

SOFTVERSKA REALIZACIJA I EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA MODELA xDSL KABLOVA

Bratislav Milovanović, Mladen Randelović, Aleksandar Atanasković, Nebojša Dončov
Elektronski fakultet u Nišu

Sadržaj: *U radu je predstavljena karakterizacija telefonskih preplaničkih petlji na fizičkom nivou, a za potrebe širokopoljnih pristupnih tehnologija kao što je xDSL. Kako je kvalitet prenosnog medijuma petlji jedan od ključnih zahteva za postizanje odgovarajućih performansi ovih servisa, opisan je analitički metod za modelovanje primarnih parametara telefonske parice u radnom frekvencijskom opsegu xDSL servisa. Ovaj model, kao i jedan empirijski model su implementirani u odgovarajući softver za karakterizaciju telefonskih parica. Na primeru konkretne telefonske parice izvršeno je eksperimentalno merenje njenih parametara, a zatim je parica modelovana primenom opisanog softvera. Na kraju je izvršeno poređenje dobijenih rezultata.*

Ključne reči: *xDSL, telefonska bakarna parica, modelovanje, karakterizacija*

1. Uvod

Proteklih godina razvoj Interneta i njegovih multimedijalnih sadržaja, video i korisničkih interaktivnih servisa, kao i mnogih drugih intenzivirao je zahteve za sve većim brzinama prenosa. Takvi zahtevi su odavno premašili brzine koje se postižu klasičnim *voice-band* modemima (do 56 kbps), odnosno alternativnim ISDN (*Interegated Services Digital Network*) rešenjem sa pristupnom brzinom od 128 kbps. Danas je na tržištu prisutno nekoliko širokopoljnih pristupnih tehnologija sposobnih da podrži prenos glasa, podataka i multimedijalnog sadržaja velikim brzinama. Ove tehnologije se generalno mogu klasifikovati u tri osnovne grupe po korišćenom prenosnom medijumu: bakarna petlja, kabl (optički i koaksijalni) i bežični pristup.

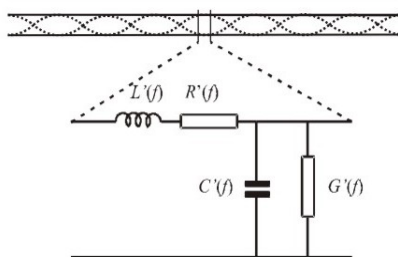
Brojne varijante DSL (*Digital Subscriber Line*) tehnologije, tzv. xDSL, ekvivalentne širokopoljnoj pristupnoj tehnologiji bakarne petlje, razvila je telekomunikaciona industrija kako bi iskoristila milione kilometara do sada postavljenih telefonskih parica. Jedna od glavnih prednosti ove tehnologije u poređenju sa ostalim širokopoljnim pristupnim rešenjima jeste ravnopravno korišćenje, a ponekad i deljenje

telefonskih pretplatničkih linija (lokalnih petlji) sa klasičnim telefonskim servisom (POTS). Međutim, zbog uskopojasne prirode POTS-a (opseg do 4 kHz za prenos glasa) [1], lokalne petlje nisu uvek pogodne za širokopojasni xDSL pristup.

