

# Kvarcni kristalni filter frekvencije 35.4 MHz zasnovan na trećem overtoneu

Dragi Dujković, Ana Gavrovska, Lenkica Grubišić, Snežana Dedić-Nešić, Irini Reljin, Ivan Popović

**Apstrakt**— Za savremene telekomunikacije, posebno digitalne, veoma je važno koristiti kvalitetne komponente za prijem, predaju i prenos signala. Među najbitnijim komponentama u takvim sistemima su kristalni filtri, koji su i često korišćene komponente. U ovom radu je opisan kristalni filter 35,4 MHz zasnovan na kristalnoj jedinki trećeg overtonea, kao i korišćene tehničke karakteristike.

**Ključne reči**—Kristali, filtri, projektovanje, overtone, tehničke karakteristike.

## I. UVOD

Potrebno je imati u vidu da mogućnost projektovanja i realizacije kristalnih filtera prema konkretnom zahtevu korisnika pruža pogodnosti u ispunjenju različitih zahteva u pogledu centralne frekvencije filtra, širine propusnog opsega i selektivnosti, toka amplitudske i fazne karakteristike u propusnom opsegu. Mogući su i mnogi specifični zahtevi vezani za klimomehantičke karakteristike, intermodulaciju i druge karakteristike koje diktira primena filtra u specifičnim uslovima. Mali je broj proizvođača koji pružaju mogućnost realizacije kristalnih filtera na osnovu konkretnih zahteva korisnika. Uglavnom se proizvodnja zasniva na realizaciji kataloških tipova filtera [1-7].

U ovom je radu realizovan novi tip kristalnog filtra na frekvenciji 35.4 MHz. Projektovan je filter koji obezbeđuje ispunjenje postavljenih zahteva. Proračunom filtra definisani su elementi ekvivalentne električne mreže i zahtevi za kristalne jedinice. Ovde zahtevi za kristalne jedinice obuhvataju: dozvoljeni nivo neželjenih rezonancija; frekvencije kristalnih jedinki; dozvoljeno odstupanje frekvencije kristala na sobnoj temperaturi i u radnom temperaturnom opsegu; vrednosti parametara kristalne jedinice; serijsku i paralelnu kapacitivnost; faktor dobrote kristala.

Postupak proizvodnje primenjen u realizaciji ovih filtera može da se uvede u proces proizvodnje svih tipova kristalnih filtera koji imaju slične zahteve u pogledu strogo definisanih

Dragi Dujković – Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: [dragi@etf.bg.ac.rs](mailto:dragi@etf.bg.ac.rs)).

Ana Gavrovska – Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: [anaga777@etf.bg.ac.rs](mailto:anaga777@etf.bg.ac.rs)).

Lenkica Grubišić – Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: [lenka@piezo.imp.bg.ac.rs](mailto:lenka@piezo.imp.bg.ac.rs)).

Snežana Dedić-Nešić – Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (e-mail: [snezanadn@gmail.com](mailto:snezanadn@gmail.com)).

Irini Reljin – Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: [irinitms@etf.bg.ac.rs](mailto:irinitms@etf.bg.ac.rs)).

Ivan Popović – Univerzitet u Beogradu -Elektrotehnički fakultet, Bulevar Kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: [poppovici@etf.bg.ac.rs](mailto:poppovici@etf.bg.ac.rs)).

električnih karakteristika.

Mogu se razmatrati sledeći izazovi: ostvarivanje što većeg slabljenja u nepropusnom opsegu filtra i što manjeg slabljenja u propusnom opsegu filtra. Zajedno sa navedenim razmatranjem odvijao se razvoj kristalnih jedinki koje imaju ostvarene sve parametare koje je odredilo projekatvanje filtra. Posebno je vođeno računa o uslovu da se ostvari što veći  $Q$ -faktor i što veći faktor potiskivanja neželjenih rezonancija.

$Q$  faktor je bezdimenzioni parametar koji opisuje koliko je oscilator ili rezonator nedovoljno prigušen. Približno se definiše kao odnos početne energije rezonatora i energije izgubljene u jednom krugu ciklusa oscilovanja. Faktor potiskivanja neželjenih rezonancija je logaritam odnosa amplituda neželjenih signala i signala na centralnoj frekvenciji rezonatora.

