

# Dizajn elektroda za kapacitivni senzor položaja

---

**Hmura, Antonio**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:016299>

*Rights / Prava:* [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni preddiplomski studij računarstva**

**DIZAJN ELEKTRODA ZA KAPACITIVNI SENZOR**

**POLOŽAJA**

**Završni rad**

**Antonio Hmura**

**Osijek, 2017.**

## Sadržaj:

1. UVOD .....	1
1.1. Zadatak završnog rada .....	1
2. ELEKTRIČNI KAPACITET .....	2
2.1. Definicija i matematički izraz.....	2
2.2. Kondenzator.....	7
3. ZASLON OSJETLJIV NA DODIR.....	13
4. DIZAJN ELEKTRODA, MJERENJA I REZULTATI .....	14
4.1. Prvi dizajn elektroda.....	15
4.2. Drugi dizajn elektroda .....	19
4.3. Treći dizajn elektroda .....	23
4.4. Četvrti dizajn elektroda .....	27
4.5. Zapažanja i komentar rezultata .....	31
6. ZAKLJUČAK .....	32
LITERATURA.....	33
SAŽETAK.....	34
ABSTRACT .....	35
ŽIVOTOPIS .....	36

# 1. UVOD

Čovjek se u sadašnjem tehnološki razvijenom vremenu svakodnevno sve više koristi pametnim uređajima kao što su pametni mobiteli, interijeri vozila kojima se služi, gotovi ugrađeni sustavi u trgovačkim centrima, bankama itd. Jedna od glavnih i najvažnijih karakteristika takvih uređaja su zaslone osjetljivi na dodir. Današnji se kapacitivni zaslone osjetljivi na dodir najčešće sastoje od četiri elektrode koje mjere promjene naboja u električnom polju koje je stvoreno na površini uređaja. Čovjek, svojim dodirom, na prstu apsorbira malu količinu naboja kojom uzrokuje razliku potencijala, te ju elektrode prepoznaju i pretvaraju u koordinate položaja.

U ovom radu je testirano nekoliko različitih položaja dvaju aluminijskih elektroda, te je ispitano koji od položaja daje najveći diferencijal potencijala. Kapacitet između ploča je mjereno RLC metrom, a promjena napona na izlazu oscilatora mjerena je pomoću multimetra.

## 1.1. Zadatak završnog rada

Zadatak završnog rada je kroz mjerenja u laboratoriju evaluirati utjecaj različitog dizajna elektroda (dimenzija, oblika) na osjetljivost kapacitivnog senzora položaja.

## 2. ELEKTRIČNI KAPACITET

### 2.1. Definicija i matematički izraz

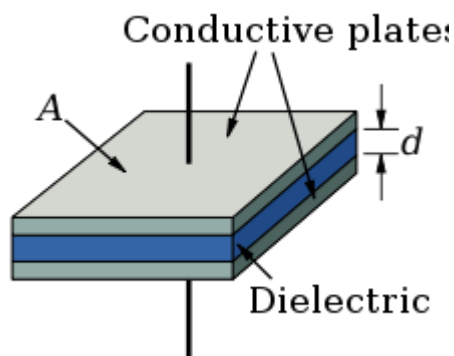
Kapacitet je fizikalno svojstvo nekog tijela koje opisuje količinu električnog naboja koje ono može pohraniti po jedinici promjene električnog potencijala. Kapacitet također podrazumijeva i pohranu električne energije koja nastaje u električnom polju. Kapacitet je funkcija geometrije dizajna i permitivnosti dielektričnog materijala između ploča kondenzatora. Ako je električni naboj istovremeno prenešen na dva početno nenabijena prazna vodiča, oba postaju jednako nabijena električnim nabojem, od kojih je jedan nabijen pozitivnim, a drugi negativnim nabojem, te je uspostavljena razlika potencijala između njih. Električni kapacitet vodiča je omjer količine naboja vodiča koji se mjeri u kulonima i razlike potencijala između vodiča koji se mjeri u voltima. Suprotna fizikalna veličina kapacitetu je elastacija. Mjerna jedinica za električni kapacitet vodiča je Farad (jedan kulon po voltu), ime je dobila po engleskom fizičaru Michael Faraday-u[4]. Kako je jedan farad izrazito veliki kapacitet, u praksi se najčešće pojavljuju iznosi koji predstavljaju milijunti dio farada, mikrofarad  $\mu\text{F}$ , te milijunti dio mikrofarada, pikofarad pF. Općenito vrijedi matematički izraz:

$$C = \frac{q}{U} [F] \quad (2-1)$$

gdje je  $C$  električni kapacitet u faradima (F),  $q$  je naboj vodiča u kulonima (C) i  $U$  je razlika potencijala u voltima (V).

Postoje dvije vrste kapaciteta nekog tijela, samostalni kapacitet i međusobni kapacitet. U strujnom krugu se najčešće mjeri kapacitet između dva susjedna vodiča (što predstavlja međusobni kapacitet) ili kapacitet između dvije ploče kondenzatora. Međutim, za bilo koje tijelo postoji i svojstvo samostalnog kapaciteta koje predstavlja količinu električnog naboja koje se mora dodati tom tijelu da se njegov električni potencijal promijeni za jednu jedinicu. Primjer međusobnog kapacitet se najlakše može prikazati na modelu kondenzatora, na kojem mjerimo električni kapacitet dviju vodljivih paralelnih ploča, međusobno izoliranih jedna od druge dielektrikom koji je smješten između njih (Sl. 2.1.) [1,2].

U električnim mrežama se također može pojaviti i parazitni kapacitet koji je neizbježan i vrlo često neželjen, ali se jednostavno stvara između dijelova električnih komponenti u mreži samo zbog njihove međusobne blizine [1,2].



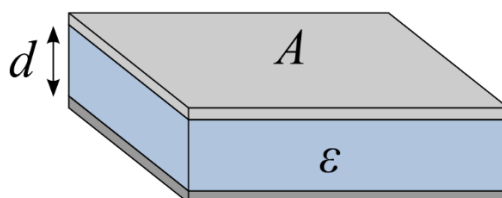
Sl. 2.1. Model jednostavnog kondenzatora [3].

Za izračunavanje električnog kapaciteta jednostavnih sustava koriste se sljedeći matematički izrazi, a navedeni su samo neki od jednostavnijih sustava kao primjeri. Postoji mnogo više sustava i puno složeniji sustavi koji imaju svoje metode i matematička rješenja [2].

Za električni kapacitet pločastog kondenzatora prikazanog na slici (Sl. 2.2.):

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad (2-2)$$

gdje je  $\varepsilon$  permitivnost (F/m) – fizikalna veličina koja opisuje utjecaj dielektrika na međudjelovanje električnih naboja, može se prikazati kao umnožak relativne dielektrične permitivnosti materijala dielektrika i dielektrične konstante vakuuma [5],  $A$  je površina ploče kondenzatora izražena u kvadratnim metrima ( $m^2$ ) i  $d$  je razmak između dviju ploča u metrima (m).

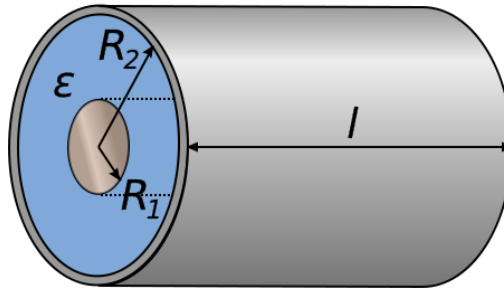


Sl. 2.2. Prikaz modela pločastog kondenzatora kojemu možemo računati kapacitet [2].

Za električni kapacitet koaksijalnog kabela prikazanog na slici (Sl. 2.3.):

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (2-3)$$

gdje je  $l$  duljina kabela u metrima (m),  $R_1$  je polumjer unutarnjeg vodiča u metrima (m), te  $R_2$  je polumjer vanjskog vodiča također u metrima (m).

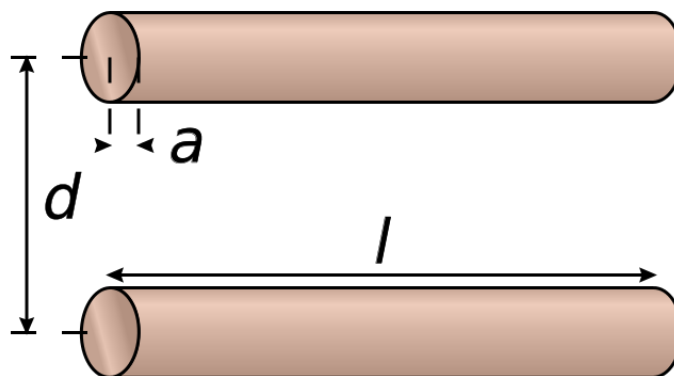


Sl. 2.3. Prikaz modela koaksijalnog kabela kojemu možemo računati kapacitet [2].

Za električni kapacitet dvije paralelne vodljive žice ilustrirane na slici (Sl. 2.4.):

$$C = \frac{\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{4a^2} - 1}\right)} \quad (2-4)$$

gdje je  $l$  duljina žice u metrima (m),  $d$  razmak (udaljenost) među žicama u metrima (m), te  $a$  predstavlja polumjer žice u metrima (m).

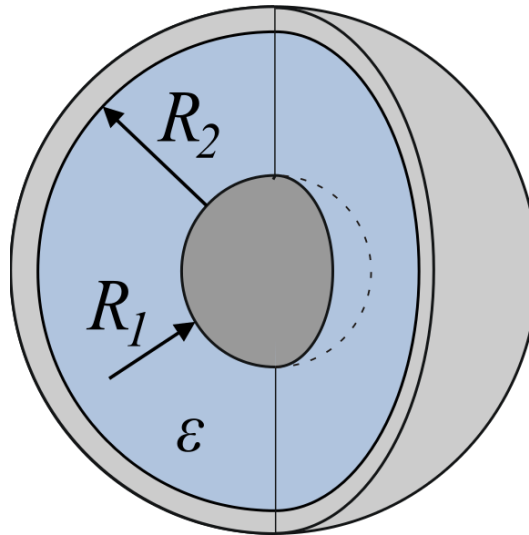


Sl. 2.4. Model dvije paralelne vodljive žice [2]

Za električni kapacitet koncentričnih sfera čiji se prikaz može vidjeti na slici (Sl. 2.5.):

$$C = \frac{4\pi\epsilon}{\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}} \quad (2-5)$$

gdje je  $R_1$  polumjer unutarnje sfere u metrima (m) i  $R_2$  (m) polumjer vanjske sfere u metrima (m):



Sl. 2.5. Model koncentričnih sfera [2]