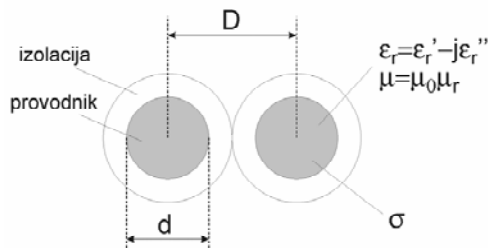
Osnovna ideja razvoja xDSL pristupne tehnologije jeste iskorišćenje već postojećih lokalnih telefonskih pretplatničkih petlji. Stoga je od izuzetnog značaja ispitivanje karakteristika telefonskih parica na fizičkom nivou, kao ključnog prenosnog medijuma petlje, radi procene primenljivosti i brzine xDSL pristupa. Prve rezultate u tom pravcu, autori rada su predstavili u referenci [2], analizirajući prenosnu naponsku karakteristiku i unete gubitke opterećene i neopterećene telefonske parice u radnom frekvencijskom opsegu xDSL servisa, sa aspekta ispunjenja *Heaviside*-ovog kriterijuma. Kako na ove karakteristike parice značajno utiču njeni primarni parametri, koji u xDSL radnom opsegu mogu značajno da variraju sa frekvencijom, od interesa je na adekvatan način modelovati efekte koji tu varijaciju prouzrokuju [3]. Za razliku od, u praksi dosta korišćenih, empirijskih modela [4] izvedenih na osnovu eksperimentalnih merenja, u ovom radu je predstavljen i jedan analitički model telefonske parice zasnovan na njenim fizičkim dimenzijama i elektromagnetskim karakteristikama materijala [5]. Jedan empirijski (British Telecom) i analitički model su obuhvaćeni realizovanim softverom za karakterizaciju telefonskih parica. Softver je razvijen u MATLAB programskom okruženju [6]. Osim modelovanja parice na osnovu odgovarajućih ulaznih parametara, softver daje i mogućnost poređenja modelovanih sa merenim karakteristikama [7]. Na ovaj način je izvedena i verifikacija kako modela tako i softvera na primeru konkretne telefonske parice.

2. Modeli telefonske parice

Električne karakteristike telefonske parice mogu se definisati koristeći model transmisionne linije. Model uključuje skup od četiri primarna parametra po jedinici dužine, uključujući rednu induktivnost i otpornost, i šantnu kapacitivnost i provodnost. Redna induktivnost predstavlja ukupnu sopstvenu induktivnost dva provodnika, dok je šantna kapacitivnost posledica blizine dva provodnika. Redna otpornost je rezultat konačne provodnosti provodnika parice, a šantna provodnost postoji zbog dielektričnih gubitaka u izolacionom materijalu između dva provodnika. Model segmenta telefonske parice prikazan je na Sl.1.



Sl.1. Segment telefonske parice modelovan transmisionom linijom



Sl.2. Presek telefonske parice

Kako se primarni podužni parametri telefonske parice u xDSL radnom frekvencijskom opsegu, za razliku od govornog opsega, ne mogu smatrati konstantnim već se menjaju sa frekvencijom, razvijeni su različiti modeli koji tu zavisnost uključuju. Većina danas dostupnih modela je dobijena empirijskim fitovanjem izmerenih primarnih i sekundarnih parametara za različite tipove telefonskih parica. Jedan od najčešće korišćenih jeste empirijski model, razvijen od strane *British Telecom*-a (BT), koji opisuje ponašanje primarnih parametara parice u frekvencijskom opsegu od DC do nekoliko desetina MHz na način [4]:

$$C'(f) = C_{\infty} + C_0 f^{-c_e}, \quad (1)$$

$$L'(f) = \frac{L_0 + L_{\infty} (f/f_m)^b}{1 + (f/f_m)^b}, \quad (2)$$

$$R'(f) = \sqrt[4]{R_{0c}^4 + a_c f^2}, \quad (3)$$

$$G'(f) = g_0 f^{g_e}, \quad (4)$$

Za dobre dielektrike, parametar C_0 u jednačini (1) je zanemarljivo mali, pa je kapacitivni model samo C_{∞} . Parametri b i f_m u jednačini (2) za induktivnost kontrolišu prelaz od vrednosti L_0 na frekvencijama kada skin efekat nije dominantan do vrednosti L_{∞} na višim frekvencijama gde ovaj efekat dominira. U jednačini (3) parametar R_{0c} predstavlja otpornost bakra na DC frekvenciji, dok je a_c parametar koji karakteriše skin efekat za bakar. Na kraju, parametri g_0 i g_e u jednačini (4) kontrolišu ponašanje eksponencijalnog porasta dielektričnih gubitaka sa frekvencijom.

