

## Kalibracija merilnikov nizkofrekvenčnega električnega polja

Marko Berginc, Klemen Starc, Borut Pinter, Miha Kokalj, Boštjan Voljč, Matjaž Lindič

Slovenski institut za kakovost in meroslovje, Tržaška cesta 2, 1000 Ljubljana, Slovenija  
E-pošta: marko.berginc@siq.si

**Povzetek.** V delu so predstavljeni postopki za kalibracijo nizkofrekvenčnih (10 Hz – 20 kHz) merilnikov električnega polja do 2 kV/m. Sprva predstavimo merilni sestav, ki smo ga uporabili za kalibracijo, ter naštejemo in ovrednotimo vse vire negotovosti, ki pripomorejo k skupni negotovosti kalibracije. Nadaljujemo s kalibracijo frekvenčnega odziva in linearnosti izbranega merilnika električnega polja. V zadnjem delu prikažemo še nekatere druge verifikacijske teste in določimo maksimalne vrednosti električnega polja, ki jih lahko generiramo z uporabljenimi opremo pri določeni frekvenci. Pri analizi merilne negotovosti smo ugotovili, da k skupni merilni negotovosti največ prispevajo negotovost zaradi prisotnosti nosilca, negotovost zaradi nehomogenosti električnega polja in negotovost merjenja razmika med elektrodama. Pri nizkih frekvencah ( $f < 20$  Hz) ima negotovost tipa A merjenja prav tako nezanemarljiv vpliv.

**Ključne besede:** električno polje, merilnik, kalibracija, negotovost, napaka

### Calibration of low-frequency electric-field probes

A procedure is presented for calibration of low-frequency (10 Hz – 20 kHz) electric-field probes with the maximal field of 2 kV/m. A measurement setup used for calibration is described and the uncertainties contributing to the overall uncertainty are given and assessed. The frequency response and linearity of a probe are calibrated. Some other verification tests are discussed and the maximal electric field to be generated with the equipment used is determined. The uncertainty analysis reveals that the distance uncertainty, uncertainty of the presence of the probe holder and non-homogeneity of the axial electric field contribute most to the overall calibration uncertainty. The uncertainty of type A of DUT is non-negligible at lower frequencies ( $f < 20$  Hz).

**Keywords:** electric-field, probe, calibration, uncertainty, error

### 1 UVOD

V današnjem svetu smo obkroženi z najrazličnejšimi električnimi napravami, ki generirajo električno, magnetno ali elektromagnetno polje. Polja imajo lahko nizke frekvence (npr. zemeljsko magnetno polje, elektroenergetsko omrežje, polje v okolici večjih porabnikov itd.) ali višje frekvence (npr. magnetna resonanca v zdravstvu, polja v bližini oddajnih anten itd.). Vsa ta polja lahko vplivajo na delovanje drugih električnih naprav, kot tudi na varnost in zdravje ljudi [1–4], zato za merjenje teh polj potrebujemo ustrezne merilne instrumente [5–8], ki jih je treba periodično kalibrirati [9]. V pomoč kalibracijam teh instrumentov je bil sprejet standard IEEE Std. 1309:2013 [10], v katerem so navedeni postopki, priporočila in merilna oprema, ki jih je pri kalibraciji smiselno upoštevati in uporabiti.

Izbira virov za generiranje električnega polja je odvisna predvsem od frekvence polja, ki jo želimo generirati. Polje z zelo visokimi frekvencami se običajno generirajo s posebnimi antenami (angl. »*horn antenna*«) v brezodbojni sobi [11,12] ali z uporabo GTEM- celic [13]. Pri generiranju električnih polj z nižjimi frekvencami (DC do ~250 MHz) se običajno uporabljajo TEM-celice [14–17]. Pri TEM-celicah je dovolj homogeno električno polje prisotno le v manjšem delu v središču TEM-celice, zato so celice na splošno primernejše le za manjše merilne instrumente in sonde [18], če pa želimo kalibrirati večje merjence v homogenem električnem polju, lahko kalibracijo pri nižjih frekvencah izvedemo tudi v ploščatem kondenzatorju [19–21].

V tem prispevku se osredotočamo na postopke za kalibracijo nizkofrekvenčnih (NF) merilnikov električnega polja v ploščatem kondenzatorju. V eksperimentalnem delu (razdelek 2) opišemo celoten merilni sestav, ki smo ga uporabili za generiranje in merjenje električnega polja. V nadaljevanju predstavimo rezultate kalibracije sonde električnega polja. Sprva opišemo vse vire negotovosti, ki smo jih zajeli pri kalibraciji (razdelek 3.1), pri čemer smo upoštevali vse zahteve za izračun merilne negotovosti [22,23]. V nadaljevanju prikažemo kalibracijo frekvenčnega odziva in linearnosti sonde (razdelek 3.2), medtem ko v zadnjem delu prispevka prikažemo še nekaj drugih verifikacijskih meritev in največje vrednosti električnega polja, ki jih lahko generiramo in uporabimo pri kalibraciji merilnih sond (razdelek 3.3).