Za električni kapacitet sfere se koristi:

$$C = 4\pi\epsilon a \quad (2-6)$$

Za električni kapacitet kružnog diska:

$$C = 8\epsilon a \quad (2-7)$$

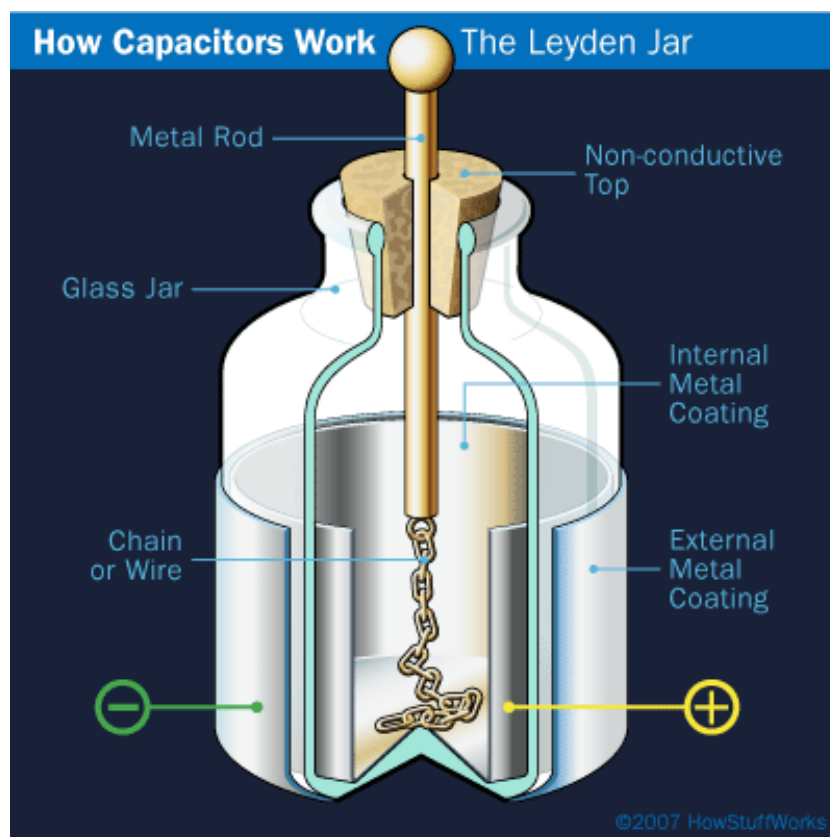
gdje u obje formule  $a$  predstavlja polumjer izražen u metrima (m).



## 2.2. Kondenzator

Kondenzator je pasivna elektronička komponenta koja u električnom krugu ima sposobnost skladištenja električne energije. Ova elektronička komponenta je zapravo sastavljena od dvije paralelne ploče vodljivog materijala između kojih je smješten izolacijski materijal. Iako električni kapacitet postoji između bilo koja dva električna elementa (vodiča) u strujnom krugu koja su dovoljno blizu, kondenzator je posebno dizajniran da osigura i poboljšava taj efekt za različite primjene, uzimajući u obzir veličinu, oblik i pozicioniranje blisko razmaknutih vodiča, te dielektričnog materijala između ploča. Razlikuju se po veličini i geometrijskom smještaju ploča, te po korištenom materijalu dielektrika između istih. Najčešće korišteni materijali izolatora su staklo, papir, keramika, teflon, zrak, guma itd. Kondenzatori se mogu proizvesti za različite svrhe, od malih plastičnih kondenzatora do ultra kondenzatora koji mogu napajati jedan čitav sustav [1,6,7].

Postoje zapisi koji ukazuju da je njemački znanstvenik Ewald Georg von Kleist izumio kondenzator u studenom 1745. Nekoliko mjeseci kasnije nizozemski profesor na sveučilištu u Leydenu, Pieter van Musschenbroek, otkrio je koncept pod nazivom Lajdenska staklenka, što se smatra prvim kondenzatorom. Kako Kleist nije imao detaljne zapise i bilješke o svome radu, niti je poznao kolegu Musschenbroeka, bio je zanemaren kao osoba koja je pridonijela razvoju kondenzatora. Međutim, tijekom godina oba su znanstvenika dobila jednake zasluge za razvoj kondenzatora jer je ustanovljeno da su njihova istraživanja neovisna jedna o drugome i samo znanstvena slučajnost. Lajdenska staklenka je vrlo jednostavan uređaj koji se sastojao od staklenke napola ispunjene vodom, te izvana i iznutra obložena metalnim profilom (folijom). Staklo je djelovalo kao dielektrik, iako se neko vrijeme smatralo da je voda ključan sastojak. Metalna žica ili lanac su bili učvršćeni kroz pluteni čep na vrhu staklenke. Lanac je na dnu bio pričvršćen za nešto što je imalo svojstvo dostavljanja naboja. Nakon primanja naboja, staklenka bi održala dva jednaka ali suprotna naboja u ravnoteži sve dok ne bi bili spojeni vodičem što je dovelo do pražnjenja i iskrenja [7]. Na slici je prikazan trodimenzionalni presjek lajdenske staklenke, njen sadržaj, oblik i konstrukcija (Sl. 2.6.).



Sl. 2.6. Presjek Lajdenske staklenke [7].

Benjamin Franklin je radio je s Lajdenskom staklenkom u svojim eksperimentima s električnom energijom i ubrzo je otkrio da i ravne ploče stakla funkcioniraju jednako kao i staklenka, što ga je potaknulo da razvije ravni kondenzator. Godinama kasnije, engleski fizičar Michael Faraday je prve praktične primjene kondenzatora otkrio u pokušaju pohranjivanja neupotrebljenih elektrona iz svojih eksperimenata. To je dovelo do prvog kondenzatora, napravljenog od velikih naftnih barela. Kao rezultat Faradayevih postignuća u području električne energije, mjerna jedinica za kapacitet, postala je poznata kao farad [7].

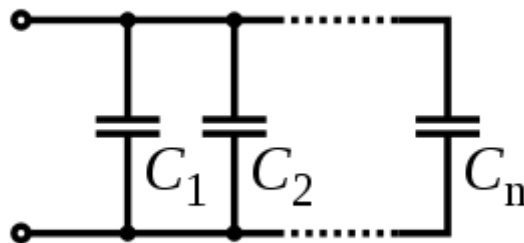
Kondenzator se zasniva na efektu razdvajanja pozitivnih i negativnih nosioca naboja na dvije odvojene paralelne ploče. Ako se na jednu ploču kondenzatora narine napon, zbog dielektrika smještenog između ploča nije moguć prijelaz tog naboja na drugu ploču. Zbog pojave električne sile koja gura pozitivne odnosno negativne nosioce naboja oni se akumuliraju na površini jedne ploče, a zbog svoje blizine električna sila utječe i na drugu paralelnu ploču te iz nje izbija nosioce naboja istog predznaka, ostavljajući nosioce naboja suprotnog predznaka na drugoj ploči. Ovim procesom na jednoj ploči ostaje više pozitivnih nosioca naboja nego negativnih, te obrnuto na drugoj ploči. Povećanjem ploča povećavamo i površinu na kojoj su nosioci naboja smješteni, pa je moguće stvaranje i veće količine naboja. Na ovaj način između ploča kondenzatora postoji razlika potencijala koja se može po potrebi koristiti unutar električnih krugova.[8]

Za paralelni spoj kondenzatora u jednostavnoj mreži vrijedi [9]:

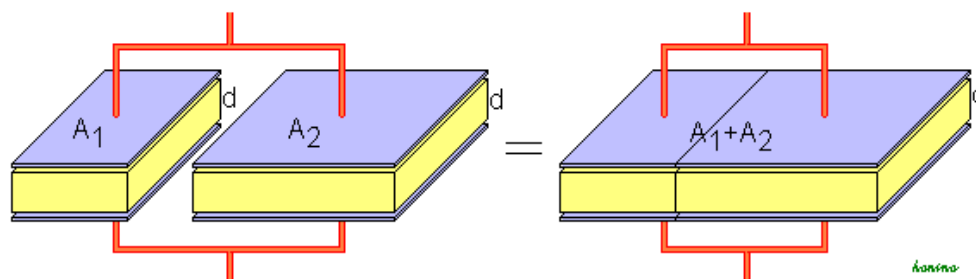
$$C_{uk} = \sum_i C_i = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (2-8)$$

gdje su  $C_{uk}$  ukupni kapacitet paralelnog spoja kondenzatora,  $C_i$  kapacitet pojedinog kondenzatora i  $C_n$  kapacitet posljednjeg kondenzatora, izraženi u Faradima (F).

Na slici (Sl. 2.7.) je shematski prikaz paralelnog spoja kondenzatora, a na slici (Sl. 2.8.) se može vidjeti pojednostavljeni prikaz fizikalnih veličina kondenzatora u paralelnom spoju.



Sl. 2.7. Paralelni spoj kondenzatora u mreži [9].



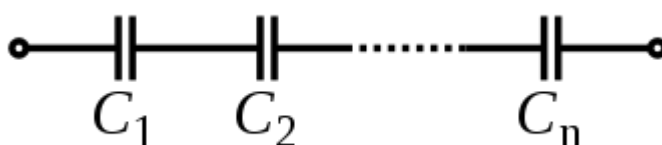
Sl. 2.8. Ilustracija paralelnog spoja dva kondenzatora s promjenom svojstava [9].

Za serijski spoj kondenzatora u jednostavnoj mreži vrijedi [9]:

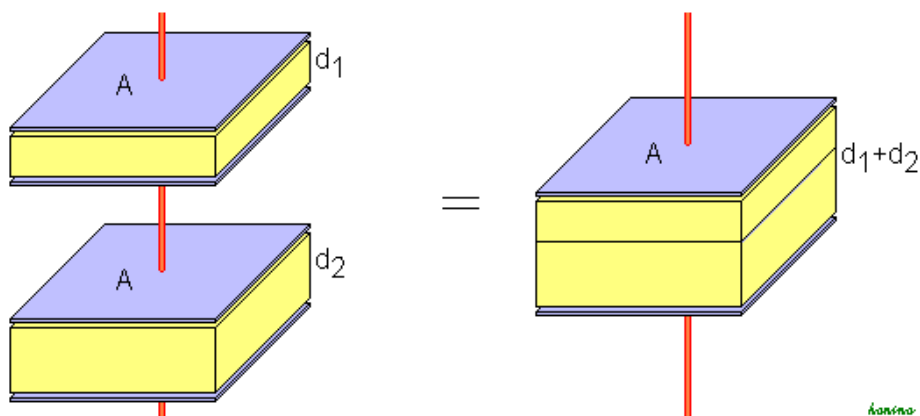
$$\frac{1}{C_{uk}} = \sum_i \frac{1}{C_i} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (2-9)$$

gdje su  $C_{uk}$  ukupni kapacitet serijskog spoja kondenzatora,  $C_i$  kapacitet pojedinog kondenzatora i  $C_n$  kapacitet posljednjeg kondenzatora, izraženi u Faradima (F).

Na slici (Sl. 2.9.) je shematski prikaz serijskog spoja kondenzatora, a na slici (Sl. 2.10.) se može vidjeti pojednostavljeni prikaz fizikalnih veličina kondenzatora u serijskom spoju.



Sl. 2.9. Paralelni spoj kondenzatora u mreži [9].



Sl. 2.10. Ilustracija serijskog spoja dva kondenzatora s promjenom svojstava [9].

