

# Prijedlog novog postupka izbora dielektričnih materijala za upotrebu u brodskim sustavima

## *Proposal of New Method for Dielectric Materials Selection in Ship Systems Applications*

Igor Vujović

Sveučilište u Splitu  
Pomorski fakultet  
e-mail: ivujovic@pfst.hr

Zlatan Kulenović

Sveučilište u Splitu  
Pomorski fakultet  
e-mail: zlatan@pfst.hr

Slavica Vujović Kežić

Split

UDK 621.315:629.5.01

Prethodno priopćenje / Preliminary communication  
Rukopis primljen / Paper accepted: 13. 12. 2013.

### Sažetak

Dielektrični materijali su konstitutivni, pomoćni ili konstrukcijski materijali u mnogim brodskim sustavima i zato je značajno izabrati ispravan materijal za određenu namjenu. U radu su analizirani utjecaji dominantnih čimbenika na kompleksnu relativnu dielektričnu konstantu s obzirom na primjenu u pomorstvu i na mehanizam polarizacije. Prikazan je novi postupak izbora dielektričnog materijala postupkom 3D oslikavanja.

### Summary

*Dielectric materials are constitutive, additional or constructive materials in wide range of ship systems. Consequently, it is imperative to select the optimal material for designated purpose. Relative dielectric constant dependence on dominant factors for marine applications is analyzed in the paper. Mechanism of polarization is also included in the analysis. A new method for choice of dielectric material based on 3D visualization is introduced.*

### KLJUČNE RIJEČI

kompleksna relativna dielektrična konstanta  
dominanti čimbenici  
izbor materijala  
dielektrični materijali

### KEY WORDS

*complex relative dielectric constant (permittivity)  
dominant factors  
material's selection  
dielectric materials*

### UVOD / Introduction

S obzirom na električna svojstva materijali se mogu podijeliti na vodiče, poluvodiče i izolatore. Dielektrični materijali su, prema električnim svojstvima, izolacijski materijali i imaju široku primjenu. Dielektrični materijali su brojni te je zato potrebno pronaći učinkoviti način izbora iz široke lepeze materijala. Dielektrični materijali, osim za električnu izolaciju, upotrebljavaju se i kao materijali za optički prijenos signala (optička vlakna i kabeli), prikaz vidnih informacija (LCD tehnologija), podloga za izradu matičnih ploča i integriranih sklopova, u nanotehnologiji, itd. Uz to, mnogi piezoelektrični materijali imaju i dielektrična svojstva [1]. Zbog toga se nalaze u širokoj lepezi proizvoda od kojih se mnogi nalaze na brodu. Značajka ovih materijala je i da su njihova svojstva podložna utjecaju različitih čimbenika. Neki od najznačajnijih, za primjenu u pomorstvu, su ovisnost o temperaturi, radnoj frekvenciji i vlažnosti.

U radu je analiziran utjecaj frekvencije, temperature i vlage na kakvoću dielektričnog materijala preko promjene iznosa relativne dielektrične konstante. Izvršena je simulacija utjecaja frekvencije na dielektričnu konstantu. Potom je dan prijedlog izbora dielektričnog materijala u pomorstvu s obzirom na utjecajne čimbenike postupkom 3D oslikavanja površina ovisnosti dielektrične konstante o temperaturi i frekvenciji. Kao dodatne površine unesene su iste ovisnosti na različitim stupnjevima zastupljenosti vlage.

### VAŽNI ČIMBENICI KOJI PRIDONOSE DIELEKTRIČNOJ KONSTANTI / Dominant factors contributing to dielectric constant

U ovom poglavlju ukratko će se opisati ovisnost relativne dielektrične konstante o dominantnim čimbenicima koji utječu na nju u brodskom okolišu. Odmah treba naglasiti da dielektrik različito reagira na istosmjerno i izmjenično vanjsko polje.

### Ovisnost dielektrične konstante o frekvenciji / Dielectric constant dependence on frequency

S obzirom na primjenu dielektričnog materijala važno je da materijal može održavati svoja svojstva na određenoj radnoj frekvenciji. S obzirom na radnu frekvenciju, procesu polarizacije dielektrika može pridonositi više ili manje mehanizama. Pošto se dielektrična konstanta izvodi iz pojave polarizacije dielektrika, važno je uzeti u obzir sve utjecajne mehanizme polarizacije s obzirom na dominantni doprinosni parametar dielektrične konstanti. Uobičajeni načini opisivanja frekvencijske ovisnosti su Debyeve jednadžbe, Cole-Cole dijagrami i prikazivanje ekvivalentnim strujnim krugom. Svi modeli imaju ograničenja glede mehanizama koje uzimaju u obzir.