## 2 EKSPERIMENTALNI DEL

Merilni sestav, ki smo ga uporabili za kalibracijo NF-merilnikov električnega polja, je prikazan na sliki 1. Električno polje se generira v ploščatem kondenzatorju z velikostjo elektrod  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ . Razmik med elektrodama kondenzatorja je nastavljen med 45 in 55 cm, zato ga je treba pred vsako kalibracijo čim bolj točno izmeriti. Na vsaj osmih različnih mestih ( $2 \times$  na posamezni stranici elektrode) smo s kalibriranim kljunastim merilom pomerili globini okvirja  $d_1$  in  $d_3$  (slika 1). Razdaljo med okvirjema obeh elektrod  $d_2$  smo izmerili s kalibriranim kovinskim ravnilom, prav tako na vsaj osmih različnih mestih, nato pa smo skupen razmik med elektrodama  $d$  izračunali kot vsoto posameznih izmerjenih razdalj (1).

$$d = d_1 + d_2 + d_3 \quad (1)$$

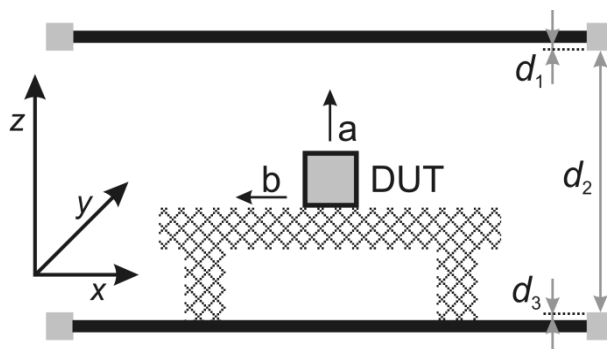
Za napetostni vir na kondenzatorju smo uporabili kalibriran kalibrator Fluke 5520, ki omogoča stabilen, točen in dovolj visok napetostni vir (330 oz. 1000 V) v širšem frekvenčnem območju (10–100 kHz). Napetostni vir je bil na kondenzator povezan z navadnim bakrenim kablom s presekom  $2\text{ mm}^2$ , paziti je bilo treba le na prebojno trdnost izolacije kabla, saj napetosti med vodnikoma lahko dosegajo 1000 V. Aksialno električno polje med elektrodama ploščatega kondenzatorja  $E_z$  smo izračunali z uporabo (2), pri kateri  $U$  pomeni napetost med elektrodama.

$$E_z = \frac{U}{d} \quad (2)$$

Med kalibracijo mora biti merjeni instrument v sredini kondenzatorja, zato je treba izdelati tudi ustrezen nosilec, ki je za različne merjence nastavljen po višini in ki v čim manjši meri spremeni obliko in vrednost električnega polja v kondenzatorju. V našem primeru smo uporabili 4 cm debelo osnovno ploščo (Styrodur®) z relativno dielektričnostjo  $\epsilon_r \approx 1.2$ . Višino nosilca smo po potrebi spreminjali z dodatnimi plastmi istega materiala, ki je bil nameščen ob robovih osnovne plošče, da je polje  $E_z$  pod in nad merjencem ostalo čim bolj nespremenjeno (slika 1).

Kalibracija se je izvajala v navadnem laboratorijskem okolju in ne v Faradayevi kletki, zato je v središču ploščatega kondenzatorja lahko prisotno določeno električno polje, čeprav na kondenzator ni priključena napetost. V našem primeru se je vrednost polja v središču kondenzatorja zaradi prisotnosti okoliškega polja spreminjala med 0.54 V/m in 2.12 V/m, poleg jakosti polja pa se je spreminjala tudi smer polja.

Za pravilno izvedbo kalibracije morajo biti nivoji generiranega polja veliko nad vrednostmi prisotnega okoliškega polja, sicer kalibracija ni pravilna, ali pa mora biti okoliško polje ustrezno ovrednoteno in vključeno v izračun skupne merilne negotovosti.



Slika 1: Stranski pogled na ploščati kondenzator z merjencem (DUT) v sredini. Merjenec se nahaja na nosilcu iz plošče Styrodur® (šrafirane oznake). Oznake  $d_1$ ,  $d_2$  in  $d_3$  pomenijo posamezne meritve razdalje, ki v vsoti dajo skupno razdaljo med elektrodama.

## 3 REZULTATI

V tem poglavju bomo predstavili rezultate kalibracije nizkofrekvenčnega merilnika električnega polja Wandel&Goltermann EFA-3. Sprva ovrednotimo vse prispevke negotovosti in podamo izračun skupne merilne negotovosti (razdelek 3.1). V nadaljevanju prikažemo rezultate kalibracije frekvenčnega odziva in linearnosti merilnika (razdelek 3.2). V zadnjem delu prikažemo rezultate nekaterih dodatnih verifikacijskih testov in vrednosti maksimalnih polj, generiranih pri različnih frekvencah (razdelek 3.3).