Ovako izvedeni BT model može se iskoristiti za određivanje nekih frekvencijskih karakteristika parice, kao što su preslušavanje i prenosna funkcija. Međutim, njegov glavni nedostatak kao i svih ostalih empirijskih modela jeste činjenica da nije zasnovan na fizičkim karakteristikama parice. Kao posledica empirijskog izvođenja, *Hilbert*-ova relacija koja daje vezu između realnih i imaginarnih delova redne impedanse, $R'(f) + j2\pi f L'(f)$, i šantne admitanse, $G'(f) + j2\pi f C'(f)$, nije zadovoljena [4]. Na taj način, ovakvi modeli telefonske parice nisu u stanju da generišu realan impulsni odziv onemogućavajući simulaciju u vremenskom domenu. Takođe, ovi modeli uključuju i izvesnu grešku kao posledicu nepreciznosti u eksperimentalnom merenju primarnih parametara parice na nižim frekvencijama.

Za razliku od njih, u referenci [5] je predložen jedan analitički model zasnovan na fizičkim karakteristikama telefonske parice. Ovaj model koji uključuje skin efekat i uticaj permitivnosti izolacionog materijala, u stanju je da prilično tačno opiše primarne parametre parice na frekvencijama koje su od interesa za xDSL servis. Na Sl.2 je prikazan poprečni presek parice koju čine dva provodnika prečnika d čiji su centri na međusobnom rastojanju D . Specifična provodnost provodnika je σ dok je relativna dielektrična konstanta izolacionog materijala $\varepsilon_r - j\varepsilon_r''$.

Primarne podužne parametre parice sa Sl.2 je prema analitičkom modelu moguće proračunati na sledeći način [5]:

$$C'(f) = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r'}{\cosh^{-1}(D/d)}, \quad (5)$$

$$L'(f) = \frac{\mu_0}{\pi} \cosh^{-1}(D/d) + \frac{R_s(f)}{2\pi^2 f d} \frac{D/d}{\sqrt{(D/d)^2 - 1}}, \quad (6)$$

$$R'(f) = \frac{R_s(f)}{\pi d} \frac{D/d}{\sqrt{(D/d)^2 - 1}}, \quad (7)$$

$$G'(f) = \frac{2\pi^2 f \varepsilon_0 \varepsilon_r''}{\cosh^{-1}(D/d)}, \quad (8)$$

Prvi član u jednačini (6) predstavlja spoljašnju induktivnost, koja je posledica magnetnog polja izvan provodnika, i ne zavisi od frekvencije. Drugi član predstavlja unutrašnju induktivnost, nastalu kao posledica magnetskog polja unutar materijala provodnika, koja opada sa povećanjem frekvencije zbog skin efekta i teži nuli na višim frekvencijama. Parametar R_s koji se javlja u jednačinama (6) i (7) predstavlja površinsku otpornost koja zavisi od frekvencije na sledeći način:

$$R_s(f) = \sqrt{\pi f \mu / \sigma}, \quad (9)$$

U zavisnosti od primarnih parametara po jedinici dužine, sekundarni parametri parice, kompleksna karakteristična impedansa Z_c i kompleksna konstanta prostiranja $\gamma = \alpha + j\beta$, mogu se proračunati kao:

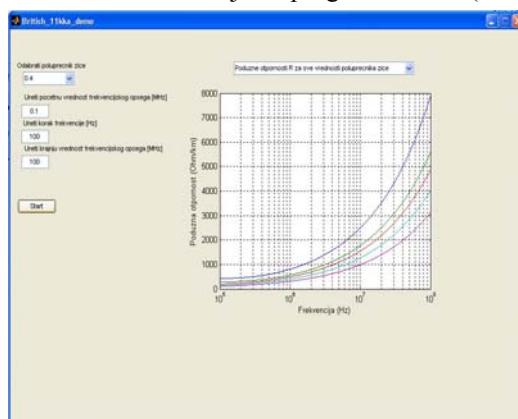
$$Z_c(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi f L'(f)]/[G'(f) + j2\pi f C'(f)]} \quad (10)$$

