Harmonijska analiza rada softverskim paketom Wavestar

Leko, Matej

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:465535

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

HARMONIJSKA ANALIZA RADA SOFTVERSKIM PAKETOM WAVESTAR

Diplomski rad

Matej Leko

Osijek, 2017.

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PROGRAMSKI PAKET WAVESTAR 2
2.1. Opis instaliranja i opcija WaveStara 2
2.2. Pokretanje programa 3
2.3.1. Harmonijska analiza snaga (HAS) 6
2.3.2. Vremenski interval uzorkovanja podataka za provođenje harmonijske analize 8
3. HARMONIJSKA ANALIZA WAVESTAROM 10
3.1. Parametri o kojima ovisi harmonijska analiza u WaveStaru 10
3.2. Ograničenja mjerenja harmonijskog sadržaja odabranog valnog oblika 11
3.2.1. Ograničenje pri mjerenju osciloskompom Tektronix TDS 224 11
3.2.2. Ograničenje WaveStara 11
3.3. Uvjeti točnosti rezultata u Wavestaru 12
4. MJERENJA HARMONIJSKOG SADRŽAJA S WAVESTAROM 13
4.1. Provjera rada WaveStara za izmjenični pravokutni valni oblik napona 13
4.2. Automatske postavke vremenskog intervala uzorkovanja podataka 17
4.3. Ručne postavke perioda uzorkovanja u WaveStaru pri harmonijskoj analizi 20
4.3.1. Pri vremenskoj bazi 10 ms/ds 20
4.3.2. Pri vremenskoj bazi 25 ms/ds 21
4.3.3. Pri vremenskoj bazi 50 ms/ds 22
5. ANALIZA HARMONIJSKOG SADRŽAJA STRUJE PRIGUŠNICE SILAZNOG ISTOSMJERNOG PRETVARAČA NAPONA 25
5.1. Silazni pretvarač napona 25
5.2. Osnovno periodičko rješenje 29
5.2. Dvostruko periodičko rješenje 30
5.2.1. Prva radna točka 30
5.2.2. Druga radna točka 31
6. ZAKLJUČAK 33
LITERATURA 34
SAŽETAK 35
SUMMARY 35
ŽIVOTOPIS 36

1. UVOD

S funkcijskim generatorom, osciloskopom i računalom će se ispitati ograničenja u harmonijskoj analizi WaveStara pomoću pravokutnog naponskog valnog oblika, i predložiti rješenja. Dobiveni rezultati će se usporediti s izračunatim.

Također će se napraviti harmonijska analiza struje prigušnice istosmjernog silaznog pretvarača pri specifičnim uvjetima.

Odredit će se ograničenja pri harmonijskoj analizi odabranih primjera, posebno ograničenja WaveStara pri preuzimanju podataka osciloskopom.

Predložit će se način odabira postavki pri korištenju WaveStara u cilju postizanja što boljih rezultata pri harmonijskoj analizi ovim programom.

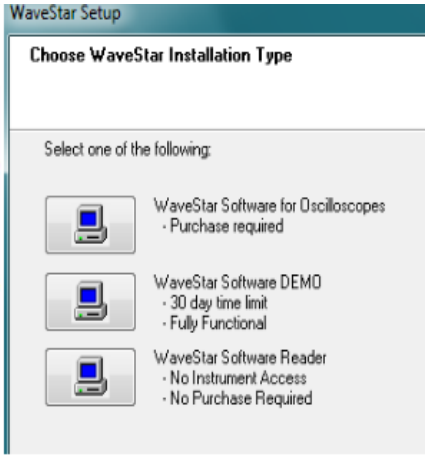
2. PROGRAMSKI PAKET WAVESTAR

Program WaveStar povezuje računalo i odabrani Tektronix osciloskop preko serijskog kabla te se pomoću njega upravlja osciloskopom u svrhu analize, snimanja, prikazivanja te mjerenja valnih oblika. Odabran je osciloskop Tektronix TDS 224 koji je spojen na računalo u Laboratoriju za elektrotehniku Fakulteta elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

2.1. Opis instaliranja i opcija WaveStara

Programska podrška WaveStar za osciloskop se instalira tako da se sa CD-a na kojemu se nalazi programska podrška započne instalacija preko prozora koji se sam pojavi na zaslonu računala (Sl. 2.1. a)).

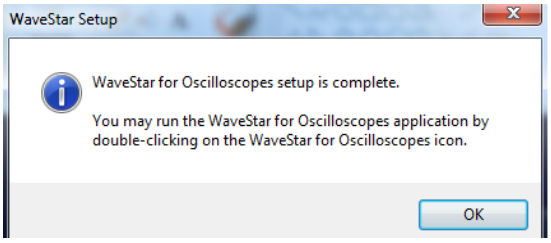
Nakon što se s prozora koje se izbacio odabere instaliranje programske podrške (*Install products*) samo računalo vodi kroz instalaciju programske podrške. Zatim je potrebno upisati tvorničku zaporku koja dolazi s CD-om, potom se pristaje na uvjete korištenja proizvođača te se dolazi do prozora, koji je prikazan slikom (Sl. 2.1. b) u kojem se bira proizvod koji će biti instaliran.



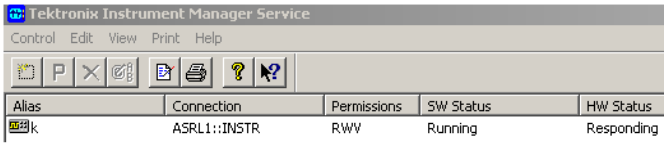
Sl. 2.1. a) *Dio programskog prozora koje se otvori pri instalaciji programske podrške*

Sl. 2.1. b) *Prozor za odabir željenog softvera*

Nakon što je odabran željeni softver, u slučaju ovog rada, *WaveStar for Oscilloscope*, računalo instalira programsku podršku kojom će komunicirati s osciloskopom. Kada je instalacija završena na zaslonu računala dolazi informacija u završetku instalacije (Sl. 2.2. a).



Sl. 2.2. a) *Prozor koji se pojavljuje pri završetku instalacije programskog sučelja*

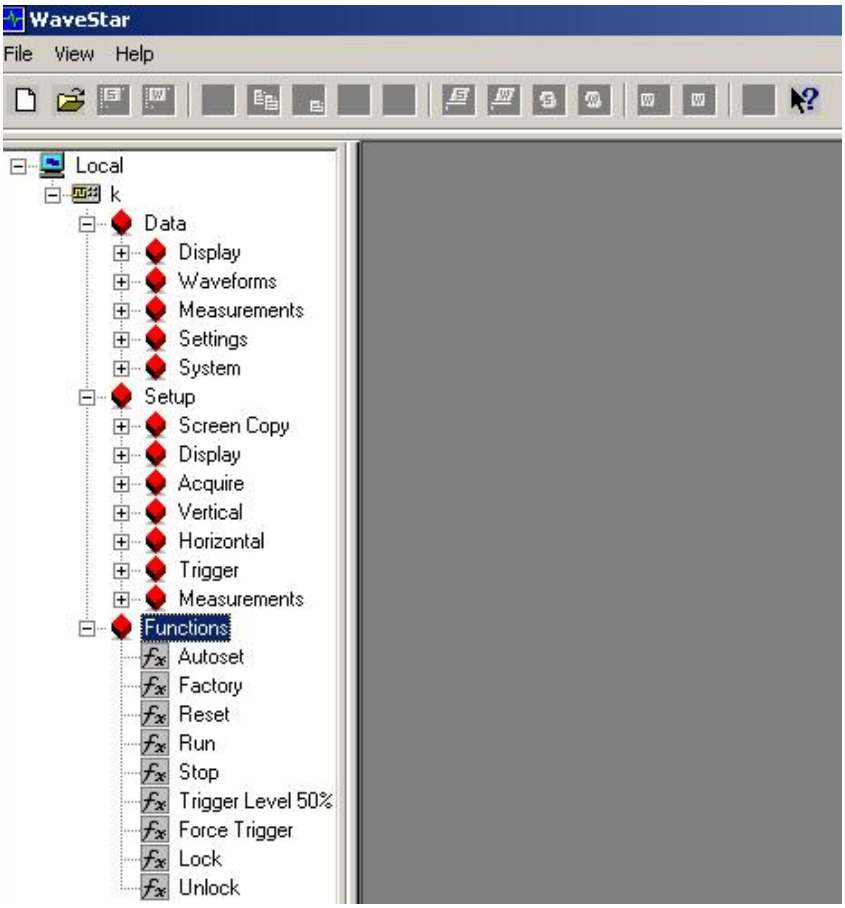


Sl. 2.2 b) *Poruka o komunikaciji računala*

2.2. Pokretanje programa

Prvo se namješta komunikacija između osciloskopa i računala u programu *Instrument Manager* gdje se postavljaju parametri i ostali podaci bitni za komunikaciju programa i osciloskopa. Pri završetku program Tektronix Instrument Manager Service izbacuje poruku, prikazanu slikom 2.2. b) *SW Status Running* i *HW status Responding*.

Program se pokreće duplim klikom ikone *WaveStar for oscilloscope*, na zaslonu računala. Pokretanjem se otvara glavni prozor sa čije lijeve stoji ikonica *Local*, prikazano slikom 2.3.



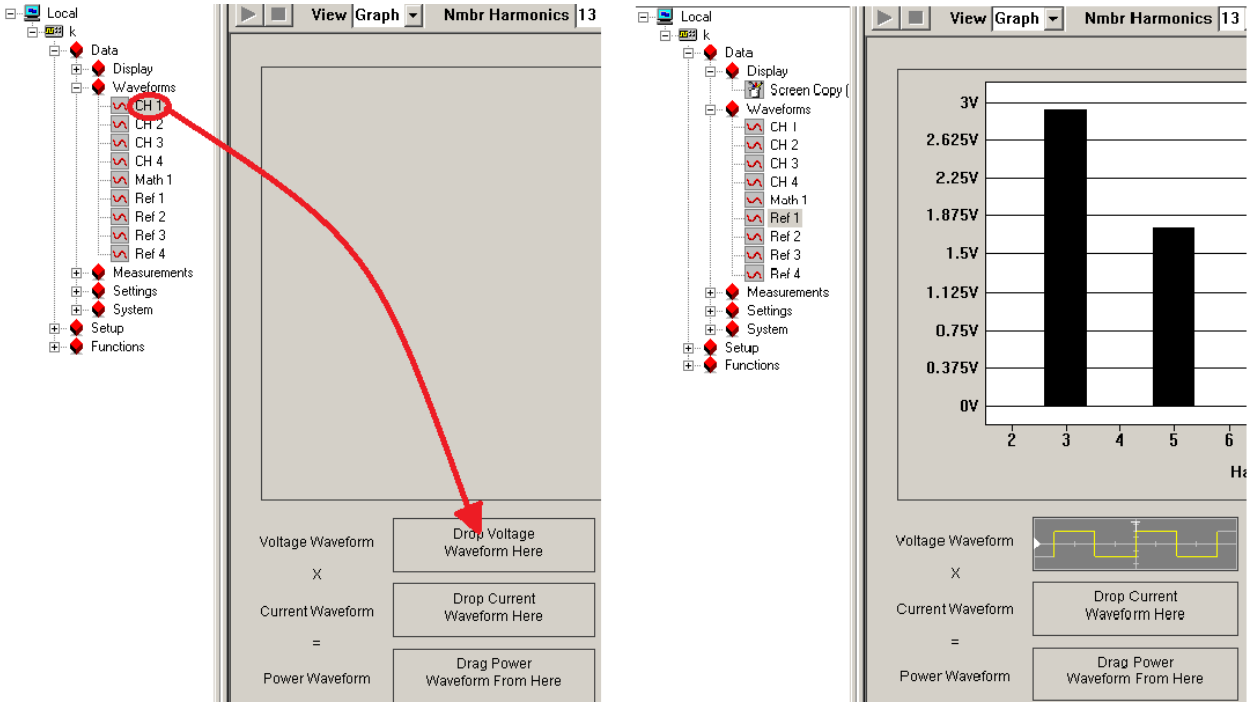
Sl. 2.3. *Osnovni prozor programa Wavestara*

Na lijevoj strani slike 2.3. se vide opcije koje razgranata forma opcija. Bitna ikona za rad u WaveStaru je DATA gdje se nalaze podopcije *Display*, *Waveforms*, *Measurement*, *Settings*, *System*. Opcije koje će se koristiti za harmonijsku analizu su *Waveforms* i *Measurements*. *Waveforms* se sastoji od kanala za skidanje podataka sa samog osciloskopa kao što su CH1, CH2, CH3, CH4, Math 1, Red 1, Ref 2, Ref 3, Ref 4.

Program WaveStar ima svoje podfunkcije i prečace, slične Wordu (MS Office). Na slici 2.4. su prikazani prečaci, redom s lijeva na desna ikone znače: otvaranje radne površine (eng. *New Data Sheet*), otvaranje spremljene radne površine (eng. *Open*), snimanje radne površine (eng. *Save DataSheet*), odsjeci (eng. *Cut*), kopiraj (eng. *Copy*), zalijepi (eng. *Paste*), odspoji (eng. *Unlink*), spoji (eng. *Relink*), isprintaj radnu površinu (eng. *Print Datasheet*), osvježi radnu površinu (eng. *Refresh Data Sheet*), osvježi skupinu dokumenata (eng. *Refresh Workbook*), pokreni skupinu dokumenata (*Start Workbook*), zaustavi skupinu dokumenata (*Stop Workbook*), Online pomoć (*Online Help*), pomoć (*What is this Help*)[1].

