

**D2 I 04**

**REALNE TEHNIČKE MOGUĆNOSTI DIGITALNIH VF VEZA PO  
VODOVIMA VISOKOG NAPONA**

J. GAJICA\*, V. ČELEBIĆ, V. SEKULIĆ

Institut "MIHAJLO PUPIN" Beograd

SRBIJA

**Kratak sadržaj:**

U ovom radu biće razmatrane realne tehničke mogućnosti digitalnih VF veza po vodovima visokig napona (VVN) koje su bitne sa stanovišta primene VF veza u mreži veza elektroprivrede. Na osnovu obrade podataka o binarnim protocima koje u tehničkoj dokumentaciji navode pojedini proizvođači digitalnih VF uređaja, prvo su sagledani realni kapaciteti prenosa koji se mogu postići digitanim VF vezama po VVN. Zatim je dato poređenje ovako dobijenih realno očekivanih binarnih protoka sa maksimalno mogućim kapacitetom kanala definisanim *Shannon*-ovom formulom. Na osnovu podataka o realnim mogućnostima uređaja formiran je predlog karakteristike "C-S/N" (karakteristika "C-S/N" pokazuje zavisnost binarnog protoka (C) od zahtevanog odnosa signal/šum (S/N) koji postoji na ulazu u prijemnik digitalnog VF uređaja, a za zadatu dozvoljenu grešku u prenosu) kao jedne od ključnih karakteristika digitalnih VF uređaja. Potom se analizira maksimalno premostivo slabljenje VF veze za različite naponske ravni VVN i različite snage predajnika VF uređaja. Posebno se razmatra prenos signala telezaštite digitalnim VF vezama, kao i vreme resinhronizacije digitalne VF veze. Na kraju je predložena metoda verifikacije kvaliteta prenosa vokodovanog govornog signala digitalnom VF vezom po VVN.

**Ključne reči:**

Digitalna VF veza – Kapacitet prenosa – Maksimalno premostivo slabljenje – Vreme resinhronizacije – Telezaštita – Vokoder

**1 UVOD**

Sa stanovišta korisnika, u aktivnostima planiranja primene i projektovanja analognih VF veza ključni pragmatični podatak o mogućnostima veze je maksimalno premostivo slabljenje veze u realnim uslovima. Ovaj podatak izražava se u dB i izvodi se relativno lako na osnovu snage predajnika, snage očekivanog šuma na dalekovodu i zahtevanog odnosa signal/šum.

Podatak o maksimalno premostivom slabljenju veze kod digitalnih VF veza (DVF) nešto je složenije izvesti jer zavisi i od tehničkih rešenja u uređajima, praktično, od primenjene vrste modulacije u

---

\* mr Jovanka Gajica, Institut MIHAJLO PUPIN, Volgina 15, Beograd, , E-mail: gajica@kondor.imp.bg.ac.yu

digitalnom kanalu (zbog njihove različite osetljivosti na šumove i smetnje), kao i od binarnog protoka za koji se veza projektuje. Pitanje određivanja maksimalno premostivog slabljenja digitalnih VF veza se dodatno komplikuje kod višenamenskih primena jer proizvođači različito deklarišu kombinacije vrsta, broja i brzina prenosa signala govora i podataka koje mogu preneti njihovi uređaji.

Smatra se da je karakteristika “ $C-S/N$ ” podatak koji najbolje pruža mogućnost međusobne komparacije i verifikacije pogodnosti digitalnih VF uređaja za pojedine primene. Karakteristika “ $C-S/N$ ” pokazuje koji se binarni protok ( $C$ ) može postići u celovitom, jedinstvenom digitalnom kanalu (u daljem tekstu: agregatni protok) za različite odnose  $S/N$  na ulazu u VF prijemnik digitalnog VF uređaja, a za zadatak dozvoljenu grešku u prenosu (BER).

U ovom radu će se učiniti pokušaj da se, na osnovu kapaciteta kanala definisanog Šenonovom formulom i karakteristika “ $C-S/N$ ” datih za digitalne VF uređaje četiri potencijalna isporučioća za domaću elektroprivredu (ABB, SIEMENS, ENSICO, Institut “Mihajlo Pupin”), definiše gabarit karakteristike “ $C-S/N$ ”. Na osnovu realnih kapaciteta prenosa digitalnih VF veza biće sagledan i prezentiran mogući broj podkanala za prenos govora i podataka u višenamenskoj digitalnoj VF vezi. Poznavanje karakteristike “ $C-S/N$ ” omogućava sagledavanje maksimalno premostivog slabljenja digitalne veze u realnim uslovima, što će takođe biti dato u ovom radu.

S obzirom na značaj prenosa signala telezaštite, u ovom radu se razmatra način realizacije ovog specifičnog TK servisa primenom digitalne VF veze po VVN. Posebna pažnja posvećena je vremenu resinhronizacije digitalne VF veze kao i proceni raspoloživosti digitalne VF veze za različite uslove rada VF uređaja (zavisno od broja manipulacija rasklopnim elementima i vremena resinhronizacije VF uređaja). Na kraju je predložena verifikacija kvaliteta prenosa vokodovanog govornog signala realizovanog digitalnom VF vezom.

