Elektrotehniški vestnik 72(5): 237-242, 2005
Electrotechnical Review, Ljubljana, Slovenija

Omejitve visokonapetostnih vodov za zanesljive digitalne komunikacije

Matej Zajc[1], Nermin Suljanović[2], Aljo Mujčić[2], Jurij F. Tasič[1]

[1] Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana
[2] Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, Franjevačka 2, 75000 Tuzla
E-pošta: zajcm@fe.uni-lj.si

Povzetek. Članek predstavi tehnične omejitve visokonapetostnih vodov za hitre digitalne komunikacije PLC. Odboj signala in karakteristike šuma predstavljajo poglavitne omejitve za zanesljive digitalne sisteme PLC. Podane so visokofrekvenčne karakteristike voda, ki so rezultat računalniškega modela in meritev na visokonapetostnem vodu. Podani so tudi rezultati simulacij kodirnega postopka BITCM za kanala AWGN in PLC.

Ključne besede: PLC, digitalne komunikacije, kodirni postopki, visokonapetostni vod, šum korone, odboj signala

Limitations of high-voltage power lines for reliable digital communications

Extended abstract. The paper deals with technical constraints of high-voltage power lines for high-speed digital PLC communications. Signal reflection and noise characteristics are recognized as major limitations for reliable digital PLC systems. High-frequency characteristics of the power line are presented based on results from a computer model and measurements. Simulation results for BITCM coding are analysed for AWGN and PLC channels.

Keywords: PLC, digital communications, coding, power line, corona noise, signal reflection

1 Uvod

Članek obravnava visokonapetostne (VN) vode s stališča ozkopasovnih in širokopasovnih komunikacij. Ideja izrabe visokonapetostnih vodov kot komunikacijskega kanala je prisotna že od začetka razvoja elektroenergetskih sistemov. VN vodi so zanimiv komunikacijski medij, ki pa je v primerjavi z drugimi žičnimi in brezžičnimi komunikacijskimi mediji relativno nepoznan. V članku so predstavljene tehnične omejitve VN vodov, ki so ključne za zanesljive ozkopasovne in širokopasovne komunikacije.

PLC (*Power Line Carrier*) je komunikacijski sistem, ki za komunikacijski kanal izrablja napetostne vode. Poglavitna prednost, ki jo prinašajo komunikacije PLC v primerjavi z drugimi žičnimi komunikacijami, je, da je prenosna pot na voljo. Tako so stroški glede na druge žične medije vezani predvsem na terminalsko opremo.

Razmah optičnih vodov v nekaterih elektroenergetskih sistemih je povzročil zmanjšan interes za komunikacije PLC po VN vodih. Kljub temu v svetovnem merilu komunikacije PLC po VN vodih pridobivajo veljavo, saj so učinkovita in cenovno ugodna rešitev.

Komunikacije PLC po VN vodih so bile v preteklosti zasnovane na analognih komunikacijskih sistemih, ki se pretežno uporabljajo še danes. Razvoj digitalnih komunikacij predstavlja nov izziv tudi za izdelovalce opreme PLC.

Analogni sistemi PLC (aPLC) se uporabljajo za govorne komunikacije, zaščito elektroenergetskega sistema in prenos podatkov. Osnovna aplikacija aPLC sistemov je govorna povezava med oddaljeno postajo in kontrolnim centrom. Za sisteme SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) in komunikacije z RTUs (Remote Terminal Units) so aPLC sistemi učinkovita rešitev. Sistemi aPLC se zaradi svoje zanesljivosti uporabljajo v sistemih zaščite visokonapetostnih vodov.

Trenutni VN sistemi PLC temeljijo na kombinaciji modema aPLC in modema dPLC združenima v enem sistemu. Tovrstna rešitev pomeni večjo stopnjo fleksibilnosti za uporabnika, hkrati pa rešuje nezadostno zanesljivost sistemov dPLC za popolno zamenjavo sistemov aPLC.

