

SVEUČILIŠTE U SPLITU  
SVEUČILIŠNI ODJEL ZA STRUČNE STUDIJE

**TELEKOMUNIKACIJE U ELEKTROENERGETSKIM  
SUSTAVIMA**



*dr. sc. Slobodanka Jelena Cvjetković*

*Čovjek koji se trudi da se dovine do svog idealra  
nalikuje putniku koji se uvečer uspinje na brežuljak.  
Kad stigne na vrh nije ništa bliže zvijezdama, samo ih bolje vidi.  
Teškoća je u tome da čovjekov život nije samo njegov.  
Tko ga želi oblikovati, mora imati pomoć svoje okoline, ili neće uspjeti.*

## **SADRŽAJ**

<b>1. UVOD .....</b>	<b>1</b>
<b>2. PREGLED RAZVOJA KOMUNIKACIJE ELEKTROENERGETSKIM VODOVIMA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Europske norme i stategija razvoja .....</b>	<b>12</b>
<b>2.1.1. Učinak ograničenja nivoa signala .....</b>	<b>15</b>
<b>2.1.2. Učinak ograničenja spektra signala .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2. Elektromagnetska usklađenost .....</b>	<b>24</b>
<b>2.2.1. Elektromagnetska kompatibilnost, problemi i rješenja .....</b>	<b>25</b>
<b>3. TOPOLOGIJA I STRUKTURA ELEKTROENERGETSKIH MREŽA .....</b>	<b>31</b>
<b>3.1. Prijenos energije visokonaponskim nadzemnim vodovima .....</b>	<b>33</b>
<b>3.1.1. Prijenosne jednadžbe .....</b>	<b>38</b>
<b>3.1.2. Visokonaponski nadzemni vodovi za prijenos visokofrekvencijskih signala .....</b>	<b>41</b>
<b>3.1.3. Visokofrekvencijska interfrenčija na visokonapskom nadzemnom vodu .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. Propagacija signala .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.1. Prigušenje signala uzrokovano gubicima kabela .....</b>	<b>47</b>
<b>4. PRIMIJENA ELEKTROENERGETSKIH VODOVA U TELEKOMUNIKACIJAMA .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1. Distribucija električne energije .....</b>	<b>51</b>
<b>4.2. Širokopojasna komunikacija elektroenergetskim vodovima .....</b>	<b>54</b>
<b>4.2.1. Primjena širokopojasnog PLC sustava u elektroprivredama .....</b>	<b>58</b>
<b>4.3. Najveći PLC AMR sustav - ENELOV TELEGESTORE SUSTAV .....</b>	<b>72</b>
<b>4.3.1. Razvoj poslovanja u stranim zemljama .....</b>	<b>75</b>
<b>4.4. Strategija razvoja mjernog sustava u Hrvatskoj .....</b>	<b>77</b>
<b>4.5. Iskustva .....</b>	<b>79</b>
<b>5. PRIJENOS SIGNALA .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1. Parametri prijenosa .....</b>	<b>83</b>
<b>5.1.1. Signal veze .....</b>	<b>84</b>
<b>5.1.2. Prigušenje signala .....</b>	<b>87</b>
<b>5.1.3. Pristupna impedancija .....</b>	<b>87</b>
<b>5.2. Prijenos signala .....</b>	<b>88</b>
<b>5.3. Širenje višesmjernog signala elektroenergetskim vodovima u visokofrekvencijskim područjima .....</b>	<b>89</b>
<b>6. PRIJENOS TELEKOMUNIKACIJSKOG SIGNALA PUTEM ELEKTROENERGETSKE MREŽE S RAZLIČITIM NAPONSKIM NIVOIMA .....</b>	<b>91</b>
<b>6.1. Dizajniranje širokopojasnih strujnih krugova .....</b>	<b>104</b>
<b>6.1.1. Komponente strujnog kruga veze .....</b>	<b>104</b>
<b>7. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>110</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>112</b>
<b>DODATAK .....</b>	<b>117</b>



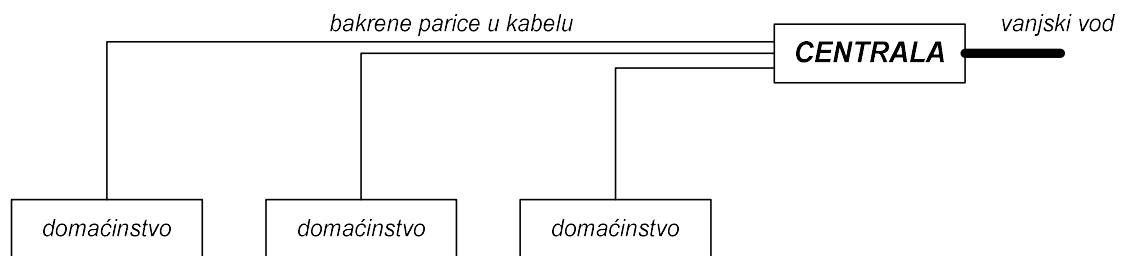
## 1. UVOD

Nakon elektrifikacije započinje istraživanje sposobnosti elektroenergetskih vodova za prijenos podataka, kao i razvoj prvih sustava za komunikaciju elektroenergetskim vodovima, PLC (Powerline communication). Komunikacija elektroenergetskim vodovima podrazumijeva prijenos informacija elektroenergetskim vodovima na frekvencijama višim od frekvencije prijenosa električne energije. Komunikacijski sustavi izgrađeni primjenom PLC-tehnologije koriste se za pružanje triju vrsta usluga. To su:

- podrška postojećim elektroprivrednim djelatnostima (daljinsko očitanje brojila, upravljanje opterećenjem i daljinski nadzor opskrbe električnom energijom)
- pristup telekomunikacijskim mrežama (pristupnim i javnim)
- usluge u kućanstvima (umrežavanje informatičke opreme u kućanstvu i nadzor kućanskih aparata).

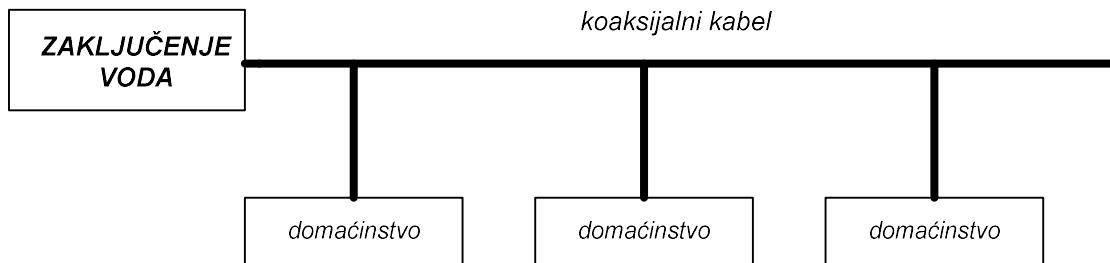
PLC tehnologija se prvobitno primjenjivala na visokonaponskim elektroenergetskim vodovima za energetske usluge. Danas se veća pozornost pridaje njezinoj primjeni na srednjenačonskim, a posebice na niskonaponskim elektroenergetskim vodovima i električnim instalacijama u zgradama. Razlikuju se uskopojasni PLC-sustavi (ostvaruju brzine rada veličine do stotinjak kbit/s) i širokopojasni PLC-sustavi (ostvaruju brzine 2 Mbit/s i više) s integriranim uslugama koje se potrošačima električne energije nude korištenjem elektroenergetskih vodova na kojima su priključeni. Uglavnom su to niskonaponski vodovi.

Kvaliteta telekomunikacijskog dvosmjernog prijenosa signalova ovisi o vrsti prijenosnog medija (radio valovi, optički kabel i bakreni vodič). Kapacitet i širina pojasa važni su parametri u telekomunikacijama i ovise o fizikalnim svojstvima medija.



Slika 1.1. Prijenos signala uporabom bakrenih parica

Za prijenos električnih signala u žičanim telekomunikacijskim mrežama koriste se bakrene parice (slika 1.1.), koaksijalni kabeli (slika 1.2.) i svjetlovodi, a u elektroenergetskim mrežama vodovi srednjeg i niskog napona (slika 1.3.).



Slika 1.2. Prijenos signala uporabom CATV sustava

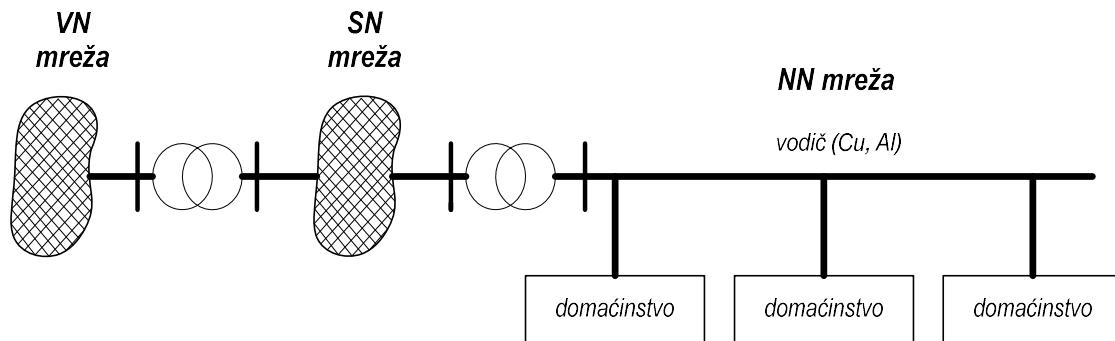
Mnogi nedostaci prijenosa bakrenim vodičima mogu se eliminirati uporabom optičkih kabela, koji je optimalan medij za prijenos telekomunikacijskih signala na velikim udaljenostima. Prednosti optičkih kabela su:

- malo prigušenje,
- velika širina pojasa (reda veličine do 100 GHz, ), tj. kapacitet prijenosa (reda veličine Tbit/s),
- male dimenzije, mala težina optičkog kabela u usporedbi s bakrenim kabelom (1g : 10kg, respektivno),
- neosjetljivost na elektromagnetske smetnje,
- sigurnost i tajnost prijenosa informacija.

Sve ove prednosti ukazuju na njihovo široko područje primjene ne samo u telekomunikacijama, nego i u industriji (elektroprivreda, avioindustrija, petrokemijska industrija, vojna industrija, robotika, itd.).

Zamjena bakrenih vodiča u kućanstvima i malim uredima sa svjetlovodima za sada je relativno skupa investicija, pa su opravdana nastojanja elektroprivreda da putem svojih lokalnih distribucijskih mreža pružaju potrošačima električne energije i širokopojasne usluge.

Deregulacija energetskog tržišta (slobodna trgovina energijom) je proces koji se trenutno odvija u Europi, te zahvaljujući ovom procesu uskoro će potrošači električne energije slobodno birati svog opskrbljivača, te ga mijenjati po želji.



Slika 1.3. Prijenos energije elektroenergetskim sustavom

Takva primjena elektroenergetskih vodova može imati za posljedicu znatne gubitke u profitu telekomunikacijskih kompanija, jer kompanije koje nude isporuku električne energije mogu ponuditi usluge u području telekomunikacija [9]. Komunikacija elektroenergetskim vodovima, odnosno primjena PLC tehnologije ima središnju ulogu u tom pothvatu.

Dvosmјernom komunikacijskom vezom između transformatorske stanice i korisnika ostvaruju se brze i izravne izmjene informacija. Očekuje se da će važnost ovakvog protoka informacija biti sve veća. Tarifiranje energije postaje sve više predmetom finog strukturiranja, da bi se dobio adekvatan odgovor na ponudu i potražnju. Elektroprivreda nastoji imati uvid u potrošnju i isporuku električne energije. Da bi se to moglo ostvariti potrebno je imati informaciju o potrošnji svakog pojedinog kupca, te na taj način poboljšati električne prilike mreže. Tako postoji razlika u cijeni ovisna o vremenskom intervalu potrošnje. Npr. oko podne, ili zimi navečer kada je veća potrošnja, cijena je skuplja, a noću, u vrijeme vrućih ljetnih dana, rano ujutro kada je manja potrošnja, jeftinija. Za prijenos poruka (novi kanali) koriste se usluge elektroenergetskih kompanija za brže i lakše utvrđivanje potreba većine korisnika, te za određivanje cijene. Ovisno o potrošnji i potrebama korisnika mogu se izraditi i poslati atraktivne ponude svakom korisniku posebno. "Pametni" uređaji u zgradbi, koji su umreženi preko instalacijskih vodova i povezani s centrom upravljanja, uključuju se kada nastupi poremećaj u snabdjevanju električnom energijom. Time se osigurava smanjenje troškova u vremenskom intervalu veće potrošnje, što donosi značajnu uštedu s obzirom na visoke troškove neisporučene električne energije.

Elektroenergetske kompanije osim dostave električne energije nude pakete usluga, ovisno o potrebama pojedinih korisnika. Ovisno o tipovima usluga ovisi i količina podataka koju je potrebno razmijeniti s krajnjim korisnikom. Postoje dodatne usluge koje nisu izravno povezane s dostavom električne energije, npr. mogućnost korištenja kodiranih TV programa, prijenos govora i podataka, očitavanje mjerila vode, plina ili grijanja pod uvjetom da ova mjerila imaju odgovarajuća sučelja. Ove dodatne usluge mogu se realizirati postojećim elektroenergetskim vodovima primjenom PLC tehnologije.

PLC funkcioniра tako da se signali visoke frekvencije prenose kroz istu elektroenergetsku mrežu koja se koristi za prijenos električne energije do kućanstava. Kako signali govora i podataka ne mogu prolaziti kroz transformator koriste se uređaji koji ga premoštavaju i omogućavaju prijenos glasa i podataka niskonaponskim vodom u lokalnoj transformatorskoj stanicu za priključenje zadnjeg korisnika. U kućanstvu se koriste unutarnji uređaji (adAPTERI) za filtriranje glasa i podataka, te za provođenje do različitih kućanskih uređaja (PC, telefon, štednjak, bojler, itd.).

PLC tehnologija ima svoje korijene još u četrdesetim godinama prošlog stoljeća. Koristila se za jednostavno telemjerenje i kontroliranje električnih uređaja u mreži. Novost je integracija prijenosa električne energije i telekomunikacijskih usluga širinom pojasa 2.5 Mbit/s ili više putem niskonaponske mreže.

Dostupnost postojeće infrastrukture eliminira potrebu za izgradnjom dodatnih objekata. Instalira se podstanica, odnosno uređaji za opskrbljivača podstanice, kao i jedinice korisnika u uvjetima da se ostvari digitalni prijenos podataka elektroenergetskim vodovima. Elektroenergetski vodovi nose signale na velike udaljenosti i pritom ne zahtijevaju regeneraciju. Njihovo širenje brzinom svjetlosti čini ih vrlo pogodnim za brzo dostavljanje video i audio podataka. Nema topološkog ograničenja za elektroenergetske vodove.

Sumitomo Electric Industries, Ltd. razvio je PLC modeme koji omogućuju brzine čija brzine prijenosa podataka 45 Mbit/s, a uz poboljšanje PLC čipova očekuju se brzine do 200 Mbit/s.

Sustav omogućuje stalnu on-line vezu s potencijalno sve nižim cijenama, jer su troškovi investiranja znatno niži u usporedbi s onima koji su predviđeni za izgradnju telekomunikacijskog sustava širokopojasnog prijenosa podataka.

Međutim, prisutni su problemi s premoštenjem transformatora pa se istražuje način kako riješiti problem "*posljednje milje*" za spajanje individualnih korisnika na transformator putem elektroenergetskih vodova [10]. Ova je tehnologija još uvek u razvoju, ali su rezultati istraživanja brojnih kompanija kao što su Main.net (Israel), Ascom (Switzerland) i neke druge (od Portugala do Skandinavije, Hong Konga, Koreje, Indije, Singapura do obje Amerike) potvrdila njezinu funkcionalnost i mogućnost praktične primjene.

Korisnici u Njemačkoj služe se PLC uslugama tvrtke RWE Energie Essen and EnBW Energie Baden-Württemberg, dok u Španjolskoj korisnici koriste usluge grupe Endesa koja koristi PLC tehnologiju. U posljednje vrijeme kompanija Lina.Net of Iceland (koji je ogranač Reykjavik Energy kompanije) počela je uvoditi PLC tehnologiju s ciljem da domaćinstva što brže pristupaju Internetu preko elektroenergetske, a ne preko telefonske mreže. U Švedskoj kompanija Sydkrat, jedna od vodećih energetskih opskrbljivača u Skandinaviji, također koristi PLC sustav za priključivanje i umrežavanje korisnika.

Na novim projektima vezanim uz PLC tehnologiju New York-based Ambient surađuje s Bechtel-om, kao i s timom Consolidated Edison of New York and Southern Telecom of Atlanta, koji je podgrupa Southern Co., vodeće energetske kompanije. Rezultati ispitivanja su pokazali da se podaci mogu prenositi i primati visokim frekvencijama uz minimalne gubitke signala [9]. Posljednjih mjeseci tvrtka Ambient je postigla ukupnu brzinu više od 20Mbit/s. Preko 200 korisnika podržava se na jednom distribucijskom krugu.

Tvrtka Powerline Technologies in Reston, Virginia, testira PLC sustav zajedno s dvije tvrtke na istoku SAD i na srednjem zapadu. U prvom dijelu prošle godine kompanija je završila početno ispitivanje u predgrađima Atlante, gdje je nekoliko kućanstava imalo pristup Internet mreži kroz posebno dizajnirani modem koji postiže brzinu veću od 1.5Mbit/s.

Zahvaljujući nedavnim postignućima na području PLC tehnologije u Evropi i naporima nekoliko PLC proizvođača u SAD, sve smo bliži komercijalnoj uporabi PLC tehnologije u SAD.

PLC sustav omogućuje krajnjim korisnicima vrlo široki spektar primjena i usluga uključujući: širokopojasni pristup Internetu, prijenos glasa putem IP (Internet protokola), multimedijalne usluge, upravljanje kućanskim aparatima. PLC nudi integriranje PC-a u kućanstvu, na drugačiji način nego do sada. Kao dio niskonaponske elektroenergetske mreže, kompjuteri se lako mogu programirati da gase svjetla ili kontroliraju sigurnosne uređaje u kućanstvu. Kompanija The Homeplug Powerline Alliance (HPA), konzorcij SAD koji ima 90 članova uključujući i takve divove kao što su Cisco, Intel, Motorola, Hwelett-Packard, radi na tehnologiji povezivanja kućanskih aparata (televizori, računala, kuhala i drugo) putem kućne električne instalacije u jednu informacijsku mrežu.

Intellon je objavio svoj tzv. PowerPacketTM, set čipova elektroenergetske mreže. To je prvi proizvod koji ima potvrdu da je uskladen s HPA's 1.0 specifikacijama. Ovaj set čipova omogućuje korisnicima pristup Internetu, povezujući računala i druge kućanske aparate brzinama iznad 14 Mbit/s, spajanjem adaptera na niskonaponski priključak.

Incidenti poput zastojia napajanja električnom energijom zbog dugotrajnih perioda velikih vrućina ili velikih ispada sustava, kao što su oni u kolovozu 2003. u New Yorku, u rujnu 2003. u Italiji i u rujnu iste godine u Švedskoj do kojih je došlo zbog preopterećenosti distributivne mreže, jasno pokazuju koliko je moderno društvo ovisno o opskrbi energijom.

Ograničavajući čimbenici distribucije na energetskom tržištu su:

- povećana potražnja za električnom energijom, zbog sve veće elektrifikacije, unatoč napretku tehnologija kojima se nastoji uštedjeti električna energija,
- sve veći porast cijene primarne energije, osobito fosilnih izvora kao i sve veći troškovi održavanja opreme za snabdjevanje energijom,
- tendencija liberalizacije modernog društva, što povećava ekonomski pritisak na opskrbljivače energije,
- potreba minimaliziranja gubitaka energije, odnosno povećanje učinkovitosti distribucije.

Posljedica ovih ograničavajućih čimbenika je potreba poboljšanja učinkovitosti proizvodnje i distribucije energije zbog smanjenja troškova. Osim tehnološkog napretka, jedan od načina da se postigne povećana učinkovitost je raspolažanje informacijama o statusu distribucijske mreže, kao i mrežnim resursima u željenom vremenskom intervalu. To zahtijeva odgovarajuću komunikacijsku infrastrukturu za sakupljanje svih bitnih informacija, gdje odlučujuću ulogu ima PLC sustav. Ovakva mreža usklađena je s potrebama mreža distribucije energije. PLC je širokopojasna pristupna tehnologija koja se koristi niskonaponskom (NN) i srednjenaponskom (SN) mrežom za pružanje telekomunikacijskih usluga. Koristeći postojeću električnu mrežnu infrastrukturu dizajnira se telekomunikacijska mreža koja nudi npr.: širokopojasni pristup Internetu, telefoniju preko IP, multimedijijske i audiovizualne usluge i naravno usluge vezane uz prijenos energije.

Tijekom prošlih nekoliko godina znatno je porastao globalni interes za PLC tehnologiju. Između 2001. i 2004. godine uspješno su obavljena mnoga istraživanja u 40 različitim zemaljama svijeta kojim se potvrdila upotrebljivost PLC sustava. Tijekom ovih pokusa testirane su komercijalne i elektroenergetske usluge. PLC industrija testira novu generaciju proizvoda (do 200 Mbit/s) koji su na tržištu trebali biti dostupni u 2006. godini, povećavajući nekoliko puta širinu pojasa u odnosu na trenutačno ponuđenu, te dajući nove funkcionalnosti, čime se poboljšava učinkovitost i konkurentnost ove tehnologije.

Kompanije koje se bave distribucijom električne energije suočavaju se s prethodno navedenim ograničenjima uvjeta poslovanja i optimiziraju troškove (odnosno svode ih na razumno mjeru) s aspekta ukupne isporučene električne energije i zahtjeva korisnika, a u cilju poboljšanja kvalitete usluga i energetske učinkovitosti. Stvaranje "*inteligentnih*" distribucijskih mreža pomaže u ostvarivanju tog cilja. U realizaciji ovog izazova osobitu važnost imaju širokopojasne komunikacije elektroenergetskom mrežom preko SN vodova kao kanala za općenite svrhe. PLC tehnologija nadopunjava primjene elektroenergetskih vodova time što nudi komunikacijski kanal za mrežnu automatizaciju, mjerenje, nadzor, utvrđivanje pogrešaka i kvarova na kabelima, izolatorima, otpornicima i drugim SN elementima mreže. PLC telekomunikacijski kanal SN vodovima elektroenergetske mreže lako je zamisliti kao jedan prijenos dužine tisuće kilometara, vrijednosti više milijuna eura. Svako produžavanje životnog vijeka kabela, te prelazak s programirane sheme održavanja na održavanje temeljeno na uštedi troškova investicije i povećanju kvalitete "proizvoda" postaje još važnije u gusto naseljenim urbanim područjima. Jedan od zadataka PLC sustava je stvoriti infrastrukturu za upravljanje potrošnjom energije koja poboljšava postojeće primjene, primjerice automatsko očitavanje brojila, upravljanje distribucijskom mrežom i daljinsko upravljanje. PLC sustav omogućuje izravnu komunikaciju u korisnikovom domu putem putem IP adrese (Internet Protocol). Pri tom se uzimaju u obzir posebne značajke sustava kao karakteristika mreže, sigurnost i usklađenost sustava. Izgrađene su telekomunikacijske mreže temeljene na SN PLC tehnologiji u više od 200 transformatorskih stanica da bi se analiziralo ponašanje sustava, te detektirale pogreške u infrastrukturi. Analiziraju se parametri sustava kao dostupnost, sigurnost, vremenski odziv, integracija s centralnim sustavom kontrole distribucije.

Potrebna je i ekomska analiza za procjenu profita. PLC tehnologija je pokazala učinkovitost te je pomoć u dizajnu, radu i održavanju novog medija i NN mreža. Novi izazovi vezani su uz sigurnost. Danas i u budućnosti sustavi koji koriste pametnu opremu i komunikacije u sebi sadrže i sigurnosne sustave koji spriječavaju upade neovlaštenih osoba.

Uporaba elektroenergetskih vodova za dvosmjernu telekomunikaciju stara je ideja i našla je primjenu u kućanstavima za prijenos podataka manjih brzina u svrhu uključivanja i isključivanja električnih uređaja, regulacije rasvjete i drugo.

U našoj zemlji istražuje se upotreba elektroenergetskih vodova za prijenos podataka malom brzinom (automatsko daljinsko očitavanje brojila i sl.). Električna snaga, odnosno energija očitava se svaki mjesec. Očitavanjem električnih brojila na daljinu smanjuju se troškovi očitavanja, pa kompanije imaju dodatnu motivaciju koristiti ih za uvođenje PLC tehnologije.

*Prednosti uvođenja sustava automatskog očitavanja brojila (AMR-sustava) temeljenog na tehnologiji komuniciranja elektroenergetskim vodovima (PLC)*

Tijekom 2000. i 2001. godine tvrtka Cognyst Consulting i časopis Metering International Magazine, jedina međunarodna publikacija o brojilima i očitanju brojila, publicirali su studiju o korištenju AMR-a (*automatic meter reading*) na tržištu svih 5 kontinenata [25] zvanu "Scottovo izvješće: Međunarodno uvođenje AMR-a". Prvo izvješće objavljeno je 2001. godine, a drugo u travnju 2002. godine. Izvješće sadrži pregled AMR-industrije i proizvođača AMR-a, podatke o postojećim instalacijama AMR-a, te podatke za kontakt blizu 600 proizvođača AMR-a.

Prema izvješću iz 2001. godine, svojim iskorakom Sjeverna Amerika je otisla dalje od drugih u implementaciji AMR-a s 31,4 milijuna instaliranih AMR-jedinica, što je tada iznosilo 92,7 % od ukupnog broja instaliranih jedinica. Također, američke tvrtke dominirale su tržištem AMR-uređaja. Verzija izvještaja iz travnja 2002. pokazala je 5 % manju zastupljenost AMR-a u Sjevernoj Americi, što je vrlo značajno jer ukazuje na trend internacionalizacije uporabe AMR-a.

Jedan od značajnijih projekata u Evropi pokrenula je 2000. godine tvrtka Enel iz Italije najavom uvođenja AMR sustava za svih 27.000.000 kupaca tijekom sljedeće 3 do 4 godine uz dvosmjernu komunikaciju putem uskopojasne PLC-tehnologije. Digitalna električna brojila za potrebe ovog projekta osiguravala je tvrtka Ampy, a PLC-tehnologiju tvrtka Echelon. Do kraja ožujka 2002. godine tvrtka Enel je uvela prvi milijun AMR-jedinica. Ovako velik broj krajnjih AMR uređaja uz ostvarenje dvosmjerne komunikacije osigurao je mogućnosti uvođenja drugih aplikacija, od nadzora i upravljanja inteligentnim uređajima u kućanstvu do implementacije različitih energetskih PLC usluga. Ako se samo 1 % kućanstava odluči za korištenje još neke usluge, dolazi se do tržišta od 270.000 kućanstava.

Prema rezultatima izvješća iz travnja 2002. godine koji su dani u tablici 1.1., najraširenija komunikacijska tehnologija korištena za AMR je radijska tehnologija, a slijedi je PLC, s tim da na rezultat značajno utječe dominacija radijske tehnologije u Sjevernoj Americi. U implementiranju AMR sustava iskorak su napravile elektroprivrede, te se čak 68% instaliranih AMR-jedinica koristilo isključivo za očitanje električnih brojila. U tablici 1.1. prikazana je zastupljenost pojedinih telekomunikacijskih tehnologija obzirom na broj AMR-jedinica u implementiranim AMR-sustavima.

Tablica 1.1. *Zastupljenost pojedinih komunikacijskih tehnologija u implementiranim AMR sustavima*

<i>komunikacijska tehnologija</i>	<i>broj instaliranih AMR-jedinica</i>	<i>broj projekata</i>	<i>% zastupljenosti pojedine tehnologije</i>
<i>radijska tehnologija</i>	34.483.073	3.290	75,6 %
<i>PLC</i>	6.945.640	816	15,2 %
<i>telefonija</i>	3.482.883	1.223	7,6 %
<i>kombinirana</i>	634.713	65	1,4 %
<i>širokopojasna tehnologija</i>	25.444	47	0,056 %
<i>pogreške</i>	4.465	15	0,01 %
<i>pametne kartice</i>	2.000	1	0,004 %
<i>modbus</i>	5	1	0,00005 %
<b><i>UKUPNO</i></b>	<b>45.578.223</b>	<b>5.458</b>	<b>100%</b>

Navedimo osnovne značajke, prednosti i nedostatke najzastupljenijih komunikacijskih tehnologija: radijske, telefonije, optičke i PLC tehnologije.

#### *Radijska tehnologija*

- Informacije o očitanjima mogu se prikupljati pomoću ručnih prijamnika, pokretnih jedinica (npr. kombi) ili u čvoru fiksne mreže,
- Elektroprivreda može posjedovati cijeli radijski sustav, što pojednostavljuje i pojeftinjuje implementaciju sustava.
- Instalacija i rad su jednostavni, jer nisu potrebna nikakva dodatna kabliranja.
- Nedostatak pokretnih sustava je jednosmjernost: pokretna jedinica šalje brojilu signal "buđenja" s naredbom za rad u zahtijevanom frekvencijskom području, a brojilo odgovara slanjem zahtijevanih informacija.
- Omogućuju komunikaciju putem satelita, pri čemu se uz brojilo postavlja radiouređaj koji komunicira sa satelitom.
- Troškovi po očitanju brojila i instalacijski troškovi su veoma visoki, geografska pokrivenost nije 100 % i nije ostvariva komunikacija u stvarnom vremenu.

#### *Telefonija*

- Najstariji uređaj koji omogućuje očitanje brojila,
- brzina prijenosa je do 56 kbit/s što je više nego što zahtijeva AMR,
- široka rasprostranjenost telefonske mreže,
- širok izbor proizvoda,
- jednostavna instalacija i uporaba,
- jedinica na strani kupca može slati informacije na unaprijed određen dan i vrijeme; nedostatak ovih sustava je što elektroprivreda ne može dobiti podatke u stvarnom vremenu na zahtjev, niti može slati naredbe,
- komunikaciju može inicirati središnja jedinica smještena u elektroprivredi ili telefonska centrala; nedostatak ovog pristupa je što treba omogućiti biranje bez zvonjave na strani kupca čime se poskupljuje implementacija,
- u kućanstvu se ista linija koristila za govornu komunikaciju i očitavanje brojila što se smatra nedostatkom.

#### *Optika*

- dobar medij za prijenos velike količine podataka,
- uglavnom u vlasništvu tvrtki za kabelsku televiziju i telefonskih kompanija,
- uporaba ove tehnologije je relativno skupa zbog troškova pristupnika (gateway) koji povezuje optički kabel s kućnom instalacijom, troškova instalacije, troškova spajanja brojila na kabel i sl.

#### *PLC tehnologija*

- dvosmjerna komunikacija,
- stalna komunikacija (on-line),
- dobra geografska pokrivenost jer svako kućanstvo ima energetski kabel,
- tehnologija je još uvijek u fazi razvoja,
- domet je ograničen udaljenošću,
- u svakoj niskonaponskoj transformatorskoj stanici potrebno je ostvariti vezu s temeljnom telekomunikacijskom mrežom
- na isplativost primjene značajno utječe karakteristika distribucijske mreže (npr., u SAD-u je nepovoljnija situacija jer je na niskonaponsku transformatorsku stanicu u prosjeku spojeno samo 10 – 15 kupaca),
- PLC tehnologija omogućava implementaciju dodatnih usluga za podržavanje elektroprivredne djelatnosti, kao što su daljinsko uključenje i isključenje kupaca, upravljanje potrošnjom, automatizacija distribucijskog sustava i slično,
- PLC omogućava upravljanje svim inteligentnim uređajima priključenim na energetsku mrežu.

Osnovna prednost PLC tehnologije u odnosu na druge tehnologije je stalna veza (*on-line*) i izvrsna geografska pokrivenost. Također PLC omogućuje simetričnu, dvosmjernu komunikaciju i upravljanje uređajima priključenim na električnu mrežu. Ova tehnologija je relativno jeftina za elektroprivrednu, jer veći dio infrastrukture već posjeduje. Širokopojasni PLC sustav također podržava primjenu dodatnih usluga, kao što su pristup Internetu i govorne i negovorne komunikacije.

Prijenos, distribucija i opskrba su u Europi suočene s radikalnim promjenama. Rastući trend privatizacije, liberalizacije i konkurenčije zahtijevaju fundamentalne promjene organizacijske strukture poduzeća, poslovnih ciljeva, organizacijske kulture, kadrova, tržišta i usmjerena kupaca.

Regionalne i nacionalne elektroprivrede su uglavnom imale monopol i poslovale su u stabilnom okruženju, uz nisku stopu rizika i visoke stalne prihode. Stoga su inovacije i implementacija novih tehnologija u elektroprivredama u prošlosti bile ograničene i spore.

Otvaranje tržišta i pojavljivanje konkurenčije utjecalo je na elektroprivrede koje počinju istraživati i razvijati nove tehnologije, zbog ostvarivanja prednosti na tržištu. Jedna od tih tehnologija je i PLC tehnologija koja se može primijeniti u izgradnji telekomunikacijske mreže uporabom elektroenergetskih vodova. Uvođenje PLC tehnologije elektroprivredama može omogućiti niz prednosti, kao što su upravljanje proizvodnjom i potrošnjom električne energije, poboljšanje naplate, smanjenje troškova, zadržavanje kupaca i povećanje prihoda.

## **2. PREGLED RAZVOJA KOMUNIKACIJE ELEKTROENERGETSKIM VODOVIMA**

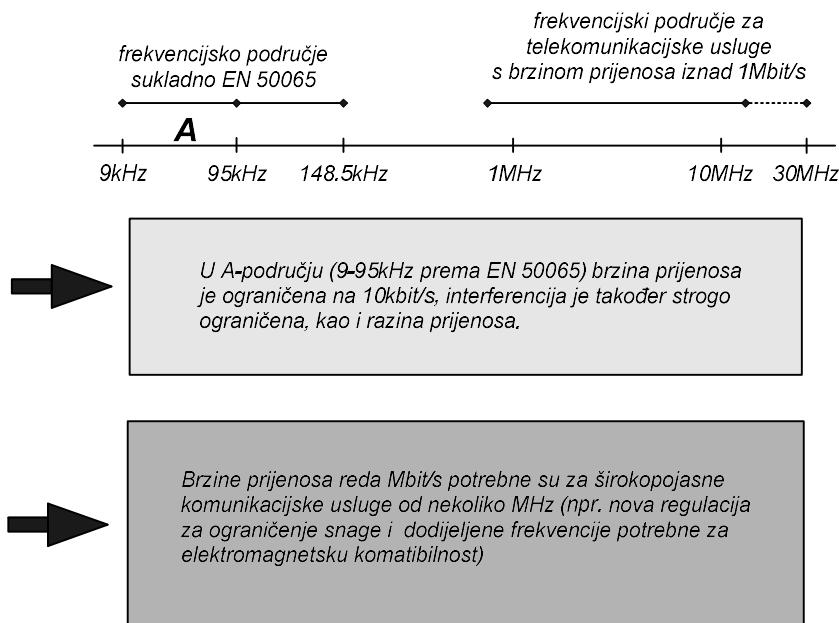
Uporaba visokonaponske elektroenergetske mreže za prijenos podataka započela je dvadesetih godina prošlog stoljeća i omogućila izravno komuniciranje između energetskih objekata povezanih visokonaponskom mrežom, posebice nadziranje radnih stanja mreže, upravljanje radom u svrhu ostvarivanja optimalne distribucije energije i rješavanja problema u mreži. Nužnost osiguravanja komunikacije između elektroenergetskih objekata rezultirala je brzim razvojem tehnike komuniciranja putem visokonaponskih vodova, poznate pod nazivom visokofrekvencijske veze po visokonapskim vodovima (VF veze po VN vodovima).

Uporaba srednjenaopnske i niskonaponske elektroenergetske mreže za prijenos podataka započela je tridesetih godina prošlog stoljeća, a koristila se u svrhu optimalne distribucije energije. Komunikacija je jednosmjerna, zahtijeva veće snage predajnika, a ostvaruje se korištenjem niskih frekvencija blizu frekvencije elektroenergetske mreže, te uključuje sve niskonaponske mreže spojene na istu srednjenaopnsku mrežu. Primjeri korištenja su: upravljanje uličnom rasvjetom, upravljanje opterećenjem i promjena tarife. Time se primjena tehnologije komuniciranja elektroenergetskim vodovima (PLC) proširila s visokonaponskih elektroenergetskih vodova, koji su stabilnije okruženje u smislu komunikacijskog kanala, na dio elektroenergetske mreže koji je puno neprikladniji za ostvarivanje komunikacije podacima, ali pogodniji za upravljanje potrošnjom električne energije i za druge mogućnosti poboljšanja elektroprivredne djelatnosti. Kako se na niskonaponsku elektroenergetsku mrežu priključuju potrošači, smetnje mogu biti velike, a uključivanje i isključivanje svakog pojedinog električnog trošila mijenja stanje u mreži. Kućanstva s pripadnim trošilima, kao i ulična rasvjeta mogu stvarati dodatne smetnje. To su razlozi da primjena PLC tehnologije na niskonaponskoj elektroenergetskoj mreži zahtijeva rješavanje niza problema s fizikalne točke gledišta.

Zadnjih tridesetak godina prošlog stoljeća istraživanja su bila usmjerena na funkcije upravljanja potrošnjom električne energije, kao što su automatsko očitavanje brojila, AMR (automatic meter reading), selektivni nadzor opterećenja i upravljanje opterećenjem. Istraživanja su vršena u frekvencijskom području od 3 kHz do 148.5 kHz što je u skladu s Europskim normama za frekvencijsko područje ispod dugovalnog područja, CELNEC (slika 2.1.). Cilj istraživanja bio je razviti sustav koji elektroprivredama omogućava promjenu opterećenja i smanjenje troškova proizvodnje električne energije [61]. Vršna opterećenja elektroenergetskog sustava zahtijevaju korištenje skupih elektrana.

Sedamdesetih godina prošlog stoljeća istraživala se primjena uskopojasne PLC tehnologije na niskonaponskoj električnoj mreži za sustave upravljanja opterećenjem (tvrtka Wisconsin Electric Power Company iz SAD-a). Pomoću tog sustava očitavala su se električna brojila za plin i vodu, s tim da su brojila bila opremljena koderima za digitalizaciju podataka.

Ranih osamdesetih godina prošlog stoljeća razvijen je sustav CALMS (Credit and Load Management System) za pružanje preciznijih podataka o potrošnji korisnika i elektroprivredi. Taj sustav elektroprivredi omogućuje bolji uvid u potrošnju električne energije, a korisniku praćenje troškova i promjenu obrasca o potrošnji električne energije radi korištenja prednosti višetarifnog sustava (engleska tvrtka South Eastern Electricity Board).



Slika 2.1. Frekvenčijsko područje za komunikaciju elektroenergetskim vodom

Sustav se temeljio na PLC tehnologiji, a jedna od ponuđenih usluga je i daljinsko očitanje brojila. Sredinom osamdesetih godina prošlog stoljeća u Velikoj Britaniji oformljen je konzorcij THORN EMI koji uvodi probnu instalaciju sustava daljinskog nadzora s 1000 korisnika. Sustav se temeljio na uporabi tehnike raspršenog spektra koja se do tada upotrebljavala isključivo u vojne svrhe. Probni sustavom ponuđene su usluge vištarifnih brojila za registriranje potrošnje električne struje, plina i vode. Nadzire se grijanje vode i prostora, a vištarifni registri bilježe potrošnju radi kasnije analize mijenjanja uzorka opterećenja, prikaza krivulje opterećenja, potrošnje i cijene. Sustav također daje informacije o pokušajima neovlaštene potrošnje. Iskustva strećena s ovim probnim sustavom većinom su pozitivna, te je na temelju dobivenih rezultata zaključeno da je potrebno nastaviti istraživanja vezana za sustav daljinskog nadzora. Kasnih osamdesetih godina prošlog stoljeća talijanska tvrtka ENEL specificirala je probnu instalaciju za svoju mrežu s namjerom ispitivanja niskonaponske elektroenergetske mreže kao medija za prijenos podataka. Ideja vodilja ovog projekta bilo je ostvarenje optimizacije korištenja raspoloživih resursa u proizvodnji električne energije, te nadziranje potrošnje korisnika. Taj je sustav projektiran za pružanje sljedećih usluga:

- periodično očitanje potrošnje za kupce priključene na mrežu,
- ugovaranje ograničenja vršnog opterećenja s kupcima električne energije,
- bilježenje maksimalnog mjesечно vršnog opterećenja,
- ograničenje ukupnog (zbirnog) vršnog opterećenja svih kupaca priključenih na mrežu kao način rješavanja kritičnih situacija u mreži,
- procjenjivanje gubitaka u mreži na temelju zbroja potrošnje individualnih kupaca i potrošnje na brojilu u transformatorskoj stanici,
- upozorenje o pokušaju neovlaštene potrošnje.

Tijekom godina nastavilo se istraživanje mogućnosti ostvarivanja dvosmjerne komunikacije elektroenergetskom mrežom. Postupci za daljinsko očitanje na niskonaponskoj energetskoj mreži

postaju osobito zanimljivi nakon deregulacije energetskog tržišta. Čitav niz proizvođača razvija uskopojasne PLC sustave namijenjene pružateljima elektroenergetskih usluga (značajnije rezultate postigne su tvrtke Schlumberger RMS, Invensys, ABB i Echelon).

Nakon početnih istraživanja uporabe PLC sustava kasnih osamdesetih godina prošlog stoljeća, zaključeno je da upravljanje opterećenjem i daljinsko očitanje brojila ne može ostvariti zadovoljavajuću dobit za pokrivanje troškova investicije, te je neophodno ponuditi i usluge koje su korisnici voljni platiti, kao što su prijenos govora ili prijenos podataka.

Tvrtka NORWEB prva počinje istraživati uporabu frekvencija iznad 1 MHz za komunikaciju niskonaponskim elektroenergetskim mrežama. Za rad tvrtke NORWEB zainteresirala se kanadska tvrtka Nortel Networks, što je 1998. godine rezultiralo formiranjem zajedničke tvrtke NOR.WEB DPL Ltd. za razvoj i promidžbu širokopojasnog pristupa Internetu ostvarenog implementacijom PLC sustava na niskonaponskim elektroenergetskim vodovima uz uporabu frekvencija iznad 1 MHz. Premda je tvrtka NOR.WEB DPL Ltd. dokazala izvedivost širokopojasne komunikacije niskonaponskom elektroenergetskom mrežom, u rujnu 1999. godine je prestala s radom.

Međutim, razvojem širokopojasnih PLC sustava nastavlja se baviti niz proizvođača, kao što su: Siemens, Ascom, Main.net, DS2, Xeline, Current Networks, Ambient Corp i Amperion. Značajan broj proizvođača širokopojasnih PLC sustava kasnije je odustao od daljnog razvoja tih sustava (npr. Siemens i Ascom), dok su ostali nastavili rad na tom području. Širom svijeta u tijeku su implementacije niza probnih instalacija širokopojasnog PLC sustava, koje su primarno usmjerene na ponudu telekomunikacijskih usluga u pristupnim telekomunikacijskim mrežama na dereguliranom telekomunikacijskom tržištu.

Deregulacija energetskog tržišta podrazumijeva njegovo otvaranje za konkurentno poslovanje za razliku od prijašnjeg monopolističkog. Na dereguliranom tržištu kupac bira između više davaljela energetskih usluga koji se natječu na tržištu, a prisutna je migracija prema strukturi cijena temeljenoj na stvarnom vremenu potrošnje električne energije za koju je bitan podatak doba dana i trajanje korištenja. Osim toga, kupci zahtijevaju pristup podacima o mjerenu potrošnje električne energije i njenoj naplati. Jedan od najvećih izazova za elektroprivrede je optimalno upravljanje ograničenim proizvodnim kapacitetima uz zadovoljavanje zahtjeva za električnom energijom. Ovo pitanje optimizacije deregulacijom i tržišnim poslovanjem dodatno dobiva na značaju. Pristup rješavanju problema je dvojak: nastojati vremenski pomaknuti potrošnju kupca (neizravan nadzor) ili osigurati nadziranje elektroenergetske mreže. Neizravan nadzor temelji se na uporabi različitih tarifnih struktura kojima se nastoji utjecati na smanjenje potrošnje energije u određena doba dana.

Nadzor elektroenergetske mreže temelji se na naprednim komunikacijskim sustavima i treba osigurati isključivanja određenih električnih trošila na strani kupaca u danim trenucima i pomicanje tih električnih usluga u manje zahtjevno vremensko razdoblje. Elektroprivredna djelatnost suočena s deregulacijom i nužno povezanim konkurentnim poslovanjem istražuje opcije kako zadržati kupce. Važnu ulogu u zadržavanju kupaca, uz kvalitetnu opskrbu električnom energijom, ima i ponuda dodatnih usluga. To vodi i do potrebe za drugačijom telekomunikacijskom infrastrukturom od postojeće, u današnjim elektroprivredama. Dolaskom deregulacije energetskog tržišta, elektroprivrede razmatraju čitav niz komunikacijskih i informatičkih aplikacija te aplikacija za usluge upravljanja energijom, kao što su automatsko očitanje brojila, mjerjenje potrošnje po vremenskim razdobljima, uočavanje neovlaštene potrošnje, upravljanje kakvoćom električne energije, daljinsko uključivanje i isključivanje kupaca i drugo. U cilju zadržavanja svojih kupaca elektroprivrede će nuditi kupcima niz usluga i pogodnosti. Žele li pružati bolju uslugu kupcu i unaprijediti svoje poslovanje, moraju ostvariti dvosmjernu

komunikaciju do svakog kupca električne energije. Dvosmjerna komunikacijska veza između transformatorske stanice i lokacije kupca osigurava značajne prednosti:

- izravnu razmjenu informacija između tvrtke za opskrbu električnom energijom i kupaca električne energije,
- brzo određivanje trenutnih zahtjeva većeg broja kupaca električne energije,
- formiranje cijene ovisno o uvjetima na tržištu na temelju poznavanja trenutnih zahtjeva za energijom,
- osim isporuke električne energije omogućuje individualne pakete usluga, ovisno o željama korisnika.

U tom smislu stalna veza s kupcima uskladjena je s njihovim načinom potrošnje, te razvojem novih usluga i ponuda. Podrške elektroprivredne djelatnosti koje omogućava uporaba PLC-tehnologije mogu se podijeliti u tri osnovne kategorije: mjerjenje, razmjena informacija i nadzor.

*Usluge kategorije mjerjenja* u osnovi pruža dvosmjerna komunikacija između kupaca i davatelja usluge. U ovu kategoriju spadaju:

- automatsko ili daljinsko očitanje brojila, (odnosi se na daljinsko prikupljanje podataka o potrošnji energije izmjerene brojilom na lokaciji kupca). Automatsko očitanje brojila pruža učinkovito organiziranje aktivnosti mjerjenja, naplate i prikupljanja podataka, poboljšanja usluge kupcu, postizanja prednosti pred konkurencijom, te registrira pokušaje neovlaštenog manipuliranja brojilom,
- daljinsko mjerjenje može se proširiti na daljinsko prikupljanje drugih vrsta podataka,
- praćenje performansi kao što su kakvoća energije i uočavanje ispada,
- elektroničko trgovanje, koje omogućava *on-line* formiranje cijene energije, a može se koristiti za optimiziranje kupovanja energije,
- prognoza potrošnje koja pomaže u optimiranju proizvodnje i kupovine energije, a osnovni izvor za predviđanje je poznavanje statistike o potrošnji;
- zaštita prihoda uočavanjem i smanjivanjem gubitaka koji nisu tehničke prirode. U tradicionalnim elektroprivredama troškovi gubitka nadoknađivali su se kroz cijenu energije, a na dereguliranom energetskom tržištu takva praksa nije uputna.

*Usluge kategorije razmjene informacija* podrazumijevaju dvosmjernu komunikaciju, ali se uglavnom odnose na povratnu informaciju koja se pruža kupcu. U ovu kategoriju spadaju:

- obračunavanje u stvarnom vremenu na temelju vremena korištenja,
- vrednovanje ugovorenog jamčenja kakvoće. Sve će češće cijenu i kakvoću energije određivati ugovor između kupca i elektroprivrede ili druge opskrbe. Uvid u detaljan profil korištenja pomoći će objema stranama definirati optimalan ugovor i vrednovati odredbe ugovorenog,
- statistike o korištenju, vizualizacija i analize daju uvid u zahtjeve za energijom i potrošnju energije;
- savjetodavne usluge, koje elektroprivrede mogu davati na temelju poznavanja svojih kupaca i na taj način postići prednost pred konkurencijom.

*Usluge kategorije nadzora* podrazumijevaju dvosmjernu komunikaciju. Komunikacija od kupca prema elektroprivredi u principu je ista kao i kod usluga kategorije mjerjenja. Međutim, komunikacija od elektroprivrede prema kupcu namijenjena je utjecaju na kupca temeljem više ili manje autonomnih odluka. U ovu kategoriju usluga spadaju:

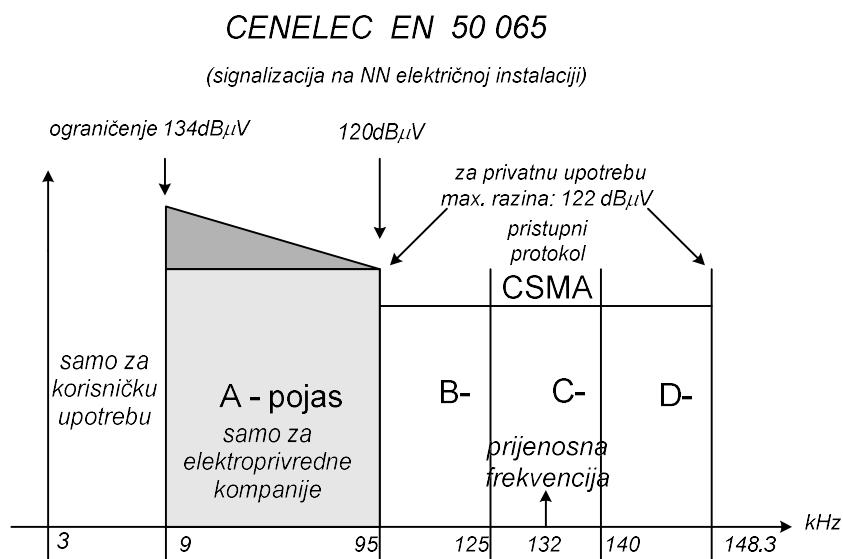
- nadzor nad proizvodnjom i potrošnjom energije, tj. upravljanje opterećenjem (oblikovanje krivulje opterećenja);

- upravljanje opterećenjem podrazumijeva mogućnost raspoređivanja opterećenja, čime se osigurava nadziranje zahtjeva potrošača, što rezultira učinkovitijim distribuiranjem potrošnje energije i smanjenjem vršnih opterećenja;
- individualno upravljanje energijom što se odnosi na davanje prednosti određenoj vrsti energije ("zelena" energija, izbor temeljen na cijeni, i drugo);
- isključenje napajanja u slučaju neplaćanja računa za potrošnju električne energije.

Implementacija ovih usluga smanjuje troškove elektroprivredama i poboljšava odnos s kupcima električne energije, čime se povećava njihova lojalnost.

## 2.1. Europske norme i strategija razvoja

Norma EN 50065 definira dijelove frekvencijskog područja od 3 do 148.5 kHz koji su namijenjeni za korištenje elektroenergetskim kompanijama i rezidencijalnim korisnicima [58]. Prihvaćena je i objavljena krajem 1991. godine. Na slici 2.2. prikazani su frekvencijski pojasevi A, B, C i D definirani normom EN 50065.



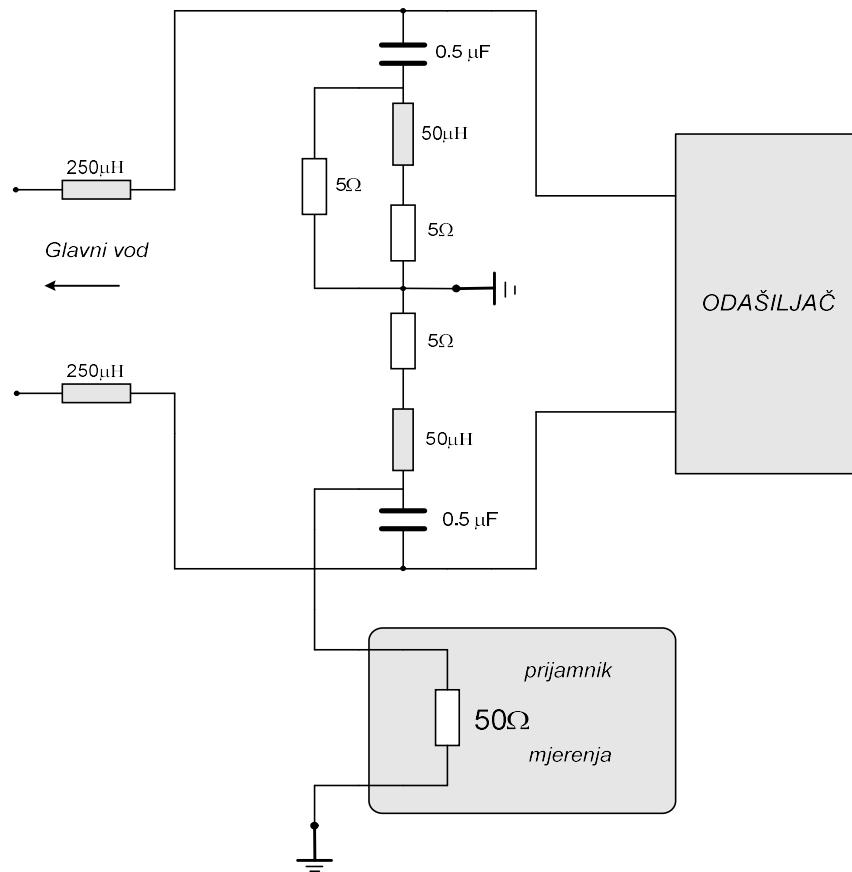
Slika 2.2. Frekvencijski pojasevi i ograničenja razina PLC signala specificiranih u EN 50065

Norma EN 50065 znatno se razlikuje od ostalih normi, npr. onih koje se primjenjuju u SAD ili Japanu gdje raspoloživo frekvencijsko područje iznosi približno 500 kHz. Osim toga, u tim je zemljama dopušteno ubacivanje signala između neutralnog vodiča i zaštitnog uzemljenja. Uporaba zaštitnog uzemljenja znači da je interferencija vrlo niska. Kako postoje razlike u normama ne može se kupiti PLC sustav u SAD ili Japanu i koristiti u Europi. Svi pokušaji da se uvezena oprema prilagodi tako da odgovara normama EN 50065 do sada su bili neuspješni.

