

Pregled doktorata u kojima je istraživana stohastička merna metoda

Dragan Pejić, Vladimir Vujičić

Apstrakt— U radu je prikazan razvoj ideja vezanih za stohastičku adiciju analogno-digitalnu konverziju. Pregled je dat kroz prizmu doprinosa 18 doktorskih radova, počev od 1996. kada je odbranjen prvi doktorat na ovu temu. Neki radovi su u većoj meri bili teorijskog značaja, drugi su imali značajniju praktičnu težinu, ali su svi dali doprinos u razvoju i primeni stohastičke konverzije u poslednjih četvrt veka.

Ključne reči—Stohastički pristup; adaptivnost; merenja; diter.

I. UVOD

Za početak primene stohastičkih principa, prvenstveno u takozvanom stohastičkom računanju, se navode [1] iz 1956. i [2] iz 1967. godine. U ova dva rada su postavljeni temelji konverzije analognih (napon) i digitalnih (broj u binarnom zapisu) vrednosti u povorku impulsa, tako da je informacija "utisnuta" u verovatnoću pojave jedinice. Pokazuje se da se, u slučaju operanada prikazanih na ovaj način, mnoge operacije obavljaju jednostavno: primenom jednostavnih kombinacionih ili sekvencijalnih mreža. Tako se množenje dva operanda u obliku povorke impulsa realizuje jednim AND logičkim kolom. Rezultat operacije je povorka impulsa kod koje je verovatnoća pojave jedinice približno jednaka proizvodu verovatnoća. Pored jednostavnosti izvođenja operacija, kao dobra osobina se navodi jednaka težina svih bita u povorki impulsa. Ovo za posledicu ima malu grešku u rezultatu, koja je posledica greške u bilo kom bitu operanda. Kod težinskih kodova je situacija druga: greška u bitu najveće vrednosti može da iznosi 50 %. Kao loše osobine ovog pristupa se navodi sporost, odnosno mala tačnost rezultata. Tačnost se može postići radom sa vrlo dugačkim operandima za šta je potrebna ili velika učestanost ili dugačko vreme računanja.

II. STOHAŠTIČKA ADICIONA ANALOGNO-DIGITALNA KONVERZIJA

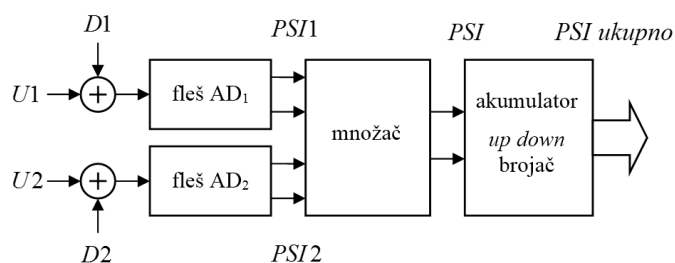
Na Katedri za električna merenja Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, sredinom devedesetih godina XX veka, se počelo raditi na ideji koja je bazirana na primeni stohastike u merenjima. U osnovi ideje jeste primena analogno-digitalne (AD) konverzije fleš AD konvertorom male rezolucije, uz

Dragan Pejić, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6, Novi Sad (email: pejicdra@uns.ac.rs)

Vladimir Vujičić, FTN, Univerzitet u Novom Sadu, Trg D. Obradovića 6 (email: vvujicic@uns.ac.rs)

dodavanje šuma specijalnih osobina na ulazni naponski signal. Uloga aditivnog šuma jeste smanjivanje velike greške kvantizacije koja je sadržana u svakom rezultatu AD konverzije, što se postiže usrednjavanjem velikog broja susednih vrednosti.

Idejni tvorac ove ideje je profesor Vladimir Vujičić, koji je bio mentor prvog doktorskog rada [3] kolege Slobodana Milovančeva. U ovom doktorskom radu su postavljene osnove nove metode na bazi primene stohastike. Metoda je nazvana: stohastička adicijna AD konverzija. Reč je o analogno-digitalnoj konverziji jer se ulaznoj analognoj veličini na izlazu konvertora dodeljuje digitalna vrednost - broj. Termini "stohastička" i "adicijna" su upotrebljeni zbog primene specijalnog šuma (ditera) koji se dodaje na ulaznu analognu veličinu. U okviru doktorske teze je pokazana važna osobina ovakvog konvertora - adaptivnost. Metrološke osobine rezultata konverzije zavise od broja osnovnih rezultata konverzije (N) nad kojima se vrši usrednjavanje. Pokazano je da preciznost rezultata konverzije raste sa kvadratnim korenom iz N . Na Sl. 1. je data blok šema stohastičkog adicijnog AD konvertora sa dva generatora šuma.