V okviru kombiniranih rešitev se dPLC uporablja za prenos govora in podatkov. Zaradi svoje zanesljivosti, robustnosti in relativno nizke cene pa aPLC ostaja v sistemih zaščite. Poglavitna pomanjkljivost sistemov

Prejet 24. junij, 2005
Odobren 25. oktober, 2005

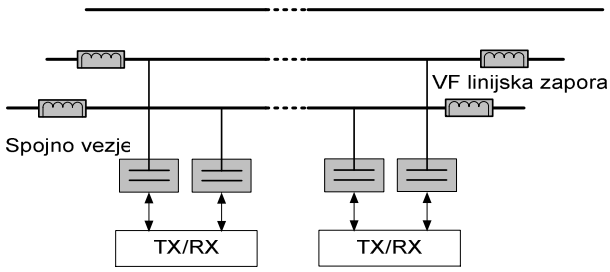
aPLC je nizka prepustnost, ki omejuje razvoj novih storitev. Po drugi strani pa je zanesljiv širokopasovni sistem dPLC zanimiva rešitev, ki bi omogočala razvoj novih aplikacij. Trenutno so zahteve po prepustnosti veliko večje, kot to omogočajo sistemi dPLC s hitrostjo prenosa do 100 kbit/s.

Šum in odboj signala sta poglavitni oviri za nadaljnji razvoj digitalnih komunikacij PLC in zamenjavo sistemov aPLC z digitalnimi. Razvoj popolno digitalnega sistema PLC trenutno omejujejo karakteristike VN voda, katerega primarni namen je prenos električne energije.

1.1 Rezultati meritev in računalniški model VN voda

VN vod s tremi faznimi vodniki v horizontalnem razporedu in dvema zaščitnima vrvema je običajen v evropskih energetskih sistemih. V članku so predstavljeni rezultati raziskav na takšnem vodu in zajemajo meritve na 400 kV VN vodu dolžine 52 km ter računalniški model, kjer so upoštevani parametri realnega voda [1]. Na podlagi meritev in teoretičnih raziskav je narejen diskretni model kanala PLC prilagojen študiji uporabe različnih komunikacijskih tehnik. V članku so podani rezultati kodirnih postopkov TCM in BITCM. Podana je tudi primerjava kanala AWGN in PLC.

2 Zgradba sistema PLC



Slika 1: Sistem PLC: priključna shema: zunanja - srednja faza

Figure 1: PLC system: coupling: middle phase – outer phase

V primerjavi z drugimi komunikacijskimi sistemi pri sistemih PLC poleg komunikacijske opreme potrebujemo tudi spojno vezje (Coupling Unit), ki ščiti komunikacijsko opremo pred visoko napetostjo ter hkrati prilagodi impedanco priključnega kabla in VN voda.

Posebnost komunikacij PLC je tudi linijska zapora (Line Trap Unit – LTU), katere naloga je blokiranje širjenja visokofrekvečnega signala v nezaželeno smer, to je v nasprotno smer od sprejemnika. S pomočjo linijskih zapor omejimo komunikacijo med dvema točkama.

2.1 Priključne sheme

VN vod je večvodniški sistem, ki ga sestavljajo trije ali več faznih vodnikov in zaščitni vodniki. Za komunikacije PLC se zaradi zanesljivosti običajno uporabljajo fazni vodniki. Ker je vodnikov več, obstajajo različni načini priključitve sistemov PLC na VN vod. Način priključitve je določen z različnimi priključnimi shemami, ki imajo specifične prenosne karakteristike [2-3].

Za VN vode s horizontalnimi faznimi vodniki sta optimalni dve priključitvi s stališča najmanjšega slabljenja in številom potrebnih spojnih vezij [2]:

- srednja faza-zemlja in
- zunanja faza-srednja faza.

3 VN komunikacijski kanal PLC

Razvoj sistemov dPLC zahteva natančno poznavanje visokofrekvenčnih karakteristik VN vodov. Model komunikacijskega kanala VN voda je ključnega pomena za nadaljnji razvoj sistemov dPLC. V preteklosti razviti modeli VN komunikacijskega kanala temeljijo na modalni analizi [2-4]. Izpeljave teh modelov temeljijo na nekaterih poenostavitvah, ki niso ključne za analogne komunikacije. Popoln model VN komunikacijskega kanala, ki je primeren za digitalne komunikacije, mora vključevati frekvenčne karakteristike kot tudi karakteristike šuma, ki skupaj pomenijo omejitve za hitre in zanesljive digitalne komunikacije.