Europska norma definira frekvencije za komunikaciju putem elektroenergetskih vodova ispod dugovalnog područja frekvencija. Slika 2.2. prikazuje podjelu raspoloživog frekvencijskog područja na dva dijela: na frekvencije ispod 95 kHz (A pojas) rezervirane za korištenje elektroprivrednim kompanijama, dok su frekvencije od 95 do 148.5 kHz (B, C i D pojasevi)

rezervirane za rezidencijalne korisnike [58]. Maksimalna razina signala od  $122 \text{ dB}\mu\text{V}$  ( $\sim 1.25\text{V}$ ) dopušta se u B, C i D pojasevima, dok je dopuštena razina u A pojasu veća i iznosi  $134 \text{ dB}\mu\text{V}$  ( $\sim 5\text{V}$ ) na  $9 \text{ kHz}$ , nakon toga se snižava na  $120 \text{ dB}\mu\text{V}$  ( $\sim 1\text{V}$ ) na  $95 \text{ kHz}$  kao što prikazuje slika 2.2. Zbog mosnog spoja definiranog mjernom normom (slika 2.3.), razina PLC signala dopuštena u stvarnosti na niskonaponskim vodovima je do dva puta veća, tj.  $10 \text{ V}$  na  $9 \text{ kHz}$ , i smanjuje se na  $2 \text{ V}$  na  $95 \text{ kHz}$ . Mjerna norma također definira upotrebu dvostrukе vrijednosti, tj.  $2.4 \text{ V}$  u B, C i D pojasevima, dok ne definira protokole za pristup korisnika prijenosnom mediju u A, B i D pojasevima.

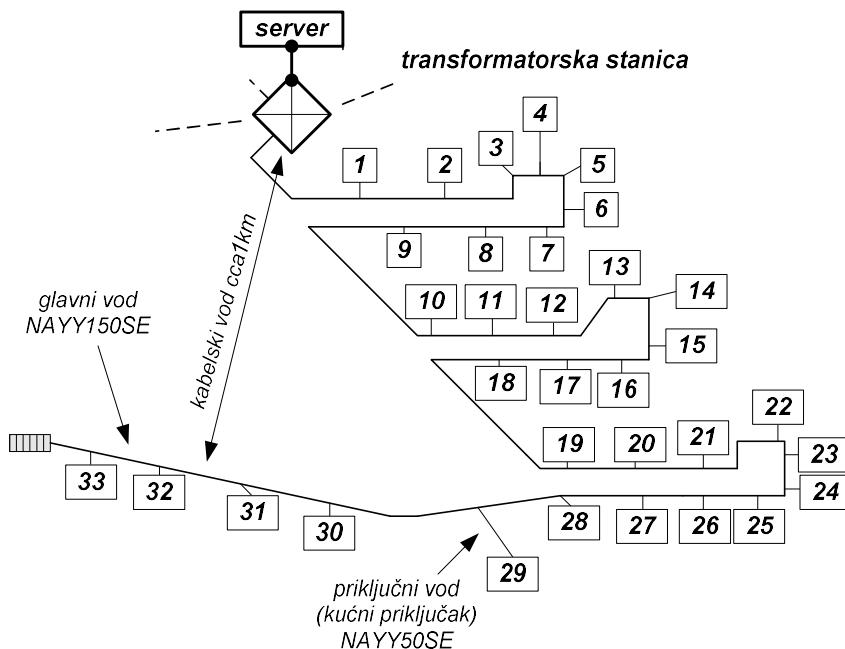
Međutim, određuje se protokol poznat pod nazivom višestruki pristup otkrivanjem nosioca i otkrivanjem sudara (paketa), CSMA/CD (carrier – sense multiple access) za uporabu u frekvencijskom pojasu C. Primjena tog protokola dobro je poznata u lokalnim mrežama klase Ethernet koji omogućuje višestruki pristup korisnika zajedničkom prijenosnom mediju. Međutim, primjena protokola CSMA/CD u C pojasu pokazala se problematičnom u praksi, jer se zbog velikog prigušenja signala na elektroenergetskom vodu ne može jamčiti demodulacija reguliranog signala kada postoji veliki broj korisnika kojima se on prenosi, npr. u velikim zgradama.



Slika 2.3. Mjerenje razina signala definiranih s normom EN 50065

Najvažniji dio frekvencijskog područja (slika 2.3.) koji je dopušten za uporabu u elektroprivredi je A pojas ( $9 - 95 \text{ kHz}$ ) [58]. Pravila mjerne regulacije EN 50065 određuju da

amplituda prijenosnog signala mora imati najvišu i konstantnu vrijednost na izlazu pojasnog filtera u širini 100 kHz. Posljedica toga je da modulacijske metode koje koriste širokopojasni prijenosni signal imaju prednosti pred uskopojasnim metodama. Frekvencijsko područje predviđeno za privatne korisnike dijeli se u tri pojasa koji su poznati pod nazivima B, C i D pojasevi. Zajednička značajka ovih pojaseva je da se ne smije prekoračiti prijenosna razina od  $122 \text{ dB}\mu\text{V}$  ( $\sim 1.25\text{V}$ ), što je slično regulaciji za A pojas. Jasno je da je razina niža u usporedbi s onom u A pojasu što se može objasniti kraćim udaljenostima unutar zgrada. Iako EN 50065 specificira odvajanje elektroprivrednih kompanija i privatnih korisnika što se tiče uporabe frekvencija, ipak veliki broj značajnih primjena zahtijeva funkcionalnu međuzavisnost oba prijenosna područja. Temeljem norme EN 50065 danas su dostupne tehnologije koje omogućavaju dvosmerni prijenos podataka brzinama do nekoliko tisuća bit/s. Često je i nekoliko stotina kućanstava izravno povezano preko distribucijske mreže koja se istodobno napaja preko zajedničkog transformatora. Mreža zvjezdaste topologije obično se dijeli na nekoliko ograna (slika 2.4.). Ova slika prikazuje jedan od deset ograna s nizom priključenih korisnika. Maksimalna udaljenost između dva modema može iznositi do 1 km.



Slika 2.4. Tipična topologija razvoda u jednom stambenom području [14]

Izlazni spektar prijenosnog uređaja utvrđuje se uporabom analizatora spektra s detektorom najviše vrijednosti unutar širine pojasa od 100 Hz. Predajnik funkcioniра na način da širina pojasa i izlazni signal pokazuju maksimalne pristupne vrijednosti u skladu s informacijama proizvođača. Širina spektra pojasa B (u Hz) utvrđuje se na osnovi širine područja frekvencija u kojem su sve linije spektra manje za 20 dB od maksimalne linije spektra. Izlazni nivo se mjeri tijekom vremenskog raspona od jedne minute korištenjem detektora najveće vrijednosti. Ova vrijednost se može dobiti korištenjem analizatora spektra s propusnim pojasmom jednakim ili većim od širine pojasa B na izlazu predajnika. Izmjereni nivo ne smije prekoračiti  $134 \text{ dB}\mu\text{V}$  na 9 kHz, a zatim se

linearno smanjuje na 120 dB $\mu$ V pri 95 kHz na logaritamskoj frekvencijskoj skali. Za širokopojasne signale, tj. signale širine pojasa iznad 5 kHz, izmjereni nivo ne prelazi 134 dB $\mu$ V. Spektar signala, koji se mjeri korištenjem detektora najveće vrijednosti sa širinom pojasa 200 Hz, ne prelazi 120 dB $\mu$ V ni u jednom frekvencijskom pojasu.

Osim signalne amplitude za širokopojasne signale norma EN50065 ograničava i širinu spektra prenesenog signala. Za ispitivanje se koristi pojasnoprpusni filter širine 200 Hz. Dopuštena amplituda širokopojasnog signala može biti veća od amplitude uskopojsnog signala što daje prednost širokopojasnim signalima. Ograničenje spektra je odlučujuće za širokopojasne signale. Temeljem norme EN50065 u natavku ovog poglavlja opisuje se učinak ograničenja nivoa signala kao i spektra signala na maksimalnu prijenosnu snagu prijenosnog sustava vezano uz definirane principe mjerjenja.

### 2.1.1. Učinak ograničenja nivoa signala

Mjerni filter ima širinu pojasa veću ili jednaku pojasnoj širini signala. Prijenosni signal  $s(t)$  prijenosnog sustava tako nije izmijenjen mjernim filterom. Vrijednost nivoa signala izmjerena detektorom najveće vrijednosti može se izraziti relacijom:

$$s_p = \max \{ |s(t)| \}. \quad (2.1.)$$

S najvećom vrijednosti od

$$s_p = \max \{ s^2(t) \} = s_p^2 \quad (2.2.)$$

i radnom snagom  $S = E\{s^2(t)\}$  može se definirati omjer stvarne i korisne snage  $X = \frac{S_p}{S}$ , gdje je  $E\{s^2(t)\}$  očekivana vrijednost. Kada se koristi maksimalna širina signala  $\hat{s}$  za utvrđivanje dopuštenog ograničenja vrijednosti na izlazu detektora najviše vrijednosti za maksimalnu prijenosnu snagu vrijedi  $S_{\max} = \frac{S_{p1\max}^2}{X}$ . Tablica 2.1. prikazuje odnos najveće i najmanje snage  $\chi$ , maksimalnu prijenosnu snagu  $S_{\max}$  i srednju vrijednost prijenosne amplitute  $A_m = \sqrt{2 \cdot S_{\max}}$  za tri različite modulacijske metode [12]. Maksimalna razina signala  $\hat{s}$  pri mjerenu je podešena na 134 dB $\mu$ V u skladu s normom EN50065.

Tablica 2.1. Maksimalna prijenosna snaga s ograničenjem nivoa signala sa tri različite modulacijske metode [7]

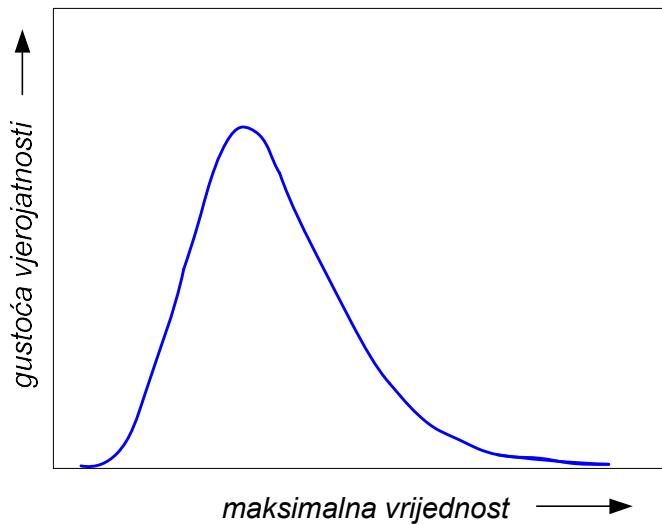
<b>modulacijske sheme</b>	<b><math>\chi</math></b>	<b><math>S_{\max}</math></b>	<b><math>\bar{A}</math></b>
<b>unipolarni ASK</b>	4	$6.28 \text{ V}^2$	$3.54 \text{ V}$
<b>PSK</b>	2	$12.56 \text{ V}^2$	$5 \text{ V}$
<b>16 - QAM</b>	3.6	$6.98 \text{ V}^2$	$3.74 \text{ V}$

Može se zaključiti da će ograničenje razine signala biti nedostatak za modulacijske sheme s promjenljivom prijenosnom amplitudom (amplitudna digitalna modulacija, *amplitude shift keying*,

ASK; *quadrature amplitude modulation, QAM*). Razlika maksimalne prijenosne snage pri primjeni modulacijskih shema PSK (fazna digitalna modulacija, *phase shift keying*) i unipolarne ASK iznosi 3 dB, a pri primjeni PSK i 16-QAM 2.55 dB [8].

### 2.1.2. Učinak ograničenja spektra signala

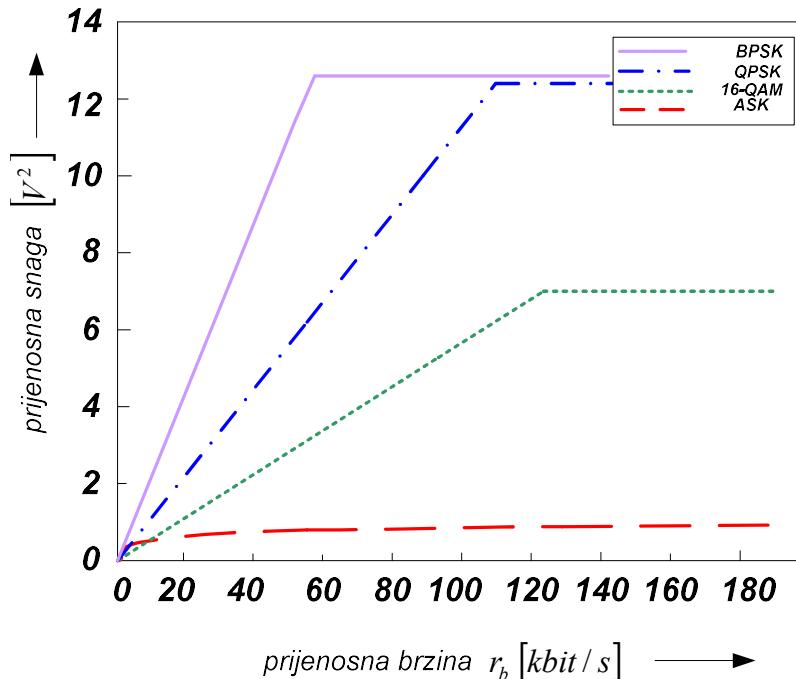
Odnos između prijenosne snage i najveće vrijednosti izlaza mjernog filtera je prilično složen kod širokopojasnih signala i ovisi o upotrebljenoj modulacijskoj shemi [62]. Potrebno je obraditi pozornost na utvrđivanje najvećih vrijednosti signala vezano uz pridržavanje ograničenih statističkih vrijednosti telekomunikacijskih signala koji se prenose putem elektroenergetske mreže. Još uvijek se raspravlja treba li mjeriti "kvazi najviše vrijednosti" ili najviše vrijednosti. Specificiranje mjerena najviših vrijednosti spektra signala rezultirat će znatnim nedostacima za komunikaciju elektroenergetskim vodovima, jer moderne digitalne prijenosne metode koje se uobičajeno koriste prenose širokopojasne signale nasumice (metoda slučajnog uzorka). Što su sofisticirane ove metode distribucija amplituda prijenosnog signala sve se više približava Gaussovoj distribuciji. Međutim, kako je vjerojatnost da će se dogoditi najviše vrijednosti vrlo mala, dobivanje tih vrijednosti putem mjernih tehnologija nije moguće. Učinak interferencije je nizak. Važno je sagledati gustoću vjerojatnosti najvećih vrijednosti na izlazu detektora, a zatim uskopojasnog filtera ( $B = 200\text{Hz}$ ) širokopojasnih PLC signala. Slika 2.5. prikazuje gustoću vjerojatnosti srednjih vrijednosti, dok su vrlo velike i vrlo male vrijednosti rijetke [62].



Slika 2.5. Gustoća vjerojatnosti maksimalnih vrijednosti karakterističnog prijenosa signala elektroenergetskim vodovima

U praktičnim mjeranjima ovo znači da dobivanje velike vrijednosti odziva ovisi o trajanju mjerjenja. Što je duže vrijeme mjerena veća je vjerojatnost da se dobije veći odziv. Slike 2.6. i 2.7. prikazuju maksimalnu prijenosnu snagu i maksimalnu energiju po bitu respektivno za 4 različite

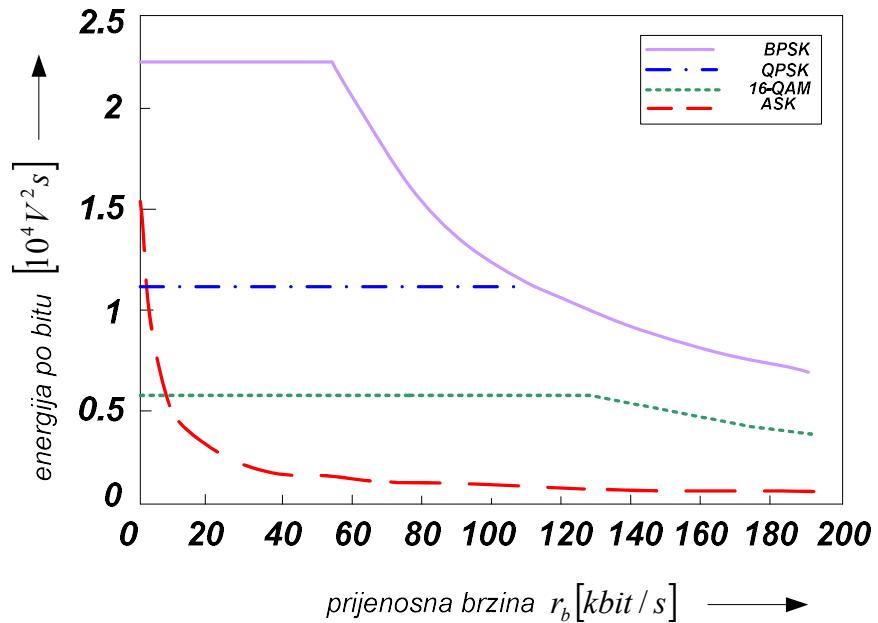
modulacijske sheme, ovisno o ritmu izmjene prijenosne brzine  $r_b$  [62]. U skladu s normom pri mjerenu se koriste slijedeći parametri: *mjerena širina pojasa*  $B_M$ , *maksimalna amplituda signala*  $\hat{s}$ , *vrijeme mjerena* 1 min



Slika 2.6. Ovisnost maksimalne prijenosne snage o prijenosnoj brzini pri uporabi različitih modulacijskih shema

Slika 2.6. prikazuje porast prijenosne snage pri uporabi različitih modulacijskih shema s potiskivanjem nosioca (binary phase shift keying BPSK, quadrature phase shift keying QPSK i QAM) ovisno o prijenosnoj brzini. Iz slike 2.6. se vidi da se prijenosna snaga ne povećava iznad određene prijenosne brzine, jer je odlučujuće ograničenje razine signala, a ne ograničenje spektra signala. Pri primjeni ASK modulacije prijenosna snaga se povećava vrlo polako, proporcionalno s frekvencijom. Ona je otprilike ista, tj. asimptotski ograničena vrijednost. Pri primjeni ASK modulacije događa se samo lagano širenje spektra povećanjem brzine prijenosa tako da veliki dio prijenosnog signala uvijek pada unutar pojasne širine mjernog filtera. To znači da ASK ne osigurava dobru kvalitetu prijenosa za područje dopušteno normom EN 50065.

Važan parametar za usporedbu sposobnosti primjene prijenosnih metoda je energija po bitu. Što je veća ova vrijednost na prijamniku, u odnosu na gustoću snage interferencije koja tamo postoji, to će se manje pogrešaka događati u prijenosu. Uobičajeno se koristi vjerojatnost pogreške po bitu u funkciji omjera energije po bitu  $E_b$  i gustoće šuma  $N_0$  kao pokazatelj kakvoće prijenosa [69].



Slika 2.7. Ovisnost maksimalne energije po bitu o prijenosnoj brzini pri uprabi različitih modulacijskih shema

U uobičajenoj komunikacijskoj tehnologiji uzima se u obzir ograničena snaga signala. Koristeći ovu ograničenu vrijednost, energija po bitu pada obrnuto proporcionalno prijenosnoj brzini podataka (slika 2.7.). Trajanje podatkovnog bita smanjuje se povećanjem brzine. Situacija je potpuno različita u komunikaciji putem elektroenergetskih vodova. Ova razlika je očigledna iz slike 2.7. koja prikazuje ovisnost energije po bitu o prijenosnoj brzini za 4 različite standardne modulacijske sheme [62]. U shemama BPSK, QPSK i QAM energija po bitu ostaje konstantna do granične vrijednosti razine signala. Usporedba ovih shema pokazuje da je do brzine 56 kbit/s energija po bitu pri primjeni modulacijske sheme BPSK 4 puta veća od one kod 16 QAM. Iznad 110 kbit/s samo BPSK može prenositi istu energiju po bitu kao QPSK. QAM uvijek ima lošiju karakteristiku nego BPSK i QPSK zbog nepovoljnog odnosa snaga (maksimalna prema utošenoj). Energija po bitu, kod primjene ASK modulacije, ubrzano se smanjuje kako se povećava brzina prijenosa. Iznad 10 kbit/s ASK shema osigurava znatno nižu energiju po bitu u usporedbi s drugim metodama.

#### Odabir modulacijske sheme za projektiranje PLC sustava

Projektiranje PLC komunikacijskog sustava slijedeće generacije za veće podatkovne brzine zatijeva u prvom redu poznavanje karakteristike kanala kao što su prijenosna funkcija, otpornost na interferenciju i kapacitet kanala. Drugim rječima, pri projektiranju treba prvo postaviti/odabrati odgovarajući model kanala elektroenergetskog voda. Međutim, projektiranje komunikacijskog kanala za prijenos po elektroenergetskom vodu na visokim frekvencijama veoma je zahtijevno, jer takvi kanali nikad prije nisu bili projektirani.

Prigušenje kanala i šum određuju kapacitet koji se može koristiti za komunikacije. Procjena kapaciteta za elektroenergetske linkove ukazuje da se prijenos podataka puno većim brzinama od

dosadašnjih može smatrati isplativim. Da bi se razvili sustavi s velikim kapacitetom kanala potrebno je pažljivo odabrat modulacijsku shemu i prilagoditi je za optimalni PLC sustav, jer se povećanje brzine podataka ne može ostvariti povećanjem pjasne širine ili dodjeljivanjem novih frekvencijskih područja. To znači da se samo uporabom sofisticiranih modulacijskih shema može poboljšati iskoristivost spektra ili odgovarajućom adaptacijskom strategijom povećati otpornost na impulsni šum i povećati brzina prijenosa podataka.

U nastavku ovog poglavlja usporedit će se parametri modulacijskih shema koje dolaze u obzir za pronalaženje optimalnog rješenja za PLC sustav. To su:

- tehnike raspršenog spektra, SST (Spread Spectrum Techniques),
- shema s jednim širokopojasnim nosiocem, bez ujednačivača (ekvalizatora),
- shema s jednim širokopojasnim nosiocem i ujednačivačem,
- shema s više širokopojasnih nosioca i s ujednačivačem,
- shema višestrukog prijenosa s frekvencijskom raspodjelom (kanala) i ortogonalnim nosiocima, OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

Kriteriji odabira najpogodnije modulacijske sheme su:

- iskoristivost spektra - izražena brojem bitova u sekundi koji se mogu ubaciti u 1 Hz pojase širine primjenom određene modulacije, tj.  $bit/(s \cdot Hz)$ ,
- maksimalna brzina prijenosa podataka  $Mbit/s$ ,
- otpornost na kanalna izobličenja,
- otpornost na impulsni šum,
- svojstva fleksibilnosti i prilagodbe,
- cijena sustava,
- elektromagnetska kompatibilnost (EMC).

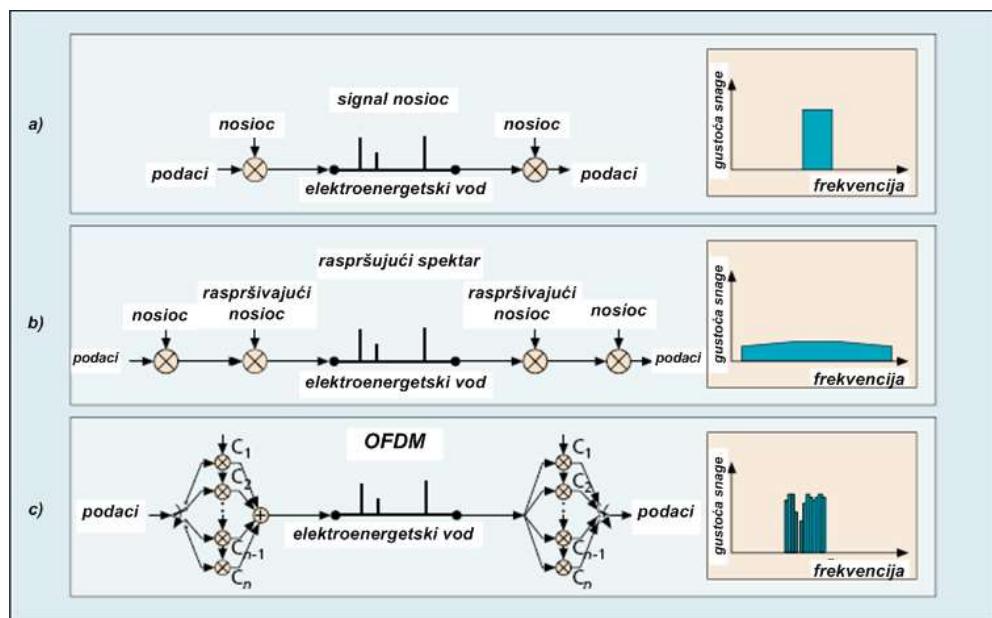
*Tehnike raspršenog spektra* odlikuju se imunošću na selektivno prigušenje i na sve vrste uskopojasnih smetnji (interferencija) uzrokovanih djelovanjem neželjenih signala u komunikacijskom sustavu, malom iskoristivosti spektra (što je nepovoljno zbog ograničenih spektralnih resursa, pa je u PLC tehnologiji cilj postići maksimalnu iskoristivost spektra) i niskom spektralnom gustoćom snage što je pogodno s gledišta elektromagnetske kompatibilnosti (tablica 2.2.). Osim toga, višestruki pristup mediju može se ostvariti s kodiranom raspodjelom po vremenu i frekvenciji, CDMA (Code Division Multiple Access) bez globalne koordinacije ili sinkronizacije.

Iz slike 2.8.b) se vidi da se pri prijenosu koristi jedan zajednički nosioc u kojega se utiskuju podaci konvencionalnim modulacijskim postupkom. Svakom pojedinom sudioniku u prometu dodjeljuje se individualni raspršujući kod koji je ortogonalan u odnosu na kodove svih drugih sudionika, čime se postiže značajno proširenje pojase širine signala koji se prenosi. Na pojasnoj strani obavlja se konvencionalna demodulacija. Međutim, ako se na prijamniku pojavi uskopojasni signal smetnje (primjerice signal radio stanice), on je podvrgnut procesu raspršenja, pa samo mali dio korisnog (informacijskog) signala može biti oštećen [74].

Tablica 2.2. Usporedba različitih metoda prijenosa za komunikaciju elektroenergetskim vodovima

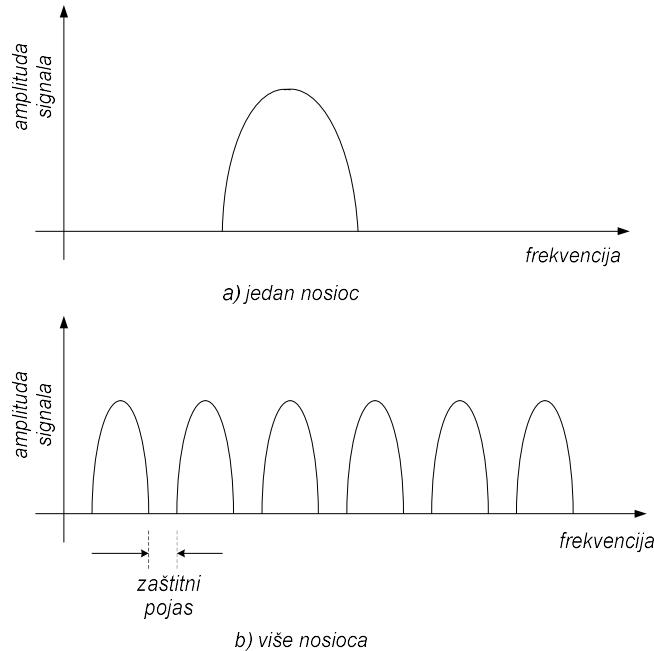
Modulacijske sheme	spektralna učinkovitost [b/(sHz)]	maksimalna brzina prijenosa podataka [Mb/s]	otoprnost na kanalna izobličenja	otpornost na impulsni šum	svojstva fleksibilnosti i prilagodljivosti	troškovi sustava	EMC
tehnika raspršenog spektra	< 0.1	~ 0.5	-	0	--	--	+
shema s jednim širokopojasnim nosiocem bez ekvalizatora	1 - 2	< 1	--	+	--	++	--
shema s jednim širokopojasnim nosiocem s ekvalizatorom	1 - 2	~ 2	+	+	0	-	-
shema s više širokopojasnih nosioaca s ekvalizatorom	1 - 4	~ 3	+	0	0	-	0
OFDM	>> 1	> 10	++	0	++	-	+

Primjenom CDMA sheme svaki sudionik može koristiti čitavi frekvencijski pojas, pa pristup mediju ne treba biti koordiniran. Međutim, svaki aktivni sudionik povećava pozadinski šum. Što je broj aktivnih sudionika veći, vjerojatnost uzajamnih smetnji je veća. Stoga broj sudionika u prometu uvijek mora biti manji od tzv. dobitka obrade signala, PG (Processing Gain) koji se izražava omjerom pojase širine prenesenog signala i pojase širine signala poruke nakon konvencionalne modulacije. U praksi PG treba biti između 10 i 100, inače CDMA sustav postaje neotporan na smetnje. Ako se CDMA sustav ispravno dizajnira, svaki novi sudionik će generirati samo mali, dobro kontrolirani dio interferencije za ostale sudionike.



Slika 2.8. Transmisijske metode za ostvarivanje komunikacija putem elektroenergetskih vodova  
Modulacijska shema s jednim nosiocem koristi samo jedan nosioc na frekvenciji  $f_0$ .  
Informacija je sadržana u promjenama amplitude, faze ili frekvencije nosioca. Ovisno o brzini tih

promjena oko nosioca  $f_0$  generira se signal veće ili manje pojasne širine  $B$ . Međutim, ova modulacija bez ujedničavača ili s njim omogućuje spektralnu iskoristivost samo  $1 - 2 \text{ bit}/(\text{s} \cdot \text{Hz})$  i maksimalne prijenosne brzine do približno  $2 \text{ Mbit/s}$ , respektivno.



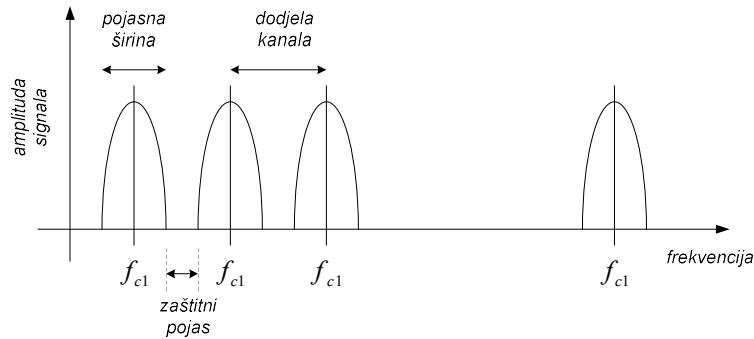
Slika 2.9. Konvencionalna modulacija: a) s jednim nosiocem  
b) s više nosioca

U pristupnoj domeni, gdje tipično kašnjenje signala iznosi približno  $10 \mu\text{s}$ , dogodit će se intersimbolna interferencija, tj. neželjeno djelovanje među simbolima, što ima za posljedicu smetnje u digitalnom prijenosu sa podatkovnim brzinama daleko ispod  $100 \text{ kbit/s}$ . Da bi se eliminirala ili barem minimizirala interferencija među simbolima potrebno je korigirati amplitudnu i faznu karakteristiku. Taj je postupak poznat još u klasičnim komunikacijama pod nazivom ujednačavanje (ekvalizacija). Uredaj (transferzalni filter) kojim se obavlja taj postupak, tj. uređaj za kompenzaciju neželjenog amplitudno-frekvencijskog ili fazno-frekvencijskog odziva naziva se ujednačavač (ekvalizator). Kako je uporaba skupih kanalnih ujednačavača neophodna, prednost jednostavnosti modulacije s jednim nosiocem na taj se način gubi. Ideja o paralelnom prijenosu podataka uporabom više različitih uskopojasnih nosioca starija je od 40 godina. Frekvencijski spektri nosioca u konvencionalnim sustavima nisu se međusobno prekrivali, jer su bili odijeljeni s žičanim pojasevima (slika 2.9.b). Međutim, osnovni nedostatak prijenosa s jednim i više nosioca u konvencionalnim sustavima bilo je slabo iskorištenje frekvencijskog spektra.

Cilj projektiranja učinkovitog sustava s paralelnim odašiljanjem signala je postići *učinkovito iskorištenje frekvencijskog spektra* uz zanemarivo preslušavanje između susjednih kanala. Taj cilj može se ostvariti uporabom *multipleksiranja s višestrukim ortogonalnim podnosiocima* u

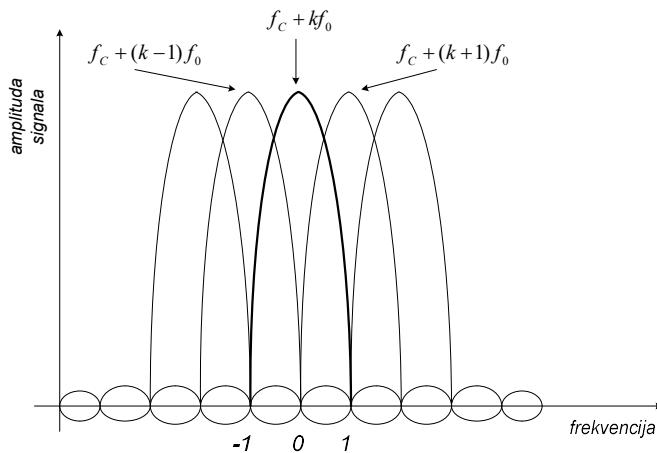
*frekvencijskoj domeni*, OFDM, tj. uporabom ortogonalnih podnosioca, čime se eliminira potreba zaštitnih pojaseva između njih. Pri primjeni OFDM sheme raspoloživi frekvencijski spektar dijeli se na veliki broj podnosioca, odnosno podkanala koji se dodjeljuju različitim korisnicima.

U tom pogledu OFDM pristup sličan je *višestrukom pristupu s frekvencijskom raspodjelom* (kanala), FDMA (Frequency Division Multiple Access) koji je prikazan na slici 2.10.



Slika 2.10. FDMA pristup

Međutim, frekvencijski spektar upotrebljava se znatno učinkovitije u OFDM sustavu, jer su razmaci između podkanala znatno manji, a spektri podkanalnih podnosioca mogu se prekrivati (slika 2.11.). Podnosioci u OFDM signalu postavljeni su međusobno toliko blizu koliko je to teorijski moguće. Blok (paket) bitova prenosi se paralelno, niskom brzinom. Primjenom OFDM sheme raspršuje se utjecaj fedinga na mnogo bitova, što je povoljnije nego ako je nekoliko susjednih bitova potpuno uništeno fedingom.



Slika 2.11. Spektri pet podnosioca

OFDM sustav može se ostvariti ako se zadovolji uvjet ortogonalnosti između podnosioca, odnosno, ako je frekvencijski razmak između dva susjedna podnosioca ( $\Delta f$ ) jednak recipročnoj

vrijednosti trajanja simbola ( $T$ ), tj.  $\Delta f = \frac{1}{T}$ . Odatle dolazi i naziv OFDM za tako formirani multipleksni signal. Drugim rječima, ako je trajanje OFDM simbola  $T$ , tada su frekvencije podnosioca  $1/T, 2/T, 3/T, \dots$ . Iz slike 1.4. se vidi da su podnosioci međusobno ortogonalni, što znači da snaga svakog signala poprima vršnu vrijednost kada je snaga susjednih signala u promatranom podkanalu jednaka nuli, pa susjedni podkanali ne interferiraju jedan s drugim. Drugim riječima, ortogonalnost između podnosioca podrazumijeva da vršna vrijednost svakog podnosioca odgovara nulama svih drugih podnosioca. Ortogonalnost je svojstvo koje omogućuje većem broju informacijskih signala prijenos po zajedničkom kanalu i njihovu detekciju bez interferencije. Gubitak ortogonalnosti ima za poslijedicu degradaciju kakvoće prijenosa. OFDM uvjet ortogonalnosti izražen je jednačbama (2.3.), (2.4.), (2.5.).

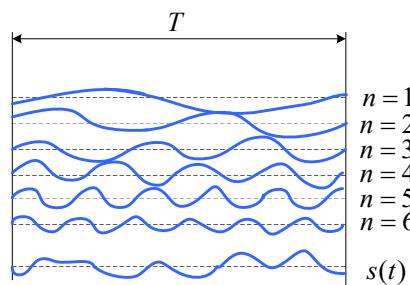
$$\int_0^T \cos(2\pi n f_0 t) \cdot \cos(2\pi m f_0 t) dt = \begin{cases} \frac{T}{2} & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \quad (2.3.)$$

$$\int_0^T \sin(2\pi n f_0 t) \cdot \sin(2\pi m f_0 t) dt = \begin{cases} \frac{T}{2} & (m = n) \\ 0 & (m \neq n) \end{cases} \quad (2.4.)$$

$$\int_0^T \cos(2\pi n f_0 t) \cdot \sin(2\pi m f_0 t) dt = 0 \quad (2.5.)$$

Skupovi funkcija su ortogonalni, ako zadovoljavaju uvjete u jednadžbi (2.3.) ili (2.4.). Ako se bilo koje dvije funkcije iz skupa pomnože i integriraju preko perioda simbola, rezultat je nula za ortogonalne funkcije (jednadžba 2.5.) Drugim riječima, podnosioci su međusobno ortogonalni, jer ako se pomnože valni oblici bilo koja dva podnosioca i integriraju preko perioda simbola rezultat je jednak nuli.

Pri primjeni OFDM aktualni digitalni tok iz izvora digitalnog signala dijeli se na  $N$  paralelnih digitalnih tokova, a svaki od njih modulira dodijeljeni uskopojasni podnosioc. Modulacija se obavlja uporabom nekoliko bitova (uobičajeno 2 do 5 bitova), pri čemu se utječe na promjenu amplitudu i fazu svakog podnosioca. Napomenimo da svaki podnosioc ima cijeli broj ciklusa po simbolu (1, 2, 3, 4, 5 i 6 ciklusa, respectivno – na slici 2.12.).



Slika 2.12. OFDM signal u osnovnom pojusu

Iz slike 2.12. se vidi da OFDM signal  $s(t)$  čini zbroj šest sinusoida, odnosno šest podnosioca, a može se izraziti jednadžbom:

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} [a_n \cos\{2\pi(f_0 + nf_0)t\} - b_n \sin\{2\pi(f_0 + nf_0)t\}] \quad (2.6)$$

Može se zaključiti da se pri prijenosu informacija primjenom OFDM modulacije upotrebljava veliki broj paralelnih uskopojasnih podnosioca umjesto jednog širokopojasnog nosioca. To ima za poslijedicu malu brzinu simbola i smanjenje međusimbolne interferencije. Treba napomenuti da se binarni korisnički simboli ("0" i "1") uporabom OFDM modulatora preslikavaju u OFDM simbole, a zatim OFDM simboli moduliraju podnosioce uporabom inverzne Furrierove transformacije, DFT u OFDM predajniku. OFDM tehnologija pokazala se učinkovitom za razasiljanje digitalnih audio signala, DAB (Digital Audio Broadcasting) i digitalnih video signala, DVB (Digital Video Broadcasting) multimegabitskim brzinama u Europi, pa ju je Europski institut za normizaciju (ETSI) unio u standarde HiperLAN2 i HiperMAN. Skupina za standarde IEEE 802.11 odabrala je OFDM modulaciju za bežične LAN mreže definirane standardima IEEE 802.11a, 802.11g i 802.16a. Razlozi su: OFDM može eliminirati međusimbolnu interferenciju na velikim brzinama u veoma disperzivnom okruženju, te može povećati spektralnu iskoristivost i umanjiti učinak impulsnog šuma, zbog dugog trajanja OFDM simbola. Kako je ključni parametar pri projektiranju PLC sustava iskoristivost spektra, a ona je pri uporabi OFDM sheme  $>>1$ , ta se modulacijska shema, uz ostale smjernice dane u ovom radu za projektiranje optimalnog PLC sustava, predlaže za uporabu u PLC sustavima.

## 2.2. Elektromagnetska usklađenost

Problem elektromagnetske usklađenosti (EMC) definira dijelove spektra između 1 i 30 MHz koji su otvoreni za uporabu u PLC sustavu. Potrebno je definirati dopuštene razine polja zračenja, uključujući i postupke mjerenja. Ovaj koncept navodi ostvarenja i ograničenja visokobrzinskog PLC-a koji je elektromagnetski kompatibilan s postojećim uslugama.

Većina Europskih opskrbljivača električnom energijom su vlasnici komunikacijskih veza prijenosa na daljinu velikim brzinama optičkim vlaknima putem VN i SN vodova. Do 1998. godine, zbog postojećih monopolija, ovaj kapacitet bio je samo djelomično iskorišten. Prijenos podataka putem distribucijske mreže električne energije već duže vrijeme ima znatnu ulogu, ali u Europi se nisu koristili sustavi koji djeluju izvan frekvencijskog područja od 150 kHz. Sadašnja upotreba je ograničena na brzine prijenosa od nekoliko kbita/s za upotrebe kao što su tarifna brojila ili daljinska očitavanja podataka. Rezultati istraživanja jasno pokazuju da frekvencijsko područje do 30 MHz nudi opcije za visokobrzinske telekomunikacije. Ovo područje se može podijeliti na frekvencijsko područje za telefoniju (tj. za prijenos glasa) i za prijenos podataka. Prenošenje podataka je od osobite važnosti za Europske sustave distribucije električne energije. U zemljama u razvoju pružanje digitalnih usluga preko elektroenergetskih vodova privlačna su alternativa sustavu telekomunikacijske mreže.

Tehnički zahtjevi potražnje u stvarnom intervalu vremena ("količina podataka po korisniku") za spomenute korisnike znatno se razlikuju, kao što se razlikuju i dopušteni rasponi pogrešaka kanalnog bita. Telefonija, npr. treba relativno nizak ali stalni raspon podataka za svakog korisnika, dok je prosječno trajanje telefonskog poziva kratko u usporedbi s trajanjem prijenosa podataka. Za prijenos glasa, izvorno kodirani bit podataka dijeli se na manje ili više važne bitove. Pogreške u

prijenosu bitova podataka uzrokuju ozbiljna oštećenja (ili prekide) pa se ovi djelovi pažljivo kanalno kodiraju. Na ovaj se način sačuva prihvatljiva kakvoća (npr. broj pogrešnih bitova u odnosu na broj prenesenih bitova iznosi do  $10^{-3}$ ). Govor zahtijeva prijenos u stvarnom vremenu. Ponavljanje izgubljenih paketa podataka ne može se ostvariti u stvarnom vremenu. Međutim, kratki prekidi se lako toleriraju, skoro su neprimjetni za korisnika, dok se duži prekidi od nekoliko sekundi ne toleriraju.

Potpuno prenošenje podataka ima različite zahtjeve. Npr., za pristup Internetu, količina podataka, koja se prenosi tijekom jednog vremenskog perioda većinu vremena je osrednja. Ponekad se, međutim mogu dogoditi vršne vrijednosti prometa, npr. pri prijenosu zvuka ili failova slike. Stoga se ne može preporučiti fiksna raspodjela kapaciteta kanala. Fleksibilna raspodjela kapaciteta, koja ovisi o korisničkim potrebama i zahtjevima, zapravo je jedino razumno rješenje. Većim brojem korisnika povećava se i vjerovatnost potrebe za većim stupnjem prenošenja podataka, ali ne smije doći do ograničenja broja korisnika.

Elektroprivredne kompanije koriste energetske mreže bez ograničenja, dok se pristup lokalnim fiksnim mrežama još uvijek ostvaruje preko standardnih bakrenih vodiča koje posjeduju bivši monopolisti. S namjerom da se stvari prava konkurenca potrebno je sve više i brže pružati usluge uporabom mreže za distribuciju energije. Međutim, postoje znatne razlike u topologiji, strukturi i fizikalnim svojstvima elektroenergetskih vodova u usporedbi s konvencionalnim medijima kao što su bakrene parice, koaksijalni kabeli i optički kabeli.

Zbog traženih točno određenih podataka iznad 1Mbit/s, mora se uzeti u obzir frekvencijski opseg od 30 MHz. Za dizajniranje odgovarajućih sustava i za planiranje mreže zahtijevaju se detaljni modeli prijenosnih karakteristika. U prošlosti većina istraživanja PLC-a, odnosno svojstava PLC-a uglavnom se koncentrirala na frekvencijski opseg ispod 150 kHz. Tek nedavno su izdane studije koje se bave frekvencijama reda veličine MHz. Neki od njih usredotočeni su isključivo na unutrašnje kanale prijenosa energije.

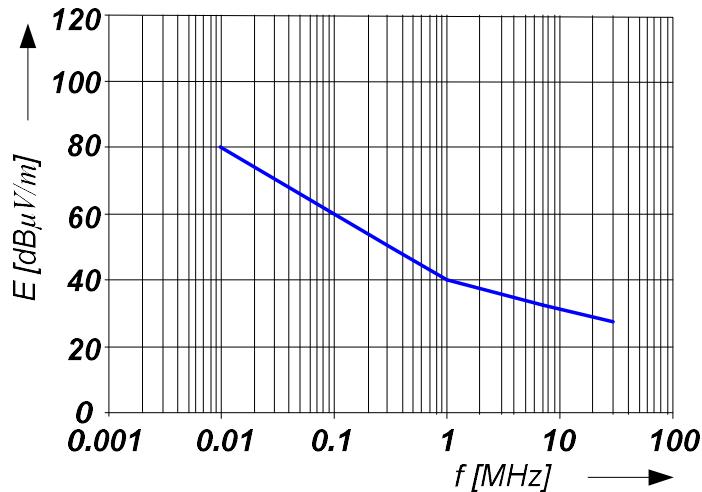
### 2.2.1. Elektromagnetska kompatibilnost, problemi i rješenja

PLC je nova širokopojasna usluga. Koristi se u elektroenergetskim mrežama i nezaštićeni je heterogeni sustav mreža. Za vanjsku uporabu PLC se temelji na korištenju frekvencijskog opsega od 1 MHz do približno 10 MHz, a za unutrašnju upotrebu između 10 MHz i 30 MHz. Prilikom prijenosa signala na ovim frekvencijama preko nezaštićenih kabela dolazi do zračenja zbog nedostatka simetrije. Elektromagnetska interferencija s signalima bežičnih usluga koje djeluju u istom frekvencijskom području je neizbjegljiva. Stoga se nastoje regulirati frekvencijska područja dopuštena za uporabu i zračenje iz niskonaponske mreže.

Na slici 2.13. prikazan je prijedlog njemačke kompanije za ograničenja jakosti električnog polja, koji je objavljen je u nacrtu studije iz siječnja 1999. godine. [8] Krivulja na slici 2.13. prikazuje predložena ograničenja jakosti električnog polja E na udaljenosti 3 m od mreže koja je ispitivana. Pri tom se ne misli samo na PLC, nego na sve vrste prijenosa podataka vodičima, uključujući koaksijalne kable, bakrene parice i svjetlovode unutar lokalne mreže.

Osim prilično oštih ograničenja razina zračenja, najkritičniji je zahtjev da se frekvencijska područja predviđena za bežične usluge ne smiju koristiti u kabelskim vezama, bez obzira na razinu zračenja. Što se tiče zaštite bežičnih sustava, do sada nisu objavljene nikakve pojedinosti o određenim pojasevima frekvencijskog područja koji trebaju biti zaštićeni. Posljedice takve

regulacije problematične su u ekonomskom smislu. Zračenja bilo kojeg prijenosnog kabela u konačnici moraju biti dovedena na razinu atmosferske pozadinske smetnje, koja može iznositi približno  $-40 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$  u nekim frekvencijskim pojasevima. Treba imati na umu da standardna oprema za mjerjenje zračenja ne mjeri razine ispod  $0 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . [8]



Slika 2.13. Prijedlog ograničenja jakosti električnog polja  $E$

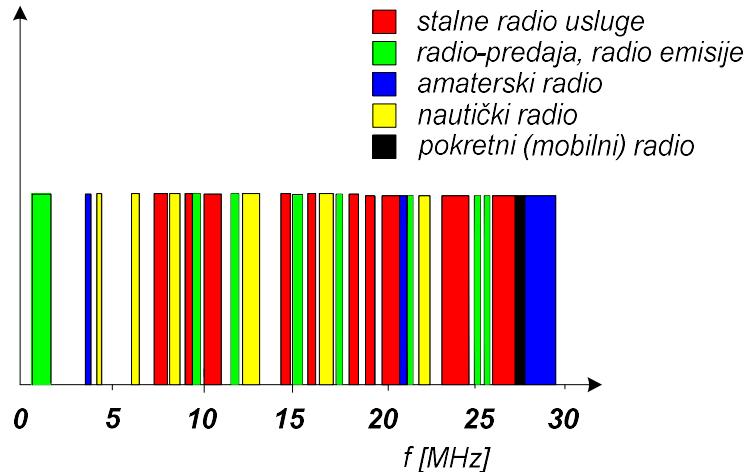
Kabelske TV ispunjavat će ove zahtjeve ako se ugase tzv. posebni televizijski kanali, koji npr. u Njemačkoj čine 1/3 ukupnog televizijskog programa. Ekonomski gledano to znači novčanu štetu od 15 do 20 milijardi eura. Posebni kanali se koriste već desetljećima bez većih EMC problema. Opasna zračenja koja utječu primjerice na zdravlje ili koja uzrokuju oštećenja, nikad nisu dokazana.

Ispunjavanje gore navedenih zahtjeva nameće potrebu dodatnog provjeravanja svake mreže za prijenos podataka, uključujući lokalnu, pristupnu i javnu telekomunikacijsku mrežu s ciljem utvrđivanja eventualnog zračenja, čak i ako je razina zračenja ispod izmjerene vrijednosti koju bilježi standardna oprema za mjerjenja. Neželjena posljedica zračenja je deaktiviranje brojnih usluga, pa se ispituju ili uvode inovativna rješenja. Očekuje se da će budućnost ponuditi bolje pristupe, odnosno bolja rješenja zaštite od elektromagnetskog zračenja.

U tom cilju važna je međusobna suradnja znanstvenika koji reguliraju razvoj s industrijom i s istraživačkim institucijama za pronalaženje kompromisnog rješenja. Takozvana "elektroenergetska zajednica" je načinila prvi važan korak time što je dala inicijativu glede regulacije. Proizvođači PLC opreme trebaju voditi računa o uporabi dopuštenih frekvencijskih pojaseva kao i gornjim granicama zračenja za definiranje razine napona na vodovima koji su potrebni za komunikacije. Prije svega važno je pronaći do sada nekorištene dijelove spektra, tj. frekvencijske pojaseve koji nisu zauzeti bežičnim uslugama.

U suradnji s RegTP, njemačkom kompanijom za regulativu, dan je pregled usluga i dodijeljenih frekvencijskih pojaseva što je prikazano slikom 2.14. Zaključak je da razine između upotrebljenih frekvencijskih pojaseva mogu iznositi do 7.5 MHz, ali je najvažnije da je pojasna

širina koja se koristi segmentirana. Ova činjenica nameće znatna ograničenja prilikom odabira signalizacije i modulacijskih shema.