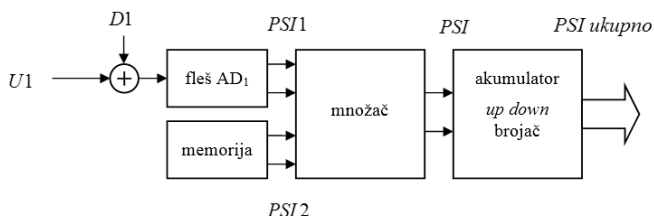


Sl. 1. Blok šema Stohastičkog adicijnog analogno-digitalnog konvertora sa dva generatora ditera

U ovom radu je korišćen fleš AD konvertor sa svega tri moguća stanja na izlazu, kodovana vrednostima iz skupa $\{-1, 0, 1\}$. Operacija množenja se jednostavno izvodi upotrebom nekoliko logičkih kola i za rezultat se dobija vrednost iz polaznog skupa. Zbog ovoga se akumuliranje realizuje korišćenjem up-down brojača. Rezultat konverzije teži vrednosti određenog integrala proizvoda ulaznih napona. Ovakav blok je namenjen za određivanje aktivne energije i aktivne snage, u slučaju da su ulazni naponi srazmerni naponu i struji potrošača. Ako se na oba ulaza dovede napon, ovom metodom se može odrediti efektivna vrednost napona po definiciji.

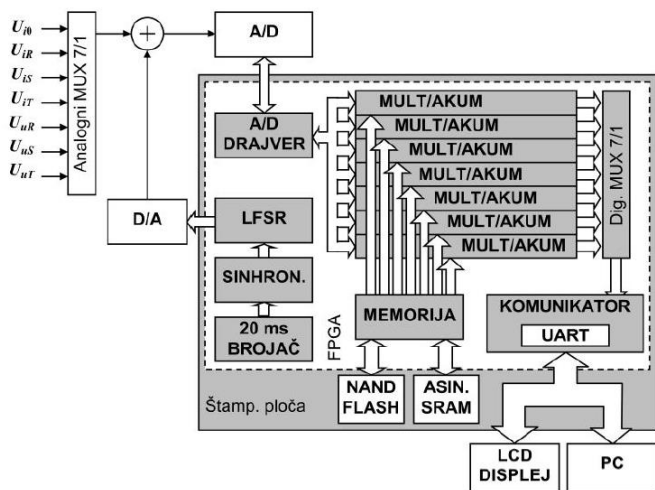
III. FREKVENTNA ANALIZA PRIMENOM STOHAŠTIČKE MERNE METODE

U sledećem koraku se razmišljalo o primenivosti stohastičke konverzije na određivanje koeficijenata razvoja u ortogonalni red. Ideja se nametnula sasvim logično budući da se koeficijenti razvoja u red određuju nalaženjem vrednosti određenog integrala proizvoda ulaznog napona i bazisne funkcije. Zaključeno je da nema potrebe realizovati bazisne funkcije u analognom obliku. Umesto toga, razmatrana je ideja prikazana na Sl. 2.



Sl. 2. Blok šema primene stohastičkog adicionog AD konvertora na određivanje jednog koeficijenta razvoja u red

Memorijski blok je iskorišćen za smeštanje dvobitnih odbiraka diterisane bazisne funkcije u trajanju jedne periode mrežnog napona i struje. Ovi odbirci se množe sa dvobitnim rezultatima fleš AD konverzije i rezultati se akumuliraju na potpuno isti način kao na Sl. 1. Ova tematika je teorijski i praktično analizirana u [4], gde je napravljen i korak dalje. Realizovan je sedmokanalni uređaj (tri napona i četiri struje), Sl. 3, kojim se vrši određivanje 50 harmonika po svakom od kanala.