### 3.1 Prispevki negotovosti

Pri kalibraciji merilnega instrumenta želimo preveriti, ali je napaka kalibriranega (DUT) merilnega instrumenta v predpisanih mejah, ki jih določa proizvajalec oz. standard, zato je osnovni matematični model kalibracije določen s (3). V (3) parameter  $E$  pomeni napako instrumenta (tj. odstopanje odčitka instrumenta od prave vrednosti električnega polja),  $E_x$  pomeni vrednost, ki smo jo odčitali iz merilnega instrumenta, in  $E_s$  pravo vrednost električnega polja. Na skupno merilno negotovost kalibracije tako vplivajo vsi posamezni prispevki negotovosti, ki so povezani z odčitkom kalibriranega merilnega instrumenta ali ki vplivajo na pravo vrednost električnega polja. Skupno merilno negotovost kalibracije smo izračunali s pomočjo (4), v kateri smo upoštevali negotovost zaradi ločljivosti kalibriranega instrumenta ( $u_{x,res}$ ), negotovost tipa A kalibriranega instrumenta, tj. negotovost zaradi raztrosa merilnih rezultatov ob ponavljanju meritev ( $u_{x,tipA}$ ), negotovost zaradi specifikacije in ločljivosti napetostnega vira ( $u_{s,spec}$  in  $u_{s,res}$ ), negotovost pri določanju razmika med elektrodama ( $u_{s,d}$ ), negotovost zaradi nehomogenosti električnega polja ( $u_{s,h}$ ) in negotovost zaradi prisotnosti nosilca v polju kondenzatorja ( $u_{s,n}$ ). Vsi ti posamezni prispevki negotovosti so podrobneje obravnavani v nadaljevanju.

$$E = E_x - E_s = E_x - \frac{U}{d} \quad (3)$$

$$u^2 = u_{x,res.}^2 + u_{x,tipA}^2 + u_{s,U-spec.}^2 + u_{s,U-res.}^2 + u_{s,d}^2 + u_{s,h}^2 + u_{s,n}^2 \quad (4)$$

Prvi obravnavani prispevek k negotovosti je negotovost merjenja razmika med elektrodama ( $u_{s,d}$ ). Skupna razdalja med elektrodama je določena kot vsota posameznih razdalj  $d_1$ ,  $d_2$  in  $d_3$  (1) in slika 1, pri čemer smo razdalji  $d_1$  in  $d_3$  izmerili s kljunastim merilom in razdaljo  $d_2$  s kovinskim merilom. Vse tri izmerjene dolžine vsebujejo enake prispevke negotovosti (5). Upoštevali smo negotovost zaradi raztrosa izmerjenih vrednosti razdalj od povprečne vrednosti ( $u_{i,d-povp}$ ), specifikacijo kljunastega merila oz. ravnila, ki je bila v vseh primerih ocenjena na 0,5 % izmerjene vrednosti dolžine ( $u_{i,d-spec.}$ ), ter ločljivost meril ( $u_{id-res.}$ ), ki je bila ocenjena na 0,5 mm pri ravnilu in 0,05 mm pri kljunastem merilu.

$$u_d^2 = c_i \cdot \sum_{i=1}^3 \left( \frac{u_{i,d-povp.}}{1} \right)^2 + \left( \frac{u_{i,d-spec.}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left( \frac{u_{i,d-res.}}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 \quad (5)$$

$$c_1 = \frac{d(d_1 + d_2 + d_3)}{dd_1} = 1$$

$$c_2 = \frac{d(d_1 + d_2 + d_3)}{dd_2} = 1 \quad (6)$$

$$c_3 = \frac{d(d_1 + d_2 + d_3)}{dd_3} = 1$$

Zaradi dovolj velikega števila meritev razdalj smo pri negotovosti zaradi raztrosa izmerjenih vrednosti privzeli normalno porazdelitev, medtem ko imata preostala dva prispevka pravokotno porazdelitveno funkcijo. Koeficienti občutljivosti  $c_i$  so pri vseh prispevkih enaki 1 (6), saj je vsota posameznih razdalj  $d_1$ ,  $d_2$  in  $d_3$  enaka skupni razdalji  $d$ . V našem primeru je razdalja med elektrodama znašala 0.4808 m, skupna negotovost meritve razmika med elektrodama pa je bila 0.0024 m (normalna porazdelitev s faktorjem razširitve  $k = 1$ ). To  $u_d$  vrednost moramo nato pomnožiti še s koeficientom občutljivosti  $c_d$  (7), da dobimo prispevek k skupni negotovosti električnega polja zaradi negotovosti merjenja razmika med elektrodama (8).