Kanal PLC sestavlja prenosna pot med oddajnikom in spojnim vezjem na oddajni strani, VN vodom, spojnim vezjem in sprejemnikom na sprejemni strani (Slika 1) [5]. Tako prenosno karakteristiko kanala PLC sestavljajo prenosne karakteristike: VN voda, spojne opreme, visokofrekvenčne zapore in priključnih kablov.

3.1 Frekvenčno načrtovanje

Na VN vodih je komunikacijam PLC namenjen frekvenčni pas med 30 kHz in 550 kHz [6, 7]. Frekvenčni pas je razdeljen v 4 kHz pasove, ki v pri komunikacijah aPLC predstavljajo posamezen kanal. Zaradi kompatibilnosti z sistemi aPLC se ista delitev frekvenčnega pasu uporablja tudi pri komunikacijah dPLC, kjer je pasovna širina kanala tako mnogokratnik 4 kHz.

Frekvenčno načrtovanje zahteva posebno pozornost zaradi interference med kanali, interference z drugimi napravami PLC na istem VN vodu in interference z radijskimi komunikacijami in navigacijskimi sistemi.

3.2 Prenosna karakteristika VN voda

Pri analitičnem modeliranju prenosne karakteristike VN voda privzamemo določene poenostavitve. V okviru modalne analize predpostavimo, da so vodniki neskončno dolgi in vzporedni z zemljo. Prenos signala po VN vodu obravnavamo kot prenos signalov skozi

modalne kanale brez medsebojne interakcije med kanali. Takšen pristop poenostavi analizo komunikacijskega sistema, vendar ne upošteva nehomogenosti voda [2-4].

Na primer končna dolžina voda in zaključitve voda z impedanco različno od impedance voda zahteva upoštevanje vpliva odbitih valov na koncu voda, ki povzročijo oscilacije v frekvenčnih karakteristikah. Upoštevati moramo tudi končno prevodnost zemlje.

Nehomogenosti VN voda delimo v tri skupine:

- transpozicija faznih vodnikov,
- poves faznih vodnikov,
- vzporedne impedance in kratki stiki na VN vodu.

Vloga transpozicije ali prepletanja faznih vodnikov je, da je VN vod simetričen za prenos električne energije. Za višje frekvence pomeni prepletanje faznih vodnikov nehomogenost, ki povzroči odboj na vodu in dodatno slabljenje, ki je največje v tedaj, ko je prepletanje faznih vodnikov izvedeno na sredini voda.

Poves faznih vodnikov je temperaturno odvisen in zmanjšuje višino vodnika nad zemljo in s tem posledično povečuje slabljenje.

Ozemljene stebre daljnovoda ter možni kratki stiki med faznimi vodniki in zemljo predstavimo z vzporednimi impedancami. Vzporedne impedance so spojene med vodniki VN voda in zemljo ter povečujejo slabljenje.

Ker se komunikacije PLC uporabljajo za prenos signalov zaščite VN voda, so visokofrekvenčne karakteristike VN voda v okvari zelo pomembne. Kratki stiki faznih vodnikov močno popačijo amplitudno karakteristiko in skupinsko zakasnitev VN voda, saj na mestu kratkega stika nastanejo odboji signala.