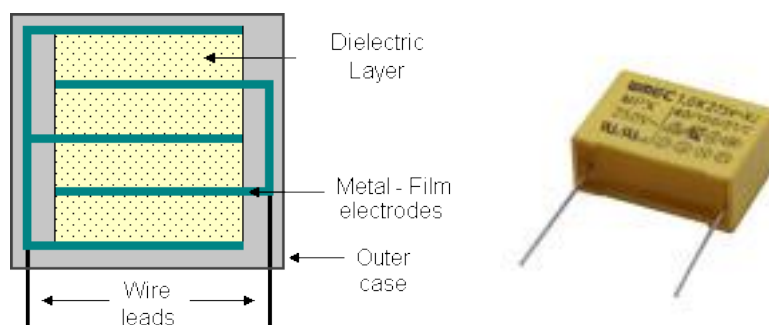
Postoji nekoliko različitih vrsta kondenzatora, ovisno o vrsti primjene i potrebama u električnoj mreži. U sljedećem dijelu su navedene samo neke od vrsta kondenzatora, najčešće korištenih u industriji [10]:

Dielektrični promjenjivi kondenzatori prikazan na slici (Sl. 2.11.) – ugađanjem vijka na vrhu kondenzatora se mijenja njegova vrijednost kapaciteta približavanjem gornje ploče u odnosu na fiksiranu donju ploču [10].



Sl. 2.11. Dielektrični promjenjivi kondenzator [10].

Film kondenzatori prikazan na slici (Sl. 2.12.) – postoje aksijalni i radijalni tip ovih kondenzatora, jedina razlika im je u konstrukciji i načinu smještanja dielektrika u odnosu na vodljivi dio [10].



Sl. 2.12. Radijalni filmski kondenzator [10].

Keramički kondenzatori prikazan na slici (Sl. 2.13.) – Imaju visoku dielektričnu konstantu i dostupni su tako da se relativno visoki kapaciteti mogu dobiti u maloj fizičkoj veličini [10].



Sl. 2.13. Radijalni filmski kondenzator [10].

Elektrolitski kondenzatori prikazan na slici (Sl. 2.14.) – Imaju vrlo raširenu primjenu, niske cijene i male veličine, koriste se kod potreba za velikim kapacitivnim vrijednostima, umjesto sloja metalnog filma koristi se polutekuća otopina elektrolita, ali ih je zbog toga vrlo lako uništiti korištenjem prekomjernog napona, krivim polaritetom, prekomjernom temperaturom itd. [10].



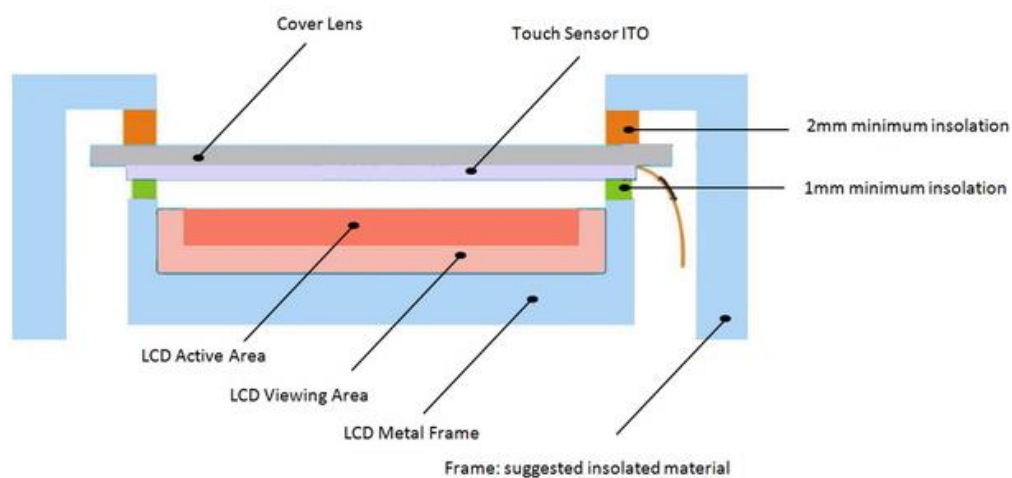
Sl. 2.14. Elektrolitski kondenzator [10].

### 3. ZASLON OSJETLJIV NA DODIR

Jedno od važnijih obilježja današnjih pametnih telefona i tableta jest zaslon osjetljiv na dodir. Dodir je jednostavna i instinktivna ljudska radnja pomoću koje čovjek može dobiti puno informacija o nekom tijelu ili u ovom slučaju koristiti funkcije svoga mobilnog uređaja [11].

Za izradu zaslona pametnog telefona staklo je optimalan materijal u ovom trenutku. Današnje staklene membrane su općenito od 0.2 mm do 0.3 mm debljine, a dodaju im se akrilne smole da se ne prljaju u jako velikoj mjeri, dok se za zaštitu od sitnih ogrebotina obično koriste rješenja proizvođača pametnog telefona dodatnim slojevima. Danas su u mobilnim uređajima najčešće implementirani zasloni osjetljivi na dodir temeljeni na kapacitivnom sustavu [11].

U kapacitivnom sustavu, čiji je detaljan presjek prikazan na slici (Sl. 3.1.), sloj koji pohranjuje električni naboj nalazi se na staklenoj ploči zaslona. Kada korisnik dodirne zaslon prstom, dio naboja se prenosi na prst korisnika pa se na taj način količina naboja na kapacitivnom sloju smanjuje. Ta razlika se mjeri unutar električnih krugova koji su smješteni na svakom kutu zaslona. Dio sklopovlja pametnog telefona zatim računa preciznu relativnu razliku u odnosu na svaki kut zaslona i tako dobiva podatak o koordinatama prsta na zaslonu. Uređaj zatim šalje taj isti podatak u pogonski program zaslona osjetljivog na dodir gdje se taj podatak dalje obrađuje. Nakon obrade, taj podatak služi operacijskom sustavu pametnog telefona da bi odredio sljedeću operaciju, otvorio nekakav program, probudio pametni telefon ili izazvao neku drugu radnju ili događaj. Jedna od prednosti koje kapacitivni sustav zaslona osjetljivog na dodir ima jest da prenosi gotovo 90% svjetlosti zaslona, tako da je na zaslonu prikazan puno čišći i oštrij prikaz u odnosu na ostale izvedbe zaslona osjetljivih na dodir [12].



Sl. 3.1. Presjek kapacitivnog sustava zaslona osjetljivog na dodir [11].

#### **4. DIZAJN ELEKTRODA, MJERENJA I REZULTATI**

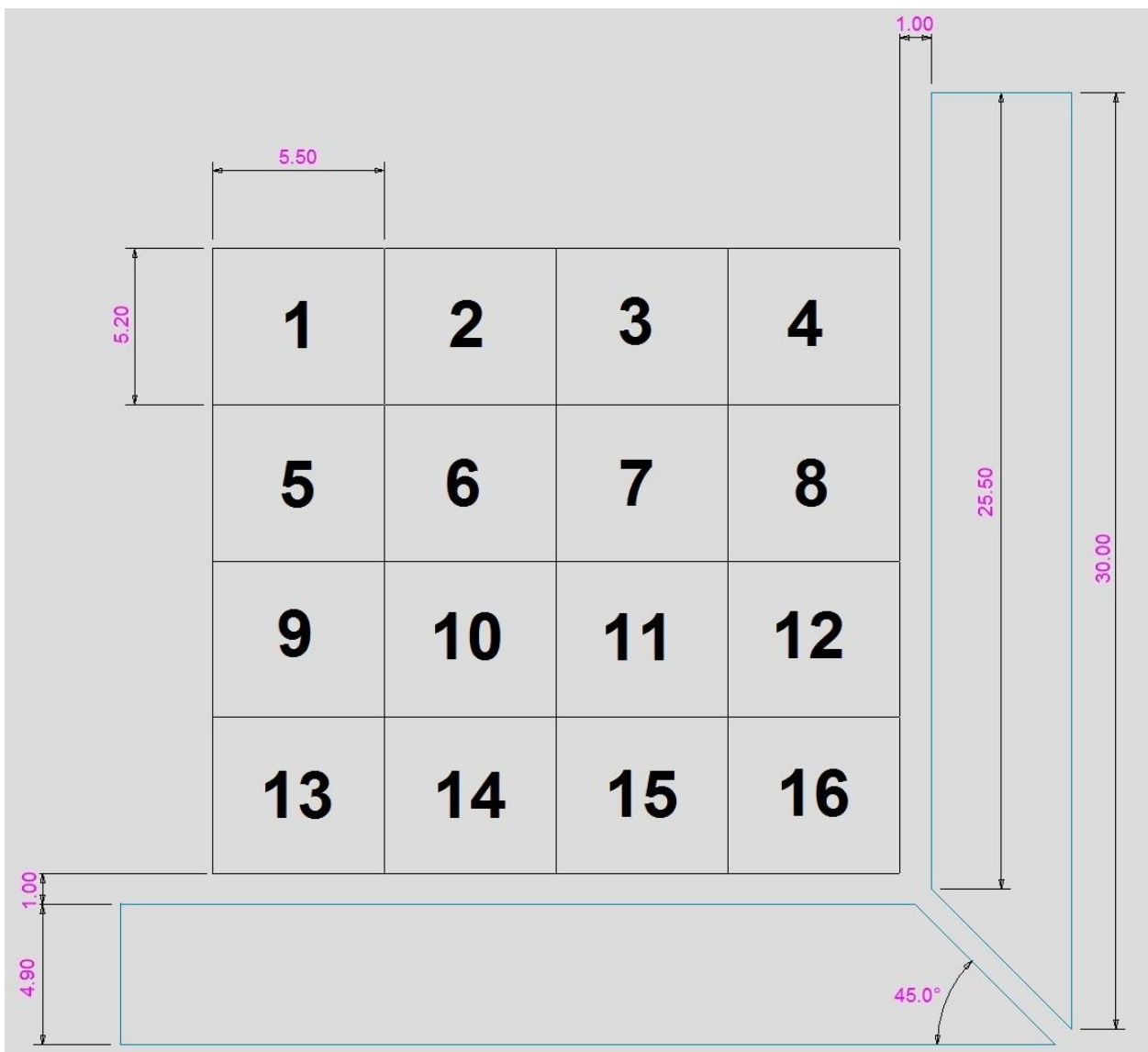
Kako je već navedeno u zadatku završnog rada, potrebno je pomoću mjerenja veličina kapaciteta i napona ispitati promjenu veličina, te odrediti najbolji položaj dviju aluminijskih elektroda kapacitivnih svojstava. Također je potrebno odrediti i oblik tih elektroda kako bi se dobila najveća promjena kapaciteta i napona. Proces mjerenja se obavljao postavljanjem metalnog predmeta unutar područja mjerenja koje je bilo predstavljeno površinom između dviju kapacitivnih elektroda. Za preciznost mjerenja napravljena je mreža na kojoj su smještena polja koja predstavljaju položaje s obzirom na dvije aluminijske elektrode. Polja su numerirana te se metalni predmet postavljao u svako polje pojedinačno i rezultati su se zapisivali. Mjerenje se odvijalo u dvije faze. U prvoj fazi mjerenja se metalni predmet postavljao u pojedino polje te se promatrao parametar kapaciteta i njegova promjena korištenjem RLC metra spojenim na elektrode senzore. Frekvencija na kojoj je mjerni instrument mjerio kapacitet postavljena je na 100 kHz. Sve vrijednosti kapaciteta su izmjerene i izražene u pikofaradima (pF). U drugoj fazi mjerenja na elektrode senzore spojen je elektronički sklop koji predstavlja oscilator čija se frekvencija osciliranja kontrolirala ulaznim naponom generatora signala na koji je bio spojen. U ovom dijelu se metalni predmet također postavljao u pojedino polje mreže, ali je ovoga puta promatran parametar napona pomoću digitalnog multimetra. U drugoj fazi mjerenja je bilo potrebno pronaći optimalnu vrijednost frekvencije oscilatora pri kojoj se napon i njegova promjena može očitati s najvećom točnošću bez velikih odstupanja. Vrijednosti električnog kapaciteta elektroda i napona između njih mjerene su na četiri različite konfiguracije elektroda.