Sl. 2.4. *Alatna traka u WaveStaru*

Olakšavajuća opcija ovog programa je „Uhvati i odloži“ (engl. *Drag&Drop*) princip rada kao što je prikazano na slici 2.5. Opcija funkcionira tako da se lijevim klikom miša „uhvati“ željeni signal sa određenog kanala držeći tipku i zatim odloži iznad radne površine (eng. Datasheet), te se u području signala (strujni ili naponski valni oblik) pojaviti identična slika s osciloskopa:



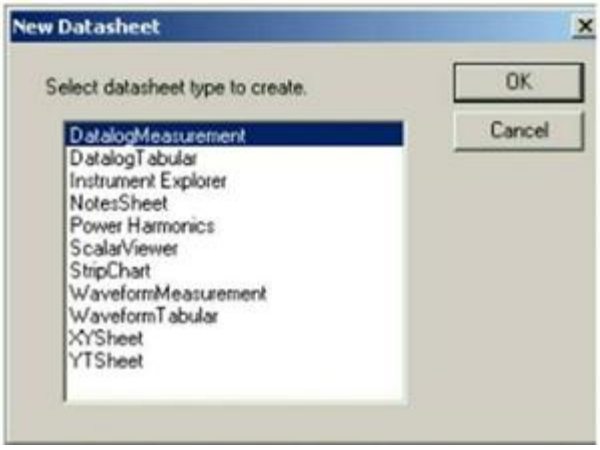
Sl. 2.5. *Isječak dijaloškog prozora WaveStara*

Opis slike:

Slikom 2.5. je prikazan prozor prije i nakon prenošenja informacija s kanala. Postupak prenošenja podataka se odvija tako da se na početku strijelice, odnosno s kanala (CH1) s kojeg se preuzimaju harmonijske informacije, stisne lijevi klik miša i zatim drži sve do željene pozicije za odlaganje, u ovom slučaju, *Voltage waveform* pokazano vrškom strijelice, gdje se lijevi klik miša otpušta.

Otvoreni prozor WaveStar podrške prikazuje opcije prikazane na lijevoj strani dok je na desnoj strani prostor predodređen za radne površine (potprograme) koje se otvaraju pomoću ikone na alatnoj traci (prečac→*New Datasheet*). Ponuđeno je 11 radnih površina za obradu prikupljenih

signala (Sl.2.6. a). Svaka radna površina ima svoje prednosti i nedostatke u prikazu. U ovome radu će se koristiti harmonijska analiza snaga (skraćeno HAS) (eng. *Power Harmonics Data Sheet*).

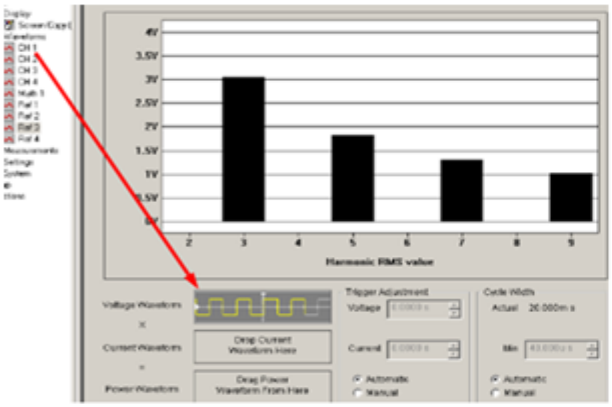


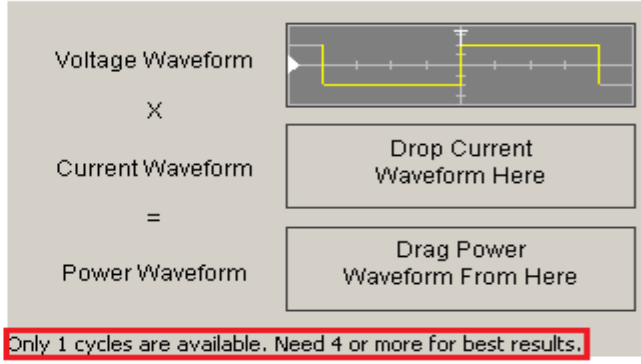
Sl. 2.6. a) *Prozor New Datasheet s ponuđenim svim radnim površinama*

Sl. 2.6. b) *Radna površina HAS-a*

2.3.1. Harmonijska analiza snaga (HAS)

HAS je radna površina (potprogram) koja prikazuje snagu i harmonijske informacije bazirane na naponu i struji promatranog valnog oblika (Sl. 2.6. b). Otvaranjem prozora ovog potprograma prikažu se dva manja prozora u lijevom kutu potprograma za prikaz valnog oblika napona (eng. *Voltage waveform*) i valnog oblika struje (eng. *Current waveweform*). Valni oblici napona i stuje signala se preuzimaju iz ponuđenih kanala (eng. chanel CH). Prozor za prikaz valnog oblika snage (eng. *Power waveform*) se nalazi ispod prozora za prikaz valnog oblika napona i valnog oblika struje (Sl. 2.7. a). U ovom radu će se koristiti samo prvi prozor za prikaz valnog oblika napona. Ukoliko je valni oblik napona prikazan u nedovoljnoj vremenskoj bazi, program će to sam sugerirati tekstom ispod sva tri navedena prozora kao što je prikazano slikom 2.7. b) i istaknuto unutar crvenog prevokutnika. Tekst upozorenja glasi: „Dostupne su samo 3 periode, za najbolje rezultate potrebno ih je 4 ili više“.



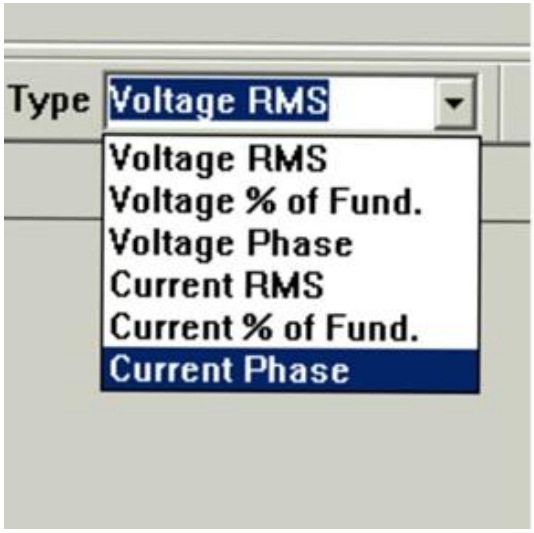


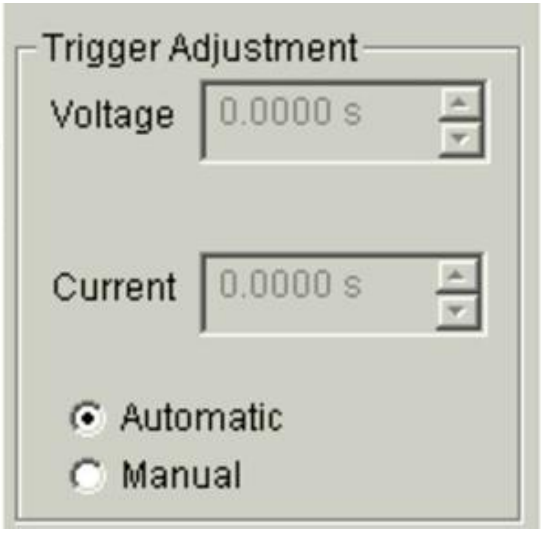
Sl. 2.7. a) *Prozor za prikaz valnog oblika*

Sl. 2.7. b) *Isječak obavijesti Wavestara upućene korisniku*

Harmonijska analiza valnog oblika može biti prikazana na dva načina: tablično i stupčasto. Pregled (eng. View) odabiremo pri vrhu HAS-a na način da biramo jednu od opcija: stupčasti prikaz (eng. *Graph*) i tablični prikaz (eng. *Table*) (Sl.2.6. b). Pri harmonijskoj analizi će se češće koristiti tablični prikaz zbog preglednijeg iščitavanja rezultata, nedostatak tabličnog prikaza je neprikazivanje prvog harmonika kao sto se vidi na slici 2.7. a. Tablični prikaz prvog harmonika bi bio koristan pri vizualnoj usporedbi s ostalim harmonicima. Pokraj te opcije se nalazi i opcija za odabir broja harmonika *(*eng. *Nmbr Harmonics)* kojih ima 51. Zadnja opcija na vrhu prozora potprograma HAS, koja utječe na prikaz, je karakakteristična vrijednost napona i struje (eng. *Type*) valnog oblika. Izabrati se može: srednja vrijednost napona (eng. *Voltage RMS*), napon u postotnim vrijednostima (eng. *Voltage % of Found*.), fazni pomak određenog naponskog harmonika (eng. Voltage Phase), srednja vrijednost struje (eng. *Current RMS*), struja u postotnim vrijednostima (eng. *Current % of Fund*.), fazni pomak određenog strujnog harmonika (eng. *Current Phase*) (Sl.2.8. a)). U ovome radu će se koristiti odabir srednje vrijednosti napona[1].

U prikazu potprograma HAS-a u desnom donjem kutu prozora je prozor za namještanje vremena okidanja (eng. *Trigger Adjusment*) sa opcijama podešenja napona (eng. *Voltage*) i struje (eng. *Current*) pri odabranom ručnom podešavanju (eng. *Manual*). Podešenja nisu nužna jer se nudi opcija automatskog podešenja (eng. *Automatic*). Pri svim mjerenjima u radu bit će odabrano automatsko podešavanje (Sl.2.8. b)).





Sl. 2.8. a) *Prikaz karakterističnih vrijednosti napona i stuje*

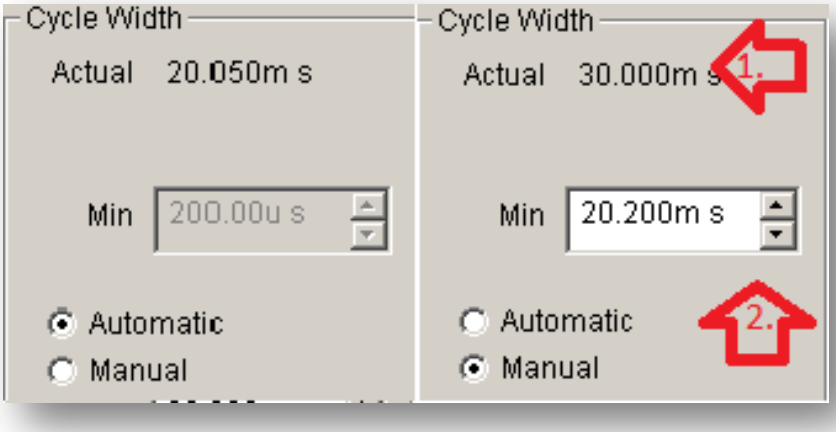
Sl. 2.8. b) *Za mjerenja u radu se koriste automatska podešenja vremena okidanja*

2.3.2. Vremenski interval uzorkovanja podataka za provođenje harmonijske analize

U donjem desnom kutu HAS-a nalazi se prozor za podešavanje vremenskog intervala uzorkovanja podataka za provođenje harmonijske analize (eng. *Cycle Width*) prikazan slikom 2.9. a). WaveStar automatski postavlja minimalni vremenski interval uzorkovanja (eng. *Min*) koji program uzima da izračuna harmonike (Sl.2.9.a)). Moguće je i ručno podešavanje intervala (eng. *Manual*). Pri ručnom namještanju vremenskog intervala uzorkovanja upisuje se vrijednost u prozor minimalnog vremenskog intervala uzorkovanja podataka (Sl.2.9.b) za koju program sam odabire vrijednost stvarnog vremenskog intervala uzorkovanja (eng. *Actual*) (Sl.2.9.b)).

Ovo je jedini parametar koji će se podešavati u WaveStaru u svrhu harmonijske analize i određivanja viših harmonika. Budući da je frekvencija valnog napona korištenog pri mjerenjima 50 Hz, slijedi da je temeljna perioda signala:

$$T = \frac{1}{50Hz} = 0{,}02\ s = 20ms$$



Sl. 2.9. a) *Isječak prozora HAS-a* **Sl. 2.9. b)** *Isječak prozora HAS-a*

Prozor prikazan slikom 2.9. a) je slučaj automatskog postavljanja vremenskog intervala uzorkovanja. Za vrijednosti manje od minimalnog vremenskog intervala uzorkovanja (200 μs) program automatski vraća vrijednost na iznos koji je određen automatskim postavkama.

3. HARMONIJSKA ANALIZA WAVESTAROM

Harmonijska analiza koju provodimo u potprogramu WaveStara, HAS-u, koristeći stupčasti i tablični prikaz, ovisi o dva parametra koji se mogu mijenjati preko osiloskopa, i samog programa Wavestara.

3.1. Parametri o kojima ovisi harmonijska analiza u WaveStaru

1. Vremenska baza signala dovedenog s osciloskopa (sekunda po dijelu skale-s/ds)-dio signala koji se promatra pri harmonijskoj analizi u WaveStaru, vremenska baza se podešava na osciloskopu okretanjem kontrole nalijevo (povećavamo vremensku bazu) i nadesno (smanjujemo vremensku bazu) (Sl. 3.1.).
2. Vremenski interval uzorkovanja podataka za harmonijsku analizu (ms)-period uzorkovanja kojim se određuje dio signala preuzetog s osciloskopa koji se koristi za izračun harmonijske analize, podešava se u HAS-u.

