

Enostavna implementacija modela visokonapetostnega PLC-kanala, zasnovanega na situ FIR

Asmir Gogić^{1,†}, Nermin Suljanović¹, Aljo Mujčić¹, Mitja Kolenc², Jurij F. Tasič² in Matej Zajc²

¹Univerza v Tuzli, Fakulteta za elektrotehniko, Franjevačka 2, 7500 Tuzla, Bosna in Hercegovina

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

[†] E-pošta: asmir.gogic@untz.ba

Povzetek. Članek predstavi enostavno implementacijo modela visokonapetostnega (VN) kanala PLC (ang. Power Line Communication) z uporabo digitalnih sit. Model temelji na treh identičnih sitih FIR (ang. Finite Impulse Response). Amplitudna karakteristika sit FIR se ujema z amplitudno karakteristiko visokonapetostnega PLC-kanala za izbrano priključno shemo spojnih vezij na VN-vod, brez upoštevanja refleksije. Odbojni pojavi, ki nastajajo na visokonapetostnih terminalih, so v modelu ponazorjeni z vzporedno povratno zanko in dodatno zakasnitvijo sit, ki ustreza času potovanja odbitega vala. Pristop, predstavljen v tem članku, smo uporabili v primeru 400 kV daljnovoda s tremi faznimi vodniki v horizontalni razporeditvi. Rezultati so podani za dve optimalni priključni shemi spojnih vezij, in sicer med srednjo fazo in zemljo ter zunanjo fazo in srednjo fazo.

Ključne besede: visokonapetostni PLC-kanal, sito FIR, model, implementacije, priključna shema spojnih vezij

Simple digital filter implementation of the HV PLC channel model

This paper presents simple implementation model of the high-voltage (HV) PLC (Power Line Communication) channel using digital filters. The model utilizes three identical FIR (Finite Impulse Response) filters. The amplitude characteristic of the FIR filters matches the HV PLC channel amplitude characteristic for a given coupling, without taking into consideration the reflection. The reflection phenomenon, occurring at the HV power line terminals, is implemented in the model by application of the parallel feedback branch and additional filter delay corresponding to the traveling time of the reflected wave. The approach presented in this paper is applied to the 400 kV power line with three phase conductors in horizontal disposition. Results are given for two optimal couplings, the middle phase to ground and the outer phase to middle phase coupling.

1 UVOD

Trenutne raziskave v domeni aktivnih omrežij (ang. Smart grid) so pokazale ponovno zanimanje za visokonapetostne (VN) PLC-komunikacije [1]. Zadnji trendi na področju delovanja in nadzora električnih sistemov vključujejo obsežne meritve na velikih geografskih področjih, kar prinaša povečane zahteve po prenosu podatkov z ustrezno pasovno širino ter zahtevano zanesljivostjo. Optični vodi, ki so vključeni v VN vode, lahko v celoti izpolnijo te zahteve, vendar niso vedno na voljo. Običajno je motiv uporabe VN vodov za komunikacijske storitve na številnih delih sveta, kjer so električni vodi običajno edina

komunikacijska infrastruktura. Poleg tega je redundantna komunikacijska pot vedno zahtevana.

Analogni PLC-sistemi (aPLC) po VN električnih vodih se običajno uporabljajo za prenos govora, signalov distančne zaščite in za prenos operativnih podatkov z nizko prenosno hitrostjo. Za SCADA (ang. Supervisory Control and Data Acquisition) sisteme in komunikacije z RTU (ang. Remote Terminal Units) je sistem aPLC zadovoljiva rešitev. Poleg tega se aPLC pogosto uporablja v zaščitnih sistemih visokonapetostnih vodov. Digitalni VN PLC-sistem (dPLC) lahko v primerjavi z analognim sistemom aPLC dosega višje prenosne hitrosti. Prednost sistemov dPLC, ki se danes uporabljajo za prenos govora in podatkov, je v kompatibilnosti z drugo digitalno opremo. Zaradi svoje zanesljivosti, robustnosti in relativno nizke cene pa aPLC ostaja v sistemih zaščite.

VN PLC-komunikacije delujejo na frekvenčnem področju od 30 do 500 kHz, ki je razdeljeno na 4 kHz pasove [2]. Pri kanalu aPLC je pasovna širina enaka 4 kHz. Za dPLC pasovno širino kanala velja, da je sestavljena iz mnogokratnika 4 kHz pasov, da je lahko kompatibilna z analognimi sistemi PLC. Pri frekvenčnem načrtovanju je treba upoštevati interference z obstoječimi kanali, kot tudi interference z lokalnimi radijskimi in navigacijskimi postajami.