## 2 REALNI KAPACITET PRENOSA DIGITALNIH VF VEZA

### 2.1 Kapacitet kanala

Kapacitet kontinualnog kanala označava teorijski maksimalni binarni protok,  $C$  (b/s), sa proizvoljno malom verovatnoćom greške, za definisani propusni opseg kanala  $B$  (Hz) i definisani odnos signal/šum ( $S/N$ ) na ulazu prijemnika [1] i [3]. Kapacitet kanala određen je sledećom formulom (*Claude Shannon*):

$$C_{Shannon} = B \times \log_2(1 + S/N), \quad (1)$$

gde je:

$C_{Shannon}$  – teorijski kapacitet kanala (b/s)

$B$  – propusni opseg kanala (Hz)

$S/N$  – odnos signal/šum u linearnim jedinicama ( $S/N = P_s/P_n$ ;  $P_s$  – srednja snaga signala;  $P_n$  – srednja snaga šuma)

Navedena formula (1) važi pod sledećim uslovima [2] i [3]:

- Signal ima Gausovu raspodelu;
- Odziv kanala na pobudu je idealan; nema amplitudskih i faznih izobličenja;
- U kanalu postoji samo aditivni beli Gausov šum, ne postoji impulsni šum, šum korone, šum preslušavanja iz predajnika u sopstveni prijemnik, šum interferencije sa drugim vezama;
- Vreme dekodovanja u prijemniku je proizvoljno dugo.

Međutim, u realnim kanalima nijedan od uslova pod kojima je izveden izraz (1) za kapacitet kanala nije ispunjen.

Kapacitet kanala definisan izrazom (1) može se egzaktno izračunati. Za standardan telefonski kanal efektivne širine 3,1 kHz i za odnos  $S/N$  od 30 dB, kapacitet kanala iznosi:

$$C_{TF} = B \times \log_2(1+S/N) = 3.100 \log_2(1+10^3) \approx 3100 \log_2 2^{10} = 31000 \text{ b/s}$$

U literaturi se, zavisno od usvojenih vrednosti za širinu propusnog opsega i odnos S/N, daju različite vrednosti za kapacitet telefonskog kanala koje se kreću u granicama od 30 do 35 kb/s. Pri tome, kapacitet telefonskog kanala je izračunat pod pretpostavkom koja podrazumeva samo prisustvo aditivnog Gausovog šuma, što nije adekvatno za realne telefonske kanale. Sa modemima realizovanim prema preporuci ITU-T V.34 korišćenjem QAM modulacije i zaštitnog kodovanja (TCM) uz prethodnu ekvalizaciju kanala (da bi se dobila optimalna funkcija prenosa) postižu se binarni protoci od 33,6 kb/s. Ovi binarni protoci se postižu samo pod skoro idealnim uslovima, zbog čega se, u praksi, u modemima ugrađuju dodatna tehnička rešenja koja proširuju njihovu praktičnu primenu i u lošijim uslovima prenosa (adaptivno smanjivanje brzine).

## 2.2 Realni maksimalni binarni protoci koji se mogu ostvariti digitalnom VF vezom

U digitalnom VF kanalu ostvarenom VF vezom (DVF kanal) ni jedan od uslova pod kojima je izveden izraz (1) za kapacitet kanala nije ispunjen:

- proizvoljno dugo vreme dekodovanja u prijemniku je nemoguće u realnim primenama;
- VF veze su pod uticajem šuma korone, impulsnog šuma i interferencija sa drugih VF veza;
- proizvoljno mala verovatnoća greške nije dostižna u realnim uslovima.

O realnim maksimalnim binarnim protocima koji se postižu na kanalima digitalnih VF veza po VVN, moguće je suditi samo na osnovu podataka proizvođača VF uređaja koji su zasnovani na merenjima u laboratorijskim i eksploatacionim uslovima, kao i adekvatnim simulacijama. Ovi podaci se u praksi iskazuju na različite načine. Tako:

- (1) SIEMENS prikazuje zavisnost binarnog protoka C od odnosa S/N pri zahtevanom  $BER \leq 10^{-7}$  za VF opsege nominalne širina 8 kHz, 7,5 kHz ili 5 kHz, na primer:

|   |   |
|---|---|
| <p>a) pri S/N = 30 dB</p> <p style="margin-left: 20px;">za B = 5 kHz      C = 32 kb/s</p> <p style="margin-left: 20px;">za B = 7,5 kHz    C = 48 kb/s</p> | <p>b) pri S/N=36 dB</p> <p style="margin-left: 20px;">za B = 5 kHz      C = 40 kb/s</p> <p style="margin-left: 20px;">za B = 8 kHz      C = 64 kb/s</p> |
|---|---|

- (2) ABB daje grafički prikaz zavisnosti binarnog protoka od odnosa S/N za digitalne VF uređaje koji se realizuju u VF opsezima efektivne širine 7 kHz, 3,3 kHz, 2,1 kHz, 1,7 kHz ili 1,4 kHz pri  $BER \leq 10^{-6}$ .

Ovakav način prikazivanja najvažnije performanse uređaja, otežava poređenje uređaja različitih tehničkih rešenja, pa će se, kao što je u uvodu najavljeno, učiniti pokušaj da se za karakteristiku “C-S/N” formuliše jedinstvena norma koju treba da zadovolje svi VF uređaji za korišćenje u mreži VF veza EPS-a i EMS-a.

## 2.3 Predlog gabarita za karakteristiku “C-S/N”

Predlog gabarita za karakteristiku “C-S/N” zasnovan je na sledećim polaznim uslovima:

- (1) Gabarit treba da važi za klasu digitalnih VF uređaja čije je korišćenje planirano u TK mreži Elektroprivrede Srbije (uređaji koji za puni dupleksni prenos koriste “slepljene” kanale nominalne širine 4 kHz), odnosno za prenos u kanalu efektivne širine 3,1 kHz.
- (2) Gabarit treba da uvaži preporuku iz dokumenta CIGRE [8] da proizvođači digitalnih VF uređaja treba da “...daju karakteristike “C-S/N“ za prenos pri kome je  $BER \leq 10^{-6}$ ...”
- (3) Značajne tačke na gabaritu treba da su definisane za standardizovane protoke.
- (4) Gabarit treba da je takav da predstavlja realnu normu koju mogu da zadovolje uređaji solidnih proizvođača VF opreme.