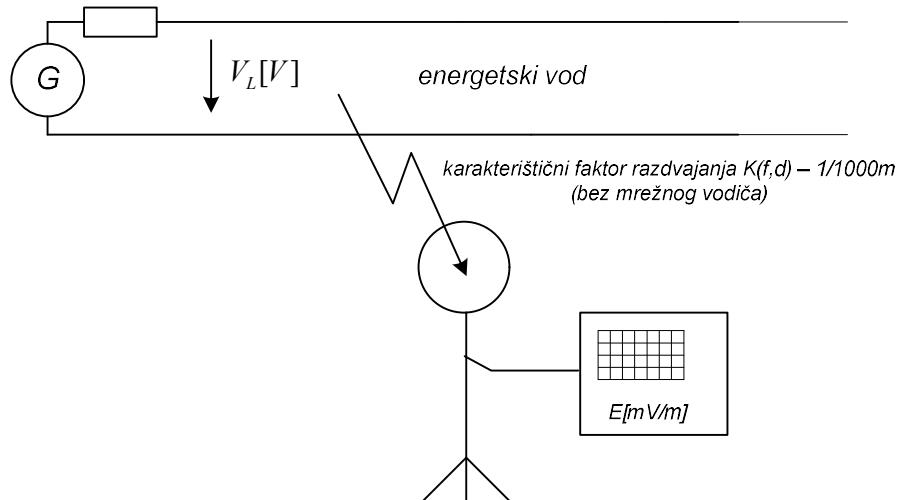


Slika 2.14. Vjerojatnosti razdvajanja za PLC u spektru iznad 30MHz

Proizvođači PLC opreme, kao što je već je navedeno, trebaju znati dopuštene, mjerljive minimume napona za uvođenje PLC tehnologije u elektroenergetske mreže. Regulacija vodi računa ne samo o naponu, nego i o mogućem zračenju. Da bi se premostila ta praznina uveden je tzv. faktor razbijanja parova glavne mreže sličan definiciji u CISPR/A [66]. Za razliku od CISPR/A ovdje se mjeri jakost polja umjesto priključenog napona antene (slika 2.15.), pa se radijacijsko polje može izraziti neovisno o priključenom naponu.

Ovako definiran faktor razdvajanja K(f,d) određuje se za svaku konfiguraciju posebno, npr. za svaki kabel ili podstanicu. Jednom kad je faktor razdvajanja poznat, lako je izračunati radijacijska polja za proizvoljno odabrane signale. Faktor razdvajanja je važan podatak za budući razvoj PLC sustava. Na njega se gleda kao na prijenosnu funkciju između komunikacijskih signala na vodovima na ulazu, i radijacijskog polja na izlazu. Faktor razdvajanja izražava učinak svih parametara koji utječu na ovu prijenosnu funkciju. Za određivanje faktora razdvajanja K(f,d) treba se kontinuirani sinusoidalni signal injektirati simetrično u elektroenergetske vodove. Signal generator pročišćava signale iznad određene frekvencije, intervala i radijacijskog polja koji se mijere antenom H-polja. Prema EMC standardima za frekvencijski raspon ispod 30 MHz koristi se antena sa lukom. Nakon prijelaza preko određene vrijednosti prekoračenja utvrđuju se amplitude H-polja. Kad se izvode mjerena s antenom H-polja kao što je prikazano na slici 2.15, mijere se samo magnetska polja [8].

Snaga električnog polja može se izračunati množeći snagu magnetskog polja s karakterističnom impedancijom  $Z_H = 377\Omega$  otvorenog prostora. Ta jednadžba je točna samo ako su komponente E i H polja okomite i ako ne postoje nikakve komponente u smjeru širenja (uvjet dalekog polja vodiča). Ako se dođe do rezultata  $E = Z_H \cdot H$  pod uvjetima bliskog polja, oni su ipak korisni za komparativna istraživanja, čak i za određivanje granice radijacije. Međutim, treba imati na umu da se snaga električnog polja do koje dolazi zbog radijacije s PLC-a, ne može usporediti sa snagom polja predajne stanice koja se mjeri na istom mjestu.



Slika 2.15. Mjerenje razine zračenja uporabom uzorka H-polja

Pod pretpostavkom da je za PLC na elektroenergetskim vodovima potreban određeni prijenosni nivo  $V_L$  (u voltima), pitanje je, koje električno polje jakosti  $E$  (V/m) rezultira na određenoj udaljenosti. Odgovor nije jednostavan, jer  $E$  bitno ovisi o strukturi mreže, načinu kako se skupljaju signali i o različitim uvjetima okoline unutar zgrade, kao što je npr. prisustvo većih metalnih dijelova.

Slika 2.16. prikazuje mjerenje zračenja na pojednostavljeni način. Iz objavljenih rezultata tih mjerenja moguća je gruba procjena vrijednosti rastavnog faktora  $K(f,d)$  u rasponu od  $10^{-3} / \text{m}$ , tj. za nivo prijenosa  $V_L = 1 [\text{V}]$  po vodu (nemodulirani prijenos) postoji električno polje jakosti približno  $E = 1 [\text{mV/m}]$  ( $\equiv 60 [\text{dB}\mu\text{V/m}]$ ) na udaljenosti od 3 m [8]. Za utvrđivanje jakosti električnog polja koja se očekuje iz stvarnog PLC sustava razmotrimo slijedeći primjer [13].

Predpostavljamo da je amplituda nositelja 1 V. Za analizu neka se odabere otpor  $1\Omega$ , čime se pojednostavljuje izračun, bez utjecaja na vrijednost rezultata. Uvezši ovo u obzir ukupna snaga prijenosa je  $P_{tot} = 1/\sqrt{2} [V^2]$ . Za prijenosnu brzinu podataka 2 Mbits/s i BPSK (binary phase shift keying) modulaciju, prijenosna snaga distribuirana je preko frekvencijskog pojasa 4 MHz. Distribucija dakle nije iznad dopuštenog frekvencijskog područja. Gustoća spektra snage prijenosnog signala može se izraziti jednadžbom:

$$S_s(f) = \frac{1 \text{ } V^2}{\sqrt{2} \cdot 4 \text{ } MHz} = 17.67 \cdot 10^{-8} \left[ \frac{V^2}{Hz} \right] \quad (2.6.)$$

Primjenjujući mjerni standard s 9kHz pojasno-propusnim filterom, prima se samo jedan dio snage koja spada u ovaj širokopojasni raspon, tj.  $P_9 = S_s(f) \cdot 9kHz = 1.59 \cdot 10^{-3} V^2$ .  $P_9$  odgovara naponu

$V_L = 47mV$ . U slučaju vanjskih mreža procjenjuje se jakost električnog polja koje se očekuje kod tog napona i faktora rasipanja  $K(f, d) \approx 10^{-3}$ , uporabom jednadžbe:

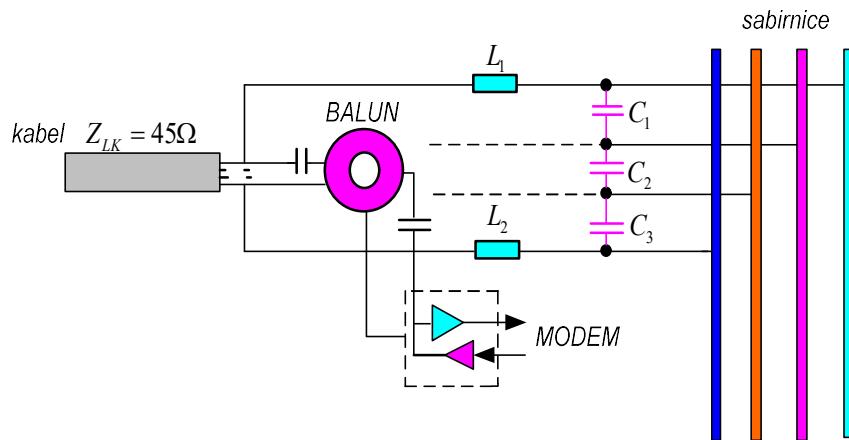
$$E_E = K \cdot V_L = 10^{-3} \cdot 47 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{V}{m} \right] = 33 \left[ \frac{dB\mu V}{m} \right] \quad (2.7.)$$

Ovaj rezultat je vrlo blizak ograničenjima koja su dobivena mjeranjem kao na slici 2.13. i jasno prikazuju ostvarljivost velike brzine u PLC sustavima čak i pod velikim ograničenjima. Međutim, faktor rasipanja znatno smanjuje vrijednosti početnih mjerena mreže. Za smanjenje signala radijacije pogodne su slijedeće mjere:

- simetrično signalno sparivanje,
- umetanje VF barijere da se spriječi širenje PLC signala u neželjenim smjerovima,
- uporaba mreže s uobičajenim načinom odbijanja.

Kada se PLC signali simetrično ubacuju u kabel i kada se istodobno podržava širenje različitim oblicima duž kabela, EMC problemi se neće dogoditi čak i kod prijenosa na udaljenostima preko nekoliko stotina metara. U svakom slučaju pametno je uzeti u obzir rezultate početnih mjerena EMC i za transformatorsku stanicu i za kućni priključak.

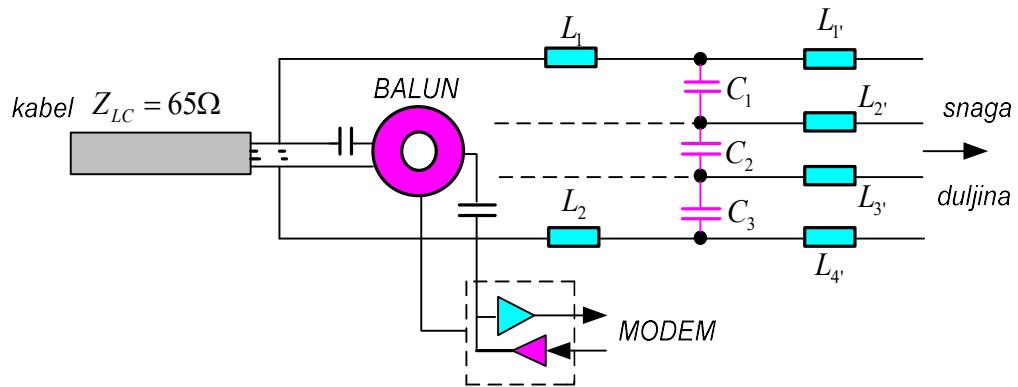
Induktivitet za VF prigušenje ubacuje se u dva vodiča koja su odabrana za prijenos PLC signala (slika 2.16.). Kapaciteti u poprečnoj grani sabirnice smanjuju ostatak VF energije koja će s vremenom proći kroz induktivitete [6]. Primjenjivanjem ovih mjera, za svaki od dovodnih kabela postavljaju se, između kabela, dvije barijere čime se ostvaruje veći stupanj razdvajanja. Ovakvi uvjeti su pogodni i za suprotni smjer, jer se primljeni signali, za koje sabirnice imaju funkciju antene, čuvaju daleko od kabela. Impedancija na izlaznoj strani modema odgovara karakterističnoj impedanciji kabela pomoću baluna (prilagodni izolacijski transformator).



Slika 2.16. Uvjeti u mreži na transformatorskoj stanici (zaštita na strani mreže)

Međutim, konstrukcija potrebnog induktiviteta pokazala se kao veliki izazov, iako je dovoljan induktivitet manji od  $10 \mu H$ . S obzirom da magnetski materijali nose sa sobom problem nelinearnosti zbog zasićenja, rješenja u obliku zavojnice bez jezgre neće dati dobre rezultate. Trenutno se ispituju odgovarajući materijali i konstrukcije za jezgru, a to radi grupa istraživača u bliskoj suradnji s industrijom i elektroprivredama. Traženje rješenja za transformatorske stanice,

dovodi do primjene induktiviteta u pojednostavljenom obliku na kućne vodove, jer se za uporabu na kućnim vodovima rade znatno manji namotaji zbog manjeg strujnog opterećenja. Međutim, za unutrašnje primjene PLC-a potrebni su dodatni induktiviteti u svakoj fazi kao i neutralni vodič za kapacitete (slika 2.17.). Vanjska impedancija modema odgovara karakterističnim impedancijama dovodnog voda [6].



Slika 2.17. Uvjeti kućnih priključenja (zaštita na strani korisnika)

Slike 2.16. i 2.17. prikazuju savršenu zadnju točku koja osigurava stabilno i sigurno ponašanje vanjske mreže neovisno o unutrašnjim aktivnostima korisnika, a to je bitan preduvjet za davanje usluga. Međutim, ovi rezultati ne primjenjuju se u unutrašnjoj mreži. PLC sustav velikih brzina unutar zgrada i dalje je EMC izazov, jer ne postoji rješenja za postavljanje uvjeta. Različiti načini signalizacije, izolirani i simetrični, neostvarivi su u većem opsegu. Potrebno je čvrsto vezivanje između signalnog napona  $V_L$  na vodu i radijacijskog polja, tj. faktor razdvajanja  $K(f,d)$  koji poprima vrijednosti veće od  $10^{-3} / m$ . Međutim, prednost uporabe PLC sustava unutar zgrada je da su udaljenosti koje premoštavamo relativno male. Dakle, bira se puno niži nivo prijenosa u odnosu na vanjske primjene. To znači da je vrlo teško procijeniti učinak interferencije. Treba napomenuti da nije uputno izvršiti mjerena unutarnjeg polja uobičajenim postupkom, jer je teško primjenljivo. Uobičajeni postupci propisuju mjerena na udaljenosti 3 m od elektroenergetskih vodova, a takva mjerena na tako kratkim udaljenostima ne daju stvarnu vrijednost radijacijskog polja. Za konkretno mjerena polja zahtijeva se mjerena na udaljenosti od najmanje jedne duljine vala, tj. 300 m za 1 MHz ili 15 m za 20 MHz. Za manje udaljenosti nema razumne interpretacije rezultata. Može se zaključiti da mjerena polja zračenja imaju smisla samo izvan zgrada, te da se ne treba bojati povećanog elektromagnetskog utjecaja na okolinu, zbog proširene primjene PLC sustava. Različite smetnje uzrokovane djelovanjem električnih i elektroničkih uređaja, kao što su prigušivači svjetla, CD players, osobna računala itd ne mogu utjecati na prijenos signala PLC sustavom.

### 3. TOPOLOGIJA I STRUKTURA ELEKTROENERGETSKIH MREŽA

Početna točka za izučavanje je analiza mrežnih struktura na različitim naponskim razinama sustava napajanja električnom energijom (visokonaponska VN 110 – 400 kV, srednjenačinska SN 10 – 35 kV i niskonaponska NN 0.4 kV), slika 6.1. Naponske razine su međusobno povezane transformatorima. Na visokim frekvencijama koje se koriste za komunikaciju, odnosno prijenos podataka, transformatori su prirodna prepreka i uzrokuju savršeno razdvajanje što nameće potrebu rješavanja tog problema u svrhu planiranja komunikacijskog sustava.

Visokonaponski vodovi služe za prijenos električne energije na velike udaljenosti od elektrane do korisnika premošćujući udaljenosti od nekoliko desetaka do nekoliko stotina kilometara. Mreže visokog napona primjenjuju se uglavnom u obliku trofaznih vodova. Trofazni sustav, u usporedbi s drugim višefaznim sustavima, ima najmanji broj vodiča, pa i najmanje investicijske troškove. Cilj je sagraditi simetrični trofazni sustav.

Pretpostavljajući da postoji odgovarajuća simetrija dovoljno je obraditi jednofazni sustav za izračunavanje trofaznog sustava.

Kada je udaljenost vodiča puno manja od duljine vala signala koji se prenosi električno polje koncentriira se uglavnom između vodiča, pa nema zračenja elektromagnetskih valova. S izmjeničnom frekvencijom 50 ili 60 Hz odgovarajuća duljina vala na visokonaponskim nadzemnim vodovima je približno 6000 km ( $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{300000}{50} = 6000 [km]$ ).

Visokonaponske mreže su projektirane za prenošenje energije na relativno velike udaljenosti. Gubici u prijenosu energije sastoje se od toplinskih gubitaka (Jouleovi gubitci) nastalih zbog radnog otpora materijala vodiča, corone i dielektričnih gubitaka nastalih na izolatorima. Povećanje nazivnog napona smanjuje toplinske gubitke, dok se dielektrični gubici povećavaju. Dimenzioniranje poprečnog presjeka vodiča i odabir materijala pomaže smanjenju toplinskih gubitaka. Radni otpor, odgovoran za toplinske gubitke, nije konstantna veličina kao u slučaju istosmjerne struje, jer porastom frekvencije raste njegova vrijednost zbog skin efekta i efekta blizine. Dolazi do potiskivanja struje prema površini vodiča i stvara se otpor koji je veći nego u slučaju istosmjerne struje.

$$R = \frac{\Delta U_f}{I} = \frac{\Delta P}{I^2} \quad (3.1.)$$

Jednadžba (3.1.) koristi se za izračunavanje vrijednosti radnog otpora koji se izražava omjerom efektivne snage i kvadrata efektivne vrijednosti struje koja prolazi tim krugom.

Dielektrični gubici energije ovise o kakvoći i dizajnu izolatora. Manji su nekoliko desetaka puta od julovih gubitaka.

Na visokonaponskim vodovima dolazi do dodatnih gubitaka zbog pojave corone, koji nastaju u zraku uslijed električnog polja (ionizacija zraka). Iskrenja nastaju u suhom zraku kada vrijednost električnog polja prelazi približno 30 kV/cm, dok je u vlažnom zraku dovoljna i puno manja jakost polja. Jakost električnog polja je najveća na površini vodiča, pa je i izbijanje u zraku najveće oko samog vodiča. Na većoj udaljenosti od vodiča električno polje je slabije zbog čega zrak uglavnom zadržava izolacijsko svojstvo. Pri pojavi korone oko vodiča se stvara vijenac ljubičastog svjetla i

odatle ovoj pojavi i ime (lat. corona = vijenac). Pri tom se javlja i karakteristično pucketanje i osjeća se miris ozona. Ionizacija zraka vrši se na račun električne energije u vodu, zbog čega je korona popraćena gubicima snage i energije. Kod sinusoidalne promjene napona pojava korone postoji samo dotle dok je trenutna vrijednost napona bliska maksimalnoj vrijednosti, te se tijekom praznjnenja stalno pale i gase. Usljed toga nastaju elektromagnetski valovi koji pričinjavaju velike smetnje radio-uredajima, televiziji, i sl. Ozon stvoren pojavom korone nagriza materijal vodiča. Može se zaključiti da je korona izrazito nepoželjna pojava na nadzemnim vodovima. Napon pri kome se javlja korona naziva se kritični napon, te ako je pogonski napon manji od kritičnog  $U_{kr}$  korona se neće pojaviti. Kritični napon može se izračunati uporabom empirijske formule:

$$U_{kr} = 84 \cdot m_0 \cdot m_n \cdot \delta \cdot r \cdot \log \frac{D}{r} \quad [kV] \quad (3.2.)$$

gdje je:

$m_0$  faktor hrapavosti vodiča i iznosi: 0.93 do 0.98 za okrugle vodiče  
0.83 do 0.87 za užad od 7 vodiča  
0.80 do 0.83 za užad sa više od 7 vodiča,

$m_n$  koeficijentom uzimaju se u obzir vremenske prilike i za lijepo (suho i vedro) vrijeme iznosi 1, a za ružno (magla, kiša, inje, led, snijeg) vrijeme iznosi 0.8.

Odgovarajućim dimenzioniranjem i povezivanjem visokonaponskih vodiča smanjuju se gubici uslijed corone i s njom povezane smetnje, a pri tom se ne treba povećavati presjek vodiča do nepraktičnih i neekonomičnih dimenzija. Jedna od metoda koja se vrlo uspješno primjenjuje za ograničenje djelovanja gubitaka uslijed korone temelji se na postavljanju vodiča unutar zajedničke izolacije četiriju vodiča, gdje je svaki pojedini vodič smješten u vrhu kvadrata. Izvedba vodiča u snopu također smanjuje koronu, svi vodiči zajedno djeluju kao da je vodič većeg promjera, ali pri tom se ipak primarno smanjuje induktivitet.

Na većim frekvencijama otpor vodiča je puno veći nego u slučaju istosmjerne struje zbog skin efekta i ovisi o frekvenciji, jer se dubina prodiranja smanjuje povećavanjem frekvencije. Proračun se može pojednostaviti ako se pretpostavi da je vodič u obliku okrugle homogene žice, da je struja paralelna s osi vodiča i razdioba struje je središnje simetrična. Usljed djelovanja skin efekta gustoća struje najmanja je u središtu, a najveća na površini vodiča. Omjer gustoće na površini i u osi vodiča bit će veći što su veći polumjer vodiča, što je viša frekvencija i što su veći permabilnost, te vodljivost materijala vodiča.

Iz istog razloga zbog kojeg dolazi do skin efekta dolazi i do efekta blizine. Struja u jednom vodiču djeluje na razdiobu struje u drugom vodiču, pa razdioba struje nije središnje simetrična. Efekt blizine dolazi više do izražaja što su vodiči bliži, npr. vodiči istog snopa.

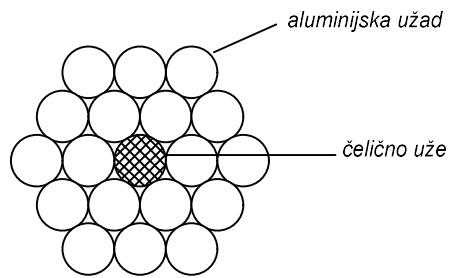
Radni otpor dvofaznog voda dužine  $l$  km na 50 Hz znatno je manji u usporedbi s onim istog voda na na radno frekvenciji 500 kHz. Ovo ukazuje da je očekivano odstupanje vrijednosti otpora pri prijenosu visokofrekvenčnih signala puno veće u usporedbi s onima na frekvencijama 50 – 60 Hz. Uz to konfiguracija visokonaponskog voda za prijenos energije različita je od one za prijenos komunikacijskih podataka. Dok prijenos energije uvijek uključuje jednoliko napajanje za sva tri vodiča trofaznog sustava, pri prijenosu komunikacijskih podataka koriste se u pravilu samo

dva vodiča. To znači postizanje različitih rezultata ako proučavamo procese širenja valova u prenošenju energije nasuprot prijenosu komunikacijskih podataka.

### 3.1. Prijenos energije visokonaponskim nadzemnim vodovima

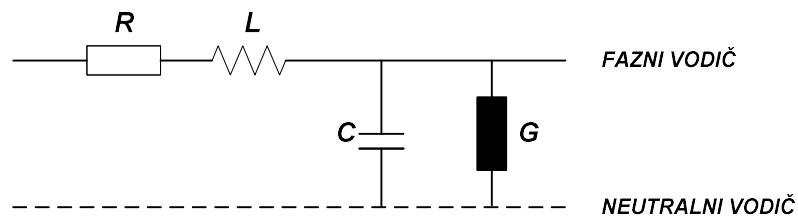
Proces širenja valova pri prijenosu energije na 50 ili 60 Hz treba se prvo razmotriti, da bi se utvrdile značajke voda pri prijenosu podataka na visokim frekvencijama.

Visokonaponski vodovi mogu se opisati pomoću jednofaznog modela s konstantama voda: R (otpor voda po duljini), G (vodljivost voda po duljini) L (induktivitet voda po duljini) i C (kapacitet voda po duljini). Slika 3.1. prikazuje presjek vodiča koji se najčešće koristi kod nadzemnih elektroenergetskih vodova.



Slika 3.1. Poprečni presjek visokonaponskog vodiča

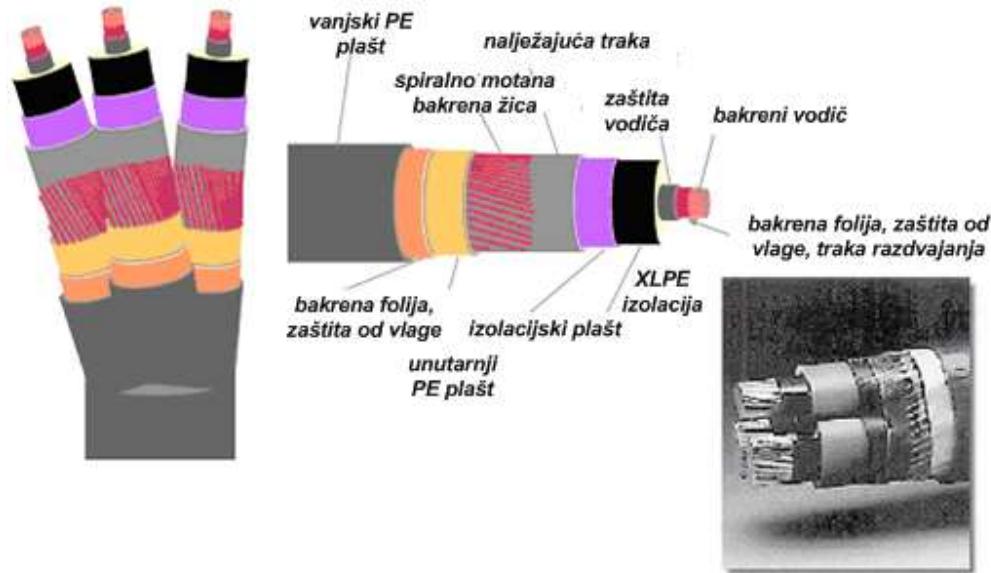
Konstante voda ovise o svojstvu materijala i geometrijskim svojstvima voda. Vodovi mogu biti izvedeni na isti način, ali uvjek se razlikuju po duljini, pa se konstante definiraju po jedinici dužine. Kod trofaznih vodova konstante se daju za jedan fazni vodič, pri čemu se kao povratni vodič uzima zamišljeni neutralni vodič, a u niskonaponskim mrežama tzv. nul-vodič (slika 3.2.).



Slika 3.2. Položaj konstanti voda

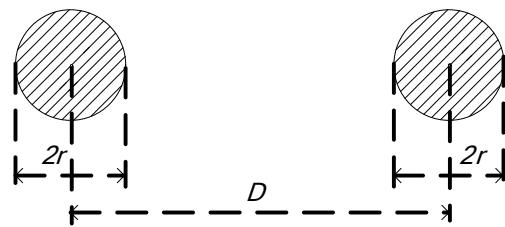
Prema položaju na vodu konstante se dijele na uzdužne (R i L) i poprečne (G i C). Ovisno o tome da li u konstantama nastaju ili ne nastaju gubici električne energije dijele se na konstante s

gubicima (R i G) i konstante bez gubitaka (L i C). Sve konstante vodova ne primjenjuju se uvijek na isti način. Kod NN vodova često se računa samo s radnim otporom, a kod SN vodova (do 35 kV) s radnim i induktivnim otporom. Kod vodova napona 110 kV računamo s radnim, induktivnim i kapacitivnim otporom, a kod vodova napona 220 kV sa svim konstantama (R, L, C i G).



Slika 3.3. Presjek kabelskog energetskog voda

Gotovo da uopće nema načina da se izračuna konstanta voda G (vodljivost). Izmjerene vrijednosti G za realne konfiguracije nadzemnih trofaznih vodova dane su u tablicama. Induktivitet (L) voda s dva vodiča, načinjenog od masivnih metalnih vodiča polumjera vodiča  $r$ , s razmakom između vodiča  $D$ , može se izraziti jednadžbom:



$$\begin{aligned}
 L &= 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left( \ln \frac{D}{r} + \frac{\mu_r}{4} \right) [H/m] = \ln \frac{D}{r} + \frac{\mu_r}{4} = \ln D - \ln r + \frac{\mu_r}{4} = \ln D - \left( \ln r - \frac{\mu_r}{4} \right) \\
 &= \ln D - \left( \ln r - \ln e^{-\frac{\mu_r}{4}} \right) = \ln D - \ln \left( r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}} \right) = \ln \frac{D}{r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}}} [H/m]
 \end{aligned}$$

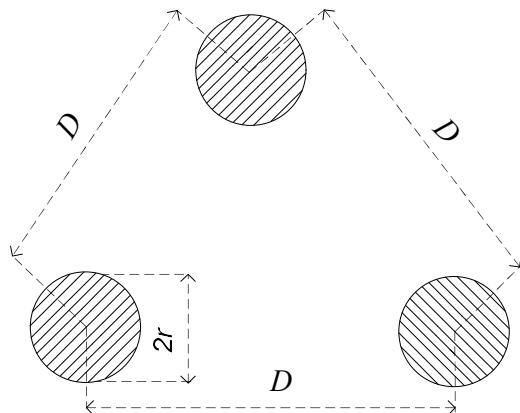
Za sve vodiče načinjene od nemagnetskih materijala (bakra, aluminija, bronce) relativna magnetska permabilnost je  $\mu_r = 1$ , pa je  $r \cdot e^{-\frac{\mu_r}{4}} = r \cdot e^{-\frac{1}{4}} = 0.7788 \cdot r = r'$ . Izraz za  $L$  može se napisati u pojednostavljenom obliku:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \frac{D}{r'} [H/m] \quad (3.3.)$$

Induktivni otpor pri frekvenciji  $f$  iznosi

$$X_L = \omega \cdot L = 2\pi f \cdot L [\Omega/km]$$

*Simetrični trofazni vod bez utjecaja zemlje* prikazan je na slici 3.4.



Pogonski induktivitet voda je:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} [H/m]$$

Slika 3.4. Simetrični trofazni vod

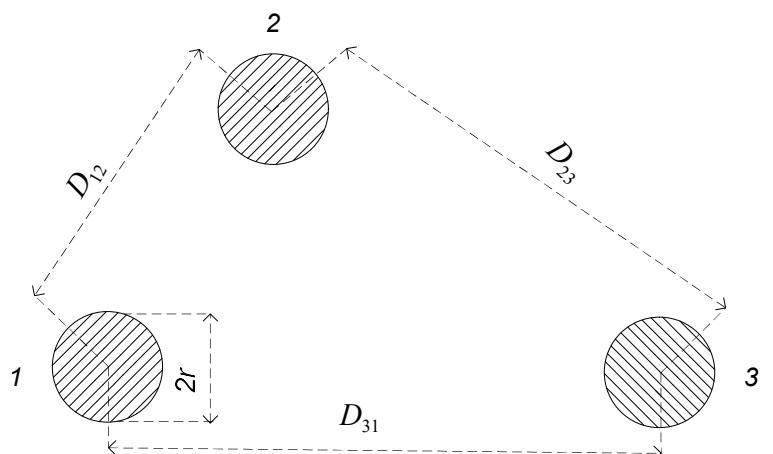
*Nesimetrični trofazni vod bez utjecaja zemlje* prikazan je na slici 3.5.

Pogonski induktivitet voda je:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{sr}}{r'} [H/m] \quad (3.4.)$$

$$D_{sr} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$$

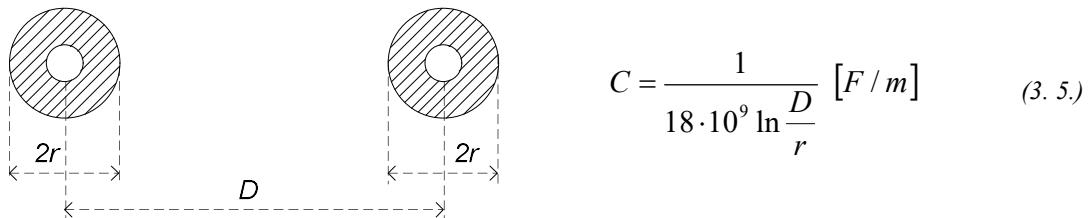
napon	$D_{sr}$
220/380 V	0.5 m
6 do 10 kV	1 m
35 kV	3 m
110 kV	4 do 6 m
220 kV	7 do 10 m



Slika 3.5. Neimetrični trofazni vod

Induktivitet svakog vodiča je različit zbog čega ni induktivni otpori vodiča nisu jednaki. Posljedica toga je da i padovi napona nisu jednaki čak i onda kada su opterećenja simetrična. U tom slučaju se i pored simetričnih napona na početku voda dobiju nesimetrični naponi na kraju voda. Da bi se izbjegli nesimetrični padovi napona i nesimetrični naponi na kraju voda, vodiči se prepliću. Preplitanje je promjena mjesta vodiča u vodu, odnosno na stupovima. Time se ne postiže samo izjednačavanje induktiviteta vodiča, nego i izjednačavanje kapaciteta vodiča.

*Dvofazni vod bez utjecaja zemlje* prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Dvofazni vod bez utjecaja zemlje

*Simetrični trofazni vod bez utjecaja zemlje*

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}} [F/m]$$

Pri frekvenciji f Hz kapacitivni otpor iznosi

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi f \cdot C} [\Omega/km]$$

*Nesimetrični trofazni vod bez utjecaja zemlje*

Kapacitet jednog vodiča

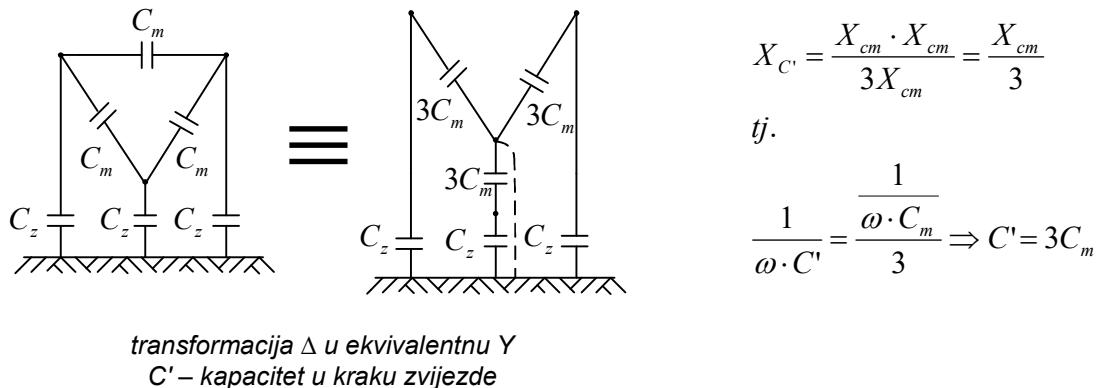
$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D_{sr}}{r}} [F/m] \quad (3.6.)$$

Pri proračunu utjecaja zemlje na kapacitete vodiča koristi se metoda preslikavanja.

$$C = \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \left( \frac{D}{r} \cdot \frac{2h}{B} \right)} [F/m] \quad (3.7.)$$

Iz relacije (3.7.) vidi se da se zbog utjecaja zemlje kapacitet vodiča povećava.

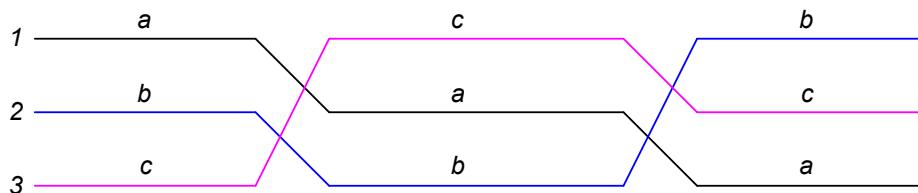
Međusobni i dozemni kapaciteti nazivaju se parcijalni kapaciteti. Kapacitet vodiča i referentne osi u simetričnom trofaznom sustavu naziva se totalni (pogonski) kapacitet  $C_t = 3C_m + C_z$ .



Interesantno je primjetiti da je umnožak induktiviteta i kapaciteta nadzemnog voda konstantan

$$L \cdot C = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r} \cdot \frac{1}{18 \cdot 10^9 \ln \frac{D}{r}} = \frac{1}{(3 \cdot 10^8)^2} = \mu_0 \cdot \epsilon_0 . \quad (3.8.)$$

Ako su osi triju vodiča trofaznog voda u vrhovima istostraničnog trokuta, vod je simetričan, te sva tri vodiča imaju isti induktivitet, ako su im presjeci jednaki. Konstrukcijom vodova rijetko se postiže simetrija vodiča tako da pojedini vodiči istog voda imaju različite induktivitete, a time i različite reaktancije. Zbog različitih padova napona u pojedim fazama u pogonu dolazi do izobličenja zvijezde napona i do pogonskih poteškoća. Stoga se konstrukcijski osigurava električna simetrija vodova koji su geometrijski nesimetrični. To se postiže izmjenom vodiča na stupu (preplitanjem, slika 3.7.).

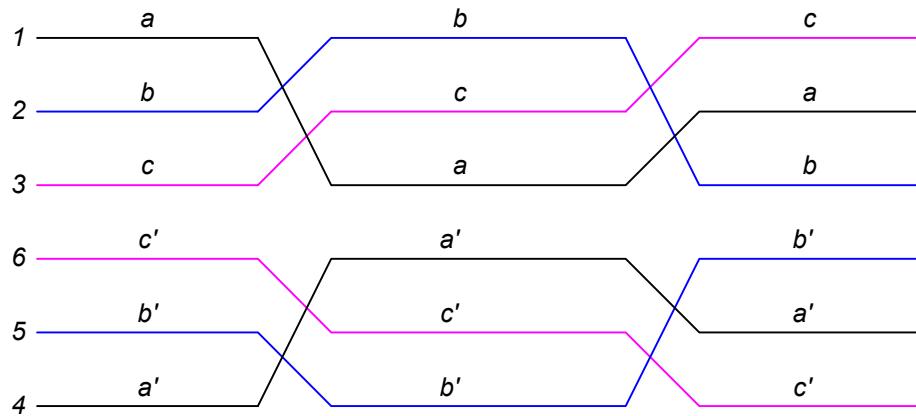


1, 2, 3 - položaj vodiča na stupu  
 $a, b, c$  - oznake faze

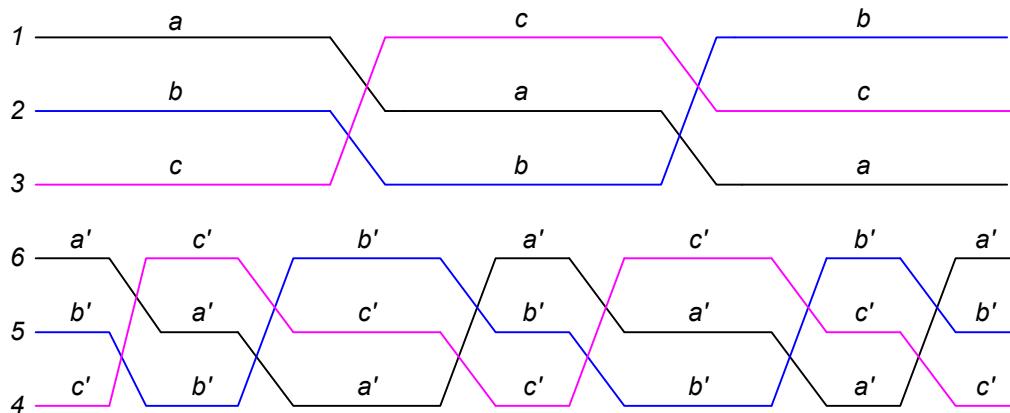
Slika 3.7. Preplet voda

Po dužini vod se podijeli na tri dijela. Potrebna su dva preplitanja da svaki vodič zauzme sve moguće položaje. Kod dvostrukih vodova razlikujemo djelomični (sl. 3.7.a) i potpuni preplet (sl. 3.7.b). Kod djelomičnog prepleta međusobni induktiviteti među vodovima nisu jednaki i premda

su vodovi, svaki za sebe, potpuno simetrirani, simetrija nije postignuta. Kratki vodovi se ne prepliću. Kod dalekovoda napona 10 kV preplitanje obično nije potrebno, kod 35 kV dalekovoda preplitanje je ponekad potrebno, a kod 110 i 220 kV dalekovoda preplitanje se redovito vrši.



Slika 3.7. a) Djelomični preplet dvostrukog voda



Slika 3.7. b) Potpuni preplet dvostrukog voda

### 3.1.1. Prijenosne jednadžbe

Trofazni vod može se grafički jednofazno prikazati kao na slici 3.2. samo ako je simetričan, sve tri faze imaju jednake električne karakteristike, te ako su po fazi za  $120^\circ$  zakrenuti naponi i struje u sve tri faze jednaki po iznosu. U ovakovom slučaju kroz crtkano prikazani povratni vodič bez impedancije, koji se nalazi na potencijalu zvjezdista sustava, ne teče nikakva struja. Ako vod nije simetričan potreban je trofazni grafički prikaz (slika 3.5.). Povratni vodič postoji u vidu zemlje i obostrano uzemljenog zaštitnog vodiča (ako ga vod ima) i ima određenu impedanciju. U nekim pogonskim slučajevima kroz njega teče struja. Na slici 3.8. prikazane su sve konstante koje se

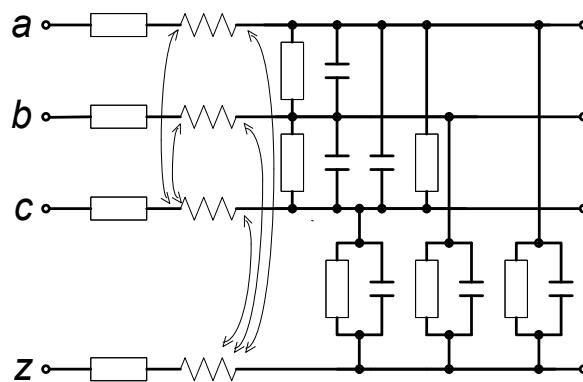
mogu pojaviti, uključujući međusobne utjecaje. Kod primjene teorije simetričnih komponenata, impedancija povratnog vodiča služi za određivanje nulte impedancije voda s konstantama  $R_{10}, L_{10}, G_{10}, C_{10}$ .

U simboličkom računu hladne konstante javljaju se u obliku ovisnom o frekvenciji:

- induktivni otpor po jedinici dužine  $X_1 = \omega \cdot L_1$  [ $\Omega/km$ ]
- kapacitivna vodljivost po edinici dužine  $B_1 = \omega \cdot C_1$  [ $S/km$ ]

Konstante možemo prikazati u kompleksnom obliku:

- prividni otpor ili impedancija  $\bar{Z}_1 = R_1 + jX_1$  [ $\Omega/km$ ]
- prividna vodljivost ili admintancija  $\bar{Y}_1 = G_1 + jB_1$  [ $S/km$ ]



Slika 3.8. Trofazni model voda dužine  $dx$

Za konkretni vod važna je i njegova duljina  $l$ . U prijenosnim jednadžbama javljaju se i izvedene karakteristične veličine:

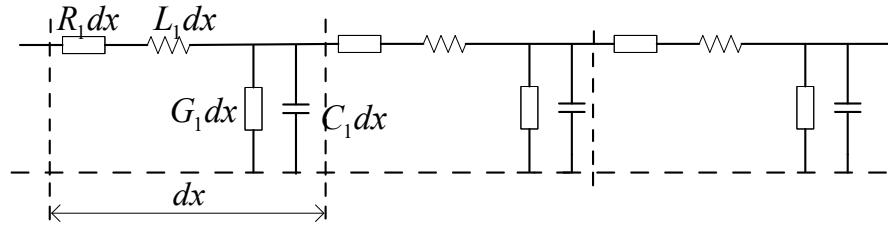
- konstanta prodiranja ili valna konstanta  $\gamma = \sqrt{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Y}_1}$  [ $1/km$ ]
- karakteristična impedancija  $\bar{Z}_c = \sqrt{\bar{Z}_1 / \bar{Y}_1}$  [ $\Omega$ ]

Konstanta prodiranja sastoji se od realnog i imaginarnog dijela

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{[(R_1 + j\omega L_1) \cdot (G_1 + j\omega C_1)]} \quad (3.9.)$$

Karakterističnu impedanciju izražavamo pomoću  $\gamma$

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} = \frac{\bar{Z}_1}{\gamma} = \frac{\gamma}{\bar{Y}_1} \quad [\Omega] \quad (3.10.)$$



Slika 3.9. Vod kao lanac infinitezimalnih dijelova

Veličine  $\alpha$  i  $\beta$  nazvane su konstanta gušenja i fazna konstanta. Za vod se kaže da ima male gubitke ako je  $R \ll j\omega L$  i  $G \ll j\omega C$ .

U ovom slučaju karakteristična impedancija računa se dobrom aproksimacijom iz  $L_1$  i  $C_1$  i to je stvarna vrijednost koja sa (3.3.) i (3.5.) daje izraz

$$Z_V = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (3.11.)$$

Prijenosne jednadžbe voda su:

$$U(l) = U_2 \cdot ch(\gamma \cdot l) + I_2 \cdot Z_c \cdot sh(\gamma \cdot l) \quad (3.12.)$$

$$I(l) = I_2 \cdot ch(\gamma \cdot l) + \frac{U_2}{Z_c} \cdot sh(\gamma \cdot l) \quad (3.13.)$$

U području prijenosa energije sa izmjeničnom frekvencijom od 50 ili 60 Hz, jednadžbe voda (3.12.) i (3.13.) koriste se za točno određivanje stanja na vodu.

Neke karakteristične pojave na vodu mogu se jednostavnije, a još uvijek točno, proučiti na idealnom vodu kod kojega je  $R_1 = 0$  i  $G_1 = 0$ . Iz ovoga slijedi

$$\gamma = \sqrt{Z_1 \cdot Y_1} = \alpha + j\beta = \sqrt{j\omega L_1 j\omega C_1} = j\omega \sqrt{L_1 C_1} = j\beta_0 \quad (3.14.)$$

Kako je  $L_1 C_1 = \frac{1}{c^2}$  (c – brzina svjetlosti), za frekvenciju 50 Hz dobijemo

$$\beta_0 = \omega \sqrt{L_1 C_1} = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi \cdot f}{300000} = \frac{2\pi}{6000} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.15.)$$

na osnovu čega se zaključuje da dužina vala  $\lambda$  uz  $f = 50$  Hz na idealnom zračnom vodu iznosi 6000 km. Ujedno se može zaljubiti da je brzina rasprostiranja vala uzduž idealnog zračnog voda jednaka brzini svjetlosti, bez obzira na frekvenciju. Kod idealnog voda je

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_1}{Y_1}} = \sqrt{\frac{j\omega L_1}{j\omega C_1}} = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = Z_V [\Omega] \quad (3.16.)$$

$Z_V$  je realna veličina i naziva se valni otpor. To je čisti djelatni otpor, svojstvo samog voda, neovisan o frekvenciji, a prema tome i o obliku vala. Valni otpor zračnih vodova je oko  $400 \Omega$ . Ako u Eulerove formule uvrstimo  $\gamma = j\beta_0$  dobijemo

$$\begin{aligned} ch(\gamma \cdot l) &= \cos(\beta_0 \cdot l) \\ sh(\gamma \cdot l) &= j \sin(\beta_0 \cdot l) \end{aligned} \quad (3.17.)$$

pa ako uz  $\bar{Z}_c = Z_V$  uvrstimo u (3.13.) i (3.14.) dobit ćemo:

$$\begin{aligned} U(l) &= U_2 \cdot \cos(\beta_0 \cdot l) + jI_2 \cdot Z_V \cdot \sin(\beta_0 \cdot l) \\ I(l) &= I_2 \cdot \cos(\beta_0 \cdot l) + j \frac{U_2}{Z_V} \cdot \sin(\beta_0 \cdot l) \end{aligned} \quad (3.18.)$$

Upravo ovaj oblik prijenosnih jednadžbi pogodan je za ramatranje karakterističnih stanja na vodu. Posebno stanje vodljivosti VN voda je kada vod na kraju opteretimo potrošačem kojemu je otpor jednak valnom otporu voda  $Z_V$ . Kako nema promjene valnog otpora, na mjestu priključka potrošača nema refleksije. Ovakav potrošač jednostavno guta polazni val i fizikalno se postiže isto stanje kao da je vod beskonačno dug. U ovom pogonskom slučaju prenosi se tzv. prirodna snaga voda. Uvjete na kraju voda  $\bar{U}_2 = \bar{I}_2 \cdot Z_V$  i  $\bar{I}_2 = \frac{\bar{U}_2}{Z_V}$  uvrstimo u jednadžbu (3.17.) pa dobijemo

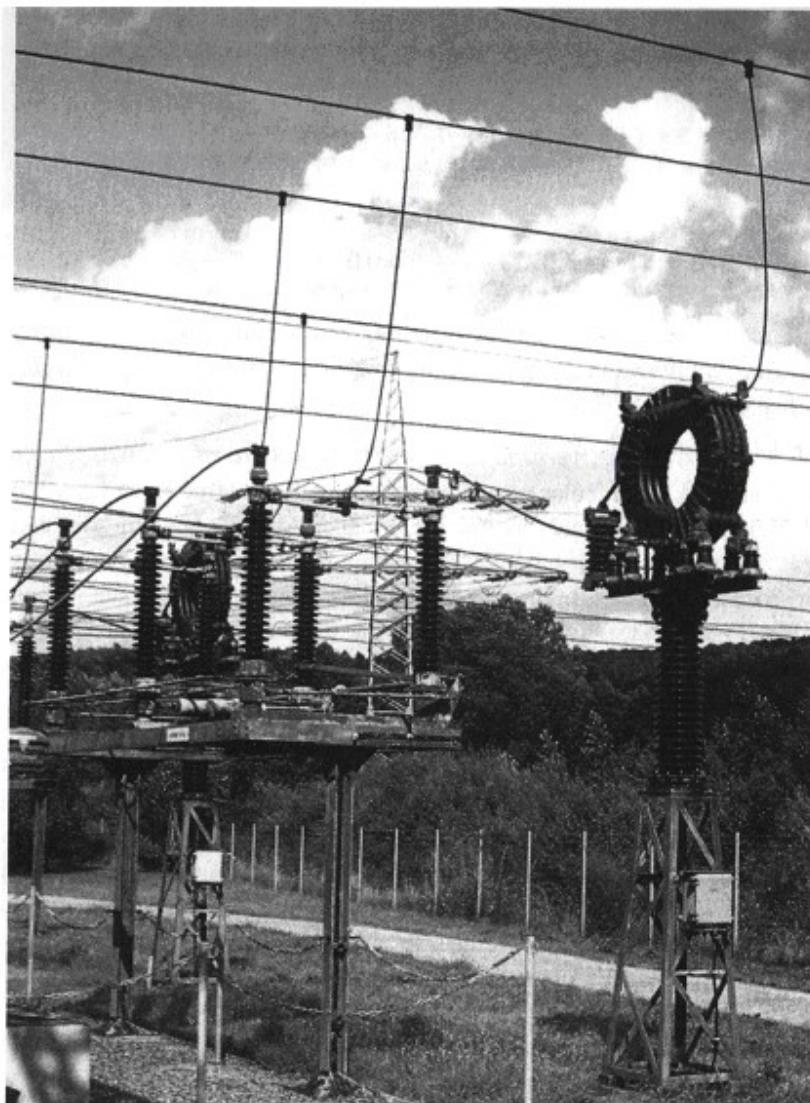
$$\begin{aligned} \bar{U}(l) &= \bar{U}_2 \cdot \cos(\beta_0 \cdot l) + j\bar{U}_2 \cdot \sin(\beta_0 \cdot l) = \bar{U}_2 \cdot e^{j\beta_0 \cdot l} \\ \bar{I}(l) &= \bar{I}_2 \cdot \cos(\beta_0 \cdot l) + j\bar{I}_2 \cdot \sin(\beta_0 \cdot l) = \bar{I}_2 \cdot e^{j\beta_0 \cdot l} \end{aligned} \quad (3.19.)$$

Omjer napona i struje na kraju voda je  $Z_V$ , a isto tako i bilo gdje na vodu. Kako je  $Z_V$  realno to su struja i napon u fazi. Efektivne vrijednosti  $\bar{U}$  i  $\bar{I}$  uzduž voda neovisne su o duljini voda  $l$  jer je  $|e^{j\beta_0 l}| = 1$ . Ako je vod opterećen prirodnom snagom imamo idealne pogonske prilike, što znači da su napon i struja konstantni duž voda i nema faznog pomaka među njima. To znači da nema prijenosa reaktivne snage, kao ni refleksije na kraju voda. Prirodna snaga trofaznog idealnog voda može se izraziti jednadžbom:

$$P_{nat} = 3 \left( \frac{U_N}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot \frac{1}{Z_V} = \frac{U_N^2}{Z_V} [MW] \quad (3.20.)$$

### 3.1.2. Visokonaponski nadzemni vodovi za prijenos visokofrekveničkih signala

Na početnim i krajnjim točkama, kao i na spojevima, koriste se niskopropusni filteri u obliku zavojnice s induktivitetom vrijednosti 0.5 do 2 mH, u cilindričnom obliku zračne jezgre s namotima (slika 3.10.). Za prilagodbu na karakterističnu impedanciju voda koriste se posebne ulazne i izlazne jedinice sparivanja. U uvjetima prijenosa VF signala ne govori se o simetričnom trofaznom sustavu već o aproksimaciji na dvofazni sustav.



Slika 3.10. Visokonaponska uključna stanica sa zatvorenom frekvencijom prijenosa

Utjecaj atmosferskih prilika utječe na prigušenje VF signala posebno led, magla, kiša i snijeg. Induktivitet po duljini  $L'_H$  računa se po (3.3.), pri čemu struktura vodiča ulazi u proračun. Kapacitet po duljini  $C'_H$  rezultira

$$C'_H = \frac{\pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{d}{r}} \quad (3.21.)$$

gdje je  $d$  – udaljenost žica

$r$  – polumjer ovisan o strukturi vodiča.

Zanemare li se gubici za dvožilno sparivanje dobije se izraz za stvarnu karakterističnu impedanciju

$$Z_{VH} = \sqrt{\frac{L'_H}{C'_H}} [\Omega] \quad (3.22.)$$

Za određivanje prigušenja VF signala prvo je potrebno odrediti konstantu prigušenja  $\alpha$ . Izračunava se iz  $R'$  i  $Z_{VH}$ , dok se  $G'$  zanemaruje. Posebni efekti prigušenja uslijed magle, leda, jake kiše ili snijega nemaju utjecaj na proračun. Otpor po duljini,  $R'$  ovisi o frekvenciji, dok prigušenje VF signala na VN vodovima ovisi o frekvenciji kao funkciji kvadratnog korijena.

