

REALIZACIJA ETALONA FAKTORJA DISIPACIJE

M. Kokalj¹, B. Pinter¹, B. Voljč¹, Z. Svetik¹, M. Lindič¹, R. Lapuh^{2,1}

¹SIQ – Slovenski inštitut za kakovost in meroslovje

²MIRS – Urad RS za meroslovje

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

Abstract

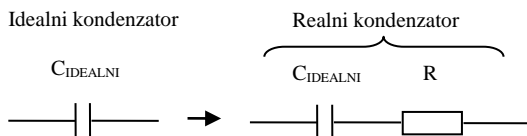
The article describes dissipation factor standard realization and practical measurements with General Radio 1615-A Capacitance Bridge. Realization of dissipation factor standard is shown with theoretical background with uncertainty explanation. Standard was compared with General Radio 1615-A Capacitance Bridge.

1. Uvod

V članku je predstavljena teoretična in praktična realizacija etalona faktorja disipacije. Teoretično pridobljene vrednosti realiziranega etalona faktorja disipacije so bile primerjane z rezultati dejanskih meritev na instrumentu za merjenje kapacitivnosti in faktorja disipacije General Radio 1615-A Capacitance Bridge. Meritve faktorja disipacije so opisane s pripadajočimi negotovostmi parametrov, ki nastopajo pri meritvi.

2. Teoretično ozadje

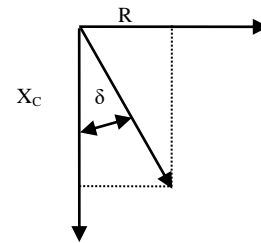
Faktor disipacije je parameter neidealnosti kondenzatorja in je odvisen od notranje upornosti kondenzatorja. Model realnega kondenzatorja predstavlja zaporedno vezana kondenzator in upor, kot prikazuje Slika 1.



Slika 1: Idealni in realni kondenzator

Faktor disipacije se izrazi kot razmerje med izgubnim delom moči na uporu in reaktivnim delom moči, ki oscilira v kondenzatorju. Ker se moč na kondenzatorju izgublja, imenujemo faktor disipacije tudi izgubni faktor. Na Slika 2 je predstavljena impedanca realnega kondenzatorja. Izgubni del kondenzatorja R in reaktivni del Xc tvorita impedančni kazalec, ki se odmika od idealnega za kot δ . Faktor disipacije se potemtakem lahko zapiše tudi kot tangens kota δ . (1)

$$D = \frac{R}{|X_c|} = \tan \delta = \omega \cdot R \cdot C \quad (1)$$



Slika 2: Impedanca realnega kondenzatorja v impedančni ravnini

2.1. Realizacija etalona faktorja disipacije

Za praktično realizacijo etalona so bili uporabljeni kondenzatorji HP 16380A in upori HP 16074A. To sta etalonska kalibracijska kompleta. Uporabljeni kondenzatorji in upori imajo štiri oklopljene terminale, kot prikazujeta Slika 3 in Slika 4.

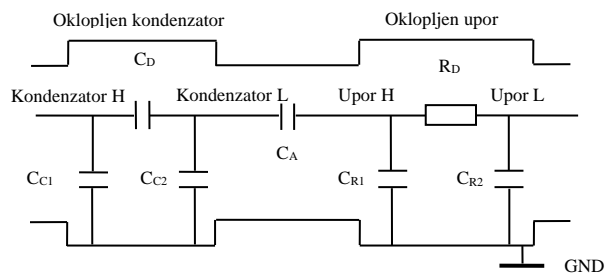


Slika 3: Štiri-terminalno oklopljen kondenzator iz kompleta HP 16380A



Slika 4: Štiri-terminalno oklopljeni upori iz kompleta HP 16074A

Ko sta kondenzator in upor zaporedno povezana, se pojavijo parazitne kapacitivnosti proti ozemljitvi, ki se morajo upoštevati pri izračunu faktorja disipacije. Natančneje se pojavijo štiri parazitne kapacitivnosti C_{C1} , C_{C2} , C_{R1} in C_{R2} , kot prikazuje Slika 5. Izkaže se, da na vrednost faktorja disipacije vplivata le parazitni kapacitivnosti C_{C2} in C_{R1} . To se lahko dokaže s T- π transformacijo [1] vezja na Slika 5.



Slika 5: Model faktorja disipacije s parazitnimi kapacitivnostmi

Etalon faktorja disipacije je bil realiziran z zaporedno vezavo kondenzatorja in upora z veznim členom oz adapterjem BNC(f)/BNC(f), ki tudi vpliva na vrednost faktorja disipacije, zato je potrebno upoštevati njegovo kapacitivnost. Adapter BNC(f)/BNC(f) je bil uporabljen z namenom zagotoviti minimalno dodano kapacitivnost, zagotoviti stabilnost in ponovljivost vrednosti etalona faktorja disipacije. Za izračun faktorja disipacije je potrebno izmeriti parazitne kapacitivnosti kondenzatorja C_{C2} , upornika C_{R1} in kapacitivnost adapterja C_A .

