

Načrtovanje umetne linije za standardni sukani par

Andrej Levstek, Matija Pirc

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, Tržaška 25, Slovenija
E-pošta: andrej.levstek@fe.uni-lj.si

Povzetek. Delo obravnava načrtovanje umetne linije za simulacijo sukanega para, ki je še vedno najbolj razširjen komunikacijski medij na ravni lokalne zanke v slovenskem in tudi evropskem prostoru. Predstavljena je analitična pot načrtovanja in sinteze umetne linije za testiranje komunikacijskih naprav. Izhodišče je določeno s tehničnimi in ekonomskimi zahtevami, ki pomenijo robne pogoje za realizacijo. Na podlagi standardov je zasnovana osnovna topologija vezja, ki upošteva privzete specifikacije. Za simetrični vodnik je narejena analiza impedance in frekvenčnega odziva. Izračuni in poteki se nanašajo na konkretne podatke o materialih, ki se uporabljajo v telekomunikacijskih omrežjih. Za izbrano topologijo so izračunani koncentrirani elementi in predlagana ustrežna realizacija. Vseskozi je vodilna zahteva, da mora biti vezje kompatibilno z mikroprocesorskim sistemom in mora omogočati neposredno procesorsko vodenje testiranja naprav in nadzor nad delovanjem umetne linije. Na izdelani liniji so bile opravljene meritve, ki so pokazale odstopanja med uporabljenim teoretičnim modelom in praktično realizacijo umetne linije. Raziskana in pojasnjena so bila odstopanja in mehanizmi, ki ustvarjajo razliko med teoretičnim modelom in praktično realizacijo. Ob koncu prispevka so podane tudi smernice za izboljšavo modela.

Ključne besede: umetna linija, sukani par, izgubna linija, digitalni prenos, komunikacijska oprema

Design of a Twisted-pair Line Simulator

Extended abstract. The paper presents the design of a copper line simulator for communication equipment testing. Wireline simulators or artificial telephone lines are used as a replacement for signal transmission cables for the testing and measuring of wired communication equipment. Wireline simulators can be implemented as an expensive precision-measurement equipment used in laboratories or as simple passive instruments.

The presented wireline simulator line is part of an automatic quality-control system for Single-pair High-speed Digital Subscriber Line (SHDSL) transmission equipment. Polyethylene-insulated 0.4 mm copper twisted pair (PE 04) connections are simulated by the presented low-cost solution. Frequency response and DC resistance can be adjusted separately by means of digital control inputs. Three lengths (1.5 km, 2.5 km and 3.5 km) and two DC resistances (600 Ω and 1000 Ω) are supported.

The propagation constant $\gamma(\omega)$ (3) and characteristic impedance $Z_k(\omega)$ (4) of the PE04 twisted pair are calculated for the frequency-dependent cable parameters (Fig. 2). The input impedance Z_{in} of the twisted pair terminated by 135 Ω that is given by (5) is plotted in Fig. 3. The magnitude and phase of Z_{in} vary with the length and frequency. In the important range of distances, i.e., from 1.5 km to 3.5 km, only the magnitude decreases with the frequency, while the phase varies only slightly.

The topology of the wireline simulator is based on a centrally-symmetric two-port network (Fig.5a). The elements of the network are selected in order to approximate the magnitude $|Z_{in}|$ (Fig. 4) and the theoretical frequency response given by (6) (Fig. 5). The frequency response is approximated by a transfer function pole on the real axis implemented in the symmetrical two port network of the intermediate topology (Fig. 7). Frequency response and DC resistance between the

ends of the simulated line are adjusted by mechanical relays (Fig. 8). Component values are found by matching the frequency response obtained by AC circuit analysis to the theoretical results. The optimal values of the capacitors are finally readjusted taking into account only commercially available values. The achieved frequency response match is shown in Fig. 9.

In Fig.10, the measured frequency responses of the realized design are compared to the theoretical results and to responses of the Consultronics DLS 50 measuring line simulator. Practical use of the presented line simulator in automatic test equipment justifies the approximations used in the design.

Keywords: wireline simulator, metallic twisted pair, transmission line, digital transmission, communication equipment

1 Uvod

V delu je predstavljena pot od načrtovanja do realizacije umetne linije za testiranje komunikacijskih naprav. Umetne linije se uporabljajo na različnih področjih komunikacijske tehnike: v naročniških telefonskih omrežjih, v slikovnih sistemih, radarski tehniki itd. V nekaterih aplikacijah je primarni cilj realizacija določene zakasnitve, v našem prispevku pa je težišče na realizaciji fizičnega vezja iz koncentriranih elementov za potrebe testiranja naročniških telefonskih sistemov. Pri tem sta bistveni predvsem nizka cena in frekvenčna karakteristika dušenja, ki naj se dobro ujema z dušenjem standardne fizične linije določene dolžine.

