kokalj

Portorož, 21. 9. 2011



Vsebina

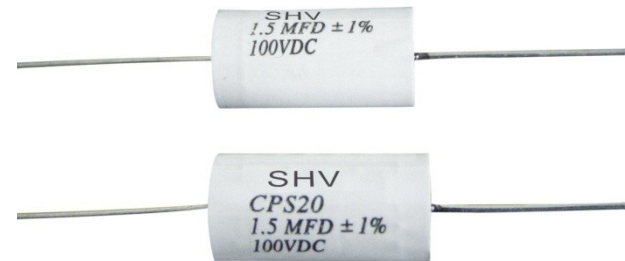
- Načini priključitve etalona kapacitivnosti na merilni instrument
- Delovanja mostiča za merjenje kapacitivnosti
- Nova kalibracijska metoda za kalibracijo delovnih etelonov kapacitivnosti
- Rezultati

Delovni etalon kapacitivnosti

Delovni etalon kapacitivnosti (4TP)

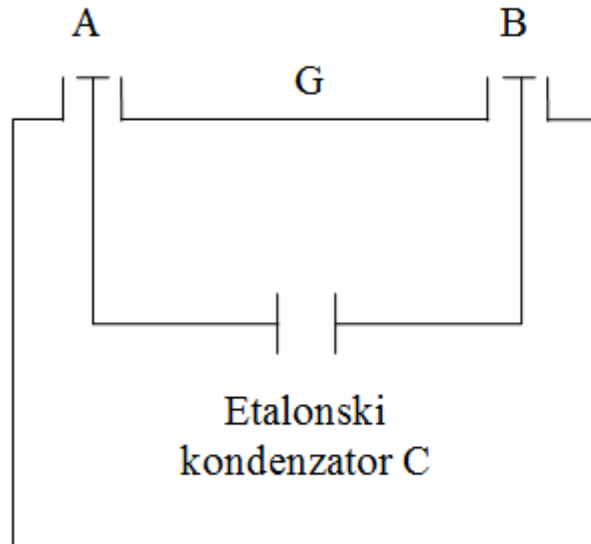


Žični kondenzator (2T)