Ako se promatra 380 kV trofazni izmjenični nadzemni vod duljine 500 km kojim se prenosi signal izmjenične frekvencije 1 MHz, tada je prigušenje s obzirom na djelatne gubitke

$$e^{\alpha(1MHz)\cdot 500km} \approx 2 \equiv 6dB \quad (3.23.)$$

Slijedeća relacija prikazuje omjer signala i šuma

$$\Gamma = S / N \quad (3.24.)$$

ili u logaritamskom prikazu

$$a = 10 \log_{10}(S / N) \quad (3.25.)$$

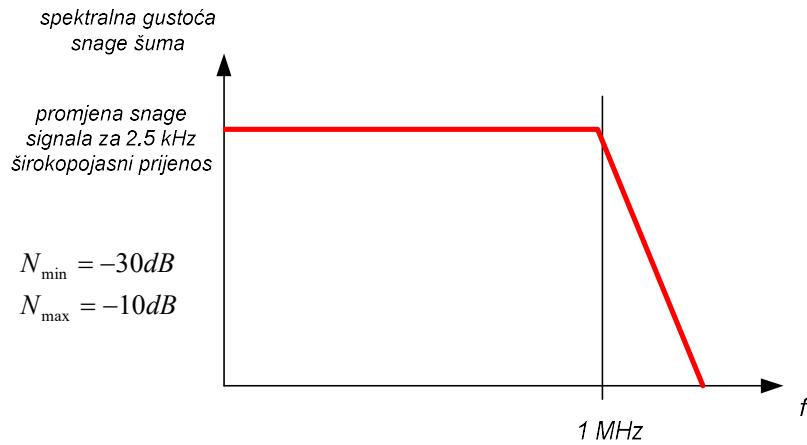
### 3.1.3. Visokofrekvenska interferencija na visokonaponskom nadzemnom vodu

Postoje dvije vrste VF interferencije na VN nadzemnom vodu: kratkotrajna impulsna interferencija, koja uzrokuje neperiodična kratkotrajna uključivanja ili atmosferska (pražnjenja) i širokopojasna stalno prisutna interferencija relativno visoke brzine, koja uzrokuje izbijanja na izolatorima, odnosno pojavu korone.

Interferencija prve vrste ima širokopojasni spektar prisutan kratko vrijeme. Može se uočiti do 300 impulsa u sekundi. Impulsi postižu očekivane amplitude i uzrokuju naponske udare na prijamniku (zbog VF dijelova), pa se uvode posebne mjere zaštite na ulazu prijamnika. U usporedbi s uskopoljasnom impulsnom interferencijom, s istim trajanjem prijenosa impulsa oštećenja su mala.

Interferencija druge vrste modelira se za frekvencije do približno 1 MHz kao šum po Gausovoj raspodjeli. Njihov udar je kritičniji od interferencije prve vrste jer su stalno prisutne na relativno visokim naponskim nivoima [53].

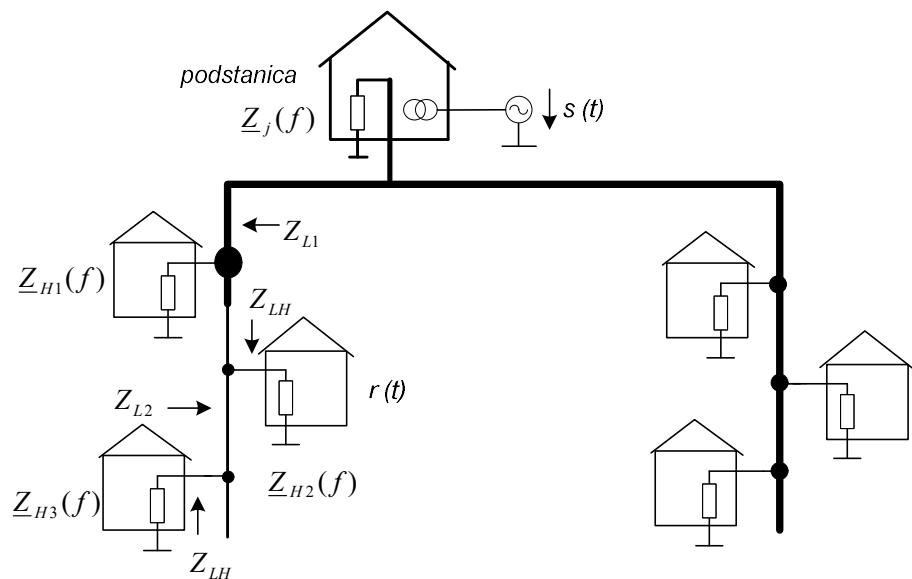
Spektralna gustoća snage ovisi o frekvenciji (power spectral density, PSD), odnosno atmosferskim prilikama. Porast za vrijeme kiše, mraza ili magle, varira za otprilike 20 dB. Slika 3.11. prikazuje PSD spektar pri čemu nivo informacije odgovara širini spektra od 2.5 kHz.



Slika 3.11. Ovisnost spektralne gustoće snage o frekvenciji u visokonaponskim vodovima

Promjena spektralne gustoće snage od  $N_{\min} = -30 \text{ dB}$  (npr.  $1 \mu\text{W}$ ) do  $N_{\max} = -10 \text{ dB}$  (npr.  $100 \mu\text{W}$ ) izravno ovisi o klimatskim uvjetima. Minimalna PSD vrijednost postiže se pri suhom vremenu, dok nivo raste povećanjem vlažnosti zraka ili smrzavanjem vodova.

Električna mreža podijeljena je u tri dijela s različitim nivoima napona. S komunikacijske točke gledišta NN, SN i VN dijelovi distribucijske mreže jednake su važnosti. Posebno je važna distribucijska mreža niskog napona kao pristupna mreža "posljednje milje" prijenosa informacija. Komunikacijska veza od podstanice do niskonaponske mreže ostvaruje se komunikacijskom mrežom putem optičkih vlakana, radio-relejnih veza, širokopojasnih kabela ili vodova srednjeg napona [18].



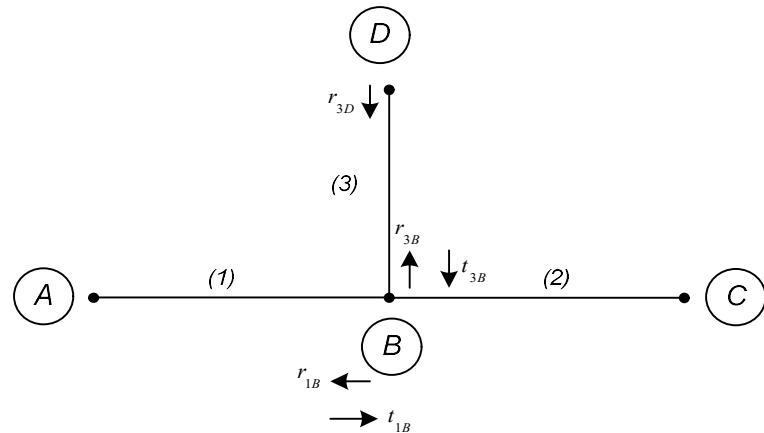
Slika 3.12. Širenje signala kroz energetske vodove lokalne mreže

Pristupna mreža niskog napona između podstanice i korisnika ima zvjezdastu strukturu (slika 3.12.) [3]. S komunikacijske točke gledišta ona ima sličnu strukturu kao i mobilna radio mreža koja se sastoji od čelija i baznih stanica.

Elektroenergetski vod pristupne mreže, za razliku od telefonske linije, ne omogućuje uspostavljanje veza od točke do točke, tj. između podcentralne i samog korisnika, nego veze između distribucijskih i kućnih kabela. Veza pristupne mreže između podstanice i korisnika (slika 3.12.) ostvaruje se uporabom distribucijskog kabela ili serijske veze distribucijskih kabela s karakterističnom impedancijom  $Z_{L_i}$  i razgranatih kućnih priključaka s karakterističnom impedancijom  $Z_{LH}$ . Kućni kabel završava u kućnoj razvodnoj kutiji. Slijedi unutrašnje postavljanje kabela koje je prikazano točno određenom impedancijom  $Z_H(f)$ . Svaka od tranzicija na vezama između kabela uzduž razvodnog puta predstavlja promjene impedancije i uzrokuje refleksiju.

### 3.2. Propagacija signala

Struktura niskonaponske mreže kod širenja signala sastoji se od odgovarajućih vodova. Javljuju se brojne refleksije, zbog spojeva na kućnim priključnim kabelima, u kućnim razvodnim kutijama i spojevima na serijskim vezama kabela sa različitim karakterističnim impedancijama. Širenje signala nije samo između predajnika i primatelja (tzv. linija svjetla) već se uzimaju u obzir i dodatni razvodni putevi (jeka, šum). Rezultat je širenje signala sa selektivnim gušenjem (slika 3.13.).



slika 3.13. propagacija signala (po Dostertu)

Širenje signala u više smjerova proučava se na ovom jednostavnom primjeru (slika 3.13.). Veza ima jedan ogrank i sastoji se od segmenata (1), (2) i (3) sa duljinama  $l_1, l_2, l_3$  i karakterističnim impedancijama  $Z_{L1}, Z_{L2}, Z_{L3}$  [8].

Pojasnimo pojam staze. Impuls nultog reda je impuls koji najkraćim putem stiže od prijemnika do predajnika. On sigurno stiže prvi i ima najveću applitudu. Polaritet amplitude prvog impulsa

odgovara polaritetu pobude. Impulsi prvog reda su impulsi koji imaju samo jednu refleksiju, ili prolaz divergentan od najkraće moguće staze, kao i jednu refleksiju na povratku k njoj. Ako su sve grane u mreži jednakog dužine i izrađene od istog materijala svi impulsi stižu u isto vrijeme. U protivnom njihovo kašnjenje značajno varira. Impulsi drugog reda prolaze ukupno dvije refleksije (prolaza kojim se udaljavaju od najkraćeg puta), te ukupno barem jednu refleksiju i jedan prolazak, ili dvije refleksije na putu natrag prema najkraćem.

Tablica 3.1. Smjerovi širenja signala ispitne mreže

staza	put širenja signala	faktor očekivanja $g_i$	duljina staze $d_i$
1	$A \rightarrow B \rightarrow C$	$t_{1B}$	$l_1 + l_2$
2	$A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow C$	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot t_{3B}$	$l_1 + 2 \cdot l_3 + l_2$
.	.	.	.
.	.	.	.
N	$A \rightarrow B (\rightarrow D \rightarrow B)^{N-1} \rightarrow C$	$t_{1B} \cdot r_{3D} \cdot (r_{3B} \cdot r_{3D})^{(N-2)} \cdot t_{3B}$	$l_1 + 2 \cdot (N-1) \cdot l_3 + l_2$

Pojednostavljeno A i C se slažu, što znači da je  $Z_A = Z_{L1}$  i  $Z_C = Z_{L2}$ . Preostale točke za refleksiju su B i C sa faktorima refleksije

$$r_{1B} = \frac{(Z_{L2} \| Z_{L3}) - Z_{L1}}{(Z_{L2} \| Z_{L3}) + Z_{L1}} \quad (3.26.)$$

$$r_{3D} = \frac{Z_D - Z_{L1}}{Z_D + Z_{L1}} \quad (3.27.)$$

$$r_{3B} = \frac{(Z_{L2} \| Z_{L1}) - Z_{L3}}{(Z_{L2} \| Z_{L1}) + Z_{L3}} \quad (3.28.)$$

i prijenosnim faktorima (segmenti (3) i (1))

$$t_{1B} = 1 - |r_{1B}| \quad (3.29.)$$

$$t_{3B} = 1 - |r_{3B}| \quad (3.30.)$$

Uz ove pretpostavke smjerovi širenja su realizirani. Na svakom dijelu puta "i" postoji težinski faktor  $g_i$  koji predstavlja umnožak refleksije i prijenosnog faktora uzduž tog dijela staze. Kašnjenje  $\tau_i$  na tom dijelu se može izračunati iz omjera dužine i fazne brzine  $\tau_i = \frac{d_i}{v_p}$ .

Povećavajući duljinu i frekvenciju gubici stvarnih kabela uzrokuju prigušenje  $A(f,d)$ . Signalne komponente tog puta dodaju se zbog superpozicije i prijenosne funkcije od A do C, a to se može izraziti kao:

$$H(f) = \sum_{i=1}^N g_i \cdot A(f, d_i) \cdot e^{j2\pi f \tau_i} \quad (3.31.)$$

Svi faktori refleksije i prijenosa su općenito manji ili jednaki jedinici.

$$|r_{jX}| \leq 1 \quad , \quad |t_{jX}| \leq 1 \quad , \quad j = 1, 2, 3, \dots \dots \quad X = A, B, C, D, \dots \dots \quad (3.32.)$$

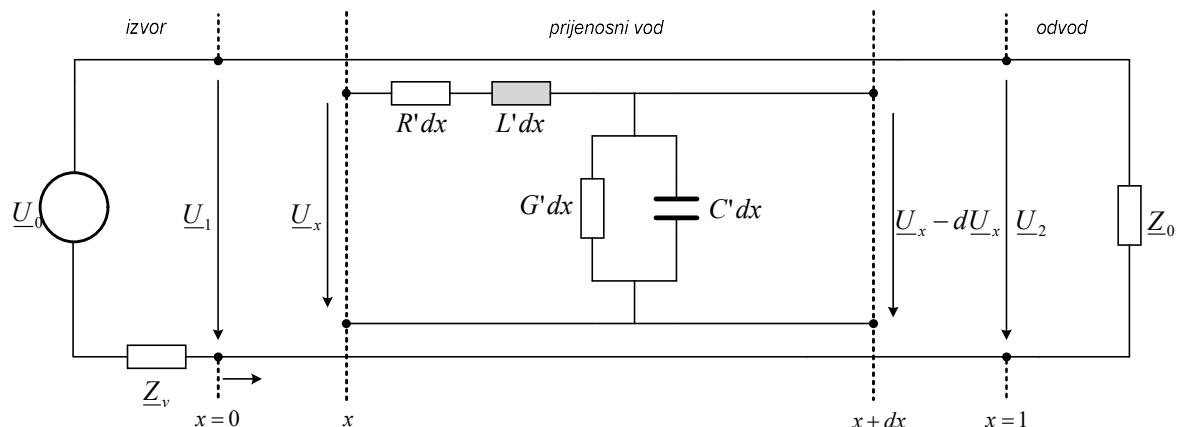
Otud težinski faktor  $g_i$ , koji je umnožak faktora transmisije i refleksije i koji je također manji ili jednak jedainici  $|g_i| \leq 1$ .

Što se duž staze događa više prijenosa i refleksije to je manji težinski faktor  $g_i$ . Zbog činjenice da duže staze imaju veće prigušenje oni manje pridonose sveukupnom signalu na točci primanja. Bilo bi razumno izabrati broj dominantnih puteva N za bilo koju dužinu.

Širenje signala u komplikiranim mrežama sa više ogranača dijeli se na manje staze na sličan način.

### 3.2.1. Prigušenje signala uzrokovano gubicima kabela

Kod propagacije signali su izloženi gušenju koje se povećava s dužinom propagacije i frekvencijom. Ovdje će se prezentirati detaljniji pogled na gubitke i prikazat će se njihov matematički model.



Slika 3.14. Širenje signala prijenosnim vodom

Teorija prijenosnog voda opisuje napon i struju uzduž voda (slika 3.14.) kako slijedi [14]:

$$\begin{aligned}\underline{U}(x) &= \underline{U}_2 \cosh(\underline{\gamma}x) + \underline{I}_2 \underline{Z}_L \sinh(\underline{\gamma}x) \\ \underline{I}(x) &= \underline{I}_2 \cosh(\underline{\gamma}x) + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_L} \sinh(\underline{\gamma}x)\end{aligned}\quad (3.33.)$$

Parametri koji opisuju prijenosni vod su karakteristična impedancija  $\underline{Z}_L$  i konstanta širenja  $\underline{\gamma}$ .

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}} \quad (3.34.)$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') \cdot (G' + j\omega C')} = \alpha + j\beta \quad (3.35.)$$

Uzvši u obzir prijenosni vod koji je ekvivalentan jedino valu koji se širi od izvora do cilja, prijenosna funkcija voda dužine  $l$  izražava se ovako

$$H(f) = \frac{U(x=l)}{U(x=0)} = e^{-\underline{\gamma} \cdot l} = e^{-\alpha(f) \cdot l} \cdot e^{-j\beta(f) \cdot l} \quad (3.36.)$$

Slika 3.15. prikazuje poprečni presjek niskonaponskog energetskog kabela sa četiri vodiča koji se koristi u elektroenergetskoj mreži Srednje Evrope.

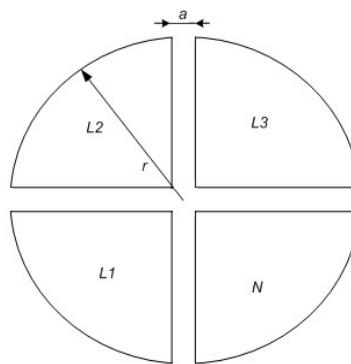
Induktivitet i kapacitet po jedinici duljine mogu se izraziti na slijedeći način:

$$\begin{aligned}C' &= \epsilon_0 \epsilon_r \frac{r}{a} \\ L' &= \mu_0 \mu_r \frac{a}{r}\end{aligned}\quad (3.37.)$$

Uzvši u obzir frekvenciju u MHz-ima, otpor po jedinici duljine određen je skin efektom i izražava se formulom

$$R' = \sqrt{\frac{\pi \cdot \mu_0}{\kappa \cdot r^2} \cdot f} \rightarrow R' \approx \sqrt{f} \quad (3.38.)$$

a pri tom slijedi segmentni vodič sa dijametrom  $r$ .



Slika 3.15. Poprečni presjek energetskog kabela (četiri vodiča)

Vodljivost po jedinici duljine

$$G' = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C' \tan \delta \rightarrow G' \approx f \quad (3.39.)$$

ovisi o dielektričnosti materijala (obično PVC).

Rezultat korištenja geometrije i svojstva materijala u gore navedenim jednadžbama rezultira sa  $R' \ll \omega L'$  i  $G' \ll \omega C'$  u frekvencijskom rasponu našeg interesa. Dakle za kabele kažemo da imaju male gubitke, a karakteristična impedancija  $\underline{Z}_L$  i konstanta rasprostiranja  $\gamma$  određuju se koristeći se slijedećim pojednostavljenim izrazima [19, 20]

$$\underline{Z}_L = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3.40.)$$

$$\underline{\gamma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{R'}{\underline{Z}_L} + \frac{1}{2} \cdot G' \cdot \underline{Z}_L + j\omega \sqrt{L' \cdot C'} = \alpha + j\beta \quad (3.41.)$$

Zbrajanjem karakterističnih parametara kabela u konstante  $k_1$  i  $k_2$  vodi do rezultata

$$\underline{\gamma} = k_1 \sqrt{f} + k_2 f + jk_3 f = \alpha + j\beta \quad (3.42.)$$

Realni dio konstante širenja  $\gamma$  i gušenje  $\alpha$  povećavaju se s frekvencijom. Odnos između  $\alpha$  i  $f$  proporcionalan je drugom korijenu  $f$ ,  $f$  ili kombinaciji oba (dominira  $k_1$  ili  $k_2$  dominira).

Realni dio konstante prodiranja može se napisati u slijedećem obliku:

$$\alpha(f) = a_0 + a_1 \cdot f^k \quad (3.43.)$$

Odgovarajućim izborom parametara  $a_0$ ,  $a_1$  i  $k$ , karakterizira se kao širenje signala energetskim kabelskim vodom:

$$A(f, d) = e^{-\alpha(f) \cdot d} = E^{-(a_0 + a_1 \cdot f^k) \cdot d} \quad (3.44.)$$

#### **4. PRIMJENA ELEKTROENERGETSKIH VODOVA U TELEKOMUNIKACIJAMA**

PLC je tehnologija koja se koristi za prijenos podataka velikim brzinama, a također i za prijenos govornih usluga. Funkcionira tako što prenosi signale visokom frekvencijom kroz istu kabelsku mrežu koja se koristi za prenošenje električne energije.

Interesantna je primjena uskopojasnog PLC-a na niskonaponskim elektroenergetskim vodovima radi davanja novih usluga, prvenstveno automatskog očitanja brojila (Automatic Meter Reading, AMR), kao najzastupljenije među njima.

Deregulirano energetsko tržište korisniku električne energije daje priliku izbora između više davaljelja energetskih usluga. Stoga se očekuje znatnija iskoristivost elektroenergetskog sustava u porastu potreba za električnom energijom i zahtjevima vezanim uz kakvoću električne energije, uz što manju potrebu za izgradnjom novih proizvodnih i mrežnih kapaciteta.

Deregulaciju prati izgradnja sustava za daljinsko automatsko očitanje brojila, izgradnja sustava upravljanja energijom, kao i izgradnja različitih sustava za implementaciju ostalih usluga za podržavanje elektroprivredne djelatnosti, a ta izgradnja u osnovi uključuje primjenu odgovarajuće telekomunikacijske i informacijske tehnologije.

Usluge za podržavanje elektroprivredne djelatnosti, među kojima je najznačajnija i najzastupljenija AMR, mogu se realizirati različitim telekomunikacijskim tehnologijama:

- mobilni radijski sustavi,
- fiksni radijski sustavi,
- telefonska mreža,
- jednosmjerni uskopojasni PLC,
- dvosmjerni uskopojasni PLC i
- širokopojasne tehnologije (uključivo širokopojasni PLC).

U početku uvodenja AMR-sustava osnovni cilj bio je smanjenje troškova očitanja, te je dominantna tehnologija za realizaciju AMR-a bila mobilni radijski sustavi (engl.: drive-by). Kod tih sustava kombijem se dolazi u blizinu brojila i korištenjem radijske tehnologije izvšava očitanje. Implementacija ovakvih AMR-sustava je najjeftinija i najjednostavnija, ali mogućnosti su ograničene. S druge strane, danas, kad se velika pozornost posvećuje mogućnosti učinkovitog provođenja dnevnog očitanja, sve više se kreće fiksnim instalacijama za AMR, gdje u najužem izboru ostaju fiksni radijski sustavi i PLC. Cijena fiksnih AMR-instalacija kontinuirano pada, čime ove napredne tehnike očitanja dobivaju na pozornosti. Općenito, izbor tehnologije pri implementaciji sustava za podržavanje elektroprivredne djelatnosti ovisi o okolnosti poslovanja elektroprivrede, zemljopisne karakteristike područja u kojem se AMR želi uvesti, ciljevi koji se AMR-om žele postići i strategija elektroprivrede. Kao samostalno rješenje AMR ekonomski je opravdan samo za određene uvjete (npr. teško dostupna brojila, gusto naseljena urbana područja). Prednosti uvođenja AMR-a su:

- smanjenje gubitaka uslijed krađe i manipuliranja brojilom,
- smanjenje troškova povezanih s iskapčanjem i ponovnim ukapčanjem brojila kod promjene vlasnika brojila, krađe, manipuliranja brojilom ili neplaćanja računa,
- poboljšanje pouzdanosti naplate,
- poboljšanu uslugu korisniku (manje je pogrešnih očitanja nego kod ručnog očitanja, pa ima manje prigovora korisnika) i

- informacije koje se prikupe AMR-sustavima mogu se iskoristiti za povećanje funkcionalnosti elektroprivrede prema korisniku.

AMR-sustavi ostvareni PLC-om imaju sva dodatna poboljšanja različitih vidova poslovanja koje uvođenje PLC-a omogućuje (mogućnost iznajmljivanja optike koja završava u stambenim područjima, budući da PLC rješava zadnju milju, a optika spoj na temeljnu telekomunikacijsku mrežu) uporabu uskopojasnih PLC-sustava za druge uskopojasne aplikacije kao što su alarmi i nadzorne funkcije; uporabu širokopojasnih PLC-sustava za AMR i širokopojasne telekomunikacijske usluge.

Ciljevi uvođenja AMR sustava su između ostalog:

- očitanje potrošnje električne energije, plina i vode,
- upravljanje novim tarifama ovisnim o potrošnji (opterećenju),
- pružanje dodatnih usluga u cilju zadržavanja kupaca,
- povećanje prihoda kad je ono teško ostvarivo proširenjem same elektroprivredne djelatnosti,
- kombinirana ponuda AMR-a i širokopojasnih telekomunikacijskih usluga,
- brže dobivanje prednosti na tržištu očitanja brojila
- brze izgradnje AMR PLC-sustava uz manje infrastrukturnih zahvata
- kombiniranje s ponudom alarmnih sustava radi povećanja prihoda.

Osnovne koristi ovog sustava su:

Za kupce:

- obračun prema stvarnoj potrošnji,
- izbor više tarifa,
- upravljanje ugovorima,
- nema više dolazaka očitača i
- troškovno učinkovit pristupnik preko kojeg se mogu osigurati dodatne usluge

Za zemlju:

- manja potrošnja,
- jednostavnija promjena opskrbljivača,
- nadzor dostupnosti i učinkovitosti mreže i
- upravljanje potrošnjom na mјernom mjestu.

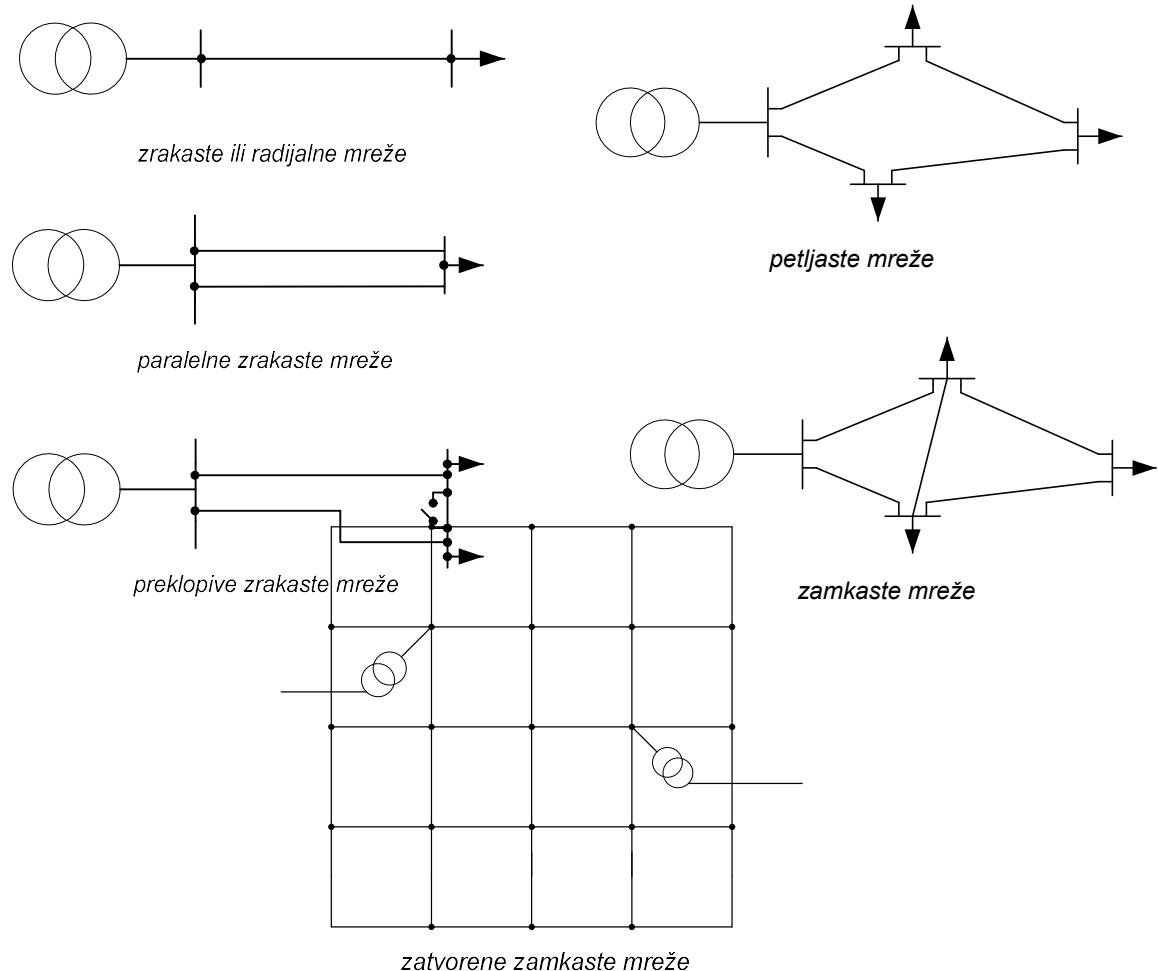
#### **4.1. Distribucija električne energije**

Pod niskonaponskom mrežom podrazumijevaju se strujni krugovi od izvora struje do sabirnica, odnosno priključka za osigurač na kućnom priključnom ormariću (KPO) s nazivnim naponom do 1 kV. Razlikuju se dva tipa niskonaponskih mreža: nadzemne i kabelske.

Električne mreže ne mogu se međusobno strogo određeno podijeliti, već ih se dijeli prema pojedinim njihovim svojstvima, npr.:

- prema vrsti struje: mreže istosmjerne struje i mreže izmjenične struje
- prema naponu: mreže niskog napona i mreže visokog napona
- prema namjeni: električne mreže za osvjetljenje, električne mreže za motorne pogone, električne mreže za toplinska opterećenja i električne mreže za mješovitu upotrebu
- prema broju vodiča: jednožične (npr. trola u tramvajskom saobraćaju), dvožične, trožične, četverožične

- po sistemu spoja: otvorene (zrakaste, paralelne, preklopive) i zatvorene (petljaste, zamkaste, zatvorene zamkaste)



- prema konstrukciji: nadzemne i podzemne (kabelske)

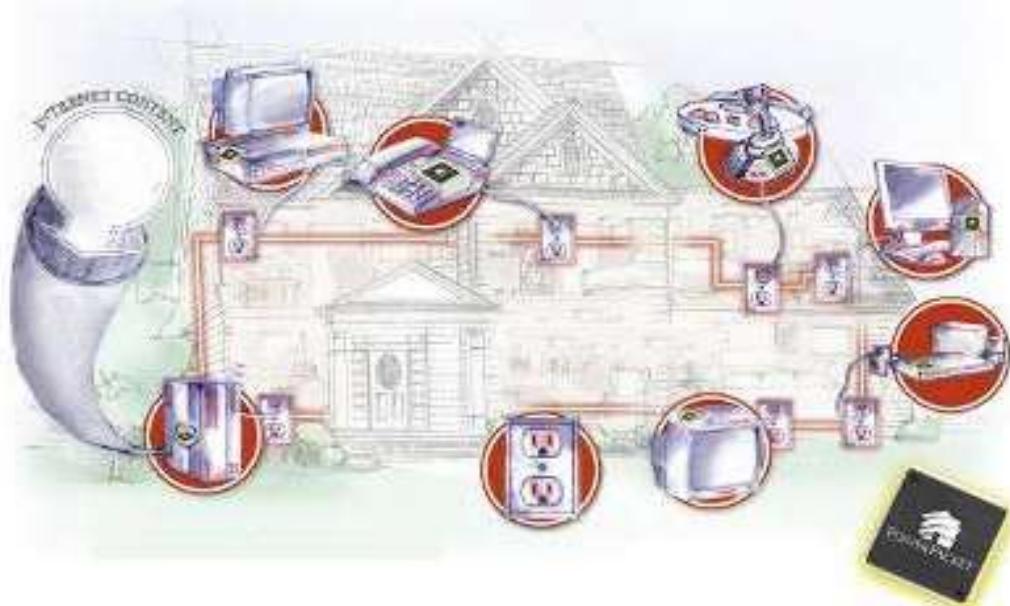
Sustav distribucije električne energije dizajniran je za sigurnu i učinkovitu distribuciju električne snage na pogonskoj frekvenciji (42; 50 ili 60 Hz), a ne za dvosmjernu telekomunikaciju.

Kućni elektroenergetski vod prenosi širokopojasne signale uglavnom bakrenim vodičima na velikim udaljenostima. Desetljećima se koristi za kućne intercom sustave (slika 4.1.) iako postoje šumovi i smetnje. Također se koristiti i za kontroliranje različitih električnih uređaja.

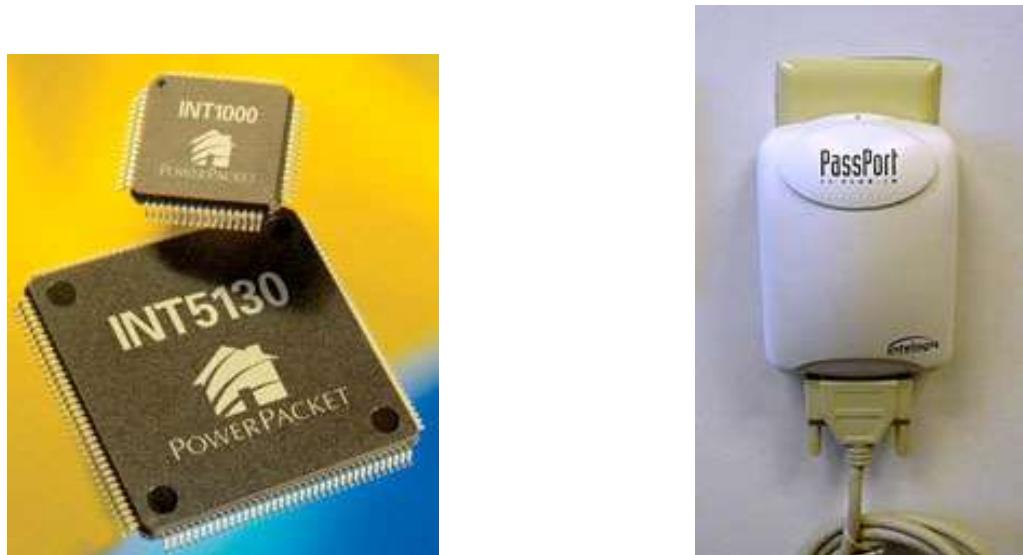
Pojasna širina parice je nekoliko MHz na udaljenosti od približno jedne milje. Širina pojasa bakrenog vodiča koja se koristi u elektroenergetskim vodovima slična je paricama u lokalnoj telefoniji, znatno se smanjuje s udaljenošću, ovisno o konfiguraciji vodiča.

Problem su šum i smetnje. Paljenje ili gašenje električne sijalice uzrokuje male električne iskrice koje imaju za posljedicu pojavu smetnje uzduž elektroenergetskog voda. Visoki naponi koji se koriste u distribuciji podložni su naponskom pražnjenju što stvara električne smetnje. Mnogi transformatori se opslužuju jednim visokonaponskim vodom s tim da se zemlja koristi za

povrat električnog signala. Takva konfiguracija je izložena smetnjama kada je u pitanju prijenos telekomunikacijskih signala.



Slika 4.1. Elektroenergetski vod u kućanstvu



Slika 4.2. Priklučci za elektroenergetski vod

Elektroenergetski vod je nezaštićen, pa djeluje kao antena koja kupi zrakom nošene smetnje (npr. bljesak munje, paljenje automobilskog motora, i visokonaponska iskrenja). Elektroenergetski vod također djeluje i kao divovska antena koja emitira visokofrekvencijske elektromagnetske smetnje.

Telekomunikacijski signali su vrlo maleni, najviše nekoliko volti. Ove male signale lako zagušuje 120 V na sekundaru transformatora, a isto naprave i tisuće volti na primaru. Smetnje koje su proizvedene na tako visokim naponima također zagušuju ili uništavaju male visokofrekvencijske telekomunikacijske signale i gotovo ih se ne može otkloniti. Udari munje na elektroenergetske vodove generiraju ogromne valove visokonaponskog elektriciteta od kojih osjetljive telekomunikacijske elektroničke uređaje treba zaštititi i izolirati.

Mnoga kućanstva su priključena na isti elektroenergetski vod (slika 4.2.). Ako se elektroenergetski vod koristi za telekomunikacijske usluge potreban je jedan veliki zajednički vod koji omogućuje da svi zainteresirani korisnici primaju iste signale. Zahtijevaju se sadržajne rezolucije multipleksiranja koje su slične onima koje se koriste za kabelske modeme i koji se koriste lokalnim mrežama za prijenos podataka. Ako se elektroenergetskim vodom prenose signali brzinom 2 Mb/s i ako se odgovarajuća pojasna širina dijeli na stotinu kućanstava, tada svako kućanstvo ima samo 20 kbit/s u prosjeku, što znači manje nego dial-up vezom spajanja modema.

Još jedna stvar koju treba naglasiti je sigurnost. Preko elektroenergetskog voda prenose se veliki naponi sa potencijalno velikim strujama. Niskonaponski uređaji u kućanstvima i uredima nemaju direktni pristup elektroenergetskom vodu (slika 4.2.). Direktna veza elektroenergetskih vodova za telekomunikacijsku upotrebu mora biti zaštićena od prenapona, dok je elektroenergetski vod zaštićen od kratkih spojeva.

## **4.2. Širokopojasna komunikacija elektroenergetskim vodovima**

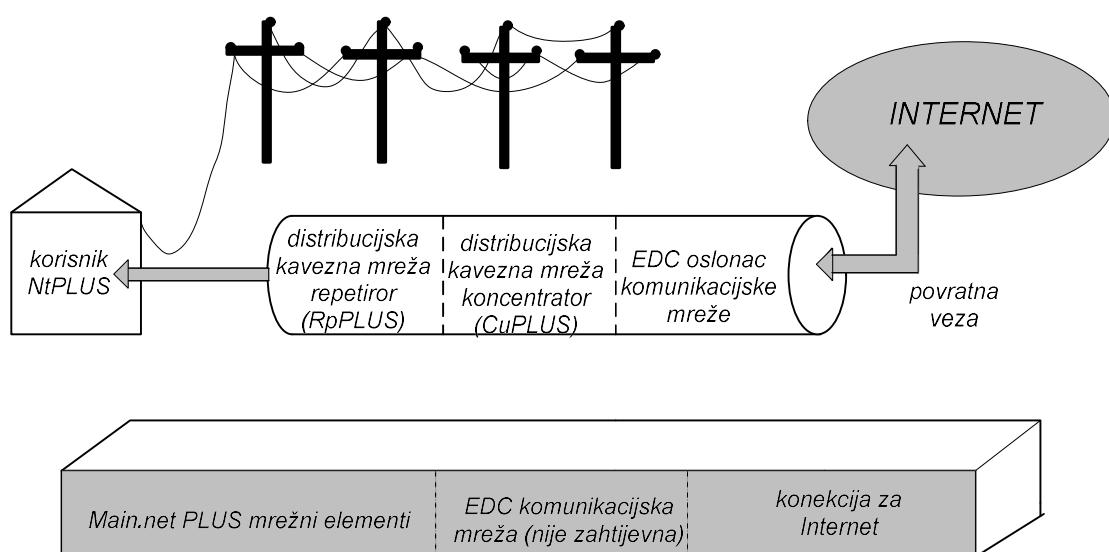
Cilj je ostvariti širokopojasni prijenos preko niskonaponskih vodova tako da postane stvarnost. To se postiže tako da se usredotoči na razvoj i primjenu PLC-a, odnosno rješenja posljednje milje, koji omogućuje širinu opsega ovisno o željama korisnika s kvalitetom usluge koju očekuje, po cijeni koju je voljan platiti. Postoje rješenja koja dostavljaju i održavaju sve komponente koje su potrebne za njihove mrežne partnerne i distribucijske kompanije električne energije, na način da ostvaruju želje korisnika, tako da se njihovo ulaganje vrati na najbolji mogući način (npr. Main.net-PLC)

Električna distribucijska mreža ima infrastrukturu koja pruža širokopojasnu uslugu. Obitelj PLUS usluga (CuPLUS, RpPLUS i NtPLUS) stvara širokopojasnu mrežnu arhitekturu, od kraja do kraja. Ta mreža se može konstruirati brzo i prilično povoljno što se tiče cijene, zato što koristi već postojeće elektroenergetske vodove za prijenos komunikacijskih signala. Kvarovi su vrlo rijetki, skoro pa nikad nijedan korisnik nije potraživao popravke, servis i sl, a nema ni potrebe za vrlo skupim uključivanjem pristupa kućanstvima. NtPLUS modemi se mogu dostaviti krajnjem korisniku, a krajnji korisnik ih jednostavno sam priključi na modem svog računala i to putem USB ili NIC kartice. PLUS (Power Line Ultimate System) je otvoreni fleksibilni sustav dizajniran za pružanje širokih raspona telekomunikacijskih usluga preko elektroenergetske mreže.

PLUS sustav se koristi sofisticiranom modemskom tehnologijom za postizanje visokog stupanja prijenosa podataka preko niskonaponskih i srednjenačnih elektroenergetskih vodova. PLUS također ima sposobnost usmjeravanja kao i precizne algoritme proračuna optimiziranja

upotrebe širokopojasnih prijenosnih usluga koje pruža PLC modem. Tamo gdje je potrebna samo telefonija primijenjujemo TelPlus seriju.

PLUS linija proizvoda (slika 4.3.) nije samo PLC sustav [53]. To je koncept koji daje vrlo povoljna telekomunikacijska rješenja za brzi prijenos preko već postojeće infrastrukture elektroenergetske mreže.

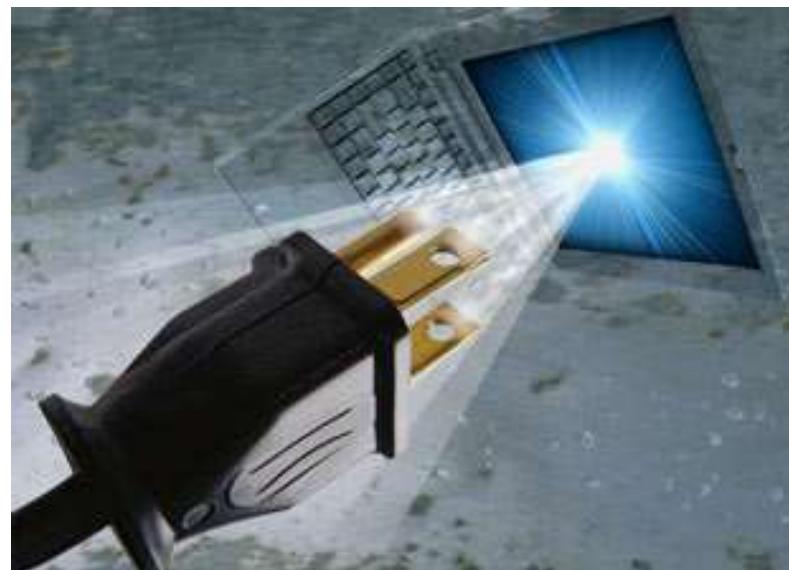


Slika 4.3. Main.net PLUS mrežni elementi

Prednosti PLUS paketa su:

- potpuno rješenje s kraja na kraj vođeno i kontrolirano za modemsku komunikaciju, koristeći se postojećom infrastrukturom;
- siguran prijenos podataka preko elektroenergetskih vodova;
- ostvaruje jednako kvalitetnu komunikaciju na niskim i na srednjim naponima (PLC signali prolaze kroz distribucijske transformatore i kroz brojila korisnika);
- "skrojen" je po mjeri karakteristika lokalnih elektroenergetskih mreža, sa što boljim učinkom;
- pruža standardni raspon prijenosa podataka od 2.4Mb/s (koji se može povećati na 10Mb/s po Q3-2002) koristeći se pri tom visoko učinkoviti modemom posebno dizajniranim za djelovanje u PLC okruženju koje je izloženo smetnjama;
- učinkovito djeluje na niskim, prilagodljivim nivoima prenošenja podataka preko elektroeneretskog voda (prilagođeno standardu elektroenergetske mreže);
- istovremeno primjenjuje mrežu pristupa PLC i mrežu pristupa domaćinstvu preko istog širokopojasnog prijenosa;
- jeftin je za korištenje i za održavanje;
- ostvaruje konfiguraciju i kontrolu na daljinu svih elemenata iz centralne stanice

CuPLUS veza za Internet transformira električnu mrežu na mrežu lokalnog područja, RpPLUS povezuje kućne električne utičnice sa CuPLUS i NtPLUS, uobičjuje mrežu i povezuje kompjuter na Internet putem standardne električne NN utičnice (slika 4.4.).



Slika 4.4. Širokopojasni prijenos elektroenergetskim vodovima – standardizirani priključak

Postoje četiri razloga zašto komunicirati putem PLC-a:

- sustav je komercijalno dostupan s velikim brojem instalacija širom svijeta,
- postoji rješenje potpune integracije sa kraja na kraj,
- sposoban je za prenošenje signala vodovima srednjeg i niskog napona, kroz transformatore i brojila, do korisnika
- omogućava brzu i jednostavnu uslugu za 30%-50% nižu cijenu

Ispituje se širokopojasni pristupa Internetu putem postojeće niskonaponske mreže. Tehnologija je poznata pod nazivom širokopojasni prijenos elektroenergetskim vodovima, BPL (broadband power lines).

To je sustav koji u konačnici korisnicima pruža pristup brzom Internetu preko NN utičnice, te je započela realizacija pilot-projekta u rezidencijalnoj četvri Greenway Plaza. Sustav nudi jedan i pol puta brži pristup Internetu od onog kojeg pružaju kabelski modemi. Najnovija istraživanja pokazuju da su električni vodovi sposobni prenijeti digitalne podatke približno istim brzinama kao i DSL (digital subscriber line), koji koristi već postojeće telefonske linije. DSL tehnologija zahtijeva sustav preklopnika, odnosno novu centralu koju telefonska tvrtka mora ugraditi u svoju mrežu da bi se povećao protok veće količine podataka preko telefonskih linija, a udaljenost kućnog priključka od "centrale" znatno utječe na kvalitetu prijenosa (s većom udaljenošću brzina prijenosa pada).



Slika 4.5. PCI računalna kartica s priključkom na PLC

Međutim u odnosu prema telefonskim linijama, "električna energija" prisutna je u kućama, pa se ova nova komunikacijska infrastruktura, tzv. "strujni internet" brzo razvija, posebice u rurarnim sredinama gdje nema širokopojasnog pristupa. Ipak, sve do nedavno nisu se koristile ponude visokokvalitetnog prijenosa podataka, video i audio usluga.



Slika 4.7. Za prijenos internetskih podataka koriste se elektroenergetski kabeli

Prilikom useljenja u novi stan, u roku od tri dana može se primijeniti novu uslugu. S BPL sustavom isporučitelji električne energije lako se prebacuju na novi servis jer je to pitanje minuta. BPL radi na principu slanja podataka pomoću radiovalova preko elektroenergetskih vodova.

Signal se pri tom pretvara u bežični signal i s električnog stupa usmjeren je prema modemu koji se nalazi u korisnikovom domu. BPL daje umreženi dom bez potrebe za novim ožičavanjem. Visokobrzinski pristup Internetu trenutno je dostupan više od 95% Amerikanaca, kako je pokazalo istraživanje FCC-a (Federal Communications Commission), ali tvrtke poput CenterPointa imat će ulogu ISP-a (Internet service provider) pružajući korisnicima usluge poput e-maila, Internet telefoniranja i drugih usluga [53]. Pokaže li se CenterPointov BPL pokuš uspješnim to će biti još jedan poticaj žestokoj konkurenциji na području pružanja širokopojasnog pristupa. Širokopojasni pristup Internetu preko električnih linija konkurira Internetskim uslugama koje se danas isporučuju preko telefonskih linija, kabela i satelita te tako znatno smanjuje cijene za krajnje korisnike. Ove planove pomno prate proizvođači mrežne opreme i regulatorna tijela, a osobito konkurenti u kabelskim i telekomunikacijskim tvrtkama koji danas drže gotovo sve privatne korisnike širokopojasnih veza na Internet.

#### *4.2.1. Primjena širokopojasnog PLC-a u elektroprivredama*

Širokopojasni PLC ili BPL (Broadband over Power Lines) je novija tehnologija komuniciranja putem elektroenergetskih vodova koja osigurava prijenos kapacitet veći od 2 Mbit/s. Širom svijeta postoji niz pilotskih instalacija, ali i komercijalnih instalacija BPL, kojima se primarno pruža pristup Internetu. Neki od implementiranih sustava koriste se i za davanje usluga podrške elektroenergetskoj djelatnosti. Primjer je tvrtka Cynergy Broadband.

Cynergy Broadband, podružnica tvrtke Cinergy Corp. i proizvođač širokopojasnog PLC-a, tvrtka Current Communication Group su započeli pružati uslugu BPL-a u Cincinnati-u, država Ohio. Planira se proširenje projekta na sjeverni Kentucky i Indiana.

Usluga koju nude sastoje se od brzog pristupa Internetu. Razmatra se i govorna komunikacija preko Interneta (voice over IP). Current Communication će nadzirati izgradnju BPL mreže, osigurati marketing, podršku kupcima i sl. Razmišlja se o dalnjim savezima s državnim elektroprivredama. Ukupna investicija iznosi 70 milijuna dolara.

Implementirani BPL sustav omogućava: stalni pristup Internetu, pristup postavljanju i skidanju podataka pomoću "HomePlug" modema, uspostavu lokane mreže, brzine veće od 3 Mbit/s po nižim mjesecnim cijenama nego što su za druge širokopojasne usluge, jednostavnu instalaciju opreme i aktivaciju usluge, nije potrebno dodatno ožičenje u kućanstvu, automatsko otkrivanje ispada i potvrda povratka napajanja, daljinski nadzor i operacije s mogućnošću daljinskog iskopčanja i ukopčanja kupaca, učinkovitiji programi upravljanja opterećenjem na mjernom mjestu, te automatsko očitanje brojila.

Cinergy ima uravnotežen portfolio koji se sastoji od dvije temeljne djelatnosti: regulirana djelatnost i prodaja energije. Unutar regulirane djelatnosti Cinergy ima 1.5 milijuna kupaca električne energije i oko 500 000 kupaca plina. U sklopu projekta planira se u roku od tri godine obuhvatiti 250 000 kupaca. Mjesečna naknada za uslugu pristupa Internetu s kapacitetom 3 Mbit/s je 39.95 dolara.

Izlazak na energetsko tržište predstavlja velik izazov za elektroprivrede jer traži poboljšanje finansijskih rezultata, pouzdanosti i sigurnosti, kao i pružanja što boljih usluga korisnicima.

Postizanju takvih rezultata pomaže poboljšanje poslovnih procesa i poboljšanje poslovanja uvođenjem odgovarajuće tehnologije.

Kao rezultat investiranja u automatizaciju distribucije sustavi funkcioniraju učinkovitije, učestalost i trajanje ispada elektroenergetske mreže su smanjeni, a imovina bolje iskorištena i održavana.

AMR, osim automatizacije mjesecnih očitanja brojila, donosi i druge značajne prednosti, kao što su: daljinsko ukapčanje i iskapčanje, upravljanje ispadima, očitanja izvan uobičajenog termina (npr. pri promjeni korisnika brojila) i uočavanje krađe.

AMR sustavi koji vrše očitanje brojila svakih 15 minuta ili češće dodatno mogu ponuditi očitanje na zahtjev, stimulativne tarife temeljene na vremenu korištenja i uvođenje inicijativa vezanih uz modeliranje zahtjeva.

Iz statističkih podataka vidi se da u uporabi AMR-a prednjači SAD, ali da se događaju značajne promjene i u Europi. Broj prodanih AMR-jedinica značajno raste iz godine u godinu. Uporaba PLC-a za AMR također je u stalnom porastu, kao i broj implementacija AMR-a u elektroprivredama. Sveukupno, sve je više elektroprivreda koje implementiraju AMR-sustave s PLC-om kao komunikacijskom tehnologijom.

Prednosti PLC-a pred drugim tehnologijama za AMR su: najveće pokrivanje, posebice za distribucije s geografski raspršenim korisnicima; kroz cijelo područje određene distribucije pruža se homogena razina usluge; sve su mogućnosti dostupne bez obzira radi li se o urbanom ili ruralnom području i bez obzira na gustoću korisnika; cijena sporije raste s padom gustoće korisnika nego kod drugih tehnologija; cijena značajno pada za slučaj gusto naseljenih urbanih područja nego kod drugih tehnologija.

Dok se ranijih godina u vrijeme državnih monopolističkih energetskih tvrtki elektroprivrede nije poticalo da investiraju u AMR-sustave jer je veći broj energetskih postrojenja i veća prodaja energije značila veći prihod i veći sveukupni profit, danas su cijena novih kapaciteta, nedostatak vremena za njihovu izgradnju i niža cijena tehnologije rezultirale time da se traži racionalizacija korištenja energije i potiču programi konzerviranja i uvođenje sustava za upravljanje zahtjevima za električnom energijom.

Može se očekivati sve šire prihvatanje AMR-a, jer ručno očitanje predstavlja značajan trošak. Dodatne prednosti ostvarive implementacijom AMR-a sve su važnije zbog smanjenja troškova, podizanja pouzdanosti i povećanja zadovoljstva korisnika i raste važnost bolje informiranosti o vremenskim vidovima računa za električnu energiju. Također, regulatori su sve više zainteresirani za konzervaciju energije, a AMR pomaže u upravljanju korištenja energije.

Isto tako, i dalje se očekuje značajna zastupljenost korištenja PLC-a u izgradnji AMR-a, kao i kombinirana uporaba PLC-a i radiofrekvencijskih rješenja.

Automatsko očitanje brojila, AMR (Automatic Meter Reading) općenito podrazumijeva daljinsko prikupljanje podataka o potrošnji, tj. očitanje brojila bez fizičkog ili vizualnog pristupa brojilu. Premda se AMR osim u elektroprivrednoj djelatnosti primjenjuje i u vodoopskrbama i opskrbama plinom, nas ipak zanima primjena AMR-a u elektroprivredama.