Faktor disipacije se z upoštevanjem parazitnih kapacitivnosti izračuna po enačbi (2).

$$D = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_D \cdot (C_D + C_{C2} + C_{R1} + C_A) \quad (2)$$

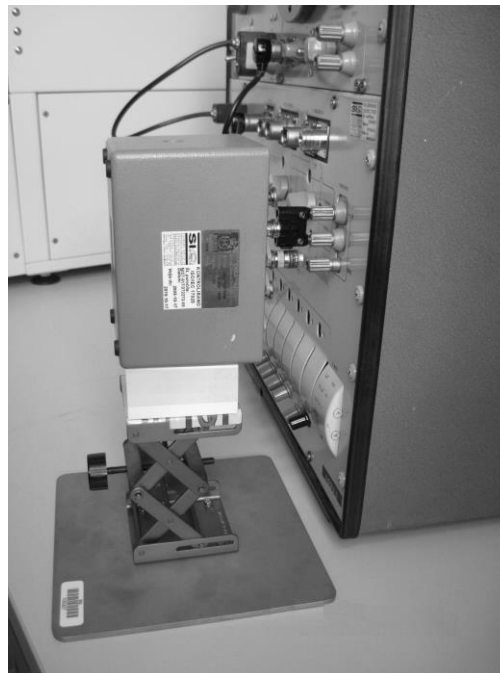
- f - frekvenca
- R_D - direktna upornost
- C_D - direktna kapacitivnost
- C_{C2} - parazitna kapacitivnost kondenzatorja C_D
- C_{R1} - parazitna kapacitivnost upora R_D
- C_A - kapacitivnost adapterja BNC(f,f)

2.2. Merjenje parazitnih kapacitivnosti

Meritve so bile izvedene na napetostnih terminalih štiri-terminalnih kondenzatorjev in uporov. Tokovni terminali niso bili povezani.

Parazitna kapacitivnost kondenzatorja C_{C2} je bila pomerjena z mostičem GR Capacitance Bridge 1615-A. Meritev je bila izvedena tako, da sta bila napetostna terminala H kondenzatorja povezana v kratek stik. Napetostna terminala L kondenzatorja se bila 2-terminalno povezana na mostič, kjer je bila izvedena 2-terminalna meritev, kot prikazuje

Slika 6. S to meritvijo se pridobi vrednost direktne in parazitne kapacitivnosti, torej $C_D + C_{C2}$.



Slika 6: Merjenje direktne in parazitne kapacitivnosti kondenzatorja $C_D + C_{C2}$

Parazitna kapacitivnost C_{R1} je bila izmerjena z LCR merilnikom HP 4284A. Napetostna potenciala L upora sta bila kratkostično povezana. Napetostna potenciala H upora sta bila 2-terminalno povezana na LCR merilnik, kot prikazuje Slika 7. Rezultat meritve je bila parazitna kapacitivnost upora C_{R1} .



Slika 7: Merjenje parazitne kapacitivnosti upora C_{R1}

Ker sta bili meritvi izvedeni v 2-terminalnem načinu, je bilo potrebno upoštevati 2-terminalno korekcijo. Pri meritvi so bile uporabljene kratke povezave oz povezave s čimmanj kablji, ker se tako zagotovi boljša ponovljivost in zmanjša negotovost meritve.

2.3. Merjenje kapacitivnost adapterja BNC(f)/BNC(f)

Kot je že bilo omenjeno, je BNC(f)/BNC(f) vezni člen, ki zaporedno povezuje kondenzator in upor. Ugotovljeno je bilo, da je njegova kapacitivnost ključna za precizno določitev vrednosti etalona. Zato je bila vrednost adapterja določena na naslednji način. Vrednost kapacitivnosti celotnega adapterja znaša 1,9 pF, vendar celotna kapacitivnost adapterja ne vpliva na kapacitivnost za izračun etalona faktorja disipacije. Del kapacitivnosti adapterja, ki vpliva na izračun, je tisti del adapterja, ki fizično ločuje napetostno sponko L kondenzatorja in napetostno sponko H upora. Celotna dolžina adapterja znaša 32,5 mm. Konektor BNC(f) ima globino jedra 9,5 mm na obeh straneh, torej je dolžina, ki fizično ločuje sponki kondenzatorja in adapterja 13,5 mm. Delna kapacitivnost adapterja je bila izračunana tako, da se je upoštevala linearna odvisnost kapacitivnosti od dolžine oz razmaka med priključkoma kondenzatorja in upora. Negotovost meritve je bila ocenjena na 0,1 pF. (3)

$$C_A = \frac{13,5\text{mm}}{35,5\text{mm}} \cdot 1,9\text{pF} = 0,8\text{pF} \quad (3)$$

2.4. Negotovosti etalona

Vse kapacitivnosti, ki nastopajo pri izračunu etalona faktorja disipacije, so bile označene kot C_{TOT} . (4)

$$C_{TOT} = C_D + C_{C2} + C_{R1} + C_A \quad (4)$$

Faktor disipacije se izračuna po enačbi (5).

$$D = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot R_D \cdot C_{TOT} \quad (5)$$

Frekvenca (f): Interni etaloni faktorja disipacije mostiča GR 1615-A Capacitance Bridge so na isti frekvenci kot modeliran zunanji etalon faktorja disipacije, ki se uporablja za kalibracijo. To pomeni, da je v tem primeru negotovost frekvence enaka nič.