$$\gamma(f) = \sqrt{[R'(f) + j2\pi f L'(f)][G'(f) + j2\pi f C'(f)]} \quad (11)$$

3. Softver za modelovanje parametara bakarne parice

U cilju proračunavanja parametara bakarne parice kao i objedinjenja pomenutih empirijskog i analitičkog modela, izrađen je softver za modelovanje parametara i poređenje modela sa stvarnim karakteristikama parice. Za izradu softvera korišćena je mogućnost kreiranja grafičkom korisničkog interfejsa u programskom paketu MATLAB. Korisniku je omogućeno da se opredeli za jedan od ponuđenih modela, empirijski ili analitički, u zavisnosti od podataka koje ima za paricu.

U slučaju da se opredeli za British Telecom model, potrebno je poznavati poluprečnik žice, kao i odabrati frekvencijski opseg od interesa (slika 3).



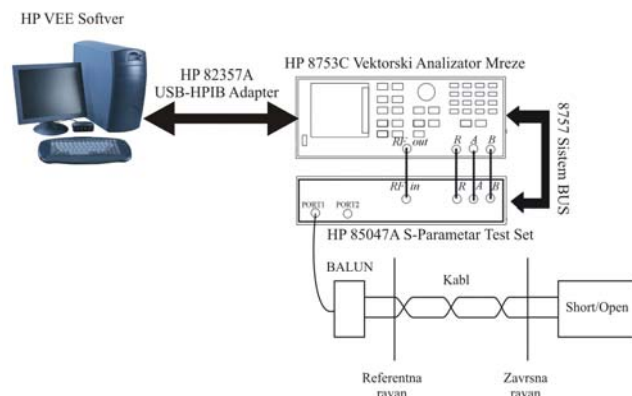
Sl.3 Izgled osnovnog ekrana za British model

Opseg je određen graničnim frekvencijama, a preciznost modelovanja odnosno broj tačaka, korakom frekvencije. Korisniku je ponuđeno da se opredeli za jednu od standardizovanih vrednosti poluprečnika. Parametri čije karakteristike je moguće modelovati su svi primarni i sekundarni parametri, a proračunavani su na osnovu jednačina datih u sekciji 2. Ostavljena je i mogućnost modelovanja željene karakteristike za sve vrednosti poluprečnika žice, čime se može posmatrati zavisnost određenog parametara od debljine žice.

Ako se korisnik opredeli za analitički model, ulazni parametri zavise od fizičkih i elektromagnetnih karakteristika kabla. Osim primarnih parametara, mogu se dobiti i karakteristike realnih i imaginarnih delova karakteristične impedanse i konstante prostiranja. Potrebno je naglasiti da softver daje mogućnost i poređenja svake od odabranih karakteristika sa odgovarajućom karakteristikom kabla koja je prethodno izmerena.

4. Postupak merenja parametara parice

U cilju eksperimentalnog određivanja primarnih podužnih parametara telefonske parice korišćen je postupak merenja ulazne impedanse testirane parice u odgovarajućem frekvencijskom opsegu za slučaj kada je ona na svom kraju otvorena i kratkospojena. Merna oprema korišćena za postupak kalibracije i merenja prikazana je na Sl.4.