Pri niskim frekvencijama zastupljena je dodirna ili međuzrnasta polarizacija (engl. *interfacial*). Ona se javlja uvijek kada postoji akumulacija naboja na površini između

dva materijala ili dva područja (zrna) unutar materijala. U dodirnom području nastaju dodatni naboji koji se iskazuju kao pojačanje dielektrične konstante. Drugi način nastanka ovoga tipa polarizacije je hvatanjem elektrona ili šupljina na defektima kristalne rešetke. Granice zrna mogu zarobiti naboje koji migriraju pod utjecajem narinutog polja i dodatno pridonijeti dielektričnoj konstanti. Kod heterogenih dielektrika povećava se ovaj tip polarizacije. Pri ovoj polarizaciji značajnu ulogu igraju i vezani naboji. Ova polarizacija iščezava već pri jako niskim frekvencijama, dok ostali tipovi ostaju zastupljeni.

U radiofrekvencijskom i mikrovalnom području, ovisno o dielektriku, iščezava drugi mehanizam polarizacije – orijentacijski. U infracrvenom području frekvencija (koje je značajno u optičkim komunikacijama) iščezava ionska polarizacija. Elektronska polarizacija ostaje zastupljena do visokih frekvencija te obično nestaje oko ultraljubičastog dijela spektra.

Da bi se mogao izraziti doprinos orijentacijske polarizacije na nekoj frekvenciji, potrebno je preko polarizabilnosti,  $\alpha$ , izraziti prvo njenu ovisnost o frekvenciji, a to je:

$$\alpha_{orient}(\omega) = \frac{\alpha_{orient}(0)}{1 + j\omega\tau} \quad (1)$$

gdje je  $\alpha_{orient}$  polarizabilnost zbog utjecaja orijentacijske polarizacije na nekoj frekvenciji,  $\omega$ , a zapravo je kompleksni broj koji pokazuje koliko su izvan faze inducirani dipolni moment i vanjsko izmjenično električno polje.  $\tau$  je vrijeme relaksacije i obrnuto je razmjerno rezonantnom frekvencijom materijala. Na niskim frekvencijama ili na istosmjernom polju, doprinos imaginarnog člana u nazivniku izraza (1) je zanemariv pa je i mali (zanemariv) fazni pomak između spomenutih vektora. Dipoli tada slijede narinuto polje. Ako su frekvencije visoke, dipoli više ne mogu slijediti promjenu polja i  $\alpha$  se bitno smanjuje jer je iznos nazivnika sve veći.

Da bi se uračunao i utjecaj elektronske polarizacije, koja je najduže zastupljena, s obzirom na frekvencijski spektar, potrebno je odrediti  $\alpha_{elekt}$  na razini mikrostrukturne analize ili iz makroskopskih veličina. Tada se relativna dielektrična konstanta može izraziti uz pomoć oba utjecaja kao [2]:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{N}{\epsilon_0} \cdot \alpha_{elekt} + \frac{N}{\epsilon_0} \cdot \alpha_{orient}(\omega) = \epsilon_{r\infty} + \frac{N}{\epsilon_0} \cdot \alpha_{orient}(\omega) \quad (2)$$

gdje je  $N$  broj induciranih dipola.

$$\epsilon_r = \epsilon_r' + j\epsilon_r'' = \epsilon_{r\infty} + \frac{N}{\epsilon_0} \cdot \frac{\alpha_{orient}(0)}{1 + j\omega\tau} = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rDC} - \epsilon_{r\infty}}{1 + j\omega\tau} \quad (3)$$