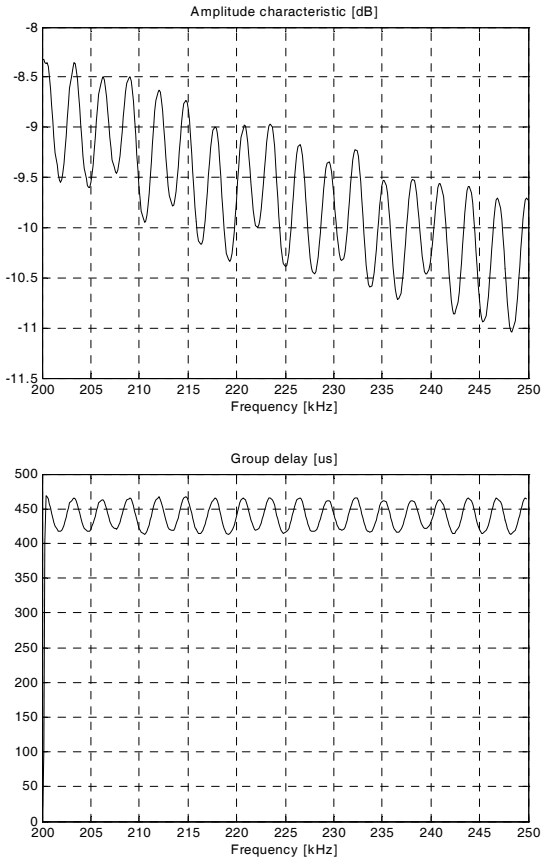
3.2.1 Vpliv odboja signala

Posebno obravnavo v okviru digitalnih komunikacij po VN vodih zahteva odboj signala. Pri komunikacijah aPLC odboj nima izrazitega vpliva na govorne komunikacije in prenos podatkov z nizkimi hitrostmi.

Odboj signala nastane na mestu spremembe impedance, kot na primer pri zaključitvi voda in nehomogenostih na vodu. Posledica odboja je valovitost visokofrekvenčne karakteristike VN voda, ki zmanjšuje zanesljivost digitalnih komunikacij.

Oscilacije (Slika 2) so rezultat odbojev na VN vodu, ki ni zaključen s karakteristično impedanco [2, 3]. Perioda oscilacij je določena z dolžino voda in hitrostjo signala. Valovitost amplitudne karakteristike glede na srednjo vrednost je znotraj intervala ± 1dB. Valovitost skupinske zakasnitve glede na srednjo vrednosti je znotraj intervala ± 25 μs [1, 8].

Zmanjšanje odboja dosežemo s prilagajanjem impedance spojnega vezja z vhodno impedanco VN voda ter uporabo izenačevalnikov. Idealno prilagajanje vhodne impedance spojnega vezja z VN vodom zahteva bolj kompleksno rešitev spojnega vezja, kot se uporablja v praksi, zato so prisotni odboji. Še več, na vhodno impedanco VN voda vplivajo tudi vremenske razmere, ki dodatno povečujejo odboje.



Slika 2: Frekvenčna karakteristika VN voda. Rezultati meritev na 400 kV VN vodu, dolžina 52 km, trije horizontalni fazni vodniki, priključna shema: zunanja – srednja faza. a) amplitudna karakteristika, b) skupinska zakasnitev

Figure 2: Frequency characteristics of a HV power line. Measurement results for a 400 kV power line, length 52 km, three phase conductors in a horizontal disposition, coupling: middle to outer phase. a) amplitude characteristics, b) group delay

Povzamemo lahko, da VN vod prinaša relativno majhno slabljenje. Skupinska zakasnitev voda je konstantna v izbranem frekvenčnem pasu, valovitost karakteristik pa je rezultat odboja signala na VN vodu.

3.2.2 Vpliv vremenskih razmer

Vpliv vremenskih razmer na VF karakteristike VN voda ni zanemarljiv. Močan dež poveča lahko pa tudi zmanjša slabljenje VN komunikacijskega kanala [5-7]. Pomembnejši vremenski vpliv predstavlja žled na faznih vodnikih, ki povečuje slabljenje in zmanjšuje hitrost širjenja signalov. Dodatno slabljenje zaradi ledu in mraza povzročajo povečane izgube v dielektriku v

okolici faznega vodnika. Odvisno od frekvence led lahko poveča ali zmanjša slabljenje. Povečani polmer vodnika lahko zmanjša slabljenje pri nižjih frekvencah. Pri višjih frekvencah imajo izgube v dielektriku večji vpliv in slabljenje narašča. Pomembno je poudariti, da spremembe temperature spreminjajo dolžino vodnikov in s tem njihovo ekvivalentno višino nad zemljo.