Sl. 3. Blok šema sedmokanalnog uređaja za razvoj u red od 50 harmonika

Sve digitalne komponente (memorija, množači, akumulatori, itd...) su realizovane primenom FPGA (Field Programmable Gate Array) modula. Analogni deo sadrži sabirač i generisanje jednog deterskog signala. Na osnovu poznavanja harmonika napona i struja se određuju efektivne vrednosti, aktivne i reaktivne snage i energije. Uslov za

funkcionisanje jeste bliskost učestanosti napona i struje nazivnoj mrežnoj učestanosti.

U [5] je izvršena generalizacija stohastičke metode i dat je detaljan matematički model. Analiziran je uticaj rezolucije primenjenog fleš AD konvertora za ulazni napon, kao i rezolucije diterisane bazisne funkcije. Pokazano je da je dovoljno da odbirci diterisanih bazisnih funkcija budu dva bita veće rezolucije nego odbirci analiziranog signala, kako ne bi dodatno povećavali grešku u određivanju razvoja u ortogonalni red. Takođe je pokazano da apsolutna greška određivanja koeficijenata razvoja u red ne zavisi od reda harmonika.

U [6] je prikazana primena stohastičke metode u određivanju harmonijskog sastava napona i struja kvara sa električnim lukom. Na osnovu dobijenih podataka je pokazano da se može efikasno utvrditi mesta nastanka kvara. Nad praktično dobijenim rezultatima je pokazano da se u vremenu od 50 ms do 60 ms može odrediti harmonijski sastav napona i struje sa greškom manjom od 2 %. Isti postupak sproveden u simulacionim uslovima daje mnogo manju grešku, reda 0.01 %.

Ofseta komparatora kojim se realizuje fleš AD konvertor je prepoznat kao jedan od najvećih uzročnika sistematske greške u okviru stohastičkog konvertora [7]. Realizovan je prototip merila, uz posebno obraćanje pažnje na smanjenje uticaja ofseta primenjenih komparatora. Pokazano je da se periodičnim obrtanjem ulaza komparatora, uticaj ofseta može smanjiti između 40 dB i 70 dB. Na ovaj način se ostvaruje mogućnost merenja aktivne energije u 15-minutnom intervalom sa greškom manjom od 100 ppm.

IV. PRIMENA STOHAŠTIČKOG KONVERTORA U BIOMEDICINSKIM DISCIPLINAMA

Nakon uspešne primene stohastičke metode na merenje parametara jednosmernog i prostoperiodičnog signala, složenoperiodičnog signala, u [8] je pokazana mogućnost primene u medicini: na merenje nestacionarnih EEG signala. Poznato je da je EEG signal male amplitude i zato lako prijemčiv za šum. Pokazano je da se primenom stohastičke digitalne metode može realizovati analiza EEG signala i što je najvažnije, postignuta je veća otpornost na prisustvo šuma nego kod klasičnih analognih i digitalnih metoda.

U [9] je pokazana mogućnost primene stohastičke digitalne metode u merenju elektrookulogrfskog signala. Primećeno je da dolazi do problema na krajevima mernog intervala usled takozvanog Gibsovog efekta. Problem je uspešno rešen preklapanjem vremenskih intervala. Preklapanjem se dobija rezerva, tako da se u kasnijoj analizi mogu odbaciti sami krajevi signala, upravo oni koji su problematični. Realizovan je sistem za testiranje, tako da se iz računara zadaje oblik signala na koji se dodaje diter i vrši fleš AD konverzija i konačno dobijeni odbirci vraćaju u računar. Na ovaj način je dobijen zatvoren sistem koji je korišćen za istraživanje primenivosti stohastičke metode, uz ograničenje učestanosti

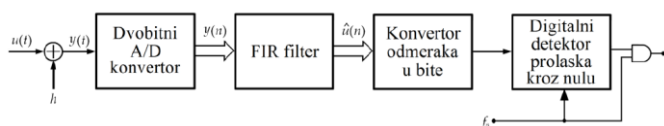
generisanja ispitivanog signala, a time i učestanosti odabiranja fleš AD konvertorom, brzinom serijske komunikacije.

Primena stohastičke metode merenja na ERP (Event Related Potential) potencijalima je prikazana u [10]. Posmatrano je merenje latence ERP signala i vršne vrednosti P300 signala. Prilikom merenja latence ERP signala dobijena je greška do 1.5 %, dok je pri merenju vršne vrednosti P300 komponente dobijena greška u oko 13 %. I ovde je potvrđena ranije pomenuta otpornost na prisustvo šuma, što predstavlja prednost stohastičke metode nad drugim metodama.