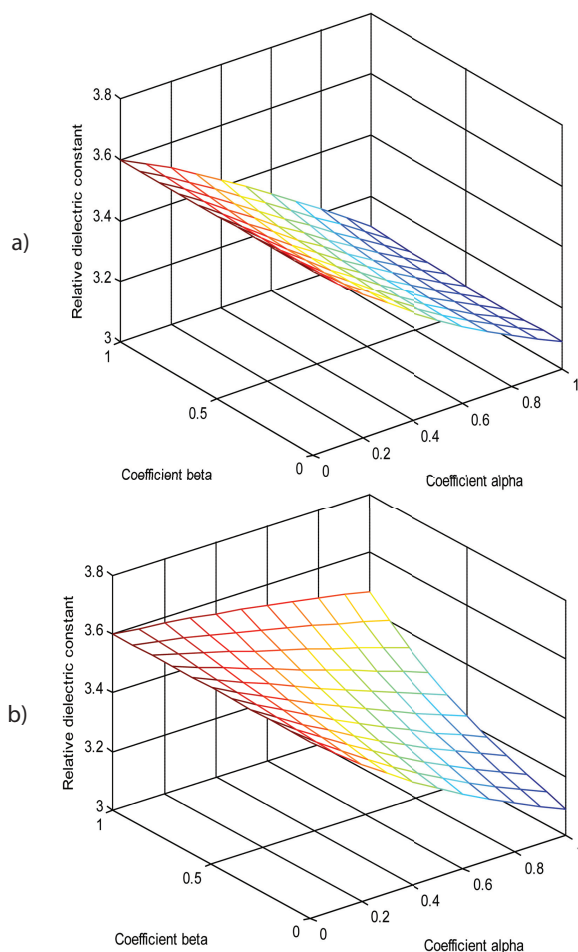
gdje je  $\infty$  indeks znači da je na tim frekvencijama zanemariva orijentacijska polarizacija, što se događa u vidljivom dijelu spektra kad ai postaje samo elektronska polarizacija. To znači da je elektronska polarizacija najmanje osjetljiva na promjene frekvencije, što je i za očekivati, jer se temelji na gibanju elektrona, koji su maleni i pokretljivi. Uzimajući to u obzir, (3) može se preformulirati tako da se odvoje realni i imaginarni dio:

$$\epsilon_r' = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rDC} - \epsilon_{r\infty}}{1 + (\omega\tau)^2} \quad \epsilon_r'' = \frac{(\epsilon_{rDC} - \epsilon_{r\infty})\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \quad (4)$$

Izraz (4) predstavlja Debayeve jednadžbe za imaginarni i realni dio kompleksne relativne dielektrične konstante. Preostala dva mehanizma polarizacije (ionska i dodirna) ne mogu se uključiti u ovaj matematički model. Naime, dodirna postoji samo na izrazito niskim frekvencijama i na istosmjernom polju, što je čak i pri frekvenciji gradske mreže zanemarivo, a ionska se može izraziti određenom pogreškom. Debayeve jednadžba je tijekom godina modificirana kako bi uključila relaksacijske vrhove koji su primijećeni kod polimernih dielektrika. Modificirana Debayeve jednadžba glasi [2]:

$$\epsilon_r = \epsilon_{r\infty} + \frac{\epsilon_{rDC} - \epsilon_{r\infty}}{[1 + (j\omega\tau)^\alpha]^\beta} \quad (5)$$

gdje su  $a$  i  $b$  konstante tipično manje od 1. Simulacija promjene vrijednosti dielektrične konstante o parametrima  $a$  i  $b$  izvršena je u Octaveu (Matlabu), a rezultat je prikazan u 3D grafu na Slici 1. Izraz (5) koristan je u inženjerskoj praksi, jer pomaže u predviđanju vrijednosti relativne dielektrične konstante na različitim frekvencijama. Utjecaj temperature može se uključiti preko  $\tau$ , za koju je uočena i ponegdje dana ovisnost o temperaturi. Tada se može predvidjeti vrijednost dielektrične konstante kao funkcija dvije varijable – frekvencije i temperature.



Slika 1. Relativna dielektrična konstanta  $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$  keramike u ovisnosti o parametrima  $a$  i  $b$  u (5) (simulirano u Matlabu): a) za  $f=40$  kHz, b) za  $f=16$  kHz  
Figure 1. Relative dielectric constant of ceramic  $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$  with respect to parameters  $a$  and  $b$  in (5) (Simulated in Matlab): a) for  $f=40$  kHz, b) for  $f=16$  kHz.

