

Jedan model simulatora impulsnih smetnji nastalih delovanjem rasklopnih elemenata u elektroenergetskom sistemu

Jovanka J. Gajica i Ljiljana D. Milić, *Senior Member, IEEE*

Sadržaj — Impulsne smetnje koje nastaju na dalekovodu usled delovanja prekidača i uključivanja i isključivanja rastavljača u elektroenergetskoj mreži značajno utiču na raspoloživost digitalnih VF veza koje se realizuju po vodovima visokog napona. U praksi se uglavnom raspoložuje veoma malim brojem autentičnih zapisa ovih smetnji koji bi se mogli koristiti u razvoju i istraživanju. U ovome radu prikazan je model za realizaciju simulatora impulsnih smetnji na računaru korišćenjem kratkotrajnog snimljenog uzorka dobijenog merenjem impulsne smetnje u tački priključka TK opreme na koaksijalni kabl. Simulator formira sekvencu koja se sastoji od pozadinskog šuma niskog intenziteta i serije kratkotrajnih slučajnih impulsnih smetnji čija su međusobna vremenska rastojanja slučajnog trajanja. Za selekciju pojedinih TK kanala, na izlazu simulatora postavljen je programabilni digitalni filter sa promenljivom centralnom frekvencijom i/ili širinom propusnog opsega.

Gljučne reči — digitalne VF veze, impulsni šum, modelovanje, prenos informacija po vodovima visokog napona, simulacija.

I. UVOD

DIGITALNE VF veze za prenos informacija po vodovima visokog napona zamenjuju dosadašnje analogne VF veze na kojima se decenijama zasnivao prenos informacija u elektroenergetskim mrežama. Razvoj savremenih telekomunikacionih tehnologija promenio je ne samo tehnologiju VF uređaja već i sam koncept njihove primene u sistemu prenosa informacija elektroenergetskih kompanija. Duž magistralnih dalekovoda polažu se optički kablovi velikih kapaciteta pa se digitalne VF veze primenjuju kao komplementarni sistemi prenosa [1]–[5]. Uloga VF veza u savremenom sistemu elektroprivrede pretežno se sagledava u sledećem:

- Povezivanje udaljenih elektroenergetskih objekata na čvorove mreže prenosa realizovane optičkim sistemima prenosa.
- Povezivanje ruralnih i teško pristupačnih područja na čvorove mreže prenosa realizovane optičkim sistemima prenosa.

Istraživanja prikazana u ovome radu finansirana su od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, projekat TR-11002.

J. J. Gajica, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija (telefon: 381-11-2775250; e-mail: gajica@kondor.imp.bg.ac.rs).

Lj. D. Milić, Institut Mihajlo Pupin, Volgina 15, 11060 Beograd, Srbija; Elektrotehnički fakultet u Beogradu, e-mail: milic@kondor.imp.bg.ac.rs.

- Realizacija rezervnih spojnih puteva za kritične servise.
- Prenos signala zaštite elektroenergetskog sistema.

S obzirom na postojanje optičkih sistema prenosa, primena VF veza se uglavnom sagledava u nižim hijerarhijskim ravnima telekomunikacionog sistema. Od savremenih digitalnih VF veze se zahteva da obezbede mnogostruko veće protoke nego njihovi analogni prethodnici da bi bile kompatibilne sa kanalima velikog kapaciteta realizovanim po optičkim vlaknima. Pri tome treba imati na umu da je savremenim VF vezama omogućen znatno širi frekventijski opseg nego što je to bio slučaj prethodnih decenija kada se informacioni sistem elektroprivrede zasnivao pretežno na VF vezama.

VF kanal koji se realizuje po vodu visokog napona izložen je specifičnim smetnjama visokog intenziteta koje potiču od visokog napona na dalekovodnoj liniji i od interferencija iz spoljnih izvora [1]–[9]. Šumovi koji potiču od visokog napona mogu se podeliti u dve kategorije:

1. Šumovi u normalnim uslovima rada u koje spadaju:
 - šum korone,
 - parcijalno pražnjenje na izolatorima i elektroenergetskoj opremi u trafostanicama
2. Šum koji potiče od rada rasklopnih elemenata elektroenergetskog sistema (prekidači, rastavljači), i kvarovi na dalekovodu.