$$c_d = \frac{dE_z}{dd} = -\frac{U}{d^2} \quad (7)$$

$$u_{s,d} = \frac{c_d \cdot u_d}{1} \quad (8)$$

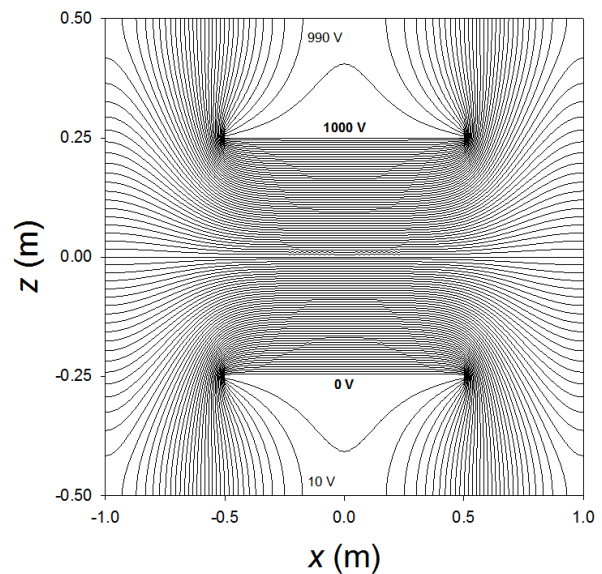
Na skupno negotovost kalibracije merilnika električnega polja vpliva tudi negotovost napetostnega vira. Upoštevali smo specifikacijo uporabljenega kalibratorja ( $U_{spec.}$ ), ki je odvisna od izbrane amplitude in frekvence, ter ločljivosti kalibratorja ( $U_{res.}$ ), ki je prav tako odvisna od uporabljenega dosega (oz. nastavljene amplitude) in v naših meritvah znaša 0.1 mV ali 10 mV. Oba prispevka negotovosti (9) in (10) imata pravokotno porazdelitveno funkcijo, njun koeficient občutljivosti  $c_U$  pa je podan z (11).

$$u_{s,U-spec.} = \frac{U_{spec.} \cdot c_U}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

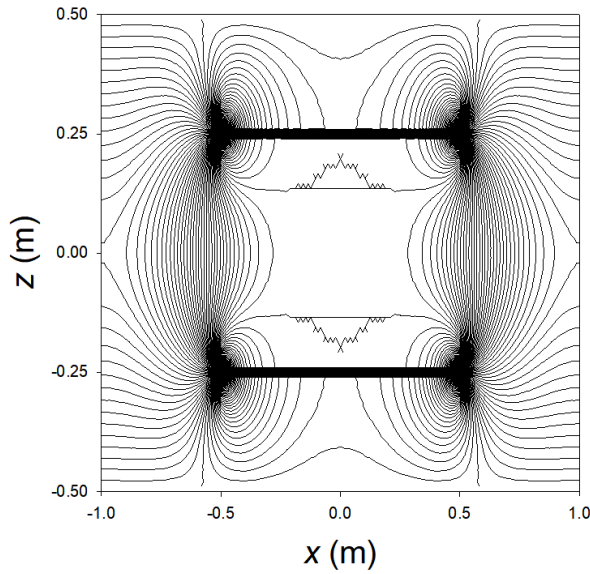
$$u_{s,U-res.} = \frac{U_{res.} \cdot c_U}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (10)$$

$$c_U = \frac{dE_z}{dU} = \frac{1}{d} \quad (11)$$

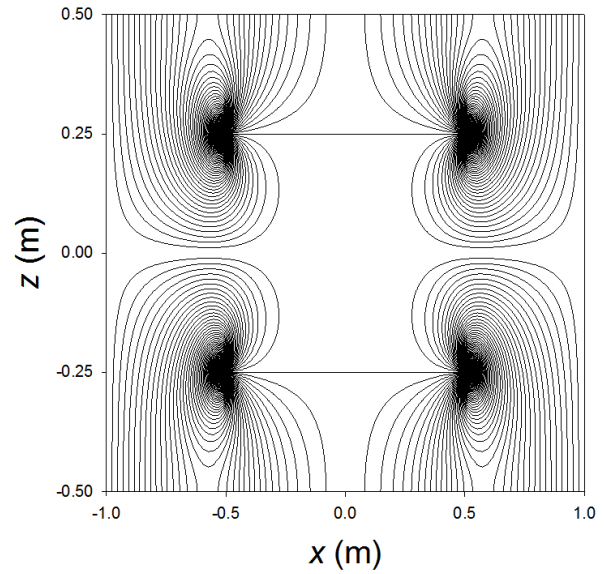
Pri priklopu napetosti na plošče kondenzatorja se poleg polja v kondenzatorju generira tudi polje v okolici kondenzatorja. Posledično aksialno polje v kondenzatorju ni povsem homogeno, prav tako pa nastane tudi določeno polje v smeri  $x$  oz.  $y$  (slika 1). Za pravilno ovrednotenje skupne negotovosti je treba oceniti homogenost polja glede na velikost merjenca DUT [19,24]. Za določitev homogenosti električnega polja smo uporabili matematično orodje Matlab®. Sprva smo z metodo končnih diferenc določili potenciale v posameznih točkah v kondenzatorju in njegovi bližnji okolici (slika 2). Iz kvocienta razlik potencialov in razdalj med simulacijskimi točkami v smereh  $z$  oz.  $x$  (oz.  $y$ ) smo določili aksialno polje  $E_z$  (slika 3) in polje



Slika 2: Simulacija potencialov v ploščatem kondenzatorju in v njegovi okolici. Posamezne ekvipotencialne ravnine so med seboj razmaknjene za 10 V.



Slika 3: Simulirano in normirano električno polje v  $z$ -smeri v ploščatem kondenzatorju in v njegovi okolici (tj.  $E_z(x,y, z) / E_z(0,0,0)$ ). Razlika med dvema krivuljama pomeni spremembo polja  $E_z$  za 2% glede na  $E_z$  polje v središču kondenzatorja.



Slika 4: Simulirano in normirano električno polje v  $x$ - oz.  $y$ -smeri v ploščatem kondenzatorju in v njegovi okolici (tj.  $E_{xy}(x,y, z) / E_z(0,0,0)$ ). Razlika med dvema krivuljama pomeni spremembo polja  $E_{xy}$  za 2 % glede na  $E_z$  polje v središču kondenzatorja.