Skladno z uporabo resničnih linij je nastala in se večala potreba po umetnih linijah, s katerimi bi lahko

nadomestili kilometre standardnega bakrenega telefonskega kabla za merilne namene. Začetna dela s tega področja, ki temeljijo na uporabi verig elementov RLC so poznana že iz prve polovice prejšnjega stoletja [1]. Poleg takšnih realizacij so danes v uporabi tudi elektronske rešitve [2], [3], ki temeljijo na uporabi digitalnih signalnih procesorjev. Takšne umetne linije so draga in specializirana merilna oprema, ki je primerna le za referenčne meritve v razvojni fazi, ko se zahteva tudi dobro ujemanje faznega poteka.

Na trgu najdemo tudi cenejše, popolnoma pasivne rešitve, v obliki samostojne merilne naprave za manj zahtevne teste [4]. Pri takšnih linijah je nastavljanje parametrov linije največkrat ročno, zato niso primerne za avtomatizirane meritve [5].

Ker v okviru obstoječih rešitev ni bilo primerne izvedbe za testiranje izdelkov serijske proizvodnje, smo se odločili za načrtovanje pasivnega vezja, ki bo nadomeščalo simetrični sukani par določene, vnaprej izbrane dolžine. Načrtovanje vezja smo zastavili tako, da lahko z električnimi signali spreminjamo nekaj najosnovnejših parametrov in s tem simuliramo različne fizične dolžine, ki so tehnično in komercialno pomembne.

2 Izhodiščne zahteve

2.1 Standardne vrednosti

V telefonskem omrežju se na ravni lokalne zanke najpogosteje uporablja sukani par bakrene žice $\varnothing 0,4$ mm. Uporabljata se v glavnem le dve vrsti izolacijskih materialov: polietilen (PE) in polivinil klorid (PVC). Slednji je najpogosteje uporabljen izolacijski material tako za omrežne kot tudi za nizkofrekvenčne telekomunikacijske kable. Izolacijska materiala se razlikujeta predvsem po relativni dielektričnosti, ki znaša $2,2 \div 2,6$ za PE in $5,8 \div 6,8$ za PVC.

Zaradi te snovne razlike ima sukani par z izolacijo PVC ustrezno višjo kapacitivnost na dolžinsko enoto C' [pF/m] in zato nižjo absolutno vrednost karakteristične impedance pri višjih frekvencah $|Z_k| = 82 \Omega$. Priporočila in standardi za ISDN [6] in druge oblike digitalnih zvez prek lokalne naročniške zanke (DLL), kot npr. HDSL in SHDSL [7], predpisujejo zaključitev linije z $R_b = 135 \Omega$, kolikor znaša $|Z_k|$ sukanega para z izolacijo PE in premerom bakrene žice 0,4 mm (PE 04). Zaradi zgoraj navedenih standardov smo se odločili za načrtovanje umetne linije, podobne kablu PE 04, ki je na obeh koncih zaključen z uporom 135Ω .

2.2 Tehnične zahteve

Tehnične zahteve za simulator bakrenega simetričnega para izvirajo iz specifikacij terminalske opreme, ki se prek umetne linije poveže v prenosni sistem, in iz

zahtev računalniško vodene testirne naprave. Realizirana rešitev mora biti cenovno ugodna, ker terminalska oprema na strani omrežnega operaterja omogoča priklon $1 \div 4$ naročniških terminalov.

Preklapljanje umetne linije med merjene pare terminalske opreme ne pride v poštev zaradi dolgih časov vzpostavljanja prenosnega sistema. Adaptivno prilagajanje frekvenčne karakteristike sprejemnega in oddajnega vezja v obeh terminalih je razmeroma dolgotrajen proces, ki lahko traja tudi dve minuti. Poleg tega se med testnim postopkom beležijo tudi morebitni izpadi sinhronizma med posameznimi pari, ki lahko nastopijo v daljšem časovnem obdobju. V testni napravi mora biti toliko umetnih linij, kolikor je maksimalno število naročniških terminalov. Osnovne tehnične zahteve so strnjene v naslednjih točkah:

- a) računalniško nastavljanje glavnih parametrov simulirane linije PE 04:
 - I. dolžina: 1,5 km, 2,5 km in 3,5 km,
 - II. enosmerna upornost: 600Ω in 1000Ω ,
- b) impedančna prilagoditev na obeh vhidih,
- c) frekvenčno območje $10 \text{ kHz} \div 500 \text{ kHz}$,
- d) simulacija amplitudnega frekvenčnega odziva žične zveze $|H(f)|$,
- e) napajanje naročniškega terminala z enosmernim tokom do 50 mA,
- f) enosmerna napajalna napetost do 400 V,
- g) preprosta in varna uporaba.