Kao predložak za sljedeću simulaciju u programu Octave (koji je kompatibilan s Matlabom) iskorišten je 1-pentanol, te je uzeto da hipotetski materijali imaju jednaku dielektričnu konstantu u istosmjernom polju (3,33). Pri čistoj elektronskoj polarizaciji, na visokim frekvencijama, mijenjana je vrijednost konstante od 10 do 100 s korakom 10 (kod 1-pentanaola je oko 15,6). Rezonantna frekvencija materijala, prema kojoj se može npr. vršiti odabir materijala, mijenjana je u području od 3 MHz do 0,5 GHz uz korak od 1 MHz (kod 1-pentanaola je 0,19 GHz). Korištene su Debayjeve jednadžbe. Slika 2 prikazuje rezultat simulacije. Slika 2.a prikazuje rezultat simulacije vrijednosti relativne dielektrične konstante s obzirom na promjenu rezonantne i radne frekvencije uz istu vrijednost konstante na visokim frekvencijama ( $\epsilon_{\infty}$ ). Slika 2.b prikazuje isti proračun za različite vrijednosti dielektrične konstante na visokim frekvencijama. Kako je pretpostavljeno (što je vidljivo iz zadanih

vrijednosti) da je riječ o grupi materijala s istim svojstvima kao što ih ima 1-pentanol, krivulje ovisnosti su sličnog valnog oblika. Iz slike 2.a vidljivo je da materijal može izabrati s obzirom na rezonantnu frekvenciju i frekvenciju pri kojoj svi mehanizmi polarizacije, osim elektronskog, iščezavaju.

### Doprinos temperature dielektričnoj konstanti / Temperature contribution to dielectric constant

Osim kroz vrijeme relaksacije, postoje i drugi modeli uvođenja temperature ovisnosti relativne dielektrične konstante. U [3, 4] je dan okvir za izradu klasičnog modela za opis dielektrične konstante kao funkcije frekvencije i temperature:

$$\epsilon_r(\omega, T) = \epsilon_{\infty} + \sum_j \frac{S_j(T)\Omega_j^2(T)}{\Omega_j^2(T) - \omega^2 - i\gamma_j(T)\omega} \quad (6)$$

gdje  $\epsilon_{\infty}$ ,  $\Omega_j$ ,  $S_j$  i  $\gamma_j$  visokofrekvencijska vrijednost dielektrične konstante, transversalni broj optičkog vala, dielektrična čvrstoća i prigušenje j-tog fonona. Uz to, dane su i temperature ovisnosti pojedinih parametara:

$$\Omega_j(T) = \Omega_j(T_0) + a_j \cdot [T - T_0] \quad (7)$$

$$S_j(T) = S_j(T_0) + b_j \cdot [T - T_0] \quad (8)$$

$$\frac{\gamma_j}{\Omega_j}(T) = \frac{\gamma_j}{\Omega_j}(T_0) + c_j \cdot [T - T_0] \quad (9)$$

$$\epsilon_{\infty}(T) = \epsilon_{\infty}(T_0) + e \cdot [T - T_0] \quad (10)$$

pri čemu su  $e$ ,  $a_j$ ,  $b_j$  i  $c_j$  konstantni koeficijenti koji ovise o vrsti materijala, a  $T_0$  referentna temperatura.

Prema [5] za frekvijsko područje u GHz može se regresijskom analizom izravno dobiti povezanost relativne dielektrične konstante i s temperaturom i s frekvencijom:

$$\epsilon_r = (a_1 - a_2 \cdot \vartheta - a_3 \cdot f) + j(b_1 - b_2 \cdot \vartheta + b_3 \cdot f) \quad (11)$$

gdje su  $a_i$  i  $b_i$  realni konstantni koeficijenti ovisni o vrsti materijala,  $J$  temperatura u °C te  $f$  frekvencija u GHz. Očito je da se i ova ovisnost može prikazati na više načina, ovisno o području primjene i vrsti materijala.

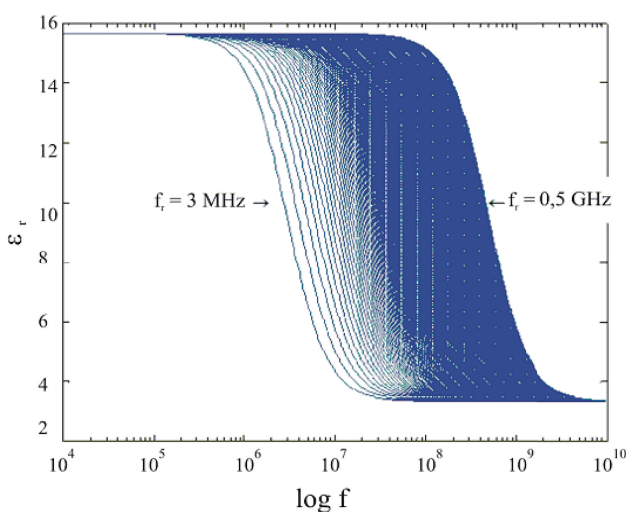
### Doprinos vlažnosti dielektričnoj konstanti / Moisture contribution to dielectric constant