$E_{xy}$  (slika 4), iz teh vrednosti pa smo nato ocenili prispevke negotovosti zaradi nehomogenosti električnega polja za merjenca različnih dimenzij (tabela 1). V tem primeru je porazdelitvena funkcija normalna, koeficient občutljivosti  $c_h$  pa je 1, saj vsaka sprememba električnega polja zaradi nehomogenosti neposredno vpliva na pravo vrednost električnega polja, skupen prispevek negotovosti zaradi nehomogenosti električnega polja pa se izračuna s pomočjo (12).

$$u_{s,h.} = \frac{E_z \cdot u_h \cdot c_h}{1} \quad (12)$$

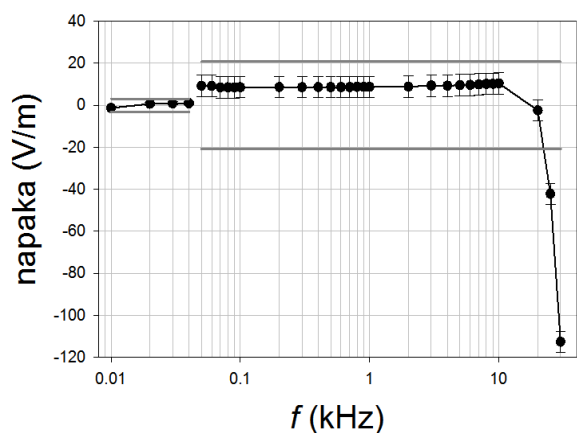
Tabela 1: Prispevek negotovosti zaradi nehomogenosti električnega polja za merilnike/sonde različnih velikosti.  $a_{maks}$  označuje največjo stranico merilnika/sonde.

$u_h$ (%)	$a_{maks}$ (cm)
0.5	16
1	21
2	26
3	29
4	31
5	37

Določili smo tudi prispevek negotovosti zaradi prisotnosti nosilca [25]. Ta ima relativno dielektričnost  $\epsilon_r > 1$ , zato deloma poveča vrednost  $E_z$ , poleg tega pa je dielektričnost praviloma tudi frekvenčno odvisna. Ocenili smo, da je prispevek k negotovosti  $u_n$  zaradi nosilca 1 % vrednosti generiranega aksialnega električnega polja  $E_z$  (razdelek 3.3), porazdelitvena funkcija je normalna, koeficient občutljivosti  $c_h$  pa je prav tako 1, saj sprememba električnega polja zaradi prisotnosti nosilca ponovno neposredno vpliva na pravo vrednost električnega polja. Prispevek negotovosti električnega polja zaradi prisotnosti nosilca smo izračunali z uporabo (13).

$$u_{s,n.} = \frac{E_z \cdot u_n \cdot c_h}{1} \quad (13)$$

Na skupno negotovost kalibracije vpliva tudi negotovost merjenca DUT. Pri njem smo upoštevali negotovost tipa A, kjer smo vzeli razliko med maksimalno in minimalno izmerjeno vrednostjo (14), ter ločljivost merilnika (15), ki je odvisna od nastavljenega merilnega dosega instrumenta, in je med 0.01 V/m in 1 V/m. Pri obeh prispevkih je predpostavljena pravokotna porazdelitev, koeficient občutljivosti  $c_x$  pa je v obeh primerih 1. Specifikacija instrumenta ni zajeta v izračun skupne negotovosti, saj je namen kalibracije, da preverimo ustreznost instrumenta s specifikacijami.



Slika 5: Razlike med izmerjenimi in pravimi (izračunanimi) vrednostmi aksialnega električnega polja (tj. napake) s pripadajočimi negotovostmi meritev pri različnih frekvencah ( $E_z = 62.5$  V/m ali  $417$  V/m). Ravna polna temno siva črta pomeni mejne vrednosti instrumenta.

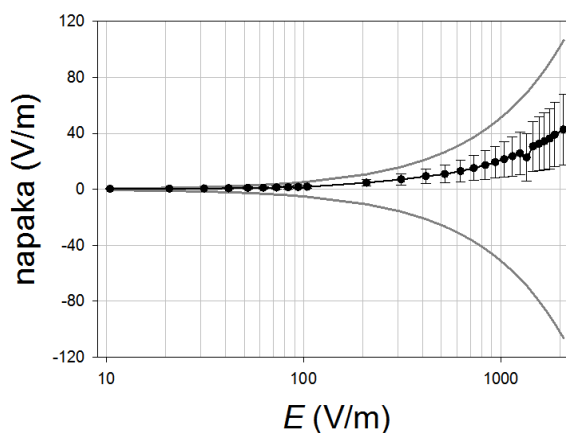
$$u_{x,tipA} = \frac{(E_{x,max} - E_{x,min}) \cdot c_x}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (14)$$