2.3 Sprejemljivost sistema

Sprejemljivost sistema se izraža kot kompromis med tehničnimi zahtevami in ceno izdelanega vezja. Glede na veliko število umetnih linij v testnem sistemu smo simulacijo lastnosti fizičnega žičnega voda omejili na posnemanje amplitudnega odziva in vhodne impedance. Ti dve lastnosti sta bistveni za preskušanje delovanja diferenčnega vezja, ki je neposredno povezano na žično zvezo. Če bi hoteli izdelati umetno linijo, ki bi posnemala tudi fazni potek, bi potrebovali veliko več elementov, kar pa za načrtovano uporabo v testni napravi finančno ni sprejemljivo.

3 Topologija vezja

Arhitektura je zasnovana na podlagi teorije delovanja električnih izgubnih linij. Pri tem sta pomembni predvsem dve električni lastnosti:

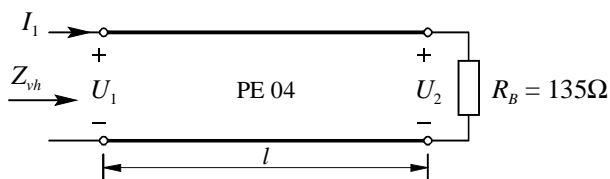
- vhodna impedanca Z_{vh} v odsek linije, ki je zaključen z izbrano bremensko upornostjo R_b ,

$$Z_{vh}(f, l) = \frac{U_1}{I_1}, \quad (1)$$

- amplitudni frekvenčni odziv $|H(f)|$ obremenjenega odseka linije z dolžino l

$$|H(f, l)| = \left| \frac{U_2}{U_1} \right|. \quad (2)$$

Razmere so ponazorjene na sliki 1.



Slika 1. Definicija osnovnih lastnosti umetne linije
Figure 1. Definition of the basic wireline simulator properties.

Pasivna narava simulirane linije narekuje zasnovo umetne linije v obliki pasivnega simetričnega dvovodnega vezja. Signali se prek sukanega para prenašajo diferencialno, kar je zagotovljeno z linijskimi transformatorji pri obeh zaključitvah. Vpliv motilnih signalov se mora tudi pri umetni liniji izraziti na obeh priključkih v obliki sofazne napetosti, kar lahko dosežemo le s centralno simetrijo fizične realizacije s koncentriranimi elementi.

3.1 Vhodna impedanca zaključene linije

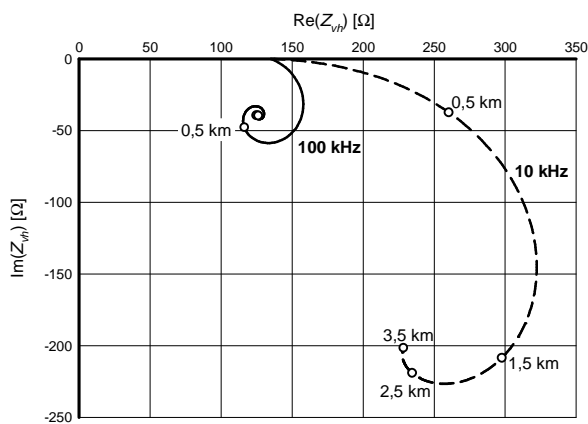
Na podlagi vrednosti in frekvenčne odvisnosti primarnih parametrov kabla PE 04 [7], ki jih prikazuje diagram na sliki 2, smo izračunali frekvenčno odvisnost faktorja prenosa

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j\omega L'(\omega))j\omega C'} \quad (3)$$

in karakteristične impedance

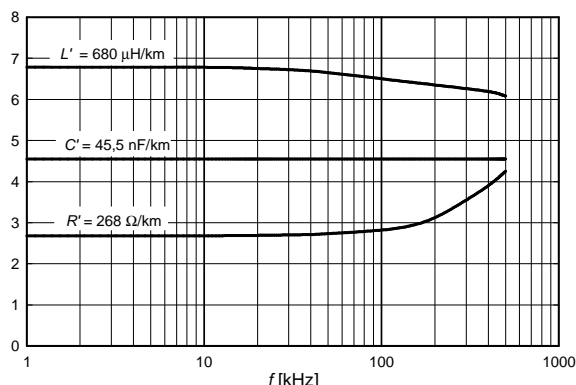
$$Z_k(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j\omega L'(\omega)}{j\omega C'}} \quad (4)$$