Uporedo sa tim je urađena i analiza svih komponenata koji se ugrađuju u filter i proveren njihov uticaj na osetljivost filtra u pogledu funkcionisanja u radnom temperaturnom opsegu i pri zadatim uslovima rada [10-11].

Rad je organizovan na sledeći način. U drugoj glavi dat je kratak osvrt na potrebe za realizacijom ovakvih filtera. Treća glava je posvećena samom projektovanju filtera. Kristalne jedinice su opisane, kao i njihova realizacija u glavi četiri. Na kraju, u petoj glavi nalazi se zaključak.

## II. REALIZACIJA FILTERA TRAŽENIH KARAKTERISTIKA

Zahtevane električne karakteristike filtera su direktno povezane sa namenom samog uređaja, a to određuje oblik amplitudske i fazne karakteristike u propusnom opsegu, centralnu frekvenciju filtra, širinu propusnog opsega i selektivnost.

Pored osnovnih karakteristika postoje i karakteristike koje u zavisnosti od toga u kakvim uslovima rada uređaj funkcioniše imaju zahteve koji se odnose na vibracije, udare, potrebe, temperaturu, pritisak, vlagu. To su tzv. klimomehantički uslovi rada, ali postoji i dosta drugih specifičnih zahteva.

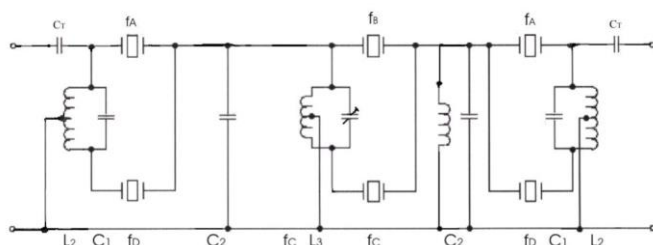
Ovi kristalni filtri, koji se prema traženoj specifikaciji ne mogu pronaći u katalozima proizvođača, zahtevaju kompletan razvoj uz odgovarajući projekat filtra prema postavljenim zahtevima.

Važna je potreba da se mogu realizovati kristalni filtri na osnovu specifičnih zahteva korisnika. To zahteva razvoj novih tehnoloških postupaka pri proizvodnji, kao i projektovanje filtera i njihovih komponenata. Zbog toga se većina proizvođača bavi proizvodnjom kataloških tipova filtera sa standardnim karakteristikama i komponentama [4-12].

### III. PROJEKTOVANJE FILTARA

Na osnovu liste tehničkih zahteva koja je prikazana u tabeli I, završen je projekat željenog filtra. Takođe, na osnovu zahteva u pogledu oblika amplitudske karakteristike u propusnom i nepropusnom opsegu određuje se red filtra i sama mreža koja ispunjava postavljene zahteve. Na slici 1 prikazana je šema jednog filtra. Prilikom proračuna parametara i projektovanja filtra mora se voditi računa i o tolerancijama komponenata koje se ugrađuju u filter kako bi bile ispunjene tražene karakteristike.

Na osnovu predviđenih gubitaka u mreži, završen je proračun filtra, određena je električna šema i definisani su zahtevi vezani za kristalne jedinice. Projektovanjem filtra moraju se tačno definisati svi parametri kristalnih jedinica, njihove vrednosti i tolerancije. Proračunavaju se i parametri kao što su frekvencija kristala, serijske i paralelne kapacitivnosti kristala i podešenosti frekvencije na sobnoj temperaturi. Takođe se definišu i maksimalna dozvoljena odstupanja frekvencija kristala u radnom temperaturnom opsegu filtra.



Sl. 1. Električna šema kristalnog filtra.

Prema datim zahtevima urađen je projekat filtra 6-og reda uz Chebyshev aproksimaciju. Razvijene su kristalne jedinice AT-reza sa malim odstupanjem frekvencije (lista tehničkih podataka tačka 8) u širokom temperaturnom opsegu koje ispunjavaju zadate zahteve u vidu položaja i potisnutosti sporednih rezonancija.