$$u_{x,res.} = \frac{E_{x,res.} \cdot c_x}{2 \cdot \sqrt{3}} \quad (15)$$

### 3.2 Kalibracija sonde

Na sliki 5 so prikazane napake (razlike med prikazanimi vrednostmi in pravimi, izračunanimi vrednostmi  $E_z$ ) s pripadajočimi negotovostmi pri kalibraciji merilnika Wandel&Goltermann EFA 3 v  $z$ -smeri. Med kalibracijo je instrument zaznal le polje v  $z$ -smeri, kar potrjuje, da sta vpliv polja  $E_{xy}$  zaradi neidealnosti in končnih dimenzij ploščatega kondenzatorja, kot tudi vpliv zunanjega električnega polja zanemarljiva. Kalibracija je bila izvedena pri  $62.5$  V/m pri  $f < 50$  Hz in pri  $417$  V/m pri  $f \geq 50$  Hz. Temno sive ravne polne črte označujejo mejne vrednosti napak, ki jih instrument ne sme preseči. Tukaj vidimo, da instrument ustreza svojim specifikacijam, saj so napake vključno z merilnimi negotovostmi pod mejnimi vrednostmi. Opazimo tudi, da so napake sistematično pozitivne. Vzrok se deloma skriva v nosilni plošči Styrodur®, ki ima  $\varepsilon_r \approx 1.2$  in zato nekoliko poveča pravo vrednost  $E_z$  v kondenzatorju. Žal je  $\varepsilon_r$  na splošno frekvenčno odvisna, poleg tega pa je površina plošče Styrodur® profilirana, zato je bila sprememba  $E_z$  zaradi nosilca le ocenjena in vključena v izračun skupne merilne negotovosti in ne v izračun prave vrednosti  $E_z$ . Če bi vpliv nosilca vključili v izračun  $E_z$ , bi se negotovost zmanjšala. Za polovico bi se zmanjšala tudi napaka, ki pa bi še vedno ostala sistematično pozitivna, najverjetneje zaradi prisotnosti merjenca, ki prav tako v manjši meri spreminja vrednost  $E_z$  [26].

Pri  $f > 20$  kHz je opaziti hitro povečanje napake, čeprav naj bi merilnik deloval do  $f = 30$  kHz.



Slika 6: Razlike med izmerjenimi in pravimi (izračunanimi) vrednostmi aksialnega električnega polja (tj. napake) s pripadajočimi negotovostmi meritev pri različnih vrednostih električnega polja ( $f = 1$  kHz). Polna temno siva črta pomeni mejne vrednosti instrumenta.

Vzrok za zdaj še ni povsem znan. Preverili smo morebiten vpliv kabla, saj je pri višjih frekvencah padec napetosti na kablu vedno večji zaradi induktivne narave kabla, medtem ko napetost na kondenzatorju upada zaradi kapacitivne narave kondenzatorja. Vseeno je vpliv pri frekvenci  $30$  kHz še vedno zanemarljivo majhen. Preverili smo tudi morebitno zmanjšanje homogenosti električnega polja pri višjih frekvencah. Pri tem testu smo pri konstantni napetosti  $U = 200$  V in pri različnih frekvencah (tj.  $50$  Hz,  $10$  kHz,  $20$  kHz in  $30$  kHz) opazovali odziv merilnika pri različnih odmikih od središča ploščatega kondenzatorja (smer  $b$  na sliki 1;  $b = 0$  (središče),  $5$  cm,  $10$  cm,  $15$  cm in  $25$  cm). Pri odmiku merjenca proti robu je vselej prišlo do manjšega upada v odčitku, ki je posledica nehomogenosti  $E_z$  (slika 3), medtem ko ni bilo mogoče zaznati nikakršne izstopajoče frekvenčne odvisnosti, ki bi opravičevala izrazito povečanje napake pri višjih frekvencah (slika 5). Vzrok za povečanje napake je morda v instrumentu, ki ni več skladen s specifikacijami pri višjih frekvencah, v frekvenčni odvisnosti  $\varepsilon_r$  nosilca ali morda v drugih razlogih.

Na podoben način smo pri  $f = 1$  kHz izmerili tudi linearnost merilnika Wandel&Goltermann EFA 3 v  $z$ -smeri (slika 6). Tudi pri tem testu se je merilnik izkazal za ustreznega, saj so napake s pripadajočimi negotovostmi pod mejnimi vrednostmi (slika 6, temno siva polna črta). Znova se je potrdilo, da so napake sistematično pozitivne, saj nosilec in merjenec zaradi svoje dielektričnosti povečujeta pravo vrednost električnega polja.

Pri obeh testih je k skupni negotovosti kalibracije največ prispevala negotovost zaradi nosilca. Pol manjša sta bila prispevka zaradi nehomogenosti električnega polja in negotovost merjenja razmika med elektrodama. Pri nizkih frekvencah je bil dokaj velik tudi prispevek

zaradi negotovosti tipa A merjenca. Vpliv preostalih virov negotovosti je bil zanemarljivo majhen.