Prvi uslovi su jednoznačno formulisani, a poslednji uslov (4) može da se ispuni uvažavanjem i adekvatnim korišćenjem podataka proizvođača VF uređaja koji su pomenuti u prethodnom odeljku. Pod tim se podrazumeva interpretacija, odnosno obrada postojećih podataka o karakteristikama “C-S/N” na način koji omogućava iskazivanje performansi različitih uređaja pod istim uslovima, to jest, da se one odnose na prenos u kanalu efektivne širine 3,1 kHz, a pri kvalitetu prenosa od  $BER \leq 10^{-6}$ .

Takva obrada podataka je urađena i uporedne karakteristike “C-S/N” za četiri tipa uređaja (proizvodnje SIEMENS, ABB, ENSICO, Institut “Mihajlo Pupin”) prikazane su na slici 1. zajedno sa teorijskom, Shannon-ovom karakteristikom.

U daljem tekstu biće opisan način formiranja četiri karakteristike koje su prikazane na slici 1.

Za uređaje proizvodnje **SIEMENS** i **ABB** izvršena je grafička i tabelarna obrada raspoloživih podataka koji se odnose na “C-S/N” karakteristiku i to sledećim postupcima:

### Uređaj proizvodnje SIEMENS

Početni podaci za ovaj uređaj su bili numerički podaci za prenos u kanalima različite širine i za različite uslove na kanalu koji su dati tabelarno u dokumentaciji proizvođača. Izdvajamo dva karakteristična primera:

(a) S/N = 30 dB

B = 5 kHz, C = 32 kb/s

B = 7,5 kHz, C = 48 kb/s

(b) S/N = 36 dB

B = 5 kHz, C = 40 kb/s

B = 8 kHz, C = 64 kb/s

Treba uočiti da je u oba primera odnos frekvencijskih opsega kanala jednak odnosu njihovih kapaciteta:

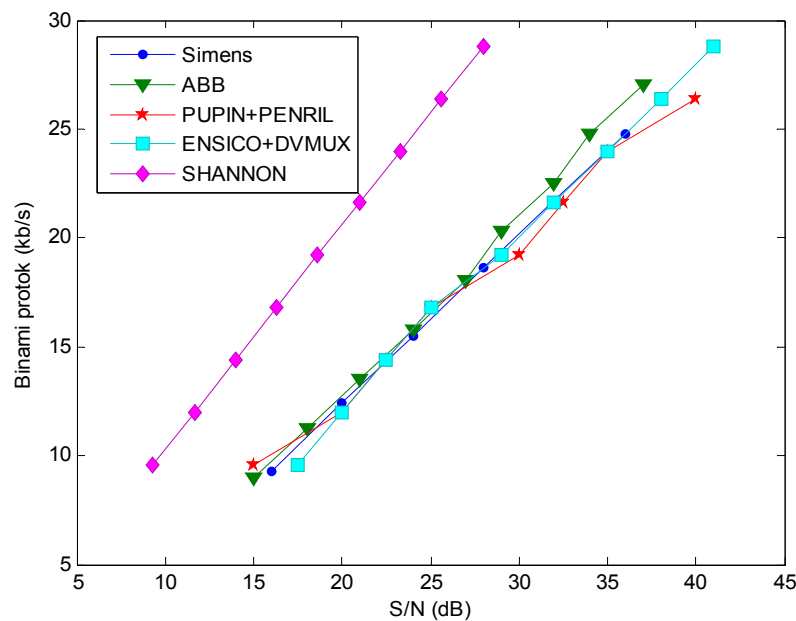
u primeru (a) važi:  $B_{5\text{kHz}}/B_{7,5\text{kHz}} \approx C_{5\text{kHz}}/C_{7,5\text{kHz}} = 0,6667$

a u primeru (b):  $B_{5\text{kHz}}/B_{8\text{kHz}} \approx C_{5\text{kHz}}/C_{8\text{kHz}} = 0,625$

Dakle, za jednu odabranu vrednost S/N dobili smo da su odnosi vrednosti binarnog protoka i širine opsega konstantni i u slučaju realnog kanala.

Pored ovog zaključka, u postupku formiranja krive za uređaj proizvodnje SIEMENS na slici 1. su, zatim, korišćeni podaci za prenos u kanalu širine 8 kHz, koji pokazuju pri kojim vrednostima odnosa S/N se postižu standardizovani protoci 24 kb/s, 32 kb/s, 40 kb/s, 48 kb/s, 56 kb/s i 64 kb/s, prikazani u Tabeli 1.

Za sve vrednosti odnosa S/N (iz drugog reda) Tabele 1. proračunati su ekvivalentni binarni protoci koji mogu da se postignu u kanalu širine 3,1 kHz (s obzirom na linearnu zavisnost odnosa širine opsega i binarnog protoka C) i upisani su, takođe, u istu Tabelu 1. (u trećem redu).



Slika 1. Karakteristike “C-S/N” za DVF uređaje različitih proizvođača za opseg 3,1 kHz pri  $BER \leq 10^{-6}$   
 Kriva za uređaj SIEMENS na slici 1. nacrtana je na osnovu podataka iz Tabele 1. (drugi i treći red)

Tabela 1. Rezultati obrade podataka za uređaj SIEMENS

|  |     |      |      |      |      |      |
|--|-----|------|------|------|------|------|
| C (kb/s)<br>očitan iz tabelarnog prikaza<br>karakteristike C-S/N za opseg 8 kHz                        | 24  | 32   | 40   | 48   | 56   | 64   |
| S/N (dB)<br>pri kome se postiže standardizovani<br>binarni protok dat u prethodnom redu                | 16  | 20   | 24   | 28   | 32   | 36   |
| C (kb/s)<br>Proračunati binarni protok za opseg<br>širine 3,1 kHz pri odnosu S/N iz<br>prethodnog reda | 9,3 | 12,4 | 15,5 | 18,6 | 21,7 | 24,8 |

### Uređaj proizvodnje ABB

Početni podaci za ovaj uređaj su sadržani u dijagramu koji pretstavlja karakteristiku “C-S/N”, ali za kanal širine 3,3 kHz. Sa tog dijagrama očitane su vrednosti potrebnog odnosa S/N za postizanje standardizovanih protoka, takođe za kanal širine 3,3 kHz i sa tim vrednostima formirana je Tabela 2.