Digitalni sistem PLC v nasprotju z analognim temelji na komunikacijskih značilnostih VN vodov in na izdelavi novih zahtev za natančno določanje frekvenčnih karakteristik VN vodov [3]. Izbira ustreznih

komunikacijskih tehnik, kot so modulacija, kanalno kodiranje in izravnavanje, je direktno povezana s temi karakteristikami.

Diskretni frekvenčni komunikacijski model VN voda, ki je primeren za analizo sistema dPLC, je predstavljen v člankih [3] in [4], ki opisujeta implementacijo digitalnega sata v obravnavanem modelu na način, ki je primeren za numerično simulacijo komunikacijskih sistemov. Ker ima obravnavani model enostavno arhitekturo za implementacijo v tehnologiji FPGA, je primeren kot fizični model za laboratorijsko testiranje naprav dPLC.

Pri uporabi VN vodov za komunikacijske namene obstajata dve dominantni omejitvi: šum korone in odboj. Šum korone na VN vodih je posledica pojava ionizacije zraka, ki obdaja fazni vodnik. VN vod je relativno visokošumni komunikacijski kanal v primerjavi z drugimi prenosnimi mediji, saj je šum časovno spremenljiv in odvisen od vremenskih razmer. Poleg tega je električni vod tudi sam šumni izvor. Nivo šuma, ki je posledica korone, se močno spreminja v periodi omrežne napetosti in je dominanten med deževnim in snežnim vremenom.

Druga pomembna lastnost obravnavanega kanala je odboj signala, ki je posledica neustrezne zaključitve VN voda s primerno karakteristično impedanco. Prisotnost odbojev povzroča odmeve v impulznem odzivu in oscilacije v frekvenčni karakteristiki (amplitudna in fazna karakteristika, skupinska zakasnitev, vhodna impedanca) kanala PLC in posledično zmanjšanje razmerje signal šum (SNR) ter večji delež bitnih napak (BER) v digitalnem komunikacijskem sistemu.

Implementacija digitalnega sata za potrebe modela kanala VN voda, ki je predstavljena v tem članku, podaja frekvenčni odziv (amplitudna in frekvenčna karakteristika), ki vključuje odboje. Generiranje šuma ni vključeno v samo implementacijo. Natančna implementacija šuma v VN PLC-kanalu je podana v [5].

2 DISKRETNi FREKVENČNI MODEL NA PODLAGI ODBOJNOSTI

Pojav razširjanja valovanja prek električnih vodov opisujeta telegrafski enačbi. Ker je VN vod obravnavan kot večvodniški sistem, velja, da sta napetost \mathbf{V} in tok \mathbf{I} v poljubni točki na električnem vodu podana s telegrafskima enačbama v matrični obliki

$$\frac{d^2 \mathbf{V}(x)}{dx^2} - \mathbf{ZYV}(x) = -\frac{d\mathbf{E}(x)}{dx} + \mathbf{ZJ}(x) \quad (1)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{I}(x)}{dx^2} - \mathbf{YZV}(x) = -\frac{d\mathbf{J}(x)}{dx} + \mathbf{YE}(x) \quad (2)$$

Elementi matrik \mathbf{Z} in \mathbf{Y} oblikujejo nabor osnovnih parametrov električnega voda, vzporednega z zemeljsko površino. Ti parametri so določeni na podlagi geometrijske zasnove električnega voda in električnih parametrov vodnikov in podlage [4]. Vpliv zemlje, ki

ima končno prevodnost, je definiran v [5]. V zgornjih enačbah vektorja $\mathbf{E}(x)$ in $\mathbf{J}(x)$ pomenita izvor napetosti in toka vzdolž voda. Na splošno vektorja $\mathbf{E}(x)$ in $\mathbf{J}(x)$ modelirata izvore šuma na VN vodu. Napetostni izvor $\mathbf{E}(x)$ pomeni interferenco z drugimi PLC-napravami in radijskimi postajami, tokovni izvor $\mathbf{J}(x)$ pa je šum, ki nastane zaradi korone [4]. Pri pasivnem omrežju je vrednost vektorjev $\mathbf{E}(x)$ in $\mathbf{J}(x)$ enaka nič. Enačbi (1) in (2) sta zapisani v originalnih (faznih) koordinatah kar pomeni, da je vsaka koordinata vektorja stanje na enem od trifaznih vodnikov. Z uporabo modalne transformacije rešimo enačbi (1) in (2), [4], [7],