Potrebno je napomenuti i da se projektovanjem filtra određuju i vrednosti parametara ostalih elemenata, kao što su otpornici, kalemovi i kondenzatori, a takođe i njihov raspored na štampanoj ploči.

Mora se uzeti u obzir da filtri rade na visokim frekvencijama, gde prisustvo parazitnih kapacitivnosti značajno utiče na karakteristike filtera, tako da je raspored elemenata od izuzetnog značaja u podešavanju vrednosti selektivnosti i slabljenja u nepropusnom opsegu filtra [1-5].

### IV. PRISTUP ZASNOVAN NA KRISTALNIM JEDINKAMA I REALIZOVANI KRISTALNI FILTAR

Projektovani filter ima relativno slabljenje u propusnom opsegu od  $\pm 4.25$  kHz koje je manje od 3dB. Izvan frekvencijskog opsega od  $\pm 20$  kHz slabljenje je veće od 60 dB. U širem opsegu frekvencija, do  $\pm 5$  MHz, relativno slabljenje je veće od 60 dB.

Minimalno pogonsko slabljenje filtra je manje od 6 dB. Ulazna i izlazna otpornost filtra iznose 50  $\Omega$ . Radni temperaturni opseg filtra je  $-10^{\circ}$  C do  $+60^{\circ}$  C. Temperaturni opseg skladištenja, odnosno opseg temperatura u kojima filter

neće promeniti karakteristike dok se čuva u skladištu je  $-40^{\circ}$  C do  $+85^{\circ}$  C.

Filter je smešten u kućište dimenzija (38,4 $\times$ 18,2 $\times$ 15,9) mm. Detalji svih tehničkih karakteristika filtra su dati u Tabeli I.

Nizom eksperimenata ustanovljen je povećan škart usled lomova na mašinama za glačanje i poliranje pri obradi pločica čiji je odnos prečnika i debljine  $\Phi/t > 100$ . S obzirom da kvarcna pločica prečnika  $\Phi = 5$  mm, frekvencije 35.4 MHz osnovne učestanosti, ima odnos prečnika i debljine  $\Phi/t = 106.38$  pristupilo se realizaciji kristala trećeg overtone čiji je  $\Phi/t = 35.46$  čime je, sa druge strane zadovoljen uslov za planparalelni (PP) oblik pločica trećeg overtone ( $\Phi/t > 35$ ).

Overtone je pojava odziva na rezonatoru koja je na frekvenciji 3, 5 ili 7 puta većoj od osnovne frekvencije rezonatora. Ova pojava se koristi da bi se postigle veće frekvencije rada kristalnog rezonatora.

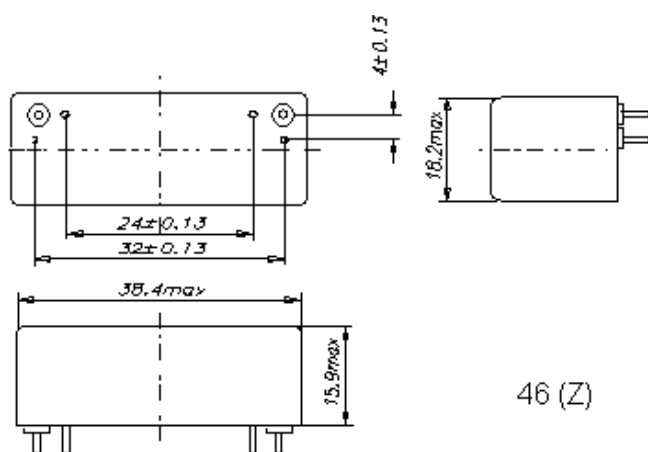
U projektu mikrominijaturnih kristalnih jedinica trećeg overtone učestanosti 35.4MHz vodilo se računa o prečniku elektrode  $d = 1.63$  mm i debljini nanetog filma  $t = 2,9 \times 10^{-7}$  m zbog zahteva za položaj i potisnutost sporednih rezonancija. S obzirom da se radi o tankim filmovima kao elektrodni materijal korišćen je aluminijum. Podešavanje frekvencije je hemijsko u sodi i anodnom oksidacijom. Sve kristalne jedinice su posle grupnog naparavanja i cementiranja stajale na vazduhu 24h radi formiranja stabilnog prirodnog oksidnog sloja. Kvarcne pločice su planparalelne (PP) prečnika  $\Phi = 5$  mm i realizovane su od kvarca faktora dobrote  $Q > 1.8 \times 10^6$  bez strukturnih defekata i grešaka pakovanja. Kristalne jedinice montirane su u držač tipa RW-HC45.