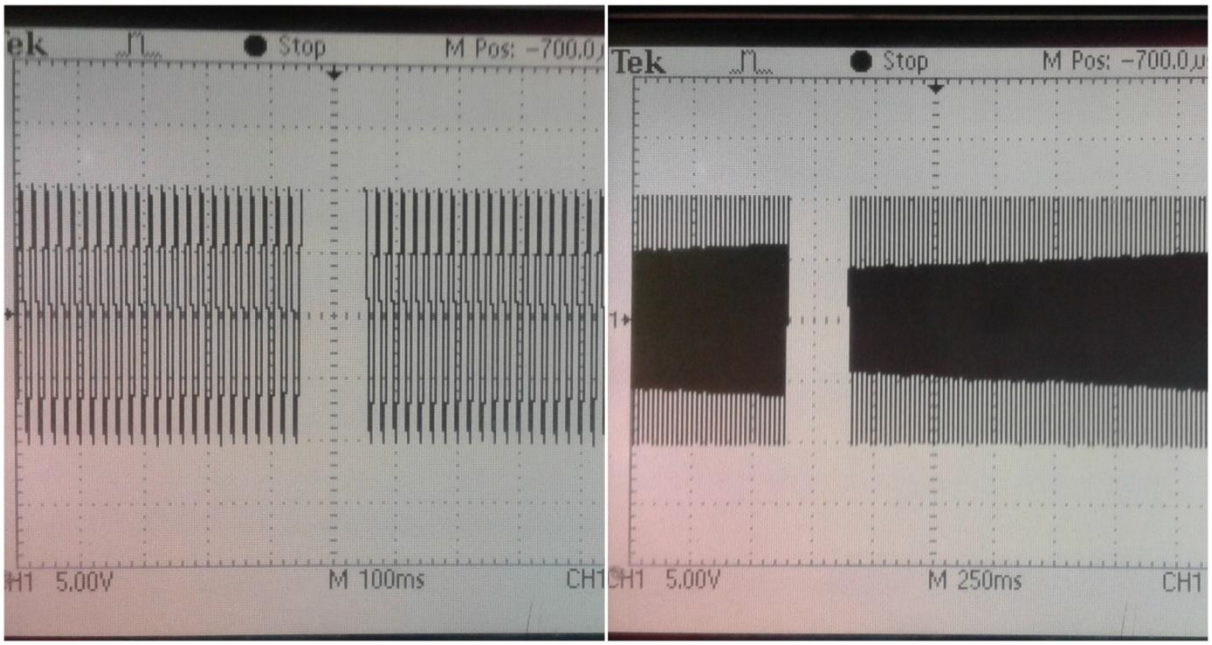
Sl. 3.1. *Kontrola na osciloskopu Tektronix TDS 224 kojim reguliramo vremensku bazu*

3.2. Ograničenja mjerenja harmonijskog sadržaja odabranog valnog oblika

Pri mjerenju harmonijskog sadržaja potrebno je pridržavati se ograničenja postavljenih radi dobivanja što točnije harmonijske analize u Wavestaru.

3.2.1. Ograničenje pri mjerenju osciloskompom Tektronix TDS 224

Vrijednosti vremenske baze se namještaju pomoću kontrole na osciloskopu. Da bi se provjerila ograničenja osciloskopa, pri dovedenim izmjeničnom pravokutnom valnim oblikom napona amplitude 10 V i frekvencije 50 Hz (taj valni oblik će se koristiti pri mjerenju harmonika), vremenska baza je povećavana od najmanje do najveće te je utvrđeno da pri vremenskoj bazi vrijednosti 100 ms/ds dolazi do pojave nedostatka podataka. Ta deformacija se pojavljuje i za sve veće vremenske baze. Slikom 3.1. prikazani su rezultati pri izmjeničnom sinusnom valnom naponskom obliku amplitude 10 V i frkvencije 500 Hz pri vremenskim bazama 100 ms/ds i 250 ms/ds. Rezultate harmonijske analize WaveStarom pri vremenskim bazama većim od 50 ms/ds se ne može smatrati ispravnima.



Sl. 3.2. *Pojava nedostatka podataka za dvije različite vremenske baze*

3.2.2. Ograničenje WaveStara

Koristeći programski paket Wavestar uočeno je kako za valni oblik napona koji je korišten u radu (frekvencije 50 Hz), doveden s osciloskopa pri vremenskim bazama 50 μs/ds, 100 μs/ds, 250 μs/ds program daje do znanja da je potrebno povećati vremensku bazu. Na slici 2.7. b) je

prikazan isječak prozora HAS-a pri vremenskoj bazi 250 μs/ds za koju program sugerira da je za analizu harmonika dostupan samo jedna perioda signala te je potrebno 4 ili više periodi za najbolje rezultate (eng. Only 1 cycles are available. Need 4 or more for best results) .

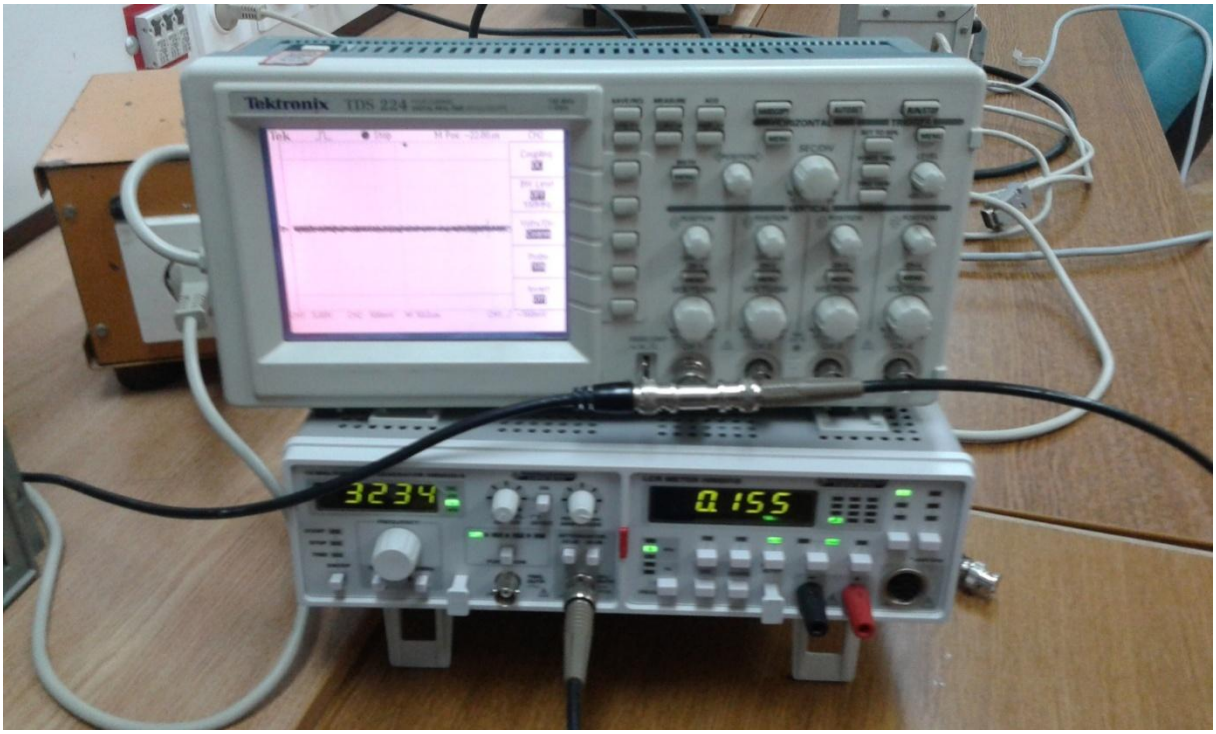
3.3. Uvjeti točnosti rezultata u Wavestaru

Stoga za dobivanje točnih rezultata harmonijske analize u WaveStaru moraju biti ispunjena dva uvjeta:

1. vremenska baza mora biti takva da sadrži barem 4 periode signala na zaslonu osciloskopa, što se vidi na slici 2.7. b).
2. vremenska baza može biti maksimalno 50 ms/ds (zbog tehničkog ograničenja osciloskopa Tektronix TDS 224).

4. MJERENJA HARMONIJSKOG SADRŽAJA S WAVESTAROM

Funkcijski generator je elektronski instrument koji je u stanju proizvoditi izlazne napone raznih oblika [2]. Korišten je funkcijski generator HM8030-6, proizvođača Rhode&Schwarz Hameg prikazan slikom 4.1.. Osciloskop Tektronix TDS 224 je spojen na funkcijski generator te na računalo, preko kojeg WaveStar prikuplja i obrađuje podatke. Mjerenja se rade sa izmjeničnim pravokutnim valnim oblikom napona amplitude 10 V i frekvencije 50 Hz. Koriste se automatske i ručno podešene postavke vremenskog intervala uzorkovanja podataka. Mjerenja su obavljena u Laboratoriju za elektrotehniku Fakulteta za elektrotehniku, računarstvo i informacijske tehnologije u Osijeku. Cilj mjerenja je vidjeti u kojim slučajevima WaveStar daje ispravne rezultate harmonijske analize.



Sl. 4.1. *Spoj funkcijskog generatora i osciloskopa priključenog serijskim kablom na računalo*.

4.1. Provjera rada WaveStara za izmjenični pravokutni valni oblik napona

Poslije upoznavanja s funkcijama WaveStara koje se koriste u mjerenjima izmjeren je pravokutni valni oblik, poznate vrijednosti amplitude napona i frekvencije, za koji je proveden i analitički proračun u svrhu određivanja harmonijske analize.

Tako je za izmjenični pravokutni valni oblik napravljena Fourierova analiza valnog oblika. Fourierovom analizom je dobiven harmonijski sadržaj napona. Harmonijski je sadržaj uspoređen

s harmonijskom analizom napona pomoću WaveStara. Fourierov red rastavlja periodičnu funkciju u sumu jednostavnih oscilatornih funkcija, tj. u sinusne i kosinusne članove. Ti redovi se koriste samo za perodične valne oblike te izgledaju kako je prikazano formulama:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty}(a_n coskx + b_n sinkx) \tag{4-1}$$

gdje je $\frac{a_0}{2}$ srednja vrijednost napona valnog oblika

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)dt \tag{4-2}$$

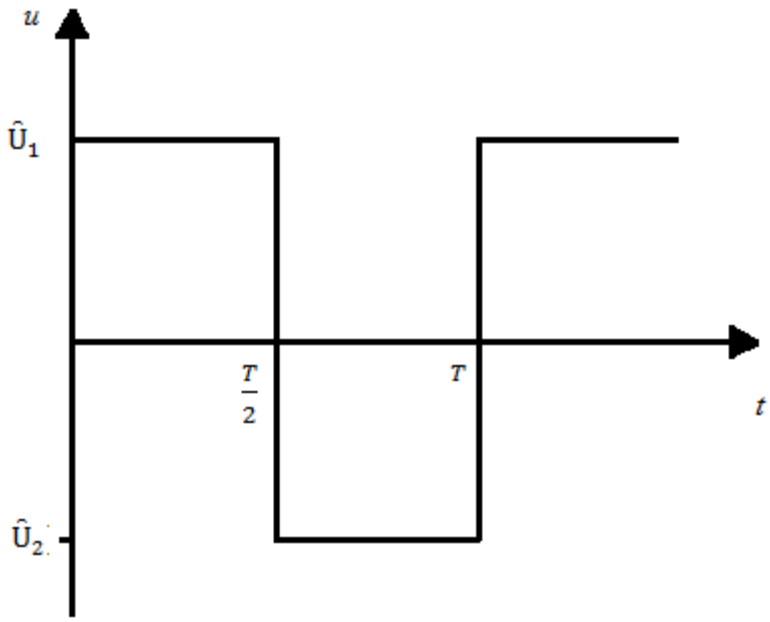
gdje je T period valnog oblika

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)cosn\omega t\ dt\ \ n = 1,2,3,4,5 \ldots \tag{4-3}$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \tag{4-4}$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)sinn\omega t dt \tag{4-5}$$

Napravljena je Fourierova analiza za pravokutni valni oblik prikazan slikom 4.2., te su dobiveni rezultati uspoređeni s mjerenjima WaveStara. Usporedba je rađena tablično i stupčasto radi provjere odstupanja mjerenja dobivenih pomoću WaveStara od računski dobivenih vrijednosti [3].



$$\hat{U}_1 = |\hat{U}|_2$$

Sl. 4.2. *Izmjenični pravokutni valni oblik napona*

Za pravokutni valni oblik pomoću navedenih formula izračunavanju se vrijednosti harmonika, te ih se uspoređuje sa izmjerenim vrijednostima istog valnog oblika u WaveStaru.