Zatim su, slično kao i u postupku za uređaj SIEMENS, za sve vrednosti odnosa S/N proračunati ekvivalentni binarni protoci koji mogu da se postignu u kanalu širine 3,1 kHz i upisani su, takođe, u trećem redu iste Tabele 2.

Na osnovu podataka iz drugog i trećeg reda Tabele 2. ucrtana je karakteristika “C-S/N” za uređaj ABB na slici 1.

Za uređaje proizvodnje ENSICO i Institut “Mihajlo Pupin” uzeti su podaci koji su dobijeni direktno merenjem, s obzirom da su ona vršena baš pod uslovima za koje se predlaže gabarit (prenos u kanalu efektivne širine 3,1 kHz, standardizovanih protoka 9,6 kb/s, 12 kb/s, 14,4 kb/s, 16,8 kb/s, 19,2 kb/s, 21,6 kb/s, 24 kb/s, 26,4 kb/s, 28,8 kb/s, pri  $BER \leq 10^{-6}$ ).

Tabela 2. Rezultati obrade podataka za uređaj ABB

|   |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| C (kb/s)<br>očitan iz dijagrama<br>karakteristike<br>C-S/N za opseg 3,3 kHz                               | 9,6  | 12   | 14,4 | 16,8 | 19,2 | 21,6 | 24   | 26,4 | 28,8 |
| S/N (dB)<br>pri kome se postiže<br>standardizovani binarni<br>protok dat u prethodnom<br>redu             | 15   | 18   | 21   | 24   | 27   | 29   | 32   | 34   | 37   |
| C (kb/s)<br>Proračunati binarni<br>protok za opseg širine<br>3,1 kHz pri odnosu S/N<br>iz prethodnog reda | 9,01 | 11,3 | 13,5 | 15,8 | 18,0 | 20,3 | 22,5 | 24,8 | 27,1 |

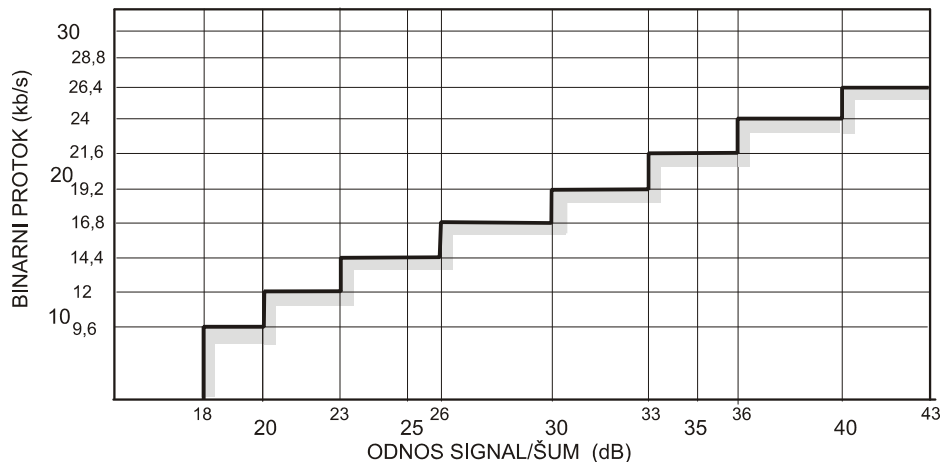
U cilju definisanja gabarita u kome će se značajne tačke nalaziti na standardizovanim vrednostima binarnih protoka, sa slike 1. očitane su vrednosti odnosa S/N za koje se postižu standardizovani binarni protoci od 9,6 kb/s, 12 kb/s, 14,4 kb/s, 16,8 kb/s, 19,2 kb/s, 21,6 kb/s, 24 kb/s, 26,4 kb/s, 28,8 kb/s, i to za sva četiri razmatrana uređaja. Očitane vrednosti navedene su u Tabeli 3.

Na osnovu izloženih podataka o realnim mogućnostima uređaja (praktično, potencijalnih isporučilaca opreme za Elektroprivredu Srbije) formiran je i, takođe, naveden u Tabeli 3. predlog norme za karakteristike “C-S/N” za digitalne VF uređaje.

Tabela 3. Minimalni zahtevani odnos signal/šum u VF kanalu efektivne širine 3,1 kHz za postizanje standardizovanih protoka, pri  $BER \leq 10^{-6}$

| TIP UREĐAJA      | MINIMALNI ZAHTEVANI ODNOS SIGNAL/ŠUM (dB) |            |              |              |              |              |            |              |              |  |
|------------------|---|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|--|
|                  | 9,6<br>kb/s                               | 12<br>kb/s | 14,4<br>kb/s | 16,8<br>kb/s | 19,2<br>kb/s | 21,6<br>kb/s | 24<br>kb/s | 26,4<br>kb/s | 28,8<br>kb/s |  |
| ABB              | 16  | 20         | 22,5         | 25,5         | 29           | 31,5         | 34         | 36,5         |              |  |
| Simens           | 16,5                                      | 20         | 23           | 26           | 29           | 32           | 36         |              |              |  |
| Pupin+Penril     | 15  | 20         | 22,5         | 25           | 30           | 32,5         | 35         | 40           |              |  |
| ENSICO+DVMUX     | 17,5                                      | 20         | 22,5         | 25           | 29           | 31           | 34         | 38           | 41           |  |
| PREDLOG<br>NORME | 18  | 20         | 23           | 26           | 30           | 33           | 36         | 40           |              |  |

Na vrednostima predloga norme iz Tabele 3. zasnovana je izrada predloga Gabarita karakteristike “C-S/N” za prenos po digitalnom VF kanalu, nominalne širine 4 kHz, sa kvalitetom prenosa u kome je  $BER \leq 10^{-6}$ . Gabarit je prikazan na slici 2.