Realizovane kristalne jedinice AT-reza zadovoljavaju zahteve za položaj i potisnutost sporednih rezonancija i dozvoljeno odstupanje frekvencije u radnom temperaturnom opsegu.

Na slici 2 prikazan je realizovani filter. Filter je smešten u standardno kućište koje je prikazano na slici 3.



Sl. 2. Realizovani kristalni filter.



SI. 3. Kućište filtra.

Ispitivanje filtera koje je izvršeno na sobnoj temperaturi i u radnom temperaturnom opsegu od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $+60^{\circ}\text{C}$  urađeno je na analizatoru spektra HP 8568A. Merenjima je utvrđeno da filter zadovoljava tražene električne karakteristike.

Rezultati merenja amplitudske karakteristike filtera na sobnoj temperaturi prikazani su u dijagramima na slici 4.

Lista tehničkih podataka za kristalne jedinice za filtre 35,4 MHz je sledeća:

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1. Kućište                   | RW-HC45  |
| 2.                           |  |
| 3. frekvencija               | $f_1 = 35392.53 \text{ kHz}$<br>$f_2 = 35401.27 \text{ kHz}$<br>$f_1 = 35393.73 \text{ kHz}$<br>$f_2 = 35400.07 \text{ kHz}$ |
| 4. $Q$ -faktor               | $> 120000$   |
| 5. dinamička kapacitivnost   | $C_l = 380 \text{ aF} \pm 10\%$  |
| 6. paralelna kapacitivnost   | $C_o = 1 \text{ pF} \pm 5\%$   |
| 7. dinamička otpornost       | $R_l < 90 \Omega$  |
| 8. podešenost                | $df/f = \pm 5 \text{ ppm}$   |
| 9. odstupanje                | $df/f = \pm 15 \text{ ppm}$  |
| 10. starenje                 | $df/f = 1 \text{ ppm/god}$   |
| 11. radni temperaturni opseg | $-10 \div +90^{\circ}\text{C}$   |
| 12. neželjene rezonancije    | A. $f_0 + 70 \text{ kHz}$ – bez $f_n$  |

TABELA I

TEHNIČKE KARAKTERISTIKE FILTERA

| Karakteristike                            | Vrednosti                                      |
|---|--|
| Centralna frekvencija(CF)                 | 35,4 MHz                                       |
| Širina propusnog opsega na 2 dB           | $\pm 3 \text{ kHz}$                            |
| Širina propusnog opsega na 3 dB           | $\pm 4.25 \text{ kHz}$                         |
| Talasnost u propusnom opsegu              | 2 dB max u opsegu $\pm 7.5 \text{ kHz}$        |
| Širina nepropusnog opsega na 60 dB        | $\pm 20 \text{ kHz max}$                       |
| Relativno slabljenje u nepropusnom opsegu | 60 dB min za $\pm 5 \text{ MHz}$               |
| Minimalno pogonsko slabljenje             | 6 dB max                                       |
| Ulazna impedansa                          | 50 $\Omega$                                    |
| Izlazna impedansa                         | 50 $\Omega$                                    |
| Radni temperaturni opseg                  | $-10^{\circ}\text{C}$ до $+60^{\circ}\text{C}$ |
| Temperaturni opseg skladištenja           | $-40^{\circ}\text{C}$ до $+85^{\circ}\text{C}$ |

## V. ZAKLJUČAK

Pored proračuna i realizacije kristalnog filtera, razvijena je i nova kristalna jedinica. Ovakvi kristalni filteri predstavljaju novi proizvod, jer su u njemu korišćene nove tehnologije i nove komponente. Ovi proizvodi imaju širok dijapazon primena i veliku upotrebnu vrednost i ističu se svojom cenom i svojim kvalitetom, tako da se mogu smatrati konkurentnim na tržištu. Navedene karakteristike i konkurentnost na tržištu daju perspektivu razvoju novih elektronskih sklopova i proizvoda zasnovanih na kristalnim jedinkama.