3.3 Karakteristike šuma

Ključna omejitev za hitre in zanesljive komunikacije PLC so šumne karakteristike VN voda.Izvore šuma na VN vodu lahko razdelimo v dve skupini glede na izvor šuma [1-3, 8]:

1. VN vod kot izvor šuma: šum ozadja kot posledica termičnega šuma; šum korone in razelektritve na izolatorjih kot posledica visoke napetosti; impulzni šum kot posledica vklopov in izklopov VN voda; šum zaradi napake na VN vodu.
2. Interference z zunanjimi viri: interferenca z drugi sistemi PLC; elektromagnetno valovanje drugih TK naprav (npr. radijske postaje); atmosferske razelektritve.

V normalnem obratovanju VN voda šum sestavlja šum korone, šum ozadja, šum atmosferskih razelektritev in interference z drugimi elektronskimi napravami. V izrednem obratovanju šum na VN vodu sestavljajo vklopi in izklopi voda, kratki stiki na vodu in atmosferske razelektritve.

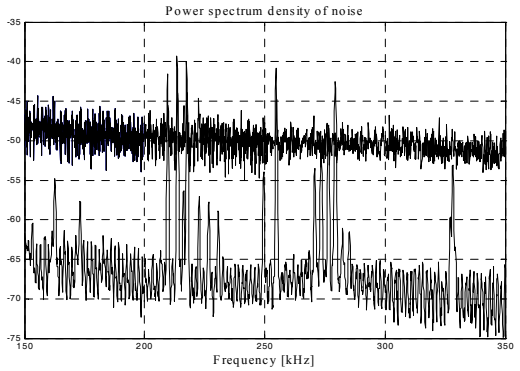
Šum korone je eden ključnih dejavnikov pri VN komunikacijah PLC. Šum korone povzroča visoka napetost na vodu, zato časovne spremembe šuma korone sledijo periodi industrijske frekvence. Pojav korone je posledica ionizacije zraka v okolici VN vodnika. Razelektritve so naključno razporejene vzdolž voda in nastopijo, ko je napetost na posameznem vodniku večja od prebojne napetosti zraka. Razelektritev zaradi korone inducira tokove v vse vodnike, ki potujejo po vodu do sprejemnika. Nivo šuma na koncu voda je pogojen s slabljenjem linije in uporabljenega načina priključitve, hkrati pa je tudi zelo odvisen od vremena.

Šum ozadja je posledica elektromagnetnega onesnaženja. To je šum zaradi elektromagnetne interference, ki ga opišemo kot beli Gaussov šum. Šum, ki je rezultat interference radijskih postaj in drugih VF aparatur na vodih, pa je definiran kot ozkopasoven šum.

Impulzni šum v VN komunikacijskemu kanalu je posledica vklopov in izklopov VN voda, kratkih stikov z lokom na VN vodu in z atmosferskimi razelektritvami. Takšen šum sestavljajo impulzi, katerih amplituda in čas med dvema impulzoma sta naključni veličini. Ti dogodki imajo relativno nizko verjetnost pojavljanja, vendar močno vplivajo na sinhronizacijo komunikacijskih naprav.