Šum korone je stalno prisutan u VF kanalu a njegova veličina varira unutar jedne periode industrijske frekvencije [1]–[4], [6]–[8]. Ponašanje šuma korone se ne menja bitno u dužem vremenskom periodu. Pojava korone i njen uticaj na prenos informacija po vodovima visokog napona detaljno su proučavane, a za potrebe razvojnih istraživanja realizovani su simulatori za rad u laboratorijskim uslovima [6]–[8].

Šumovi koji potiču od rada rasklopnih elemenata elektroenergetskog sistema i od atmosferskih pražnjenja imaju visoke amplitude i uglavnom su relativno kratkog trajanja: od nekoliko mikrosekundi do nekoliko sekundi [1]–[4]. Šumovi koji nastaju usled delovanja rasklopnih elemenata u dalekovodnoj mreži prouzrokuju gubitak sinhronizacije i pakete grešaka u kanalu realizovanom digitalnom VF vezom po vodu visokog napona.

Spektralni sastav signala impulsnih smetnji, generalno je širokopoljanski, pri čemu koncentracija snage može biti i u visokofrekventijskom i u niskofrekventijskom području

[1]–[4]. Niskofrekventne pojave (frekvencije 50Hz i harmonici do reda kHz) potiču uglavnom od kratkih spojeva. Visokofrekventne pojave (frekvencije reda MHz) potiču uglavnom od komutacija rasklopnih elemenata elektroenergetskog sistema. Za prenos signala podataka značajne su visokofrekventne impulsne smetnje koje mogu da interferiraju sa telekomunikacionim signalima podataka i ometaju njihov prenos.

U ovom radu će biti prikazan simulator koji omogućava analizu visokofrekventnih impulsnih smetnji na računaru opšte namene, i to impulsnih smetnji prouzrokovanih radom rasklopnih elemenata elektroenergetske mreže koji, po intenzitetu, trajanju i strukturi predstavljaju najveću opasnost za kontinuirani prenos po digitalnim VF vezama.

U trenutku nastanka i trajanja, impulsne smetnje po amplitudi daleko nadmašuju sve ostale tipove smetnji pa se stoga u ovome radu koncentrišemo isključivo na probleme simulacije impulsnih smetnji.

Rad je podeljen u pet sekcija. U sekciji II, koja sledi posle uvoda, prikazan je model simulatora impulsnih smetnji koji je razvijen tokom ovih istraživanja. U sekciji III prikazan je programabilni digitalni filter koji služi za selekciju telekomunikacionog VF kanala koji se analizira. U sekciji IV dati su eksperimentalni rezultati koji ilustruju primenu opisanog modela simulatora. Sekcija V je zaključak.

II. MODEL SIMULATORA IMPULSNIH SMETNJI

Autentični mereni podaci impulsnih smetnji koje mogu dospeti na ulaz telekomunikacione opreme su teško dostupni u praksi. Ova merenja se obavljaju retko i uglavnom se zbog specifičnosti merne opreme raspolaže malim brojem kratkotrajnih uzoraka čije je trajanje do nekoliko milisekundi [1], [9]–[11]. Poznato je da rad rasklopnih elemenata može proizvesti impulsne smetnje trajanja do nekoliko sekundi pa se postavlja problem generisanja tako dugačkih signala impulsnih smetnji za potrebe razvoja i istraživanja.

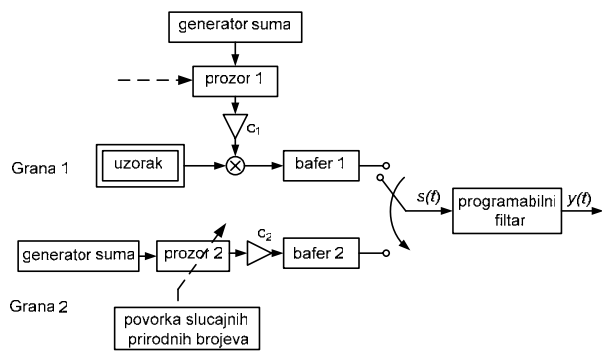
Simulator koji se prikazuje u ovome radu koristi sledeće osobine signala impulsnih smetnji:

- Signal impulsne smetnje se najčešće pojavljuje kao povorka slučajnih kratkotrajnih signala šuma velikog intenziteta.
- Rastojanje između ovih signala u povorki je slučajno.
- Spektar signala impulsne smetnje prekriva frekvencijsko područje u kome se koriste VF veze po dalekovodu: 40kHz – 1MHz.