Na slikama priloženim uz svaki od dizajna i smještaja elektroda je prikazana mjerna mreža. Mjerna mreža se sastoji od ukupno šesnaest polja. Na svako pojedino polje se postavljao metalni predmet koji je uzrokovao promjenu u kapacitetu i naponu svojim djelovanjem između dvije aluminijske trake. Predmet je bio dimenzija  $5.50 \times 5.20$  cm, s obzirom na to je mreža i podijeljena. Mreža je od svake elektrode bila u razmaku od 1 cm. U tablicama mjerenja koje su smještene u pojedinom slučaju zapisane su vrijednosti unutar retka i stupca koji odgovara broju retka i stupca na mjernoj mreži. Kote duljina na slikama su prikazane u centimetrima, izmjerene vrijednosti kapaciteta u tablicama su izražene u pikofaradima, te vrijednosti razlike između referentnog kapaciteta u tablicama su izražene u postotcima. Također su izrađeni i površinski grafikoni na kojima je grafički prikazana osjetljivost dizajna. U grafikonima su upisane samo rubne vrijednosti mjerne mreže zbog lakšeg očitavanja. Nijanse žute boje i visina određuju razlike vrijednosti u trenutku kada je predmet postavljen s obzirom na referentnu vrijednost određene veličine u tom polju bez ikakve pobude. Zbog prisutnosti smetnji, nesavršenosti instrumenata, uzemljenja, te ostalih čimbenika mjerenja imaju određeni stupanj pogreške.

## 4.1. Prvi dizajn elektroda

Za prvi slučaj elektrode su postavljene pod pravim kutom jedna s obzirom na drugu kako je prikazano na slici (Sl. 4.1.). Jedan kraj svake elektrode savinut pod kutem od  $45^\circ$  i razmaknute 1 cm jedna od druge u dodirnom kutu. Referentna vrijednost kapaciteta bez predmeta iznosi 9,1 pF, referentna vrijednost napona bez predmeta iznosi 3,644 V, te frekvencija oscilatora u ovom slučaju iznosi 210 kHz.



Sl. 4.1. Prikaz senzorskih elektroda s obzirom na mjernu mrežu u mjerilu.

Tablica 4.1. Izmjerene vrijednosti kapaciteta na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog kapaciteta.

Izmjerene vrijednosti kapaciteta [pF]				Razlika od referentnog kapaciteta [%]			
9,110	9,120	9,120	9,130	0,1099	0,2198	0,2198	0,3297
9,110	9,110	9,120	9,160	0,1099	0,1099	0,2198	0,6593
9,120	9,130	9,140	9,170	0,2198	0,3297	0,4396	0,7692
9,130	9,140	9,170	9,300	0,3297	0,4396	0,7692	2,1978

Tablica 4.2. Izmjerene vrijednosti napona na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog napona.

Izmjerene vrijednosti napona [V]				Razlika od referentnog napona [%]			
3,665	3,656	3,668	3,671	0,5763	0,3293	0,6586	0,7409
3,669	3,661	3,655	3,649	0,6861	0,4665	0,3019	0,1372
3,659	3,660	3,646	3,642	0,4116	0,4391	0,0549	0,0549
3,652	3,649	3,644	3,604	0,2195	0,1372	0,0000	1,0977

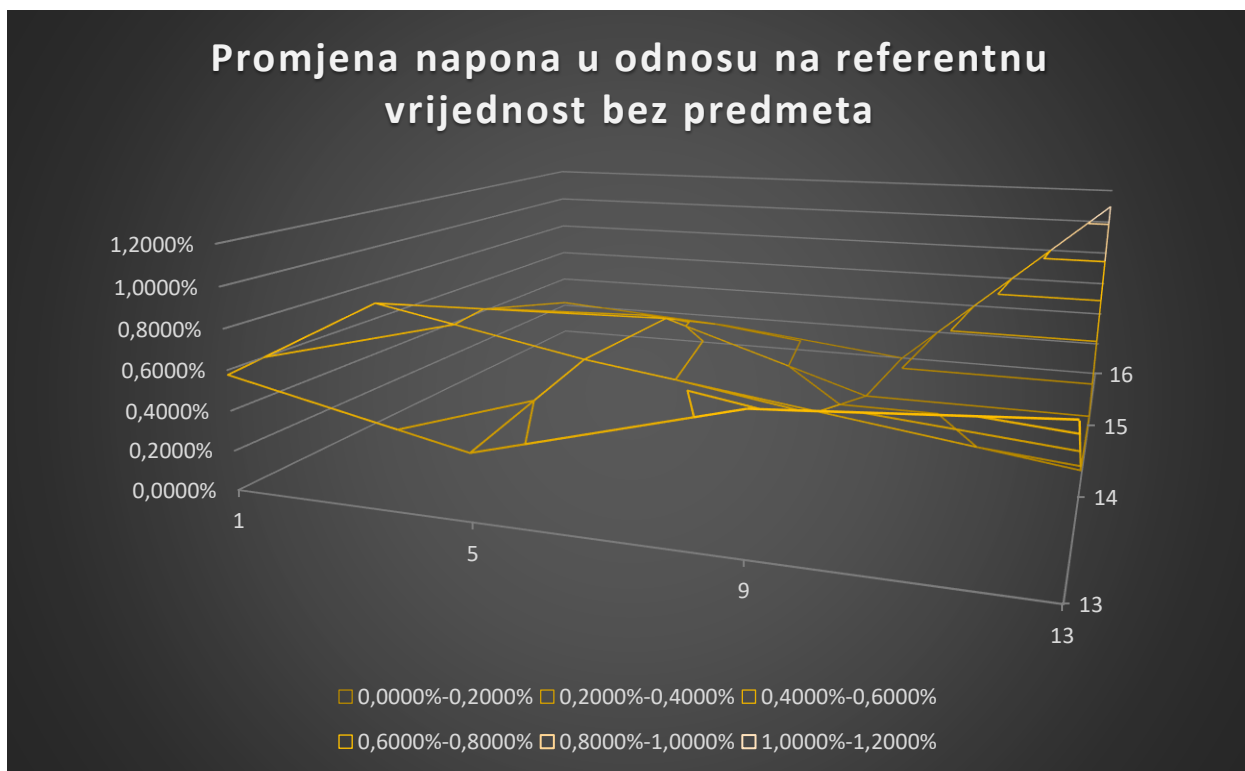
Na slikama su prikazani odnosi promjene kapaciteta i referentne vrijednosti trodimenzionalnim (Sl. 4.2.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.3.) površinskim grafikonima, te odnosi promjene napona i referentne vrijednosti također u trodimenzionalnim (Sl. 4.4.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.5.) površinskim grafikonima.



Sl. 4.2. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.



Sl. 4.3. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.



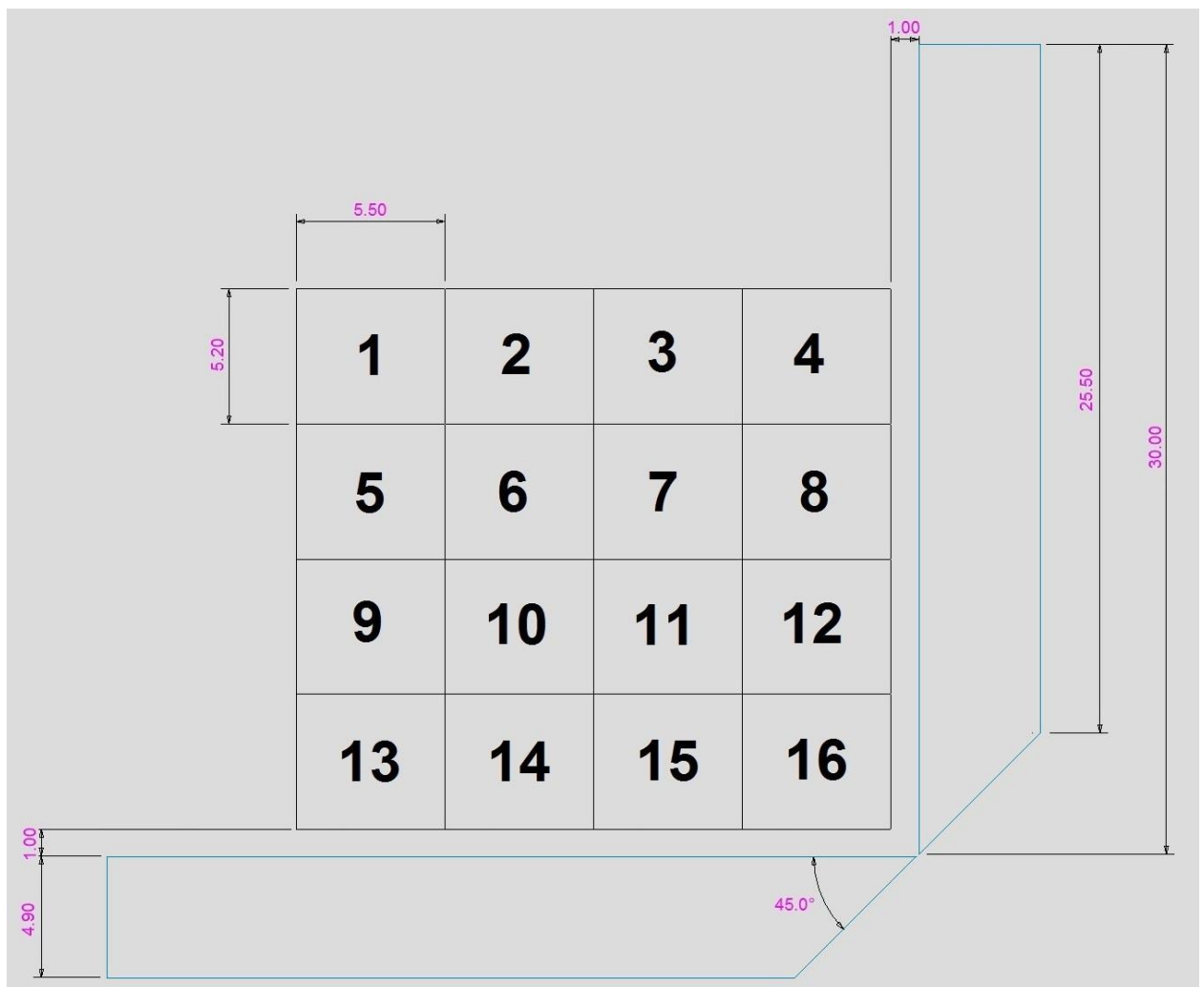
Sl. 4.4. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.



Sl. 4.5. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.