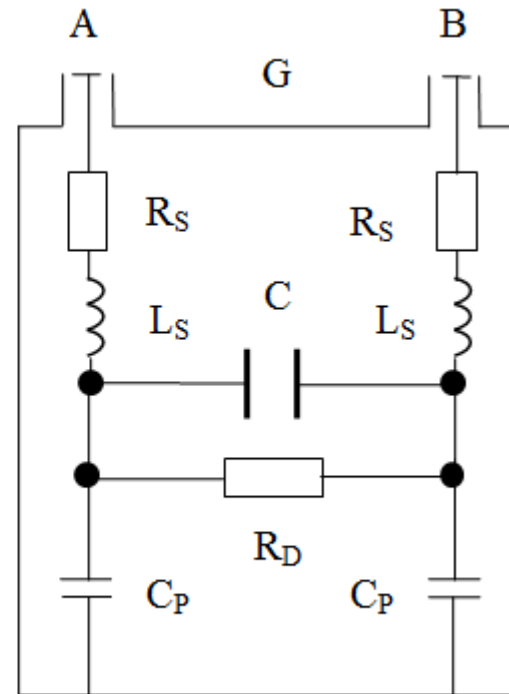


Model etalonskega kondenzatorja

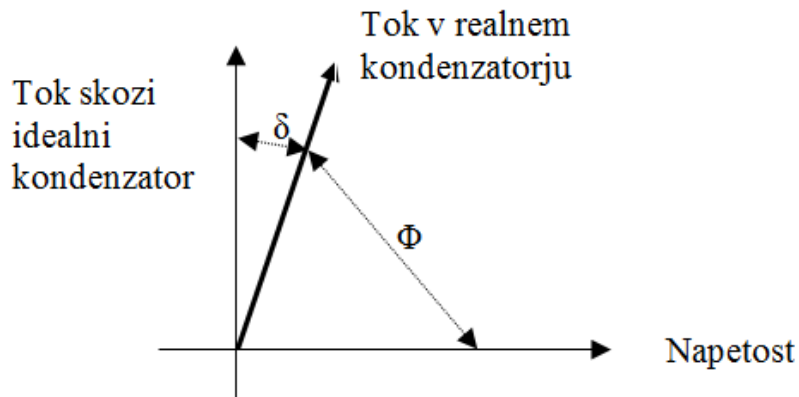
Idealni kondenzator



Realni kondenzator



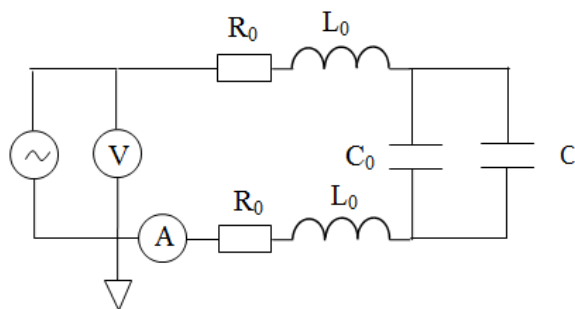
Fazni potek pri realnem kondenzatorju



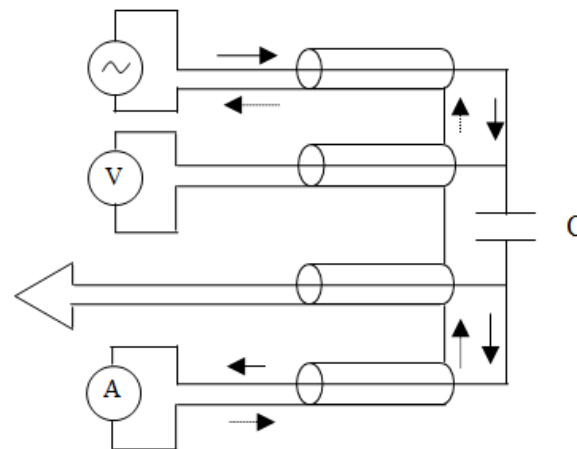
δ – izgubni kot
 φ – fazni kot

Načini priključitve etalona kapacitivnosti na merilni instrument

2 terminala



4 terminalni pari

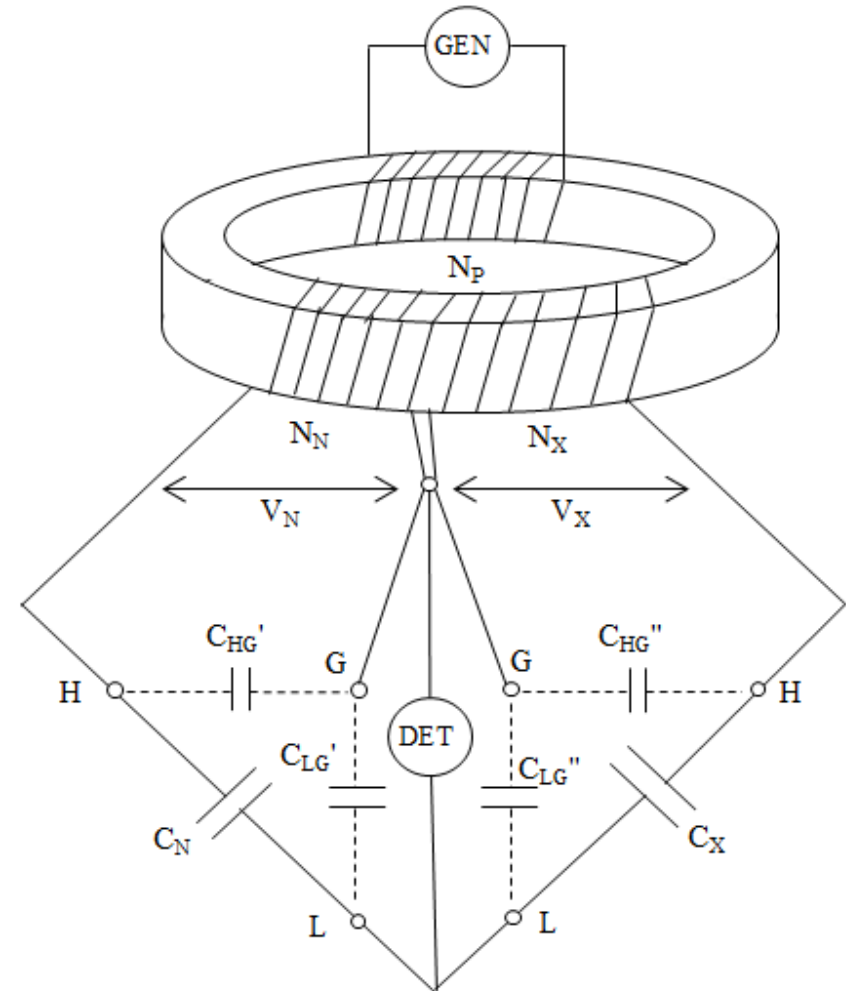


Delovanja transformatorskega mostiča za merjenje kapacitivnosti

Prednosti transformatorskega mostiča:

- Doseganje velike točnosti z uporabo transformatorskih razmerij do 1000:1
- Omogoča merjenje širokega kapacitivnega obsega
- Majhno lezenje
- Neobčutljivost na temperaturne razlike

$$V_N C_N = V_X C_X \quad \text{oz.} \quad \frac{C_X}{C_N} = \frac{V_N}{V_X} = \frac{N_N}{N_X}$$



Nova metoda za merjenje kapacitivnosti

- Podrobna in celovita analiza vseh prispevkov merilne negotovosti
- Kalibracija merilnega mostiča GR 1615A