AMR podrazumijeva sljedeće: svaki kupac energije ima brojilo koje pruža podatke o korištenju energije, podaci o korištenju trebaju se spremiti na način koji prati određivanje cijene energije tijekom vremena, naplata se temelji na fiksnim cijenama ili na tržišno zavisnim cijenama (cijene se mijenjaju iz sata u sat ili češće), potrebno je bilježiti podatak o količini potrošene energije za svako tarifno razdoblje, u određenim vremenskim razmacima zabilježene podatke čita odgovarajuća elektroprivredna kompanija, preuzima ih i pohranjuje radi kasnijeg pozivanja na iste, u određenim vremenskim intervalima elektroprivredna kompanija kupcima energije ispostavlja

račun temeljen na količini potrošene energije i cijeni energije u razdoblju njenog korištenja, korisniku je omogućen uvid u vlastiti uzorak korištenja pregledom povijesti korištenja, elektroprivredna kompanija analizira podatke o korištenju u svrhu otkrivanja krađe energije i prijevara vezanih uz mjerjenje potroška energije.

U prošlosti glavni motiv elektroprivreda pri razmatranju uvođenja AMR-a bio je smanjiti troškove očitanja brojila. Tvrta AT&T s grupom elektroprivreda i tvrtkom Westinghouse započela je istraživati uslugu automatskog očitanja brojila prije tridesetak godina [59]. Nakon toga AT&T je ponudio usluge AMR-a temeljene na uporabi telefonske mreže po cijeni od 2 \$ po brojilu, što je bilo ekonomski neprihvatljivo.

Moderno razdoblje AMR-a počinje 1985. godine kad se implementira nekoliko projekata. 1986. Minnegasco uspostavlja radijski AMR sustav s 450.000 krajnjih korisnika, a 1987. Philadelphia Electric Co. instalira AMR sustav temeljen na uskopojasnom PLC-u putem niskonaponskih elektroenergetskih vodova s više tisuća krajnjih korisnika [43].

Premda je smanjivanje troškova i dalje značajan poticaj za uvođenje AMR-a, deregulacija energetskog tržišta dodatno je pojačala interes za ove sustave. AMR sustav se uz brojila sastoji od tri osnovne komponente: višefunkcionalnog čvora u kućanstvu (MFN), čvora za koncentrator i komunikator (CCN), te sustava za upravljanje i nadzor (OMS).

MFN je jedinica koja se ugrađuje u kućanstvu posebno uz brojilo ili je integrirana u brojilu. Njena je funkcija očitanje brojila u definiranim vremenskim razmacima (najčešće 15 minutni intervali) i pohrana očitanih vrijednosti u memoriju. CCN je osobno računalo koje se ugrađuje u niskonaponskoj trafostanici, upravlja svim MFN-ovima na tom području i odgovoran je za prikupljanje vrijednosti iz njihovih brojila. OMS upravlja sa više CCN-ova. Podaci koje je prikupio CCN se pohranjuju u OMS gdje se kasnije pregledavaju i analiziraju.

AMR sustav počinje s MFN jedinicom koja pretvara očitanje brojila u digitalni podatak prikladan za slanje do središnje opreme sustava. U slučajevima kada imamo elektromehanička brojila bez impulsnih izlaza, MFN jedinica se sastoji od optičkog čitača koji se ugrađuje s vanjske strane brojila i broji okretaje diska, te na taj način pretvara kWh u digitalni podatak. Ukoliko elektromehaničko brojilo ima impulsne izlaze tada se oni priključuju na MFN jedinicu koja pretvara impulse u digitalni zapis. Postoji i mogućnost zamjene postojećih elektromehaničkih brojila novim električnim brojilima s već ugrađenim komunikacijskim dijelom. Komunikacijski sustav za prijenos podataka od MFN jedinice do CCN-a može biti telefonska mreža, PLC sustav, radijski sustav, sustav kabelske televizije ili neki drugi komunikacijski sustav.

AMR zahtijeva vrlo mali prijenosni kapacitet, ali je za njegovu punu implementaciju potrebna komunikacijska veza između svakog brojila i središnje opreme sustava, što ga značajno poskupljuje.

Neke od značajnijih koristi koje elektroprivrednim tvrtkama donosi uporaba AMR-a su:

*Smanjenje troškova očitanja:* Tradicionalan način očitanja zahtijeva značajnu radnu snagu i može predstavljati značajan udio u troškovima poduzeća. Uz trošak radne snage postoji i trošak vozila, osiguranja uniforme i slično, koji se mogu izbjegći tehnološkim rješenjima. Isto tako, u mnogim područjima postoji ograničenje maksimalnog broja uzastopnih procjena očitanja brojila.

*Mogućnost očitanja teško dostupnih brojila:* U većini slučajeva brojilo je smješteno unutar posjeda kupca. Pristup tim brojilima često podrazumijeva fizički pristup radnika koji očitava brojilo, očitača. Taj problem danas je naglašen jer kupci često nisu kod kuće u vrijeme dolaska očitača. To dovodi do ponovnih izlazaka na teren radi očitanja, veće zastupljenosti procjenjenih umjesto očitanih stanja brojila, gubitaka prihoda, neotkrivenih neovlaštenih potrošnji i sl. Primjenom AMR-a ovi problemi nestaju i eliminiraju se obračuni temeljeni na procjeni.

*Poboljšanje usluga:* U dereguliranom okruženju, zadovoljstvo kupaca i zadržavanje kupaca su ključne komponente poslovanja Opskrbe. AMR sustav poboljšava uslugu kupcima jer daje češća očitanja i obračun temeljen na stvarnoj potrošnji u odgovarajućem vremenskom razdoblju, povećava točnost očitanja brojila smanjenjem grešaka uzrokovanih ljudskim faktorom, omogućava upozorenja o kvarovima, smanjuje ometanje kupaca u odnosu na ručna očitanja budući da radnici Opskrbe ne ulaze u prostor kupca te ubrzava proces rješavanja žalbi kupaca vezanih za očitanje brojila.

*Povećanje zadovoljstva očitača:* Radnici koji očitavaju brojila izlažu se opasnosti nesigurnih okruženja, bilo da se radi o području s povećanom stopom kriminala, psima ili nečem trećem. Automatizacijom procesa očitanja smanjuju se opasnosti koje prijete očitačima.

*Primjena cijena u stvarnom vremenu:* AMR uvodi promjenjive tarife temeljene na dobu dana kad je potrošnja ostvarena. Različiti tarifni modeli zasnovani na određenim vremenskim razdobljima dana mogu se koristiti za ohrabrenje kupaca da prebace svoju potrošnju u vrijeme nižeg opterećenja elektroenergetskog sustava kao i obeshrabriti ih da koriste električnu energiju za vrijeme vršnog opterećenja elektroenergetskog sustava. To osigurava proizvodnji smanjenje maksimalnih kapaciteta elektrana i postizanje boljeg povrata kapitala.

*Smanjenje vremena od očitanja do obračuna:* AMR Opskrbama smanjuje vrijeme od očitanja do obračuna, integrirajući podatke o očitanjima i sustav za obračun. Isto tako, AMR, osigurava češća očitanja a time i češće obračune.

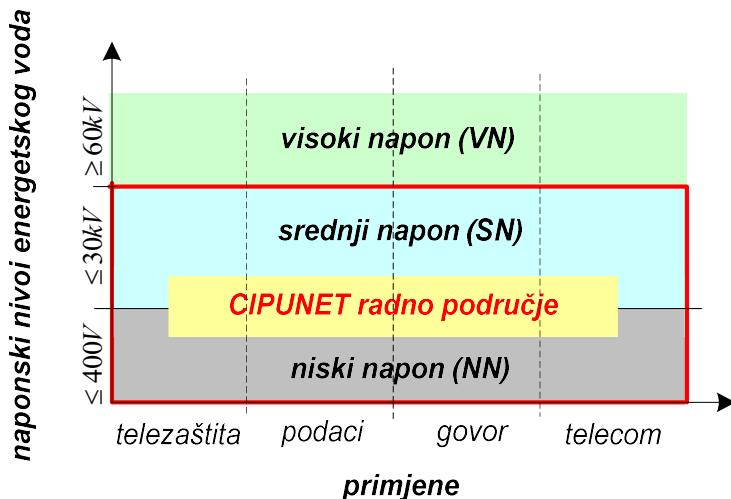
*Poboljšano uočavanje prijevara:* AMR elektroprivredama osigurava uočavanje prijevara s brojilima, uključivo prekide kabela na brojilu. Pripadne račune sustav označava posebnim kodom kojim upućuje na potrebu istraživanja slučaja.

Istim komunikacijskim sustavom koji se koristi za AMR ostvaruje čitav niz usluga i funkcija koje u velikoj mjeri smanjuju operativne troškove elektroprivrede, a neke od njih donose i dodatne prihode. Dodatni troškovi povezani s uvođenjem tih funkcija u AMR sustav neznatni su. Dodatne usluge i funkcije su npr.: daljinsko uključenje i isključenje kupaca, upravljanje potrošnjom, plaćanje unaprijed (engl.: prepayment), kontrolna mjerena (engl.: submetering), kupcu se daje mogućnost pristupa podacima, sigurnosni sustavi poput protuprovalnih alarma, upravljanje inteligentnim aparatima u kućanstvu i automatizacija distribucije.

#### *Komercijalne telekomunikacijske usluge*

Među ostalim karakteristikama PLC pruža potpuno integrirane usluge, visoku učinkovitost i univerzalni pristup. Nadalje korištenje postojeće infrastrukture dovodi do brzih zaokreta u mreži, osobito uvezši u obzir činjenicu da su PLC tehnologija i instalacija opreme znatno napredovali tijekom proteklih godina. PLC je alternativno pristupna tehnologija koja nadopunjava postojeću pristupnu tehnologiju na tržištu i pomaže razvoju informacijskog društva.

Širokopojasni PLC je velika prilika za jedinice koje maksimiziraju vrijednost njihovih postojećih električnih mreža. Stvara novi izvor prihoda time što nudi širokopojasni pristup Internetu, telefoniji i drugim uslugama, postojećim korisnicima električne energije. Širokopojasno tržište se znatno povećava i glavni je pokretač rasta telekomunikacijskih usluga. PLC operatori uzimaju dio širokopojasnog tržišta povećavajući prihod po klijentu. Nadalje širokopojasni PLC uvodi primjene koje poboljšavaju učinkovitost glavnog biznisa električne kompanije: automatskog očitavanja brojila, monitoring i upravljanje mrežom, itd.



Slika 4.8. Područja primjene

Mnogi PLC pokušaji uspešno su dovršeni u Evropi, što dokazuje održivost solucije alternativnih telekomunikacijskih mreža, koristeći već postojeću infrastrukturu.

*Electricité de France – EDF* je uspješno dovršio nekomercijalnu liniju proizvoda. Sada se sa lokalnim vlastima i vlasnikom električne mreže dogovara primjena na ispitnom području koje obuhvaća 35000 kuća. Kao konekcija koriste se iznajmljene linije i DSL linije. 1500 korisnika testira Internet pristup PLC tehnologija mrežom koja je u stanju postići brzine 256 kbit/s. Testiraju se naseljena područja

Treba napomenuti da EDF do sada nije dobio nikakve pritužbe na elektromagnetske smetnje. Slijedeći koraci razvoja PLC-a u Francuskoj su planiranje da EDF postane javna kompanija te da postane francuski PLC provider. Vlasnici električne mreže traže dopuštenje da postanu telekom operateri i da se testira VOIP servis kao i novu generaciju PLC opreme.

*Electridiade de Portugal – EDP* je uspješno realizirao ispitivanje PLC-a i doveo do početaka komercijalizacije. PLC tehnologija sa tisuću konektiranih korisnika pokriva 95% kuća u području testiranja. Tijekom šest mjeseci probno je priključeno 1800 kuća. Svi korisnici uključeni su na Internet i govorne usluge. Nisu zabilježene nikakve smetnje. EDP je donio posljednju odluku glede prve komercijalne implementacije PLC mreže i sklopljen je ugovor sa ONI telekom tvrtkom. EDP ima 56% dionica ONI tvrtke i jedna je od tvrtki koje imaju monopol u Portugalu. EEF rastuća je PLC mreža i planira razvoj i povećanje korisnika. Iskustva su: pozitivan odziv korisnika koji su vrlo zadovoljni PLC tehnologijom, dostigli su važnu ulogu prodiranja u male tvrtke, nisu imali velikih tehničkih problema. Novi korisnici će biti priključeni u mrežu u vrlo kratkom vremenu iz razloga što je PLC infrastruktura već položena

*ENF – Spain*, Endesa je komercijalizirala PLC već 2003. godine. Glavna obilježja su prijenos glasa (Voice over IP) i Internet pristup. Upravo komercijalizira svoje usluge u Zaragozi i Barceloni sa zadovoljavajućim rezultatima. Endesa je dobila operatorsku licencu od španjolskih vlasti, 60 % Endesa korisnika koji su probno koristili PLC potpisalo je ugovor za PLC usluge. 85 % korisnika je potpisalo za VOIP usluge. Slijedeći korak Endesa je analizira komercijalizacijskih rezultata za buduće implementacije.

*ENEL (Italia)* je uspješno postavio niskonaponsku PLC mrežu i počeo je sa testiranjem 2004. godine. Aktualan status Enel projekta obuhvaća postavljanje nekomercijalne mreže u području Grasseto. Dobili su preko 6000 zahtjeva za priključak i 2400 korisnika priključeno je u 950 gradova sa instalacijom od 3800 uređaja. Enel je ostvario najbržu primjenu PLC mreže i svi potencijalni korisnici se mogu priključiti vrlo brzo. Zabilježeno je visoko zadovoljstvo korisnika. Stabilnost sustava i tehnologije je vrlo visoka te nije zabilježen niti jedan ispad u pogonu cijelog sustava. U 2004. godini Enel PLC projekt je testiran u Wind telekomunikacijskoj tvrtci koja je u vlasništvu Enel-a. Slijedeći koraci su strateške odluke.

*Iberdrola (Španjolska)* nastavlja razvoj na komercijalnoj osnovi. Krajem 2004. godine PLC usluge su dostupne u Valenciji i Madridu i u planu je širenje na još dva grada. Više od 60 000 domaćinstava ima od listopada 2004. godine dostupan PLC signal, što znači da kada se potpiše ugovor potrebno je samo postaviti instalaciju. Iberdrola je postigla porast od 150 000 korisnika godišnje (PLC signal u metrima po prostoriji). Uspješno nudi dva različita Internet pristupa (do 600 Kb po 39 eura). Krajem listopada 2004 novi je pristup (do 1 Mb) dostupan na tržištu, uz ponudu visokofrekventne usluge na tržištu.

Iberdrola i dalje posluje po već spomenutim ciljevima: razvija maloprodajnu mrežu i očekuje komercijalizaciju PLC pod znakom Iberdrola, radi sa PLC SN i NN dostupnom tehnologijom, obavila je neke interferencijske testove koji su dokazali da ona ne postoji, mogući problemi sa radioamaterima se rješavaju slučaj po slučaj, a zasada ih nema

*Unión Fenosa (Španjolska)* je provela nekoliko uspješnih tehnoloških pokušaja i postigla licencu proširenja za PLC. Komercijalizacija će pričekati dok se ostvare određeni uvjeti. Trenutni status projekta je: poslovni model Unión Fenosa je odlučen i potvrđen kao potpuni proizvod široke potrošnje, potencijalni komercijalni partner proučava tržište u smislu donošenja odluke, Unión Fenosa će s plasmanom čekati dok ne postane dostupna oprema PLC-a nove generacije, Unión Fenosa testira trenutnu PLC SN i NN tehnologiju u Madridu na 30 korisnika. 2002. godine, Unión Fenosa je uspostavio uspješnu pokusnu stanicu u Guadalajara (Španjolska) koja se testira na 30 korisnika. Za vrijeme pokusa Unión Fenosa je ponudila Internet i VoIP. Kompanija je postigla preko 80% korisnosti Interneta. VoIP je manje zastupljen od Interneta, sa manje od 50%.

Unión Fenosa ne vidi ograničenja u elektromagnetskoj interferenciji za razvoj, jedino kao problem u izoliranim slučajevima, koji će se posebno individualno rješavati.

*Drewag (Njemačka)* je počeo sa komercijalizacijom PLC krajem 2003. godine. U rujnu 2004. godine Drewag je implementirao sustav kod 15000 kućanstava i postigao 700 preplatnika na Internet.

*Linz AG (Austrija)* je komercijalni PLC davatelj usluga od kraja 2002. godine glavni podaci su da je rujnu 2004. Linz AG razvio pokrio je PLC uslugom 37000 kućanstava. Usluga podrazumijeva SN i NN PLC sustave. Linz Ag do rujna 2004. godine imao je 3000 preplatnika na Internet. Broj je u 12 mjeseci (jesen 2003. – jesen 2004. godine) porastao sa 1000 na 3000. Operator omogućava brzine od 768 kbit/s.

*Power PLUS Communications – PPC (Njemačka)* je vodeći PLC operator sa više od 200000 kućanstava. PPC AG je zajedničko društvo između MVV Energie AG i ABB New Ventures GmbH. MVV Energie AG pčela je 01. 07. 2001. godine u Mannheim sa komercijalnim razvojem PLC. Komercijalni razvoj se prenio na PPC. PPC-ev projekt pokriva različite vidove PLC tehnologije, od pilot-projekta, komercijalnih usluga, razvoja LC servisa, i slično. PPC trenutno pokriva 9000 kućanstava. Više od 5000 preplatnika koristi brzi pristup Internetu putem PLC (do 400 kbit/s). PPC razvija novi poslovni segment, razvijajući kombinirani (napajanje i WLAN) pristup širim mrežama sa velikim brojem članova. PPC nudi uspješnu PLC-WLAN verziju za

hotele. Nisu dokazani nikakvi problemi izazvani sa PLC. Privatni radio-amateri prijavljuju brojne neotkrivene probleme sa interferencijom. Samo su dva dokazana problema sa interferencijom pod istragom RegTP. PPC vjeruje da su i te pritužbe neosnovane.

*Scottish Southern Electric – SSE (Ujedinjeno Kraljevstvo)* razvija PLC komercijalne aktivnosti i postao je međunarodni čimbenik PLC tehnologije i satelitskog povezivanja. SSE razvio je PLC mrežu Winchester, Stonehaven, Campbeltown i Crieff, pokrivajući 20000 korisnika

### *Rezultati i realizacije*

AMRA (Automatic Meter Reading Association) je neprofitno udruženje koje uslužnim tvrtkama pruža informacije o inovativnim tehnologijama čija primjena unapređuje njihov rad, uslugu koju pružaju kupcima i korištenje raspoloživih izvora (adresa na Internetu: [www.amra-intl.org/about/index.htm](http://www.amra-intl.org/about/index.htm)).

Udruženje između ostalog izdaje izvještaje o probnim poligonima i instalacijama temeljenim na primjeni inovativnih tehnologija koje ne uključuju sve instalacije koje postoje, već daju snimku razvojnih aktivnosti temeljenu na dobrovoljnoj prijavi projekata od strane samih uslužnih tvrtki.

Izvještaj za 2003. godinu [30], daje prikaz instalacija za AMR u 85 uslužnih tvrtki koje sveukupno uključuju 18,3 milijuna instaliranih i/ili ugovorenih krajnjih jedinica. Od prijavljenih projekata njih 67% su novi, što ukazuje na pozitivan trend AMR-aktivnosti. Od prezentiranih 85 projekata, njih 34% koriste PLC, a od ukupnog broja instaliranih jedinica, njih 6% komunikaciju ostvaruje korištenjem PLC-a. U Tablici 4.1. dan je prikaz projekata koji za AMR koriste PLC-tehnologiju. Svi osim projekta tvrtke Integral Energy Blacktown iz Australije, vođeni su u SAD-u. Među dobavljačima navedenih projekata dominiraju dvije američke tvrtke: Hunt Technologies i DCSI.

Podaci objavljeni u godišnjim izvještajima organizacije AMRA prikupljaju se na temelju dobrovoljne prijave projekata od samih komunalnih tvrtki koje vode projekte, tako da njihovo uspoređivanje od godine do godine ne daje ispravnu sliku stanja na tržištu. Svakako je relevantan podatak o broju novih instalacija, koji u stvarnosti može uključivati više projekata od prijavljenih. Ovakav pristup prikupljanju podataka koji se oslanja na komunalne tvrtke kao izvor podataka, rezultat je činjenice da AMRA želi dati viđenje AMR-industrije neovisno o proizvođaču, kao i da ne nastupa agresivno prema komunalnim organizacijama budući da neke i ne žele davati informacije o svojim strateškim ili taktičkim inicijativama. Međutim, rezultat je često pogrešno interpretiranje prikupljenih podataka (npr. za 2002. godinu bilo je prijavljeno manje instalacija nego za 2001. pa se na temelju toga često analiziralo da je AMR-tržište doseglo zasićenje i predstoji opadanje AMR-industrije). Podaci koje proizvođači AMR-rješenja daju o svojoj prodaji su daleko točniji pokazatelji stanja AMR-industrije. [29]

Tablica 4.1. Popis AMR-projekata koji koriste PLC prijavljenih organizaciji AMRA za 2003. godinu [30]

	elektroprivreda	ukupan broj brojila	dobavljač instalacije	PLC-	broj AMR-brojila		početak projekta
					instaliranih	ugovorenih	
1	ATCO Electric Ltd., Edmonton, AB	173.000	DCSI		136.000	158.000	1.1.1994.
2	BartonCounty Electric Cooperative, Lamar, MO	6.000	DCSI		3.600	6.000	1.1.1999.
3	Beltrami Electric Cooperative Bemidji, MN	16.300	Hunt Technologies		15.100	0	1.1.2003.
4	Butler County REC, Allison, IA	5.940	Hunt Technologies		5.900	0	1.1.2000.
5	Callaway Electric Cooperative, Fulton, MO	12.358	DCSI		80	1.080	1.2.2003.
6	CanadianValley Electric Cooperative, Seminole, OK	21.200	DCSI		20.000	0	1.3.2000.
7	Carbon Power & Light Inc., Saratoga, WY	5.625	DCSI		1.700	5.625	20.12.2002.
8	Central Electric Cooperative, Parker, PA	25.528	Hunt Technologies		13.121	20.003	1.1.2000.
9	Central Lincoln PUD, Newport, OR	35.138	Hunt Technologies		460	0	1.1.2001.
10	Clark Energy Cooperative Inc., Winchester, KY	24.000	Hunt Technologies		23.850	0	1.8.1991.
11	Comanche Electric Cooperative, Comanche, TX	16.000	Hunt Technologies		7.000	0	1.1.1998.
12	Co-Mo Electric Cooperative Inc., Tipton, MO	28.200	DCSI		13.550	28.000	1.12.2001.
13	Holy Cross Energy, Glenwood Springs, CO	96.162	Hunt Technologies		4.200	0	1.1.2000.
14	Illinois Rural ElectricCo., Winchester, IL	10.225	Hunt Technologies		6.425	10.225	1.1.1998.
15	Integral Energy Blacktown, Australia	760.000	Intermoco		200	400	1.12.2002.
16	Intercounty Electric Cooperative Association, Licking, MO	56.000	DCSI		17.600	28.000	1.1.2002.
17	Kandiyohi Power Cooperative, Willmar, MN	9.871	Hunt Technologies		8.835	1.035	1.9.2000.
18	KayElectric Cooperative, Blackwell, OK	5.569	DCSI		4.366	0	1.6.2000.
19	Kiamichi Electric Cooperative, Wilburton, OK	19.103	DCSI		11.005	20.102	1.4.2000.
20	Lee County Electric Cooperative, North Fort Myers, FL	160.000	DCSI		40.500	160.000	1.3.2002.
21	Minnesota Power,+B45 Duluth, MN	131.300	Hunt Technologies		29.336	74.000	1.5.2002.
22	North Arkansas Electric Cooperative Inc., Salem, AR	32.358	TVESCO		18.152	33.357	1.1.2001.
23	Northern Rio Arriba Electric Co-op, Chama, NM	3.856	Hunt Technologies		3.474	0	1.1.2001.
24	Okefenoke EMC; Nahunta, GA	29.500	DCSI		3.150	9.500	15.9.2002.
25	Ozarks Electric Co-op, Fayetteville, AR	53.800	DCSI		38.000	53.800	1.1.2001.
26	Rappahannock Electric Cooperative, Culpeper, VA	82.500	DCSI		80.750	0	1.2.2001.
27	Red River Valley Co-op. Power, Halstad, MN	6.400	Hunt Technologies		5.585	815	1.1.2003.
28	Sac Osage Electric Cooperative, El Dorado Springs, MO	10.280	DCSI		10.262	0	1.4.2000.
29	Tallapoosa Roiver Electric Cooperative, LaFayette, AL	21.458	Hunt Technologies		12.073	9.385	1.1.1998.
<b>UKUPAN BROJ AMR-JEDINICA</b>		<b>1.857.671</b>			<b>534.274</b>	<b>619.327</b>	

U Tablici 4.2. dan je prikaz projekata koji za AMR uz PLC koriste i druge tehnologije. U ovu kategoriju spada i najveći projekt uvođenja AMR-a na svijetu koji vodi talijanska tvrtka Enel S.p.A..

Tablica 4.2. *Popis AMR-projekata koji koriste PLC i druge tehnologije, podaci AMRA za 2003. godinu [30]*

	<i>elektroprivreda</i>	<i>ukupan broj brojila</i>	<i>dobavljač PLC-instalacije</i>	<i>broj AMR-brojila</i>		<i>početak projekta</i>
				<i>instaliranih</i>	<i>ugovorenih</i>	
1	ATCO Electric Ltd., Edmonton, AB	27.000.000	Echelon Corp.	7.700.000	0	30.6.2000.
2	BartonCounty Electric Cooperative, Lamar, MO	119.040	DCSI	880	18.200	1.6.2003.
3	Beltrami Electric Cooperative Bemidji, MN	51.358	DCSI	48.792	0	14.1.2002.
4	Butler County REC, Allison, IA	9.000	Hunt Technologies	6.225	0	1.3.1996.
5	Callaway Electric Cooperative, Fulton, MO	17.000	DCSI	9.950	7.050	1.9.2002.
6	CanadianValley Electric Cooperative, Seminole, OK	103.553	Hunt Technologies	41.130	0	1.1.1990.

Tvrtka Hunt Technologies (adresa na Internetu: [www.turtletech.com](http://www.turtletech.com)) istražuje AMR od svojih početaka sredinom 80-tih godina prošlog stoljeća. Do danas, tvrtka je isporučila skoro 4 milijuna krajnjih AMR-jedinica za više od 450 tvrtki. Na AMR-tržištu ima najveći udjel u području ruralnih elektroprivreda, a raste joj udio u području elektroprivreda u vlasništvu privatnih investitora.

Tvrtka nudi jednosmjerna, a od 2001. godine i dvosmjerna rješenja automatskog očitanja brojila korištenjem PLC-tehnologije. Za dvosmjerno rješenje se do veljače 2004. godine opredijelilo više od 30 tvrtki, što uključuje više od 2 milijuna krajnjih jedinica, od kojih se njih 5 opredijelilo za implementaciju na cijelom svom teritoriju. Ovo rješenje je bogatije performansama i omogućuje: očitanje vremena korištenja, daljinsko ukapčanje i iskapčanje, nadzor opterećenja s verifikacijom, direktno očitanje registra trofaznog brojila, uočavanje ispada, obavijest o povratku napona.

Prema podacima za 2003. godinu, tvrtka je postigla 20% bolje rezultate od predviđenih. Sklopili su ugovore za AMR sustav s 28 novih korisnika.

U proljeće 2004. tvrtka je objavila potpisivanje licencnog ugovora s tvrtkom Itron, vodećim proizvođačem bežičnih AMR-sustava, o prodaji, dizajnu, dalnjem razvoju, proizvodnji i podršci primopredajnog kodera za AMR [33]. Zahvaljujući tom ugovoru, tvrtka Hunt Technologies uključuje i Itronovu radiofrekvencijsku tehnologiju u svoja brojila, te nudi integraciju dvije najraširenije vrste AMR-rješenja, rješenja s radiofrekvencijskom komunikacijom i rješenja s PLC-om, te tako poboljšava svoju poziciju na tržištu.

Tvrtka Hancock-Wood započela je istraživanje rješenja za očitanje brojila zbog potrebe smanjenja troškova i učinkovitijeg organiziranja procesa očitanja, ali se na široko uvođenje sustava odlučila zadovoljna iskustvima i ostalim mogućnostima koje sustav pruža: [31]

- analiziranje kvalitete napajanja
- fleksibilnije naplate
- dnevno očitavanje koje posebice pomaže odjelu za odnose s kupcima jer im pomaže u odgovorima na upite korisnika

Budući planovi tvrtke uključuju: korištenje izvještaja o potrebama kupaca (u smislu opterećenja) kao pomoći pri modeliranju opterećenja i prikaz podataka o korištenju električne

energije preko web-a za komercijalne korisnike. Tvrta procjenjuje da će se temeljem ušteda u različitim odjelima tvrtke investicija vratiti u manje od 5 godina.

Sličan primjer je i tvrtka *Alger Delta Electric Cooperative of Gladstone*, koja se također odlučila instalirati dvosmjerno AMR-rješenje tvrtke Hunt Technologies na svih 10.000 brojila na svom teritoriju, s tim da ga osim za očitanje brojila, namjerava koristiti i za potrebe upravljanja radom sustava. Ključni faktor za odabir bila je potreba učinkovitijeg očitanja, posebice za brojila sezonskih kupaca. Ostale mogućnosti sustava zadovoljile su bitne operativne potrebe Alger Delte. Dnevno izvještavanje o ispadima olakšava izlazak osoblja za održavanje tijekom radnog vremena, a ne popodne ili vikendom (kad sezonski potrošači najviše zovu radi prijave kvarova). Prikupljeni podaci o opterećenju elektroenergetske mreže značajna su podloga za inženjersko planiranje. Tvrta predviđa zamjenu svih brojila do kraja 2006. godine. [32] Predviđaju da će uštede na očitanju brojila osigurati povrat investicije unutar 7 do 8 godina, uključivo i trošak kredita koji su uzeli za ovu namjenu. Očekuju da će se vrijeme povrata i skratiti kad se uzmu u obzir ostale uštede koje sustav pruža.

U prosincu 2003. tvrtka *Habersham Electric Member Cooperative, Clarkesville, Ga*, odlučila se za punu implementaciju dvosmjernog AMR-sustava tvrtke Hunt Technologies, čemu je prethodila probna instalacija s 900 brojila korisnika kategorije kućanstva. Tvrta ističe da se na punu implementaciju odlučila zbog performansi AMR-rješenja koje pruža dvosmjerni sustav tvrtke Hunt Technologies i same tvrtke, koja je isporučila i implementirala sustav potpuno u skladu s danim opisom. Značajan porast broja korisnika zbog izgradnji domova umirovljenika, potaknuo je tvrtku Habersham da potraži troškovno učinkovitu opciju očitanja brojila. AMR-sustav popunjava račun i osigurava brže rješavanje pritužbi na visinu računa. U tvrtki očekuju povrat investicije unutar tri do četiri godine. [36]

Kao primjer poboljšanja koje elektroprivredama donosi implementacija njihovih AMR-rješenja, tvrtka Hunt Technologies na svojim stranicama na Internetu navodi dva slučaja:

- Minnesota Valley Cooperative Light & Power Association i
- Kentucky Utilities Co.

*Minnesota Valley Cooperative Light & Power Association* (5000 korisnika u južnoj Minnesoti) implementirala je PLC AMR sustav fokusiran na usluge kupcima. Sustav je poboljšao kvalitetu života kupaca (eliminira potrebu da kupac sam očitava svoje brojilo) i povećao njihovu lojalnost. Ponudili su dodatne usluge svojim korisnicima, sustav grijanja, usluge praćenja, kreditiranje. Utjecaj AMR-a na poslovanje tvrtke je očit: trošak očitanja je značajno pao, pritužbe na previsoki račun su pale s 10 pritužbi/mjesec na 2 pritužbe/mjesec, broj izlazaka na lokacije smanjio se s 10 posjeta/mjesec na 4 posjete/godinu, elektroprivrede troše manje vremena na revidiranje izvještaja o variranju iznosa na računima. [37]

Prema procjeni tvrtke, AMR je sveukupno smanjio troškove poslovanja preko 30.000 \$ godišnje. Uz ove mjerljive pokazatelje, značajni su i ostali: generiranje povijesnih profila korištenja, na temelju AMR-podataka identificiraju se kratkotrajni i dugotrajni ispadi elektroenergetske mreže za ispravno dimenzioniranje transformatora, jednostavnije lociranje mjesto kvara čime se smanjuje vrijeme i novac potreban za otklanjanje kvara, kupci električne energije su zadovoljniji jer nemaju problema s pokvarenom hranom uslijed nestanka struje, kvarovima električnih uređaja i pogreškama u naplati.

Tvrta *Kentucky Utilities Co.* uvela je PLC-sustav kako bi poboljšala učinkovitost i smanjila troškove vezane uz ukapčanje i iskapčanje korisnika, te osigurala obračun električne energije prema stvarnom korištenju. Tvrta obuhvaća otprilike 496.000 korisnika smještenih uglavnom u urbanim sredinama. Kako bi ubrzala uvođenje automatiziranog očitavanja brojila, tvrtka je uvela

ručne čitače i AMR-sustave temeljene na PLC-u i korištenju telefonskih linija. PLC-sustavi se koriste na otprilike 3.800 brojila smještenih u ruralnom dijelu teritorija, gdje je dosta korisnika s privremenim boravištem koji često traže usluge ukapčanja i iskapčanja, što je prije instalacije PLC AMR-sustava zahtjevalo izlazak osoblja na teren uz prosječnu cijenu od 14 dolara. [38] Nakon uvođenja AMR sustava tvrtka je riješila 509 zahtjeva za ukapčanje ili iskapčanje, od kojih je samo njih 42% zahtjevalo izlazak na teren. Time je ostvarena ušteda od 7.100 dolara u pet mjeseci, što odgovara uštedi od 17.100 dolara na godinu. Zahvaljujući programskoj podršci implementiranog PLC AMR-sustava, osoblje tvrtke Kentucky Utilities Co. prati otvaranje i zatvaranje korisničkih računa, te obavlja ukapčanje ili iskapčanje iz informatiziranog centra za usluge korisnicima. Osim ove direktnе financijske uštедe, AMR znači stratešku prednost zbog poboljšane komunikacije čiji se učinci odražavaju na sveukupan rad distribucije, jednostavnog praćenja povijesnih podataka bitnih za upravljanje opterećenjem i poboljšane usluge korisnicima. Preciznost naplate je poboljšana zahvaljujući podacima dostupnim putem AMR-sustava. Zahvaljujući svakodnevnom očitanju brojila, distribucija se više ne oslanja na predviđanje pri formiranju računa prije iskopčavanja ili ukopčavanja.

Na temelju iskustava s prvih 3800 PLC AMR brojila, tvrtka se odlučila ispitati kako dvosmjerni PLC AMR sustav zadovoljava potrebe upravljanja.

DCSI (Distribution Control Systems Inc.) je podružnica tvrtke ESCO Technologies Inc. (adresa na Internetu: [www.twacs.com](http://www.twacs.com)), koja proizvodi i prodaje dvosmjerni automatski komunikacijski sustav temeljen na PLC-tehnologiji uskopojasnog prijenosa podataka elektroenergetskim vodovima. DCSI ima više od 80 korisnika, a instalirano ili ugovoreno preko 7 milijuna brojila. Najznačajniji korisnici su ATCO Electric, Florida Power & Light Co., PPL Electric Utilities i Wisconsin Public Service Co.

Tvrtka *Bangor Hydro-Electric Company*, podružnica tvrtke Emera Inc., najavila je u travnju 2004. godine potpisivanje ugovora o uvođenju sustava AMR tvrtke DCSI na cijelom svom teritoriju, što obuhvaća otprilike 110.000 brojila. Cilj uvođenja ovog sustava je: dnevno prikupljanje podataka o korištenju električne energije, poboljšano upravljanje ispadima u električnoj mreži, prikupljanje podataka koji pokazuju koliko uspješno distribucija radi.

Jedan od poticaja za donošenje ovakve odluke bilo je pozitivno iskustvo s DCSI-jevim sustavom pri povratku napona nakon uragana Isabel koji je uzrokovao ispad električne mreže u kolovozu 2003. godine. [39]

Tvrtka *Idaho Power Company*, podružnica tvrtke IDACORP Inc., također je odlučila potpisati ugovor za prvu fazu instalacije dvosmjernog AMR-sustava TWACS tvrtke DCSI. [40]

Među zanimljivim instalacijama DCSI-jevog AMR-sustava su instalacije u tvrtkama:

- PPL Electric Utilities
- Florida Power & Light Co.
- Rappahannock Electric Cooperative
- Wisconsin Public Service Co.

Tvrtka *PPL Electric Utilities* započela je instalaciju automatskih brojila i do danas je instalirala preko 1,1 milijun brojila. Predviđena je instalacija za svih 1,3 milijuna korisnika PPL-a, smještenih na teritoriju veličine 25.900 km<sup>2</sup>. Tvrtka ima mješavinu urbanih i ruralnih korisnika i to kategorija kućanstvo, poduzetništvo i industrija. Dijelovi ruralnih područja su vrlo slabo naseljeni tako da bežična rješenja nisu prihvatljiva. Cijena projekta je 112 milijuna dolara, a dodatnih 48 milijuna dolara koštati će interna instalacija i integracija s ostalim sustavima. Odabiru proizvođača DCSI prethodila je dvogodišnja analiza. Radi se o najvećem projektu dvosmjernog PLC AMR sustava u Sjevernoj Americi. [41]

PPL-ova radna grupa za uvođenje AMR-a identificirala je više od 100 procesa unutar tvrtke na koje će utjecati uvođenje AMR-a. Ove procese podijelili su u tri grupe. U prvu grupu spadaju procesi koje treba preorganizirati prije početka uvođenja AMR-a (njih 40-tak). U drugu grupu spadaju procesi koje treba preraditi tijekom probne instalacije, a u treću procesi koji se trebaju doraditi nešto prije implementacije cjelokupnog sustava.

Umjesto uobičajenih 20.000 promjena brojila godišnje, kroz tri godine implementacije imaju projek od 400.000 promjena godišnje, što traži značajan napredak u učinkovitosti (npr. elektroničko generiranje naloga za promjenu brojila), veći volumen telefonskog prometa zbog potrebe dogovaranja termina promjene brojila, pritisak na odjel za ispitivanje brojila zbog povećanog volumena posla i slično. Osim za očitanje brojila, sustav koriste za očitanja u stvarnom vremenu, praćenje ispada i uočavanje krađe.

Tvrtka *Florida Power & Light Co.* (FPL) instalirala je najveći sustav za upravljanje opterećenjem na svijetu opremom sustava TWACS proizvođača DCSI. Ranih 80-tih godina prošlog stoljeća Florida Public Service Commission (PSC) zatražila je od elektroprivreda u Floridi da implementiraju upravljanje zahtjevima za električnom energijom. Bio je to odgovor na energetsku krizu. Kao rezultat, tvrtka FPL je razvila nekoliko programa za svoje korisnike. Kao nadopunu programa analizirala je različite sustave za upravljanje opterećenjem i to posebice kod načina komuniciranja (radio, telefon, PLC). Odlučili su se za dvosmjerni PLC-sustav unatoč većim troškovima, jer sustav pruža značajno niže troškove rada i održavanja u odnosu na ostale sustave. Važne uštede su ostvarive zahvaljujući mogućnostima daljinskog lociranja neispravne opreme čime se snižavaju troškovi rada i održavanja. Dodatno, odabrani sustav upravljanja opterećenjem daje mogućnost prebacivanja opterećenja. Sustav koristi više od 816.000 komunikatora (engl.: *transponders*) i uključuje više od 712.000 korisnika. [42]

Prema iskustvima FPL-a, s operativne točke gledišta, rezultati upravljanja opterećenjem su pozitivni. Sustav se pokazao učinkovitim i pouzdanim alatom za smanjivanje vršnih zahtjeva. Radi održavanja infrastrukture koja podržava implementaciju sustava i odgovaranje na upite kupaca, potrebno je imati posebnu grupu u odjelu za usluge korisnicima. Nakon instalacije opreme za upravljanje opterećenjem na lokaciji korisnika, otprilike 1,5% tih korisnika generira pozive. FPL implementira upravljanje opterećenjem samo kad se prepostavlja opterećenje sustava iznad graničnog pričuvnog kapaciteta. U praksi, upravljanje opterećenjem implementira se u projektu 3-4 puta godišnje: 2 puta ljeti i otprilike 2 puta zimi. Trebalo je 5 godina da se sustav upravljanja opterećenjem razvije i implementira do današnjeg načina rada. Kroz te godine FPL je uočio velik značaj sustava u proljeće i jesen kad predstavlja vrijedan alat tijekom razdoblja održavanja elektrana ili u situacijama prouzročenim "višom silom". Na korištenje sustava utječu ponašanje i tehnološka razmatranja korisnika. Ključno je da sustav bude što nevidljiviji za korisnike. Zbog toga se rjeđe koristi za "izravnjanje" opterećenja reguliranjem korištenja klimatskih sustava, a primarno regulacijom grijanja za vodu i pumpi za bazene, osim kad su zahtjevi za kapacitetom kritični.

Kao rezultat uvođenja sustava je smanjenje opterećenja za 3.463 MW, čime se izbjegla potreba za izgradnjom otprilike 10 novih 400 MW-tnih elektrana. Ušteda od 1.000 MW postignuta je smanjenjem vršnih zahtjeva postignutim sustavom za upravljanje opterećenjem. Zahvaljujući smanjenju zahtjeva, smanjen je broj ispada (blackouts), a i povećana prodaja energije drugim elektroenergetskim tvrtkama na Floridi [44].

Primjena upravljanja opterećenjem prepostavlja da kupac električne energije daje elektroprivredi dozvolu za nadziranje njegovih električnih uređaja. FPL plaća kućanstvima 6 \$ mjesečno za nadziranje uređaja za klimatizaciju, a 3,5 \$ mjesečno za nadziranje grijanja vode. Ova

poticajna sredstva predstavljaju značajan dio troškova implementacije programa upravljanja opterećenjem. FPL razmatra mogućnost smanjivanja poticaja kako bi osigurali dugotrajnu troškovnu učinkovitost programa.

Dugotrajno smanjenje troškova može se postići samo temeljem pažljivog planiranja, učinkovitog testiranja, kao i brze implementacije i evaluacije rezultata. FPL mora realizirati smanjenje godišnjih troškova i podnosići izvještaj PSC-u.

AMR-sustav tvrtke *Rappahannock Electric Cooperative* (REC) pokazao je svoju punu vrijednost tijekom uragana Izabel koji je zahvatio dijelove triju američkih država 18. rujna 2003. godine. Samo u Virginiji je bez napona ostalo više od 2 milijuna korisnika, od kojih neki i 2 tjedna. U središtu putanje uragana Isabel je područje tvrtke REC koja ima oko 85.000 korisnika. REC je počeo doživljavati ispadne mreže od 10.30 ujutro dok je uragan bio na 200 milja od njegovog teritorija. Unutar jednog dana, kad je glavni udar uragana prošao, bez napona je ostalo oko 80.500 korisnika REC-a (95% ukupnog broja korisnika). Zbog jačine vjetra osoblje iz održavanja tvrtke REC prvi dan nije moglo izaći na teren. Uspjeli su osigurati pomoć izvana i udvostručiti broj ljudi na 650. U sljedećih 10 dana obradili su 81.000 prijava ispada, zamjenili 300 stupova i do 29.9.2003. ponovo osigurali napajanje električnom energijom svim svojim korisnicima, u čemu im je veliku pomoć pružio AMR-sustav. [45]

Tvrta REC od studenog 2002. godine koristi DCSI-jev AMR-sustav TWACS za očitanje jednofaznih brojila korisnika kategorije kućanstvo. Sustav koriste i za verifikaciju dojave o ispadu mreže prije slanja servisera na teren. Dispečer šalje signal prema brojilu za koji je prijavljen ispad. Ukoliko se signal vrati, zna da na brojilu postoji napon i da postoji greška unutar električne instalacije korisnika. Ovim se izbjegava nepotrebno slanje servisera na lokaciju na kojoj nema ispada. Ova sposobnost sustava da provjeri ima li napajanja na određenom brojilu od neprocjenjive je vrijednosti tijekom saniranja ispada mreže, npr. kod uragana Isabel. Svake noći operateri su slali signale do brojila kako bi izolirali, odredili i verificirali lokacije ispada. Na temelju tih podataka identificirali su područja s velikom koncentracijom ispada, davali im prioritet u servisiranju i tako racionalizirali broj izlazaka na teren i koncentrirali se na najproblematičnija područja. U tvrtki smatraju da im je AMR smanjio vrijeme normalizacije mreže za barem 1-2 dana.

Osim uloge u skraćivanju vremena popravka, AMR je odigrao značajnu ulogu u održavanju redovitog rasporeda naplate bez korištenja procjenjivanja potrošnje. Tvrta inače koristi 17-dnevni ciklus očitavanja. Svake noći izračunava se račun i šalje sljedeći dan na naplatu. Čim je bilo jasno da će uragan proći područjem, prikupljena su očitanja nekoliko dana unaprijed (umjesto 5.000 brojila koliko inače očitavaju dnevno, dan prije uragana očitano je 15.000 brojila). Očitanja su pohranjena i računi poslani na dan prema rasporedu. Naplatni ciklus za dio računa bio je 2-4 dana kraći nego inače, ali svi su računi bili izrađeni na temelju stvarne potrošnje. S obzirom da su svi radnici bili angažirani na popravljanju mreže, ručno očitanje brojila kasnilo bi barem 7 dana, što bi značilo dodatna prekoračenja, možda i potrebu procjenjivanja iznosa računa i potencijalno veći broj poziva s pritužbama na obračunati iznos. Mnogi ljudi su se tijekom popravka mreže preselili kod onih koji su imali napajanje ili u područja koja nisu bila zahvaćena uraganom i zatim su se telefonski željeli informirati je li uspostavljena opskrba električnom energijom njihovog kućanstva. Zahvaljujući mogućnosti provjere statusa brojila pomoću AMR-a odgovaranje na upite bilo je olakšano.

U REC-u su zadovoljni uvedenim AMR-sustavom i računali su na dodatne sekundarne prednosti, međutim tek nakon uragana su vidjeli kako sekundarne vrijednosti sustava nadmašuju njihova očekivanja. Počeli su razmišljati o uvođenju dodatnih poboljšanja koja će još više povećati

vrijednost AMR-sustava, npr. napraviti sučelje za program analiziranja poziva s dojavom problema prema AMR sustavu kako bi se po dojavi automatizirano provjeravao status brojila.

Tvrtka *Wisconsin Public Service Co*, (WPSC) je javno uslužno poduzeće, jedino s rasprostranjenom implementacijom mjernog sustava u kontinentalnom dijelu SAD-a [46]. WPSC je regulirana opskrba u državi Winsconsin s oko 425 000 kupaca električne energije i plina (s 388 451 elektroničkih brojila i 229 905 brojila za plin, izvještaj 2000.godine).

Regulator PSCoW je izdao početno odobrenje WPSC-u pokretanja pilot projekta 1998. godine. WPSC je proveo analizu isplativosti koja je pokazala da je instalacija u ruralnoj sredini na granici isplativosti dok je instalacija u urbanoj sredini neisplativa, te se teško mogu ispravno procijeniti konačne koristi sustava. U pilot projektu odlučili su se za samo jednu tehnologiju: DCSI-jev TWACS sustav. 19. 4. 2000 godine WPSC je završio implementaciju sustava na 4 od 6 područja odabranih za pilot projekte. TWACS sustav sastoji se od komunikatora koji se dograđuju na mnoga postojeća elektromehanička ili elektronička brojila, te se zasnivaju na komunikaciji energetskom mrežom. U svaku trafostanicu potrebno je ugraditi komunikacijsku opremu. Mrežni server je smješten na centralnom mjestu sustava upravljanja i prikupljanja podataka. Sustav povezuje brojila različitih opskrbljivača (električna energija, plin, voda) te prikuplja podatke. Svakih 8 sati sustav šalje pohranjene podatke (moguće je i satno), ali kako postoji dvostranska komunikacija u realnom kratkom vremenu daje se odgovor na upit brojilima. Sustav također može integrirati komunikatore za kontrolu opterećenja i uslugu obavještavanja uslijed ispada, detekcije krađa i obračuna. Ukupni planirani kapitalni troškovi za ovaj sustav iznose US\$ 84.8 milijuna. Od toga US\$ 51.8 milijuna za elektronička brojila, US\$ 22.8 milijuna za brojila za plin, US\$ 6.0 milijuna za koncentratore za prikupljanje podataka i komunikacijske vodove, US\$ 2.8 milijuna za *hardware* za centralnu stanicu, upravljanje projektima i vodove do trafostanice i US\$ 1.4 milijuna za *software*. Operativni troškovi i troškovi održavanja nisu eksplicitno navedeni ali su navedene projekcije ušteda na operativnim troškovima i troškovima održavanja. U prvoj godini rada sustava, 2003, projekcija uštede iznosi US\$ 3.9 milijuna.

S obzirom na navedeno, prosječni trošak po brojilu (brojilo i komunikacijski modul) je:

- brojilo električne energije (388,451) - US\$ 133.43
- brojilo za plin (229,905) - US\$ 99.10
- trošak mjernih uređaja po kupcu (425,000) - US\$ 199.57

Ako se iz analize izostave brojila za plin, kapitalni trošak po kupcu električne energije bi bio oko US\$ 159.70. Kroz 15 godina, sa stopom od 15% povrata taj je iznos US\$ 23.95 godišnje odnosno US\$2.00 mjesečno, po kupcu. Ušteda na operativnim troškovima iznosi oko US\$ 6.35 po brojilu (el. energija i plin) godišnje (ili US\$ 9.23 po kupcu godišnje).

Tablica 4.3. *Troškovi po brojilu*

<i>Prosječni troškovi po brojilu el. energije i modulu</i>	US\$ 133.43
<i>Prosječni svi –ulazni troškovi/brojilu el. energije</i>	US\$ 159.70
<i>Godišnji trošak (kroz 15 god.)/kupcu</i>	US\$ 23.95
<i>Mjesečni trošak/kupcu</i>	US\$ 2.00
<i>Mjesečni trošak /O&amp;M uštede</i>	US\$ 1.47

U svom izvješću WPSC navodi dvije glavne kategorije nemjerljivih koristi:

- *Novčane i sistemske koristi:*
  - potencijalno smanjenje potpore za uredske procese,
  - smanjenje poziva izvan radnog vremena zbog ispada,
  - smanjenje zaliha brojila i ograničenih tipova brojila,
  - smanjenje potraživanja koje je nemoguće naplatiti,
  - smanjenje troška zbog procjene računa,
  - smanjenje gubitaka u vodovima,
  - optimalno upravljanje imovinom.
- *Poboljšana usluga kupcima koja uključuje:*
  - povećanje sigurnosti opskrbe,
  - smanjenje trajanja ispada,
  - mogućnost izrade novih inovativnih tarifnih sustava,
  - razvoj infrastrukture koja daje kupcima izbor,
  - inspekcija sustava tijekom ugradnje,
  - pozitivan efekt na okoliš zbog smanjenja korištenja vozila,
  - poboljšana točnosti brojila,
  - poboljšano upravljanja opterećenjem,
  - smanjenje krađa,
  - povećanje dotoka gotovine (novca),
  - smanjenje troškova brojila,
  - smanjenje broja posjeta kupaca.

U Europi je u tijeku izgradnja najvećeg PLC-sustava na svijetu u talijanskoj elektroprivredi, Enelu, te u Švedskoj, gdje se regulator umiješao i definirao tempo implementacije AMR-sustava.

#### **4.3. Najveći PLC AMR sustav - ENELOV TELEGESTORE SUSTAV**

ENEL Spa., talijanska elektroprivreda s više od 30 milijuna kupaca, započela je u svibnju 2000. godine s razvojem daljinskog sustava za očitanje koji koristi niskonaponsku mrežu za prijenos podataka u kombinaciji s javnom telekomunikacijskom mrežom. [47] U reorganizaciji poslovanja ENEL je započeo s nizom unutrašnjih promjena: inženjerинг distribucijskih i opskrbnih procesa kroz inovacije i uvođenje novih tehnologija. Jedna od većih tehnoloških inovacija Enel-a odnosi se na automatizaciju sustava mjerjenja. Pripadni projekt nazvan je Telegestore sustav. Telegestore je inovativni sustav dizajniran za daljinsko očitanje i upravljanje, kupcima električne energije, na niskonaponskoj mreži. Uključuje sustav daljinskog očitanja brojila, sustav za upravljanje kupcima i potencijalni sustav "usluga dodane vrijednosti". Telegestore projekt predviđa zamjenu Enel-ovih brojila.

Prije implementacije samog projekta Enel je proveo brojna tehnološka istraživanja i pilot projekte još od 1990. godine. Pilot projekti sustava daljinskog upravljanja brojilima preko energetske mreže služili su Enel-u za ispitivanje različite tehnologije i prikupljanje znanja o sustavima daljinskog očitanja. Implementirani su u nekoliko talijanskih gradova pokrivajući približno 70.000 kupaca (njih 40 000 u dijelu Rima). Ova instalacija je bila uspješna s tehničke točke gledišta, ali je projekt napušten kada su postale dostupne konkurentne tehnologije poput: potpuno elektroničko i integrirano brojilo, umjesto tradicionalnog elektromehaničkog brojila.

integriranog s vanjskim električnim uređajem za komunikaciju; uporaba javne telekomunikacijske mreže (GSM) za komunikaciju između trafostanice i centralnog sustava, umjesto komunikacije srednje/visoko naponskom energetskom mrežom.