V obeh izrazih smo upoštevali frekvenčno odvisnost upornosti R' in induktivnosti L' , ki ju povzroča kožni pojav [8], [9]. Upornost narašča zaradi manjšega efektivnega preseka bakrenega vodnika, induktivnost pa se rahlo znižuje s frekvenco, ker izginja magnetno polje znotraj vodnika, in z njim notranja induktivnost. Kapacitivnost C' je v opazovanem območju konstantna, prevodnost G' pa je v obravnavanem frekvenčnem območju popolnoma zanemarljiva, zato ne nastopa v



Slika 3. Vhodna impedanca zaključene linije ($R_B = 135 \Omega$) za dolžine $l = 0 \div 3,5$ km pri $f = 10$ kHz in 100 kHz
Figure 3. Plot of the complex input impedance for variable length of terminated line ($R_B = 135 \Omega$) at $f = 10$ kHz and 100 kHz.

izrazih (3) in (4).



Slika 2. Tipične vrednosti parametrov simetričnega para PE04
Figure 2. Parameters of a 0.4 mm PE twisted pair (PE04).

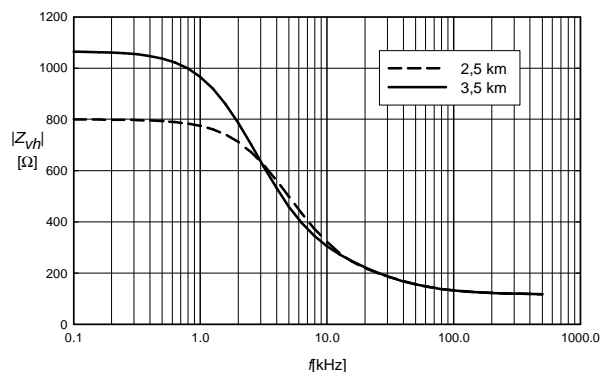
Za izračun potočkov Z_{vh} (1) v odsek zaključene izgubne linije (slika 1) moramo najprej določiti odbojnost bremena Γ_B , nato pa z njo razmerje med napetostjo in tokom na vходу linije

$$Z_{vh}(\omega, l) = \frac{U^+ + U^-}{I^+ + I^-} = Z_k \frac{1 + \Gamma_B \cdot \exp(-2\gamma l)}{1 - \Gamma_B \cdot \exp(-2\gamma l)}, \quad (5)$$

pri čemer so Z_k , Γ_B in γ frekvenčno odvisni parametri, l pa je dolžina kabla. Na sliki 3 je v kompleksni ravnini prikazan potek Z_{vh} za dolžine kablov do 3,5 km.

Iz grafa na sliki 3 ugotovimo, da pri nizkih frekvencah prevladuje ohmska upornost bakrene zanke, z višanjem frekvence pa $|Z_{vh}|$ pada in postaja čedalje manj odvisna od dolžine povezave. Z večanjem dolžine kabla upada velikost odbitega vala na vходу. Z_{vh} postaja enaka karakteristični impedanci, ki pa je nekoliko odvisna tudi od frekvence. Za digitalne prenosne sisteme (HDSL, SHDSL, ISDN) so pomembne frekvence od 10 kHz do 500 kHz, zato mora načrtovana umetna linija na tem frekvenčnem področju dobro posnemati lastnosti fizične povezave.

Načrtovanje in izbiro elementov za sintezo vhodnega dela vezja smo si olajšali z grafom frekvenčnega poteka $|Z_{vh}|$ pri dolžinah 2,5 km in 3,5 km, ki je prikazan na sliki 4.



Slika 4. Frekvenčni potek $|Z_{vh}|$ za dve dolžini zaključene linije
Figure 4. Frequency plot of $|Z_{vh}|$ for two lengths of a terminated cable.

3.2 Frekvenčni odziv zaključene linije

Frekvenčni odziv linije podaja enačba (1) in predstavlja razmerje med napetostjo na bremenski upornosti na koncu kabla in napetostjo na vhodu. Določimo ga na podlagi napredujočega in odbitega napetostnega vala

$$H(\omega, l) = \frac{U^+(l) + U^-(l)}{U^+(0) + U^-(0)} = \frac{(1 + \Gamma_B) \exp(-\gamma l)}{1 + \Gamma_B \cdot \exp(-\gamma 2l)}, \quad (6)$$

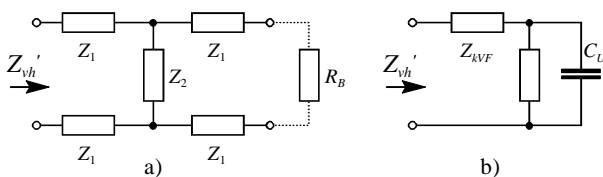
kjer sta odbojnost Γ_B in faktor prenosa γ frekvenčno odvisna. Slika 5 prikazuje frekvenčne poteke $|H(f, l)|$, določene z enačbo (6), za tri dolžine lokalne zanke.