U daljem razvoju ovih i sličnih uređaja treba ići na usvajanje novih tehnologija izrade kristalnih jedinki i upotrebe novih i kvalitetnijih komponenti u kolu elektronskih sklopova novih uređaja.

## ZAHVALNICA

Istraživanja opisana u ovom radu su finansirana od strane Ministarstva za obrazovanje, nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije. Broj ugovora 451-03-68/2022-14/200103

## LITERATURA

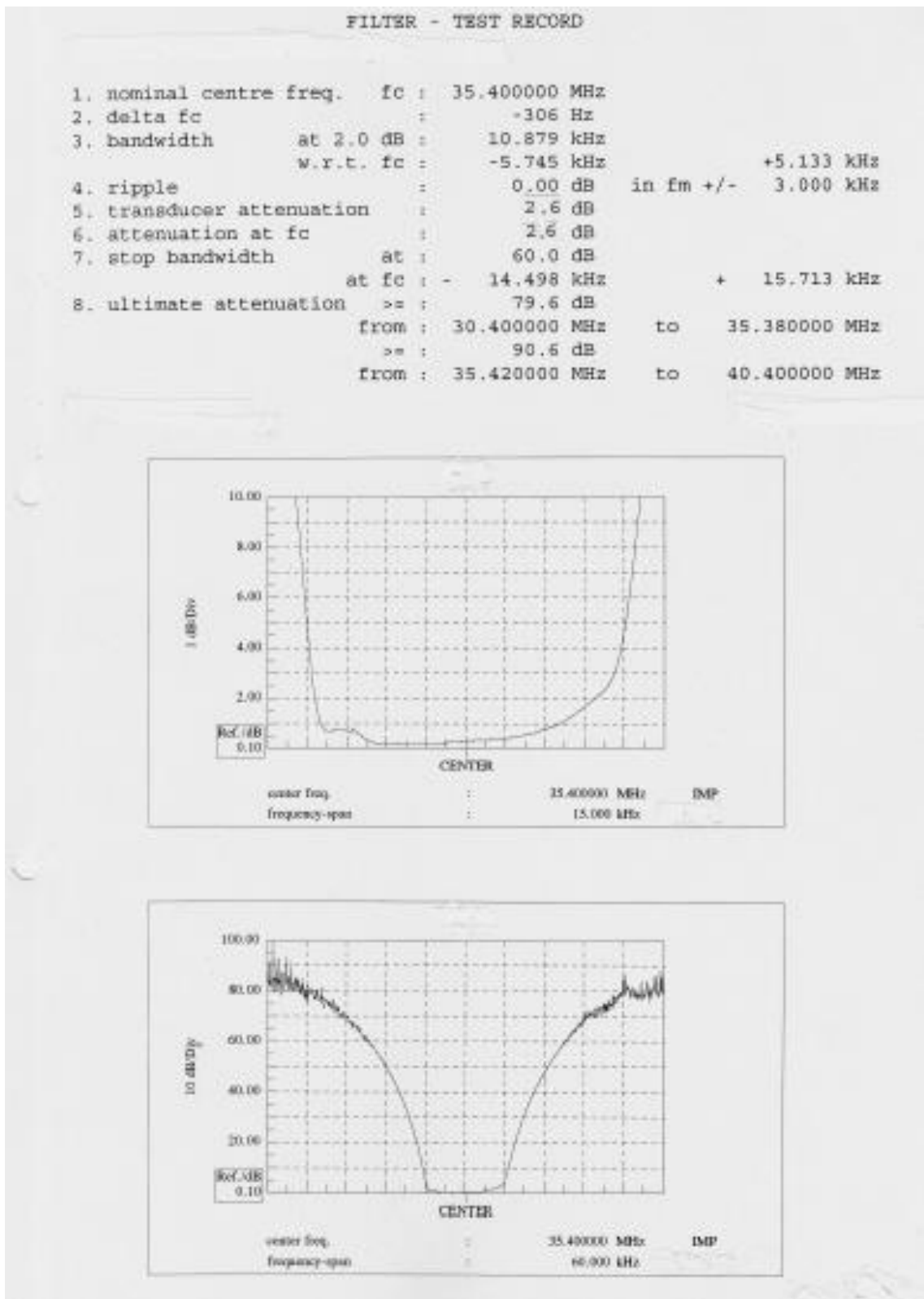
- [1] S. Dedić-Nešić "Prilog projektovanju kristalnih filtara sa linearnom faznom karakteristikom", magistarska teza, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1991.
- [2] R. G. Kinsman, "A history of crystal filters," in Proc. of the 1998 IEEE Int. Frequency Control Symposium, pp. 563-570, 1998.
- [3] H. J. Blinckhoff, A. I. Zverev "Filtering in the Time and Frequency Domains" John Wiley and Sons, Inc, 1976.
- [4] D. S. Humpherys "The Analysis, Design and Synthesis of Electrical Filters" Prentice Hall, Englewood Clifs, N.J. 1970.
- [5] S. Dedić-Nešić, D. Dujković, L. Grubišić, I. Reljin, B. Reljin, "Novi visokokvalitetni 90.1105 MHz filtri za komunikacije u rudnicima," ETRAN, 2010.
- [6] D. Dujković, B. Reljin, S. Dedić-Nešić, L. Grubišić, D. Jevtić, "Novi kristalnih filter F121," ETRAN, 2012.
- [7] D. M. Dujković, S. Dedić-Nešić, L. Grubišić, A. Gavrovska, and I. Reljin, "High-quality crystal filter: Design and realization," *Telfor J.*, vol. 5, no. 2, pp. 118-122, 2013.
- [8] L. Grubišić, S. Dedić-Nešić, D. M. Dujković, B. Reljin, "Novi tip kristalne jedinice za filtre namenjene za rad u posebnim klimo mehaničkim uslovima", ETRAN, 2012, EK2.6-1-4, Banja Vrućica 2011.