### 3.3 Drugi verifikacijski testi in maksimalne vrednosti generiranega polja

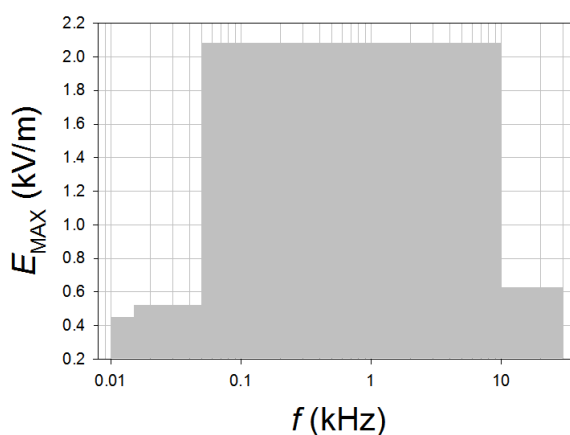
Poleg zgornjih dveh testov smo opravili tudi nekaj drugih verifikacijskih testov, s katerimi smo želeli preveriti pravilnost kalibracije.

Pri prvem testu smo pod ali nad merjenec namerno dodajali dodatne 4 cm debele plošče Styrodur® in opazovali odziv merjenca (tabela 2) pri  $f = 100$  Hz. Po pričakovanjih večje število plošč poveča vrednost  $E_z$ . Iz povprečnih razlik med izmerjenimi vrednostmi smo določili, da je prispevek k negotovosti zaradi nosilca Styrodur® manj kot 1 % vrednosti  $E_z$  (razdelek 3.1).

Ovrednotili smo tudi vpliv lege obeh priključnih kablov, ki sta lahko speljana neposredno v bližini elektrod kondenzatorja ali daleč okoli (navpično glede na posamezno elektrodo). Merjeni instrument je v obeh primerih pokazal isti odčitek, ne glede na frekvenco vzbujanja. Na homogenost električnega polja in s tem na točnost meritve lahko vplivajo tudi okoliški dejavniki (npr. prisotnost drugih instrumentov, armirane stene, osebja, inštalacij itd.), zato standard priporoča, da je med kalibracijo okoli kondenzatorja dovolj praznega prostora. Da bi ovrednotili morebiten vpliv armirane stene, smo pri različnih amplitudah (100 V, 500 V, 1000 V) in frekvencah vzbujanja (50 Hz, 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz) pomerili odziv merjenca, pri čemer sprva v okolici kondenzatorja ni bilo nobenih objektov, v drugem primeru pa je bil kondenzator z eno stranico postavljen neposredno ob armirano steno. Odčitki merilnika se pri postavitvi kondenzatorja ob steno v nobenem primeru niso razlikovali od predhodnih meritev.

Tabela 2: Vpliv števila plasti Styrodur® na vrednost  $E_z$ , ki ga pokaže merjenec. Debelina posamezne plasti Styrodur® je bila 4 cm, plasti pa so bile nameščene pod merjencem ali nad njim. Aksialno polje brez prisotnosti nosilca naj bi bilo 208.3 V/m z negotovostjo 2.5 V/m (normalna porazdelitev).

Št. plasti	$E_x$ (V/m)
1	212.6
2	213.7
3	216.0
4	216.9



Slika 7: Maksimalne vrednosti  $E_z$ , ki jih je mogoče generirati z uporabljenim merilnim sestavom pri različnih frekvencah.

Pri zadnjem testu smo preverili, kakšne so maksimalne vrednosti  $E_z$ , ki jih lahko generiramo z našim merilnim sestavom (slika 7). Po pričakovanjih se je izkazalo, da je v našem primeru maksimalno polje omejeno edino z maksimalno napetostjo, ki jo lahko generira napetostni vir (kalibrator) pri določeni frekvenci. Pri višjih frekvencah in hkrati višjih napetostih bi bilo lahko polje posredno omejeno tudi z maksimalnim tokom, ki ga lahko generira napetostni vir (tj. ~40 mA), saj se impedanca ploščatega kondenzatorja s povečevanjem frekvence niža. Kljub vsemu je kapacitivnost uporabljenega ploščatega kondenzatorja zelo nizka (~18.5 pF), zato pri frekvencah do 30 kHz maksimalni tok napetostnega vira še ni dosežen, niti pri najvišjih napetostih kalibratorja.

## 4 SKLEP

V prispevku smo predstavili postopke za kalibracijo nizkofrekvenčnih (10 Hz – 20 kHz) merilnikov električnega polja ( $E_z \leq 2100$  V/m). Pri kalibraciji smo upoštevali številne vire negotovosti; negotovost napetostnega vira, negotovost tipa A in ločljivost merjenca, negotovost zaradi nehomogenosti električnega polja, negotovost zaradi prisotnega nosilca in negotovost pri merjenju razmika med elektrodama. Zadnji trije prispevki so se izkazali kot dominantni, medtem ko so preostali prispevki zanemarljivo majhni. Skupna merilna negotovost pri meritvi frekvenčnega odziva in linearnosti je okoli 2,4 % vrednosti generiranega električnega polja (normalna skupna porazdelitev s faktorjem razširitve  $k = 2$ ). Meritve frekvenčnega odziva merilnika so tudi pokazale, da začne napaka hitro naraščati pri frekvencah nad 20 kHz, iz za zdaj še ne povsem jasnih razlogov.