## 4.2. Drugi dizajn elektroda

U drugom slučaju elektrode su postavljene pod pravim kutom jedna s obzirom na drugu kako je prikazano na slici (Sl. 4.6.). Jedan kraj svake elektrode savinut pod kutem od  $45^\circ$ , odvojene samo toliko da se ne dodiruju u dodirnom kutu, okrenute jedna prema drugoj. Referentna vrijednost kapaciteta bez predmeta iznosi 8,13 pF, referentna vrijednost napona bez predmeta iznosi 3,114 V, te frekvencija oscilatora u ovom slučaju iznosi 190 kHz.



Sl. 4.6. Prikaz senzorskih elektroda s obzirom na mjernu mrežu u mjerilu.

Tablica 4.3. Izmjerene vrijednosti kapaciteta na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog kapaciteta.

Izmjerene vrijednosti kapaciteta [pF]				Razlika od referentnog kapaciteta [%]			
8,130	8,130	8,140	8,170	0,0000	0,0000	0,1230	0,4920
8,130	8,140	8,150	8,190	0,0000	0,1230	0,2460	0,7380
8,140	8,140	8,150	8,210	0,1230	0,1230	0,2460	0,9840
8,170	8,190	8,210	8,340	0,4920	0,7380	0,9840	2,5830

Tablica 4.4. Izmjerene vrijednosti napona na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog napona.

Izmjerene vrijednosti napona [V]				Razlika od referentnog napona [%]			
2,806	2,650	2,572	2,532	9,8908	14,9004	17,4053	18,6898
2,745	2,821	2,503	2,448	11,8497	9,4091	19,6211	21,3873
2,677	2,649	2,510	2,453	14,0334	14,9326	19,3963	21,2267
2,707	2,676	2,502	2,443	13,0700	14,0655	19,6532	21,5478

Na slikama su prikazani odnosi promjene kapaciteta i referentne vrijednosti trodimenzionalnim (Sl. 4.7.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.8.) površinskim grafikonima, te odnosi promjene napona i referentne vrijednosti također u trodimenzionalnim (Sl. 4.9.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.10.) površinskim grafikonima.

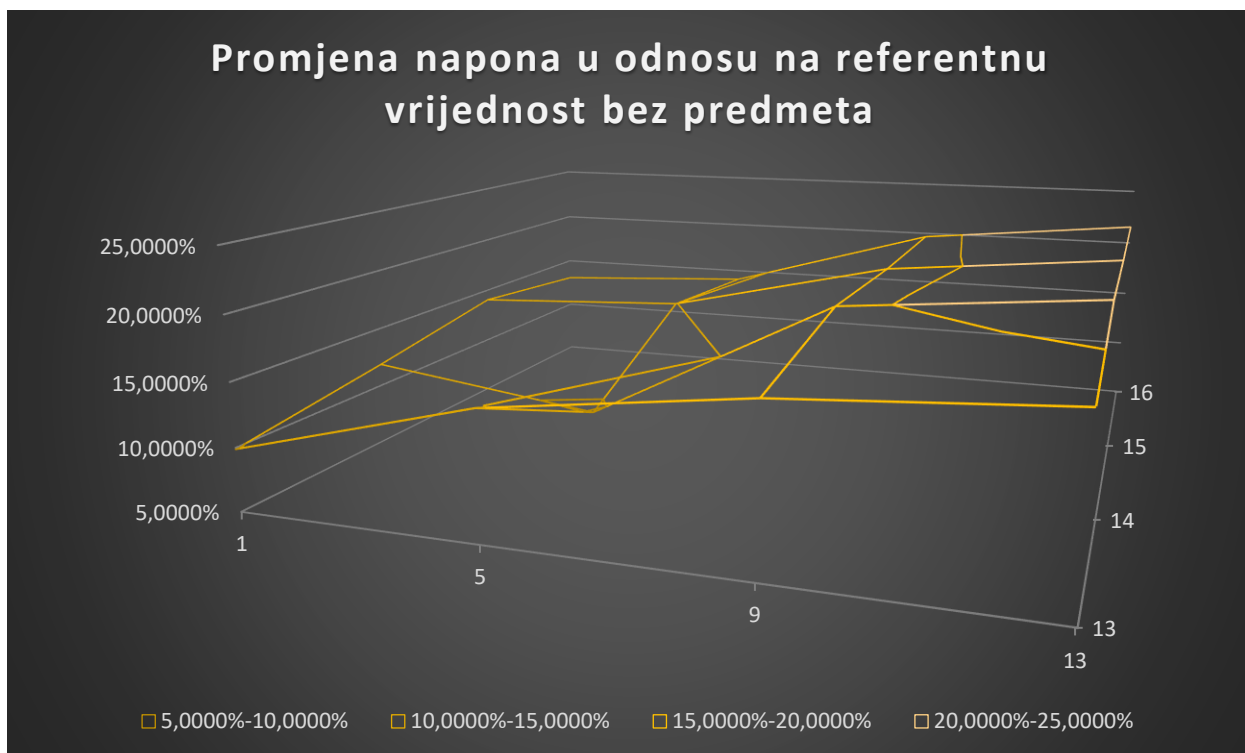


Sl. 4.7. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.

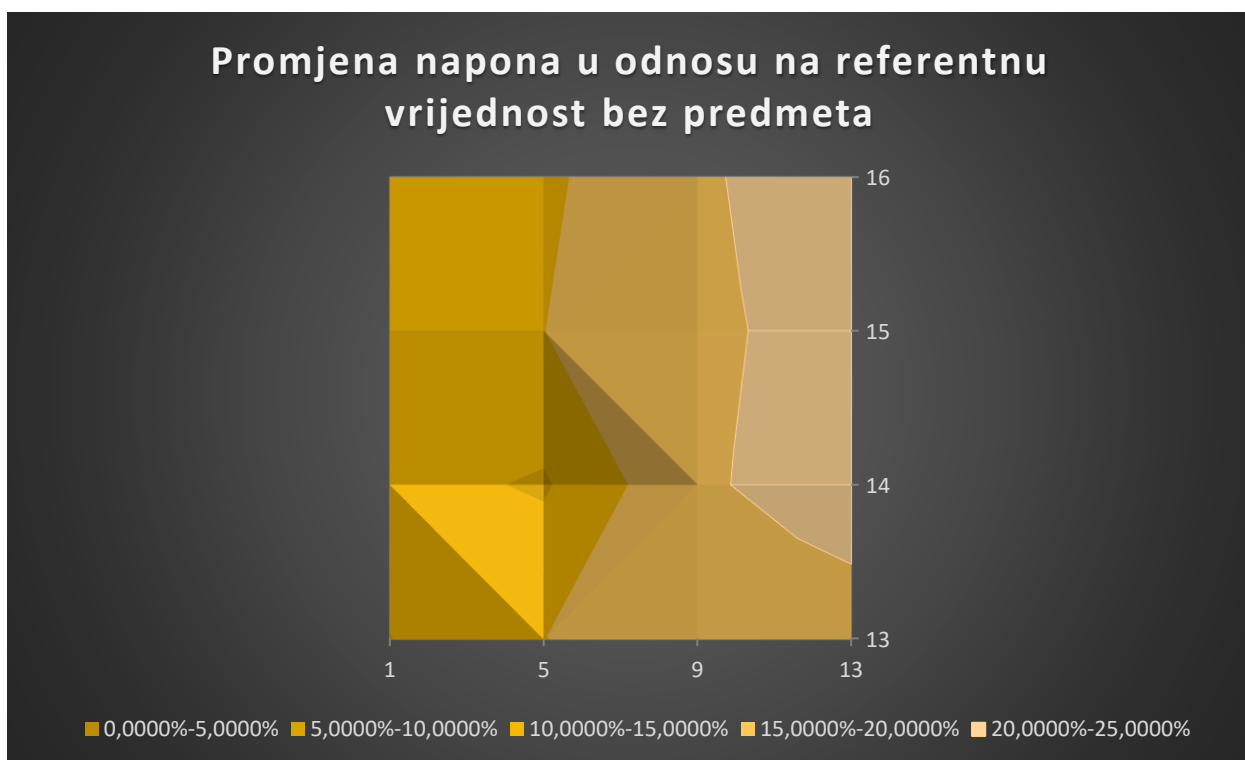


Sl. 4.8. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.





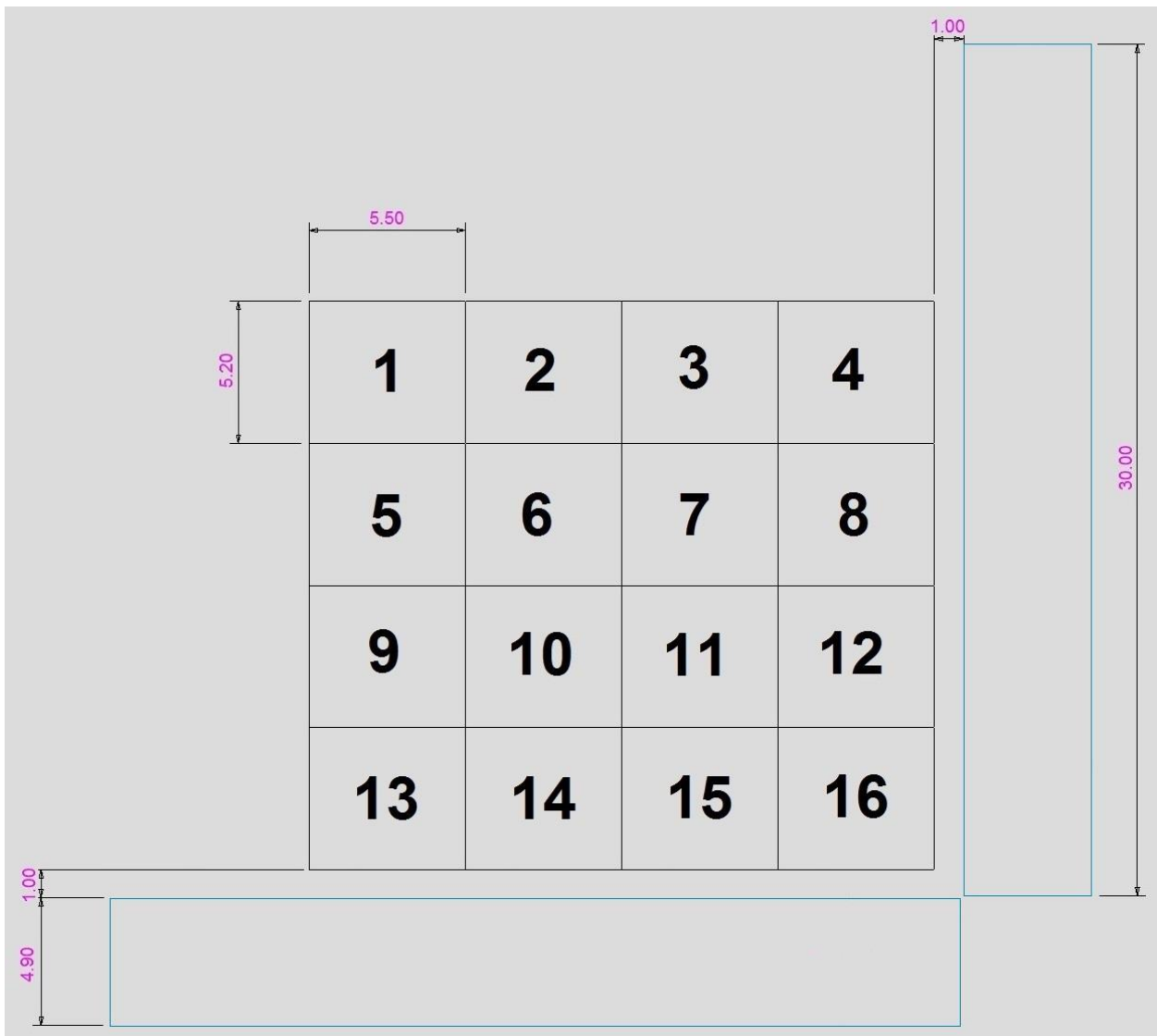
Sl. 4.9. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.