Slika 2. Predlog gabarita karakteristike “C-S/N” za prenos po digitalnom VF kanalu, efektivne širine 3,1 kHz (nominalne širine 4 kHz), sa kvalitetom prenosa u kome je  $BER \leq 10^{-6}$

## 2.4 Mogući broj podkanala u višenamenskoj digitalnoj VF vezi po dalekovodu

U višenamenskoj digitalnoj VF vezi u okviru agregatnog binarnog protoka koji se može ostvariti u realnim uslovima prenosa, moguće je, zavisno od zahteva korisnika i tehničkih karakteristika digitalnog VF uređaja, realizovati različite kombinacije (broj i vrsta) podkanala za prenos govornih signala i signala podataka. Raspodela agregatnog binarnog protoka na pojedine podkanale koji se realizuju u okviru višenamenske digitalne VF veze po VVN zavisi od više faktora:

- zahtevanog vremena prenosa signala sa kraja na kraj veze u određenom podkanalu,
- vrste primenjenog zaštitnog kodovanja u određenom podkanalu,
- zahtevane signalizacije u određenom podkanalu,
- zahtevanih servisnih podataka (npr. za nadgledanje veze) i dr.

U okviru podkanala za prenos govornog signala vrši se prenos signala govora, signalizacije i signala zaštitnog kodovanja.

U okviru podkanala za prenos podataka vrši se prenos signala korisničkih podataka, signalizacije i signala zaštitnog kodovanja.

U okviru dodatnog podkanala vrši se prenos podataka za potrebe sinhronizacije, nadgledanja udaljenog uređaja i dr.

Na slici 3. dati su primeri strukture podkanala za agregatne protoke od 24 kb/s, 19,2 kb/s i 14,4 kb/s.

Primeri su zasnovani na sagledavanju mesta i uloge digitalnih VF veza u TK sistemu EPS-a, pa u tom smislu, mogu biti inicijalni predlozi za tehničke uslove digitalnih VF uređaja, u uslovima veoma raznolike ponude načina korišćenja digitalnih VF uređaja, a u cilju izvesne unifikacije opreme u Elektroprivredi.

1) 24 kb/s

|                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| GK<br>6,4 kb/s | GK<br>6,4 kb/s | KP<br>7,2 kb/s | KP<br>1,2 kb/s | DK<br>2,8 kb/s |
| 12,8 kb/s      |                | 11,2 kb/s      |                |                |

2) 19,2 kb/s

|                |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| GK<br>6,4 kb/s | GK<br>6,4 kb/s | KP<br>3,6 kb/s | KP<br>1,2 kb/s | DK<br>1,6 kb/s |
| 12,8 kb/s      |                | 6,4 kb/s       |                |                |

3) 14,4 kb/s

|                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|
| GK<br>6,4 kb/s | GK<br>6,4 kb/s | KP<br>1,2 kb/s | DK<br>0,4 kb/s |
| 12,8 kb/s      |                | 1,6 kb/s       |                |

LEGENDA:

GK - podkanal za prenos govornog signala (vokoder je realizovan binarnim protokom od 4,8 kb/s)

KP - podkanal za prenos signala podataka

DK - dodatni podkanal za potrebe sinhronizacije (paketa ili sl.), nadgledanje, i dr...

Slika 3. Primeri raspodele podkanala za agregatne protoke 24 kb/s, 19,2 kb/s i 14,4 kb/s

### 3 MAKSIMALNO PREMESTIVO SLABLJENJE DIGITALNE VF VEZE

Kao što je rečeno u uvodu, maksimalno premestivo slabljenje kod digitalnih VF veza nije jednostavno izvesti. Međutim, u praksi, kako u projektovanju veza tako i u investicionim aktivnostima, i dalje će se maksimalno premestivo slabljenje veze uvažavati kao koristan pragmatičan podatak.

U želji da se izbegnu eventualne omaške kao posledica neadekvatnog preslikavanja metodologije izračunavanja maksimalno premestivog slabljenja kod analognih VF veza za izračunavanje maksimalno premestivog slabljenja digitalnih veza, ukazaće se na postupak kojim se može izračunati ovaj podatak za određene konkretne zahteve.

Maksimalno premestivo slabljenje digitalne VF veze  $S_{DVF \text{ veze}}$  (koje uključuje slabljenje linije i sprežnih pribora na obe strane VF veze) u realnim uslovima može da se izrazi na poznati način:

$$S_{DVF \text{ veze}} = P_{sT} - S/N - N, \quad (2)$$

gde su:

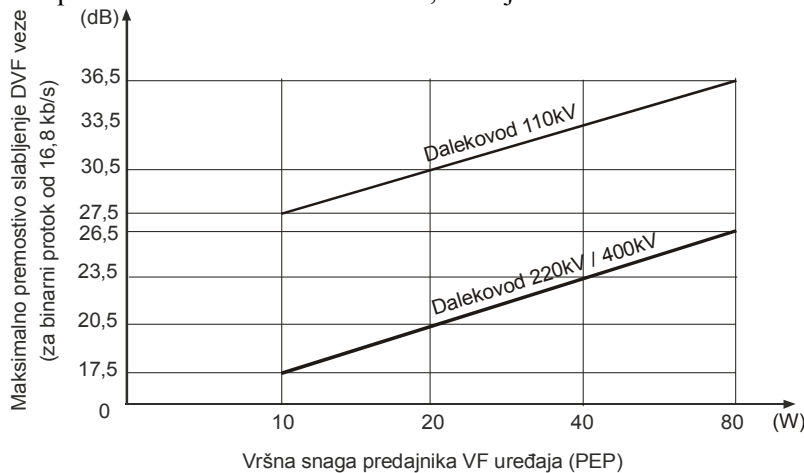
$P_{sT}$  - srednja snaga signala u digitalnom kanalu na izlazu VF predajnika (dB),

$S/N$  - zahtevani odnos signal/šum na ulazu u VF prijemnik (dB) za odgovarajući binarni protok (za zadati BER),

$N$  - nivo šuma sa linije u propusnom frekvencijskom opsegu DVF kanala (dB) u tački priključivanja sprežne opreme na vod visokog napona.

Posebno se ukazuje da je  $P_{ST}$  srednja snaga signala u digitalnom kanalu, a ne vršna snaga PEP (*Peak Envelope Power*) koja se često daje u prospektnom materijalu VF uređaja. Naime, odnos između vršne i srednje izlazne snage digitalnog VF uređaja je između 8,5 dB i 10 dB za tipična rešenja u VF uređajima [7]. Za potrebe ovog razmatranja usvojen je odnos između vršne i srednje snage VF uređaja od 10 dB.

Na slici 4. su prikazani rezultati razmatranja maksimalno premostivog slabljenja digitalne VF veze za različite snage predajnika i za različite naponske ravni VVN po kome se realizuje VF veza. Prikazani rezultati se odnose na prenos signala koji ima fiksnu, standardizovanu vrednost binarnog protoka od 16,8 kb/s, što se postiže, kako se vidi sa dijagrama na slici 4, pri odnosu S/N od 26 dB pri  $BER \leq 10^{-6}$ . Prikazana su dva grafika: jedan za dalekovod 110 kV, i drugi za dalekovode 220 i 400 kV (smatra se da su nivoi šumova na 220 i 400 kV-tnim dalekovodima isti u slučaju da 400 kV-tni dalekovod koristi dva provodnika u fazi [6]). Proračuni su rađeni pod pretpostavkom da nivo šuma korone,  $N$ , u najgorim vremenskim uslovima, u opsegu širine 4 kHz, iznosi -30 dBm za dalekovod naponske ravni 110 kV, odnosno -20 dBm za dalekovode naponske ravni 220 kV i 400 kV (sa dva provodnika u fazi). S obzirom da je efektivni frekvencijski opseg DVF kanala širine 3,1 kHz, ekvivalentni nivo šuma korone za DVF kanal smanjen je za 1,1 dBm ( $10 \log_{10}(3,1/4)$ ). Pored toga, pri proračunu je izvršena korekcija vrednosti šuma korone za dodatnih 7,6 dB, zbog porasta uticaja napona šuma korone u prenosu signala po digitalnim VF vezama pri lošim vremenskim uslovima, a što je u skladu sa analizom datom u [1] i [3].



Slika 4. Maksimalno premostivo slabljenje DVF veze za binarni protok 16,8 kb/s ( $S/N = 26$  dB) za različite snage predajnika VF uređaja na VVN različitih naponskih ravni

#### 4 PRENOS SIGNALA TELEZAŠTITE

Prenos signala telezašite je specifičan i istovremeno jedan od kritičnih TK servisa u elektroprivredi.

Digitalni VF uređaji sa sadašnjim tehničkim rešenjima nisu pogodni da se signal telezašite prenosi kao jedan od digitalno multipleksiranih signala iz sledećih razloga:

- Digitalna VF veza zahteva određeni minimalni odnos signal/šum  $(S/N)_{min}$  kako bi se realizovale projektovane karakteristike prenosa. U slučaju da je odnos signal/šum manji od  $(S/N)_{min}$ , one su značajno degradirane. Vrednost  $(S/N)_{min}$  zavisi od konkretnih rešenja DVF uređaja, ali je ta vrednost obično veća od zahtevane vrednosti odnosa signal/šum za korektan prenos signala telezašite analognom VF vezom (analognim prenosom). Ovo naročito važi kada su neregularni uslovi na liniji (havarijska stanja), kada  $(S/N)_{min}$  koji zahteva DVF veza ne može da se obezbedi.
- Kada su neregularni uslovi na liniji signal trpi značajna amplitudska i fazna izobličenja, što dodatno degradira karakteristike prenosa DVF vezom.
- Procesi kodovanja i dekodovanja u DVF vezi unose izvesno kašnjenje u prenosu. Ovo dodatno kašnjenje moglo bi da degradira prenos signala telezašite do neprihvatljivog (npr., ukupno vreme prenosa signala distantne zaštite za zahtevanu pouzdanost).

Iz navedenih razloga preporučuje se da se signali telezaštite u digitalnim VF vezama prenose kao kod analognih VF veza (bez ikakvih digitalnih obrada, transponovanjem u VF kanal amplitudnom modulacijom). U tom smislu postoji i preporuka u dokumentima CIGRE [3].

## 5 VREME RESINHRONIZACIJE

Uticao šumova i impulsnih smetnji velikog intenziteta na rad VF veza predstavlja osnovni uzrok prelaska digitalnih VF veza iz stanja raspoloživog u stanje neraspoločivog sistema (pored otkaza na telekomunikacionoj opremi, VF uređajima, sprežnom priboru). Ovaj uticaj se manifestuje na dva načina:

- Direktni, u kome impulsne smetnje unose greške u prenosu u takvom broju da se veza smatra neraspoločivom (preporuka ITU-T G.821);
- Indirektno, iniciranjem ispada VF veze iz sinhronizacije, odnosno iz osnovne funkcije prenosa signala.