Direktna upornost (R_D): Prava vrednost upornosti in njegova negotovost pri kalibracijski frekvenci je pridobljena iz kalibracijskega certifikata s faktorjem pokritja $k=2$.

Vsota vseh kapacitivnosti (C_{TOT}): Direktne in stranske kapacitivnosti kondenzatorja, upornika in adapterja BNC(f)/BNC(f). Vse kapacitivnosti so bile merjenje pri kalibracijski frekvenci z instrumentoma GR 1615-A Capacitance Bridge in HP 4282A Precision LCR Meter.

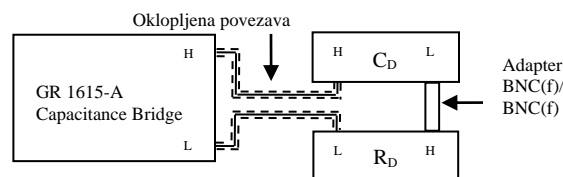
Primer izračuna negotovosti v skladu z dokumentom EA-4/02 je podan v tabeli 1.

Quant.	Estimate	Stand. uncert.	Prob. dist.	Div.	Sens. coef.	Uncert. cont.
X_i	x_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
f	1000 Hz	0 Hz	normal	1	$6,7 \cdot 10^{-4}$ 1/Hz	0,00000
R_d	100038 Ω	4,12 Ω	normal	2	$6,7 \cdot 10^{-6}$ 1/ Ω	0,00003
C_{all}	1,06 nF	0,17 pF	normal	1	$6,3 \cdot 10^8$ 1/F	0,00011
D	0,66744					0,00011
		Expanded uncertainty of measurement:				0,00022

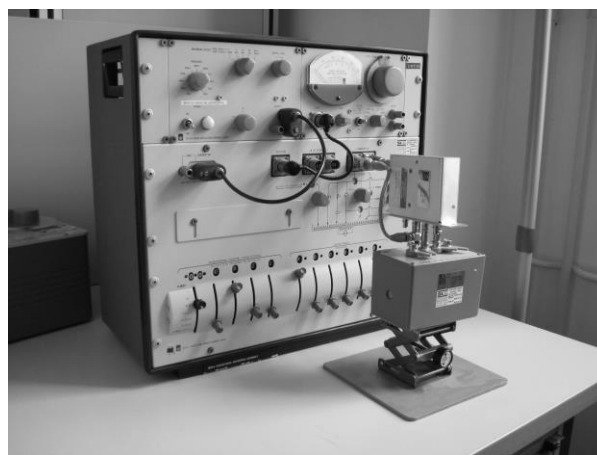
Tabela 1: Primer izračuna negotovosti za kondenzator 1000 pF zaporedno vezan z uporom 100 k Ω

3. Praktične meritve faktorja disipacije

Realiziran etalon faktorja disipacije je bil pomerjen na mostiču GR 1615-A Capacitance Bridge. Meritev je bila izvedena 3-terminalno z uporabo 20 cm dolgih koaksialnih kablov, kot prikazujeta Slika 8 in Slika 9.



Slika 8: Shema praktične realizacije etalona



Slika 9: Merjenje faktorja disipacije na mostiču GR 1615-A

4. Primerjava med izračunano in izmerjeno vrednostjo faktorja disipacije

Faktorji disipacije so bili realizirani z različnimi kombinacijami zaporedno vezanega kondenzatorja in upora.

Tabela 2 prikazuje izmerjene in izračunane oz etalonske faktorje disipacije s podano negotovostjo etalona. Parameter e predstavlja relativno razliko med izmerjeno in izračunano vrednostjo faktorja disipacije.

C & R	D Izmerjeno $\times 10^{-5}$	D Izračunano $\times 10^{-5}$	D Negotovost $\times 10^{-5}$	e [%]
1000pF+100k Ω	66650	66670	20	-0,04
1000pF+10k Ω	6658	6661	2	-0,05
1000pF+1k Ω	664,9	667,1	0,2	0,33
100pF+100k Ω	9967	9947	20	-0,20
100pF+10k Ω	988,6	989,6	2	-0,10
100pF+1k Ω	97,7	99,9	0,2	-2,19

Table 2: Izmerjeni in izračunani faktorji disipacije

5. Zaključek

Faktor disipacije je bil zelo natančno modeliran za kombinacije kondenzatorja in upora višjih vrednosti. Manj natančni rezultati so bili ugotovljeni pri nižjih vrednostih kondenzatorja in upora. Temu botruje dejstvo, da so bile direktne in parazitne kapacitivnosti pri nižjih vrednostih izmerjene z manjšo relativno točnostjo.

Literatura

- [1] Eric D. Simmon, "Calibration of Dissipation Factor Standards": IEEE, vol. 48, no. 2, April 1999
- [2] Andrew D. Koffman, "Uncertainty analysis for four terminal-pair capacitance and dissipation factor characterization at 1 and 10 MHz": IEEE April 2000