Iz prikazanih frekvenčnih potekov ugotovimo, da je pri kratki razdalji (1,5 km) večina dušenja posledica ohmske upornosti. Pri frekvenci 100 kHz je dušenje le za 2 dB večje kot pri 10 kHz. Povsem drugače je pri daljših zankah, kjer je dušenje že pri nizkih frekvencah znatno. Pri vseh potekih je opazno upadanje izhodnega signala od neke mejne frekvence, ki spominja na frekvenčno karakteristiko realnega pola, vendar so nagibi nekoliko bolj položni. Pri dolžini 3,5 km se izhodni signal na območju od 10 do 100 kHz zniža za 15 dB. To je manj, kot je nagib RC člena oz. pola na realni osi, ki ima nagib 20 dB/dek.

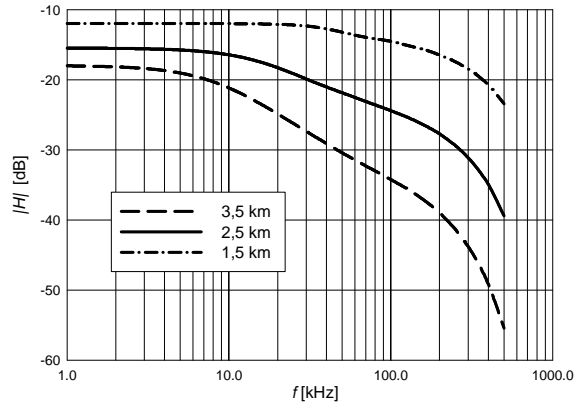
Poleg prvega preloma frekvenčnih potekov v okolici 10 kHz vidimo znatno povečanje dušenja v okolici 200 kHz. Zaradi kožnega pojava se upornost bakrenega vodnika močno povečuje, kar dodatno pripomore k dušenju izhodnega signala. Frekvenčno območje nad 500 kHz je za prenos signalov uporabno le za krajše razdalje. V nadaljevanju se bomo osredotočili na sintezo vezja, ki posnema lastnosti fizičnega kabla z dolžino 2,5 km, kar je najpogostejša dolžina lokalne zanke.

4 Sinteza pasivnega vezja

Topologija vezja iz koncentriranih elementov je zasnovana na centralno simetričnem štiripolnem vezju (slika 6a). Vhodna impedanca zaključenega vezja se mora dobro ujemati s teoretično izračunanimi poteki. Iz teoretičnega frekvenčnega poteka $|Z_{vh}(f)|$ (slika 4) je razvidno, da lahko vhodno impedanco zaključene linije modeliramo z $Z_{vh}(s)$, ki ima pol in ničlo na realni osi. Njena realizacija je prikazana na sliki 6b, kjer Z_{kVF} pomeni Z_k pri visokih frekvencah, ki je skoraj čisto realna in znaša 135 Ω . Vrednost kondenzatorja C_U je določena s polom, ko se $|Z_{vh}|$ pri dani dolžini linije začne zmanjševati.

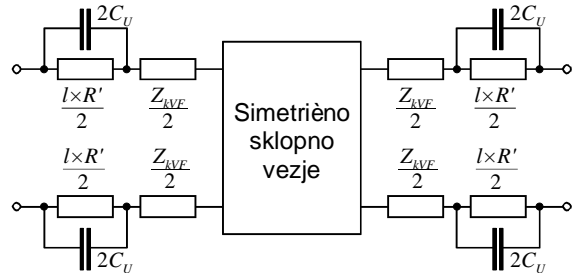


Slika 6. a) Centralno simetrično vezje b) minimalna realizacija vhodne impedance
Figure 6. a) Centrally symmetric four-pole network b) Minimal realization of the input impedance.



Slika 5. Amplitudni frekvenčni odzivi za tri dolžine kabla PE 04, zaključenega z $R_B = 135 \Omega$
Figure 5. Frequency response for three lengths of a PE 04 terminated cable ($R_L = 135 \Omega$).