Iskustva prikupljena pilot projektom poslužila su Enel-u za odabir tehnologije i detaljniju pripremu plana implementacije te analizu isplativosti.

Enel-ov Telegestore sustav sastoji se od brojila, koncentratora, modema i centralnog sustava.

*Električno brojilo* ima integriran mjerni sustav, sklopnike i PLC komunikacijsku funkciju.

Brojilo je dizajnirao Enel uz pomoć nekoliko vanjskih dizajnera kako bi osigurao integraciju sustava. Brojila su proizvedena ugovaranjem s internacionalnim proizvođačima koji mogu osigurati veliku razinu proizvodnje uz malu razinu pogreške. Brojilo je razvijeno prema internacionalnim standardima (CEN 61036, CEN 61268).

*Koncentrator*, instaliran gotovo u svakoj trafostanici, može komunicirati s brojilima i sa centralnim sustavom. Koncentrator šalje upite brojilu po "master-slave" principu. Komunikacija između koncentratora i brojila je na PLC mreži, CENELEC, 82 kHz (primarni nosioc frekvencije) ili 75 kHz (sekundarni nosioc frekvencije) FSK, 2400 bit/s. Ovaj pojas je rezerviran za potrebe elektroprivreda povezane s njihovim osnovnim poslovanjem.

*Modemi* ugrađeni u trafostanicama, prenose podatke prikupljene u koncentratoru centralnom sustavu putem telekomunikacijske mreže (GSM, ISDN, itd.) sa TCP/IP protokolom. Uglavnom se koristi GSM.

*Centralni sustav* (AMM) prikuplja i šalje podatke od/prema koncentratorima i upravlja sustavom. Centralni sustav je integriran s glavnim sustavom što znači da se sve operacije rade automatski. Ključne karakteristike Telegestore su:

- mjerjenje radne i jalove energije,
- funkcije daljinskog očitanja brojila,
- poznavanje uporabnog vremena,
- funkcije upravljanja ugovorom,
- daljinsko iskopčanje/ukapčanje u svrhu kontrolu opterećenja,
- otkrivanje krađa,
- informiranje kupaca,
- preplatni sustav (bez kartice kao medija plaćanja),
- upravljanje snagom,
- upravljanje energijom u niskonaponskoj mreži,
- individualna usluga kupcu,
- nadzor kvalitete usluge,
- potencijalan razvoj "usluga dodane vrijednosti" za tržište električne energije

Enel je u projekt uključio podružnicu za testiranje opreme, Cesi. Cesi provodi terenske testove kako bi rekonstruirao tipično okruženje šuma koji postoji u mreži. Ovi testovi, započeti u 2000. godini, uključuju više od 1000 brojila koji su spojeni na više od 3000 električnih uređaja korištenih u kućanstvu i malim poslovnim posjedima.

Glavni cilj uvođenja ovakvog projekta je osigurati bolju uslugu kupcima koji na ovaj način koriste povoljnije tarifne modele (eventualno ostvarivati niže tarife) te se smanjuju troškove poslovanja (očitanje brojila, izlasci na teren i sl.). Ostvarene prednosti su:

- transparentnost s obzirom na potrošnju energije, tarife, ugovore i korištenje snage. Sve ove informacije kupci mogu pročitati na pokazivaču (engl.: *display*).
- obračun temeljen na stvarnom očitanju brojila

- fleksibilne strukture tarifa, s mogućnošću dnevne, tjedne, mjesecne i sezonske promjene i fleksibilnost obračunskog perioda.
- smanjeno čekanje za promjenu ugovora, otklanjajući smetnje kupcu zbog intervencija na mјernom mjestu,
- nema više pogrešaka u očitanju brojila, što smanjuje broj žalbi i nesporazuma s kupcima.

Većina operacija se obavlja automatski što znači sve se rješava puno brže, bez ljudske intervencije na terenu. To vodi povećanoj operativnoj učinkovitosti. Uštede u tekućim troškovima proizlaze iz daljinskog upravljanja ugovora kupaca i daljinskog očitanja. Konačna veličina projekta (30 milijuna brojila) pruža i ekonomsku korist. Trenutno se za elektronička brojila plaća isti iznos kao i za elektromehaničko brojilo. Ta je cijena mnogo niža od cijene drugih elektroničkih brojila dostupnih na tržištu, a prednosti koje pružaju su višestruke;

- smanjenje gubitaka energije, minimizacije krađa i poboljšanje prognoze potrošnje
- povećanje zadovoljstva kupaca. Telegestore se može smatrati alatom za povećanje transparentnosti, pojednostavljenje operacija, ponudu novih tarifa i prilagodbu odnose između Enela i kupca.
- otvaraju se nove poslovne mogućnosti na dva fronta – postojećoj bazi korisnika nude se usluge dodane vrijednosti, a uslužnim tvrtkama nudi konzultantske usluge zahvaljujući jedinstvenom iskustvu Enel-a stečenom ovim projektom (proteklih nekoliko godine Enel je prikupio tehnološko iskustvo, iskustvo na procesima i intelektualno vlasništvo koje može izvoziti širom svijeta).

Nacionalni elektroenergetski sustav također ima koristi od Telegestore sustava.

- moguće je upravljanje zahtjevima za potrošnjom – kupci mogu sami nadzirati informacije na pokazivaču brojila. Dokazano je, kupac koji je svjestan troška potrošnje tijekom vršnog opterećenja promijenit će ponašanje i prebaciti potrošnju na razdoblje s jeftinijom tarifom. Dodatno, kupac koji je svjestan cijene energije smanjit će potrošnju za oko 5 do 10%. Ovaj se efekt povećava kada su razlike između tarifa za određena vremenska razdoblja jednak različite.
- poboljšana kvaliteta usluge na niskonaponskoj mreži i praćenje opskrbe energijom
- smanjeni energetski gubici zbog krađa, tehničkih gubitaka i lošeg rada brojila.

Poboljšana izvedbe elektroničkih brojila u smislu dostupnosti informacija smanjuju potrošnju električne energije. Dodatna ušteda nastaje kod energije koja trenutno nije obračunata kupcu zbog greške na brojilu ili krađe. Elektroničko brojilo ima samo-dijagnostički sustav koji šalje signal centralnom sustavu kada uoči pojavu neispravnog funkciranja. Dodatno, koncentrator redovito poziva brojila i ako se pojedino brojilo ne javlja koncentrator šalje signal upozorenja u centralni sustav. Vezano uz krađu električne energije, elektroničko brojilo je opremljeno protuprovalnim sustavom koji proradi kada kupac pokuša otvoriti poklopac ili ukloniti brojilo iz ormarića ili reprogramirati brojilo i prekida napon.

U 2003. godini Enel je započeo objedinjavati podatke o uštredama ostvarenim projektom Telegestore. Do 2005. godine, sa potpunom uporabom sustava, Enel je uštedio više od 400 milijuna Eura godišnje.

#### *4.3.1. Razvoj poslovanja u stranim zemljama*

Enel-ov projekt se trenutno smatra najinteresantnijim, ambicioznim i inovativnim projektom u posljednjih nekoliko godina. Ovim projektom Enel je ostvario prestiž u energetskom sektoru širom svijeta. Enel je tek započeo razmišljati o proširenju prednosti ovakvog sustava na druge zemlje.

Proces liberalizacije će postupno zahvatiti sve članice zajednice. Do 2004. godine u Europi je bilo 370 milijuna kupaca. Nakon priključenja još 10 zemalja u 2004. godini i još 3 u 2007. godini europsko energetsko tržište doseći će 500 milijuna kupaca električne energije. To implicira da će biti još 200 milijuna više brojila, od kojih će većina biti smještena u zemljama s visokom stopom rasta novih kupaca. Procjenjuje se da će se 60 % tih brojila zamijeniti u sljedećih 8 godina, što odgovara količini od oko 15 milijuna brojila godišnje. Enel očekuje proširenje svog Telegestore-sustava na europsko energetsko tržište, kao i uspostavu saveza s velikim europskim elektroprivredama i industrijskim grupama vezano uz razvoj Enelove tehnologije i znanja.

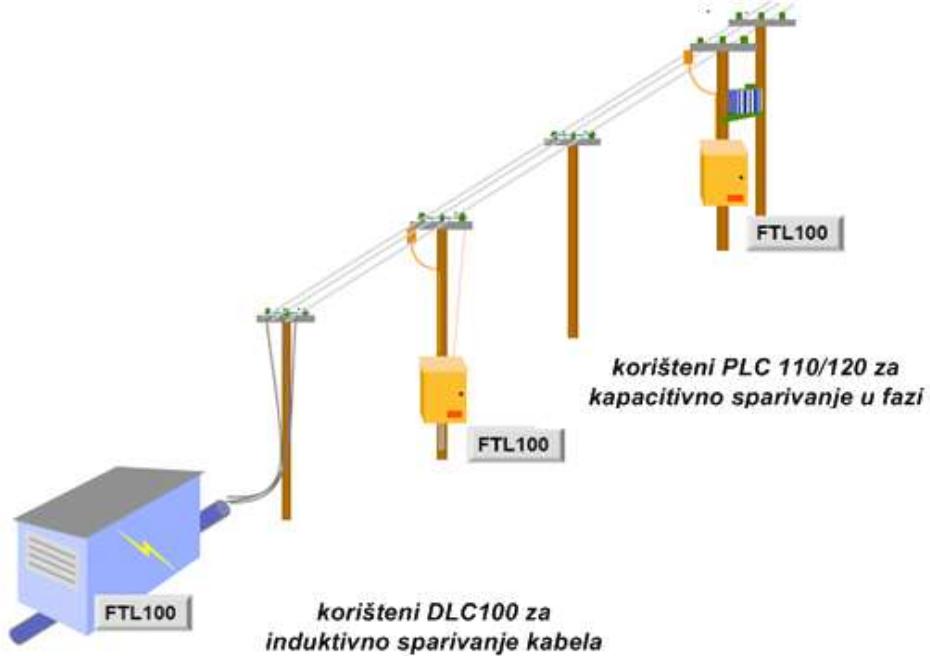
Mnogi pilot projekti koji uključuju druge elektroprivrede su u tijeku; primjer uspješnog pilot projekta koji je završio u 2003 godini je ASM Brescia, talijanska multinacionalna (*multi-utility*) tvrtka. Više od 80 elektroprivreda u svijetu je već posjetilo Enel i pokazalo veliki interes za Telegestore sustav.

Jedna od tvrtki koja je sudjelovala u dizajniranju brojila za Enel-ov projekt je bila tvrtka Ampy. U nastavku opisujemo njihov AMR sustav pod nazivom Mainstalk. U Tablici 4.4. je prikazana rasprostranjenost Mainstalk sustava:

Tablica 4.4. Rasprostranjenost Mainstalk sustava

<i>zemlja</i>	<i>količina</i>
<i>Skandinavija</i>	2324
<i>UK</i>	570
<i>UK</i>	3220
<i>Australija</i>	2765
<i>Malezija</i>	74
<i>Južna Amerika</i>	4226
<i>Južna Afrika</i>	50
<i>Guernsey</i>	2002
<i>Singapur</i>	45

Mainstalk sustav pruža mogućnosti očitanja brojila za električnu energiju, plin i vodu. Također podržava: daljinsko iskopčanje i ukopčanje kupaca, eliminaciju izlaska na teren, daljinsko upravljanje opterećenjem, daljinsko prebacivanje tarifa, primjenu višetarifnih sustava, kontinuirani nadzor kvalitete opskrbe (npr. naponi, prekidi).



*Slika 4.10. Dopuštene komunikacije između nezaštićenih energetskih vodova i zaštićenih kabela izvan dodatnih hardware instalacija*

Sustav prenosi podatke putem PLC-a (Power Line Carrier) tj. energetskom mrežom. U niskonaponskim trafostanicama ugrađuju se koncentratori koji se nazivaju LC (Local Controller). Jedinice komuniciraju i primaju podatke iz brojila koja su ugrađena na mjernim mjestima kupaca. LC naizmjene komunicira s RC-om (Regional Controller). RC je software u kojem se prikupljaju i obrađuju podaci primljeni sa LC-ova.

#### Švedska

Pitanje očitanja brojila već se dugo razmatra u Švedskoj. Nakon procesa deregulacije energetskog sektora u Švedskoj, zahtjevalo se da korisnici koji žele kupovati električni energiju od dobavljača koji nije njihova lokalna energetska tvrtka, trebaju vlastitim sredstvima instalirati AMR. Ovakve samostojeće instalacije su skupe, pa je mijenjanje dobavljača električne energije bilo preskupo da bi bilo isplativo. Zbog toga je zahtjev ukinut 1999. godine. Brzo restrukturiranje energetske industrije izazvalo je dosta zbumjenosti u javnosti. Korisničke grupacije posebice su kritizirale račune za električnu energiju jer su nerazumljivi i nisu temeljeni na stvarnoj potrošnji. Također, pokazalo se da postoji jak interes za očuvanjem okoliša, u sklopu čega se pokazuje velik interes za korištenjem obnovljivih izvora energije i konzervacijom energije. U svibnju 2002. godine švedsko tijelo nadležno za energetiku prezentiralo je izvještaj u kojem se tvrdi da bi češćim očitanjem električnih brojila sveukupna švedska ekonomija zaradila 800 milijuna švedskih kruta godišnje, što je otprilike 70 milijuna dolara. Ovo tijelo je zbog toga preporučilo da se od 2006. godine električna brojila korisnika s više od 8.000 kWh godišnje (u ovu grupu spada trećina energetskih korisnika u Švedskoj) očitavaju barem jednom mjesečno, a od 2009. godine sva

brojila. Vlada je u ožujku 2003. godine odlučila da se do 2009. godine svih 5 milijuna električnih brojila mora očitavati barem jednom mjesecno. [49]

Jedna od tri najveće energetske tvrtke u Švedskoj, tvrtka Vattenfall AB (aktivna u Njemačkoj, Švedskoj, Finskoj i Poljskoj s ukupno 6 milijuna korisnika), inicirala je nabavu 425.000 AMR-uređaja što je oživjelo švedsko tržiste AMR-a (nekoliko manjih regionalnih elektroprivreda već je ranije instaliralo AMR-sustave). Sustav koristi brojila opremljena za komunikaciju putem RF-a i PLC-a. [50]

#### **4.4. Strategija razvoja mjernog sustava u Hrvatskoj**

HEP Distribucija d.o.o. naručila je studiju: "Strategija nabave i zamjene brojila električne energije" od Energetskog instituta Hrvoje Požar - Zagreb. U studiji su definirane osnovne strateške smjernice nabavke brojila u svrhu uvođenja sustava automatskog očitavanja brojila. Preporuka je ugradnja intervalnih brojila svim kupcima čija je snaga veća od 30 kW. Također se preporuča provesti niz pilot projekata kojima bi se ispitale različite tehnologije AMR sustava. [www.cinergy.com]

U 2002. godini u Hrvatskoj je bilo 2.076.775 kupaca podijeljeno u kategorije:

- kućanstvo,
- niski napon,
- visoki napon.

Kupcima je ukupno prodano 12.615 GWh električne energije. U Tablici 4.5. prikazana je prodaja električne energije i gubici u distribuciji za 2000., 2001. i 2002. godinu:

Tablica 4.5. Statistika prodaje električne energije i gubitaka u distribuciji

(GWh)	2000.	2001.	2002.
Raspoloživo u distribuciji	13.135	13.734	14.022
Gubici u distribuciji	1.423	1.833	1.407
Prodaja	11.712	11.901	12.615

Kada se pokuša novčano vrednovati gubitke tada bi oni iznosili približno 675.360.000 kuna (ostvarena prosječna cijena električne energije u 2002.godini 0,48 kn x 1.407 GWh). Trenutno je nemoguće točno utvrditi iznos tehničkih i komercijalnih gubitaka pa je teško pokrenuti mjeru smanjenja gubitaka kad nije jasna struktura elektroenergetske mreže. AMR sustav nudi opciju transparentnog prikaza strukture gubitaka.

Zabilježeno maksimalno opterećenje u 2002. godini iznosi 2.650 MW. Uvođenjem AMR sustava može se vršno opterećenje smanjiti za približno 4% tj. 106 MW.

AMR sustav također smanjuje troškove očitanja te osigurava primjenu različitih tarifnih sustava prilagođenih kupcu. Prilikom promjene tarifnog sustava u 2002. godini bilo je potrebno očitati sva dvotarifna brojila i podesiti uklopne satove što je koštalo HEP približno 10 milijuna kuna. Ukoliko bi htjeli fakturirati kupcima električnu energiju prema stvarnoj potrošnji dakle fakturirati na mjesecnoj bazi, što znači i mjesечно očitanje, trošak bi bio približno 2 milijuna kuna mjesечно (1 kn / mjernom mjestu).

Iz navedenog vidljive su direktnе potencijalne uštede primjenom AMR sustava.

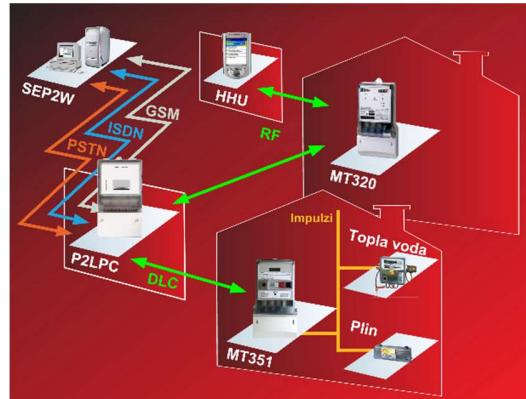
Trenutno je u HEP-u oko 50% povlaštenih kupaca opremljeno elektroničkim brojilima s opteretnom krivuljom i PSTN ili GSM komunikacijom.

#### *AMR projekti u HEP-u za kupce kategorije kućanstvo*

U nekim DP-ovima poput DP "Elektroslavonije" Osijek postoje AMR pilot projekti za kupce kategorije kućanstvo, implementirani u urbanim i ruralnim sredinama. Oni obuhvaćaju približno 4000 elektroničkih brojila s GSM komunikacijom proizvođača "Riz" što je oko 3% ukupnog broja kupaca u kućanstvu u DP "Elektroslavonija" Osijek instaliranih u 12 ruralnih područja, 11 kolektivnih stambenih zgrada i jednom trgovачkom centru. Iskustva na pilot projektima su za sada pozitivna. Sustav omogućava mjesečno očitanje brojila i promjenu tarifnog sustava daljinskim putem.

DP "Elektrodalmacija" Split je također pokrenula pilot projekt AMR sustava koji obuhvaća oko 150 MTU prijemnika proizvođača "ABB" ugrađenih na poklopcu priključne kutije elektromehaničkog brojila ugrađenih u urbanom području. Sustav pruža opciju promjene tarifnog sustava daljinskim putem te iskopčanje/ukopčanje kupaca.

U tijeku je i pilot projekt AMR sustava zasnovanog na PLC tehnologiji koji se sastoji od elektroničkog brojila i PLC komunikatora proizvođača "Iskraemeco". Pilot projektom predviđena je ugradnja pedesetak brojila. Sustav se sastoji od PLC koncentratora na koji se može spojiti do 1000 brojila. Udaljenost između koncentratora i brojila u ruralnim sredinama iznosi 2000 metara dok u gradskim iznosi 200 metara. Brojila mogu biti za električnu energiju, plin i vodu. Sustav osigurava daljinsko očitanje brojila i promjenu tarife.



Slika 4.11. PLC sustav proizvođača "Iskraemeco"

Tablica 4.6. Statistika prodaje električne energije i gubitaka u distribuciji (Split)

(GWh)	2003.	2004.	2005.
Raspoloživo u distribuciji	1930	2011.2	2136.4
Gubici u distribuciji	268.5	234.9	234.4
Prodaja	1661.5	1776.3	1902.0

Pilot projekt koji je predložen za Split nije prihvaćen, jer u ovoj fazi projekta još nisu definirani svi osnovni parametri potrebni za uvođenje PLC tehnologije. Problem je na razini cijele distribucije jer rade na različitim nivoima pristupa. Potrebno je objediniti pristup u cijeloj distribuciji Republike Hrvatske.

#### **4.5. Iskustva**

Howard Scott je autor godišnjih izvještaja o implementaciji AMR-a u Sjevernoj Americi (Scott Report: AMR Deployments in North America), koje izdaje tvrtka Cognyst Consulting. Izvještaji sadrže opis implementiranih AMR-sustava i sumarne prikaze koji uključuju više stotina tablica, te desetke karata, grafikona i slika napravljenih na temelju podataka dobivenih od proizvođača AMR-rješenja. Zastupljenost AMR-jedinica za komunikaciju PLC-tehnologijom je u stalnom porastu, kao i broj AMR-jedinica instaliranih u elektroprivredama. Sumarni podaci o broju AMR-jedinica po pojedinoj vrsti tvrtke za 2001. i 2002. godinu, koji se temelje na podacima iz Scottovih izvještaja dani su u tablici 4.7. [24]

Prema podacima iz izvještaja *The Scott Report: International AMR Deployments* do 01. 01. 2001. godine u svijetu je prodano 33.8 milijuna AMR jedinica: [22]

- 31.4 milijuna u Sjevernoj Americi (93%)
- 1.2 milijuna u Aziji
- 0.9 milijuna u Europi
- 0.9 milijuna na Srednjem Istoku

Tablica 4.7. Statistika o AMR-u u SAD-u prema Scottovim izvještajima

<i>vrsta utility-tvrtke</i>	<i>ukupan broj tvrtki u SAD-u</i>	<i>kumulativan broj isporučenih AMR-jedinica do 2002.</i>	<i>penetracija AMR-brojila</i>	<i>% AMR-jedinica koje komuniciraju bežično</i>	<i>kumulativan broj isporučenih AMR-jedinica do 2003.</i>
elektroprivreda	3 318	19 247 415	15.25%	77%	24 896 978
plin	1 800	13 707 065	21.60%	93%	15 627 757
vodoprivreda	54 000	6 876 835	8.70%	84%	8 569 370
<b>UKUPNO</b>	<b>59 118</b>	<b>39 831 315</b>			<b>49 094 105</b>

U siječnju 2003. godine izdana je druga edicija izvještaja o situaciji na međunarodnom tržištu koja sadrži

(adresa na Internetu: [www.thescottreport.com/scottreport/industry\\_studies.htm](http://www.thescottreport.com/scottreport/industry_studies.htm)):

- informacije za kontakt s 590 proizvođača AMR-a diljem svijeta
- tehnički prikaz 67 različitih proizvoda
- osnovne podatke o implementacijama (geografsko područje, komunikacijska tehnologija i proizvođač)
- informacije o implementacijama u 61 zemlji.

Tvrtka Chartwell (adresa na Internetu: [www.chartwellinc.com](http://www.chartwellinc.com)) između ostalog bavi se kontinuiranim istraživanjem AMR-industrije, te rezultate objavljuje u seriji izvještaja o

istraživanju očitanja brojila, *METERING Research Series*. [25] U okviru te serije od 2001. godine tvrtka Chartwell je izdala 27 izvještaja, od čega tijekom 2004. godine sljedeća tri:

- Developing AMR Business Cases: Getting the most out of RFIs, RFPs and Technology Investigations, May 19, 2004
  - Broadband over Power Lines 2004 Report, March 15, 2004
  - Strategies for Integrating AMR, CIS / Other Systems, February 5, 2004
- Prema podacima u Chartwellovom godišnjem izvještaju za 2003. godinu, *Chartwell AMR Report 2003, 8th Ed.*, napravljenom na temelju anketiranja 100 elektroprivrednih i drugih komunalnih tvrtki
- otprilike 16,5 % brojila u Sjevernoj Americi je opremljeno opremom za AMR do kraja 2003. godine,
  - njih 36 % bit će opremljeno do kraja 2008. godine,
  - dok 95 % elektroprivrednih i drugih komunalnih tvrtki razmatra uvođenje AMR-sustava.

Tablica 4.8. Proizvođači AMR-sustava zastupljeni na američkom AMR-tržištu [23]

<i>proizvođač</i>	<i>broj AMR-jedinica prodanih u 2002.</i>	<i>ukupan broj prodanih AMR-jedinica do 2003.</i>	<i>broj AMR-projekata</i>
Itron	2 881 790	20 335 454	1131
Schlumberger	2 516 240	11 277 583	137
DCSI	1 142 432	2 723 063	84
Badger	555 146	2 533 332	941
Hunt Technologies	517 858	2 253 736	451
Invensys	340 306	1 475 738	1129
Neptune	330 213	1 392 336	225
RAMAR	305 025	669 715	227
AMCO/Elster	273 404	1 255 156	159
Datamatic	134 434	280 678	113
Hexagram	122 985	204 936	36
Cannon	20 674	193 475	201
Comverge	14 110	24 543	15
Nertec	11 403	52 220	52
NRTC Utilities	7 030	23 996	68
Metretek	3 155	59 590	118
SpeedRead	2 017	2 017	5
MTC	2 000	2 000	1
NexusData	1 215	11 315	6
Silver Spring	1 200	4 916	25
Reatcel	873	2 900	6
muNet.com	142	399	30
Ostali	0	626 369	434
<b>UKUPNO</b>	<b>9 183 652</b>	<b>45 405 467</b>	<b>5 594</b>

U izvještaju "Developing AMR Business Cases: Getting the most out of RFIs, RFPs and Technology Investigations" naglašava se da ne postoji najbolja komunikacijska tehnologija za AMR, pa je potrebno odabratи tehnologiju koja najbolje odgovara korporativnim ciljevima i strategiji uslužne tvrtke. [27] Izvještaj uključuje opsežnu analizu (engl.: *case studies*) o elektroprivredama s više od milijun korisnika. Naglašena je potreba istraživanja tehnologija i navedeno je kako nekoliko tvrtki istražuju različite tehnologije prije ikakvog većeg uvođenja. Ključni zaključci ovog izvještaja su:

- primjena AMR-a treba biti direktno vezana uz strategiju tvrtke,
- ne smije se "očarati" mogućnostima određene tehnologije; treba se opredijeliti za onu koja najbolje ispunjava ciljeve tvrtke,
- potrebno je što detaljnije istražiti mogućnosti postojećih rješenja, nikako požurivati u istraživanju postojećih tehnologija,
- u razvoj AMR-a uključuje se sve odjele na koje će utjecati uvođenje AMR-a
- pri izradi zahtjeva za ponudu proizvođačima treba ostaviti prostora za pojašnjenje kako njihova tehnologija pruža alternativno rješenje
- potrebno je posjetiti što više drugih elektroprivrednih tvrtki koje su implementirale razmatranu tehnologiju.

Prema izvještaju "Broadband over Power Lines 2004 Report", postotak elektroprivreda i drugih tvrtki koje planiraju ili razmatraju korištenje širokopojasnog PLC-a (koristi se i kratica BPL, Broadband Power Line), kontinuirano raste od 6% 2000. godine do 20%. Dodatno, širokopojasni PLC se smatra četvrtim izborom među AMR-tehnologijama. Izvještaj je napravljen na temelju intervjua s tvrtkama, proizvođačima PLC-a, konzultantima, kao i na temelju rezultata godišnjih izvještaja tvrtke Chartwell o AMR-u, a uključuje:

- 5 studija (engl.: *case studies*) - Cinergy, Progress Energy, Idacomm, Manassas Electric Department i Minnesota Rochester Public Utilities,
- izvještaje 17 projekata uvođenja širokopojasnog PLC-a,
- prikaz 8 proizvođača širokopojasnih PLC rješenja - Ambient Corp., Amperion Inc., Current Technologies LLC, Main.net Powerline Communications Inc., Hiawatha Broadband Communications Inc., Prospect Street Broadband, International Broadband Electric Communications Inc. i Data Ventures Inc. i
- prikaz dvije organizacije koje se bave širokopojasnim PLC-om - Power Line Communication Association i United Power Line Council.

Među ključne točke vezane uz širokopojasni PLC i trendove u toj industriji prema nalazima izvještaja spada i sljedeće:

- tehnologija je prevladala glavne zapreke i dokazala uspješnost u nizu instalacija manjeg opsega, s tim da su mišljenja glede primjene u većem opsegu dvojaka; zagovaratelji širokopojasnog PLC-a smatraju kako nema razloga sumnjati u uspješnost instalacija većeg opsega, dok drugi smatraju da se širokopojasni PLC tek mora dokazati u većim instalacijama
- čak i oni koji su isprobali širokopojasni PLC imaju dvojbe glede poslovnog slučaja (engl.: *business case*) u nedoumicama su koliko naplaćivati i kako najbolje ponuditi usluge
- veliko je pitanje mogu li elektroprivrede uspješno ponuditi i promicati usluge širokopojasnog PLC-a obzirom na nedostatak vlastitog iskustva u tom području i promašaje nekih prošlih telekomunikacijskih pothvata, posebice uzme li se u obzir da su do nedavno deregulacije djelovale u monopolističkom okruženju.

Izvještaj među prednostima širokopojasnog PLC-a naglašava mogućnost uvođenja AMR-a i povezanih sustava, kao i entuzijazam regulatora u podržavanju tehnologije širokopojasnog PLC-a.

U izvještaju "*Strategies for Integrating AMR, CIS / Other Systems*", iznose se iskustva i zaključci stečeni u brojnim integracijskim projektima, između kojih su i sljedeći:

- ne treba čekati, s integracijom treba započeti odmah kod prvog projekta; procese treba uspostaviti prije uvođenja AMR-a
- premda uvođenje sustava za AMR s očitanjem jednom dnevno ili češće povećava složenost integracije, isto s druge strane može unaprijediti funkcioniranje niza odjela, među kojima i inženjeringu i odjela za usluge korisnicima.

Prema izvještaju, ukoliko tvrtke žele polučiti što više koristi od AMR-a, sustava za upravljanje ispadima i sličnih sustava, moraju ih integrirati sa sustavima informacija o korisnicima (engl.: *customer information systems*). Integracija može povećati sveukupnu učinkovitost elektroprivrede, te donijeti dodatne prihode i poboljšati usluge korisnicima.

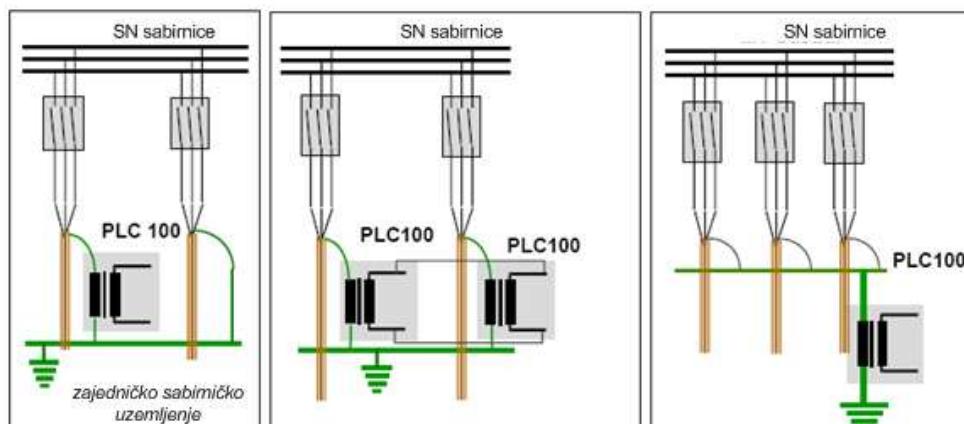
Prema izvještaju iz 2002. godine o prednostima AMR-a kod korisnika s privremenim boravištim ("AMR for Transient Customers") 30% tvrtki koristi ili planira koristiti AMR kako bi smanjile troškove prikupljanja očitanja pri promjeni korisnika brojila u apartmanima i drugim privremenih boravištima [28]. Mnogi AMR-sustavi osiguravaju očitanje na zahtjev, što elektroprivredi olakšava očitanje brojila bez slanja radnika na teren što poboljšava učinkovitost i smanjuje troškove. Ukoliko se korisnici često sele, elektroprivredi i drugim tvrtkama značajno se povećavaju troškovi. Prema procjeni izvještaja, do 2002. godine je samo 3% tvrtki koristilo AMR za daljinsko ukapčanje i iskapčanje korisnika.

## 5. PRIJENOS SIGNALA

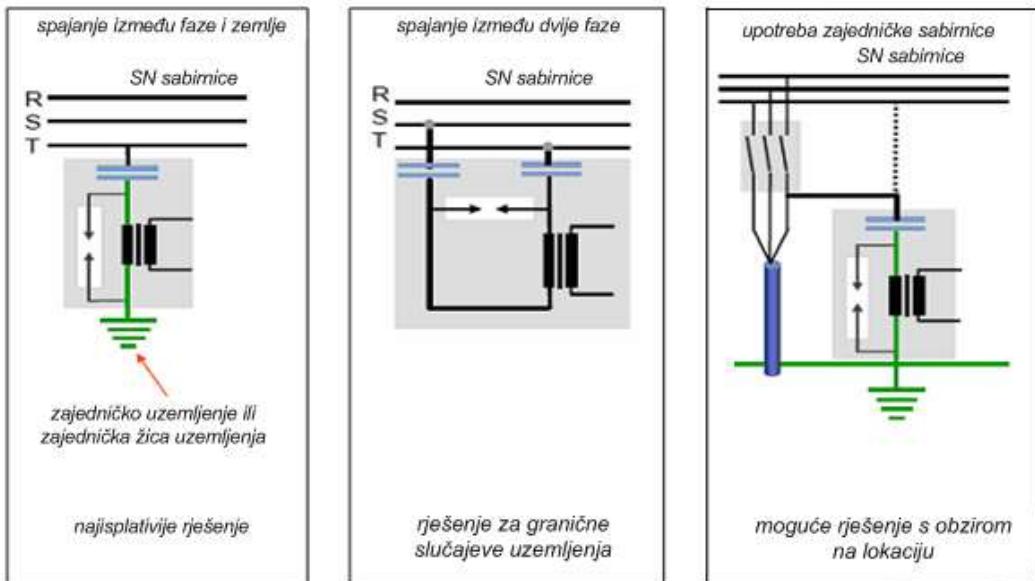
Za prijenos informacija signalima s frekvencijom puno većom od frekvencije prijenosa električne energije (50, 60 Hz, itd.) koriste se niskonaponski vodovi u skladu s normom EN 50065. Na niskonaponskim vodovima potrebna je vrlo velika snaga za MTU (mreža tonfrekventnog upravljanja). To znači da je pulsirajući prijenosni signal (ripple carrier signaling, RCS) nepogodan za dvosmjerni prijenos i za modemske operacije. Za spajanje modema za prijenos podataka na niskonaponske vodove trebaju biti ispunjena dva uvjeta prijenosa signala poruke. Prvo, poželjno je umetnuti prijenosni signal s gornjom pristupnom dopuštenom vrijednošću amplitude i drugo, signal primatelja treba biti čist, što u idealnom slučaju podrazumijeva dovođenje signala ulaz prijemnika, da se pri tom odvajaju neželjeni djelovi signala (npr. oštećeni interferencijom). U oba slučaja potrebno je imati sigurno odvajanje napona niskonaponskog voda, jer niskonaponski vod ima sinusoidalni napon frekvencije 50 do 60 Hz kod kojeg postoje i brojni harmonici iznad osnovne frekvencije. Prijelazna stanja, tj. kratki impulsi s visokim amplitudama mogu ometati prijenos ili uništiti ulazni signal prijamnog modema. Modem nema dugi vijek trajanja, ako se pravilno ne zaštiti.

### 5.1. Parametri prijenosa

U zagradama točka napajanja PLC sustava je klasična niskonaponska zidna utičnica (220 V) spojena sa tri vodiča: faza (L1, L2 ili L3), nula i uzemljenje. Prije je sparivanje PLC signala bilo uobičajeno između nule i uzemljenja. Jedan kraj svih zidnih utičnica galvanski je spojen sa nul vodičem, prolazi cijelu zgradu i uzemljen je na spoju zgrade, a faze se dijele po zidnim utičnicama. Galvanski spoj faza nije ispred transformatora. Pozivajući se na sliku 2.12. uočavamo da se spoj za visoke frekvencije i uzemljenje nalaze na kućnom spoju.



a) induktivno



b) kapacitivno

Slika 5.1. Načini injektiranja signala u elektroenergetsku mrežu (galvansko razdvajanje)

Opisana metoda spajanja "kućnog" PLC između faze i nule nije se pokazala kao najbolje rješenje, jer modem odašilje signale u zidnu utičnicu, a napajan npr. iz L1, dok je modem koji prima signale priključen na L2. Tako primljeni signali su vrlo slabi, zbog prolaza između L1 i L2, te može doći do velikog gušenja signala na instalacijama u zgradama i kod malih udaljenosti između predajnika i prijamnika. Kod spajanja PLC između faze i nule također dolazi do visokog stupanja asimetrije koja na mjestu napajanja uzrokuje uobičajeno elektromagnetsko zračenje već kod malih prijenosa. Na slici 5.1. prikazano je galvansko razdvajanje energetskih vodova od informacijske mreže.

#### 5.1.1. Signal veze

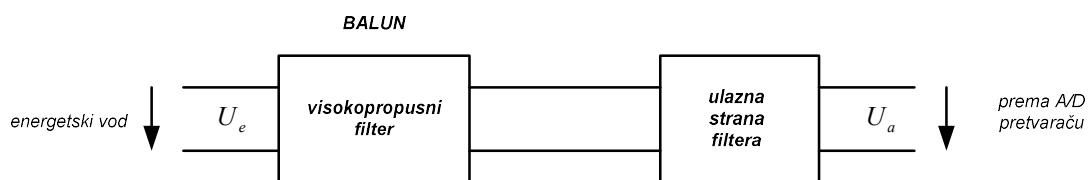
Slika 5.2. prikazuje stranu predajnika [13]. Iz ove se slike vidi da analogni signal iz predajnika dolazi u elektroenergetsку mrežu preko niskopropusnog filtera koji se napaja iz D/A pretvarača.



Slika 5.2. Sparivanje signala na strani predajnika

Omjer između nazivnog napona i amplitude prijenosnog signala uglavnom je veći od 30. To nije veliki tehnički problem, jer se frekvencije razlikuju faktorom od 400 do 3000. Međutim, kao što je prije spomenuto, postoji opasnost za završni stupanj prijenosa i to primarne strane, zbog

prenapona u elektroenergetskoj mreži, pa je potrebno primjeniti odgovarajuće mjere zaštite. Za prijenosne sustave koji koriste frekvencijska područja u skladu s normom EN 50065 pokazala se adekvatnom uporaba tzv. diode prigušenja. Takve diode odlikuju se brzim odgovorom (od nekoliko nano sekundi), brzim pretvaranjem velike količine energije u toplinu, a da pri tom nema nikavog oštećenja. Međutim, ove diode imaju relativno visoki kapacitet, pa se ne mogu primijeniti na visokim frekvencijama (reda MHz). To znači da su potrebni zaštitni strujni krugovi za telekomunikacijske sustave.



Slika. 5.3. Sparivanje signala na strani prijamnika

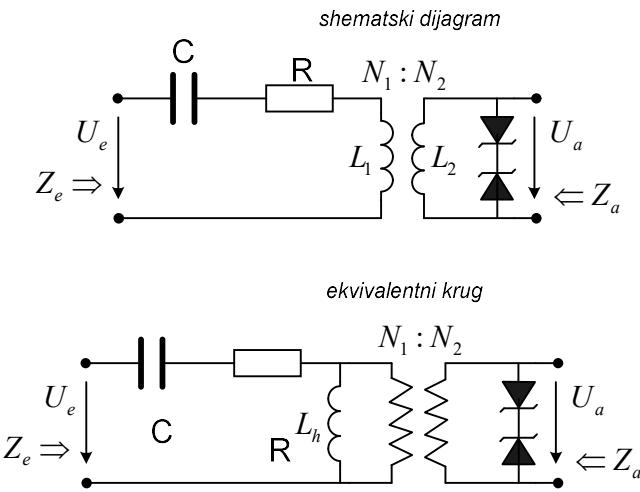
Sprezanje signala prikazano na slici 5.4. mora biti izvedeno tako da se spriječi smanjenje amplitude signala na visokoenergetskim prijelazima kroz transformator u smjeru modema. Zaštita tih prijelaza osigurava dovoljno prigušenje da se može izbjegći uništavanje izlaznog stupnja transformatora.

Slika 5.3. prikazuje stranu prijamnika [13]. Funkcionalni blok pod nazivom "predajnik s visokopropusnim filterom" omogućava sigurno odvajanje 50 ili 60 Hz nazivnog napona i potiskuje niskofrekvenčne dijelove spektra do približno 20 kHz koji uzrokuju interferenciju.

Osnovna struktura opreme sprezanja (transformatora s propusnim filterom) je ista na slikama 5.2. i 5.3., ali je dimenzioniranje pojedinačnih komponenata različito. Strana predajnika zahtijeva čvrsto sprezanje, dok strana prijamnika zahtijeva sprezanje s mogućnošću izmjene. Ovo je efekt koji se javlja prolaskom signala kroz visokofrekvenčni filter i nema neželjene reakcije na impedanciju mreže što je vrlo važno za funkciranje sustava. Energetske usluge dodane vrijednosti koriste se tamo gdje je aktivan samo jedan predajnik unutar odgovarajućeg dijela mreže. Međutim, broj prijamnika može biti do nekoliko stotina. Stoga učinci prijamnika na karakteristike mreže moraju biti što manji, osobito na impedanciju mreže i prijenosnu funkciju. Velik broj prijamnika, čvrsto spojenih s mrežom smanjuje impedanciju mreže, pa se na taj način nepotrebno opterećuje predajnik. Slika 5.4. prikazuje strujni krug transformatora s visokopropusnim učinkom. Na strani predajnika uobičajeno se odabire kapacitet između 1 i 2  $\mu\text{F}$ . Na strani prijamnika dovoljna je vrijednost kapaciteta od 100 nF. Na strani predajnika priključuje se što manji otpor  $R$  (čvrsto sparivanje), a sastoji se od radnog otpora na primaru transformatora i otpora na sekundaru (što nije prikazano na slici 5.4.) koji se uvijek koristi u praktičnoj upotrebi zbog sigurnosnih razloga osobito za signalno napajanje u "crossbar" sustavu. Na strani predajnika otpor je puno manji od  $1 \Omega$ . Na strani prijamnika  $R$  je puno veći nego impedancija NN mreže. U praksi se pokazalo da su najprikladnije vrijednosti za  $R$  između 100 i 150  $\Omega$ . Kod dimenzioniranja induktiviteta  $L_1$  i  $L_2$  treba voditi računa da je njihova impedancija ( $2\pi f_i L_{1,2}$ ) uvijek puno veća od spojenih otpora na svim radnim frekvencijama  $f_i$ .

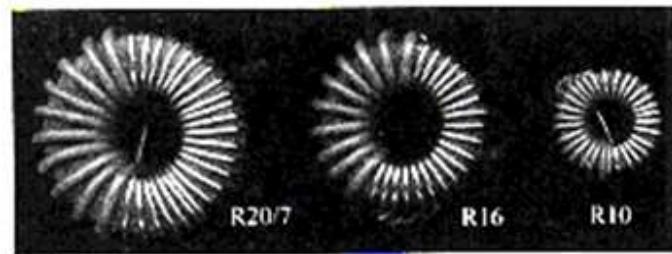
U izračunima se uglavnom treba usredotočiti na stranu NN vodova, tj. na pravilno dimenzioniranje u ekvivalentnom strujnom krugu prikazanom na slici 5.4. Na strani predajnika izlazni otpor treba biti što manji ( ) na što utječe izlazni stupanj predajnika. Odabirom omjera

proporcionalno se transformira napon na izlaznom stupnju tako da dolazi do željene amplitude signala u glavnim vodovima, što je uobičajeno maksimum signala pristupne amplitude. Omjer uobičajeno se nalazi u rasponu  $\frac{1}{2} - \frac{1}{4}$  [13].



Slika 5.4. Shematski prikaz spajanja strujnog kruga transformatora

Na strani prijamnika, iza transformatora, spaja se aktivni pojASNOPROPUSNI filter čiji ulazni otpor može odabrati unutar širokog raspona od 5 do nekoliko stotina  $\Omega$ . To znači da je omjer  $N_1 : N_2$  namješten na 1. Prstenaste feritne jezgre prikladne su za dizajniranje predajnika. One omogućuju optimalno vođenje magnetskog polja s vrlo niskim gubicima. Ovo je važan činioč za primjenu čvrstog sprezanja. Veliki broj pokusa s drugim oblicima jezgri nije dao zadovoljavajuće rezultate. Slika 5.5. prikazuje tri dizajna prilagodnog transformatora s odgovarajućim namotima, kakvi su se koristili u modemima. Oznake  $R_{10}$ ,  $R_{16}$  i  $R_{20}$  odnose se na promjere izražene u mm, respektivno. Vidi se da je namatanje transformatora relativno jednostavno. Slika 5.5. također pokazuje da je moguće postići dobru izolaciju namota, pa modemi mogu raditi na niskonaponskim mrežama bez ikakvog rizika.



Slika 5.5. Dizajniranje prilagodnog izolacijskog transformatora

U tablica 5.1. dani su najvažniji tehnički podaci za tri feritne jezgre koje su prikazane na slici 5.5. [1].

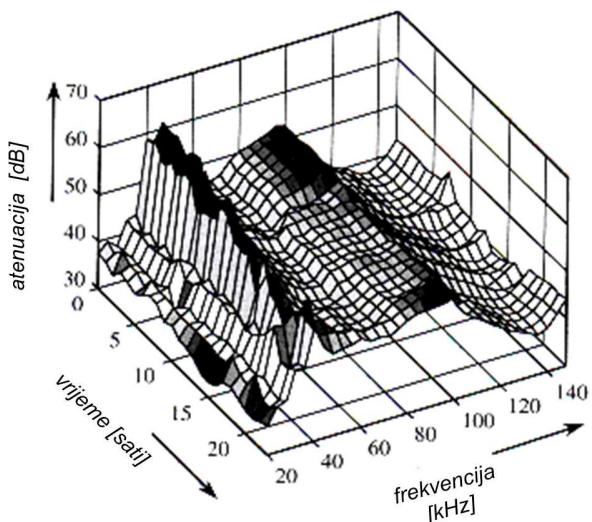
Tablica 5.1. Važni podaci feritnih jezgara za elektroenergetske aplikacije

	Vrsta feritne jezgre		
	R10	R16	R20/7
vanjski promjer	10 mm	16 mm	20 mm (visina 7mm)
materijal	N30	N27	N27
$A_L$ veličina u $nH / N^2$	1760	1290	1930
Ef. mag. rešetkaste sekcije	$A_{e10} = 7.83mm^2$	$A_{e16} = 19.73mm^2$	$A_{e20} = 33.63mm^2$
indukcija	$B_1 = 380mT$	$B_2 = 480mT$	$B_3 = B_2 = 480mT$

### 5.1.2. Prigušenje signala

Trodimenzionalni grafički prikaz prigušenja u najvažnijem dijelu spektra elektromagnetskog zračenja specificiranog normom EN 50065 tijekom perioda od 20 sati prikazan je na slici 5.6. [1]. Maksimalna vrijednost prigušenja je približno 65 dB. Prigušenja mogu biti veća od 80 dB, ovisno o dužini puta.

Iz slike 5.6. također se vidi da važan utjecaj na prigušenje imaju frekvencija i vrijeme, a ne samo dužina puta. Primjećuju se odstupanja prigušenja signala koja ovise o frekvenciji u rasponu od 30 dB, te odstupanja koja ovise o vremenu i iznose približno 10 dB. Ekstremne vrijednosti izmjerene na određenim dionicama značajnije su, jer dovode do jakog prigušenja preko uskog frekvencijskog pojasa. U ovom se primjeru prigušenje signala uobičajeno povećava povećanjem frekvencije, pa kanal ima niskopropusni karakter. Opisane značajke elektroenergetskog voda uzrokuju da je pri prijenosu podataka nužno koristiti modulacijske sheme koje su otporne na različite vrste frekvencijsko – selektivnog prigušenja.

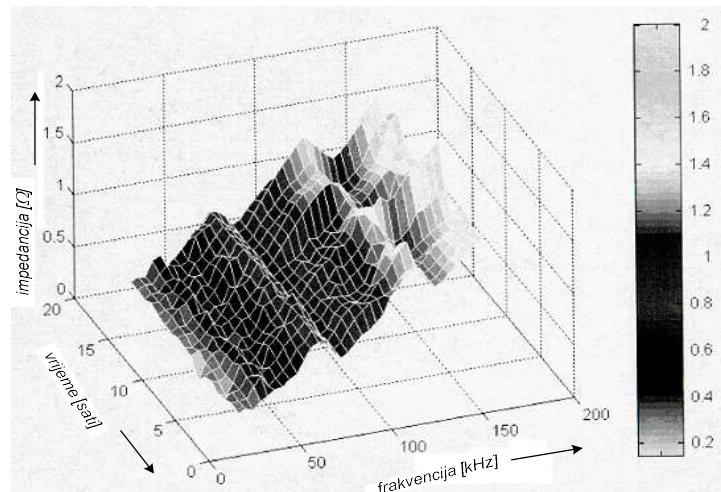


Slika 5.6. Ovisnost prigušenja signala o vremenu i frekvenciji

### 5.1.3. Pristupna impedancija

Modem na strani predajnika ima zadatok prenošenja odgovarajućeg napona u niskonaponske vodove gdje amplitude napona dosežu maksimalnu vrijednost specificiranu normom EN 50065. Zahtijevana prijenosna snaga lako se izračuna ako je poznata ulazna impedancija niskonaponskih vodova. Što je manja impedancija postiže se veća snaga. Najnepovoljniji uvjeti se nalaze na

“crossbar” sustavu podstanice (slika 3.11.). Paralelno povezivanje velikog broja jezgri u vanjskom krugu, između ostalog, uzrokuje vrlo male impedancije. Slika 5.7. prikazuje ovisnost impedancije o frekvenciji. Raspon i odstupanje je približno 0.2 do  $2\Omega$ . To znači da se mora osigurati snaga u rasponu 25 do 250 W, ako se želi postići prijenosna amplituda od 10V. Ovo dovodi do vrlo skupih prijenosnih izlaznih stupnjeva u praktičnim primjenama. Nadalje, dizajn dijelova sprežnika, osobito kapaciteta, vodi do još većih troškova. U nekim primjenama nije se išlo iznad maksimalne prijenosne snage od 100 W, zbog troškova, pa su pokušali izabrati za rad frekvencijsko područje iznad 50 kHz. Na osnovi procjene rezultata mjerjenja pristupne impedancije  $Z_e$  niskonaponskih vodova, pohranjenih u bazi podataka, može se zaključiti, da se impedancija uvijek povećava na frekvencijama 100 kHz i 150 kHz. Slika 5.7. također prikazuje da pristupna impedancija ovisi o vremenu. Osim što pristupna impedancija ovisi o frekvenciji, mjesto priključka ima također znatan utjecaj na njegovu vrijednost [1]. U transformatorskoj stanici vrijednost pristupne impedancije je puno niža nego na utičnicu u zgradu. Kako kućni priključak ima znatno veću pristupnu impedanciju u usporedbi s pristupnom impedancijom transformatorske stanice, pa će izlaz prijamnika, koji se napaja maksimalnom snagom od nekoliko wata, biti dovoljan za rad modema na strani korisnika.



Slika 5.7. Ovisnost gušenja niskonaponskog voda o vremenu i frekvenciji

## 5.2. Prijenos signala

Vizija ostvarivanja Interneta preko elektroenergetske mreže je osobito atraktivna, jer na taj način najveća svjetska mreža znanja i informacija postaje lakše dostupna. Svatko može pristupiti Internetu jednostavnim uključivanjem računala u bilo koju niskonaponsku utičnicu.

Deregulacija u telekomunikacijama omogućava pružanje telekomunikacijskih usluga putem elektroenergetskih mreža. Telekomunikacijske usluge se realiziraju preko postojećih javnih i privatnih niskonaponskih elektroenergetskih mreža. Da bi se oblikovalo zajedničko stajalište nedavno je utemeljeno nekoliko udruga koje povezuju praktična i teorijska znanja, kao što je npr. HomePlug Powerline Alliance [[www.powerline-plc.com](http://www.powerline-plc.com)].

HPPA Inc je utemeljena u ožujku 2000. i čini ju 13 članica. Korporacija je utemeljena da se:

- definira, utvrdi i podrži kućna mrežna specifikacija koja pruža mogućnost korištenja elektroenergetske mreže, za prijenos informacija i uključuje brzo usvajanje specifikacija i normi od strane onih koji razvijaju PLC proizvode i usluge,
- stvori okruženje u kojem se korporacijski članovi mogu sastati da odobre predložene revizije i poboljšanja razvoja koja će usljetiti nakon početnih specifikacija, te da se utemelje agencije i tijela koja imaju svrhu odabira specifikacija i pretvaranja istih u međunarodne norme,
- organizira forum na kojem korisnici, znanstvenici i pružatelji usluga kućnih mreža mogu dati zahtjeve za međusuradnju kao i za širu mogućnost korištenja,
- educiraju poslovne korisničke zajednice o vrijednostima, prednostima i upotrebi kućne mreže i usluga putem javnog informiranja, publikacija, trgovinskih sajmova, sponzorskih seminara i drugih programa koje organizira korporacija,
- zaštite potrebe korisnika i poveća konkurenčiju među prodavačima na način da se podupire kreiranje i implementacija uniformiranog, industrijski normiranog postojećeg postupka ispitivanja i procesa koji osiguravaju međuoperativnost proizvoda i usluga kućne mreže,
- održi vezu s obrazovnim institucijama, vladom, razvojnim institucijama i drugim tehnološkim konzorcijima, kao i ostalim organizacijama koje podupiru i pridonose razvoju specifikacije i normi za kućnu mrežu,
- potakne konkurentnost u razvoju novih proizvoda i usluga koje se temelje na zakonima i regulativama.