V. GENERALIZACIJA STOHAŠTIČKE METODE

Doktorska teza [11] definiše pojam merenja na intervalu naspram standardnog pristupa koji je merenje u tački. Stohastička metoda je primer merenja na intervalu: rezultat stohastičke konverzije je vrednost određenog integrala proizvoda dve vremenski zavisne veličine. Kao što je već pokazano, mnoštvo veličina se određuje upravo na ovaj način: aktivna snaga i energija, efektivna vrednost, koeficijenti razvoja u ortogonalni red, itd... Samo usled razvoja tehnologije, očekuje se dalje poboljšanje metroloških performansi merenja na intervalu primenom stohastičke metode. Zahvaljujući adaptivnosti, sa porastom učestanosti odabiranja raste preciznost rezultata merenja dobijenih primenom stohastičkog pristupa.

Posebna pažnja tačnom određivanju mrežne učestanosti je posvećena u [12]. Tačno poznavanje vrednosti mrežne učestanosti je od presudnog značaja za kvalitet ostalih merenja u elektroenergetskom sistemu koja mogu biti obavljena primenom stohastičkog konvertora. Definisana je metoda za merenje mrežne učestanosti primenom stohastičke merne metode i FIR (Finite Impulse Response) filtera, Sl. 4.



Sl. 4. Blok šema za određivanje učestanosti napona primenom FIR filtera

Mala rezolucija primenjenog fleš AD konvertora, omogućava jednostavnu izvedbu FIR filtera bez korišćenja množača. Kako je moguća vrednost na izlazu fleš AD konvertora iz skupa -1, 0 i 1, umesto množenja vrednosti odbirka koeficijentom filtera, ovde se koeficijenti koriste sa promenjenim znakom, anuliraju se ili se koriste bez izmene, zavisno o vrednosti odbirka.

Ukoliko se poznaje tačna vrednost mrežne učestanosti, moguće je prevazići ograničenja na koja je ukazano u [4] i [5]. U [13] je obuhvaćen uticaj osobina deterskih signala, uticaj nepoklapanja trajanje merenja sa celim brojem perioda merenog signala, kao i uticaj odstupanja učestanosti osnovnog harmonika od nazivne vrednosti (50 Hz ili 60 Hz). Dat je niz preporuka za poboljšanje metroloških osobina merila koje se odnose na izvedbu pseudoslučajnih deterskih signala. Najvažniji doprinos disertacije je definisanje postupka kojim

se u slučaju odstupanja učestanosti od nazivne vrednosti vrši određivanje vrednosti harmonika na osnovu skupa izmerenih vrednosti pseudoharmonika.

U radu [14] je prikazana je primena stohastičke merne metode u merenju napona i struje korišćenjem transformatora bez jezgra. Transformatori bez jezgra se odlikuju većom linearnošću, ali se retko koriste pošto na sekundaru daju napon srazmeran izvodu merene veličine. Primenom harmonijske analize bazirane na stohastičkoj mernoj metodi, ovaj problem se prevazilazi i što je još važnije, postaje prednost. Prirodno je da viši harmonici imaju manju vrednost, a zbog diferenciranja se dobija efekat pojačavanja n-tog harmonika faktorom n. U radu je dato rešenje za visokonaponski transformator bez jezgra, koji je opisan teorijski i simulaciono, a na prototipu sprovedena merenja su potvrdila prethodno dobijene rezultate.

Analiza uticaja variranja mrežne učestanosti na rezultate merenja primenom stohastičke metode u elektrodistributivnoj mreži je prikazana u [15]. Teorijskim, simulacionim i na posletku eksperimentalnim analizama potvrđena je mogućnost primene stohastičke metode sa 2-bitnim fleš A/D konvertorima u merenju, prevashodno osnovnog, a kasnije i viših harmonika u mreži, čak i u prisustvu značajne (7 puta veće od izmerene) gausovske varijacije mrežne frekvencije. Merne nesigurnosti rezultata simulacija merenja efektivne vrednosti osnovnog harmonika trougaonog (THD = 12 %) i testerastog signala (THD = 81 %) su ispod 0.006 %, čak i pri (za fleš A/D konvertore i SDMM metodu) frekvenciji odabiranja 100 kHz.