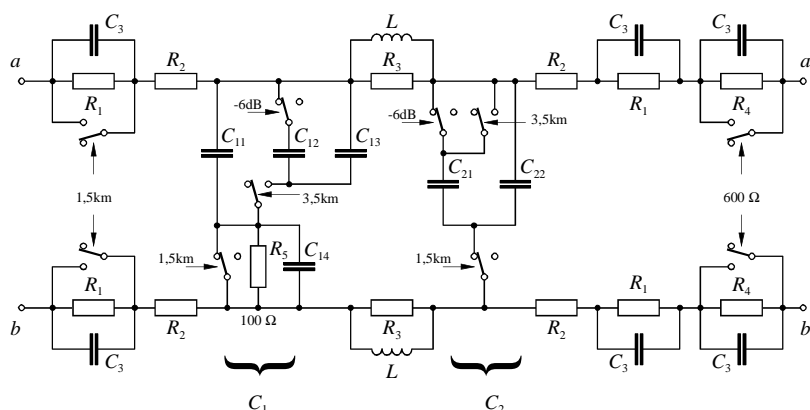
Prikazana realizacija še ne izpolnjuje zahteve po simetriji, ki jo uresničimo s serijsko vezavo dveh polovičnih impedanc Z_{vh}' . Zaradi centralne simetrije nastopa takšna impedanca na obeh priključnih sponkah. Sintezo vezja moramo razširiti z ustreznim sklopom med obema deloma vezja, ki mora posnemati frekvenčne odzive, podane na sliki 5. Električna shema vezja, ki izpolnjuje dane zahteve, je prikazana na sliki 7.



Slika 7. Vmesna faza topologije umetne linije
Figure 7. Intermediate phase of a wireline simulator topology.

Problem sklopnega vezja je treba rešiti na način, ki zagotavlja ustreznost frekvenčnega odziva. Doseči je treba ujemanje vhodne impedance, ki ga zagotavlja realizacija na sliki 6b. Pri načrtovanju sklopnega vezja, ki je ključno za ustrezen potek $|H(f)|$, je treba upoštevati tudi enosmerni napajalni tok naročniškega terminala. Rešitev smo poiskali v obliki simetričnega vezja π .

Končna shema, ki upošteva tudi zahtevane nastavitve parametrov, je prikazana na sliki 8. Karakteristiko dušenja nastavljam s spreminjanjem vrednosti elementov, kar je izvedeno z miniaturnimi mehanskimi releji. Koncepta centralne simetrije vezja nismo popolnoma upoštevali v končni realizaciji vezja. Popolna simetrija bi zahtevala dodatne elemente, zato smo se ji iz cenovnih razlogov odpovedali. Ta ekonomsko-tehnični kompromis ni poslabšal lastnosti vezja v okviru danih toleranc.



Slika 8. Električna shema vezja za simulacijo bakrenega sukanege para
Figure 8. Schematic diagram of the designed metallic twisted-pair simulator.

5 Realizacija vezja

Vrednosti elementov v shemi na sliki 8 smo določili na podlagi petih meril:

- enosmerna upornost med sponkama a in a' mora biti $300\ \Omega$ oziroma $500\ \Omega$
- upori morajo biti dimenzionirani za tok $100\ \text{mA}$
- s spreminjanjem kapacitivnosti C_1 in C_2 vezje posnema frekvenčni odziv linije dolžine $2,5\ \text{km}$ oziroma $3,5\ \text{km}$ in dodatno $1,5\ \text{km}$
- impedanca med priključkoma a in b ob zaključitvi s $135\ \Omega$ na priključkih a' in b' se mora ujemanjati z analitično izračunanim potekom za izbrano dolžino
- kondenzatorji, ki sestavljajo kapacitivnosti C_1 in C_2 , morajo imeti nizko serijsko induktivnost in nazivno napetost $U_N \geq 400\ \text{V}$

Pri dimenzioniranju konkretnih elementov smo analizirali njihov vpliv na zgoraj naštetih merila s programskim orodjem SPICE. Rezultati numerične analize podajajo nominalne vrednosti elementov in ne zajemajo toleranc uporabljenih komponent. Pri izbiri vrednosti na podlagi numerične simulacije nismo izbirali optimalnih vrednosti glede na ujemanje frekvenčnih potekov, ampak smo kombinirali vrednosti tako, da smo z njimi pokrili vse zahtevane dolžine.