Pored toga, Europski institut za normizaciju telekomunikacija ETSI (European Telecommunications Standards Institute) započeo je PLT (powerline technologies) projekt razvoja normi i specifikacija koje pokrivaju potrebe prijenosa glasa i podataka niskonaponskom energetskom mrežom, distribucijskom mrežom i ostvarivanjem električnog umrežavanja. Jedan od glavnih ciljeva ovog projekta je potpuno usklađivanje ETSI normi s odgovarajućim EU/EC odredbama

### **5.3. Širenje višesmjernog signala elektroenergetskim vodovim u visokofrekveničkim područjima**

Pri korištenju elektroenergetskih mreža kao puteva brzog prijenosa podataka za Internet moraju se uzeti u obzir frekvencije, koje su nosioci usluga prijenosa glasa i podataka, unutar raspona od 500 kHz do 20 MHz. Razvoj odgovarajućih komunikacijskih sustava i planiranje komunikacije elektroenergetskom mrežom zahtijeva razvoj i upravu modela kanala koji se temelje na mjerjenjima prijenosnih karakteristika niskonaponskih mreža unutar gore spomenutog frekvencijskog područja.

Heterogena struktura elektroenergetske mreže s brojnim ograncima i impedancijama koje nisu simetrične uzrokuje brojne refleksije visokofrekveničkih signala. Osim širokopojasnog rasprostiranja signala sa frekvencijsko selektivnom raspodjelom elektroenergetski kabeli pokazuju smanjenje amplitude signala ovisno o duljini kabela i frekvenciji. Složena funkcija prijenosa kanala duž elektroenergetskog voda opisuje se parametrima modela unutar promatranog frekvencijskog područja. Mjerena amplituda i odgovarajuće faze modeliranog voda s poznatom geometrijom potvrđuju točnost modela. Usporedbom s rezultatima mjerjenjima koja su obavljena na stvarnim energetskim mrežama dokazuje se usporedivost modela za stvarne topologije mreža.

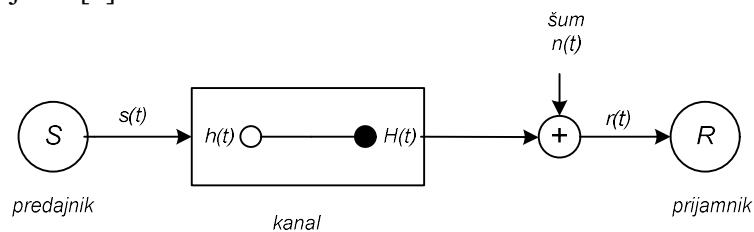
U nastavku ovog poglavlja predstavljen je model složene prijenosne funkcije komunikacijskog kanala elektroenergetskim vodom u frekvencijskom području između 500 kHz i 20 MHz. Model je izведен na temelju fizikalnih učinaka, tj. širenja signala i gubitaka na vodu. Rezultati dobiveni mjerjenjem na modelu mreže s dobro poznatim parametrima odgovaraju onima koji su dobiveni simulacijom. Dokazana je i primjenjivost modela danog u literaturi [20] na stvarnim mrežama.

Mnogi modeli nude rješenja izvođenja i ispitivanja mreža različitih mrežnih topologija, te omogućuju proučavanje njihovih učinaka u komunikacijskim sustavima putem simulacija. Na temelju dovoljno velikog broja mjerjenja može se postaviti model baze podataka širenja signala za planiranje komunikacijskih mreža elektroenergetskim vodom. Osim toga, mogu se definirati i modeli kanala za usporedbu performanse različitih modulacija i shema kodiranja za buduće norme.

Sve veći zahtjevi za usluge u području komunikacija uzrokovali su uporabu mreže za dovod električne energije kao višenamjenskog medija koji dostavlja ne samo energiju, nego i glas, kao i usluge dostavljanja različitih podataka. Pristup Internetu preko elektroenergetske mreže je u središtu brojnih istraživačkih aktivnosti [5, 6, 19, 20].

Mreža elektroenergetskih vodova znatno se razlikuje u toplogiji, strukturi i fizikalnim svojstvima od uobičajenih telekomunikacijskih mreža s paricama, koaksijalnim kabelima i optičkim kabelima. Traže se modeli prijenosnih karakteristika mreže niskog napona za dizajniranje odgovarajućih komunikacijskih sustava, kao i za planiranje komunikacijskih mreža elektroenergetskim vodovima..

U literaturi se može pronaći nekoliko različitih pristupa modeliranju prijenosnih karakteristika ovih elektroenergetskih vodova. Većina modela predstavlja pristupe koji opisuju ponašanje neke mreže po komponentama koji koriste matrični zapis raspoređenih parametara, ili matrice impedancija četveropola i matrice admintancija. Ovi modeli podrazumijevaju detaljno znanje o komponentama mreže za utvrđivanje elemenata matrica. Glavni nedostatak takvih pristupa je veliki broj parametara koji se ne mogu utvrditi s dovoljnom točnošću. Svrha ili cilj pristupa je pokazati komunikacijski kanal kao crnu kutiju, te opisati njegove karakteristike prijenosa prijenosnim funkcijama [3].



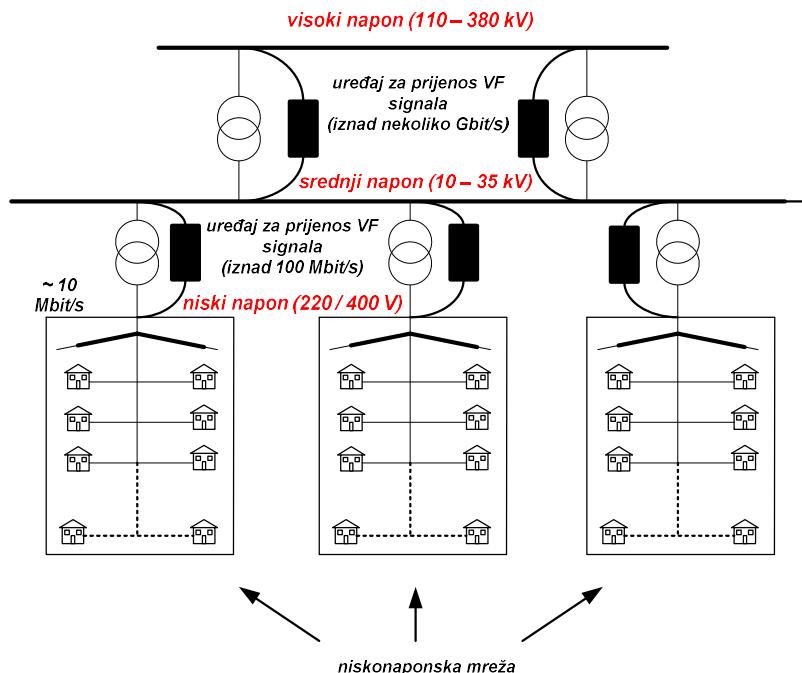
Slika 5.8. Općeniti model energetskog kanala

Slika 5.8. prikazuje model kanala koji se koristi u komunikacijskom inženjeringu [3]. Ovaj model pokazuje prijenosnu funkciju  $H(f)$  uz nekoliko karakterističnih parametara u frekvencijskom području od 500 kHz do 20 MHz, a valorizira se na fizikalnim učincima koji se promatraju tijekom velikog broja mjerjenja.

## 6. PRIJENOS TELEKOMUNIKACIJSKIH SIGNALA PUTEM ELEKTROENERGETSKE MREŽE S RAZLIČITIM NAPONSKIM NIVOIMA

Jedan od problema prisutnih u PLC sustavu je prenošenje telekomunikacijskih signala izvan kućanstva po vodovima elektroenergetske mreže, a drugi problem je transformator snage. Telekomunikacijski signali su male amplitude a visoke frekvencije. Ove signale lako zagušuje transformator.

Da bi se signal prenijeo s jednog naponskog nivoa na drugi koriste se uređaji koji to omogućuju (slika 6.1.). Obično su to sprežnici koji se temelje na induktivnoj i/ili kapacitivnoj vezi.

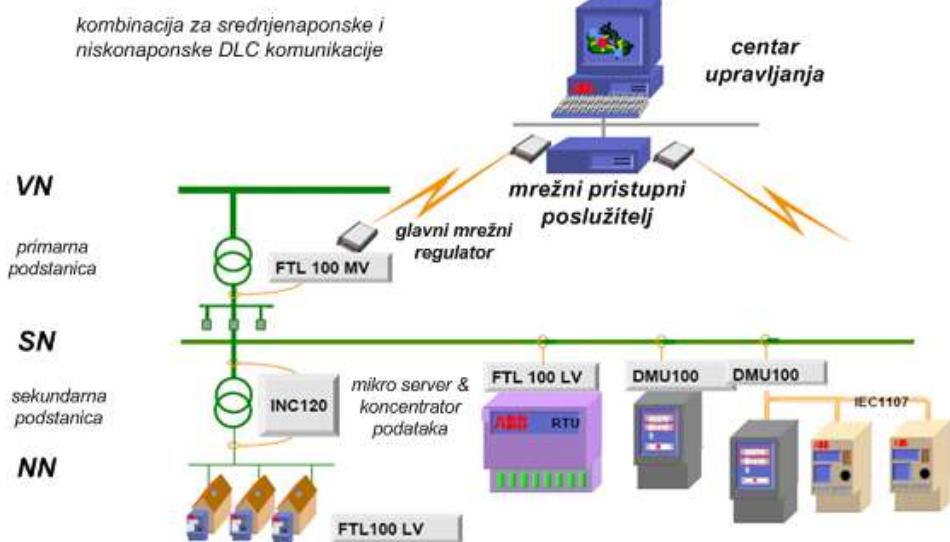


Slika 6.1. Struktura sustava napajanja električnom energijom i protok podataka

Mnoga kućanstva su priključena na isti elektroenergetski vod. Ako se elektroenergetskim vodom prenosi signal prijenosne brzine 2 Mbit/s i ako se raspoloživa pojasna vala dijeli na stotinu kućanstava, tada svako kućanstvo ima samo 20 kbit/s u prosjeku, što znači manje nego dial-up vezom spajanja modema (slika 6.2.).

Rješenje "posljednje milje" elektroenergetskim vodom prikazano je na slici 6.3. [1]. Transformatorska stanica napaja do 400 kućanstava putem nekoliko (uobičajeno 3 do 6) izlaznih kabela. Komunikacija se kontrolira iz centralne koja se naziva bazna stanica. Tako je ostvarena struktura mreže od jedne prema više točaka. Fiksna telekomunikacijska mreža strukturirana je na drugačiji način. Njezin glavni cilj je učinkovito povezivanje od točke do točke, jer za telefoniju korisnik obično treba samo jednu jedinstvenu vezu s partnerom. Pristup Internetu ostvaruje se učinkovitijim rješenjem, tj. putem strukture povezivanja od jedne točke prema više točaka, za razliku od fiksne telekomunikacijske mreže.

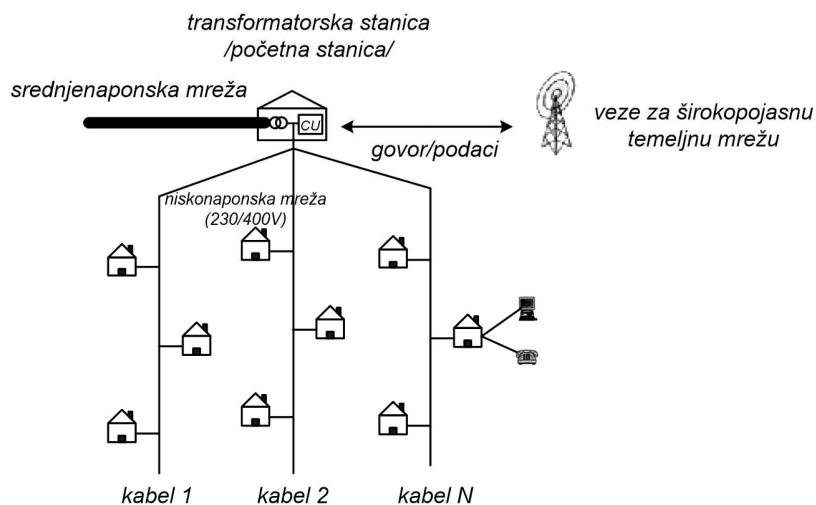
### DLC komponente



Slika 6.2. Sustav intervalnog mjerjenja

Tijekom pristupa Internetu korisnici kontaktiraju sa poslužnikom (serverom) preko pristupnih veza kojima se dostavljaju željene informacije. Dvije bitne razlike postaju očite kada se usporedi PLC veza s normalnom telefonskom vezom. To su:

- server može biti zauzet, zbog brojnih korisnika koji se istovremeno priključuju
- promet informacija je nesimetričan, tj. korisnik šalje vrlo kratke poruke zahtjeva prema serveru, male prijenosne brzine, dok se od servera očekuje da omogući pristup velikom broju podataka u vrlo kratkom roku (unutar konvencionalne telefonske mreže po bakrenim paricama može se ostvariti nesimetričan prijenos uporabom sustava nesimetrične pretplatničke linije, ADSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line) )



Slika 6.3. Elektroenergetski dio strukture lokalnom petljom

Mreža prikazana na slici 6.3, predstavlja sustav veze od transformatorske stanice prema potencijalnim korisnicima sa srednjenaponskog na niskonaponsko područje. U slučaju više korisnika priključenih istovremeno, važno je koristiti cijeli kapacitet kanala da količina prenesenih podataka za svakog korisnika tijekom perioda prometnog zagušenja ne padne ispod prihvatljive razine. Dužina kabela za prijenos energije je ograničena, ali nema fizikalnih ograničenja koja predstavljaju nepremostive prepreke. Prijenos podataka iz predajnika bazne stanice koja se može nalaziti pokraj transformatorske stanice (to se vidi iz slike 6.3. u obliku tornja za radio vezu) prema temeljnoj širokopojasnoj mreži (npr. Internetu) ostvaruje se uporabom različitih prijenosnih medija kao što su optički kabeli, bakreni kabeli, bežične veze (radio-veze), ili putem vodova srednjeg napona. Osim PLC i ADSL sustava predložena su i druga rješenja "*posljednje milje*", a predložili su ih različiti pružatelji usluga.

Postoji još jedno rješenje "*posljednje milje*" i to radio prijenosom signala na kratkim udaljenostima. U kolovozu 1999. godine došlo je do frekvencijske raspodjele u Njemačkoj posredstvom RegTP (regulativne organizacije za telekomunikacijske i poštanske usluge u Njemačkoj). Sada su dostupna dva frekvencijska područja za prijenos komunikacijskih signala. To su 3.5 GHz i 26 GHz područje.. Kako su navedena frekvencijska područja osjetljiva na fizičke prepreke, (što je izraženo u urbanim sredinama) elektromagnetski valovi mogu biti gotovo potpuno blokirani, pa je potrebno imati izravnu liniju vidljivosti između bazne stanice i opreme korisnika. Bazne stanice se stoga postavljaju na povišenom položaju i usmjerene su prema korisnicima.

PLC električni ulaz u zgradu treba definirati i s tehničke i sa zakonske točke gledišta, jer ovdje prestaje odgovornost opskrbljivača električnom energijom. Za unutrašnje instalacije odgovoran je vlasnik, a vanjsko ožičavanje obavlja se u skladu s normama. Instalacije u zgradi mogu biti heterogene i koriste se kao brze lokalne mreže.

#### *Širine pojasa i određivanje frekvencije*

Prijenos podataka brzinama do nekoliko Mbit/s može se ostvariti u distribucijskim mrežama električne energije i u unutarnjim instalacijama zgrada. Ovo je dokazano brojnim studijama koje su potkrijepljene detaljnim mjeranjima, ali i brojnim eksperimentima na terenu [2,3,7]. Uporaba frekvencijskog opsega iznad 30 MHz osigurava različite mogućnosti, npr. brzi pristup Internetu, unutrašnje primjene poput digitalne distribucije audio ili video signala iz niskonaponske utičnice i drugo.

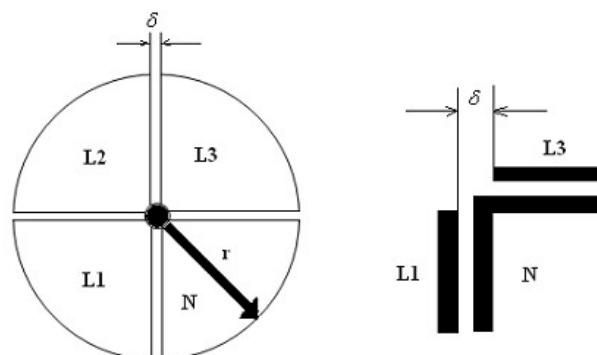
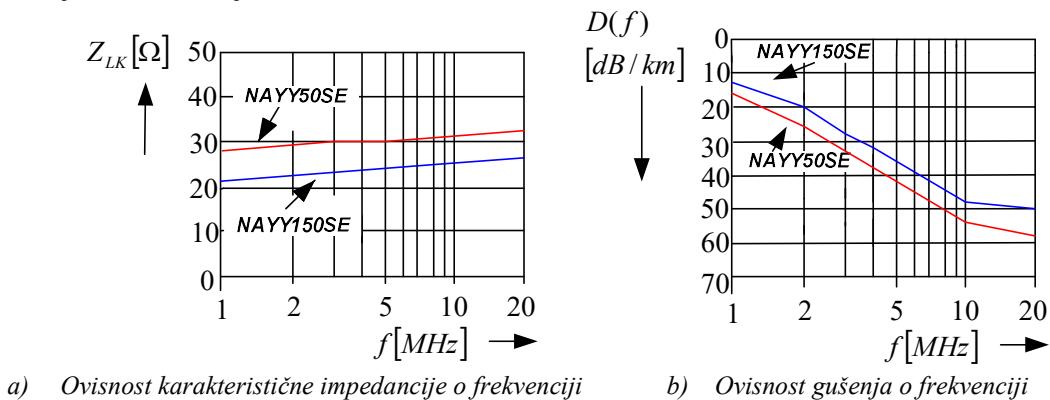
Međutim, za sada je regulirao korištenje frekvencijskog područja od 3 do 148.5 kHz za PLC sustave. PLC sustav koji djeluje u tom frekvencijskom pojusu primjenjuje se u automatizaciji zgrada, za prijenos elektroenergetskih informacija. Međutim, za više frekvencije ne postoje norme ni pravila za njihovo korištenje u PLC primjenama. Donošenju takvih normi trebaju prethoditi ispitivanja na terenu za čije je izvođenje potrebna dozvola od strane nadređenih uprava nakon što se uđovolji određenim zahtjevima koji se odnose na lokacije, prijenosne snage i frekvencije korištenja.

Treba napomenuti da od 1998. godine postoje različite radne skupine kao što su PTF (Powerline Telecommunications Forum) forum i radna grupa ATRT (Arbeitskreis Technische Regulierung in der Telekommunikation = working group of technical regulation for telecommunication za RegTP) koje se bave problemima regulacije i donošenjem normi koje se odnose na primjenu PLC tehnologije na frekvencijama iznad 148.5 kHz.

### Karakteristike kanala, tehnike povezivanja i rezultati mjeranja na visokim frekvencijama u PLC sustavu

Za prijenos podataka na frekvencijama većim od 20 MHz prikladni su nadzemni i podzemni elektroenergetski kabeli, dok se u unutrašnjim instalacijama mogu prenositi signali frekvencije iznad 30 MHz. Elektroenergetskih vodova uzrokuju relativno male gubitke. Međutim, na podzemnim kabelima s PVC izolacijom javlja se karakteristika niske propusnosti. Dijagrami na slici 6.4.c) se odnose na segmentni kabel. Dijagrami na slici 6.4.a) prikazuju ovisnost karakteristične impedancije o frekvenciji. Ovisnost prigušenja kabela D o frekvenciji prikazana je na slici 6.4.b) [12].

Krivulje označene s NAYY150SE odnose se na kabele kratkog dometa (približno 10 m) koji dovode električnu energiju izravno do priključaka, dok se krivulje označene s NAYY50SE odnose na niskonaponski dovodni kabel. Gornja granica frekvencije koja se preporuča za korištenje u PLC sustavu ne definira se samo na temelju učinaka prigušenja. Stupanj reagiranja signala primatelja na smetnje i šumove igra bitnu ulogu u kvaliteti kanala. Vrijednosti prigušenja mogu se mijenjati ispitivanjem stvarne mreže koja uključuje brojne čvorove, pri čemu interferencija igra važnu ulogu. Kad se razmatraju unutrašnje veze situacija je drugačija. U unutrašnjim instalacijama preporuča se korištenje visokih frekvencija, iznad 30 MHz uglavnom zbog mnogo kratkih udaljenosti. To ima i nekih dodatnih prednosti, jer se nivo pozadinskog šuma smanjuje s povećanjem frekvencije.



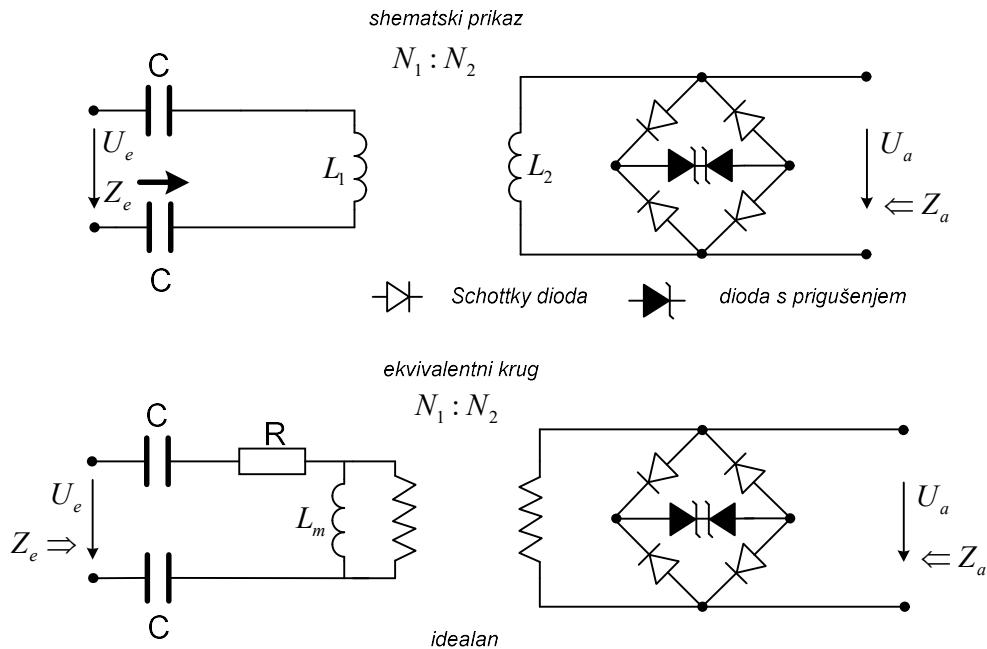
c) Presjek segmentnog NN kabela

Slika 6.4. Značajke NN energetskih kabela za VF prijenos:

Tehnika povezivanja signala u elektroenergetsku mrežu na način koji je definiran frekvencijskim rasponom ispod 150 kHz ne koristi se za više frekvencije (npr. od 500 kHz do 30 MHz). Osnovni principi vrijede, ali je potrebno izvesti neke prilagodbe. Strujni krug veze je modificiran kao što prikazuje slika 6.5.[2] Na lijevoj strani se nalaze dva kapaciteta veze (68 nF, 1000 V), a u središtu jezgra s primarnim i sekundarnim namotima (2 zavoja svaki).

Važan je odabir odgovarajućeg vodiča za dobru elektromagnetsku usklađenost. Simetrično vezivanje dviju faza osigurava puno bolje rezultate, zbog većeg napona (400V umjesto 220V) između faza. Prednost je korištenje dvaju kapaciteta jer se oni spajaju tako da svaki ima pola napona, tj. 200V. Kapacitet za VF primjene ima 1/10 vrijednosti kapaciteta koja je potrebna za CELNEC stranu A-D (< 150 kHz) (slika 2.2.), pa su troškovi znatno smanjeni. Situacija je potpuno drugačija u unutrašnjim mrežama, jer se neutralni vodič pokazuje kao najbolji odabir za prenošenje PLC signala s dobrim karakteristikama elektromagnetske usklađenosti.

Na modemskoj strani potrebno je promijeniti odgovarajuću zaštitu, jer postojeće propuštajuće diode imaju relativno veliki kapacitet kako bi prigušile dijelove signala. Zaštitni most prikazan na slici 6.5. dobro radi pri frekvencijama do približno 30 MHz [2]. Međutim, četiri Schottky diode treba pažljivo odabrati, jer kapaciteti variraju od jednog tipa diode do drugog. Općenito, dovoljni su uređaji niske snage i malog kapaciteta zato jer je propusni napon Schottky diode približno jednak trećini napona uobičajene Si diode. Zbog toga se treba pobrinuti da svaka od četiri Schottky diode uvijek ostane reverzno-propusna za sve amplitude signala koje se prenose. Kao što je prikazano na slici 6.5. ovo je moguće ostvariti pomoću dvosmjerne propusne diode koja je priključena dijagonalno u most. Svojim velikim kapacitetom dijagonalni napon mosta ne slijedi RF signal, nego ostaje gotovo nepromijenjen, korenspodirajući najvišim vrijednostima prenesenog signala. Ovo je razlog zašto su Schottky diode reverzno-propusne.



Slika 6.5. VF sparivanje jedinica sa zaštitnim strujnim krugom

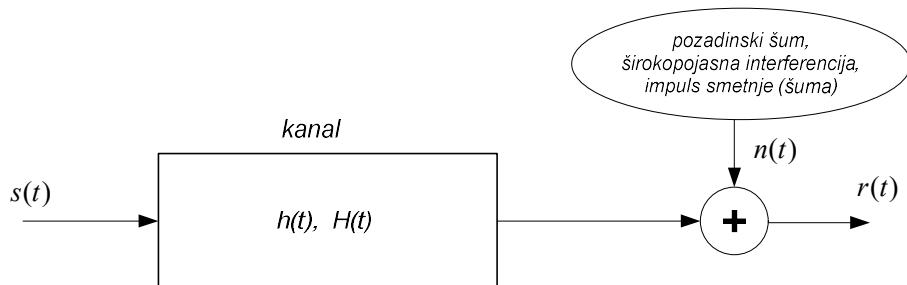
Na frekvencijama iznad 30 MHz Schottky diode se zamjenjuju PIN diodama koje imaju još nižu propusnost. Iako postoji veći propusni napon, ne očekuju se nikakva oštećenja jer se najveći dio spektra energetski opasnih prijenosa nalazi na relativno niskim frekvencijama.

Što se tiče magnetskih materijala jezgre i tu postoje neke promjene koje su potrebne za rad u RF području. Prstenaste jezgre su se pokazale dobrima u primjeni pri frekvencijama od nekoliko stotina kHz, dok za signale u MHz području uzrokuju znatan pad učinkovitosti. Za više frekvencije dvostruka šupljina željezne jezgre pokazala se kao dobro rješenje. Induktivni otpor ovisan o induktivitetu  $L_m$  (sl. 6.5.) sada ima malu vrijednost zbog visoke frekvencije, tako da se mogu (u ovom slučaju) upotrijebiti namoti s malo zavoja. Ovo je prednost glede magnetiziranja jezgre strujom frekvencije 50 ili 60 Hz. Kako su ovi kapaciteti relativno mali, magnetiziranje jezgre ne predstavlja problem pri prijenosu visokim frekvencijama. Slika 6.6. prikazuje element elektroenergetske veze za frekvencije iznad 50 MHz [13].



slika 6.6. Karakteristični element kod RF sparivanja jedinica

Informacija koju prenosi signal  $s(t)$  i sadržana je u primljenom signalu  $r(t)$  ključna je karakteristika prijenosne funkcije  $H(f)$ . Signal  $r(t)$  je mješavina prigušenog (oslabljenog) prenošenog signala i šuma, tj.  $r(t) = h(t) \cdot s(t) + n(t)$  [13]. Za detekciju poruke koja se temelji na primljenom signalu  $r(t)$ , omjer signal/šum (S/N) ključna je karakteristika. Ona određuje vjerojatnost pogreške bita. Signal šuma na prijamniku može se izračunati ako je poznata lokalna interferencija kao i prigušenje za promatrano frekvencijsko područje. Jedina slobodna varijabla je amplituda prijenosnog signala. Prigušenje i interferencija utvrđuju se mjeranjima. Ovaj zadatak je daleko komplikiraniji za visoke frekvencije nego za one ispod 150 kHz. Prigušenje elektroenergetskog kanala s prijenosnom funkcijom  $H(f)$  utvrđuje se omjerom primljenog i prenošenog signala  $r(t)/s(t)$ .  $H(f)$  je složena funkcija frekvencije (slika 6.7).



Slika 6.7. Načelo sustava prijenosa informacija

Međutim, za određivanje prijenosne funkcije  $H(f)$  primjenjuje se stvarni prijenosni signal  $s(t)$  u obliku sinusoide s frekvencijom  $f$  i amplitudom  $A$ , bez ograničenja početnog signala

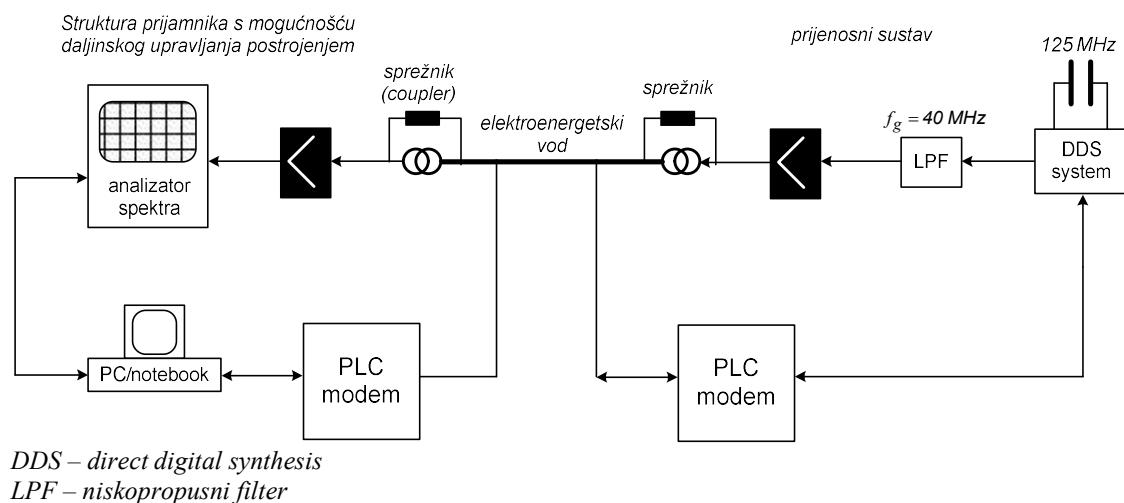
$$s(t) = A \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (6.1.)$$

Primljeni signal  $r(t)$  je složen tako da se za  $H(f)$  utvrđuju amplituda  $|H(f)|$  i fazni kut  $\varphi_H(f)$ . U početnoj točci  $|H(f)|$  je od veće važnosti, jer rezultati za  $|H(f)|$  zadovoljavaju jasne procjene karakteristike kanala koji se koristi za telekomunikacije. Mjerjenje  $\varphi_H(f)$  zahtijeva znatno više pažnje, ali je neizbjegljivo za odabir i optimizaciju sheme odgovarajuće modulacije. Amplitude  $|H(f)|$  prijenosne funkcije i/ili njezine recipročne vrijednosti, prigušenja  $D(f)$  [dB], mogu se izračunati uporabom jednadžbe:

$$|H(f)| = \frac{\text{amplituda primljenog signala frekvencije } f}{\text{amplituda signala frekvencije } f \text{ u početnoj točci}} \quad (6.2.)$$

$$\frac{D(f)}{dB} = -20 \log_{10} |H(f)| \quad (6.3.)$$

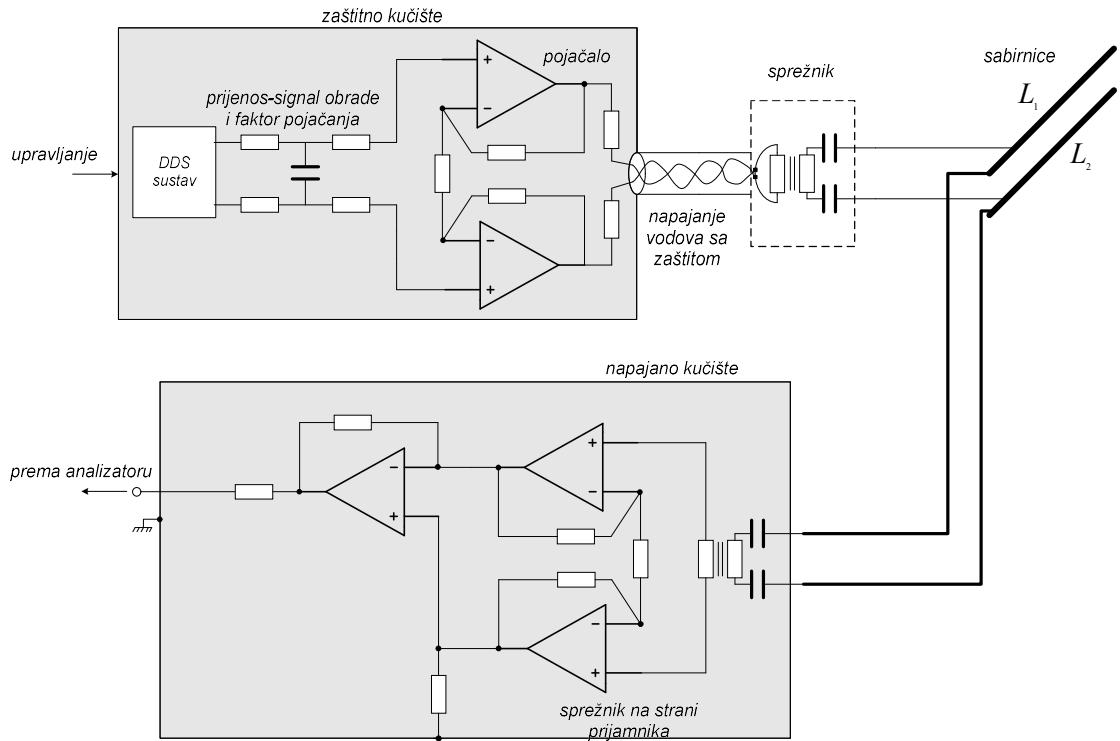
Primljeni signal  $r(t)$  se procjenjuje, primjerice korištenjem analizatora spektra (slika 6.8.) [1].



Slika 6.8. Sustav automatskog VF mjerjenja prigušenja i zračenja

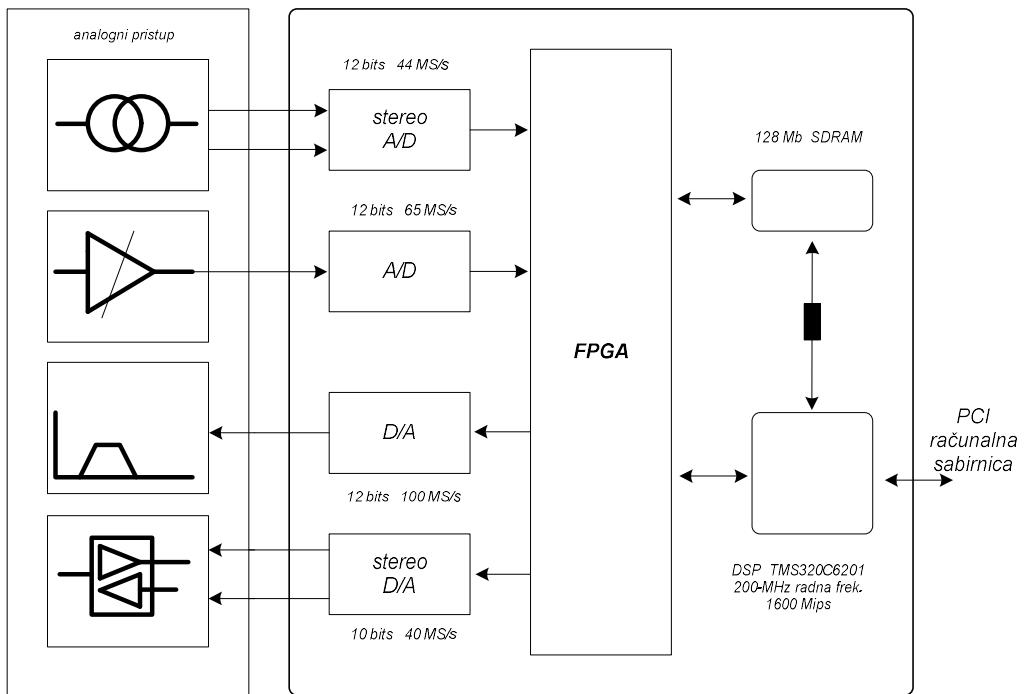
Za određivanje omjera signal/šum (S/N) dovoljna su dva analizatora spektra za promatrana frekvenčna područja. Jedan analizator ima aktivni predajnik (S), a drugi pasivni predajnik (N). Nakon filtriranja prijenosni signal se pohranjuje. Prijenosni signal se provodi preko zaštićene parice i simetrično vezuje u elektroenergetsku mrežu.

Kapacitivnost se ne zanemaruje unutar frekvencijskog raspona, induktiviteti se stavljuju vrlo blizu jedan drugome da se izbjegne međuindukcija. Priklučkom predajnika prema zemlji prenošeni signal djelomično se šalje preko parazitnog kapaciteta.



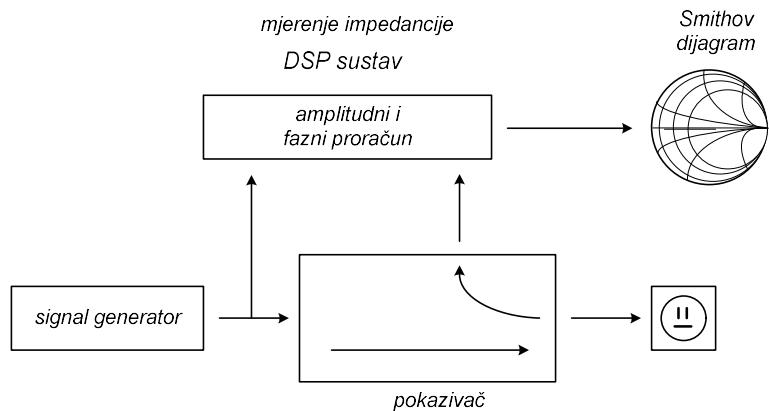
Slika 6.9. Detalji prikladni za elektroenergetski signal sprezanja na visokim frekvencijama

Mjerni sustavi prikazani na slici 6.9. su automatizirani [1]. Strujni mjerni sustavi ne bilježe važne parametre kao npr. fazu prijenosne funkcije, povratni impuls ili ulaznu impedanciju elektroenergetskih vodova. Većina tih mjerjenja provodi se uporabom digitalnih osciloskopa i skupih analizatora mreže. Ovi nedostaci potakli su istraživače da zajednički razviju univerzali mjerni sustav koji se naziva "Power Line Analyzing Tool" (iPLATO). Koncept ovog sustava je prikazan na slici 6.10. Ovaj novi sustav je prisutan na tržištu od kraja 2001. godine. Temeljna značajka iPLATO-a je da je to sustav brzog digitalnog procesiranja visokofrekvencijskih signala (DSP, digital signal processing) s brzinama barem 128 Mbit/s. DSP sustav se priključuje u PCI kanal (PCI slot) na ulaz standardnog PC-a. Dva para A/D i D/A pretvarača (konvertora) s različitim brzinama i rezolucijom čine most između "analognog pristupnog kraja" (koji je opremljen s vezama na elektroenergetsku mrežu da bi bio analiziran) i DSP sustava. Prototipna verzija iPLATO-a, koja se koristi, snima signale periodom od 65 Mbit/s pri rezoluciji od 12 bita.



Slika 6.10. Univerzalni sustav iPLATO za analiziranje karakteristika elektroenergetskih vodova

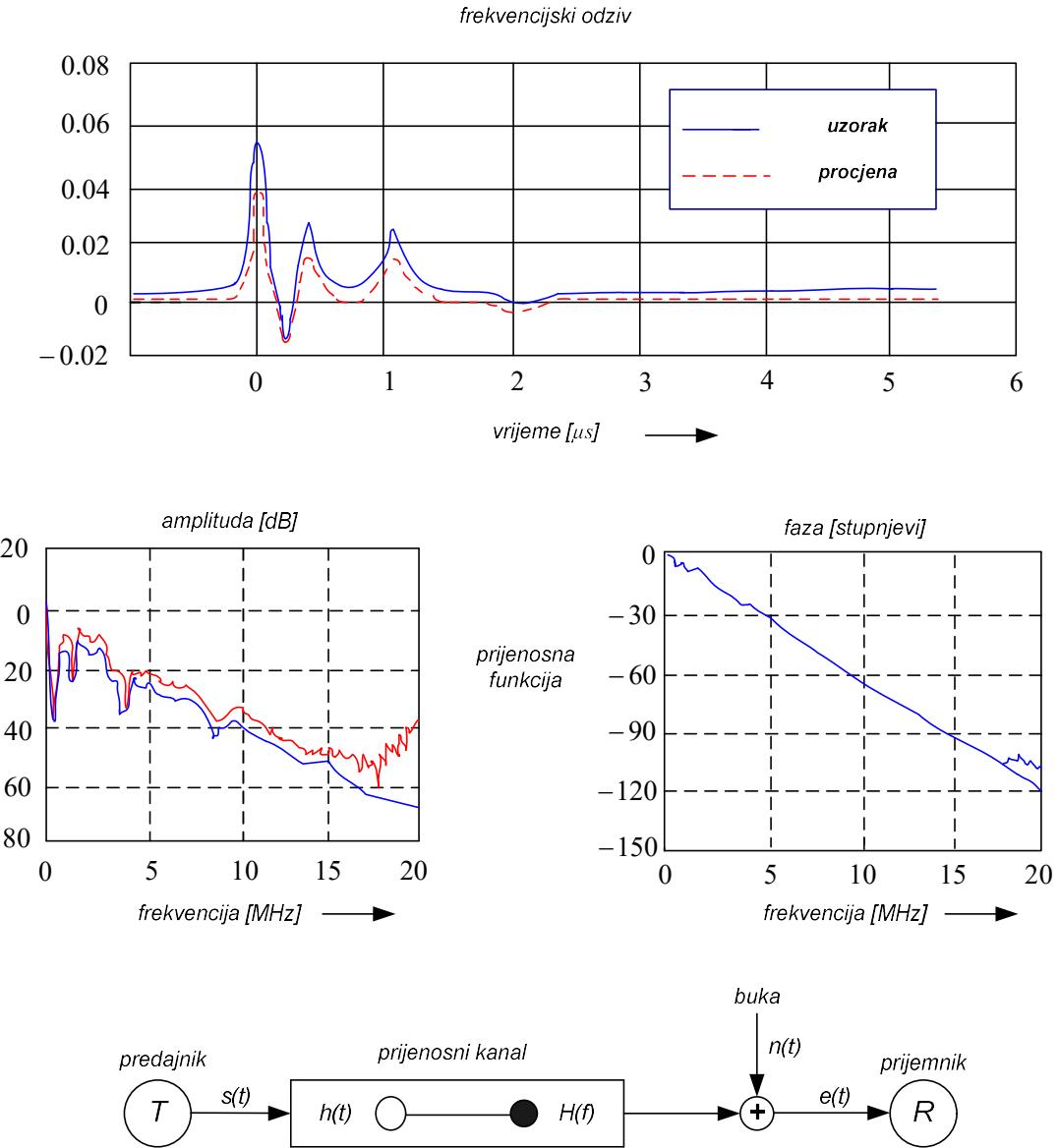
Mjerni sustav iPLATO omogućuje, pored analiziranja i snimanja signala, sintezu za simuliranje i uvođenje testiranja za kompletne PLC sustave. Analogna pristupna strana ne uključuje samo filtere i pojačala koji su potrebni za definiranje složene prijenosne funkcije, nego i odziv impulsa kao dio spektra, te vrijeme trajanja pojave smetnji (slika 6.11.).



Slika 6.11. Mjerenje karakteristične impedancije energetskog voda s mjernim sustavom iPLATO

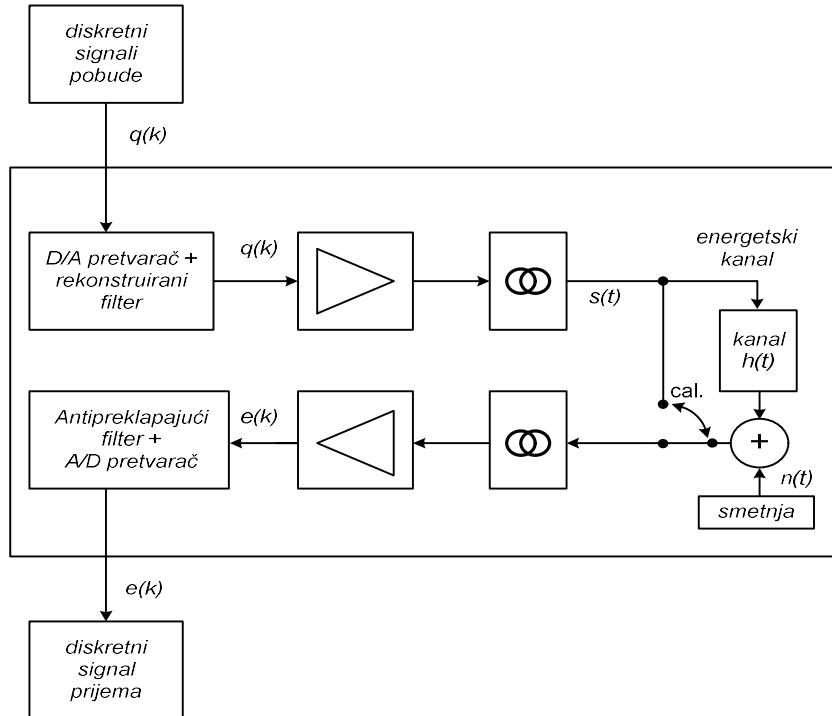
Pri dizajniranju PLC sustava važno je uporijebiti OFDM modulacijsku shemu i poznavati frekvencijski odziv impulsa za definiranje važnih parametara elektroenergetskog kanala.

#### *osnovne procjene za elektroenergetski kanal*



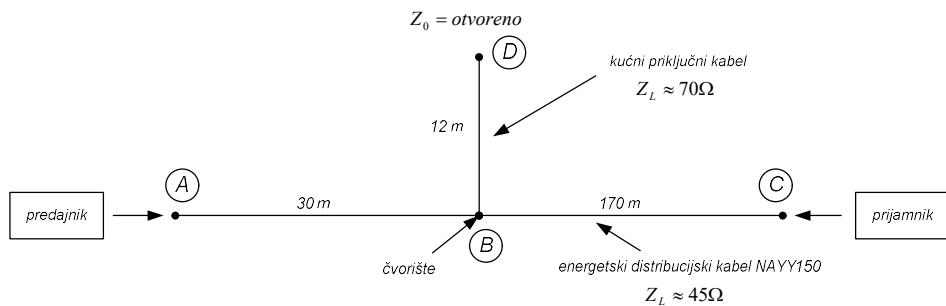
Slika 6.12. Karakteristični elektroenergetski kanal s odzivom impulsa i složenom prijenosnom funkcijom

Mjerenjem se dobiva rezultat iz kojeg se iščitava odziv signala prikazan na slici 6.12. [2]. Rezultati mjerenja prijenosne funkcije dani su u literaturi [12, 13, 17, 19, 20]. Mjerenja su obavljena uz prisustvo smetnji. Mjerna se metoda temelji na periodičnoj izmjeni signala spektra poticanog u ispitivanom kanalu i na uporabi algoritma za izračunavanje rezultata (slika 6.13). [5]



Slika 6.13. Širokopojasna maketa za procjenu imulta odziva i prijenosne funkcije elektroenergetskih kanala

Slika 6.14. prikazuje jednostavnu mrežu, upotrebljenu za provjeru Dostertovog modela mreže. Predajnik signala nalazi se na lokaciji A. Signal putuje prema prijamniku na lokaciji C. Oni su uskladieni karakterističnim impedancijama kabela. Točka D je otvorena za početni faktor refleksije  $r = 1$  [19]. Pokazalo se da se rezultati dobiveni simulacijom dosta dobro slažu s onima koji su dobiveni mjeranjem karakteristika kanala, iako je uzeto u obzir samo prvih šest odjeka. To se objašnjava činjenicom da višestruko reflektirani impulsi prolaze dulje puteve, pa se više prigušuju u dielektriku i vodičima kabela. Reflektirani impulsi prolaze preko čvorova u mreži, gdje se reflektiraju, pri čemu se također smanjuje amplituda impulsa. Zato odjeci višeg reda i s većim kašnjenjem, u odnosu na prvi impuls, imaju bitno niže amplitude, te slabo utječu na rezultat mjerjenja (vidi poglavlje 3.4., tablica 3.2).

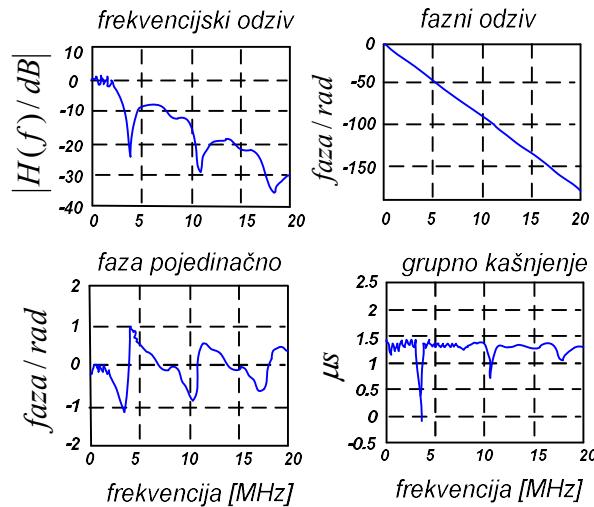


Slika 6.14. Konfiguracija modela mreže prema Dostertu

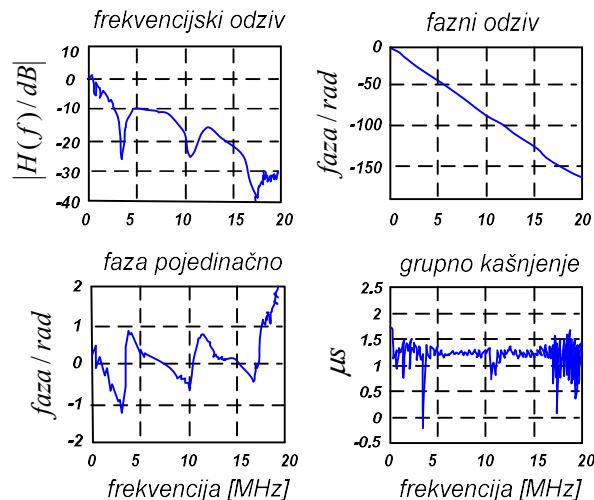
Prijamni i predajni signali, kao i prijenosna funkcija pohranjuju se u unutarašnjoj memoriji (tzv. "digitalni zapis osciloskopa"). Ovisnost prijenosne funkcije i prigušenja o frekvenciji prikazani su na slici 6.15. Grafovi prikazuju raspone frekvencija s faznim pomacima [20].

Refleksije u čvorovima grananja uzrokuju peridično odstupanje frekvencijskog odziva što se vidi iz grafova na slici 6.15.

Slika 6.16. pokazuje rezultate simulacije prijenosnih karakteristika prema višestaznom modelu koji se temelji na jednadžbi  $H(f)$  sa  $N=6$  staza. Parametri su navedeni u tablici 6.2. Očito je da se rezultati simulacije i mjerena absolutne vrijednosti prijenosne funkcije i faze veoma malo razlikuju. Može se zaključiti da model pokriva sve bitne učinke [14].