Zbog slabe izučavanosti utjecaja vlage na dielektričnu konstantu u pomorstvu, često se spominje istraživanje iz područja proučavanja tla. Tako se u tom području ovisnost o vlazi modelira dielektričnim materijalima u ovisnosti o autoru i primjeni, preko volumske količine vlage i dielektrične konstante uz pomoć polinomske ovisnosti prvog ili trećeg reda [6]:

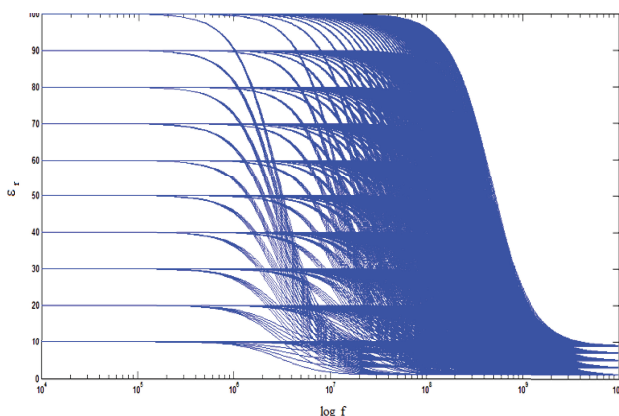
$$\theta = a \pm b \cdot \epsilon_r \quad \theta = a - b \cdot \epsilon_r + c \cdot \epsilon_r^2 - d \cdot \epsilon_r^3 \quad (12)$$

gdje su  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$  ovisni o vrsti materijala.

Kako se dio satelitskih djelovanja vezanih uz pomorstvo odnosi na X-područje zbog ionsferskog djelovanja, u [7] je razmatran odnos između sadržaja vlage i dielektrične konstante. U tom frekvijskom području realni i imaginarni dijelovi mogu se izlučiti iz algebarskog izraza za kompleksnu relativnu dielektričnu konstantu:



a)



b)

Slika 2. a) Rezultat simulacije odnosa između iznosa relativne dielektrične konstante, radne frekvencije i rezonantne frekvencije materijala, b) rezultat simulacije veze iznosa relativne dielektrične konstante, radne frekvencije, rezonantne frekvencije materijala i odziva konstante na visokofrekvencijsko električno polje

Figure 2. a) Simulation results for relationship between the value of the relative dielectric constant, operating frequency, and material's resonant frequency, b) simulation results for relationship between the value of the relative dielectric constant, operating frequency, material's resonant frequency and the value of the dielectric constant at high frequency electric field

$$\epsilon_r = (a \cdot e^{b \cdot Mc} - c) + j(d \cdot e^{e \cdot Mc} - f) \quad (13)$$

gdje bi za npr. izolator od drvenih vlakana, u ovisnosti o tome o kojem je drvu riječ, bili  $a = 3,95$ ,  $b = 2,79$ ,  $c = 2,25$ ,  $d = 2,69$ ,  $e = 2,15$  i  $f = 2,68$ .  $Mc$  označava sadržaj vlage.

### IZBOR MATERIJALA S OBZIROM NA UTJECAJ DOMINANTNIH ČIMBENIKA NA DIELEKTRIČNU KONSTANTU / *Material selection based on influence of dominant factors into dielectric constant*

u razmatranju izbora dielektričnog materijala mora se izvršiti predodabir kako bi se isključili materijali koji zbog nekih svojih posebnosti nisu pogodni za upotrebu na brodovima. Zbog toga se iduće razmatranje odnosi na materijale koji nisu isključeni iz primjene na brodu.