Sl. 4.10. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.

### 4.3. Treći dizajn elektroda

Treći položaj elektroda dizajniran je tako da su obje elektrode postavljene pod pravim kutom jedna s obzirom na drugu, odvojene samo toliko da se ne dodiruju u dodirnom kutu, kako je prikazano na slici (Sl. 4.11.). Referentna vrijednost kapaciteta bez predmeta iznosi 8.3 pF, referentna vrijednost napona bez predmeta iznosi 3.447 V, te frekvencija oscilatora u ovom slučaju iznosi 200 kHz.



Sl. 4.11. Prikaz senzorskih elektroda s obzirom na mjernu mrežu u mjerilu.

Tablica 4.5. Izmjerene vrijednosti kapaciteta na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog kapaciteta.

Izmjerene vrijednosti kapaciteta [pF]				Razlika od referentnog kapaciteta [%]			
8,310	8,310	8,320	8,330	0,1205	0,1205	0,2410	0,3614
8,310	8,310	8,320	8,350	0,1205	0,1205	0,2410	0,6024
8,310	8,320	8,330	8,400	0,1205	0,2410	0,3614	1,2048
8,360	8,370	8,390	8,530	0,7229	0,8434	1,0843	2,7711

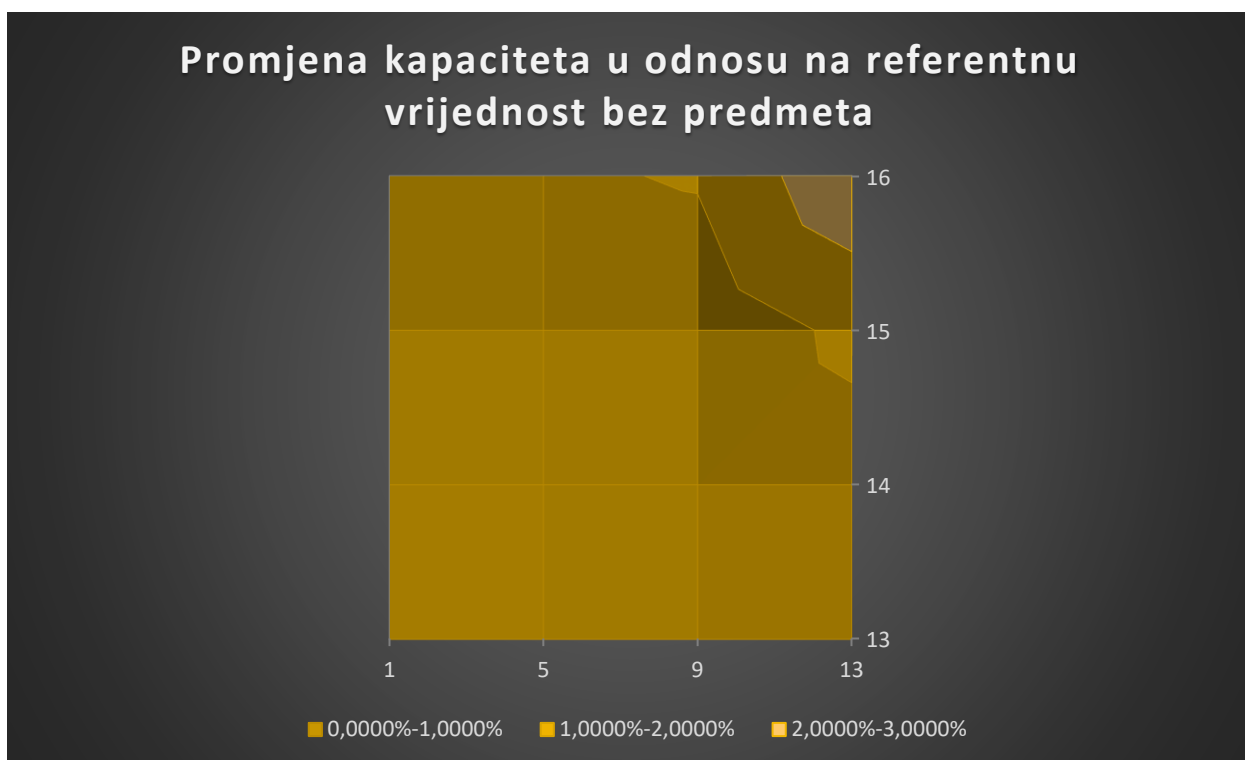
Tablica 4.6. Izmjerene vrijednosti napona na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog napona.

Izmjerene vrijednosti napona [V]				Razlika od referentnog napona [%]			
3,445	3,433	3,439	3,378	0,0580	0,4062	0,2321	2,0017
3,412	3,411	3,378	3,338	1,0154	1,0444	2,0017	3,1622
3,391	3,381	3,204	3,017	1,6246	1,9147	7,0496	12,4746
3,406	3,333	2,995	2,709	1,1894	3,3072	13,1129	21,4099

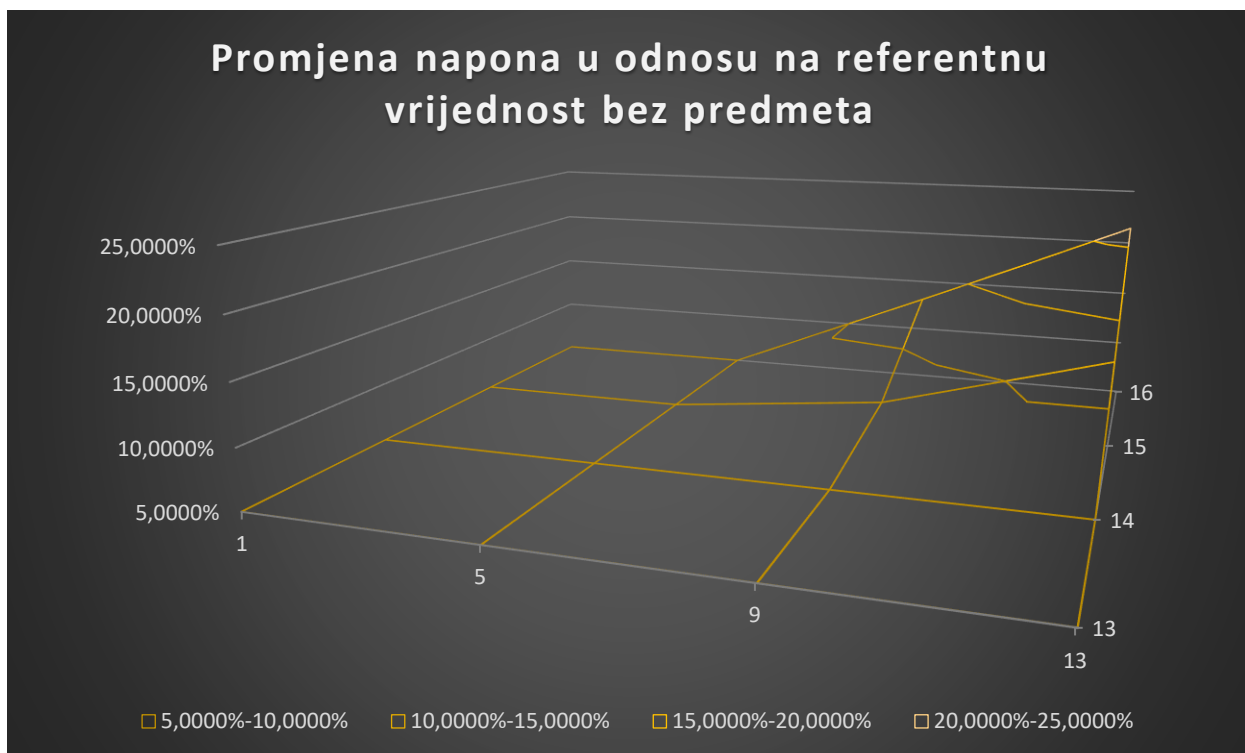
Na slikama su prikazani odnosi promjene kapaciteta i referentne vrijednosti trodimenzionalnim (Sl. 4.12.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.13.) površinskim grafikonima, te odnosi promjene napona i referentne vrijednosti također u trodimenzionalnim (Sl. 4.14.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.15.) površinskim grafikonima.



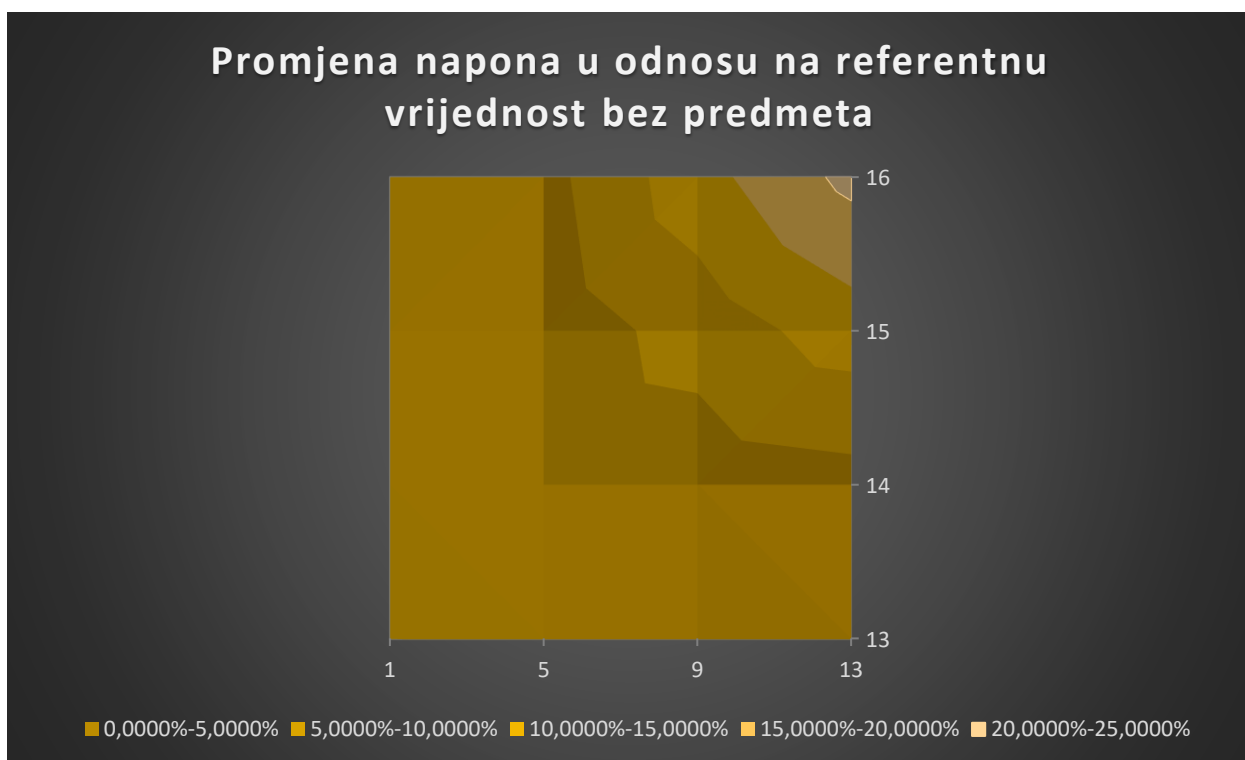
Sl. 4.12. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.