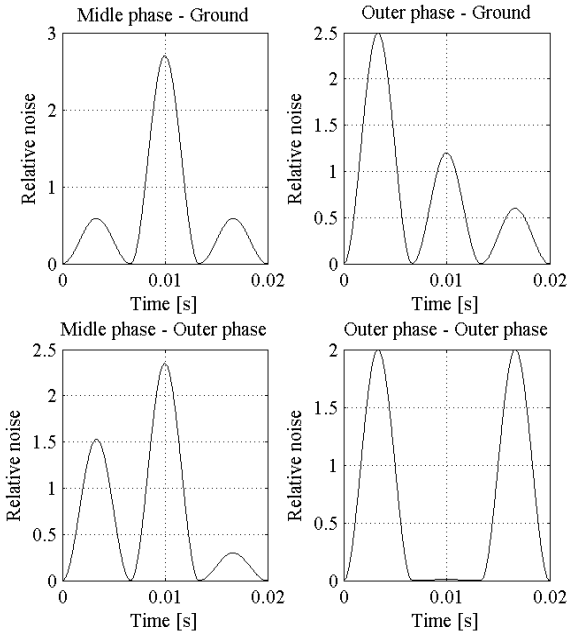
3.3.1 Šum korone

V analognih komunikacijah je šum korone obravnavan kot beli Gaussov šum, kar je sprejemljivo zaradi ozkega frekvenčnega pasu in karakteristik komunikacij aPLC. Pri komunikacijah dPLC moramo šum korone obravnavati kot beli Gaussov šum s spremenljivo srednjo kvadratno vrednostjo, ki je močno pogojena z vremenom [8]. Pri lepem vremenu lahko šum korone obravnavamo kot beli Gaussov šum s konstantno srednje kvadratno vrednostjo. V slabem vremenu je šum korone glavni vir šuma v normalnem obratovanju VN voda.



Slika 3: Spektralna gostota moči šuma na 400kV VN vodu: zgoraj šum v slabem vremenu, spodaj šum v lepem vremenu

Figure 3: PSD of noise on a 400 kV HV power line: foul weather conditions (above), fair weather conditions (below)



Slika 4: Relativni šum korone za različne priključitve

Figure 4: Relative corona noise for different couplings

V frekvenčnem prostoru je šum korone podan s spektralno gostoto moči (PSD), ki je pri slabem vremenu za 18 dB nad nivojem šuma pri lepem vremenu (Slika 3).

V časovnem prostoru šum korone opišemo kot Gaussov šum s spremenljivo srednje kvadratno vrednostjo (RMS) (Slika 4) [3, 8]. Šum je definiran z razmerjem trenutne vrednosti efektivne vrednosti napetosti in povprečno vrednostjo efektivne vrednosti napetosti šuma. Šum se časovno spreminja znotraj periode industrijske frekvence za 7.95 dB [1, 8].

Razelektritve na VN vodu so najpogostejše v trenutku pozitivnega maksimuma napetosti posamezne faze. V periodi industrijske napetosti imamo tako tri pozitivne maksimume, ki povzročijo tri izbruhe impulznih motenj, katerih velikost je odvisna od tipa VN voda, načina priključitve spojne opreme in vremenskih pogojev (Slika 4).

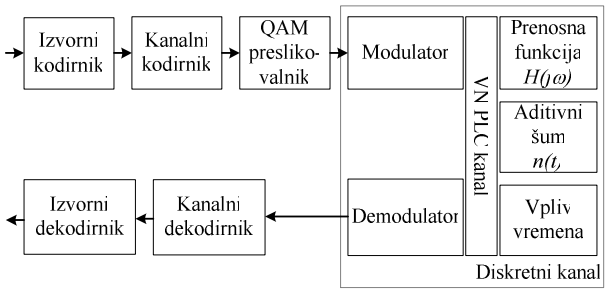
4 Komunikacijski sistem PLC

Zanesljiv prenos digitalnih informacij po VN vodih v največji meri omejujta dva pojava:

- odboj signala na VN vodu in
- šumne razmere.

Odboj signala na VN vodu lahko zmanjšamo z uporabo izenačevalnikov prenosne poti. Šumne razmere na vodu so zelo vremensko pogojene. Zmanjšanje vpliva šuma na digitalni prenos informacij dosežemo z uporabo primernih kanalnih kodirnikov. V tem članku se bomo omejili na postopke odprave vpliva šuma na digitalne komunikacije (Slika 5).

V simulacijah je uporabljen diskretni model PLC kanala [1, 8], katerega vhod so vzorci konstalacijskega diagrama, izhod pa isti vzorci z dodanim šumom. V tem primeru predstavlja en vzorec en simbol. Modulator in demodulator sta zaradi poenostavitve del diskretnega kanala [9].



Slika 5: Model PLC komunikacijskega sistema

Figure 5: Model of a PLC communication system

Izračun kodnega dobitka sistema, ki vsebuje zaščitno kodiranje, zahteva poznavanje verjetnosti napake nekodiranega sistema kot začetnega razmerja moči signala in šuma za doseganje določene verjetnosti napake. Ocena nekodiranih digitalnih komunikacijskih sistemov v zvezah PLC s fazno in amplitudno-fazno modulacijo so narejene s pomočjo verjetnosti napak simbolov in verjetnosti napak bitov v funkciji razmerja moči signala in šuma na sprejemnem delu komunikacijskega sistema [9].