Pošto je moguće materijal identificirati preko rezonantne frekvencije ili preko vrijednosti relativne dielektrične konstante pri istosmjernom ili visokofrekvencijskom električnom polju, nije potrebno koristiti oba parametra te je iz istraživanja isključena rezonantna frekvencija (kada bi se uključila, trebalo bi dobiti 4D graf, što nije bilo moguće oslikati u raspoloživom programskom paketu). Za izbor materijala može se razviti aplikacija koja vizualno predočava utjecaj vlage, frekvencije i temperature na relativnu dielektričnu konstantu. Ona bi mogla davati grafički izlaz kao na Slici 3. Na toj slici je različitim bojama obojena površina ovisnosti za određeni postotak vlage. Površina se tvori promjenom frekvencije i temperature. Simulacija za

Sliku 3 izvedena je za skupinu materijala, koja ima jednake ovisnosti radi jednostavnosti. U primjeru različitih ovisnosti površine bi se mogle preklapati i prolaziti jedne kroz drugu. U načelu je potrebno naći koja površina upada u zahtjevani opseg po koordinatnim osima te s obzirom na to odrediti koji je materijal optimalan za željenu primjenu u pomorstvu.

Kako bi se dobila temperatura u K, brojčana vrijednost x-osi (temperaturne) 3D grafa potrebno je preačunati prema izrazu:

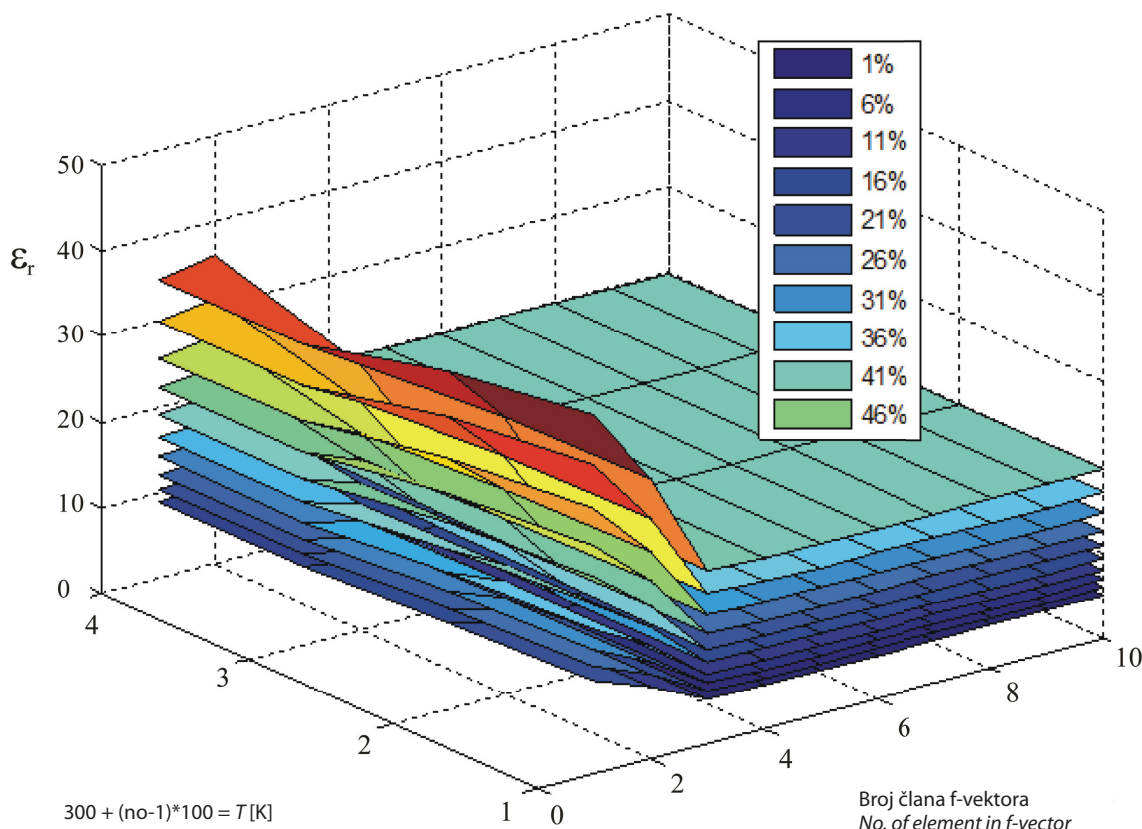
$$T [K] = 300 + (no - 1) \cdot 100 \quad (14)$$

U simuliranom primjeru vlaga je dana u diskretnom obliku s inkrementom od 5%, a razmatrani opseg je od 1 do 46% vlažnosti.