$$\mathbf{V} = \mathbf{S}\mathbf{V}_s, \mathbf{I} = \mathbf{Q}\mathbf{I}_s \quad (3)$$

kjer sta napetost in tok podana z vektorjema \mathbf{V}_s in \mathbf{I}_s . Kompleksna matrika \mathbf{S} je izbrana kot matrika lastnih vrednosti produkta $\mathbf{\Gamma}^2 = \mathbf{ZY}$, matrika \mathbf{Q} pa je enaka $(\mathbf{S}^T)^{-1}$. Matriko funkcije razširjanja v faznih koordinatah označuje $\mathbf{\Gamma}$. Transformacija, ki jo definira (3), transformira enačbi (1) in (2) v sistem navadnih nehomogenih diferencialnih enačb, ki ju zapišemo v matrični obliki kot

$$\frac{d^2 \mathbf{V}_s(x)}{dx^2} = \gamma^2 \mathbf{V}_s(x) + \mathbf{Z}_s \mathbf{J}_s(x) - \frac{d\mathbf{E}_s(x)}{dx} \quad (4)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{I}_s(x)}{dx^2} = \gamma^2 \mathbf{I}_s(x) + \mathbf{Y}_s \mathbf{E}_s(x) - \frac{d\mathbf{J}_s(x)}{dx} \quad (5)$$

Rešitev sistema navadnih diferencialnih enačb ustreza modalnim komunikacijskim kanalom, ki so neodvisni med seboj in vsebujejo lastno funkcijo razširjanja in karakteristično impedanco.

Lastne vrednosti matrike \mathbf{ZY} definirajo kvadrat modalnih funkcij razširjanja γ^2 . Konstanta širjenja in razširjanja γ je diagonalna matrika dimenzije $N \times N$, katere elementi so modalne funkcije razširjanja. VN električni vod s tremi faznimi vodniki v horizontalni razporeditvi ima tri načine priključitve sistemov PLC, ki so prikazani na sliki 1. Največje slabljenje ima zemeljski način, kjer se energija razširja skozi tri fazne vodnike (slika 1) in se vrača prek zemlje. Zemeljski način ima veliko večje slabljenje kot preostala dva načina in komponenta zemeljskega načina izgine po približno 20 do 30 km [4]. Fazna načina 1 in 2 imata znatno manjše slabljenje, ker se energija razširja in vrača prek faznih vodnikov. Fazni način 1 ustreza



Slika 1: Trije načini priključitve sistemov PLC na VN vod s tremi faznimi vodniki v horizontalni razporeditvi

primeru, ko se signal razširja in vrača po zunanjem faznem vodniku. V faznem načinu 2 se signal razširja skozi zunanja fazna vodnika, vrača pa se skozi srednji fazni vodnik. Visokofrekvenčna karakteristika električnega voda (amplitudna in fazna karakteristika) se lahko izračuna po metodi odbojnih koeficientov v modalnih koordinatah [4]. Metoda je predstavljena v nadaljevanju, polna izpeljava izrazov za amplitudno in fazno karakteristiko za obravnavano priključno shemo pa je podana v [8]. Pri izpeljavi tovrstnih izrazov moramo upoštevati, da je to večvodniški sistem, zato so napetosti na vseh izhodnih sponkah v povezavi z napetostmi na vseh vhodnih sponkah.

V_1 in I_1 sta napetost in tok na oddajni strani, medtem ko sta V_2 in I_2 napetost in tok na sprejemni strani. Amplitudna in fazna karakteristika se določi iz

$$\alpha = 10 \log \left| \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} \right| [dB] \quad (6)$$

$$\beta = \text{Im} \left\{ \ln \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} \right\}. \quad (7)$$

Za homogeni električni vod velja, da sta napetosti V_1 in V_2 povezani z napetostno transformacijsko matriko T

$$V_2 = T V_1 \quad (8)$$

in v modalnih koordinatah

$$V_{2s} = T_s V_{1s}. \quad (9)$$

Matrika T_s je napetostna transformacijska matrika podana v modalnih koordinatah [4]

$$T_s = (I + K_{2s}) e^{-\gamma l} (I + K_{1s})^{-1}. \quad (10)$$

K_{1s} in K_{2s} predstavljata matrične modalne odbojne koeficiente na sprejemni in oddajni strani, $e^{-\gamma l}$ pa je diagonalna matrika, ki je za primer električnega voda s tremi vodniki dimenzije 3×3

$$e^{-\gamma l} = \begin{pmatrix} e^{-\gamma_1 l} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\gamma_2 l} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\gamma_3 l} \end{pmatrix}. \quad (11)$$