- [9] D. Dujković, S. Dedić Nešić, L. Grubišić, B. Reljin, I. Reljin, "Crystal Filter 50 MHz for Applications in Specific Environmental Conditions," in Proc. 10th Int. Conf. on Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), 2011, vol. 1. pp. 253-256, Nis, Serbia, 2011.
- [10] D. M. Dujković, S. Dedić Nešić, L. Grubišić, M. Paskaš, and Irini Reljin, "New 76.8375 MHz Crystal filter Based on Third overtone Crystal units," 28th Telecommunications forum TELFOR 2020, pp.177-180, 2020.
- [11] D. M. Dujković, I. Reljin, L. Grubišić, S. Dedić-Nešić, and A. Gavrovska, "Kristalni filtri za opseg frekvencija 150-170MHz," ETRAN, EK 1-1, pp. 213-216, Stanišići 2021.
- [12] D. M. Dujković, S. Dedić-Nešić, L. Grubišić, I. Reljin, and A. Gavrovska, "New stop band 48 MHz crystal filter," Telfor Proceedings, pp. 249-252, Belgrade 2021.

## ABSTRACT

In modern telecommunications, especially digital, it is very important to use quality components for receiving, sending and transmitting signals. Among the most valuable components are crystal filters, which are also commonly used components. The paper describes a 35.4 MHz crystal filter based on crystalline units of the third overtone and applied technical characteristics.

**Quartz crystal filter 35.4 MHz based on crystalline units of the third overtone**

Dragi Dujkovic, Ana Gavrovska, Lenkica Grubisic, Snezana Dedic-Nesic, Irini Reljin



Sl. 4. Rezultati merenja amplitudske karakteristike filtra 35,4 MHz na sobnoj temperaturi.