Impulzni karakter šuma na VN vodu ne dovoljuje klasičnega pristopa, pri katerem VN vod modeliramo z AWGN (Average White Gaussian Noise) kanalom. Osnovna razlika med kanaloma AWGN in PLC je časovna in periodična spremenljivost moči šuma v kanalu PLC, pri čemer je povprečna moč v obeh kanalih enaka. V nasprotju z kanalom AWGN je v kanalu PLC moč šuma koncentrirana v ozkih področjih [8].

Za izbrano verjetnost napak pri nekodiranem sistemu PLC je zahtevano večje razmerje signal šum, kot pri kanalu AWGN pri enaki povprečni moči šuma. Pri izbranem BER 10^{-6} mora biti SNR v kanalu PLC 6 dB nad zahtevanim SNR za kanal AWGN [11].

Izhodna moč signala za prenos podatkov je omejena, zato zmanjšanje verjetnosti napake ni dovoljeno s povečanjem moči signala. Edina možnost za zmanjšanje verjetnosti napak v VN PLC komunikacijskem sistemu je uporaba kanalnih kodirnikov, kjer je odkrivanje in odpravljanje napak doseženo z dodajanjem redundance v niz simbolov ali bitov, ki se prenašajo. Cilj kanalnega kodiranja je zmanjšanje verjetnosti napak ob trenutnem razmerju signal-šum v razpoložljivi pasovni širini kanala. Pri tem povečanje simbolne hitrosti ne sme vplivati na povečanje pasovne širine kanala temveč le na število nivojev signala.

4.1 TCM

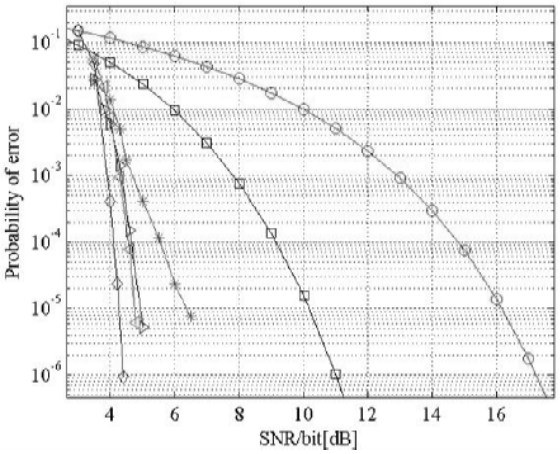
CIGRE [6] priporoča uporabo TCM (Trellis Coded Modulation) pri razvoju digitalnih modemov PLC. Obstoječi modemi različnih izdelovalcev imajo kodiranje zasnovano na TCM. TCM prinaša kodirne dobitke v primeru kanala AWGN v intervalu od 3 do 6 dB pri enaki hitrosti prenosa in isti pasovni širini [10-11]. Osnovni problem za uporabo TCM v komunikacijah PLC so izbruhi napak na zaporednem nizu simbolov. Rešitev predstavlja uporaba pravilno izbranega prepletalnika simbolov.

4.2 BITCM

BITCM (Bit Interleaved Turbo Coded Modulation), ki prav tako ohranja konstantno pasovno širino kanala, je zasnovan na serijski povezavi turbokodirnika za binarno kodo, bitnega prepletalnika in modulatorja s povečanim številom točk v konstalacijskem diagramu v primerjavi z nekodiranim sistemom.

Shema BITCM kanalnega kodiranja pri digitalnem prenosu signalov v kanalu PLC ima večjo učinkovitost kot pri TCM. Enostavnost uporabe za različna kodna razmerja in število točk v konstalacijskem diagramu daje ta dodatne prednosti pristopu BITCM. Slika 6 podaja primerjavo nekodiranega sistema 4 QAM s kodiranim sistemom 16 QAM, za različne turbo-

kodirnike v primeru kanalov AWGN in PLC. Različna konstalacijska diagrama sta potrebna za ohranitev enake pasovne širine za nekodirani in kodirani primer. Razlika med kanaloma AWGN in PLC se zmanjša iz 6 dB v primeru nekodiranega pristopa na 2 dB v primeru z kodiranjem BITCM.