Brojevi na y-osi (frekvencijskoj) predstavljaju redni broj elementa iz vektora frekvencija, koji iznosi:

$$f = [50, 100, 500, 1000, 5000, 10000, 50000, 100000, 500000, 1000000] \text{ [Hz]} \quad (15)$$

Da bi se odredilo koji je materijal potreban za neku primjenu u pomorstvu, potrebno je rezultat iz presjeka skupova dopuštenih vrijednosti relativne dielektrične konstante prebaciti u referentne uvjete i iz tablica s podacima o materijalima odrediti vrstu materijala, tj. normalizirati na referentne vrijednosti dominantnih čimbenika. Traženje presjeka u 3D grafu koji odgovara primjeni zapravo je novi grafički postupak.



Slika 3. Oslikavanje simulacijskih rezultata za ovisnost relativne dielektrične konstante o temperaturi, frekvenciji i vlažnosti / Figure 3. Visualization of simulation results for temperature, frequency, and moisture dependence of the relative dielectric constant

## ZAKLJUČAK / Conclusion

Dominantni čimbenici koji utječu na relativnu dielektričnu konstantu, a time i kakvoću dielektrika u pomorstvu su vlažnost, temperatura i frekvencija. U radu su obrađeni utjecaji sva tri spomenuta čimbenika. Posebno je simulirana ovisnost o frekvenciji s obzirom na druge, nedominantne čimbenike, a koji karakteriziraju dielektrične materijale.

U radu je predstavljen novi 3D grafički postupak za izbor odgovarajućega dielektričnog materijala. Preduvjet za upotrebu postupka je izbacivanje iz izbora materijala koji zbog svojih posebnosti ne mogu biti korišteni na brodu. Nedominantni parametri, prema teoriji, ne predstavljaju značajan utjecaj, što bi trebalo provjeriti i u praksi da bi se došlo do sigurnog zaključka. Ovaj postupak izbora materijala mogao bi se komercijalizirati tako da se preko zaslona osjetljivog na dodir definiraju potrebni parametri i izabire potrebni dielektrični materijal.

Numeričke simulacije izvedene su uz pretpostavku da se izbor radi između srodnih materijala i zato su dobiveni slični valni oblici. U primjeru raznovrsnih materijala dolazi do preklapanja površina ovisnosti, što ne utječe na sam izbor, nego samo na preglednost oslikavanja.

U predloženom postupku čovjek bira materijal. Budući

rad bi mogao uključiti teoriju skupova, uz pomoć koje bi se mogao razviti automatizirani postupak za izbor materijala. Logičkim razmišljanjem može se zaključiti da je za izbor pravoga materijala potrebna funkcija presjeka skupova vrijednosti.

## LITERATURA / References

- [1] Kulenović, Z., Kuzmanić, I., Vujović, I., About a Crack in Piezoceramic Element of Electromechanical Device on the Ship, *Naše more*, 2005, 52(1-2), pp. 75-80.
- [2] Kasap, S. O., *Principles of Electronic Materials and Devices*, 3rd ed., 2006, McGraw Hill, New York.
- [3] Silans, T.P., Maurin, I., Segundo, P. C. S., Saliel, S., Gorza, M. P., Ducloy, M., Bloch, D., Meneses, D. S., Echegut, P., Temperature dependence of the dielectric permittivity of  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{BaF}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : Application to the prediction of a temperature dependent van der Waals surface interaction exerted onto a neighbouring Cs ( $8P_{3/2}$ ) atom, *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, 21, 255902, doi:10.1088/0953-8984/21/25/255902
- [4] Puchkov, A. V., Basov, D. N., Timusk, T., The pseudogap state in high- $T_c$  superconductors: an infrared study. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 1996, 8(48), 10049.
- [5] Dev, S. R. S., Gariépy, Y., Raghavan, G. S. V., Measurement of Dielectric Properties and Finite Element Simulation of Microwave Pretreatment for Convective Drying of Grapes, *Piers Online*, 2009, 5(7), pp. 690-695.
- [6] Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Reichert, J. M., Minella, J. P. G., Dielectric Constant Obtained from TDR and Volumetric Moisture of Soils in Southern Brazil, *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2010, 34(3), pp. 649-658.
- [7] Helhel, S., Colak, B., Özen, S., Measurement of Dielectric constant of Thin Leaves by Moisture Content at 4mm Band. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, 2007, 7, pp. 183-191.