Slika 6.15. Rezultati mjerena za Dostertov model mreže



Slika 6.16. Odziv za mrežu sa  $N=6$  staza signala

Tablica 6.2. Parametri modela jednostavne mreže

broj staza	1	2	3	4	5	6
duljina $d_i$ u metrima	200	221	242	259	266	530
težinski faktor $g_i$	0.54	0.275	-0.15	0.08	-0.03	-0.02
$k = 1$	$a_0 = -2.1 \cdot 10^{-3}$			$a_1 = 8.1 \cdot 10^{-10}$		

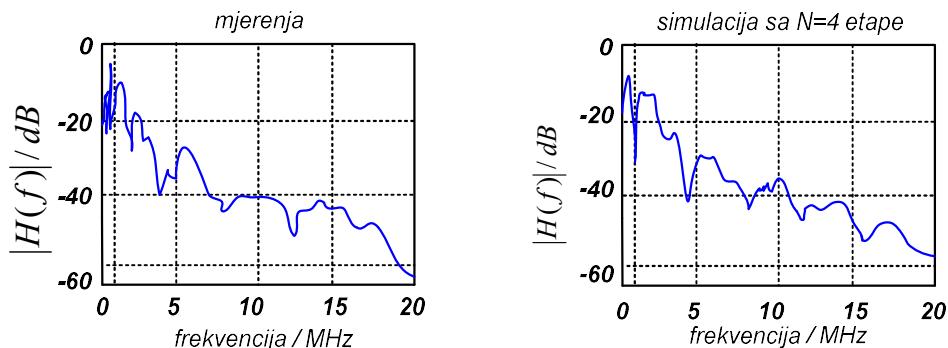
Model je primjenljiv i na realne mreže. Slika 6.16. prikazuje apsolutnu vrijednost prijenosne funkcije elektroenergetskog voda za veze približne duljine 150 m. Kašnjenja jeke su određena iz rezultata mjerena. Odgovarajuće duljine izračunate su korištenjem jednadžbe

$$\tau_i = \frac{d_i \cdot \sqrt{\varepsilon_r}}{c_0} = \frac{d_i}{v_p} \quad \text{sa} \quad \varepsilon_r = 4 \text{ i brzinom propagacije } v_p.$$

Tablica 6.3. Parametri modela prikazanog na slici 6.14.

broj staza	1	2	3	4
kašnjenje $\tau_i$ u $\mu\text{s}$	1.0	1.25	1.76	2.64
ekvivalentna duljina staze $d_i$ u m	150	188	264	397
težinski faktor $g_i$	0.4	-0.4	-0.8	-1.5
$k = 0.5$	$a_0 = 0$			$a_1 = 8 \cdot 10^{-6}$

Slika 6.17. prikazuje rezultate dobivene mjeranjem i simulacijom sa  $N = 4$  staze ove veze. Duljine staza su navedene u tablici 6.3. Graf pokazuje da se bitni učinci mogu opisati relativno jednostavnim modelom. Samo na niskim frekvencijama rezultati simulacije i mjeranja se neznatno razlikuju. To je zbog činjenice da duže jeke, koje nisu uzete u obzir u tom skupu parametara, osobito utječu na niži dio spektra [20]. Ovaj primjer prikazuje primjenjivost modela na stvarnim mrežama.



Slika 6.17. Gradički prikaz rezultata mjeranja ovisnosti apsolutne vrijednosti prijenosne funkcije o frekvenciji na elektroenergetskom vodu duljine 150 m i rezultata dobivenih simulacijom

## **6.1. Dizajniranje širokopojasnih strujnih krugova**

Jedna od najkritičnijih komponenata svakog PLC sustava je povezivanje njegovog strujnog kruga s strujnim krugom distribucijske elektroenergetske mreže. Ovo ni u kom slučaju nije jednostavno zbog zahtjevnih karakteristika PLC kanala. Visoki naponi, promjenljivih impedancija, visoke amplitude smetnje koje ovise o vremenu, nameću potrebu pažljivog dizajniranja sparivanja tih strujnih krugova, da bi se ostvario prijenos komunikacijskih signala s odgovarajućom pojasmom širinom i odgovarajućim stupnjem sigurnosti koji je propisan međunarodnim normama. Postoje dva osnovna načina povezivanja (sparivanja) induktivno i kapacitivno, a i neka njihova hibridna rješenja.

Potrebno je pažljivo projektirati strujni krug veze i strujni krug snage da bi se postigla optimalna kompatibilnost između ova dva sustava. Sustav snage i komunikacijski sustav djeluju u različitim područjima – sustav snage na vrlo niskoj frekvenciji i vrlo visokoj snazi, struji i naponskim nivoima, a komunikacijski sustavi djeluju na puno višim frekvencijama i vrlo niskoj snazi, struji i naponskim nivoima. Dobro dizajniran PLC sustav mora imati pravilno usklađen sustav snage i komunikacijski sustav. Prijenos komunikacijskih signala PLC kanalom može se ostvariti na nekoliko načina:

- diferencijalnim načinom povezivanja pri čemu se koriste fazni i neutralni vodič (linijski (fazni) vodič se koristi kao jedan kraj, a neutralni vodič se koristi kao drugi kraj)
- uobičajeni način povezivanja: linijski i neutralni vodovi su upareni. Ovaj način povezivanja osigurava do 30 dB bolje polje spajanja od diferencijalnog. U nekim zemljama uobičajeni način povezivanja nije dozvoljen na mrežama niskog napona zbog potencijalne opasnosti za korisnike.

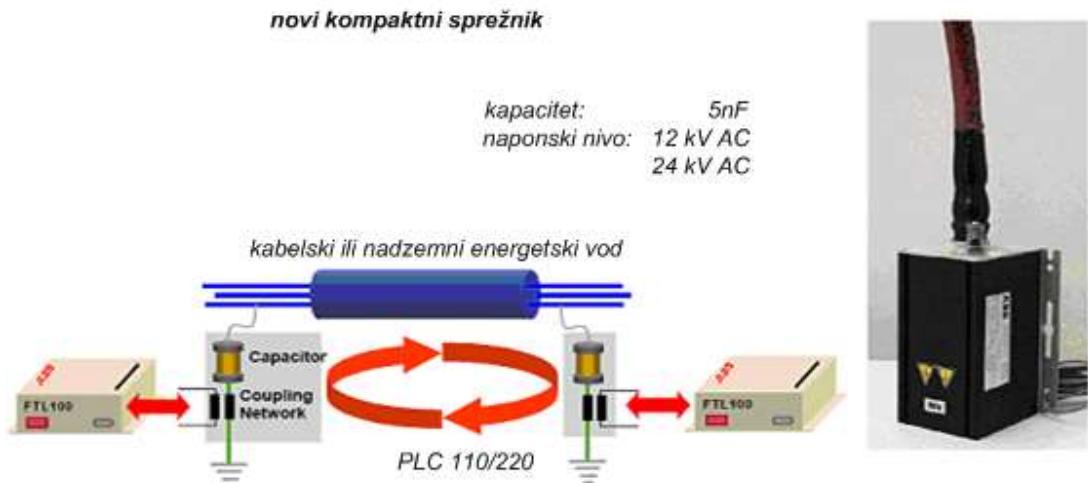
Ovaj strujni krug pruža potrebnu galvansku izolaciju PLC sustava od elektroenergetskog voda. To se postiže induktivnom ili kapacitivnom vezom. Induktivno povezivanje uzrokuje gubitke do nekoliko dB. Međutim, izbjegava izravnu vezu s mrežom zbog čega se smatra sigurnijim i lakšim za instaliranje od kapacitivnog povezivanja. Kapacitivnim povezivanjem realizira se željeno visokopojasno filtriranje s postojećom elektronikom koju je lako dizajnirati. U praksi se često primjenjuje kombinacija obiju tehnika, tj. hibridno rješenje.

### **6.1.1. Komponente strujnog kruga veze**

Kapacitivna veza se koristi u PLC sustavu najčešće za povezivanje PLC signala s elektroenergetskom mrežom ili kao dio sofisticiranih visokopojasnih filtera. Zahtjevi i bitne karakteristike kapacitivne veze su definirane u ANSI-C93.1-1973 normama. Kapacitivne veze prenose komunikacijsku struju i zato je potrebno spajati visokofrekvenske kapacitete (samo rezonantna frekvencija mora biti viša od modulacijske frekvencije). Osim toga VF kapaciteti filtriraju snagu (koja se smanjila preko komponente), kao i utjecaj prenapona.

Glavna funkcija induktivne veze je u biti transformatorska veza, a cilj joj je ostvariti galvansku izolaciju i prilagoditi impedanciju. Ova veza propušta VF komunikacijski signal te je dizajnirana kao takva. Val snage ima puno nižu frekvenciju i puno viši nivo napona, te ima utjecaj ograničenja (blokiranja) u rasponu od najmanje  $10^5$ , u usporedbi s komunikacijskim valom. Stoga se val snage filtrira NF filterom prije nego što uđe u transformatorsku vezu.

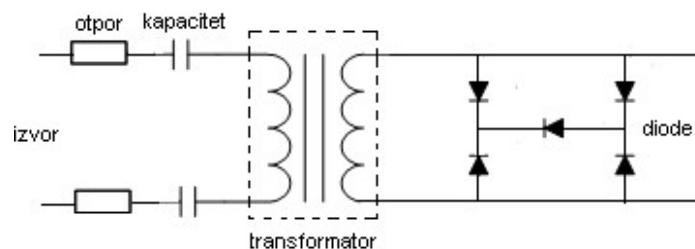
Vodljivi blokovi dizajnirani su da bi spriječili prenapon ili pad napona. Vodljivi blok zaustavlja modulacijsku frekvenciju i zbog toga je samorezonantna točka iznad te frekvencije.



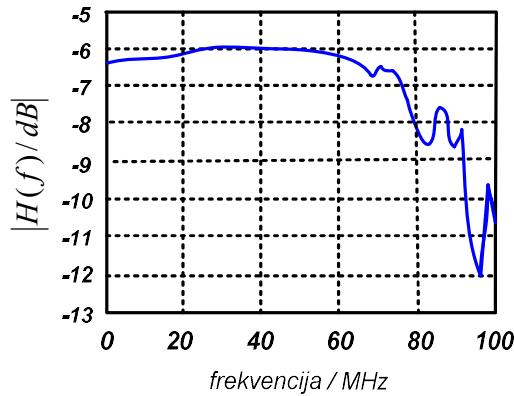
Slika 6.18. Prikaz kapacitivne veze

### Primjer

Strujni krug veze sadrži i kapacitivne i transformatorske veze. Slika 6.19. prikazuje širokopojasni strujni krug koji je dizajniran za mjerjenje PLC kanala [10]. Krug sadrži VN kapacitete, širokopojasni transformator, te kombinaciju dioda za zaštitu od prenapona.

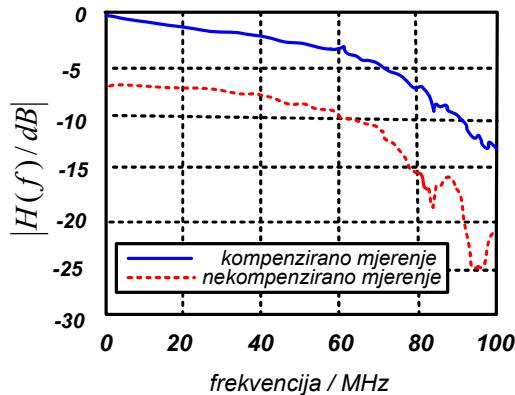


Slika 6.19. Prijenosni strujni krug

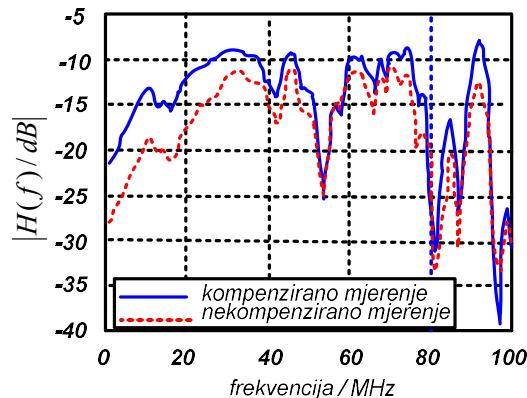


Slika 6.19. a) Ovisnost prijenosne funkcije o frekvenciji za strujni krug prikazan na slici 5.17.

Slika 6.19. a) prikazuje funkciju prijenosa ovog strujnog kruga. Slika 6.20. prikazuje izmjenični frekvencijski odziv snage kabela dužine približno 20 m, a slika 6.21. prikazuje frekvencijski odziv PLC kanala kod stvarne smetnje elektroenergetskog voda [10].

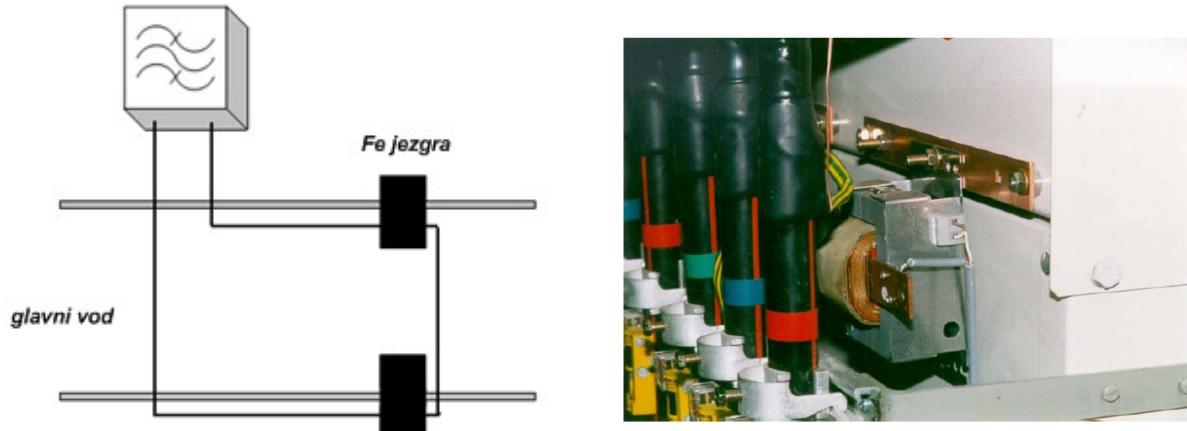


Slika 6.20. Prigušenje dvadeset metarskog energetskog kabela



Slika 6.21. Frekvencijski raspon za PLC kanal

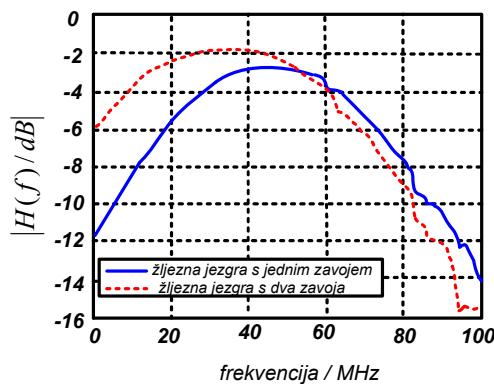
U induktivnoj vezi PLC signal se propušta u energetske distribucijske vodove. Ovo se postiže putem induktivne promjenjive (prilagodljive) veze, pri čemu se koriste odgovarajuće VF željezne jezgre. Metoda induktivnog propuštanja najučinkovitija je kada je glavna impedancija nisko na signalu propusne točke. Ovo je obično slučaj kada se propušta signal kroz postojeću mrežu gdje je nekoliko energetskih kabela spojeno zajedno. Spajanjem nekoliko energetskih kabela u jednoj točki ili stanici rezultira paralelnim vezivanjem pojedinačnih kabelskih impedancija. Rezultat toga je niska ulazna impedancija.



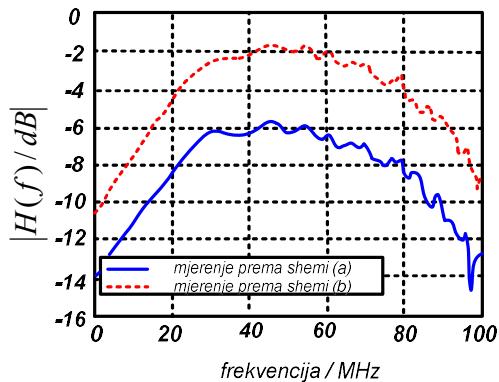
Slika. 6.22. Induktivno sprezanje koristeći Fe jezgre

Dakle, induktivna veza je često korištena metoda vezivanja, jer ima bolje karakteristike u situacijama niske impedancije, te je jednostavnija za korištenje. Induktivna veza uključuje željezne prstenove (koji imaju funkciju pretvarača) da bi se propustio komunikacijski signal u glavnu mrežu. U ovom slučaju ne postoji galvanska veza između energetske mreže i PLC opreme, što je pogodno za korištenje, a i sigurnije je s praktične točke gledišta. Odabir tih Fe prstenova ovisi:

- o odrezoj frekvenciji u željezu (slika 6.22. prikazuje frekvencijski odziv kod primjenjenih Fe prstena) [11],
- o vrijednosti struje u Fe prstenima (struja u vodiču koji prolazi kroz Fe prsten ne bi trebala prekoračiti ovu vrijednost struje),
- o izboru Fe prstena s manjim promjerom što može olakšati instaliranje.

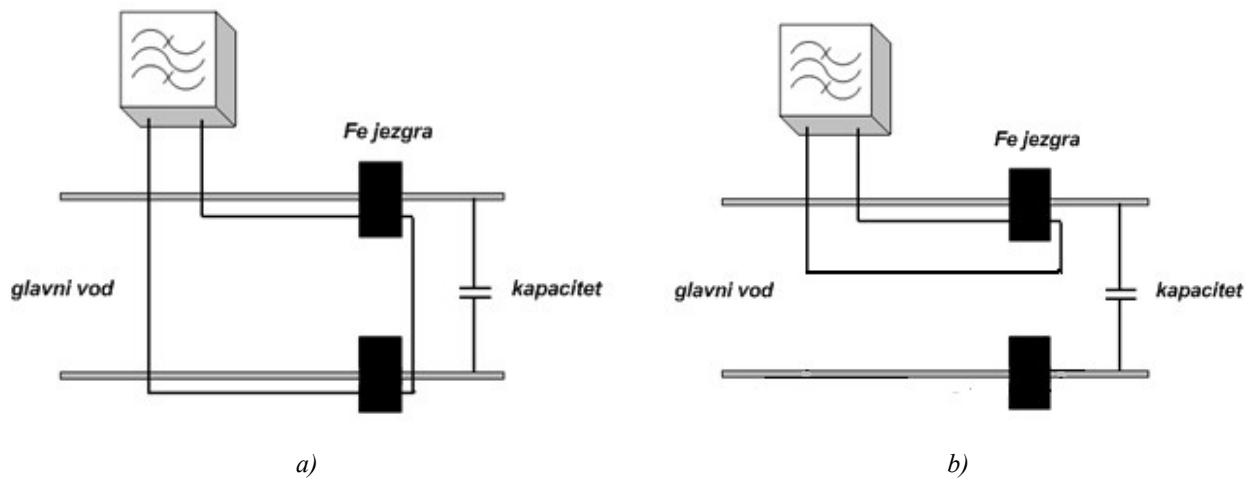


Slika 6.23. Frekvencijski raspon za Fe jezgru s jednim i s dva zavoja



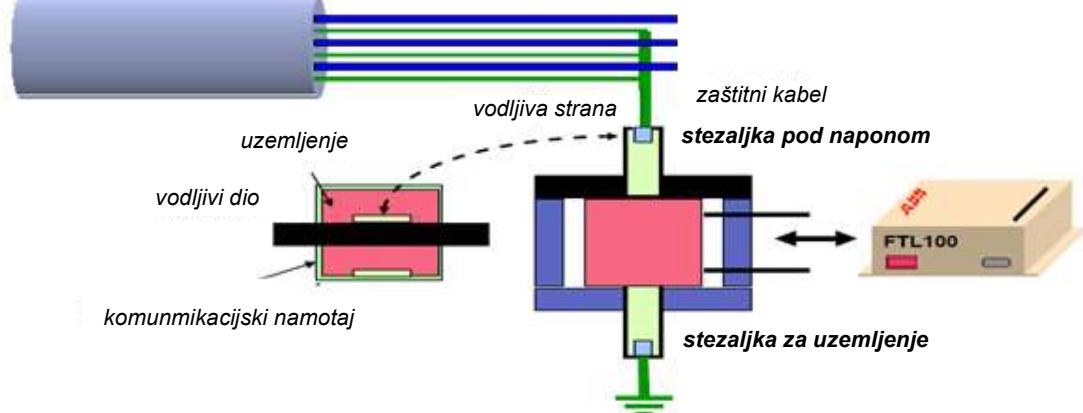
Slika 6.24. Rezultati mjeranja ovisnosti absolutne vrijednosti prijenosne funkcije o frekvenciji s Fe jezgrom prema shemi na slici 6.25.a i 6.25.b

Kapacitivna veza koristi se da bi se smanjila impedancija u točci spajanja što rezultira povećanom učinkovitošću vezivanja, a također ograničava širenje signala u neželjenom smjeru. Kapacitivne veze ponašaju se kao "prečica" signala za komunikacijski signal. Stoga signalna struja teče uglavnom kroz kapacitivnu vezu. Dvije se sheme mogu koristiti za prijenos PLC signala na distribucijske elektroenergetske vodove kao što je prikazano na slici 6.25. Druga metoda povećava učinkovitost povezivanja. Slika 6.23. pokazuje mjerene ovisnosti amplitude vrijednosti prijenosne funkcije o frekvenciji 20 m kabela snage s  $50 \Omega$  opterećenja na oba kraja koristeći induktivnu vezu s Fe prstениma. Shema u kojoj se koriste dva Fe prstena (sl. 6.25.a) daje poboljšano spajanje do 8dB (sl. 6.25.b) [11].



Slika 6.25. Sheme kapacitivnog sprezanja

*kabel ili nadzemni elektroenergetski vod*



*Slika 6.26. Prikaz strujnog kruga veze*

Strujni krug veze prikazan na slici 6.26. važna je komponenta u komunikacijskom sustavu elektroenergetskih vodova. Da bi postigli optimalnu usklađenost između sustava energetske mreže i PLC sustava moraju se vrlo pažljivo odabrati komponente prije spomenutog strujnog kruga.

## **7. ZAKLJUČAK**

U ovom magistarskom radu razmatra se širenje upravljačkog signala elektroenergetskom mrežom s različitim naponskim razinama. Posebice su istraživane mogućnosti elektroenergetskih vodova kao novog medija za prijenos podataka, odnosno medija za rješenje problema tzv. posljednje milje. To uključuje razmatranje Europske norme EN 50065 koje specificiraju frekvencijske pojaseve uporabe, ograničenja razina PLC signala i njihov utjecaj na odabir modulacijske sheme, odnosno metode prijenosa. U radu je obavljena usporedba analiza različitih modulacijskih shema. To su: shema s raspršenim spektrom, s jednim nosiocom bez uporabe ekvalizatora i s uporabom ekvalizatora, shema s višestrukim nosiocima s uporabom ekvalizatora i OFDM shema. Usporedbena analiza je obavljena na osnovi sljedećih kriterija: spektralne učinkovitosti, maksimalne prijenosne brzine podataka, robusnosti na kanalna izobličenja, robusnosti na impulsni šum, fleksibilnosti i prilagodljivosti cijene sustava i podržavanja EMC regulative. Razlozi su sljedeći: velika spektralna učinkovitost, velika prijenosna brzina, otpornost na kanalna izobličenja, otpornost na impulsni šum, fleksibilnost i adaptivnost glede odabira optimalne modulacijske sheme za svaki podkanal uz zadovoljenje EMC regulative. Navedeno ukazuje da je sa sadašnje točke gledišta OFDM shema najpogodnija, pa se predlaže za uporabu u PLC sustavu u elektroenergetskoj mreži R. Hrvatske.

Novi medij, elektroenergetska mreža, omogućava sada i u budućnosti cijeli dijapazon novih usluga zbog same prirode prijenosa električne energije do krajnjeg korisnika. S toga je logičan nastavak pružanja novih komunikacijskih usluga korisnicima, pa se tijekom vremena i razvojem novih tehnologija eventualnim korisnicima nudi i široki dijapazon mogućnosti. Sama ideja i povijest razvoja uporabe elektroenergetskih vodova u komunikacijama ukazuje na sve šire usvajanje ovog načina uporabe elektroenergetske mreže kao novog medija transporta informacija.

Topologija i struktura električnih mreža imaju važnu ulogu kod prijenosa energije visokonaponskim i niskonaponskim elektroenergetskim vodovima, te za prijenos visokofrekventnih signala, kao i kod mogućih visokofrekventnih interferencija na elektroenergetskim vodovima. Elektroenergetska mreža bi pored svoje osnovne zadaće, prijenosa električne energije, imala i zadaću telekomunikacijske mreže za prijenos različitih informacija.

U ovom radu obrađuje se širenje signala elektroenergetskim vodovima, a posebice je predstavljen problem prigušenja signala uzrokovan gubicima kabela.

Primjena elektroenergetskih vodova u telekomunikacijama fokusirana je na uporabu komercijalnih telekomunikacijskih usluga. Posebice se ističe problem širokopojasne komunikacije elektroenergetskim vodovima, te je stoga predstavljena i strategija primjena širokopojasnog PLC-a kod elektroprivrednih sustava u nekoliko zemalja kao i u Republici Hrvatskoj.

Istaknut je problem propagacije visokofrekventnih signala u elektroenergetskim vodovima.

Problem određivanja frekvencije i širine pojasa te različite tehnike vezivanja i mjerena na visokim frekvencijama za PLC su od posebnog interesa. Stoga je matematički opisan i analiziran kanalni i pojednostavljeni model prijenosa elektroenergetskim vodom u cilju optimalnog dizajniranja širokopojasnih strujnih krugova. Komunikacija elektroenergetskom mrežom, PLC, je prijenos informacija od predajnika do prijemnika elementima elektroenergetske mreže na frekvencijama višim od frekvencije prijenosa električne energije.

Zbog moguće primjene posebice se predstavljaju temeljne komponente strujnog kruga veze PLC-a s elektroenergetskom distribucijskom mrežom.

Valja izdvojiti poruku o temeljnog problemu premošćivanja transformatora u sustavu zbog inherentnog transformatorskog prigušenja visokih frekvencija. Zbog visokih napona pogonske frekvencije, promjenljivih impedancija, velikih amplituda smetnji, ovo povezivanje mora biti veoma pažljivo dizajnirano da bi se omogućio specifični prijenos signala s odgovarajućom širinom pojasa kao i odgovarajućim stupnjem sigurnosti koje zahtijevaju korisnici, odnosno koji je propisan domaćim i međunarodnim standardima.

Temeljni zaključak o potrebi uvođenja širenja upravljačkog signala elektroenergetskom mrežom s različitim naponskim razinama predstavljen je svojim povijesnim razvojem, znanstveno matematičkim pristupom, te projekcijom strateškog opredjeljenja moguće primjene različitih sustava u Republici Hrvatskoj.

Na kraju, ali ne i najmanje važno valja se fokusirati i na moguću dinamiku uvođenja ovih usluga jer mnoštvo tehnološki sofisticiranih novih proizvoda valja očekivati u skoroj budućnosti. Ovaj pristup sve više dobija na važnosti deregulacijom elektroenergetskog sektora i uvođenjem tržišnih zakonitosti gdje se traži što veća iskoristivost svakog elementa mreže kao i mreže u cjelini.

## **LITERATURA**

1. Klaus Dostert: «Powerline Communications», 2001 Prentice Hall PTR
2. Barnes J.: A Physical Multi-Path Model for Power Distribution Network Propagation. Proceedings of the 1998 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Tokyo 24.-26.März 1998, pp. 76-89.
3. Dalby A.: Signal Transmission on Power Lines-Analysis of Power Line Circuits. Proceedings of the 1997 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Essen 2.-4.April 1998, pp. 37-44.
4. H.-K. Podszeck, «Carrier Communication over Power Lines,» 4<sup>th</sup> Edition, New York: Springer-Verlag, 1972
5. Hooijen, O: A Channel Model for the Residential Power Circuit Used as a Digital Communications Medium. IEEE Transactions on Electromagn. Compat. Vol. 40 (1998), pp. 331-336.
6. K. Dostert: RF-Models of the Electrical Power Distribution Grid. Proceedings of the 1998 International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Tokyo (March 1998) 105-114.
7. Karl, M.: Möglichkeiten der Nachrichtenübertragung über elektrische Energiverteilnetze auf Grundlage europäischer Normen. Fortschrittsberichte VDI, Reihe 10, Nr. 500, VDI-Verlag, Düsseldorf 1997
8. Lampe, L. H., Huber, J. B.: Bandwidth efficient power line communications based on OFDM. To be published AEÜ Vol. 54/Heft 1, Feb. 2000.
9. Noll, Michael A.: «Technological Challenges of Powerline Telecommunication», 2002.
10. Petrus A. J. V. Rensburg and H. C. Ferreira, «Coupling Circuitry: Understanding the Functions of Different Components,» Proc. of 7<sup>th</sup> ISPLC-2003, Kyoto, Japan, pp. 204-209, March 26-28, 2003.
11. Petrus A. J. V. Rensburg and H. C. Ferreira, «Practical Aspects of Component Selection and Circuit Layout for Modem and Coupling Circuitry,» Proc. of 7<sup>th</sup> ISPLC-2003, Kyoto, Japan, pp. 197-203, March 26-28, 2003.
12. Philipps, H.: Performance Measurements of Powerline Channels at High Frequencies. Proceedings of the International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Tokyo, Japan 1998, pp. 229-237.
13. Rickard, James. A Pragmatic Approach to Setting Limits to Radiation from Powerline Communications Systems. Third International Symposium on Powerline Communications, Lancaster University, 30 March 1999.
14. Steinbuch K.; Rupprecht W.: Nachrichtentechnik. Springer-Verlag, 3. Auflage, Berlin 1982
15. Threin G.: Datenübertragung über Niederspannungsnetze mit Bandspreizverfahren. Forthshritt-Berichte VDI, Reihe 10, Nr. 156, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
16. Waldeck T., Zimmerman M., Dostert K.: Konzepte für Powerline-Kommunikationssysteme. Funkschau, No.14, 1998, pp. 40-43.
17. Walter Hagmann, «Installation and Net Conditioning Manual for Powerline Infrastructure Units,» Ascom Powerline, pp. 8-13, 2000.

18. Zimmerman M., Dostert K.: Sprache über die Stromleitung. Funkschau, No.4, 1998, pp. 22-27.
19. Zimmerman M., Dostert K.: A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. Proceedings of the International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Tokyo, Japan 1998, pp. 229-237.
20. Zimmerman M., Dostert K.: A Multi-Path Signal Propagation Model for the Power Line Channel in the High Frequency Range. Proceedings of the International Symposium on Power Line Communications and its Applications, Lancaster, United Kingdom 1999, pp. 45-51.
21. "Primjena PLC-a u uvjetima dereguliranog tržišta električne energije", Suzana Javornik Vončina, Tina Jakaša, CIGRE Cavtat 2003
22. AMR Deployments worldwide, Metering International, 3/2001
23. AMR Growth Continued in 2002, But 2003 is Not So Clear By Howard Scott, Cognyst Consulting
24. Ron Chebra: "AMR Communications – RF the winner", RAMAR Automatic Meter Reading, Winter 2002
25. About 17 % of Meters in North America Read Remotely, Says New Chartwell AMR Report, Transmission & Distribution, Oct 15, 2003
26. [www.chartwellinc.com/AMRBusinessCases.html](http://www.chartwellinc.com/AMRBusinessCases.html)
27. One-third of Utilities interested in broadband over power lines, report says, Electric Light / Power Utility Automation, March 23, 2004
28. One-third of Utilities Looking to Use AMR to Cut Costs of Handling Transient Customers, Chartwell Study Finds, Transmission & Distribution, Dec 17, 2002
29. Warren B. Causey: "AMR on a roll", Enerweb Strat Cha, 3 May 2003
30. 2003 AMRA Trials & Installations Report: A Snapshot of Ongoing Projects From the Utility's Perspective
31. Hunt Technologies, Inc., News Release: "Hunt Technologies Reports Record Performance in 2003", January 12, 2004
32. Hunt Technologies, Inc., News Release: "Hunt Technologies' Two-Way Automatic Meter Reading System Gains Widespread Market Acceptance", February 9, 2004
33. Hunt Technologies Signs License Agreement with Itron to Expand its AMR Product Offering, [www.turtletech.com/Itron2.aspx](http://www.turtletech.com/Itron2.aspx)
34. Hunt Technologies, Inc., News Release: "Hancock-Wood Electric Cooperative Selects. Hunt Technologies' Two-way Automatic Meter Reading Solution for System-wide Use", April 12, 2004
35. Hunt Technologies, Inc., News Release: "Alger Delta Deploying Hunt Technologies' Two-way Automatic Meter Reading Solution", April 28, 2004
36. Performance spurs Habersham EMC's TS2 full deployment, Turtle News from Hunt Technologies, Spring 2004
37. AMRA News: "Territorywide AMR Yields Big Results for Minnesota Electric Cooperative", March/April 2001, Volume 14, Number 2
38. AMRA News, "Kentucky Utilities Reduces Site Visits and Saves Money With AMR
39. TWACS News: "Bangor Hydro Signs with DCSI for Full System Automatic Meter Reading and Other Functionality", April 14, 2004
40. TWACS News:"DCSI Signs Contract with Idaho Power Company for Phase I of Automatic Meter Reading Project, February 05, 2004

41. PPL Electric Utilities Awarded Automatic Meter Reading Project of the Year for 2003
42. The Chartwell AMR Report: "PPL to spend \$160 million to install powerline carrier system from DCSI, including \$112 million for equipment"; February 15, 2002, VOL.2, No.4
43. "Automatic Meter Reading: Pilot Project Offers Valuable lessons", Electricity Today Issue 5, 2003
44. Michael Andreolas: "Mega Load Management System Pays Dividends", Transmission & Distribution World, February 2004
45. Matt Faulconer: "AMR Proves its Value in Wake of Hurricane Isabel", Utility Automation & Engineering T & D, November/December 2003
46. Smart Meters for Smart Competition – A Consumer Perspective on FRC Policies, PARETO Associates Pty Ltd, May 2001
47. Vincenzo Cannatelli: "ENEL Telegestore Project IS ON TRACK", Metering International 1/2004
48. Tobias Ryberg: "Legislation triggers AMR boom in Sweden", Metering International 1/2003
49. Christer Lundgren "Vattenfall installs Automatic Meter Reading system", Metering International, 3/2003
50. Studija EIHP: "Strategija nabave i zamjene brojila električne energije"
51. Godišnje izvješće HEP-a za 2002. godinu.
52. [www.cinergy.com](http://www.cinergy.com)
53. [www.phoneplusmag.com](http://www.phoneplusmag.com)
54. "D41 White Paper AMR", Alberto Sendín Escalona, Rafael Saorín Adán, Dr. Jens Hartmann, Juan A. Garrigosa, OPERA. IST Integrated Project No 507667. Funded by EC, 15-dec-2004.
55. Vincenzo Cannatelli: "ENEL Telegestore Project IS ON TRACK", Metering International 1/2004
56. "The Italian leading edge, Telegestore Project", prezentacija, Marketforce, London, 14.03.2005.
57. PALAS – Powerline as an Alternative Local AccesS, IST-1999-11379, Deliverables D5: "State of the Art and Initial Analysis of PLC Services", Ottosson, H., Akkermans, H.
58. CENELEC EN 50065-1:1991 "Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148,5 kHz – Part 1: General requirements, frequency bands and electromagnetic disturbances"
59. "Automatic Meter Reading", Tom D. Tamarkin, Public Power, Volume 50, Number 5, October 1992
60. "AMR is becoming an International Technology", Dr Howard Scott, Metering International, 2002 Issue 2 "World's Largest Metering Project", R. Eaton, Metering
61. "Modulatonsarten für die Powerline-Kommunikation", prezentacija, Klaus Dostert
62. Waldeck, T.: Einzel-und Mehrträgerverfahren für die störresistente Kommunikation auf Energieverteilnetzen. Logos-Verlag, Berlin, Germany 2000.
63. Podszech, H. K.: Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung über Hochspannungsleitungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
64. Ferreira H., Grove H., Hooijen O., Vinck A.: »Powerline Communications: An Overview,» Africon 1996, Stellenbosch, pp. 556-563.

65. "World's Largest Metering Project", R. Eaton, Metering International, Issue 3 2001
66. CISPR/A (Secretariat) 67, Report 60 (7/1985): Methods of measurement of mains decoupling factors.
67. CISPR 16: Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measuring Methods, CISPR Publication 16, Geneva
68. Ožegović, M.; Ožegović, K.: "Električne energetske mreže I", udžbenici Sveučilišta u Splitu, Split 1996.
69. Proakis, J. G.: Digital Communications. McGraw-Hill, 1995.
70. Podszech, H. K.: Trägerfrequenz-Nachrichtenübertragung über Hochspannungsleitungen. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971.
71. "IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications", IEEE Standard 643-1980.
72. ANSI C93.1-1972, Requirements for Power Line Coupling Capacitors.
73. Smith report on project AY 3062 concerning a model to predict the radiation properties of certain line transmission system. The Smith Group Limited, UK.
74. IEEE Communications magazine, April 2004, Vol. 42 No.4 ([www.comsoc.org](http://www.comsoc.org))

Ads by Google

[Power Line Communications](#)

Article in CioReadit online.FreeNodeTrial!

[www.KeepMedia.com](http://www.KeepMedia.com)

[Power Transmission](#)

Main.net-Power Line Communications Inc

[www.powerline-plc.com](http://www.powerline-plc.com)

Voith sets world-wide standards as partner to essential industries

[www.voith.com](http://www.voith.com)

[Computer Networking](#)

Networking Guides & Equipment Fast Shipping – Compare Prices

[www.MonsterMarketplace.com](http://www.MonsterMarketplace.com)

[www.citi.columbia.edu/amnoll/](http://www.citi.columbia.edu/amnoll/)

[www.powerlineworld.com/powerlineintro.html](http://www.powerlineworld.com/powerlineintro.html)

[www.powerlinecommunications.net](http://www.powerlinecommunications.net)

#### **more about powerline communications:**

"The Use of Existing Electrical Powerlines for High Speed Communications to the Home", paper by Michael Prop

"Are You Ready for the Revolution?", Global Electricity Strategy, Morgan Stanley Dean Witter, April 12, 2001

"Who is Who" of US companies bodies actively involved in the development and market implementation of PLC Systems

Powerline Communications Home Networking Technology eLibrary

#### **online articles about PLC technology development:**

"Instant Home Computer Networks", New York Times, David Pogue, April 4, 2002

"Accessing the Net Through Outlets", David Stevenson, January 24, 2002

"Can Powerline Technology Save Broadband?", Tim McDonald, December 27, 2001

"Power Couple", Geoffrey Davies, September 17, 2001

"Birth of the plugged generation?", Emilie Martin, September 6, 2001

"Internet Access via Power Lines Reborn in Europe", Joris Evers, August 28, 2001

"Electrifying the Web", James Norman, August 8, 2001

"The Final Connection", Brett Kilbourne, July/August 2001

Broadband PLC tests carried out by Main.net Communications in Germany, Sweden, Finland, Poland, India

Technical Brochure WG D2.14

**DODATAK**

## **Premoštenje transformatora SIEMENS-ovo rješenje**

### **DCS3000**

PLC signal je signal srednjeg frekvencijskog dometa. Veliko prigušenje signala i postojeća valna ograničenja prijenosa podataka PLC sustavom na sekundarnoj strani distribucijskog transformatora omogućava frekvenciju prijenosa podataka.

Digitalni prijenos podataka široko razgranatim srednjenaponskim mrežama nije bio uspješan sve do devedesetih godina prošlog stoljeća, iako se prijenos podataka uporabom tehnologije frekvencijskih nosioca na visokonaponskim kabelima koristio od dvadesetih godina prošlog stoljeća. Glavni razlog tome bile su brze i složene vrste digitalnih modulacija koje su postale pouzdane uporabom današnjih brzih procesora signala.

Jedan od današnjih najpoznatijih sustava na polju distributivnog linijskog nosioca, DLC (distributed line carrier) je Siemensov distribuirani komunikacijski sustav, SIEMENS DCS3000 (Distributed Communication System), koji se koristi za prijenos podataka preko srednjenaponskih podzemnih i nadzemnih kabela. Primjenom te tehnologije može se ostvariti prijenos podataka izravno po oklopima podzemnih srednjenaponskih kabela. Modulirani digitalni signal narinut je na srednjenaponski kabel uporabom kapacitivnih ili induktivnih sprežnika.

Distributivni linijski sustav DCS3000 omogućuje automatizaciju srednjenaponske elektroenergetske mreže koja donosi niz pogodnosti operatorima i korisnicima. Čak što više, DCS3000 omogućuje povećanje učinkovitosti, bez većih dodatnih ulaganja, uporabom elektroenergetske mreže. Bez obzira na srednjenaponsku mrežnu arhitekturu Siemens nudi opciju prijenosa podataka iz jedinice udaljene stanice, RTU (Remote Station Unit) ili brojila u kontrolni centar (slika 1). DCS3000 temelji se na dva osnovna elementa. To su:

- osnovna jedinica BU (basic unit)
- sprežna oprema (coupling devices)



*Osnovna jedinica (BU)*

Osnovna jedinica kao prijenosni medij koristi srednjenaponske vodove i žične komunikacijske vodove u frekvencijskom pojasu od 9 do 148.5 kHz. Osigurava prijenosne brzine 4.8, 9.6, 19.2, 28.8 kbit/s, pri čemu koristi pojasnu širinu od 4 do 24 kHz ovisno o prijenosnoj brzini. Topologija mreže može biti linijska (sabirnička), u obliku stabla, prstena ili njihova kombinacija. Koriste se sučelja: RS 232, IEC 870-5-101, DNP 3.0 (nivo 2) i IEC 61 107 (brojila).

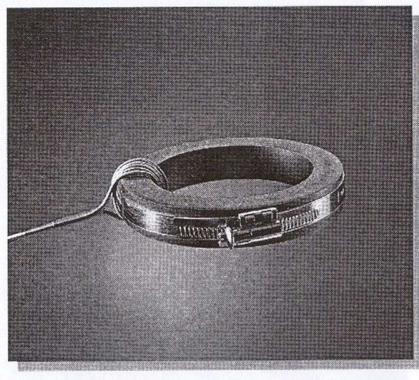
*Slika 1.*

## **UNUTARNJE I VANJSKO SPREZANJE**

Unutarnje i vanjsko sprezanje može biti:

- sprezanje s induktivnom opremom, CDI (Coupling Devices Inductive)
- sprezanje s kapacitivnom opremom, CDC (Coupling Devices Capacitive)

### ***CDI oprema***



*Slika 2.*

DI opremu čini feritni prsten s procjepom (split ferrite ring) promjera 100 mm opremljen spojnicom (slika 2). Prijenosni medij je kabel (primjerice XLPE) s oklopom od izolacijskog materijala. Transmisijsku stazu čine oklop kabela i zemlja. Srednjenačinski vod se ne koristi za komunikaciju. Električna izolacija od srednjenačinskog voda ostvaruje se pomoću transformatora. Dužina transmisijske staze može iznositi do 5 km

### ***CDC oprema***

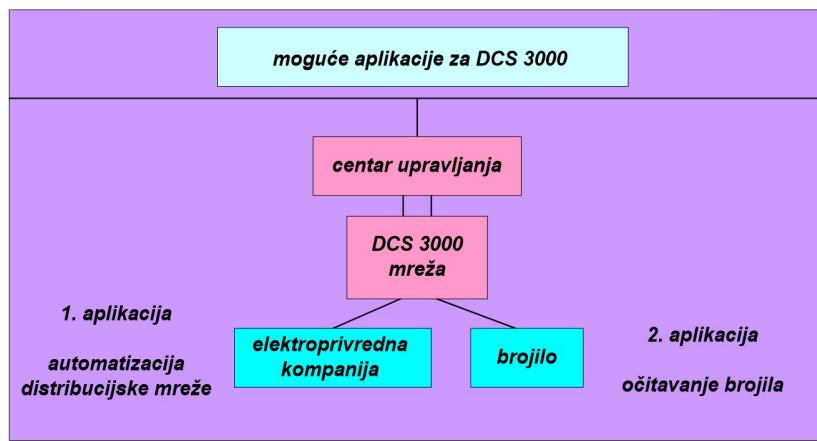


*Slika 3.*

CDC opremu čini serijski spoj osigurača, kondenzatora i zavojnice za pražnjenje (slika 3). Prijenosni medij je kabel s uzemljjenim oklopom (primjerice NAKBA) i nadzemni vod. Treba napomenuti da kvaliteta komunikacija ne ovisi o vrsti kabela. Transmisijsku stazu čine kabelski vodič i zemlja. Sprežna oprema ima značajke visokopropusnog filtera koji propušta prijenosne frekvencije, a blokira linijsku frekvenciju (50 Hz). Najveće područje djelovanja (domet) za kabel iznosi do 5 km, a za nadzemni vod do 15 km (ovisno o vrsti voda). Sigurnosni krug jamči odvajanje CDC opreme od srednjenačanske mreže bez reakcije.

Siemens nudi dvije osnovne aplikacije za DSC3000:

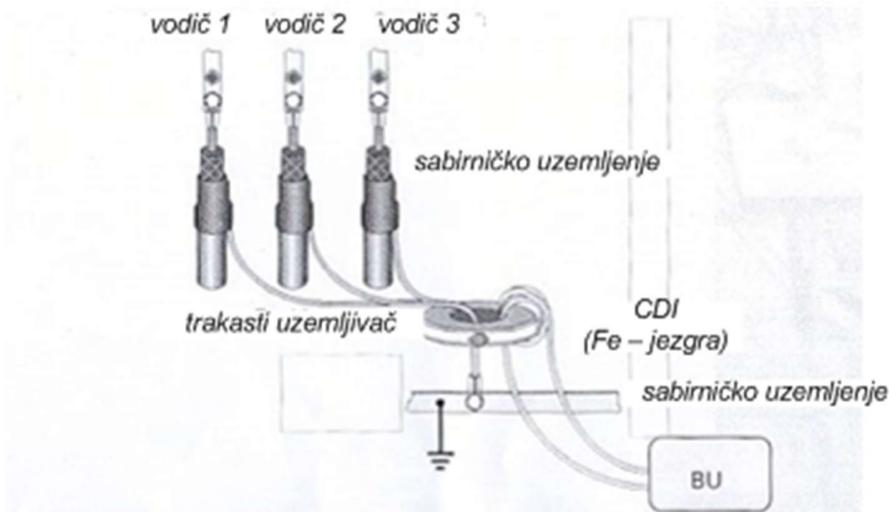
- automatizacija srednjenačanske mreže
- očitavanje brojila



Slika 4.

Brojne pogodnosti su kombinirane u pojedinačnom sustavu sa DCS3000: različite izvedbe (npr. očitavanje brojila), optimalno vođenje postojećih izvora, poboljšanje kvalitete kopmletne mreže, smanjivanje stvarnih troškova. Odluke o izvedbama donose se s financijskih aspekata. DCS3000 pogodan je dugoročno gledano. Neznatno veća početna investicija u opremi (u usporedbi s niskim troškovima GSM modema) kompenzirana je minimalnim troškovima održavanja. Prednosti DCS3000 u korištenju vlastite mreže, očituju se kroz veliku prilagodljivost, kratko vrijeme odgovora, potpunu neovisnost o konstrukcijama u okruženju, o radio-okruženju, ili o mrežnim distributerima (unutarnji ili vanjski).

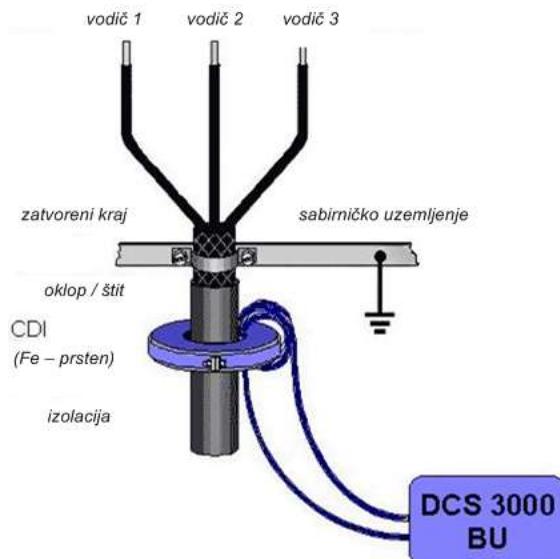
*CENTAR UPRAVLJANJA* kontrolira tok informacija u oba smjera, prema kontrolnom centru, ili prema udaljenoj stanici, te prema mjerjenjima glavne funkcije od početka voda prema kraju. Ima ulogu kontroliranja i nadgledanja cijelog voda.



Slika 5. Sprežnik transformatora zatvoren preko trakastog uzemljenja SN kabela

Prijenos informacija u SN sustavu uvijek je podložan smetnjama. Taj problem je DCS3000 riješio posebnim OFDM prijenosnim sustavom. Paralelnim spajanjem vodiča prijenos je siguran bez obzira na smetnje. Dodatna korekcija greške (FEC, forward error correction) eliminira svaki bit s pogreškom koji je možda prisutan.

Postojeći mrežni sustav SN mreže nominalnog napona 6kV – 24kV koristi se kao prijenosno sredstvo. Zahtjevi variraju ovisno o opremi i vrsti distribucijske mreže (podzemni ili nadzemni vodovi). Potrebno je voditi računa o tehničkim uvjetima i troškovima. Siemens nudi dva načina: induktivne ili kapacitivne spojne elemente ovisno o vrsti distribucijske mreže. To su: kondenzatorski elementi (CDC) za zemno-osjetljive ukopane i nadzemne vodove kod kojih komunikacijski pristup uključuje vodljivi kabel i tlo, te jednostavno sparivanje induktiviteta (CDI) za kabele neosjetljive prema zemlji kod kojih komunikacijski pristup uključuje izolirani kabel i tlo.



Slika 6.

Ovisno o rasponu napona bez obzira hoće li sustav biti korišten u zatvorenom ili otvorenom, Siemens predlaže točno "skrojenu" kapacitivnu komunikacijsku soluciju.

<i>Naziv proizvoda</i>	<i>Naponski nivo</i>
Unutra CDC 6	iznad 6 kV
CDC 12	iznad 12 kV
unutra CDC 6	iznad 6 kV
CDC 12	iznad 12 kV

CDI može se montirati kroz cijeli vod. U slučaju pojedinačnih kabela, svako uzemljenje prolazi kroz CDI. CDC može se montirati uz uzemljenje prekidača ili pri vrhu sabirničke ručice. Sklop treba biti usaglašen sa regionalnim standardima

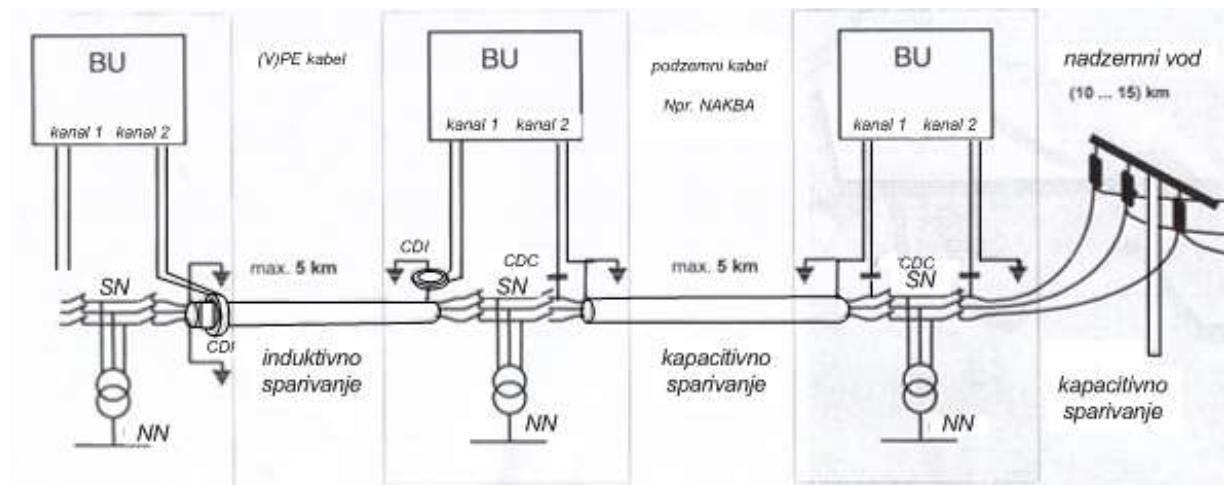
Siemens je jedan od vodećih svjetskih opskrbljivača digitalnih komunikacijskih mreža. Nudi provjerena rješenja za komunikacijsku infrastrukturu. Svaki porast potražnje na tržištu prati se

brzim i fleksibilnim odgovorom korisnicima. Mrežni operatori koji žele održati ili povećati svoju konkurentnost poboljšavaju mrežnu infrastrukturu i u isto vrijeme smanjuju troškove održavanja mreže. Vodeći se tim, proizvođači razvijaju svjetski priznate proizvode za PDH i SDH mreže. U stanju je podržati svoje korisnike (kupce) u bilo kojem trenutku, na bilo kojem mjestu. Ponuđena usluga sadrži:

- mrežno savjetovanje (pomoć korisniku u fazi dizajniranja i planiranja buduće mreže)
- inženjerstvo (nakon odabira određene ponude fokusiraju se na fino podešavanje detalja zajedno s korisnikom, tako da se ostvari obostrano zadovoljstvo i suradnja)
- opskrba (ovisno o odabiru korisnika, opskrbljuju ga svojim proizvodima, ili bilo kojeg proizvođača opreme)
- integracija u postojeću mrežu (proizvođači imaju sredstva i opremu koja uključuje proširenje postojeće korisnikove komunikacijske mreže)
- instalacija (na zahtjev ovlašteni inžinjeri montiraju naručenu opremu)
- vježbanje (korisnici se educiraju o korištenju opreme u skladu s njihovim predznanjem)
- usluge nakon prodaje (bilo koja podrška nakon kupnje opreme izvodi se ovlaštenim timovima)

### **PRIJENOS ELEKTROENERGETSKIM VODOM**

Fleksibilna mrežna konstrukcija, po cijeni povoljna opcija i progresivna pretvorba analogne komunikacijske mreže u digitalnu, zahtijeva sve kraće inovacijske krugove u PLC tehnologiji. Moderni PLC sustavi ne uzimaju u obzir samo specifičnosti visokonaponskog voda, već garantiraju da će prvo i osnovno biti ekonomski i tehnički korisni u današnjoj analognoj i budućoj digitalnoj tehnologiji.



Slika 7. Načini sprezanja na srednjenačinsku mrežu