Model realizovanog simulatora zasnovan je na digitalnoj obradi signala. Za frekvenciju odabiranja uzima se $f_s = 2$ MHz u cilju pokrivanja frekvencijskog opsega koji se koristi za VF veze, i istovremeno omogućava dovoljnu preciznost u realizaciji programabilnih digitalnih filtera propusnika opsega širine 4, 8, 16, 32 i 64 kHz.

Skica blok šeme simulatora prikazana je na Sl. 1. Simulator formiraju dve osnovne grane: grana 1 koja generiše povorku kratkotrajnih signala smetnji, i grana 2 koja generiše pozadinski šum i reguliše rastojanje između kratkotrajnih signala smetnji. U grani 1 osnovni element

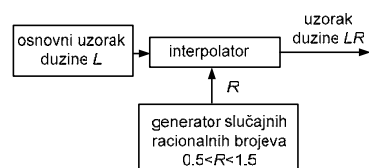
je blok «uzorak» koji sadrži sekvencu dužine L koja predstavlja snimljeni osnovni uzorak signala smetnji. Blok «prozor 1» je pravougaoni prozor dužine L (dužina jednaka dužini uzorka). Namena «prozora 1» je da izdvoji sekvencu dužine L iz generatora šuma. Posle množenja rezultat (sekvenca dužine L) se smešta u «bafer 1». U grani 2 se nalazi pravougaoni «prozor 2» čija se dužina N uzima iz skupa slučajnih prirodnih brojeva. Pomoću «prozora 2» izdvajaju se sekvence pozadinskog šuma dužine N . Tako formirana sekvenca se smešta u «bafer 2». Na izlazu komutator naizmenično uzima sadržinu «bafera 1» i «bafera 2» i formira povorku slučajno raspoređenih impulsnih smetnji $s(t)$. Ukupno trajanje signala $s(t)$ određeno je izborom dužine generatora šuma. Programabilni filter propusnik opsega kod koga su centralna frekvencija i širina propusnog opsega programabilne veličine izdvaja signal koji odgovara željenom VF kanalu. Signal $y(t)$ predstavlja simulaciju impulsne smetnje u okviru jednog telekomunikacionog kanala.



Sl.1 Blok šema simulatora impulsnih smetnji.

Simulator, kao što će biti pokazano u sekciji IV, na bazi odabranog autentičnog uzorka generiše povorku impulsnih smetnji čije su amplitude i međusobna rastojanja slučajne veličine. Generatori šuma u svakoj realizaciji generišu različite sekvence čime se praktično eliminiše ponavljanje rezultata u eksperimentima.

Pored navedenih funkcija, simulator može menjati dužinu trajanja uzorka i to ekstenzijom ili kompresijom datog osnovnog uzorka. Naime, u blok «uzorak» na Sl.2 može se implementirati funkcija interpolatora sa racionalnim faktorom R , gde je R slučajna vrednost iz skupa racionalnih brojeva iz opsega $[0.5, 1.5]$. Ako je dužina sekvence osnovnog uzorka L odbiraka, dužina sekvence interpoliranog uzorka iznosi LR . Praktična realizacija se ostvaruje zamenom bloka «uzorak» sa Sl. 1 sa strukturom prikazanom na Sl. 2.



Sl.2 Formiranje uzorka signala smetnje sa promenljivom dužinom sekvence.

III. PROGRAMABILNI DIGITALNI FILTAR PROPUSNIK OPSEGA

Digitalni filtar prikazan na Sl.1 je propusnik opsega čija je namena da iz spektra signala impulsne smetnje izdvoji deo spektra koji odgovara izabranom telekomunikacionom kanalu. Za primenu u simulatoru odabran je digitalni filtar kod koga se direktno mogu podešavati centralna frekvencija i širina propusnog opsega [12], [13].

Struktura digitalnog filtra se zasniva na prototip filtru propusniku niskih frekvencija koji je konačnog impulsnog odziva (FIR) i sekcijama filtera propusnika svih frekvencija. Dakle, polazi se od funkcije prenosa prototip FIR filtra $H_{FIR}(z)$

$$H_{FIR}(z) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k z^{-k}$$

a zatim se uvodi zamena

$$z^{-1} \Rightarrow \frac{\alpha_1 - g(1 + \alpha_1)z^{-1} + z^{-2}}{1 - g(1 + \alpha_1)z^{-1} + \alpha_1 z^{-2}}$$