Prvi, direktni uticaj na raspoloživost VF veze, kao što je rečeno, može da ima različitu dužinu trajanja zavisno od geneze, intenziteta, trajanja i strukture smetnje, pa tako i različiti “doprinos” ukupnom vremenu neraspoločivosti veze.

Drugi, indirektni uticaj je, praktično, uvek reda dela do desetak sekundi po jednom ispadi iz sinhronizacije, a u ukupnom udelu, zbog velike učestanosti impulsnih smetnji, može da bude višestruko značajniji.

Dužina vremena resinhronizacije, stoga, ima karakter značajne karakteristike, a izbor metoda i tehničkih rešenja sinhronizacije i resinhronizacije u digitalnim VF uređajima predstavlja važno opredeljenje.

CIGRE je u svojim dokumentima [3] iskazala stav da se za digitalnu VF vezu, koja ima vreme oporavka manje od jedne sekunde, može smatrati da ima prihvatljivu raspoloživost; VF veze sa vremenom oporavka većim od 10 sekundi se smatraju za veze sa visokom neraspoločivošću.

Detaljnije razmatranje i eventualni izbor mogućih metoda sinhronizacije u digitalnim VF uređajima izlazi iz okvira ovog rada, ali će u Tabeli 4. pokušati da se izvrši procena očekivane raspoloživosti digitalnih VF veza za različite uslove rada VF uređaja (zavisno od broja manipulacija rasklopnim elementima i vremena resinhronizacije VF uređaja).

Tabela 4 Procena raspoloživosti digitalne VF veze za različite uslove

| Broj manipulacija RE                                     |            |          | Trajanje smetnje |          |                  | Neraspoloživost VF veze | Raspoločivost VF veze |
|--|------------|----------|------------------|----------|------------------|-------------------------|-----------------------|
| Ukupno   | Rastavljač | Prekidač | Rastavljač       | Prekidač | Resinhronizacija |                         |                       |
| <b>Uticaj vremena resinhronizacije kraćeg trajanja</b>   |            |          |                  |          |                  |                         |                       |
| 2  | 1          | 1        | 3 s              | 20 ms    | 1 s              | $0,602 \times 10^{-4}$  | 0,99994               |
| 6  | 3          | 3        | 3 s              | 20 ms    | 1 s              | $1,806 \times 10^{-4}$  | 0,99982               |
| 12   | 6          | 6        | 3 s              | 20 ms    | 1 s              | $3,611 \times 10^{-4}$  | 0,99964               |
| <b>Uticaj vremena resinhronizacije tipičnog trajanja</b> |            |          |                  |          |                  |                         |                       |
| 2  | 1          | 1        | 3 s              | 20 ms    | 5 s              | $1,527 \times 10^{-4}$  | 0,99984               |
| 6  | 3          | 3        | 3 s              | 20 ms    | 5 s              | $4,583 \times 10^{-4}$  | 0,99954               |
| 12   | 6          | 6        | 3 s              | 20 ms    | 5 s              | $9,167 \times 10^{-4}$  | 0,99908               |
| <b>Uticaj vremena resinhronizacije dužeg trajanja</b>    |            |          |                  |          |                  |                         |                       |
| 2  | 1          | 1        | 3 s              | 20 ms    | 10 s             | $2,6852 \times 10^{-4}$ | 0,99973               |
| 6  | 3          | 3        | 3 s              | 20 ms    | 10 s             | $8,056 \times 10^{-4}$  | 0,99919               |
| 12   | 6          | 6        | 3 s              | 20 ms    | 10 s             | $16,111 \times 10^{-4}$ | 0,99839               |

Procena raspoloživosti data je pod sledećim pretpostavkama [1]:

- Prosečan broj dnevnih manipulacija ne prelazi 2 (za VF vezu koja je locirana u delu EES gde se stiče veoma mali broj VVN), 6 (za VF vezu koja je locirana u delu EES gde se stiče veći broj VVN) ili 12 (za VF vezu koja je locirana u delu EES gde se stiče veoma veliki broj VVN).
- Sve manipulacije imale su za posledicu ispad veze iz sinhronizacije, što ne mora uvek da bude slučaj.
- Prosečno trajanje smetnji usled rada rastavljača je 3 s.
- Prosečno trajanje smetnji usled rada prekidača je 20 ms.
- Prosečno vreme potrebno za resinhronizaciju VF veze iznosi 1 s (kraće trajanje), 5 s (tipično trajanje) ili 10 s (gornja granica po preporuci CIGRE).

Kao što se može videti iz Tabele 4 pri navedenim pretpostavkama izračunata raspoloživost kreće se u granicama 0,9984 do 0,9999 što sa stanovišta mesta i uloge digitalnih VF veza u budućem TK sistemu EPS-a predstavlja prihvatljivu vrednost. Naime, u budućem TK sistemu EPS-a digitalne VF veze bi se koristile kao rezervni putevi za potrebe realizacije kritičnih servisa i to u regionalnoj ravni gde se stiče manji broj VVN i gde su samim tim manje izražene smetnje visokog intenziteta.