Red matrik K_{1s} in K_{2s} je določen na podlagi števila načinov priključitev, ki je enako številu vodnikov. Modalna odbojnost na sprejemni strani je dobljena iz odbojnosti K_2 zapisane v faznih koordinatah po enačbi

$$K_{2s} = \lambda^{-1} K_2 \lambda \quad (12)$$

Matrika K_2 je izračunana na podlagi linijske karakteristične impedance Z_c in admittance bremena, ki je podana kot $Y_L = (Z_L)^{-1}$.

$$\begin{aligned} K_2 &= (I + Y_L Z_c)^{-1} (I + Y_L Z_c) \\ &= (Z_c + Z_L)^{-1} (Z_c - Z_L) \end{aligned} \quad (13)$$

Matrika λ je normalizirana matrika S glede na prvo vrstico. Modalna odbojnost na koncu oddajne strani je določena s

$$K_{1s} = e^{-\gamma l} K_{2s} e^{-\gamma l}. \quad (14)$$

Vektor faznega toka na koncu prenosne poti je določen kot

$$I_1 = Y_{in} V_1, \quad (15)$$

kjer je Y_{in} vhodna admitančna matrika

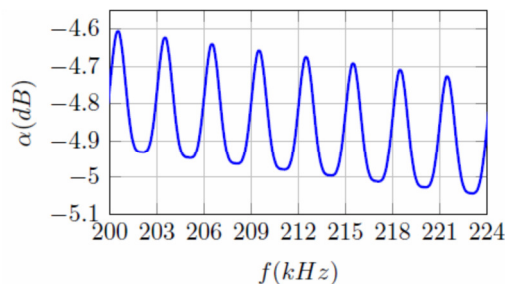
$$Y_{in} = Y_c (I - K_1) (I + K_1)^{-1}. \quad (16)$$

Tok na sprejemni strani je določen z admitančno matriko bremena Y_L

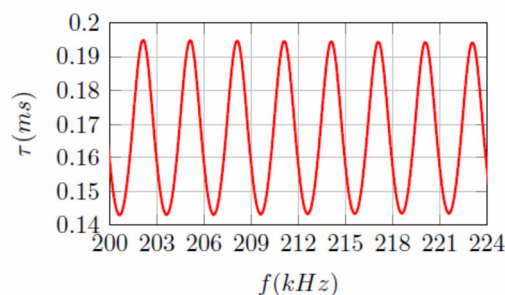
$$I_2 = Y_L V_2. \quad (17)$$

Ta koncept omogoča izračun frekvenčnega odziva VN PLC kanala za različne priključne sheme spojnih vezij na podlagi enačb (6) in (7). Metoda priključitve spojnega vezja med srednjim faznim vodnikom in zemljo ter zunanjim in srednjim faznim vodnikom je optimalna za 400 kV VN vode s faznimi vodniki v horizontalni razporeditvi [4]. Izračunana amplitudna karakteristika in skupinska zakasnitev v 24 kHz frekvenčnem pasu je prikazana na slikah 2 in 3.

Do odboja signalov pri VN električnih vodih prihaja zaradi neujemanja karakteristične impedance električnega voda in zaključne impedance. Kot



Slika 2: Amplitudna karakteristika 400 kV električnega voda s priključitvijo spojnega vezja med srednjim faznim vodnikom in zemljo



Slika 3: Skupinska zakasnitev 400 kV električnega voda s priključitvijo spojnega vezja med srednjim faznim vodnikom in zemljo

posledica odboja nastanejo oscilacije in skupinska zakasnitev v amplitudni karakteristiki. Periodo med sosednjima maksimuma in minimuma oscilacije določi

$$\Delta f_{\max - \min} = \frac{v}{4l}. \quad (18)$$

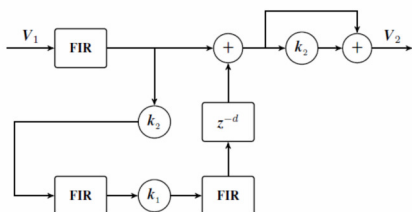
Ker je hitrost valovanja v približno enaka 300 000 km/s, je perioda oscilacij za vodnik dolžine $l = 50$ km enaka 1.5 kHz.