Iz (4-2) slijedi:

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^T f(t)dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T}\int_0^{\frac{T}{2}} \hat{U}_1 dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} \hat{U}_2 dt = \frac{2}{T}\left\{\hat{U}_1 \frac{T}{2} + \hat{U}_2 \frac{T}{2}\right\} = \hat{U}_1 + \hat{U}_2$$

Budući da je $\hat{U}_1 = -\hat{U}_2$ njihov je zbroj nula, $a_0 = 0$

Iz(4-3) slijedi

$$a_0 = \frac{2}{T}\left[\int_0^{\frac{T}{2}} \hat{U}_1 \cos kt\, dt + \int_{\frac{T}{2}}^{T} \hat{U}_2 \cos kt\, dt\right] = \frac{2}{T}\left[\hat{U}_1 \left(\frac{1}{k}\sin kt\right)\Big|_0^{\frac{T}{2}} + \hat{U}_2 \left(\frac{1}{k}\sin kt\right)\Big|_{\frac{T}{2}}^{T}\right]$$

$$b_n = -\frac{2}{kt}\left[\hat{U}_1(\cos\frac{2\pi n}{T}\frac{T}{2} - 1) - \hat{U}_2\left(\cos\frac{2\pi n}{T}T - \cos\frac{2\pi n}{T}\frac{T}{2}\right)\right]$$

$$b_n = \frac{2}{kt}\left[-\hat{U}_1 \cos 2\pi n + (\hat{U}_1 + \hat{U}_2)\cos n\pi - \hat{U}_1\right]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n}\left[\hat{U}_2 \cos 2\pi n - (\hat{U}_1 + \hat{U}_2)\cos n\pi - \hat{U}_1\right]$$

$$b_n = \frac{1}{\pi n}\left[\left(\hat{U}_1 + \hat{U}_2\right) - (\hat{U}_1 + \hat{U}_2)\cos n\pi\right] \; n = 1,2,3,4,5 \ldots$$

Do sada je rađeno sa općim brojevima, nadalje se uzima da su $\hat{U}_1 = \hat{U}_2 = \hat{U}$ te slijedi:

$$b_n = \frac{\hat{U}}{\pi n}\left[(1+1) - (1+1)\cos n\pi\right]$$

$$b_n = \frac{\hat{U}}{\pi n}\left[-2\cos n\pi + 2\right]$$

Pa razvoj napona u Fourierov red glasi:

u(t)=$\sum_{k=1}^{\infty}\left(\frac{\hat{U}}{\pi n}(-2\cos n\pi + 2)\right)\sin kt \;\; n = 1,2,3,4,5 \ldots$

razvojem funkcije u(t) za prva tri člana dobiveno je: $\frac{T}{2}$

$$u(t) = \frac{4\hat{U}}{\pi}\sin t + \frac{4\hat{U}}{3\pi}\sin 3t + \frac{4\hat{U}}{5\pi}\sin 5t \ldots \tag{4-6}$$

Čla b_n postoji samo za neparne *n*-ove, jer je uvrštavanjem parnih *n*-ova dobiveno $b_n = 0$. Član b_n za *n*=1,3,5,7,9 je

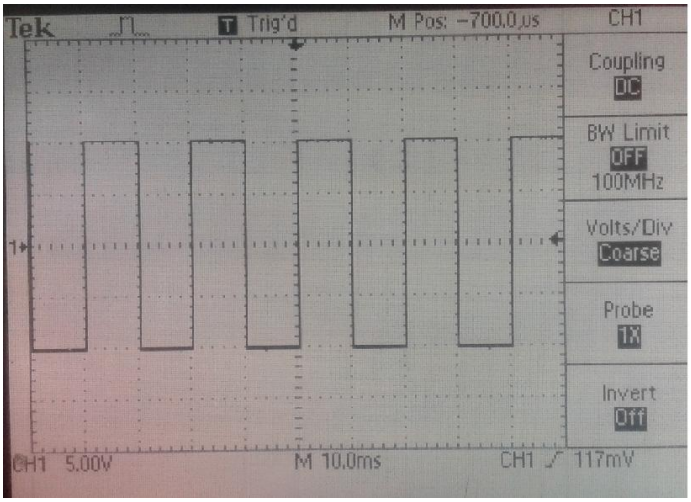
$$b_n = \frac{4\hat{U}}{n\pi} \tag{4-7}$$

Članovi a_n su jednaki nuli. Zaključeno je da za pravokutni valni oblik napona postoje samo neparni harmonici (prvi, treći, sedmi itd.), a parani harmonici za isti valni oblik ne postoje Rješavajući (4-2) dobiveno je da je srednja vrijednost valnog oblika jednaka nuli.

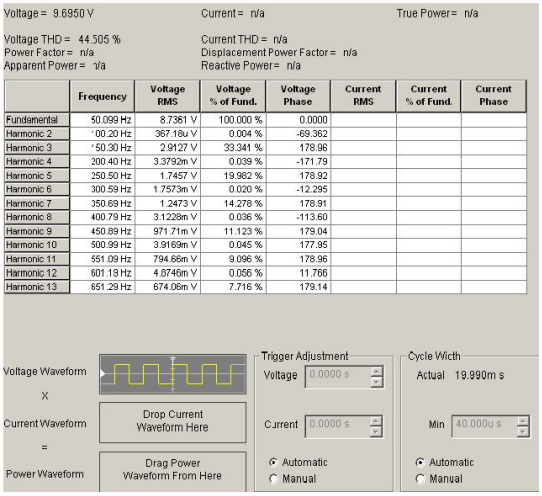
Napravljena su mjerenja u WaveStaru za isti signal, te su uspoređeni dobiveni i izračunati podaci. Za usporedbu s izračunatim podacima uzeti su harmonici čija postotna vrijednost u odnosu na osnovni harmonik prelazi 10%.

4.2. Automatske postavke vremenskog intervala uzorkovanja podataka

Pri zadanom valnom obliku određena su ograničenja osciloskopa da za nedovoljne velike vremenske baze ne daje točna rješenja. Za mjerenja se koriste dovoljno velike vremenske baze za koje se ne pojavljuje upozorenje u HAS-u o nedovoljnoj vremenskoj bazi. To su: 10 ms/ds, 25 ms/ds, 50 ms/ds. Valni oblici pri vremenskim bazama 10 ms/ds, 25 ms/ds, 50 ms/ds preuzeti su s osciloskopa.



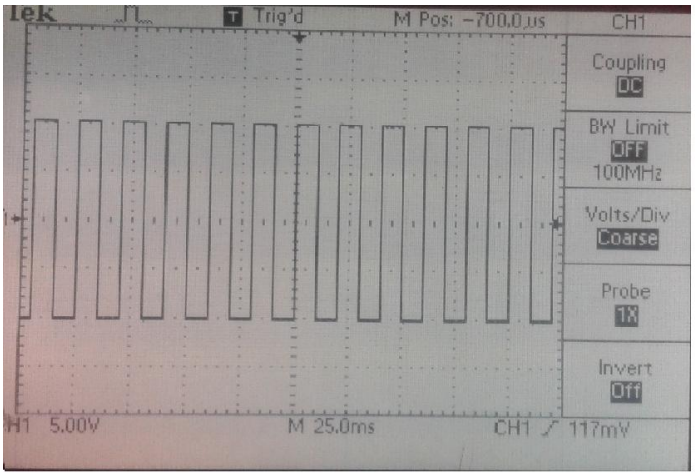
Sl. 4.3. a) *Valni oblik napona*

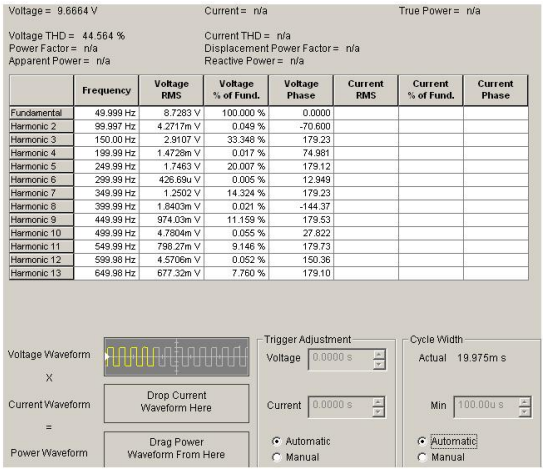


	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	50.099 Hz	8.7361 V	100.000 %	0.0000			
Harmonic 2	100.20 Hz	367.18u V	0.004 %	-69.362			
Harmonic 3	150.30 Hz	2.9127 V	33.341 %	178.96			
Harmonic 4	200.40 Hz	3.3792m V	0.039 %	-171.79			
Harmonic 5	250.50 Hz	1.7457 V	19.982 %	178.92			
Harmonic 6	300.59 Hz	1.7573m V	0.020 %	-12.295			
Harmonic 7	350.69 Hz	1.2473 V	14.278 %	178.91			
Harmonic 8	400.79 Hz	3.1228m V	0.036 %	-113.60			
Harmonic 9	450.89 Hz	971.71m V	11.123 %	179.04			
Harmonic 10	500.99 Hz	3.9169m V	0.045 %	177.95			
Harmonic 11	551.09 Hz	794.66m V	9.096 %	178.96			
Harmonic 12	601.19 Hz	4.8746m V	0.056 %	11.766			
Harmonic 13	651.29 Hz	674.06m V	7.716 %	179.14			

Sl. 4.3. b) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Za zadani valni oblik pri vremenskoj bazi 10 ms/ds prikazan slikom 2.7. a), dobivene su značajne vrijednosti samo za neparne harmonike (Sl.4.3. b)). Harmonici 1., 3., 5. i 7. prelaze postotnu vrijednost 10% te će se uspoređivati s izračunatim vrijednostima.



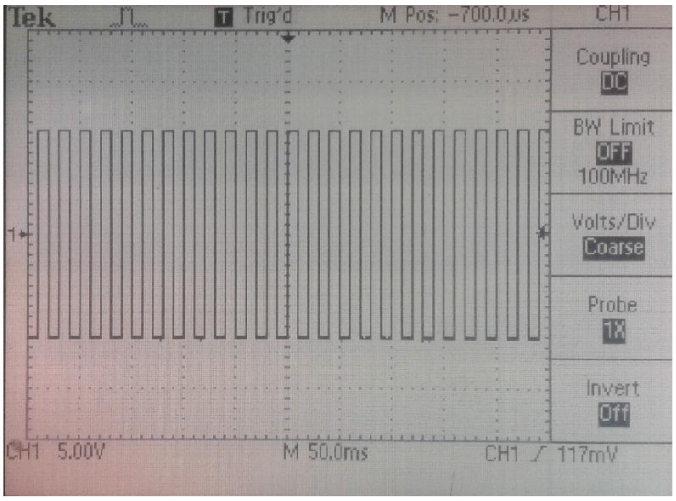


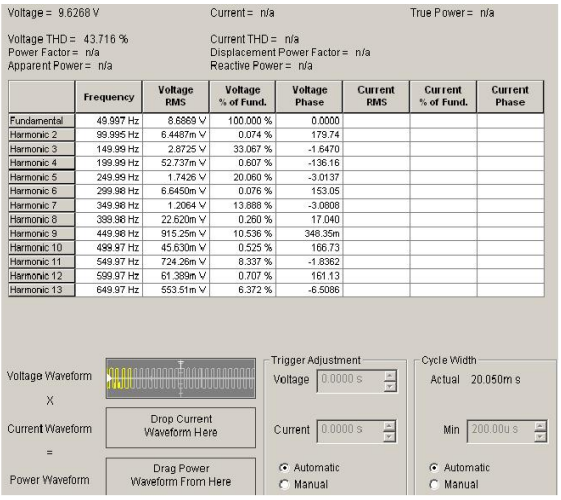
	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.999 Hz	8.7283 V	100.000 %	0.0000			
Harmonic 2	99.997 Hz	4.2717m V	0.049 %	-70.600			
Harmonic 3	150.00 Hz	2.9107 V	33.348 %	179.23			
Harmonic 4	199.99 Hz	1.4728m V	0.017 %	74.981			
Harmonic 5	249.99 Hz	1.7463 V	20.007 %	179.12			
Harmonic 6	299.99 Hz	426.69u V	0.005 %	12.949			
Harmonic 7	349.99 Hz	1.2502 V	14.324 %	179.23			
Harmonic 8	399.99 Hz	1.8403m V	0.021 %	-144.37			
Harmonic 9	449.99 Hz	974.03m V	11.159 %	179.53			
Harmonic 10	499.99 Hz	4.7804m V	0.055 %	27.822			
Harmonic 11	549.99 Hz	798.27m V	9.146 %	179.73			
Harmonic 12	599.98 Hz	4.5706m V	0.052 %	150.36			
Harmonic 13	649.98 Hz	677.32m V	7.760 %	179.10			

Sl. 4.4. a) *Valni oblik napona*

Sl. 4.4. b) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Pri vremenskoj bazi 25 ms/ds slikom pri harmonijskoj analizi valnog oblika prikazanog slikom 4.4. a), su dobiveni su slični rezultati kao pri 10 ms/ds. Parni harmonici ne postoje (Sl.4.4. b)), a 1., 3., 5. i 7. harmonik će se uspoređivati s izračunatim vrijednostima.





	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS	Current % of Fund.	Current Phase
Fundamental	49.997 Hz	8.6869 V	100.000 %	0.0000			
Harmonic 2	99.995 Hz	6.4487m V	0.074 %	179.74			
Harmonic 3	149.99 Hz	2.8725 V	33.067 %	-1.6470			
Harmonic 4	199.99 Hz	52.737m V	0.607 %	-136.16			
Harmonic 5	249.99 Hz	1.7426 V	20.060 %	-3.0137			
Harmonic 6	299.98 Hz	6.6450m V	0.076 %	153.05			
Harmonic 7	349.98 Hz	1.2064 V	13.888 %	-3.0808			
Harmonic 8	399.98 Hz	22.620m V	0.260 %	17.040			
Harmonic 9	449.98 Hz	915.25m V	10.536 %	348.35m			
Harmonic 10	499.97 Hz	45.630m V	0.525 %	166.73			
Harmonic 11	549.97 Hz	724.26m V	8.337 %	-1.8362			
Harmonic 12	599.97 Hz	61.389m V	0.707 %	161.13			
Harmonic 13	649.97 Hz	553.51m V	6.372 %	-6.5086			

Sl. 4.5. a) *Valni oblik napona*

Sl. 4.5. b) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Pri vremenskoj bazi 50 ms/ds se također rezultati slični prethodnima te se opet uzimaju prva četiri neparna harmonika radi usporedbe s izračunatim harmonicima.