Sl. 4.13. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.



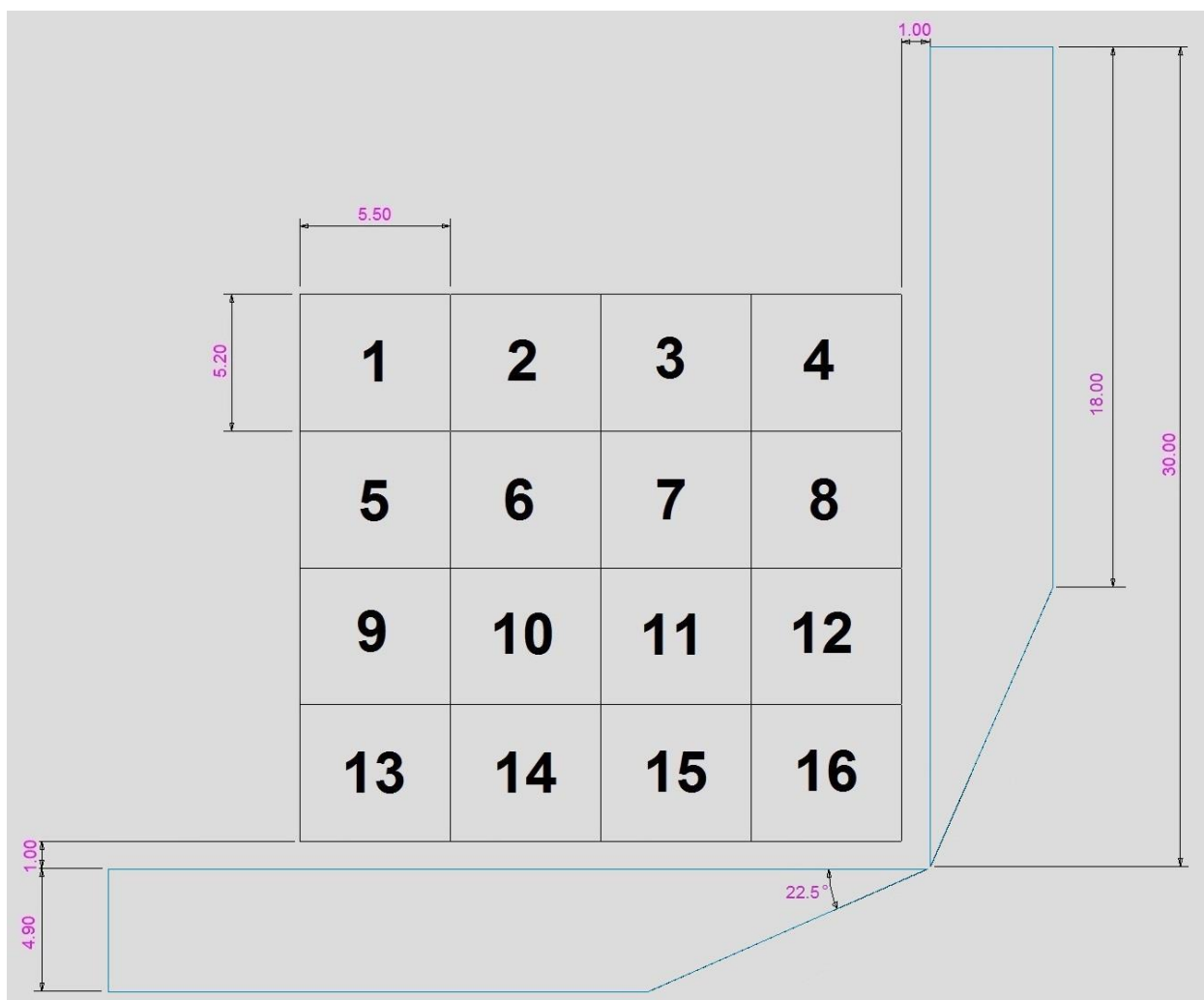
Sl. 4.14. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, trodimenzionalni prikaz.



Sl. 4.15. Površinski grafikoni koji prikazuju promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, dvodimenzionalni prikaz.

#### 4.4. Čevrti dizajn elektroda

Položaj elektroda u četvrtom testu je vrlo sličan drugom, elektrode su postavljene pod pravim kutom jedna s obzirom na drugu, jedan kraj svake elektrode savinut pod kutem od  $22.5^\circ$ , odvojene samo toliko da se ne dodiruju u dodirnom kutu, okrenute jedna prema drugoj. Prikaz ovog dizajna predstavljen je na slici (Sl. 4.16.). Referentna vrijednost kapaciteta bez predmeta iznosi 7,7 pF, referentna vrijednost napona bez predmeta iznosi 3.568 V, te frekvencija oscilatora u ovom slučaju iznosi 210 kHz.



Sl. 4.16. Prikaz senzorskih elektroda s obzirom na mjernu mrežu u mjerilu

Tablica 4.7. Izmjerene vrijednosti kapaciteta na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog kapaciteta.

Izmjerene vrijednosti kapaciteta [pF]				Razlika od referentnog kapaciteta [%]			
7,710	7,720	7,720	7,750	0,0000	0,1297	0,1297	0,5188
7,720	7,720	7,730	7,770	0,1297	0,1297	0,2594	0,7782
7,730	7,730	7,740	7,800	0,2594	0,2594	0,3891	1,1673
7,760	7,770	7,800	7,930	0,6485	0,7782	1,1673	2,8534

Tablica 4.8. Izmjerene vrijednosti napona na mjernoj mreži s postotnim prikazom razlike od referentnog napona.

Izmjerene vrijednosti napona [V]				Razlika od referentnog napona [%]			
3,411	3,232	3,208	3,186	4,4002	9,4170	10,0897	10,7063
3,331	3,227	3,127	3,128	6,6424	9,5572	12,3599	12,3318
3,264	3,277	3,140	3,132	8,5202	8,1558	11,9955	12,2197
3,191	3,090	3,022	2,917	10,5661	13,3969	15,3027	18,2455

Na slikama su prikazani odnosi promjene kapaciteta i referentne vrijednosti trodimenzionalnim (Sl. 4.17.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.18.) površinskim grafikonima, te odnosi promjene napona i referentne vrijednosti također u trodimenzionalnim (Sl. 4.19.) i dvodimenzionalnim (Sl. 4.20.) površinskim grafikonima.

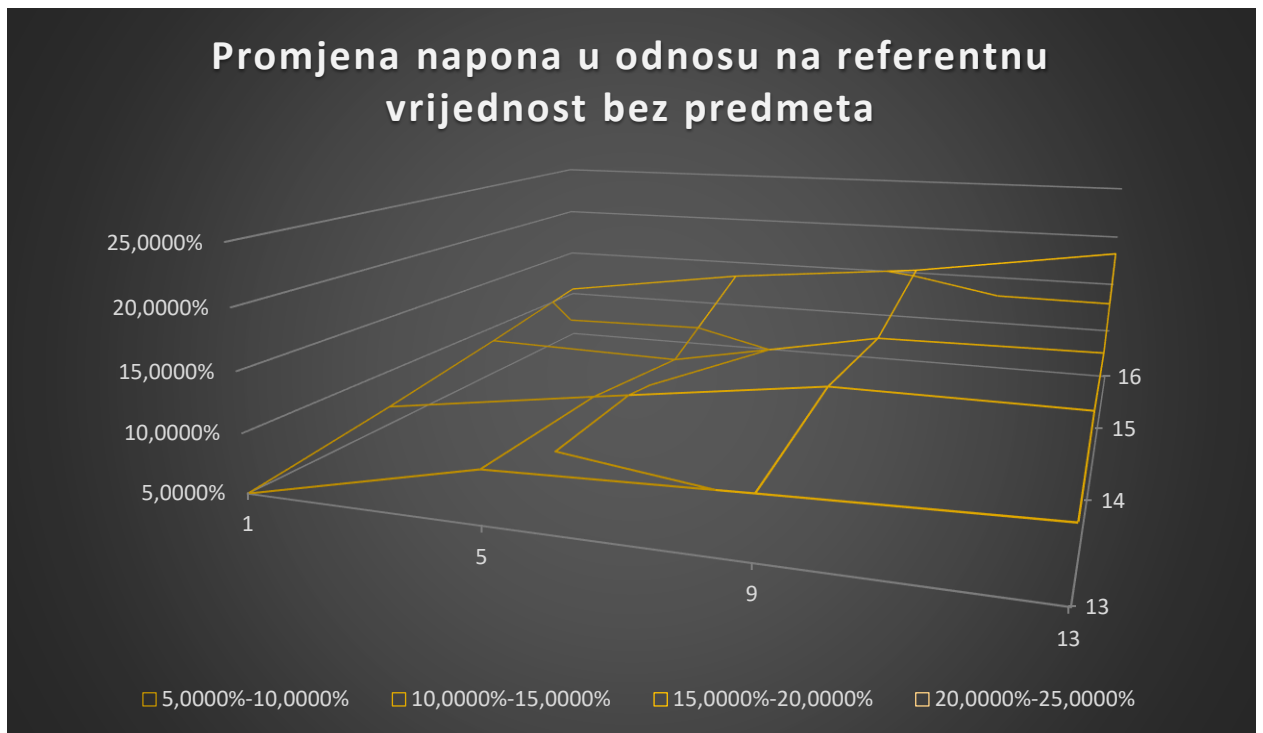


Sl. 4.17. Površinski grafik koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, prikazan pod kutem.