Sl.4. Merno mesto

Putem ova dva merenja moguće je najpre naći sekundarne parametre telefonske parice u razmatranom frekvencijskom opsegu, $Z_c(f)$ i $\gamma(f)$. Kako je ulazna impedansa parice dužine l za slučaj kada je ona na svom kraju otvorena: $Z_{oc}(f) = Z_c / \tanh(\gamma l)$, odnosno za slučaj kada je na svom kraju kratko spojena: $Z_{sc}(f) = Z_c \tanh(\gamma l)$; to se iz ova dva izraza mogu odrediti karakteristična impedansa i konstanta prostiranja telefonske parice:

$$Z_c(f) = \sqrt{Z_{oc}(f) Z_{sc}(f)}, \quad (12)$$

$$\gamma(f) = \frac{1}{l} \tanh^{-1} \sqrt{\frac{Z_{sc}(f)}{Z_{oc}(f)}}, \quad (13)$$

Na osnovu ovako nađenih sekundarnih parametara moguće je proračunati primarne podužne parametre telefonske parice kao:

$$R'(f) = \operatorname{Re}\{\gamma(f) Z_c(f)\}, \quad (14)$$

$$L'(f) = \frac{1}{2\pi f} \operatorname{Im}\{\gamma(f) Z_c(f)\}, \quad (15)$$

$$C'(f) = \frac{1}{2\pi f} \operatorname{Im}\left\{\frac{\gamma(f)}{Z_c(f)}\right\}, \quad (16)$$

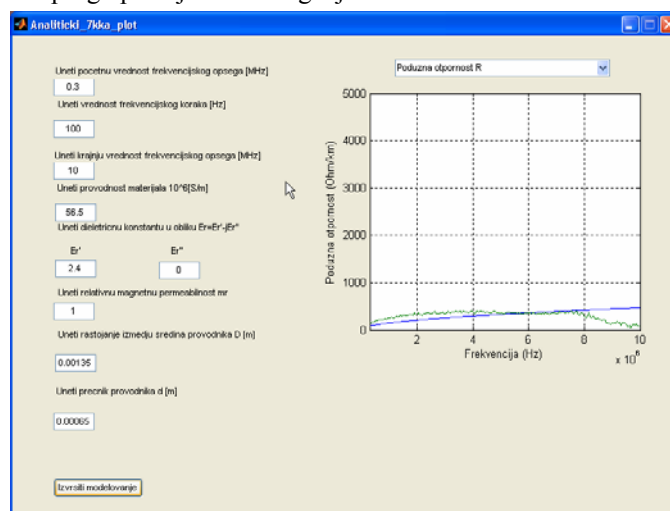
$$G'(f) = \operatorname{Re}\left\{\frac{\gamma(f)}{Z_c(f)}\right\}, \quad (17)$$

5. Numerička analiza

U cilju verifikacije analitičkog modela implementiranog u softveru opisanom u Sekciji 3, analizirana je konkretna telefonska parica sledećih fizičkih dimenzija: $d=0.65$ mm i $D=1.35$ mm. Provodnici parice su od bakra specifične provodnosti $\sigma=5.65 \cdot 10^7$ S/m. Najpre je izvršena eksperimentalna analiza telefonske parice dužine u frekvencijskom opsegu od (0.3-10) MHz. Sekundarni parametri su nađeni na način opisan u Sekciji 4, a zatim su proračunati primarni podužni parametri koristeći jednačine (14)-(17). Realni deo relativne dielektrične konstante izolacionog materijala je $\epsilon_r' = 2.4$.

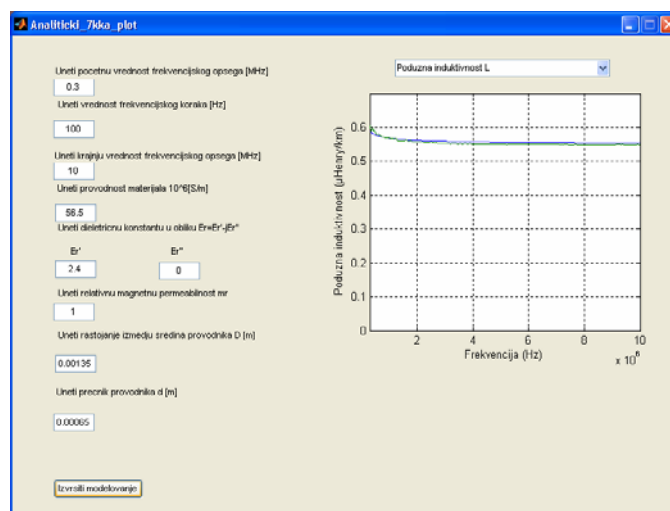
Nakon toga su primarni parametri razmatrane parice modelovani primenom analitičkog modela, i izračunati sekundarni parametri prema jednačinama (10) i (11). Dobijeni rezultati su upoređeni i prikazani na slikama 5-10.