Na slikama 4.3.b), 4.4. b), 4.5.b) prikazani su rezultati izračuna u HAS-u u tabličnom obliku. Kao što je i očekivano pojavljuju se samo neparni harmonici. Njihov iznos je prikazan u postotnim i efektivnim vrijednostima. Nakon provedenih mjerenja WaveStarom, izračunati rezultati se uspoređuju sa snimljenim rezultatima.

Izračunati koeficijenti Fourierove analize:

$$b_1 = \frac{4\hat{U}}{n\pi} = \frac{4\times10}{1\times3.14} = 12.73\ V \quad b_3 = \frac{4\hat{U}}{n\pi} = \frac{4\times10}{3\times3.14} = 4.24\ V \quad b_5 = \frac{4\hat{U}}{n\pi} = \frac{4\times10}{5\times3.14} = 2.54\ V$$

$$b_7 = \frac{4\hat{U}}{n\pi} = \frac{4\times10}{7\times3.14} = 1{,}82\ V \qquad b_{1ef} = \frac{12{,}73\ V}{\sqrt{2}} = 9.003\ V$$

Izračunate vrijednosti su dobivene s vršnim vrijednostima napona. Da bi se dobile efektivne vrijednosti napona, dobivene vrijednosti se dijele s $\sqrt{2}$, što je izračunato ranije u tekstu za b_{1ef}. Rezultati mjerenja u WaveStarovim potprogramima su prikazani u efektivnim vrijednostima. Budući da su vrijednosti izračunatih i izmjerenih podataka pretvorene u efektivne, mogu se uspoređivati. Vrijednosti amplituda harmonika su uspoređene s izračunatim vrijednostima u tablici, izračunata su odstupanja.

Tablica 4.1. ***Usporedba izmjerenih i izračunatih amplituda harmonika***

r.br.	Vremenska baza(ms/ds)	Vrijednosti	Harmonici,n			
			1.	3.	5.	7.
Izračunate vrijednosti harmonika			9,003	3,001	1,801	1,2861
1	10	U(n)[V]	8,736	2,913	1,746	1,2473
		U(n) [%]	100	33,341	19,882	11,123
		Odst.[%]	2,976	2,932	3,063	3,01
2	25	U(n)[V]	8,783	2,910	1,746	1,2502
		U(n) [%]	100	33,348	20,007	14,324
		Odst.[%]	2,442	3,033	5,5	2,791
3	50	U(n)[V]	8,687	2,873	1,743	1,2064
		U(n) [%]	100	33,067	20,060	13,888
		Odst.[%]	3,16	4,265	3,22	6,1970

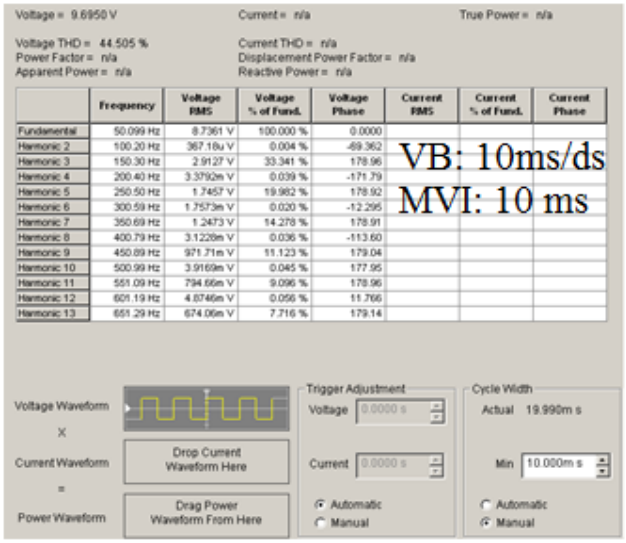
Mijenjajući vremenske baze, pri automatskim postavkama vremenskog intervala uzorkovanja, u WaveStaru su dobiveni su samo neparni harmonici (parni harmonici su zanemarivo malih vrijednosti). Odstupanja neparnih harmonika se kreću oko 3%, ali su približno jednaka te je moguće da je došlo do sistematske pogrške zbog neispravnosti instrumenta. Najveće odstupanje se pojavljuje za 7. harmonik pri vremenskoj bazi 50 ms/ds i iznosi 6,19%. Vrijednosti izmjerenih

harmonika, prema relaciji (4-7), odgovaraju analitičkom izračunu za izmjenični pravokutni valni oblik napona. WaveStar daje ispravne rezultate pri automatskim postavkama vremenskog intervala uzorkovanja za zadani valni oblik.

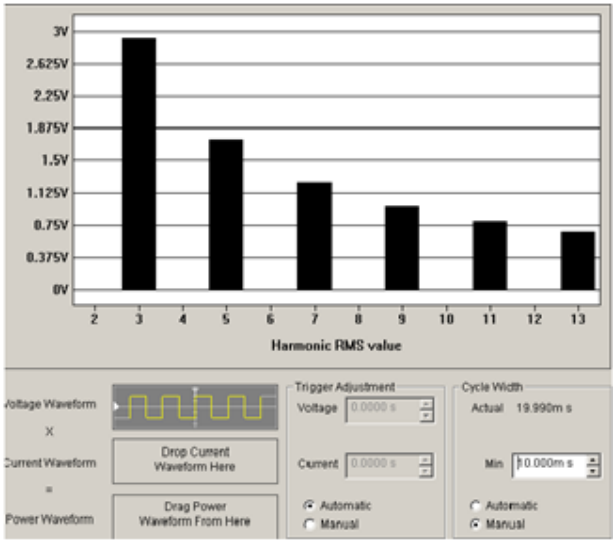
4.3. Ručne postavke perioda uzorkovanja u WaveStaru pri harmonijskoj analizi

Pri istom valnom obliku napona ručno su mijenjane vrijednosti minimalnog vremenskog intervala uzorkovanja podataka u HAS-u. Snimani su rezultati i utvrđivala njihova točnost usporedbom s analitičkim izračunom harmonika napona. Vremenske baze pri kojima je mjereno su: 10 ms/ds, 25 ms/ds, 50 ms/ds. Za svaku vremensku bazu se mijenjaju vrijednosti minimalnog vremenskog intervala tako da prva bude 0,5 temeljne periode signala, a druga ona pri kojoj dolazi do prve promjene stvarnog vremenskog intervala uzorkovanja. Na slikama su dodatno naglašeni: vremenska baza (skraćeno VB) i minimalni vremenski interval (skraćeno MVI), radi lakšeg uočavanja istih.

4.3.1. Pri vremenskoj bazi 10 ms/ds

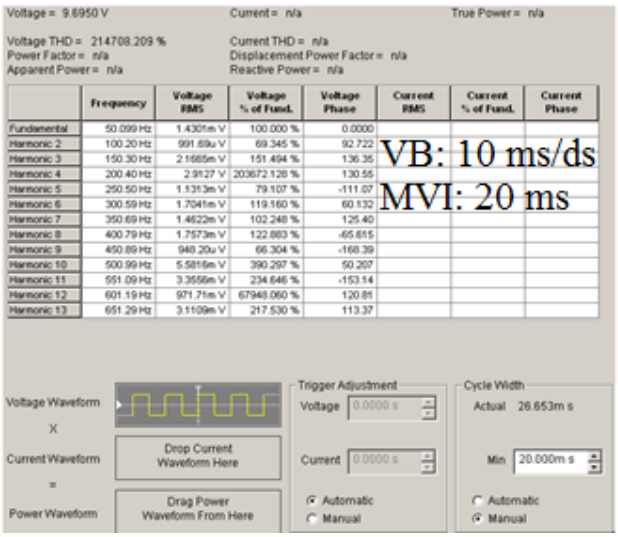


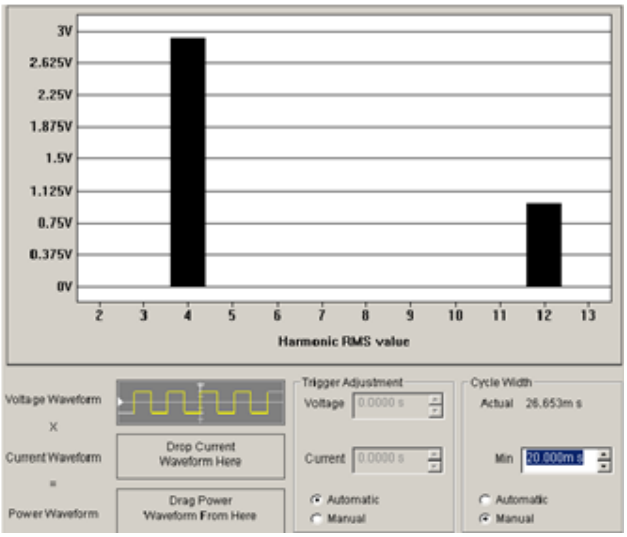
Sl. 4.6. a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*



Sl. 4.6. b) *Stupčasti prikaz amplituda harmonika napona u HAS-u*

Za minimalni vremenski interval od 10 ms (pola temeljne periode signala) stvarni vremenski interval je 19,990 ms, što znači da je jednak temeljnoj periodi. WaveStar daje rezultate identične rezultatima kao pri automatskim postavkama, iz čega je zaključeno da su ispravni.



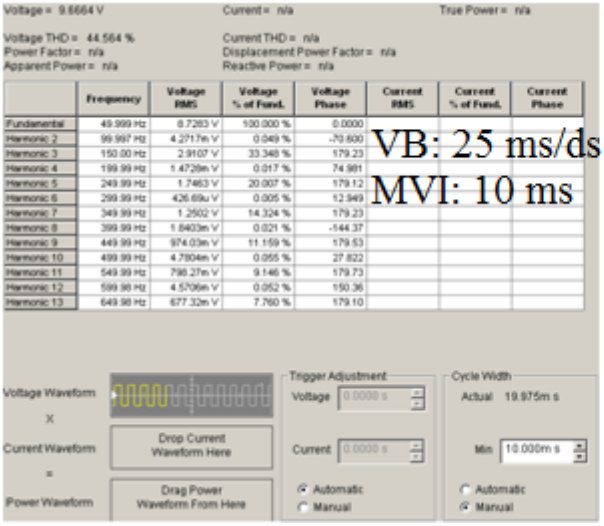


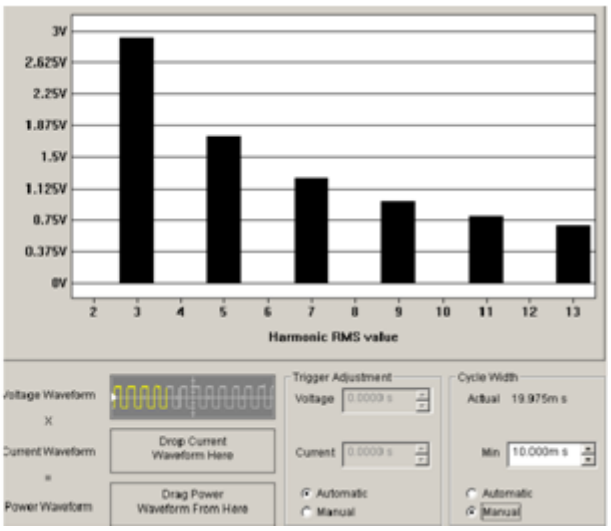
Sl. 4.7.a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Sl. 4.7.b) *Stupčasti prikaz amplituda napona u HAS-u*

Pri minimalnom vremenskom intevalu od 20 ms dolazi do promjene stvarnog vremenskog intervala u vrijednost 26,653 ms, prema relaciji (4-7) dobivene amplitude napona harmonika ne odgovaraju amplitudama zadanog napona. Ne dobiju se ispravni rezultati u WaveStaru. Pri svim vrijednostima većim od 20 ms se dobijaju rezultati neispravni prema analitici harmonijskog sadržaja.