što daje funkciju prenosa $H(z)$ u obliku

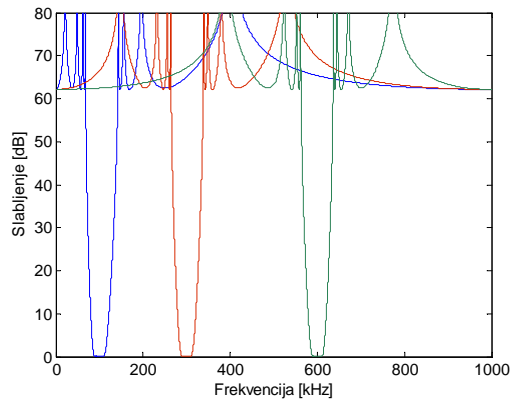
$$H(z) = \sum_{k=0}^{N-1} a_k \left(\frac{\alpha_1 - g(1 + \alpha_1)z^{-1} + z^{-2}}{1 - g(1 + \alpha_1)z^{-1} + \alpha_1 z^{-2}} \right)^k$$

Odgovarajućim izborom parametara α_1 i g podešavamo širinu propusnog opsega i centralnu frekvenciju filtra. Parametri α_1 i g se direktno izračunavaju na osnovu širine propusnog opsega Δf koja se definiše na 3 dB, donje granične frekvencije propusnog opsega f_l i frekvencije odabiranja f_s :

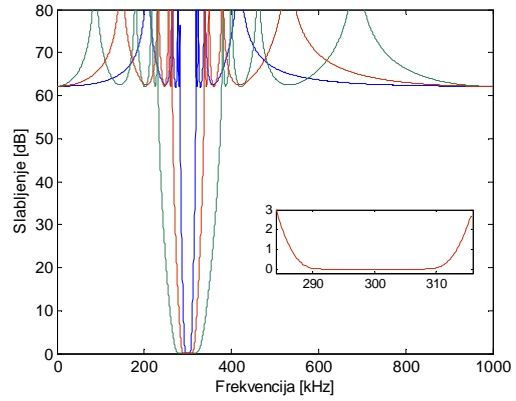
$$\alpha_1 = \frac{1 - \tan(\pi \Delta f / f_s)}{1 + \tan(\pi \Delta f / f_s)}$$

$$g = \frac{\cos(2\pi f_l + \pi \Delta f / f_s)}{\cos(\pi \Delta f / f_s)}$$

Kod ovako realizovanog filtra propusnika opsega slabljenje u nepropusnom opsegu je identično sa slabljenjem prototip FIR filtra, a širina propusnog opsega i centralna frekvencija su varijabilne veličine koje se lako programiraju. Slike 3 i 4 ilustruju karakteristike propusnika opsega koji se zasniva na prototip filtru minimalne faze 15-tog reda. Sl. 3 ilustruje promenu centralne frekvencije f_c , a Sl. 4 promenu širine propusnog opsega Δf .



Sl.3 Filtar propusnik opsega: $\Delta f=32$ kHz, $f_c=100, 300$ i 600 kHz.

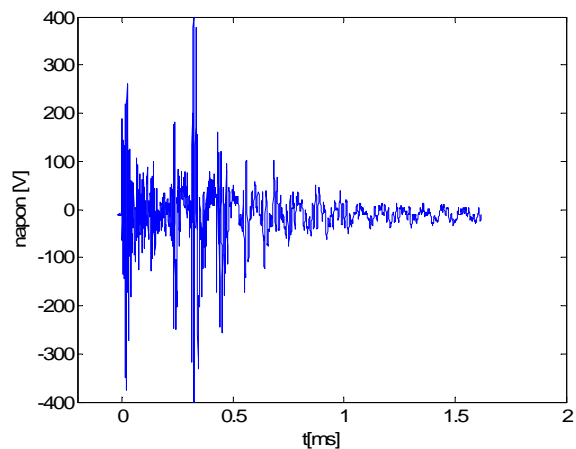


Sl.4 Filtar propusnik opsega: $\Delta f=16, 32$ i 64 kHz, $f_c=300$ kHz.