Odbiti valovi na električnem vodu se v časovnem prostoru izražajo kot odmevi. Zakasnitev odmevov je določena z dolžino voda in hitrostjo razširjanja signala po mediju. Za zakasnitev odmevov v frekvenčnem prostoru velja, da so v korelaciji s periodo oscilacije. Intenzivnost odmevov je definirana z odbojnostmi ter slabljenjem linije in je v frekvenčnem prostoru proporcionalna amplitudi osciliranja.

Fazni način 2 močno vpliva na jakost odbojev, saj je za ta modalni kanal značilno nizko slabljenje. Izmerjena energija med načini je razvidna iz matrike modalnih odbojnosti, ki jo določa enačba (12).

3 IMPLEMENTACIJA SITA FIR

V tem poglavju je opisan postopek implementacije VN PLC kanala s siti FIR. Frekvenčni odziv modela ustreza frekvenčni karakteristiki PLC-kanala, ki vključuje odboje. Oscilacije v amplitudni karakteristiki in skupinska zakasnitev so zajete v predlaganem modelu. Poudariti je treba, da so prisotna manjša odstopanja v primerjavi s polnim modelom. Preprosta izvedba modela je prikazana na sliki 4.



Slika 4: Preprosta implementacija modela s siti FIR

Model je sestavljen iz treh identičnih sit FIR, ki so namenjena uporabi simuliranega diskretnega frekvenčnega odziva VN PLC-kanala brez odbojev. Razširjanje odbitega vala (odmev) je realizirano z dodatno vzporedno vejo, ki vsebuje koeficiente k_1 in k_2 ter zakasnitev d . Ti koeficienti v modelu so odboji, katerih vrednost je določena na podlagi ujemanja frekvenčnega odziva preprostega modela s simuliranimi, karakteristikami, kolikor se le da natančno. Posledica takšnega pristopa je, da vrednosti k_1 in k_2 nista omejeni na območje $[-1,1]$. Zato smo izvedli pomembno poenostavitvev, da se skalarne konstante obnašajo kot odbojnosti namesto frekvenčno odvisnih matrik (pojasnjeno v poglavju 2). Število vzorcev d je izračunano iz vzorčne frekvence in zakasnitve širjenja signala.

Simuliran diskretni frekvenčni odziv VN-PLC-kanala na podlagi metode odbojnih koeficientov pomeni vhodni niz podatkov za implementacijo na podlagi sit FIR. Alternativno so lahko parametri preprostega modela FIR določeni iz izmerjene karakteristike visokonapetostnega kanala PLC [9]. Amplitudna

karakteristika sita FIR ustreza karakteristiki VN PLC-kanala brez vključevanja pojava odbojev. Ker ima sito FIR linearen potek faze, ne podaja faze kanala PLC. To je prva predpostavka, ki pomeni odstopanje implementiranega modela od natančnega računskega modela v skladu z metodologijo, ki je podana v drugem poglavju.

Frekvenčni odziv sistema, ki ga ilustrira slika 4, je enak

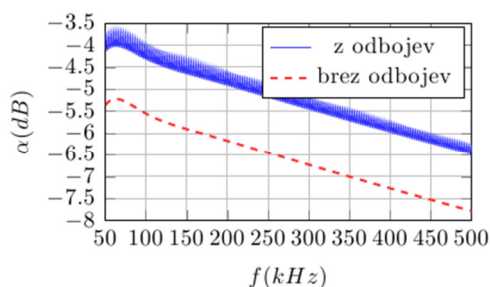
$$H(j\omega) = (1 + k_2) F(j\omega) + k_1 k_2 (1 + k_2) F^3(j\omega) e^{j\omega d} \quad (19)$$

kjer je $F(j\omega)$ frekvenčni odziv treh identičnih sit FIR.

Amplitudna karakteristika, ki je izražena v decibelih, se izračuna na podlagi prejšnje enačbe takole:

$$\begin{aligned} \alpha_{dB}(j\omega) &= |20 \log |1 + k_2| F(j\omega) + k_1 k_2 (1 + k_2) F^3(j\omega) e^{j\omega d}| \\ &= 20 \log |F(j\omega)| + 20 \log |1 + k_2| + \\ &\quad + 20 \log |1 + k_1 k_2 F^2(j\omega) e^{j\omega d}| \end{aligned} \quad (20)$$

Za razlago pomena členov v zgornjem izrazu bomo upoštevali simulirano amplitudno karakteristiko, ki jo prikazuje slika 5. Ta karakteristika ustreza 400 kV električnemu vodu, dolgemu 50 km, in s priključitvijo spojnega vezja med srednjim faznim vodnikom in zemljo. Na sliki 5 je amplitudna karakteristika PLC-kanala brez pojava odbojev označena z rdečo barvo.