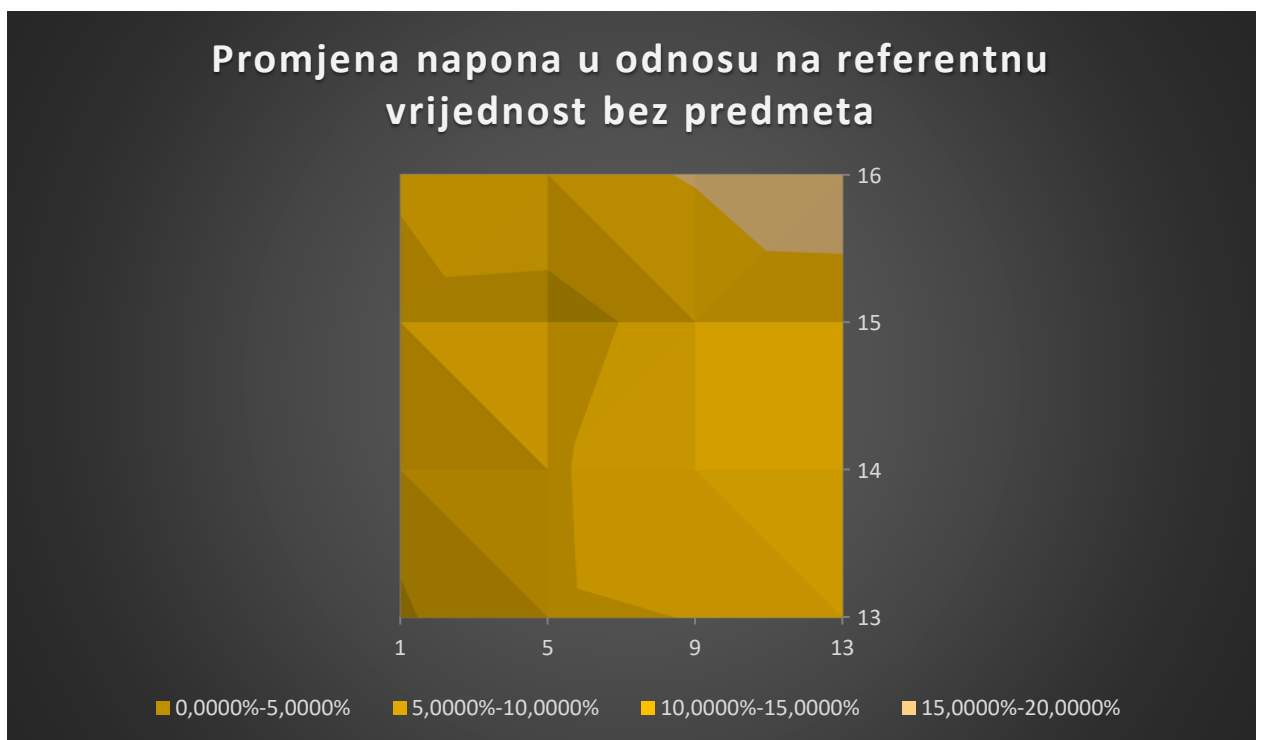


Sl. 4.18. Površinski grafik koji prikazuje promjenu kapaciteta u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, prikazan odozgo.





Sl. 4.19. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, prikazan pod kutem.



Sl. 4.15. Površinski grafikon koji prikazuje promjenu napona u odnosu na referentnu vrijednost bez predmeta, prikazan odozgo.

## 4.5. Zapažanja i komentar rezultata

Kako možemo očitati vrijednosti grafičkim putem, u svakom slučaju se primjećuje najveća pobuda postavljanjem predmeta na polje pod brojem 16 jer je najbliži točki dodira dviju elektroda. Najpreciznija i najkonzistentnija pobuda primjećuje se u trećem dizajnu elektroda zbog takvog položaja elektroda koji omogućuje najveću pobudu električnog polja. Iako nije toliko osjetljiv na veće udaljenosti od točke dodira, što je predmet postavljen bliže elektrodama to je pobuda bila veća i svakim daljnjim pomakom linearna do nekog stupnja. Kao najgori senzor promjene napona izdvaja se prvi dizajn zato što je gotovo nemoguće precizno odrediti poziciju predmeta zbog velikih oscilacija vrijednosti unutar mjernog područja. Pregledom rezultata također možemo uočiti da razmak između ploča, te njihov kut utječu na promjenu polja. Zbog toga se u slučaju gdje su elektrode smještene najbliže, pod kutem od  $90^\circ$ , može očitati najveća promjena. Ako je razmak između ploča veći zbog njihovog kuta, tada je pobuda manja. U slučaju kada su elektrode postavljene s konstantnom veličinom razmaka kao u prvom dizajnu, tada se dobiva odziv srednje kvalitete, ali lošiji od odziva kod elektroda postavljenih pod pravim kutem.

Dodavanjem dodatnih elektroda na rubove mreže uvelike bi se smanjio problem određivanja pozicije, te bi vrijednosti napona puno brže i preciznije dolazile do svojih ustaljenih vrijednosti. Pomoću tih vrijednosti matematičkim je putem moguće odrediti točne vrijednosti koordinata predmeta unutar polja kao u suvremenim zaslonima osjetljivim na dodir.

## 5. ZAKLJUČAK

Završni rad je podijeljen u dva konkretna dijela. Teorijski dio opisuje potrebna znanja, veličine, te pojmove vezane za svojstva i pojave unutar praktičnog dijela. Kapacitet je osnovno svojstvo na kojem funkcioniraju dvije elektrode koje predstavljaju senzore na kojima su izvršavana mjerenja. To je svojstvo preko kojega proučavamo odnos elektrona u vodiču, ponašanje naboja, te stvaranje razlike potencijala koja nam je bitna pri promatranju osjetljivosti elektroda. Kondenzator je konkretan elektronički element koji svojim svojstvom pohrane električnog naboja pokazuje kako zapravo kapacitet djeluje te je iz tog razloga opisan u ovom završnom radu. Ukratko je opisan i način rada zaslona osjetljivog na dodir jer je taj koncept na određen način dokazan u praktičnom dijelu, mjerenjem promjene električnih veličina unutar električnog polja koje se nalazi između aluminijskih elektroda.

Praktični dio rada sastoji se od dizajniranja i pozicioniranja dviju aluminijskih elektroda s kapacitivnim svojstvima. Postavljene na rubove mjerne mreže, koja se sastoji od šesnaest polja na koje se postavljao metalni predmet, na zaslonima digitalnih mjernih uređaja očitavale su se vrijednosti kapaciteta i napona. Za mjerenje napona potrebno je uzemljiti metalni predmet dodiranjem kako bi se prikazivale konkretne i točne vrijednosti, dok za kapacitet to nije bilo nužno. Iz dobivenih mjerenja i nacrtanih grafova može se doći do zaključka da su najbolji rezultati dobiveni kada su elektrode postavljene okomito jedna s obzirom na drugu i kada imaju pravokutni oblik bez točaka dodira. Kao najgori dizajn se može izdvojiti kada su elektrode okomite, rubovi pod kutem od  $45^\circ$ , te okrenute jedna prema drugoj. Iako rezultati zbog smetnji nisu savršeno točni, može se doći do navedenih zaključaka i uspoređivati ih međusobno. Dodavanjem elektroda na ostale rubove bi se matematičkim putem mogla riješiti nepoznanica koordinata i točna udaljenost predmeta od pojedinog vrha, kao kod suvremenih zaslona osjetljivih na dodir.

## LITERATURA

- [1] Nekoliko urednika enciklopedije Britannica „*Capacitance*“, <https://www.britannica.com/science/capacitance>, studeni 2016., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [2] Korisnici internetske enciklopedije Wikipedia „*Capacitance*“, <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance>, lipanj 2017., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [3] Projekt autora Maximous „*Measure Capacitance With Arduino*“, <http://www.instructables.com/id/Measure-Capacitance-with-Arduino/>, 2015., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [4] Korisnici internetske enciklopedije Wikipedia „*Capacitance*“, <https://en.wikipedia.org/wiki/Farad>, lipanj 2017., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [5] Korisnici internetske enciklopedije Wikipedija „*Permitivnost*“, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Permitivnosti>, lipanj 2017., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [6] Nekoliko urednika enciklopedije Britannica „*Capacitor*“, <https://www.britannica.com/technology/capacitor>, svibanj 2013., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [7] Marshall Brain i Charles W. Bryant „*How Capacitors Work*“, <http://electronics.howstuffworks.com/capacitor.htm>, rujan 2007., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [8] Youtube video o fizici kondenzatora i njihovom ponašanju u strujnom krugu, autora Eugene Khutoryansky pod nazivom kanala: Physics Videos by Eugene Khutoryansky „*Capacitors and Capacitance: Capacitor physics and circuit operation*“, [https://youtu.be/f\\_MZNsEqyQw](https://youtu.be/f_MZNsEqyQw), 26. travanj 2016., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [9] Korisnici internetske enciklopedije Wikipedia „*Capacitor: Networks*“, <https://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor#Networks>, lipanj 2017., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [10] Autori i urednici stranice elektroničkih pojmova „*Electronics Tutorials: Types of Capacitors*“, [http://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap\\_2.html](http://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap_2.html), prosinac 2016., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [11] Sanja Ledinek „*Kako radi kapacitivni sustav za raspoznavanje dodira u smartfonima i tabletima*“, <http://www.racunalo.com/kako-radi-kapacitivni-sustav-za-raspoznavanje-dodira-u-smartfonima-i-tabletima-ucimo-zajedno/>, travanj 2014., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.
- [12] Nekoliko različitih autora i urednika „*How do touch-screen monitors know where you're touching?*“, <http://computer.howstuffworks.com/question716.htm>, rujan 2001., pristup ostvaren 25. lipnja 2017.

## SAŽETAK

**Naslov:** Dizajn elektroda za kapacitivni senzor položaja

U ovom završnom radu osim teorijskih pojmova kapaciteta, kondenzatora i zaslona osjetljivih na dodir detaljno je odrađen i praktični dio određivanja i dizajna elektroda kao kapacitivnih senzora za položaj metalnog tijela unutar površine između elektroda. Korištene su dvije aluminijske trake kao senzori, te su postavljanjem metalnog tijela unutar električnog polja mjerene promjene veličina kapaciteta i napona. Usporedbom dobivenih rezultata, uz manja odstupanja, može se dovesti do zaključka o kvaliteti dizajna i smještaja pojedinih sustava elektroda, te njihovu osjetljivost na predmet. U radu je to prikazano analitičkim i grafičkim rješenjima.

**Ključne riječi:** kapacitet, kondenzator, touchscreen, naboj, napon, elektrode, mjerenje

## **ABSTRACT**

**Title:** Electrode design for capacitive position sensor

In this bachelor thesis, apart from the theoretical concepts of capacitance, capacitor and touchscreen, the practical part of setting and design of electrodes as a capacitive sensors for position of the metal object inside the surface between the two electrodes is in detail explained as well. Two aluminum strips were used as sensors and the capacity and voltage differential was measured by placing the metal body inside the electric field. By comparing the obtained results including minor deviations, a conclusion is drawn about the design quality and the placement of each electrode system and their sensitivity to the object. This thesis presents analytical and graphical solutions.

**Key words:** capacitance, capacitor, touchscreen, charge, voltage, electrode, measurements

## **ŽIVOTOPIS**

Antonio Hmura je rođen 31. siječnja 1996. u Osijeku. Nakon završene osnovne škole „Mladost“ u Osijeku 2010. upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, smjer tehničar za računalstvo. Unutar svog srednjoškolskog obrazovanja svoja teorijska znanja nadopunjuje sudjelovanjem u natjecanjima iz osnova informatike na kojem 2013. ostvaruje 1. mjesto na županijskom natjecanju. Obavljanjem stručne prakse u HEP TE-TO Osijek i RTV servisu Madecki proširuje svoje praktične vještine. 2014. godine direktnim upisom započinje studij računarstva na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Od 2015./2016. akademske godine je demonstrator kolegija Elektronika I, na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku smjerovima elektrotehnika, te računarstvo.