Slika 6: Primerjava verjetnosti napake nekodiranega sistema (4 QAM) in sistema BITCM (16 QAM, 1280 bitni prepletalnik, hitrost prenosa 128 kbit/s). o: nekodirani sistem, PLC, 4 QAM; □ nekodirani sistem, AWGN, 4 QAM; ◊ sistem BITCM, AWGN; * sistem BITCM, PLC, polinom (7, 5); > sistem BITCM, PLC, polinom (15, 13); < sistem BITCM, PLC, polinom (23, 35)

Figure 6: Error probability for an uncoded system (4 QAM) and BITCM system (16 QAM, 1280 bit interleaver, bit rate 128 kbit/s). o: uncoded system, PLC, 4 QAM; □ uncoded system, AWGN, 4 QAM; ◊ BITCM system, AWGN; * BITCM system, PLC, polynomial (7, 5); > BITCM system, PLC, polynomial (15, 13); < BITCM system, PLC, polynomial (23, 35)

5 Sklep

Razumevanje visokofrekvenčnih karakteristik in karakteristik šuma VN kanala PLC je ključni dejavnik pri razvoju hitrih in zanesljivih digitalnih komunikacijskih sistemov PLC. Odboj in šum sta poglavitna omejujoča dejavnika za razvoj hitrih in zanesljivih digitalnih sistemov PLC.

Časovna spremenljivost karakteristik kanala PLC zahteva uporabo prilagodljivih sistemov. Kodirni postopki zasnovani na turbokodiranju so zanimiva rešitev za novo generacijo sistemov dPLC. Sistem BITCM je primeren zaradi možnosti preproste spremembe sheme kodiranja in dekodiranja.

Rezultati raziskav so potrdili možnosti razvoja VN komunikacijskih sistemov PLC z večjo hitrostjo prenosa, kot to omogočajo dosegljivi sistemi PLC na svetovnem trgu.

6 Zahvala

Raziskave je sofinanciralo Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo v okviru programa P2-0246. Avtorji se zahvaljujejo podjetjem Iskra Sistemi, ELES in Fotona.

7 Literatura

[1] A. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc, J. F. Tasič, "Corona noise on a 400 kV overhead power line: measurements and computer modeling", *Electrical engineering,* letn.86, št. 2, str. 61-67, 2004.

[2] G. V. Mikutski, *High-frequency channels for power system protection and automation*, Energy, Moscow, 1976. *v Ruščini*

[3] Y. P. Shkarin, *High-frequency channels via overhead power lines*, Moscow: Appendix to Energetik, 2001. *v Ruščini*

[4] L. M. Wedepohl, "Application of matrix methods to the solution of traveling-wave phenomena in polyphase systems", *PROC. IEE*, letn. 110, št. 12, str. 2200-2212, 1963.

[5] An American National Standard, *IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications*, IEEE, New York, 1980.

[6] CIGRÉ STUDY COMMITTEE 35, WORKING GROUP 09, *Report on digital power line carrier*, 2000.

[7] IEC REPORT, *Planning of (single-sideband) power line carrier systems*, Geneva, 1980.

[8] N. Suljanović, A. Mujčić, M. Zajc, J. Tasič, "Computation of high-frequency and time characteristics of corona noise on HV power line", *IEEE Transactions on Power Delivery*, letn. 20, št. 1, str.71-79, 2005.

[9] A. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc and J. F. Tasič, "Error probability of MQAM signals in PLC channel", *Zbornik ERK 2003,* str. 71-74.

[10] R. Sušnik, S. Tomažič, "Kodirni postopki na podlagi mrež", *Elektroteh. vestn.*, letn. 70, št. 1-2, str. 59-65, 2003.

[11] S.Haykin, *Advanced Communication Syst*ems, Wiley, 2001.

Matej Zajc je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani.

Nermin Suljanović je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Tuzli.

Aljo Mujčić je docent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Tuzli.

Jurij F. Tasič je redni profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in predstojnik Laboratorija za digitalno obdelavo signalov, slik in videa.