Nova metoda za merjenje kapacitivnosti

- Matematični model meritve

$$C_X = M(N_1 C_{N_n} + N_2 C_{N_{n+1}} + N_3 C_{N_{n+2}} + N_4 C_{N_{n+3}} + N_5 C_{N_{n+4}} + N_6 C_{N_{n+5}}) + k_{temp} + k_u + k_l + k_n + k_{res}$$

- Izračun merilne negotovosti

$$u_{C_X} = \sqrt{\begin{aligned} & (u_{A_{C_X}})^2 + \left(\frac{u_M \cdot ci_M}{2}\right)^2 + \sum_{j=1}^6 \left(\frac{u_{N_j} \cdot ci_{N_j}}{2}\right)^2 + \sum_{k=1}^6 \left(\frac{u_{C_k} \cdot ci_{C_k}}{2}\right)^2 + \\ & + \frac{(uk_{temp})^2}{3} + \frac{(uk_{balance})^2}{3} + \frac{(uk_{drift})^2}{3} + \frac{(uk_{zero})^2}{3} + \frac{(uk_{res})^2}{3} \end{aligned}}$$

Rezultati

- Primerjava SIQ z NIST in NPL

C_{nom}	C_{SIQ}	U_{SIQ}	C_{NIST}	U_{NIST}
[pF]	[pF]	[pF]	[pF]	[pF]
1	0,99985	0,00004	0,99988	0,00002
10	9,99867	0,00016	9,99895	0,00020
100	99,9907	0,0015	99,9918	0,0020
1000	1000,016	0,016	1000,016	0,020

C_{nom}	C_{SIQ}	U_{SIQ}	C_{NPL}	U_{NPL}
[nF]	[nF]	[nF]	[nF]	[nF]
10	9,9995	0,0002	9,9994	0,0003
100	99,986	0,002	99,985	0,003
1000	999,95	0,1	999,98	0,05