Podužna otpornost analizirane telefonske parice u posmatranom frekventijskom opsegu ima vrednost manju od 500 Ω/km , što je prikazano na Sl.5. U skoro celom frekventijskom opsegu postoji dobro slaganje rezultata.



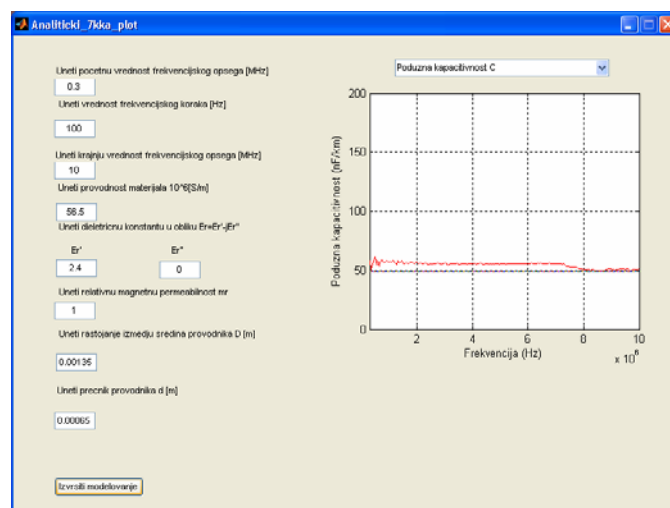
Sl.5. Podužna otpornost u funkciji frekvencije

Promena podužne induktivnosti sa frekvencijom prikazana je na Sl.6. Na niskim frekvencijama podužna induktivnosti ima vrednost blisku 0.6 $\mu\text{H}/\text{m}$ što ustvari odgovara unutrašnjoj induktivnosti koja potiče od magnetskog polja unutar materijala provodnika (drugi član u jednačini (6)). Sa porastom frekvencije, kao posledica skin efekta, opada i vrednost unutrašnje induktivnosti tako da dominantan uticak na ukupnu induktivnost ima spoljašnja induktivnost kao posledica magnetskog polja izvan provodnika parice. Ova induktivnost je predstavljena prvim članom u jednačini (6) koji ne zavisi od frekvencije što se može videti i na Sl.6.



Sl.6. Poduzna induktivnost u funkciji frekvencije

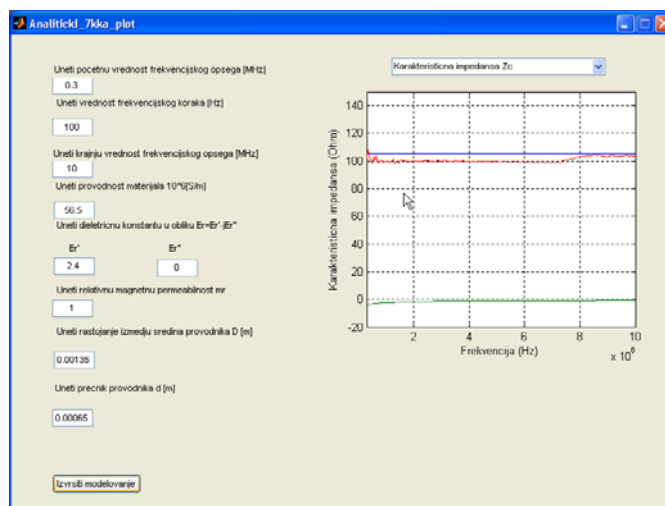
Na Sl.7 prikazano je poređenje rezultata za poduznu kapacitivnost, koje se može oceniti kao odlično. Pritom treba reći da poduzna kapacitivnost u analitičkom modelu nije funkcija frekvencije, već ima konstantnu vrednost u celom frkvencijskom opsegu. Kada je reč o poduznoj provodnosti njena frekvencijska zavisnost opisana jednačinom (8) nije mogla biti izračunata usled nepoznavanja imaginarnog dela relativne dielektrične konstante izolacionog materijala ali merene vrednosti ukazuju da se radi o vrednostima bliskim nuli u razmatranom frekvencijskom opsegu.