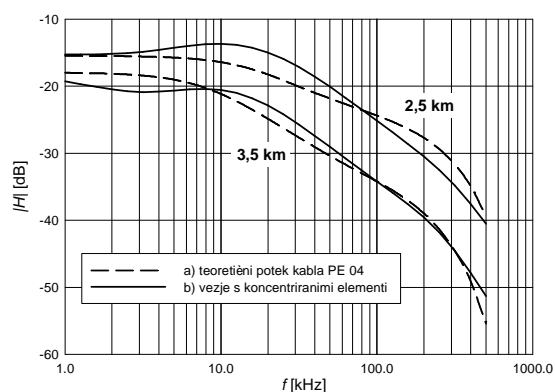
Spreminjanje parametrov linije je izvedeno z elektromehanskimi releji, ki zagotavljajo galvansko ločitev linije od krmilnih logičnih signalov. Miniaturni rele z dvema izmeničnima kontaktoma omogoča učinkovito kombiniranje komponent na vezju. Za kapacitivnosti C_1 in C_2 smo uporabili poliestrske (PET) kondenzatorje ($U_N = 400\ \text{V}$). Uporaba kondenzatorjev z metaliziranim filmom zagotavlja varno delovanje, ker se v takšnih kondenzatorjih mesta mikroskopskih prebojev sami izolirajo od okolice. Pri keramičnih kondenzatorjih se preboj konča s kratkim stikom.

Za kondenzator $C_3 = 470\ \text{nF}$ v shemi (slika 8) smo izbrali keramične večslojne kondenzatorje (X7R) zaradi prihranka na prostoru, saj imajo majhne fizične dimenzije ob zahtevani kapacitivnosti. Na njih je le nizka enosmerna napetost, ki jo povzroča enosmerni

napajalni tok terminalske opreme na naročniškem koncu kabla. Tolerance teh kondenzatorjev imajo zanemarljiv vpliv na amplitudni frekvenčni potek. Zaradi nizke enosmerne prednapetosti je znižanje kapacitivnosti zanemarljivo.

6 Rezultati simulacij in meritev

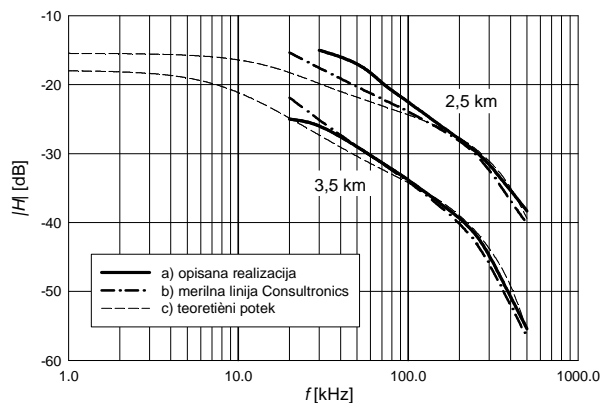
Dosežene lastnosti realizirane umetne linije pokaže primerjava s teoretičnimi izračuni. Rezultat optimizacije vrednosti je prikazan z grafom frekvenčnega odziva na sliki 9. Karakteristika vezja, nastavljenega za simulacijo linije z dolžino $3,5\ \text{km}$, se lepo ujema s teoretičnim potekom, ker je nagib $20\ \text{dB/dek}$ in se lepo ujema s potekom realnega pola. Vrednosti elementov umetne linije za dolžino $2,5\ \text{km}$ so izbrane tako, da se vrednost dušenja na sredini območja ujema s teoretičnim. Območje pod $10\ \text{kHz}$ ni pomembno za prenosne sisteme xDSL, saj imajo linijski transformatorji spodnjo mejno frekvenco med 10 in $30\ \text{kHz}$.



Slika 9. Frekvenčni odziv $|H(f)|$ sukanege para PE 04:
a) teoretični potek; b) AC analiza za projektirano vezje
Figure 9. Frequency response $|H(f)|$ of a PE 04 twisted-pair
a) line theory, b) AC analysis of the designed circuit.

Računalniško načrtovane umetne linije smo preverili z meritvami izdelanih tiskanih vezij. Vezja smo načrtovali z upoštevanjem izhodiščnih predpostavk o simetriji vezja, da bi se izognili motnjam iz okolice in

med sosednimi linijami. Meritev prenosne karakteristike smo izvedli z analizatorjem vezij HP 3698A [10]. Zaradi asimetričnih priključkov merilnega instrumenta smo za priklop umetne linije uporabili linijska transformatorja Pulse B1040A. Rezultati meritev za dve dolžini linije so prikazani na grafu slike 10. Na istem grafu sta za primerjavo podana izmerjena frekvenčna poteka merilne umetne linije Consultronics.



Slika 10. Primerjava izmerjenega frekvenčnega poteka izdelane umetne linije s teoretičnim izračunom in z meritvami merilne umetne linije Consultronics

Figure 10. Experimental and theoretical frequency responses: a) measured response of the designed network, b) Consultronics measuring line simulator, and c) theoretical response.

Rezultati kažejo dobro ujemanje izdelanega vezja z izračunanim potekom in z merilno napravo. Odstopanja in ukrivljenost potekov pri $f < 30$ kHz so posledica spodnje frekvenčne meje linijskega transformatorja.