## LITERATURA

- [1] IEC 61786-1:2013, Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments.
- [2] IEC 61786-2:2014, Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 2: Basic standard for measurements.
- [3] IEEE Std. C95.3.1-2010, IEEE Recommended Practice for Measurements and Computations of Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields with Respect to Human Exposure to Such Fields, 0 Hz to 100 kHz.
- [4] Wen F., Huang X., "Human Exposure to Electromagnetic Fields from Parallel Wireless Power Transfer Systems", *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(2), str. 157, 2017.
- [5] Bassen H., Smith G., "Electric field probes-A review", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 31(5), str. 710–718, 1983.
- [6] Davida V., Nica I., "A measurement system for an automatic survey of low frequency magnetic and electric fields", *Review of Scientific Instruments*, 83, str. 105102, 2012.
- [7] Yu J. J. Zeng R., Niu B., Li C. X., "Electric Field Measurement under AC/DC Hybrid Transmission Lines Using an Integrated Optical Sensor", *International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Poznan, Poland, September 08–11, 2014.
- [8] Perry D., Chadderdon S., Forber R., Wang W. C., Selfridge R., Schultz S. "Multiaxis electric field sensing using slab coupled optical sensors", *Applied Optics*, 52(9), str. 1968–1977, 2013.
- [9] Tishchenko V. A., Lukyanov V. I., Tokatly V. I., "National primary standard for the unit of electric field strength at frequencies of 0.0003–1000 MHz", *Measurement Techniques*, 55(9), str. 965–970, 2012.
- [10] IEEE Std. 1309–2013, IEEE Standard for Calibration Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz.
- [11] Goodall E. R., "NPL Contribution to EUROMET Comparison 819: Comparison of Electrical Field Strength Measurements above 1 GHz", *Metrologia*, 48(S), 2011.
- [12] Wu I. F., Ishigami S., Gotoh K., Matsumoto Y., "Calibration of electric field probes with three orthogonal elements by standard field method", *IEICE Electronics Express*, 6(14), str. 1032–1038, 2009.
- [13] Wu I., Ishigami S., Gotoh K., Matsumoto Y., "Calibration of electric field probes in GTEM cell using reference antenna method", *IEICE Electronics Express*, 6(20), str. 1469–1475, 2009.
- [14] Ishigami S., Hirata H., "A New Calibration Method for an Electric-field Probe using TEM Waveguides", *20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, January 12–16 2009.
- [15] Crawford M. L., "Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, EMC-16(4), 1974.
- [16] Zilberti L., Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., "On the use of TEM cells for the calibration of power frequency electric field meters", *Measurement*, 43(9), str. 1282–1290, 2010.
- [17] Taylor H. C. Burl M., Hand J. W., "Design and calibration of electric field probes in the range 10–120 MHz", *Physics In Medicine and Biology*, 42(7), str. 1387–1394, 1997.
- [18] Morioka T., "Response of a Short-Dipole Probe to a Nonuniform E-Field of a TEM Cell", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(7), str. 2709–2714, 2011.
- [19] Tishchenko V. A., Tokatly V. I., Lukyanov V. I., "Calculation of the field of a parallel-plate capacitor for calibrating electric field strength converters with a grounded plate", *Measurement Techniques*, 55(4), str. 459–462, 2012.
- [20] Nogi Y., Suzuki K., Ohkuma Y., "Measurement of electric fields and estimation of dielectric susceptibility", *American Journal of Physics*, 81(5), str. 359–365, 2013.
- [21] Misakian M., "Calibration of Flat 60-Hz Electric-Field Probes", *Bioelectromagnetics*, 5(4), str. 447–450, 1984.
- [22] ISO/IEC Guide 98-1:2009, Uncertainty of measurement - Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement.
- [23] ISO/IEC Guide 98-3:2008, Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- [24] Parker G. W., "Electric field outside a parallel plate capacitor", *American Journal of Physics*, 70(5), str. 502–507, 2002.
- [25] Bottauscio O., Chiampi M., Crotti G., Zilberti L., "Perturbing effects of the probe support on the calibration of electric field meters", *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 42(3), str. 345–350, 2008.
- [26] Huan W. Chen Z., "Compensation method for the coupling error between the EUT and TEM cell in E-field probe isotropic calibration", *Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC) and EMC Europe*, Dresden, Germany, August 16–22, 2015.

**Marko Berginc** je diplomiral leta 2004 in doktoriral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo pametna omrežja, meritve kakovosti električnega omrežja, metrologijo Li-ionskih baterij in merjenje električnega in magnetnega polja.

**Klemen Starc** je diplomiral leta 2017 na Fakulteti za elektrotehniko. Njegovo delo zajema kalibracije različnih električnih merilnih instrumentov.

**Borut Pinter** je diplomiral leta 2005 na Fakulteti za matematiko in fiziko v Ljubljani. Zaposlen je na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo EMC-meritve, merjenja na RF-področju, odgovoren pa je tudi za vzdrževanje nacionalnih etalonov za čas in frekvenco.

**Miha Kokalj** je diplomiral leta 2011 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo merjenje impedance pri nizkih in visokih frekvencah, merjenje vibracij in EMC-meritve.

**Boštjan Voljč** je diplomiral leta 2002 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo delo na AC-napetosti, toku in moči, odgovoren pa je tudi za vzdrževanje nacionalnih etalonov za električni tok in napetost.

**Matjaž Lindič** je magistriral leta 1993 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo delo na AC- in DC- napetostih in toku, je pa tudi vodja oddelka za meroslovje na Slovenskem inštitutu za kakovost in meroslovje.