Sl.7. Poduzna kapacitivnost u funkciji frekvencije

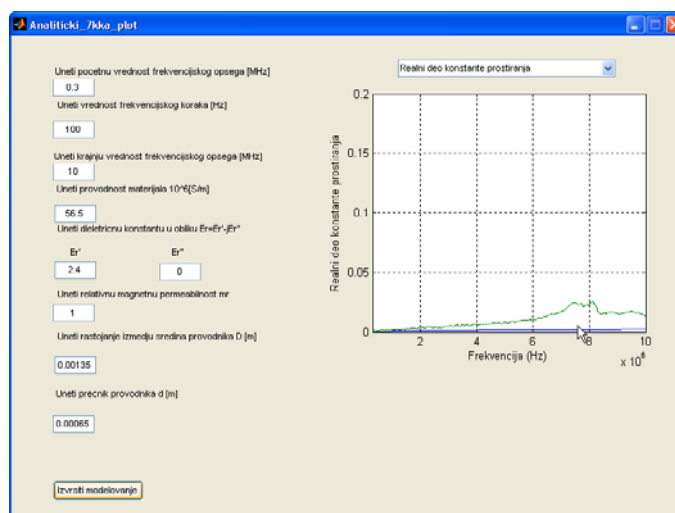
Kada je reč o sekundarnom parametrima analizirane telefonske parice takođe je dobijeno zadovoljavajuće slaganje rezultata. Na Sl.8 su prikazani realni i imaginarni deo karakteristične impedanse, koji ne zavise značajnije od frekvencije. Za realni deo karakteristične impedanse, merene i modelovane vrednosti su bliske, a u jednom delu

opsega se slaganje može oceniti i odličnim. Za imaginarni deo karakteristične impedanse najbolje slaganje rezultata je postignuto u donjoj polovini frekvencijskog opsega od interesa.



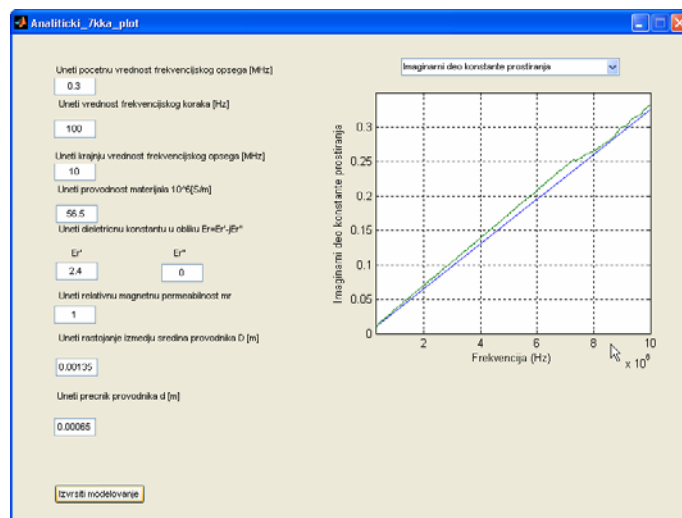
Sl.8. Karakteristična impedansa u funkciji frekvencije

Rezultati za realni deo konstante prostiranja odnosno konstantu slabljenja (α) prikazani su na Sl.9.