4.3.2. Pri vremenskoj bazi 25 ms/ds



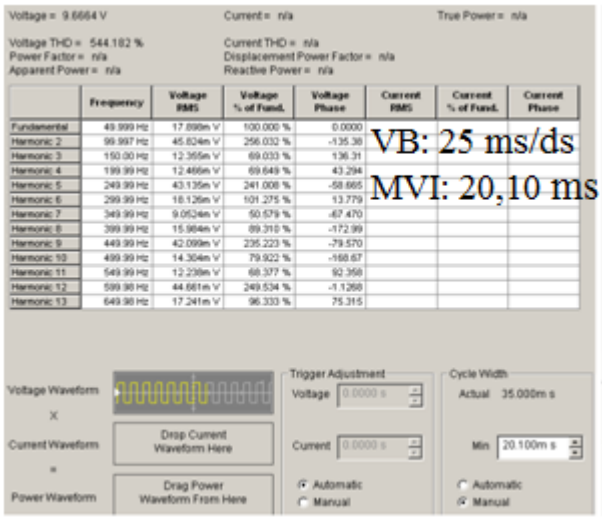


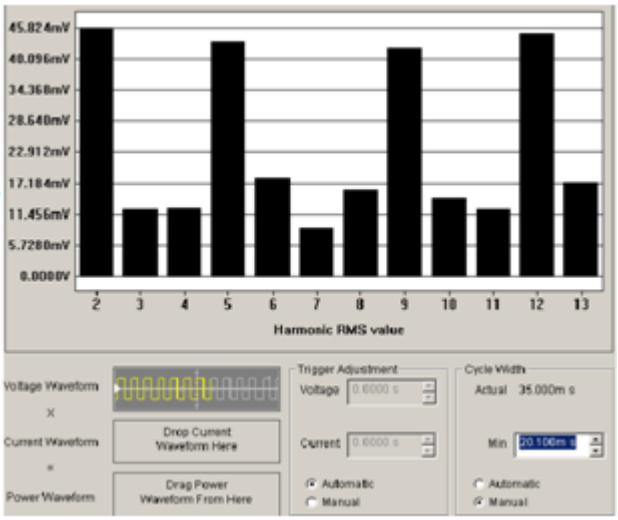
Sl. 4.8. a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Sl. 4.8. b) *Stupčasti prikaz amplituda harmonika napona u HAS-u*

Kada je minimalni vremenski interval uzorkovanja postavljen na 10 ms stvarni vremenski interval je 19,975 ms i rezulati harmonijske analize odgovaraju rezultatima pri automatskim

postavkama. Rezultati u HAS-u su ispravni, prema relaciji (4-7), koja vrijedi za zadani valni oblik.



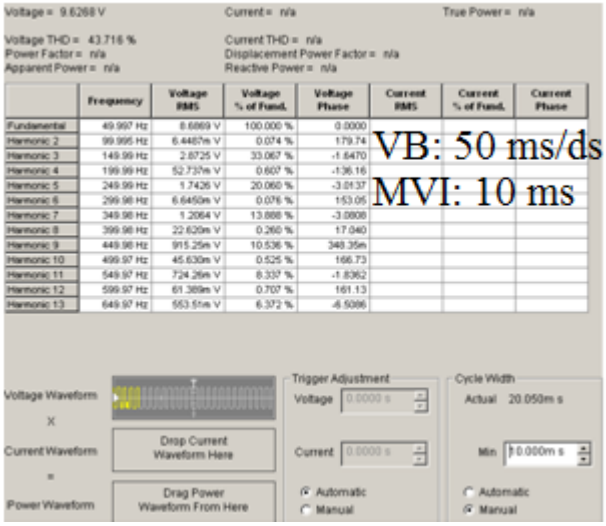


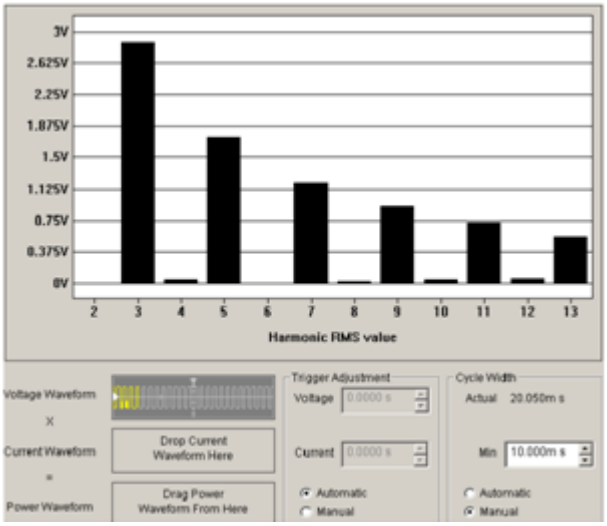
Sl. 4.9. a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Sl. 4.9. b) *Stupčasti prikaz amplituda harmonika napona u HAS-u*

Povećavajući vrijednost minimalnog vremenskog intervala na vrijednost 20,10 ms (veću od temeljne periode), stvarni vremenski interval se povećava na 35,000 ms rezultati harmonijske analize su netočni prema relaciji (4-7). Rezultati pri svim vrijednostima minimalnog vremenskog intervala uzorkovanja većima od 20,10 ms su netočni.

4.3.3. Pri vremenskoj bazi 50 ms/ds

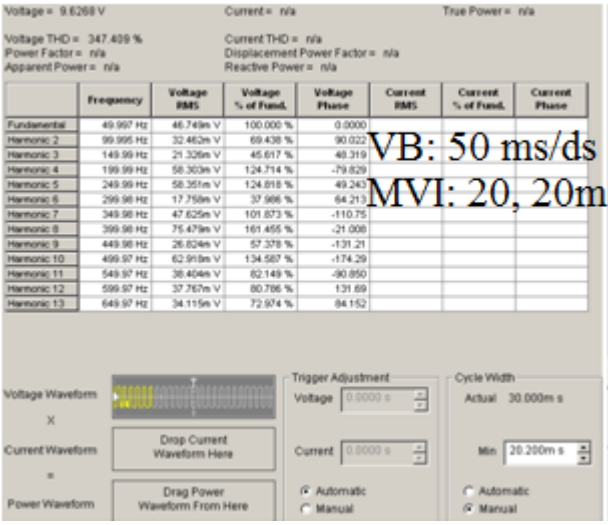


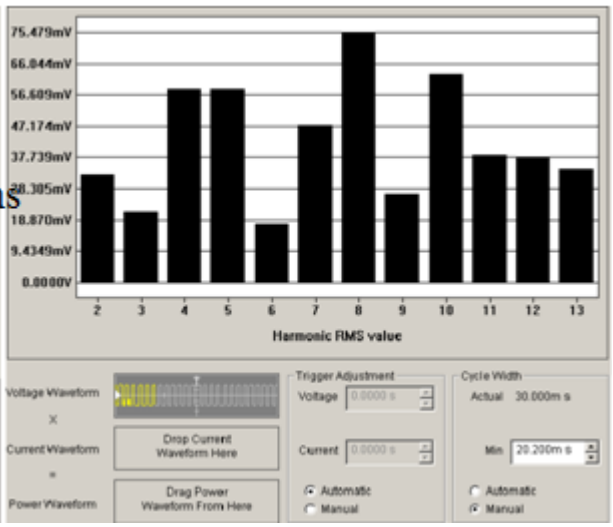


Sl. 4.10. a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u*

Sl. 4.10. b) *Stupčasti prikaz amplituda harmonika napona u HAS-u*

Pri vrijednosti minimalnog vremenskog intervala 10 ms vrijednost stvarnog vremenskog intervala je 20,050 ms. Rezultati harmonijske analize su identični rezultatima pri automatskim postavkama vremenskog intervala. Rezultati harmonijske analize u HAS-u su ispravni.



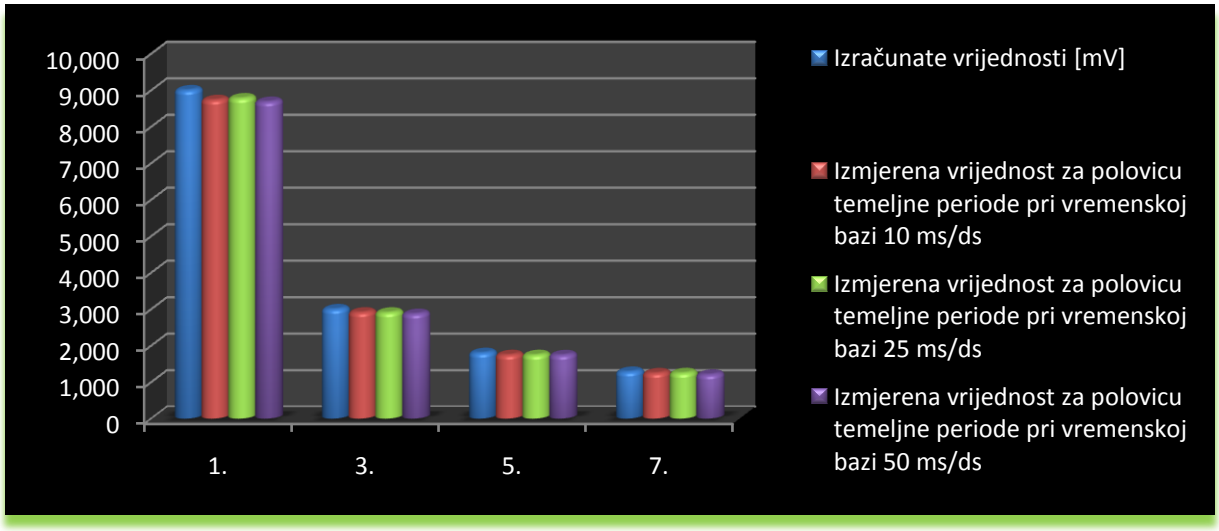


Sl. 4.11. a) *Tablični prikaz amplituda napona harmonika u HAS-u.*

Sl. 4.11. b) *Stupčasti prikaz amplituda harmonika napona u HAS-u*

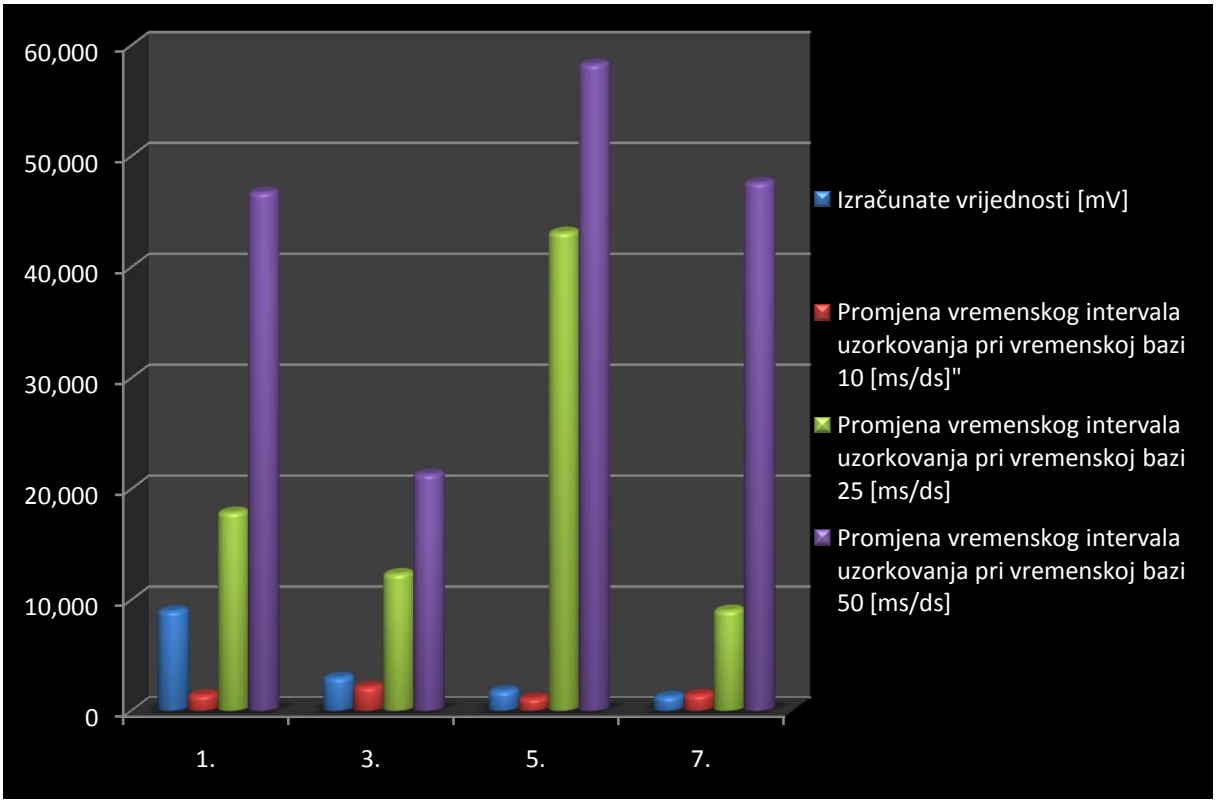
Kada se vrijednost minimalnog vremenskog intervala poveća na 20,20 ms, stvarni vremenski interval se poveća na 30,000 ms. Amplitude napona harmonika ne odgovaraju relaciji (4-7). Rezultati harmonijske analize su neispravni. Za svaku veću vrijednost minimalnog vremenskog intervala dobiju se neispravni rezultati.

Usporedba izračunatih i izmjerenih rezultata: Stupčastim prikazom je prikazan odnos izmjerenih i izračunatih rezultata za dva vremenska intervala uzorkovanja podataka.



Sl.4.12. *Stupčasti prikaz izmjerenih i izračunatih rezultata*

Slikom 4.12. stupčasto su prikazane izmjerene i izračunate vrijednosti harmonika napona pri vremenskom intervalu uzorakovanja 10 ms. Plavi stupci prikazuju izračunate vrijednosti, a ostali izmjerene vrijednosti harmonika pri različitim vremenskim bazama, a pri istim vremenskim intervalom uzorkovanja koji iznosi 10 ms. Rezultati dobiveni u WaveStaru su točni, uz tehnički prihvatljivo odstupanje od otprilike 3 %. Najveće odstupanje je identično kao i pri automatskim postavkama: 6,19 % za 7. harmonik pri 50 ms/ds.