Rezultati

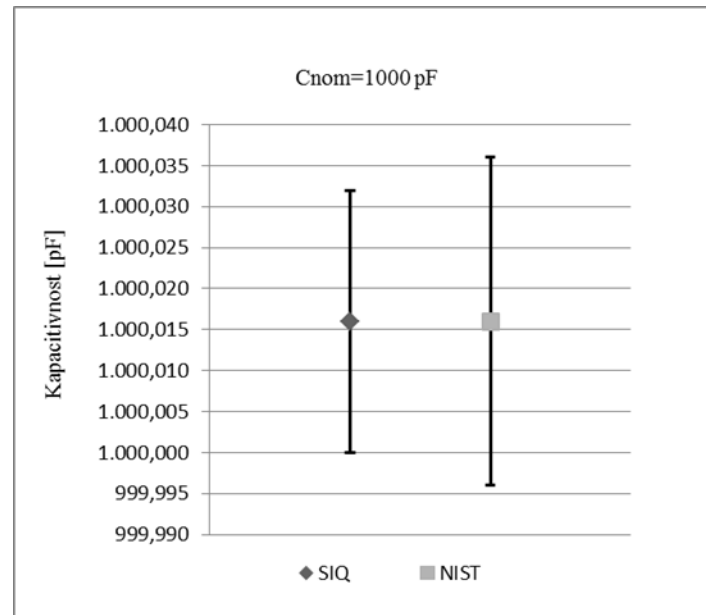
- Vse primerjane kalibracije so med seboj ekvivalentne (po faktorju DE)
- $DE < 1 \longrightarrow$ Ekvivalenca

$$DE = \frac{|C_{SIQ} - C_{NIST \text{ oz } NPL}|}{\sqrt{(U_{SIQ})^2 + (U_{NIST \text{ oz } NPL})^2}}$$

Faktorji ekvivalence DE

C_{nom} [pF]	DE
1	0,78
10	0,93
100	0,44
1000	0

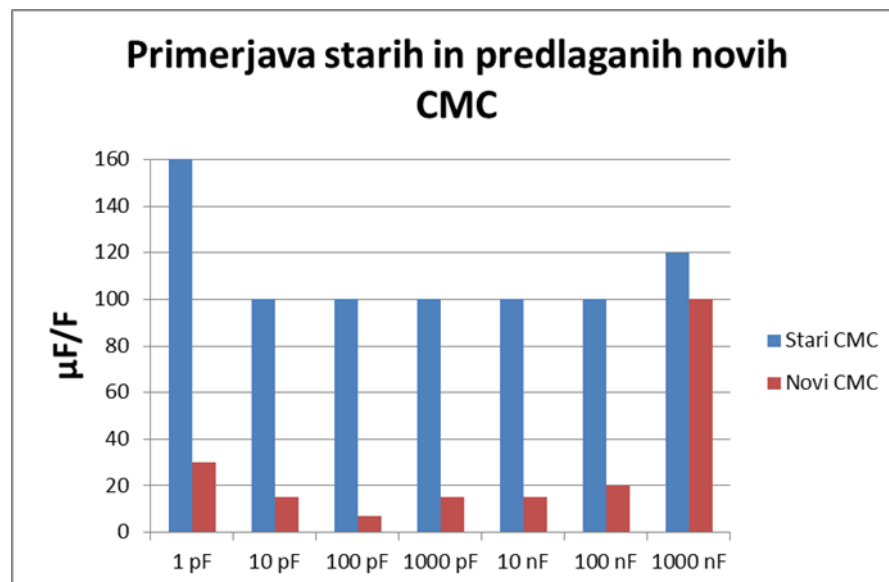
C_{nom} [nF]	DE
10	0,18
100	0,28
1000	0,27



Izboljšanje kalibracijske zmogljivosti CMC

- Postopki so bili potrjeni s strani akreditacijske presoje in se redno uporabljajo v SIQ
- Predlagani novi CMC

Kapacitivnost C Nominalna vrednost	Stare vrednosti CMC v [$\mu\text{F}/\text{F}$]	Predlagane nove vrednosti CMC v [$\mu\text{F}/\text{F}$]
1 pF	1300	30
10 pF	100	15
100 pF	100	7
1000 pF	100	15
10 nF	100	15
100 nF	100	20
1000 nF	120	100



Prispevki

- Podrobna analiza delovanja transformatorskega mostiča za merjenje kapacitivnosti
- Nova metoda za kalibracijo etalonov kapacitivnosti (akreditirana)
- Rezultati kalibracij so primerljivi z NIST in NPL
- Izboljšanje merilne negotovosti
- Predlagani novi CMC
- Vpis v bazo KCDB (postopek še traja)