## 6 VERIFIKACIJA KVALITETA PRENOSA VOKODOVANOG GOVORNOG SIGNALA

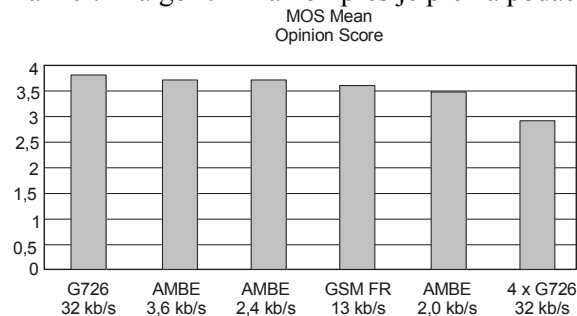
Kod analognih VF veza verifikacija kvaliteta prenosa govora je vršena proverom kvaliteta govornog kanala, odnosno merenjem ekvivalentnih slabljenja, amplitudne karakteristike, linearnosti rada komandora i izobličenja test signala.

Kvalitet prenosa govora po digitalnim VF vezama u kojima je primenjen proces vokodovanja mogućnosti testiranja veze prostoperiodičnim test signalima su veoma ograničene. Iz tog razloga, verifikacija kvaliteta prenosa vokodovanog govornog signala je složenija i vrši se na osnovu razmatranja tri komponente:

- Razumljivosti (jasnoće) – izražava korelaciju između količine informacija koje su poslate i onih koje su prepoznate u procesu prenosa govora preko sistema prenosa (mreže).
- Kašnjenja – predstavlja ukupno vreme prostiranja signala kroz sistem prenosa (mrežu).
- Eha (odjek) – predstavlja preslušavanje signala na daljem kraju veze, a koja je dovoljne snage i kašnjenja da ometa govornika.

### 6.1 Vrednosti kvaliteta po MOS skali za vokodere raspoložive na tržištu

Razumljivost vokodovanog govornog signala izražava se ocenom na MOS (*Mean Opinion Scores*) skali koja ima raspon ocena za kvalitet od 1 do 5. Za kodovanje govora koriste se vokoderi sa različitim linearnim ili nelinearnim postupcima kompresije, sa protocima 9600, 4800, 2400 b/s, pa i niže. Na sadašnjem stepenu razvoja vokodera postiže se dobar kvalitet govora vokodovanog na 4800 b/s sa ocenom od oko 3,8 prema MOS skali, a za vokodere koji rade sa binarnim protocima od 9600 b/s postiže se kvalitet već sasvim blizu 4 prema MOS skali. Ilustracije radi, na slici 5. prikazan je kvalitet govora po MOS skali za govor kodovan različitim algoritmima kompresije prema podacima iz [1].



Slika 5. Primeri kvaliteta prema MOS skali za vokodere koji koriste različite algoritme kompresije govora

## 6.2 Kvalitet prenosa govora po digitalnim VF vezama

U dokumentima CIGRE kao i u tehničkoj dokumentaciji digitalnih VF uređaja pojedinih proizvođača ne postoje podaci o kvalitetu vokodovanog govornog signala. U takvim uslovima, na osnovu podataka sa slike 5. za vokodovane govorne kanale realizovane digitalnim VF vezama po VVN [1] mogu se prihvatiti sledeće minimalne vrednosti kvaliteta govornog signala prema MOS skali:

- 3,5 za prenos sa binarnim protokom do 4800 b/s,
- 3,8 za prenos sa binarnim protokom do 9600 b/s.

Ukupno kašnjenje govornog signala na vezi koja koristi vokodere na sme da bude veća od 200 ms [1].

Preporukama ITU-T serije P definisane su metode za subjektivnu i objektivnu procenu kvaliteta prenosa vokodovanog govornog signala.

### LITERATURA

- [1] Jovanka Gajica: „Tehnika prenosa signala po vodovima visokog napona digitalnim VF vezama”, naučna monografija, Akademska Misao, Institut "Mihajlo Pupin", Beograd, oktobar 2007.
- [2] J. Gajica: “Analiza tehničkih uslova i mernih metoda za digitalne VF sisteme prenosa informacija po vodovima visokog napona”, Magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Beograd 2006.
- [3] "Report on Digital Power Line Carrier", CIGRE WG 35.09, August 2000.
- [4] "Guide on Power Line Carrier" CIGRE, 1979.
- [5] "IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications", IEEE Std 643 TM – 2004 (Revision of IEEE Std 643-1980).
- [6] "Planning of (single-sideband) power line carrier systems"; IEC 60663, 1980.
- [7] "Single sideband power-line carrier terminals"; IEC 60495 (1993-09).
- [8] "Digital Power Line Carrier Equipment – Present Use and Future Applications, CIGRE SCTF D2.08, 2006.
- [9] "Digitalni VF uređaj" IS 40-Interni standard Elektroprivrede Srbije IS 40, Decembar 2004.

**Abstract:** The real technical capabilities of digital power line carrier links, that are important from the viewpoint of their application in an electric power utility telecommunication network, will be investigated in this paper. Based on the processing of data about bit rates, that are given by particular manufacturers of digital PLC equipment in their technical sheets, the real transmission capacities (bit rates) that can be realized by using this technology are considered first. A comparison of these real transmission capacities and maximum channel transmission capacities, defined by *Shannon's* formula, is given. Based on data about real transmission capacities of the PLC equipment, we propose the "C-S/N" characteristic (the "C-S/N" characteristic shows the relationship between bit rate (*C*) and required signal/noise (*S/N*) ratio at the input to the receiver of the digital PLC equipment for a given bit error rate (BER)), as one of the most important characteristics of digital PLC equipment. Further on, we analyze the maximum line attenuation for a PLC link for various voltage levels of a high voltage line and various transmitter powers of the PLC equipment. In particular, we analyze teleprotection signal transmission by using digital PLC equipment as well as digital PLC link recovery time. At the end, we propose a method for evaluating the speech quality of the transmitted vocoded speech signal by using digital PLC link.

### Keywords:

Digital PLC - Transmission capacity – Maximum line atenuation – Recovery time – Teleprotection - Vocoder

### REAL TECHNICAL CAPABILITIES OF DIGITAL POWER LINE CARRIER LINKS