Sl. 4.13. *Stupčasti prikaz izmjerenih i izračunatih rezultata*

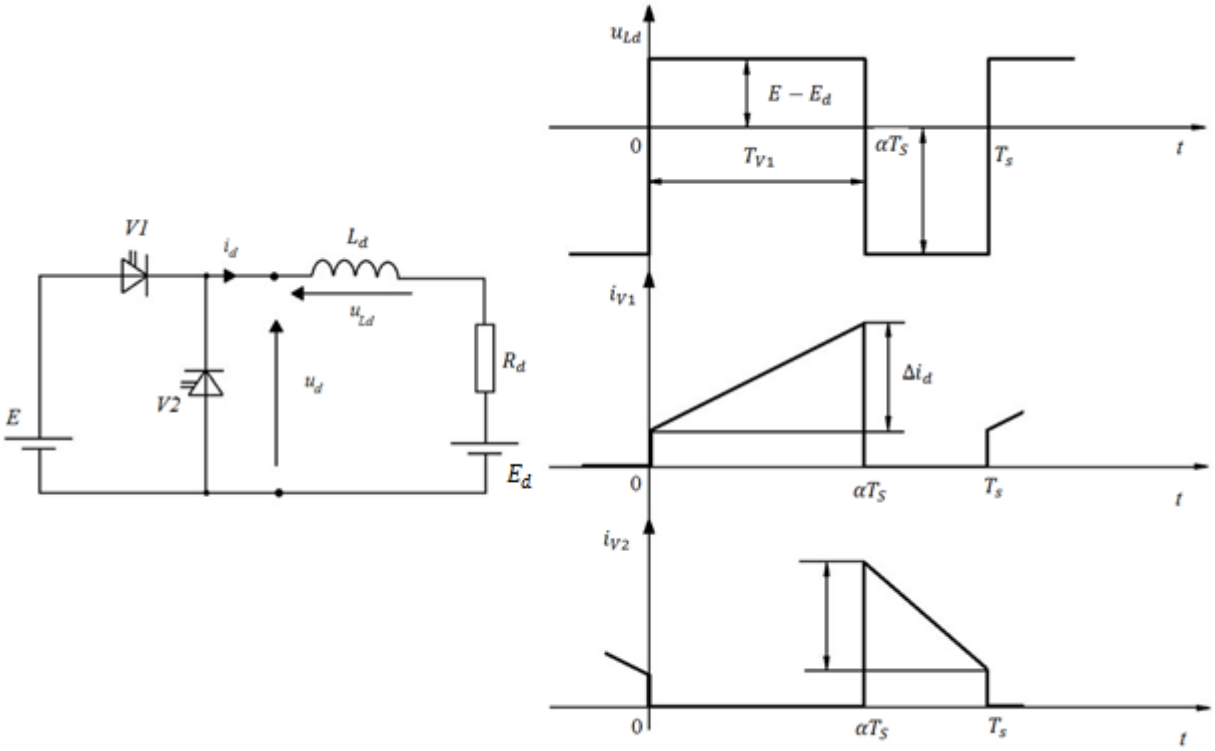
Slikom 4.13. je prikazana usporedba izmjerenih i izračunatih rezultata nakon promjene vremenskog intervala na vrijednost jednaku temeljnoj periodi signala. Prikazani su 1., 3., 5., i 7. harmonik. Primjećena su značajna odstupanja od izračunatih rezultata jer rezultati dobiveni WaveStara nisu ispravni za zadani valni oblik napona.

5. ANALIZA HARMONIJSKOG SADRŽAJA STRUJE PRIGUŠNICE SILAZNOG ISTOSMJERNOG PRETVARAČA NAPONA

Za ustaljena stanja osnovno periodičko rješenje i dvostruko periodičko rješenje, za različite radne točke, mjeri se harmonijski sadržaj WaveStarom.

5.1. Silazni pretvarač napona

Istosmjerni silazni pretvarači napona služe povezivanju dvaju istosmjernih sustava. Služe pretvorbi jedne razine istosmjernog napona u drugu. Koriste se za napajanje elektroničkih sklopova, trošila različitih naponskih nivoa iz akumulatorskih baterija, za pogon i reguliranje brzine vlaka koja su trošila velikih snaga[4][5].



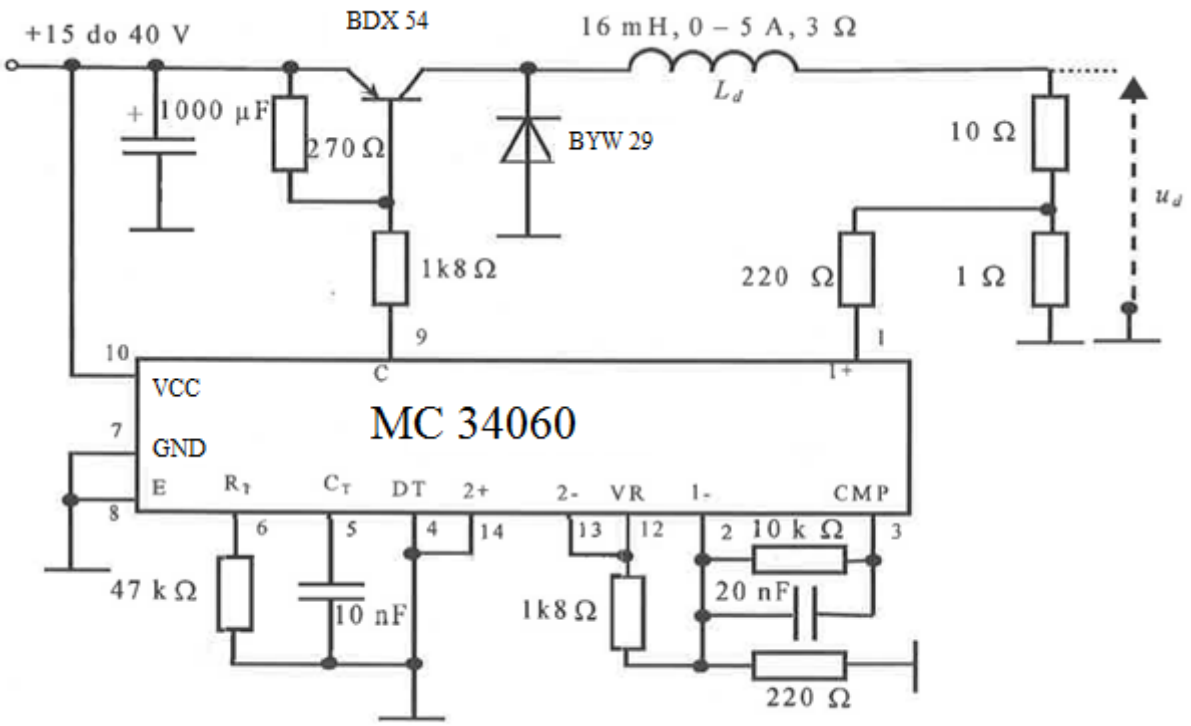
Sl. 5.1. *Karakteristični valni oblici pri valovitoj struji trošila*

Struja trošila I_d je uvijek je veća od srednje vrijednosti struje izvora, tj. $I_d > I_E(0)$. Dobiveno je strujno pojačanje. Ulazna snaga istosmjernog strujnog pretvarača jednaka je izlaznoj snazi $EI_E(0) = U_d(0)I_d$, stoga je strujno pojačanje ostvarivo samo ako je srednja vrijednost napona na trošilu $U_d(0)$ uvijek manja od napona E naponskog izvora:

$$U_d(0) < E \tag{5-1}$$

Zato se ovaj istosmjerni pretvarač zove silazni istosmjerni pretvarač.[6]

U ovome radu korišten je silazni istosmjerni pretvarač 7V/1A. Silazni pretvarač napona tvore upravljački i energetski dio. Energetski dio se sastoji od: tranzistora BDX 54, diode BYW 29 i zavojnice L_d. Upravljački dio čine integrirani krug MC 34060 i ostale pasivne komponente prikazane slikom 5.2. [7]. Karakteristike silaznog istosmjernog pretvarača su da se promjenom ulaznog napona mijenja ustaljeno stanje, te dolazi do udostručenja periode [3].



Sl. 5.2. *Shema spoja silaznog istosmjernog pretvarača [1]*

Opis mjerenja:

Ulazni napon se povećava do točke bifurkacije (prijelaz iz jednog periodičkog rješenja u drugo), napravljena su mjerenja te harmonijske analize u WaveStaru za ustaljeno stanje pri ulaznom naponu prije prelaska osnovnog u dvostruko periodičko rješenje te za dvije radne točke pri dvostrukom periodičkom rješenju. Za svako periodičko rješenje, odnosno radnu točku, mijenja se vremenska baza na osciloskopu na vrijednosti 250 µs, 500 µs i 1 ms i prate promjene pri

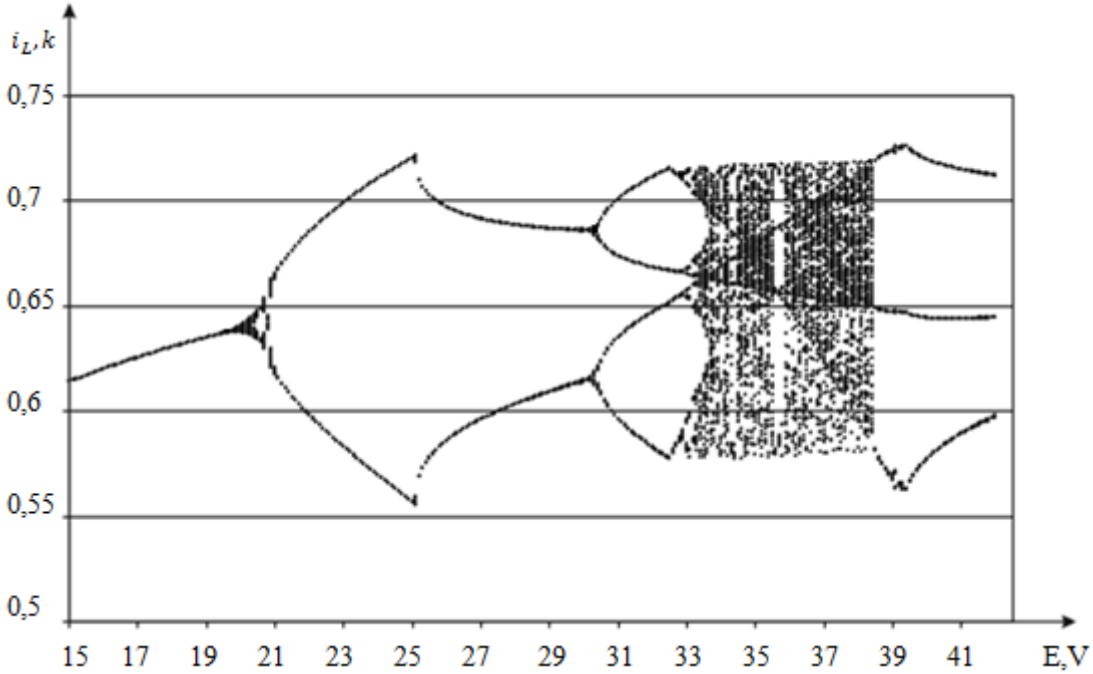
harmonijskoj analizi u WaveStaru. Budući da su rezultati harmonijske analize slični za sve 3 vremenske baze, za usporedbu rezultata u daljnjem tekstu, koristit će se isključivo rezultati pri vremenskoj bazi 250 μs.

Tablicom 5.1. prikazana su ustaljena stanja istosmjernog silaznog ispravljača u ovisnosti o ulaznom naponu [8]. Za mjerenja su korišteni podaci za osnovno i dvostruko periodičko rješenje.

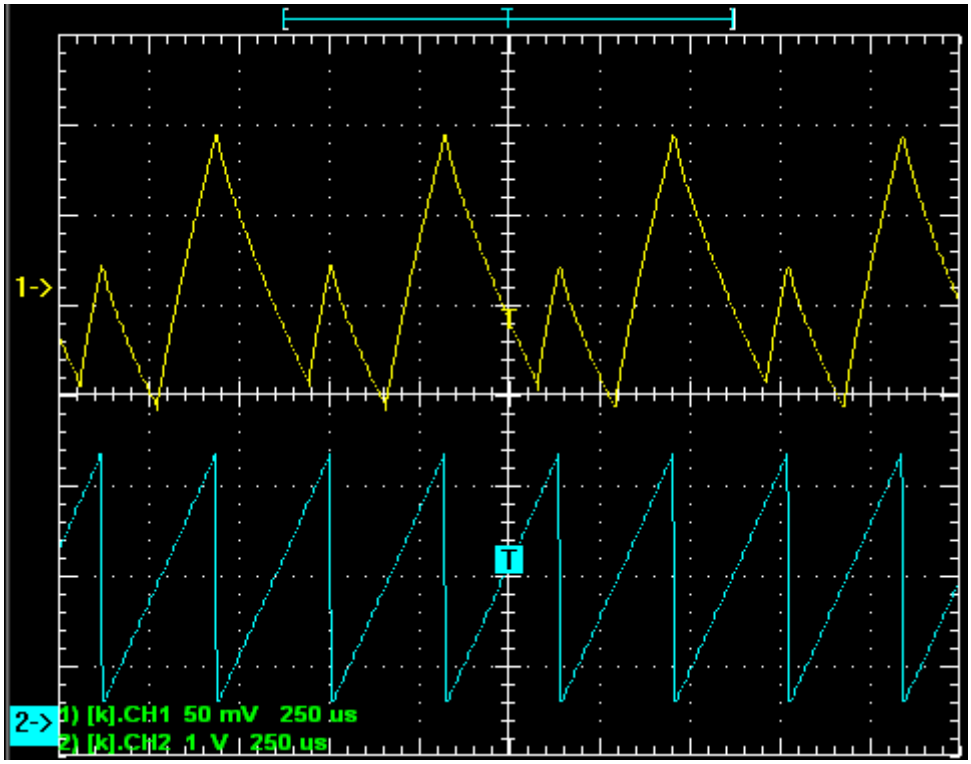
Tab. 5.1. *Promjene ustaljenih stanja istosmjernog silaznog pretvarača mijenjanjem ulaznog napona identificirane mjerenjem i simulacijom*