Mogućnost primene stohastičke konverzije u nultim metodama je istraživana u [16]. Pokazano je teorijski, simulaciono i praktično da se zahvaljujući jednostavnoj strukturi stohastičkog konvertora ima mali broj izvora sistematske greške. Primenom metoda za smanjenje sistematskih grešaka na prihvatljivo male vrednosti, dobija se mogućnost vrlo tačnih i preciznih merenja malih napona. To kvalifikuje stohastičke metode za merenje u okolini nule.

U [17] je kombinovano korišćenje 4-bitnog fleš AD konvertora umesto dvobitnih. Dobijaju se 4-bitni odbirci ulaznih detersanih veličina, što dalje zahteva komplikovaniji digitalni blok za množenje i akumuliranje. Sve digitalne funkcije su realizovane primenom FPGA modula. Dobitak je u višestruko boljim performansama koje se postižu u pogledu preciznosti rezultata merenja. Za postizanje dobre tačnosti merenja primenjene su poznate tehnike potiskivanja uticaja ofseta komparatora, kojih je sada 16 u fleš AD konvertoru, za razliku od svega dva komparatora u osnovnoj varijanti. Na vremenskom intervalu od 180 sekundi, na realizovanom prototipu je dobijena preciznost od 0.003 %, uz tačnost od 0.007 %.

U svim prethodnim praktičnim rešenjima dileri su generisani primenom LFSR (Linear Feedback shift Register) i digitalno-analognog (DA) konvertora. Pokazuje se da performanse DA konvertora ograničavaju kvalitet ditera u pogledu rezolucije i brzine generisanja, što se direktno odražava na finalne metrološke rezultate. U [18] je dat predlog za generisanje ditera bez upotrebe DA konverora. U

radu je definisana metoda za generisanje šuma uniformne raspodele vrednosti odabiranjem trougaonog napona. Trenuci odabiranja trougaonog napona su određeni LFSR mehanizmom i nestabilnošću primenjene PLL petlje. Na ovaj način je izvršena randomizacija predvidivog (pseudoslučajnog) ponašanja LFSRa i nepredvidivog (u velikoj meri slučajnog) ponašanja PLL petlje i izbegnuta su ograničenja koja nameće primena DA konvertora.

Stohastička merna metoda je primenjena i optimizovana za merenje snage i energije vetra [19]. Ovo je sve važniji problem, obzirom na želju da se sve veći broj vetrogeneratora instalira, ponekad na vrlo nedostupnim lokacijama. Jednostavnost stohastičke metode, pored malog broja izvora sistematskih grešaka čijim se otklanjanjem na dužem vremenskom intervalu postižu zapaženi metrološki rezultati, se karakteriše i malom potrošnjom električne energije. Ova činjenica dodatno kvalifikuje uređaj za merenje snage i energije vetra na bazi stohastičke metode za korišćenje u paralelnim merenjima na nedostupnim mestima koja se izvode radi ispitivanja potencijalnih lokacija na koje bi se postavljali vetrogeneratori.

Slično merenjima na intervalu, u radu [20] je predloženo upravljanje na intervalu: pristup koji se već uspešno pokazao u energetskim, biomedicinskim i drugim merenjima, ovde je proširen na fazi upravljanje. Rad prikazuje stohastički analogno-fazi konvertor (SAFC), uređaj koji radi sa podacima niske rezolucije u impulsnom režimu. Umesto rigorozne tačnosti, javljaju se slučajni događaji, zahvaljujući diterovanju nezanemarive greške kvantizacije po vrednosti pretvorene su u slučajnu grešku i kao takve proučavaju se statističkim metodama. Kombinovana je teorija verovatnoće sa fazi logikom, na način da se one međusobno dopunjuju.

VI. ZAKLJUČAK

Stohastička adiciona analogno-digitalna konverzija je pojam po kojem je Katedra za električna merenja Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu prepoznatljiva. Metoda je primenjiva na određivanje aktivne energije, aktivne snage, efektivne vrednosti napona, za određivanje koeficijentata razvoja u red - svuda gde je potrebno odrediti vrednost određenog integrala proizvoda dva napona. Primenjivana je u elektrodistributivnim merenjima i biomedicini, kao i u fazi upravljanju.