Sl.9. Konstanta slabljenja α u funkciji frekvencije

Dobijeno je odlično slaganje merenih i modelovanih vrednosti do 5 MHz, nakon čega dolazi do odstupanja koja su najizraženija za frekvencije od (7.5-8.5) MHz. Ovo odstupanje je posledica nepoznavanja imaginarnog dela relativne dielektrične konstante koja je usled toga bila zanemarena. Odlično slaganje dobijenih rezultata za imaginarni deo konstante prostiranja odnosno faznu konstantu (β), koji raste sa porastom frekvencije, dato je na Sl.10.



Sl.10. Fazna konstanta β u funkciji frekvencije

6. Zaključak

U ovom radu je prezentovana karakterizacija telefonskih parica na fizičkom nivou, kao ključne infrastrukturne komponente telefonskih pretplatničkih petlji, u radnom frekvencijskom opsegu xDSL pristupne tehnologije. Za potrebe modelovanja parice, iskorišćena je teorija transmisionih linija i analitički model koji uključuje frekvencijsku zavisnost njenih primarnih podužnih parametara. Prednost jednog ovakvog modela u odnosu na u praksi dosta korišćene empirijske modele ogleda se u direktnoj vezi primarnih parametara parice sa njenim fizičkim karakteristikama i elektromagnetskim pojavama kao što je recimo skin efekat. Sa druge strane prezentovani model za razliku od empirijskih modela nudi mogućnost simulacije lokalne petlje i u vremenskom domenu i određivanje njenih drugih ključnih karakteristika kao što je recimo BER. Time se operaterima xDSL servisa omogućava da steknu potpuni uvid u moguće performanse xDSL pristupne tehnologije pri njenoj implementaciji na postojeće lokalne pretplatničke petlje. Oba prezentovana modela su implementirani u softver koji osim modelovanja bakarnih parica ima i mogućnost poređenja modelovanih i merenih karakteristika parice pre njenog korišćenja u xDSL sistemu.

Literatura

- [1] L.Cohen, *Heaviside's Electrical Circuit Theory*, London: McGraw Hill Book London, 1928.
- [2] B.Milovanović, A.Marinčić, N.Dončov, "Characterization of Twisted Pair Telephone Cable for Broadband Telecommunication Services," Proc. of 23rd POSTEL Symposium, Faculty of Traffic and Transport Engineering, Beograd, Serbia and Montenegro, 2005, pp.241-251.
- [3] P.F.Combes, *Microwave Transmission for Telecommunications*, John Wiley & Sons, 1991.

- [4] P.Golden, H.Dedieu and K.Jacobsen, *Fundamentals of DSL Technology*, Auerbach Publications, Taylor & Francis Group, 2006.
- [5] J.J.Yoho, *Physically-Based Realizable Modeling and Network Synthesis of Subscriber Loops Utilized in DSL Technology*, PhD Thesis, Faculty of the Bradley Department of Electrical and Computer Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 2001.
- [6] S.E.Lyshevski, *Engineering and Scientific Computations Using MATLAB*, John Wiley & Sons, 2003.
- [7] M.Stojanović, A.Atanasković, M.Ranđelović, N.Dončov, B.Milovanović, "Karakterizacija telefonskih parica za potrebe xDSL servisa", ETRAN 2006.

Abstract. *In this paper, characterization of telephone subscriber loops on physical layer, used for broadband telecommunication services such xDSL, is presented. Since the transmission medium quality is one of the key requirements for performance capabilities of these services, an analytical method for modelling of primary per-unit length parameters of twisted pair is described. This model, as well as one empirical model, are implemented in appropriate software developed for telephone subscriber loops characterization. For the example of particular twisted pair telephone cable, experimental measurement of its primary parameters is done, which is followed by their modelling using described software. At the end, experimental and modelled results are compared.*

Keywords: *xDSL, twisted pair, modelling, characterisation*

**SOFTWARE REALIZATION AND EXPERIMENTAL VERIFICATION OF
MODELS FOR xDSL CABLES**

Bratislav Milovanović, Mladen Ranđelović, Aleksandar Atanasković, Nebojša Dončov