7 Sklep

Predstavljena realizacija umetne linije se je izkazala kot cenovno ustrezna rešitev za izvedbo hkratnega testiranja večjega števila parov telekomunikacijske opreme pod realnimi pogoji. Zaradi pomanjkanja prostora nismo podali vseh nastavitvev, ki jih vezje omogoča. Omenimo samo posnemanje dolžine 1,5 km, ki je pomembna za širokopasovne prenosne sisteme na krajših razdaljah.

Pri načrtovanju vezja je potrebna posebna pozornost prazenju kondenzatorjev med žilama a in b , ki po odklopu merjenega modula lahko ostanejo nabiti na napetosti 200 V in več. Težavo, ki pomeni nevarnost pri rokovanju, smo v končni izvedbi odpravili z uporabo 4,7 M Ω , vezanim med sponki a in b (slika 8).

Pomanjkljivost merilne naprave je uporaba elektromehanskih relejev za spreminjanje parametrov linije. Odskakovanje kontaktov in priklop praznega kondenzatorja k nabitemu kondenzatorju povzroča iskrenje in je vir znatnih elektromagnetnih motenj. Težava je elegantno rešljiva z uporabo polprevodniških relejev (Opto-MOS), ki so brez mehanskih kontaktov. Poleg tega imajo releji Opto-MOS nekoliko višjo

upornost sklenjenega stikala, ki je koristna za dušenje motenj pri preklapljanju kondenzatorjev. Po drugi strani je rešitev znatno dražja, ker za doseg istih funkcij potrebujemo znatno več polprevodniških relejev.

Opisana vezja umetne linije so uporabljena v avtomatski merilni napravi za končno kontrolno večdostopovnih telefonskih sistemov in podatkovnih modemov.

8 Literatura

- [1] L. E. Swedlund, *A study of an artificial telephone line*, Thesis, California Institute of Technology, Pasadena, CA, USA, 1928
- [2] Telebyte Inc., Hauppauge, NY, USA, web: www.telebytebroadband.com, marec 2008
- [3] LSX 2025 DSL Line Simulator, Sparnex N.V., web: www.sparnex.com, marec 2008
- [4] Electron Parametrics Limited, X-600-0.4 ADSL Artificial line, web: www.epl.co.uk, Issue C, 24th April 2002, dostop marec 2008
- [5] A. Levstek, S. Gorup, M. Jankovec, Ž. Gorup, Automatic equipment for final testing of telephone pair gain systems, *Proc. of the, 10th Mediterranean Electrotechnical Conference, MELeCon 2000*, May 29-31, 2000, Limassol, Cyprus, Vol. 1, pp. 61-64.
- [6] *Integrated services digital network (ISDN) basic rate access, ETR 080*, ETSI, Sophia Antipolis, France, 1996, ISBN 2-7437-0814-X Edition 2
- [7] *Recommendation G.991.2 - Single-pair high-speed digital subscriber line (SHDSL) transceivers*, ITU-T, Irvine, Ca, USA, 2001
- [8] J. J. Werner, The HDSL environment, *IEEE Journal on selected areas in communications*, vol.9, no. 6, pp. 785-800, Aug. 1991
- [9] D. K. Cheng, *Field and Wave Electromagnetics*, 2nd ed., Addison-Wesley, 1998, ISBN 0-201-52820-7
- [10] R. Lao, The twisted-pair telephone transmission line, *High Frequency Electronics*, November 2002, pp. 20-30

Andrej Levstek je diplomiral leta 1979, magistriral leta 1982 in doktoriral leta 2003 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Od leta 1984 je zaposlen na isti fakulteti, od leta 2003 kot docent. Predava predmete s področja elektronike in procesiranja signalov. Raziskovalno deluje na področju polprevodniških struktur, elektronskih vezij in obdelave signalov. V zadnjem času se ukvarja z razvojem inteligentnih senzorjev in na področju avtomatskega testiranja telekomunikacijske opreme. Dr. Levstek je član IEEE in društva MIDEM. Vrsto let je bil tajnik slovenske sekcije IEEE.

Matija Pirc je diplomiral leta 2004 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Leta 2005 se je zaposlil na isti fakulteti kot asistent. Pedagoško sodeluje pri predmetih Procesiranje signalov, Elektronske komponente, Komponente in signali, Digitalne komunikacije, Gradnja mikroprocesorskih sistemov, Realizacija elektronskih sklopov, Računalniška orodja in Seminar. Vpisan je na podiplomski študij elektrotehnike. Raziskuje optično-električne lastnosti polprevodnikov, elektronske elemente in elektronske sisteme v telekomunikacijah.