Slika 5: Skupinska zakasnitev 400 kV električnega voda s priključitvijo spojnega vezja med srednjim faznim vodnikom in zemljo

Prvi člen v enačbi (20) določa to karakteristiko. Sito FIR v implementiranem modelu (slika 4) je načrtovano tako, da se ujema z amplitudno karakteristiko. Ker je frekvenčno območje VN PLC-komunikacij omejeno na 500 kHz, je izbrana vzorčna frekvenca sita FIR enaka 1 MHz.

Opazovani premik med karakteristikama z odboji in brez njih (slika 5) ustreza drugemu členu enačbe (20). Koeficient k_2 je izračunan tako, da usklajuje obe karakteristikami.

$$20 \log |1 + k_2| = 1.5 \Rightarrow k_2 = 10^{1.5/20} - 1 = 0.1885 \quad (21)$$

Zadnji člen enačbe (20), ki vsebuje koeficienta k_1 in k_2 , pomeni oscilacije v amplitudni karakteristiki med odbojem. Koeficient k_1 je izračunan tako, da so oscilacije v fazni karakteristiki ustrezne. Faza modela, ki je prikazan na sliki 4, je

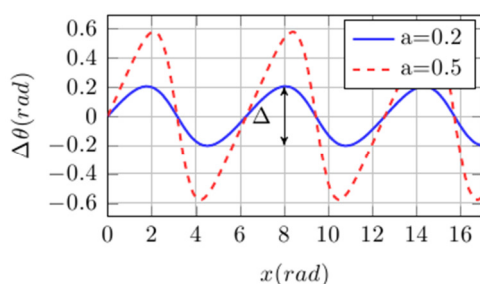
$$\arg\{H(j\omega)\} = \Theta(\omega) + \arctan\left(\frac{k_1 k_2 |F(j\omega)|^2 \sin(\Theta(\omega) + \omega d)}{1 + k_1 k_2 |F(j\omega)|^2 \cos(\Theta(\omega) + \omega d)}\right) \quad (22)$$

kjer je $\Theta(\omega) = \arg\{F(j\omega)\}$. Za poenostavitev določanja koeficienta k_2 uvedemo novi spremenljivki $a = k_1 k_2 |F(j\omega)|^2$ in $x = \Theta(\omega) + \omega d$ v izraz (22).

$$\arg\{H(j\omega)\} = \Theta(\omega) + \arctan\left(\frac{a \sin(x)}{1 + a \cos(x)}\right) \quad (23)$$

$$= \Theta(\omega) + \Delta\Theta(\omega)$$

Člen $\Delta\Theta(\omega)$ je periodična funkcija ω . Ko je intenzivnost osciliranja v simulirani fazni karakteristiki določena lahko določimo vrednost parametra a , ki ustreza amplitudi osciliranja (slika 6).



Slika 6: Oscilacije $\Delta\Theta(\omega)$

Za amplitudo oscilacije, ki je razvidna iz slike 6 in jo določa $\Delta = \max\{\Delta\Theta(\omega)\} - \min\{\Delta\Theta(\omega)\}$, velja, da se spreminja s parametrom a . Povezava med Δ in a glede na (23) je prikazana v tabeli 1 za nekatere značilne vrednosti parametra a .

Tabela 1: Povezava med parametrom a in amplitudo oscilacij v fazni karakteristiki

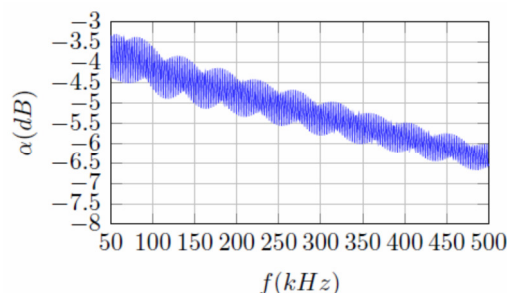
a	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
Δ	0.200	0.403	0.609	0.823	1.047	1.287

Amplituda oscilacij v fazni karakteristiki, ki ustreza amplitudni karakteristiki, prikazani na sliki 5, je približno enaka 0.2 rad. Glede na tabelo 1 smo izbrali $a = 0.1$. Ker sta koeficienta k_1 in k_2 konstantna in tako poenostavimo model in se $|F(j\omega)|$ spreminja v rangu 1.5 dB (slika 5), izberemo $|F(j\omega)| = 5\text{dB}$, kar znaša $|F(j\omega)|^2 = (0.5623)^2 = 0.3162$. Na podlagi tega se koeficient k_1 izračuna takole:

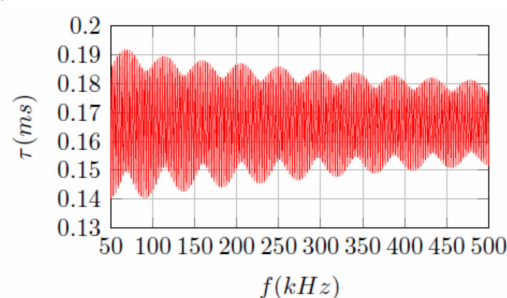
$$k_1 k_2 |F(j\omega)|^2 = 0.1 \Rightarrow k_1 k_2 = 0.3162 \Rightarrow k_1 = 1.81 \quad (24)$$

Amplitudna karakteristika preprostega sistema za izračunane koeficiente k_1 in k_2 ter sito FIR z dano amplitudno karakteristiko, ki je označena z rdečo barvo na sliki 5, je prikazana na sliki 7. Oscilacije so bolj

poudarjene v skupinski zakasnitvi kot v fazni karakteristiki. Skupinska zakasnitev obravnavanega sistema je podana na sliki 8.



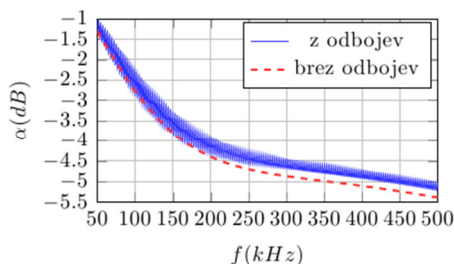
Slika 7: Amplitudna karakteristika implementiranega modela s priključitvijo spojnega vezja med srednjo napetostno fazo in zemljo



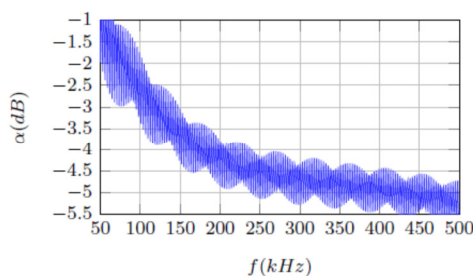
Slika 8: Skupinska zakasnitev implementiranega modela s priključitvijo spojnega vezja med srednjo napetostno fazo in zemljo

Ob primerjavi obeh amplitudnih karakteristik, ki sta nazorno predstavljene na slikah 5 in 7, opazimo intenzivne oscilacije v amplitudni karakteristiki preprostega modela, kar je posledica določitve koeficientov k_1 in k_2 , ki sta izračunana za ujemanje amplitude oscilacij v simulirani fazni karakteristiki. Določanje koeficientov tako, da dosežemo oscilacije v simulirani amplitudni karakteristiki, bi pripeljalo do veliko manjše amplitude osciliranja v fazni karakteristiki preprostega modela.

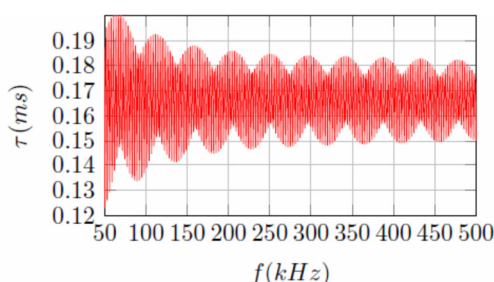
Postopek, ki je predstavljen v članku, vodi do modela, katerega lastnosti bistveno ne odstopajo od računskega modela, temelječega na odbojnostih. Po drugi strani tako preprost model zagotavlja ustrezno fazno nelinearnost z bolj intenzivno nelinearnostjo v amplitudni karakteristiki. To je sprejemljivo pri uporabi modela za testiranje VN PLC modemov. Metodologija, ki je predstavljena v članku, se prav tako uporablja pri priključitvi spojnega vezja med zunanjo napetostno fazo in srednjo napetostno fazo na 400 kV električnih vodih. Simulirana amplitudna karakteristika za ta primer je prikazana na sliki 9. Sliki 10 in 11 prikazujeta za zgoraj predstavljen primer amplitudno karakteristiko in skupinsko zakasnitev preprostega modela. Prednosti predlaganega modela sta enostavnost in možnost takojšnje implementacije v tehnologiji FPGA. Frekvenčne karakteristike preprostega modela se