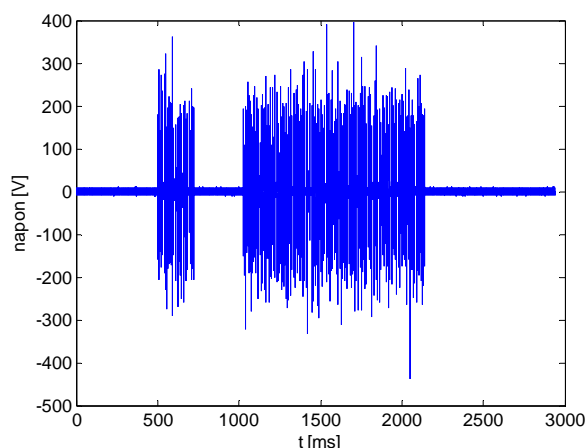
IV. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovoj sekciji biće prikazani eksperimentalni rezultati simulacije impulsnih smetnji. Kao osnovni uzorak u simulatoru sa Sl. 1 korišćen je jedan od autentičnih signala dobijen merenjima impulsnih smetnji prilikom remonta HE Perućica [10], [11]. Odabrani osnovni uzorak trajanja 1.6 ms prikazan je na Sl. 5.

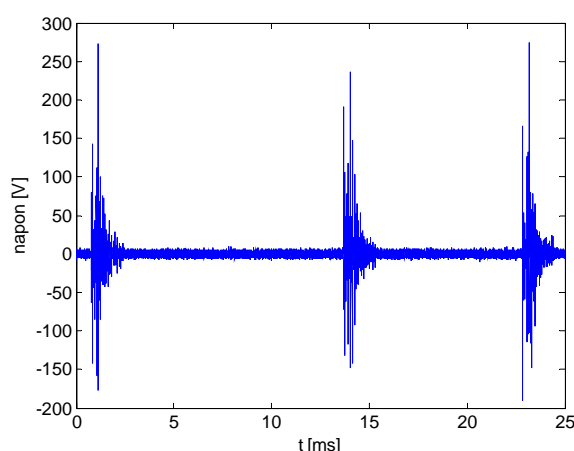
Slike 6, 7 i 8 ilustruju rezultate dobijene primenom simulatora sa Sl. 1 i osnovnog uzorka sa Sl. 5. Na Sl. 6 je prikazana jedna realizacija simulacije signala impulsnih smetnji, tj. signala označenog sa $s(t)$ na Sl.1. Prikazani signal $s(t)$ je ukupnog trajanja od blizu 3 sekunde a sastoji se od vremenski slučajno raspoređene povorke signala sa Sl.5 čije su amplitude modifikovane množenjem sa slučajnom sekvencom kao što je predstavljeno na Sl.1, grana 1. Radi ispitivanja uticaja impulsnih smetnji na jedan telekomunikacioni kanal, rezultujući signal $s(t)$ je propušten kroz programabilni filtar propusnik opsega koji je prikazan u sekciji III. U eksperimentu su odabrani sledeći parametri filtra: centralna frekvencija $f_c=300$ kHz, i propusni opseg $\Delta f=32$ kHz. Sl. 7 prikazuje segment signala $y(t)$ sa izlaza filtra u trajanju od 25 ms. Vremensko frekvencijska analiza ilustrovana je na Sl. 8 na primeru segmenta filtriranog signala koji je dat na Sl.7.



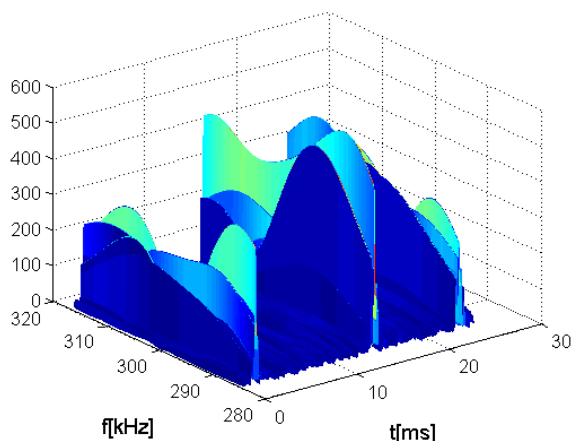
Sl.5 Osnovni uzorak signala impulsnih smetnji.



Sl. 6 Signal impulsnih smetnji $s(t)$ generisan pomoću simulatora: frekvencija odabiranja $f_s=2$ MHz.



Sl. 7 Segment signala impulsnih smetnji $y(t)$ dobijen na izlazu programabilnog filtra za $f_c=300$ kHz i $\Delta f=32$ kHz.



Sl. 8 Spektar segmenta signala impulsnih smetnji dobijen na izlazu programabilnog filtra za $f_c=300$ kHz i $\Delta f=32$ kHz.