Svaki doktorat na temu stohastičke merne metode je otkrio i ostavio neka otvorena pitanja i probleme. Na njih su odgovarali kasnije objavljeni članci ili sledeći doktorati. Neka od otvorenih pitanja koja su otvorena u poslednjih nekoliko doktorata su: a) merenje vrlo slabih, zašumljenih i izobličjenih signala, b) istraživanje primene stohastičke digitalne merne metode optimalne rezolucije, c) realizacija stohastičkog digitalnog DFT procesora viokog reda, d) merenje nelinearnim senzorima, e) merenje posredno izmerenih nelinearnih veličina i f) merenje imitansnim senzorima.

Dalji razvoj stohastičke merne metode podrazumeva: a)

prepoznavanje i otklanjanja izvora sistematske greške kako bi se tačnost metode i dalje povećavala i b) primenu sve bržih analognih i digitalnih komponenti, kako bi se u što kraćem vremenskom intervalu dobijali što precizniji rezultati merenja.

LITERATURA

- [1] J. von Neumann, "Probabilistic logics and synthesis of reliable organisms from unreliable components," in Automata Studies, Princeton University Press, 1956.
- [2] B. R. Gaines, "Stochastic computing," in American Federation of Information Processing Societies: Proceedings of the AFIPS '67 Spring Joint Computer Conference, April 18-20, 1967, Atlantic City, New Jersey, USA, 1967.
- [3] Slobodan Milovančev, "Adaptivni AD konvertor i njegova primena", FTN Novi Sad, 1996.
- [4] Nebojša Pjevalica, "Merenja na elektrodistributivnoj mreži u frekventijskom domenu", FTN Novi Sad, 2007.
- [5] Velibor Pjevalica, "Stohastički digitalni procesor ortogonalnih funkcija", FTN Novi Sad, 2008.
- [6] Branislav Santrač, "Precizno određivanje mesta kvara sa lukom u elektroenergetskom sistemu", Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet Čačak, 2008.
- [7] Dragan Pejić, "Stohastičko merenje električne snage i energije", FTN Novi Sad, 2010.
- [8] Platon Sovilj, "Stohastičko digitalno merenje EEG signala", FTN Novi Sad, 2010.
- [9] Jelena Đorđević Kozarov, "Metoda merenja elektrookulografskog signala na intervalu sa preklapanjem vremenskih prozora", FTN Novi Sad, 2017.
- [10] Milan Milovanović, "Metoda merenja moždanih ERP potencijala zasnovana na merenju harmonika epohe", FTN Novi Sad, 2015.
- [11] Predrag Poljak, "Prilog razvoju i standardizaciji mernih metoda u merenjima u tački i merenjima na intervalu", FTN Novi Sad, 2012.
- [12] Aleksandar Radonjić, "Merenja u frekventijskom domenu u konceptu pametne mreže", FTN Novi Sad, 2013.
- [13] Boris Antić, "Teorija realnog integrisanog merila harmonika", FTN Novi Sad, 2013.
- [14] Dušan Čomić, "Stohastička metoda merenja napona i struje na visokom naponu", FTN Novi Sad, 2015.
- [15] Željko Beljić, "Metoda merenja harmonika u realnoj distributivnoj mreži primenom AD konvertora dvobitne rezolucije", FTN Novi Sad, 2016.
- [16] Bojan Vujičić, "Detekcija nule AD konvertorom niske rezolucije", FTN Novi Sad, 2017.
- [17] Marjan Urekar, "Prilog optimizaciji digitalnih merenja", FTN Novi Sad, 2018.
- [18] Nemanja Gazivoda, "Nova metoda za povećanje efektivne rezolucije stohastičkih mernih instrumenata visokih performansi", FTN Novi Sad, 2019.
- [19] Boris Ličina, "Metoda merenja snage i energije vetra zasnovana na merenju na intervalu", FTN Novi Sad, 2020.
- [20] Karolj Nađ, "Stohastički analogno fazi konvertor i njegova primena", FTN Novi Sad, 2013.

ABSTRACT

The paper presents the development of ideas related to stochastic analog-to-digital conversion. The overview is given through the prism of the contribution of 18 PhD theses, starting from 1996, when the first doctorate on this topic was defended. Some works were more of theoretical significance, others had more significant practical weight, but all contributed to the development of stochastic conversions in the last 25 years.

Overview of PhD theses in which the stochastic measurement method was investigated

Dragan Pejić, Vladimir Vujičić