Slika 9: Simulirana karakteristika visokonapetostnega PLC-kanala s priključitvijo spojnega vezja med zunanjo in srednjo napetostno fazo



Slika 10: Amplitudna karakteristika implementiranega modela s priključitvijo spojnega vezja med zunanjo in srednjo napetostno fazo



Slika 11: Skupinska zakasnitev implementacijskega modela s priključitvijo spojnega vezja med zunanjo in srednjo napetostno fazo

razlikujejo od simuliranih karakteristik, kjer so bolj poudarjene oscilacije amplitudnih karakteristik. Model vključuje pojav odbojev na VN električnih vodih, ki je kritični faktor skupaj s šumom korone pri določanju zmogljivosti VN PLC-modema.

4 SKLEP

V članku je predstavljen preprost model VN PLC-kanala, ki deluje na podlagi sit FIR. Parametri predlaganega modela so določeni z uporabo simulirane diskretne frekvenčne karakteristike visokonapetostnega PLC-kanala. Ti parametri se lahko tudi izračunajo z uporabo izmerjene frekvenčne karakteristike. Preprosti model vključuje refleksijo, ki je kritični faktor pri določanju zmogljivosti visokonapetostnega PLC modema skupaj s šumom korone. Generiranje šuma korone v članku ni obravnavano.

Prednosti predstavljenega modela sta enostavnost in možnost takojšnje implementacije v tehnologiji FPGA.

Relativna slabost so bolj poudarjene oscilacije v amplitudni karakteristiki preprostega modela kot v simulirani amplitudni karakteristiki.

ZAHVALA

Raziskave je omogočilo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo Republike Slovenije v okviru programa P2-0246 – Algoritmi in optimizacijski postopki v telekomunikacijah.

LITERATURA

- [1] S. Galli, S. Scaglione and Z. Wang, "For The Smart Grid and Through the Grid: The Role of Power Line Communications in the Smart Grid", Proceedings of the IEEE, Vol. 99, No. 6, pp. 998 – 1027, junij 2011.
- [2] International Electrotechnical Commission, IEC report 663, Planning of (single-sideband) power line carrier, Geneve, 1980.
- [3] N. Suljanović, A. Mujčić, M. Zajc, J.F. Tasič, "High-frequency characteristic of high-voltage power line", Proceedings of EUROCON 2003, The IEEE Region 8, Vol. 2, pp. 310 – 314, 2003.
- [4] G.V. Mikutski, V.S. Skitalcev, "High-frequency links over power lines", Energoatomizdat, Moskva, 1987.
- [5] A. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc, J.F. Tasič, "Corona noise on a 400 kV overhead power line", Electrical engineering, Vol. 86, pp. 61 – 67, januar, 2004.
- [6] J.R. Carson, "Wave propagation in overhead wires with ground return", Bell Syst. Tech. J., Vol. 5, pp. 539 – 554, 1926.
- [7] L.M. Wedepohl, "Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems", Proceedings of IEEE, Vol. 110, No. 12, pp. 2200 – 2212, december, 1963.
- [8] N. Suljanović, A. Mujčić, Z. Sehić, M. Zajc, J.F. Tasič, "Computation of transfer function for multiconductor power lines", Proceedings of the 15th International Electrotechnical and Computer Science Conference ERK 2006, Portorož, Slovenija, Vol. A, pp. 211 – 214, 2006.
- [9] M. Zajc, N. Suljanović, A. Mujčić, J.F. Tasič, "Frequency Characteristics Measurement of Overhead High-Voltage Power-Line in Low Radio-Frequency Range", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 4, pp. 2142 – 2149, 2007.

Asmir Gogić je asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Tuzli. Raziskovalno se ukvarja z modeliranjem in simulacijami komunikacijskih omrežij, kanalov in protokolov.

Nermin Suljanović je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Tuzli. Raziskovalno se ukvarja z digitalnimi komunikacijami in modeliranjem komunikacijskih kanalov.

Aljo Mujčić je izredni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Tuzli. Raziskovalno se ukvarja s PLC komunikacijami, optičnimi komunikacijami in tehnikami kodiranja.

Mitja Kolenc je raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja z inteligentnimi električnimi omrežji in digitalno obdelavo signalov.

Jurij F. Tasič je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno se ukvarja s področjem digitalne obdelave signalov in adaptivnimi sistemi.

Matej Zajc je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Raziskovalno je aktiven na področju digitalnih komunikacijskih sistemov in digitalne obdelave signalov.