V. ZAKLJUČAK

U ovome radu je prikazana jedna mogućnost za realizaciju simulatora impulsnih smetnji visokog intenziteta koje nastaju usled delovanja rasklopnih elemenata u elektroenergetskoj mreži. Simulator je namenjen razvojnim istraživanjima sa ciljem da u laboratorijskim uslovima omogući testiranje uticaja impulsnih smetnji na digitalne VF veze po dalekovodima.

LITERATURA

- [1] J. Gajica, "Tehnika prenosa signala po vodovima visokog napona digitalnim VF vezama," Akademski Misao i Institut M. Pupin, 2007.
- [2] "Report on Digital Power Line Carrier", CIGRE WG 35.09, August 2000. pp. 20.
- [3] "Guide on Power Line Carrier" CIGRE, 1979. pp. 99.
- [4] "IEEE Guide for Power-Line Carrier Applications", IEEE Std 643™ – 2004 (Revision of IEEE Std 643-1980), pp.33.
- [5] R. Iibuchi, H. Kaneko, S. Fukagawa, M. Matsumoto, S. Suzuki, K. Seino, "Construction of IP network in rural areas," CIGRE, Study Committee D2: Information Systems and Telecommunication, 2009 Colloquium, Oct. 21-22, 2009, Fukuoka, Japan
- [6] N. Suljanović, A. Mujčić, M. Zajc, and J.F. Tasič, "High-frequency characteristics of high-voltage power line," *Proc. IEEE Region 8 EUROCON 2003*, Sept. 2003, Ljubljana, Slovenia, pp. 310-314.
- [7] A. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc, and J.F. Tasič, "Power line noise model appropriate for investigation of channel coding methods," *Proc. IEEE Region 8 EUROCON 2003*, Sept. 2003, Ljubljana, Slovenia, pp. 209-303.
- [8] N. Suljanović, A. Mujčić, M. Zajc, and J.F. Tasič, "Computation of high-frequency and time characteristics of corona noise on HV power line," *IEEE Trans. On Power delivery*, Vol. 20, No1, Jan. 2005, pp. 71-79.
- [9] J. Gajica, Lj. Milić, "Analiza uticaja impulsnog šuma na telekomunikacioni kanal realizovan VF vezom po dalekovodu," *Zbornik radova TELFOR 2006*, Beograd, nov. 2006, str. 305- 308.
- [10] R. Naumov, P. Vukelja, J. Mrvić, D. Hrvić, N. Jablan, D. Čizmović, M. Perišić: "Tranzijentni naponi u niskonaponskim kolima HE "Perućica" pri operacijama sklopnih aparata 220 kV i 110kV", 25. *Savetovanje JUKO CIGRE*, Herceg Novi, 16-20 septembar 2001. R 36-03.
- [11] P. Vukelja, R. Naumov, J. Mrvić, D. Hrvić: "Istraživanje tranzijentnih napona u niskonaponskim kolima HE "Perućica", Izveštaj br. 310001, Institut "Nikola Tesla" 2000.
- [12] M. Nikolić, "Projektovanje programabilnih IIR digitalnih filtera propusnika/nepropusnika opsega, *Zbornik radova TELFOR 2004*, Beograd, nov. 2004., *Studentski rad, mentor L.Milić*.
- [13] Lj. Milić, S. Damjanović, and M. Nikolić, "Frequency transformations of IIR filters with filter bank applications," *IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems APCCAS 2006*, pp. 1053-1056, Singapore, December 2006.

ABSTRACT

This paper presents a computer model for simulating the impulse noise produced by the operation of circuit breakers and isolator switches in electric power systems. The simulator utilizes a recorded sample of the impulse noise as a kernel sequence. The kernel sequence is measured and recorded at the point of connection of the telecommunication equipment to the coaxial cable. The simulator produces the sequence composed of the low-level background noise, and of the train of short-time high-level noise impulses of random amplitudes which are evenly distributed in time. At the output, the simulator is supplied with the bandpass digital filter with programmable bandwidth and programmable central frequency. The purpose of the filter is to simulate the impulse noise over the bandwidth of the desired telecommunication channel.

A COMPUTER MODEL OF THE IMPULSE NOISE PRODUCED BY OPERATION OF BREAKERS AND SWITCHES IN POWER ELECTRIC SYSTEM

Jovanka J. Gajica, Ljiljana D. Milić