Ustaljena stanja	**Ulazni napon E(V)** **Simulacija**	**Ulazni napon E(V)** **Mjerenje**	**Izlazni napon U_d(V)** **Mjerenje**
Osnovno perodičko rješenje	15-20,5	15,04-22,48	6,75-6,92
Dvostruko periodičko rješenje	20,05-30,3	22,48-32,47	6,92-7,03
Četverostruko periodičko rješenje	30,03-32,8	32,47-36,52	7,03-7,05
Kaotično rješenje	32,8-38,8	36,52-41,57	7,05-7,07
Trostruko periodičko rješenje	>38,8	>41,57	7,07

Bifurkacijski dijagram prikazan slikom 5.3., za silazni istosmjerni pretvarač 7V, 1A izrađen simulacijom, preuzet iz [9]



Sl. 5.3. *Bifurkacijski dijagram dobiven simulacijom za istosmjerni silazni pretvarač (7V, 1A)*

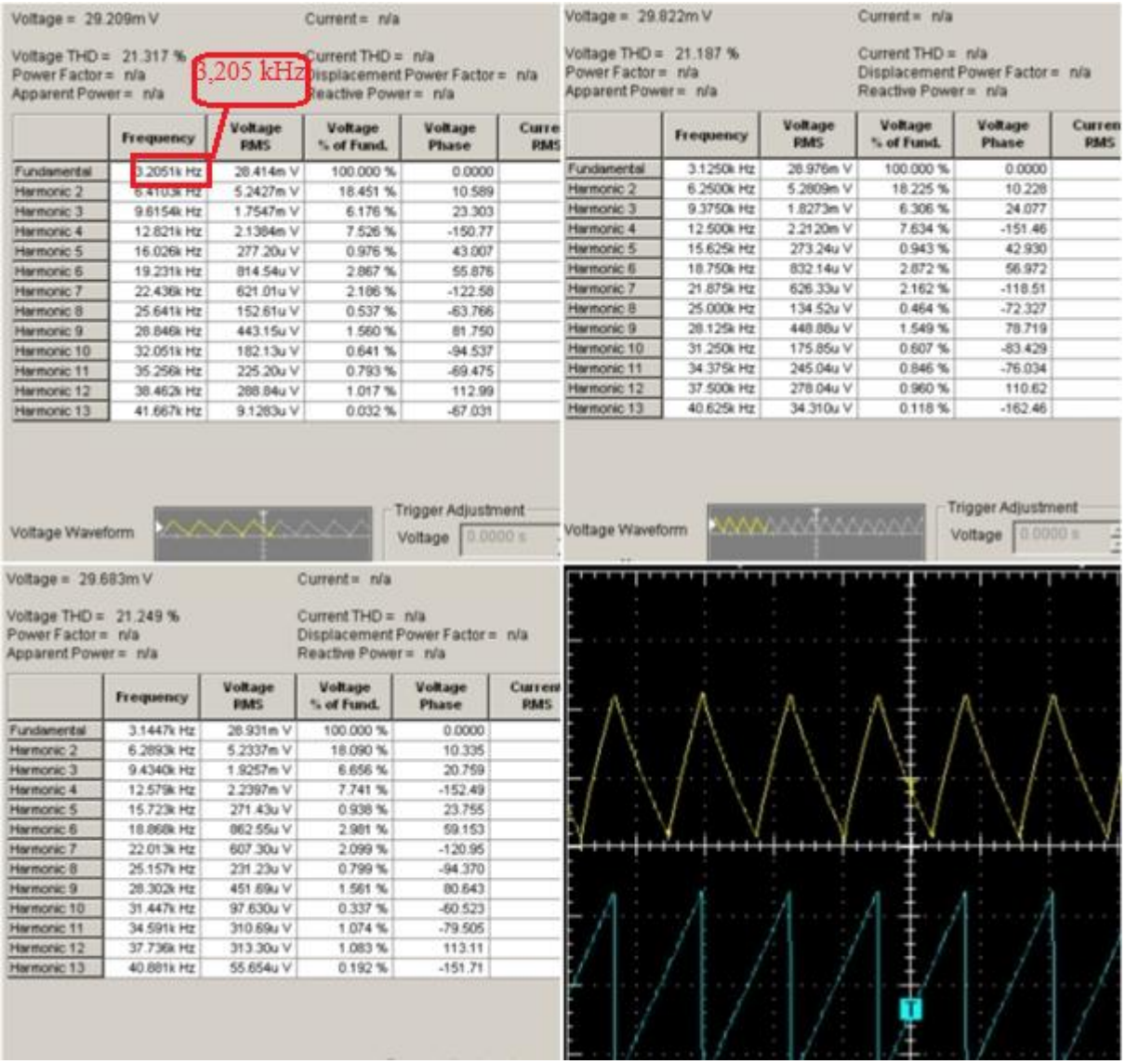


Sl.5.4. *Dvostruko periodičko rješenje za istosmjerni silazni pretvarač*

Slikom 5.4. su prikazani valni oblik struje prigušnice (broj 1) i napon rampe (broj 2) istosmjenog silaznog pretvarača za ustaljeno stanje. Brojanjem periode valnog oblika napona rampe unutar jedne periode valnog oblika struje prigušnice određuje se ustaljeno stanje. Budući da se u jednoj periodi struje prigušnice u ovom slučaju nalazi dvije periode valnog oblika napona rampe, radi se o dvostrukom perodičkom rješenju.

5.2. Osnovno periodičko rješenje

Prikazano osnovno periodičko rješenje je zapaženo pri ulaznom naponu 21,65 V.



	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Curre RMS
Fundamental	3.2051k Hz	28.414m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	6.4103k Hz	5.2427m V	18.451 %	10.589	
Harmonic 3	9.6154k Hz	1.7547m V	6.176 %	23.303	
Harmonic 4	12.821k Hz	2.1384m V	7.526 %	-150.77	
Harmonic 5	16.026k Hz	277.20u V	0.976 %	43.007	
Harmonic 6	19.231k Hz	814.54u V	2.867 %	55.876	
Harmonic 7	22.436k Hz	621.01u V	2.186 %	-122.58	
Harmonic 8	25.641k Hz	152.61u V	0.537 %	-63.766	
Harmonic 9	28.846k Hz	443.15u V	1.560 %	81.750	
Harmonic 10	32.051k Hz	182.13u V	0.641 %	-94.537	
Harmonic 11	35.256k Hz	225.20u V	0.793 %	-69.475	
Harmonic 12	38.462k Hz	288.84u V	1.017 %	112.99	
Harmonic 13	41.667k Hz	9.1283u V	0.032 %	-67.031	

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Curren RMS
Fundamental	3.1250k Hz	28.976m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	6.2500k Hz	5.2809m V	18.225 %	10.228	
Harmonic 3	9.3750k Hz	1.8273m V	6.306 %	24.077	
Harmonic 4	12.500k Hz	2.2120m V	7.634 %	-151.46	
Harmonic 5	15.625k Hz	273.24u V	0.943 %	42.930	
Harmonic 6	18.750k Hz	832.14u V	2.872 %	56.972	
Harmonic 7	21.875k Hz	626.33u V	2.162 %	-118.51	
Harmonic 8	25.000k Hz	134.52u V	0.464 %	-72.327	
Harmonic 9	28.125k Hz	448.88u V	1.549 %	78.719	
Harmonic 10	31.250k Hz	175.85u V	0.607 %	-83.429	
Harmonic 11	34.375k Hz	245.04u V	0.846 %	-76.034	
Harmonic 12	37.500k Hz	278.04u V	0.960 %	110.62	
Harmonic 13	40.625k Hz	34.310u V	0.118 %	-162.46	

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Curren RMS
Fundamental	3.1447k Hz	28.931m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	6.2893k Hz	5.2337m V	18.090 %	10.335	
Harmonic 3	9.4340k Hz	1.9257m V	6.656 %	20.759	
Harmonic 4	12.579k Hz	2.2397m V	7.741 %	-152.49	
Harmonic 5	15.723k Hz	271.43u V	0.938 %	23.755	
Harmonic 6	18.868k Hz	862.55u V	2.981 %	59.153	
Harmonic 7	22.013k Hz	607.30u V	2.099 %	-120.95	
Harmonic 8	25.157k Hz	231.23u V	0.799 %	-94.370	
Harmonic 9	28.302k Hz	451.69u V	1.561 %	80.643	
Harmonic 10	31.447k Hz	97.630u V	0.337 %	-60.523	
Harmonic 11	34.591k Hz	310.69u V	1.074 %	-79.505	
Harmonic 12	37.736k Hz	313.30u V	1.083 %	113.11	
Harmonic 13	40.881k Hz	55.654u V	0.192 %	-151.71	

Sl. 5.5. *Isječci harmonijske analize iz HAS-a i karakteristični valni oblici*

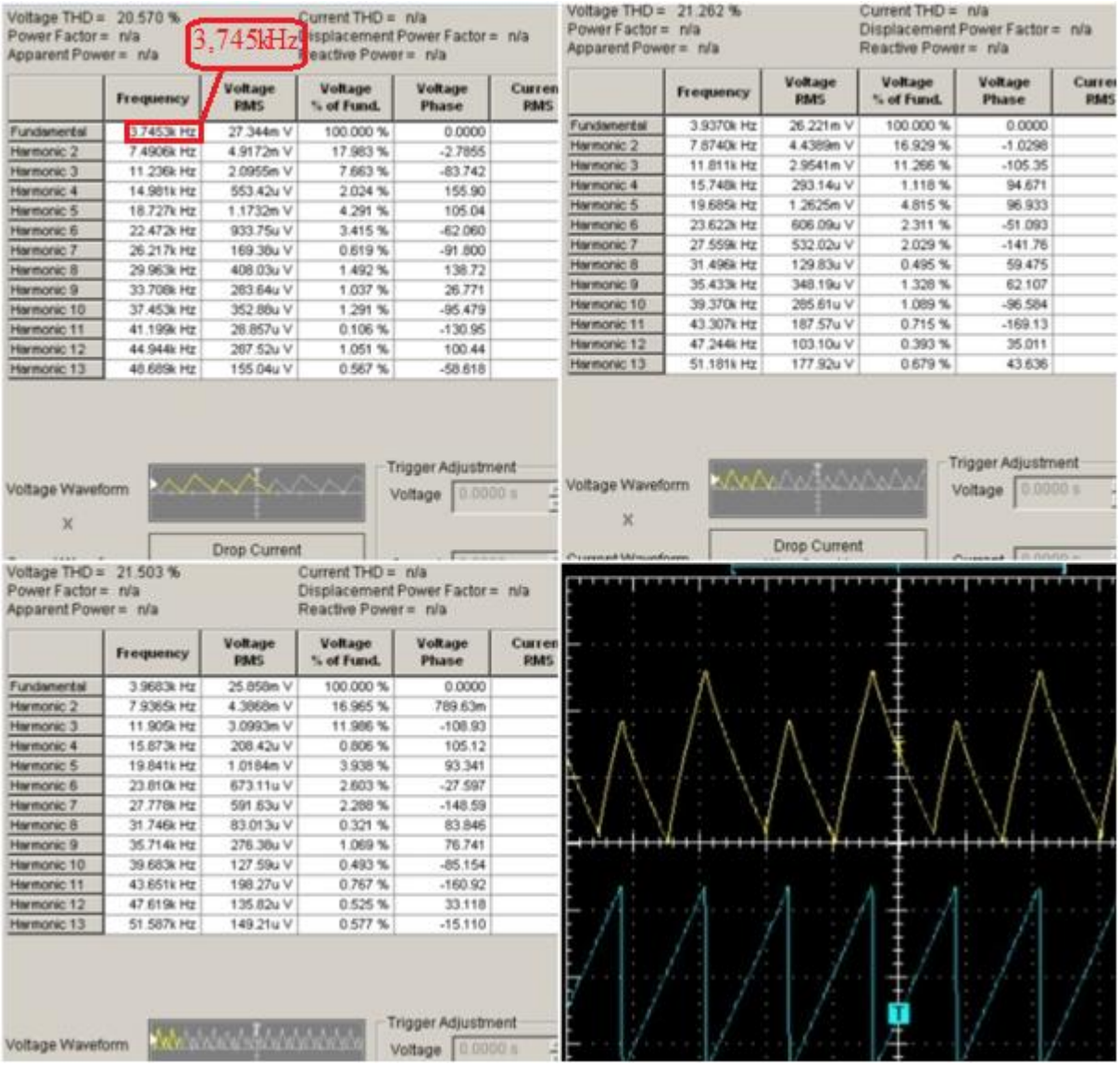
Iz slike 5.5. iz valnih oblika zaključujemo je da se radi o osnovnom periodičkom rješenju. Za sve tri vremenske baze dominatni je harmonik izmjeren na frevenciji od nešto višoj od 3 kHz (3,205 kHz) što je prihvatljiv rezultat budući da pretvarač radi na 3 kHz.

5.2. Dvostruko periodičko rješenje

Izvedena su dva mjerenja pri različitim vrijednostima ulaznoga napona za ustaljeno stanje.

5.2.1. Prva radna točka

Pri ulaznom naponu 23,03 V.



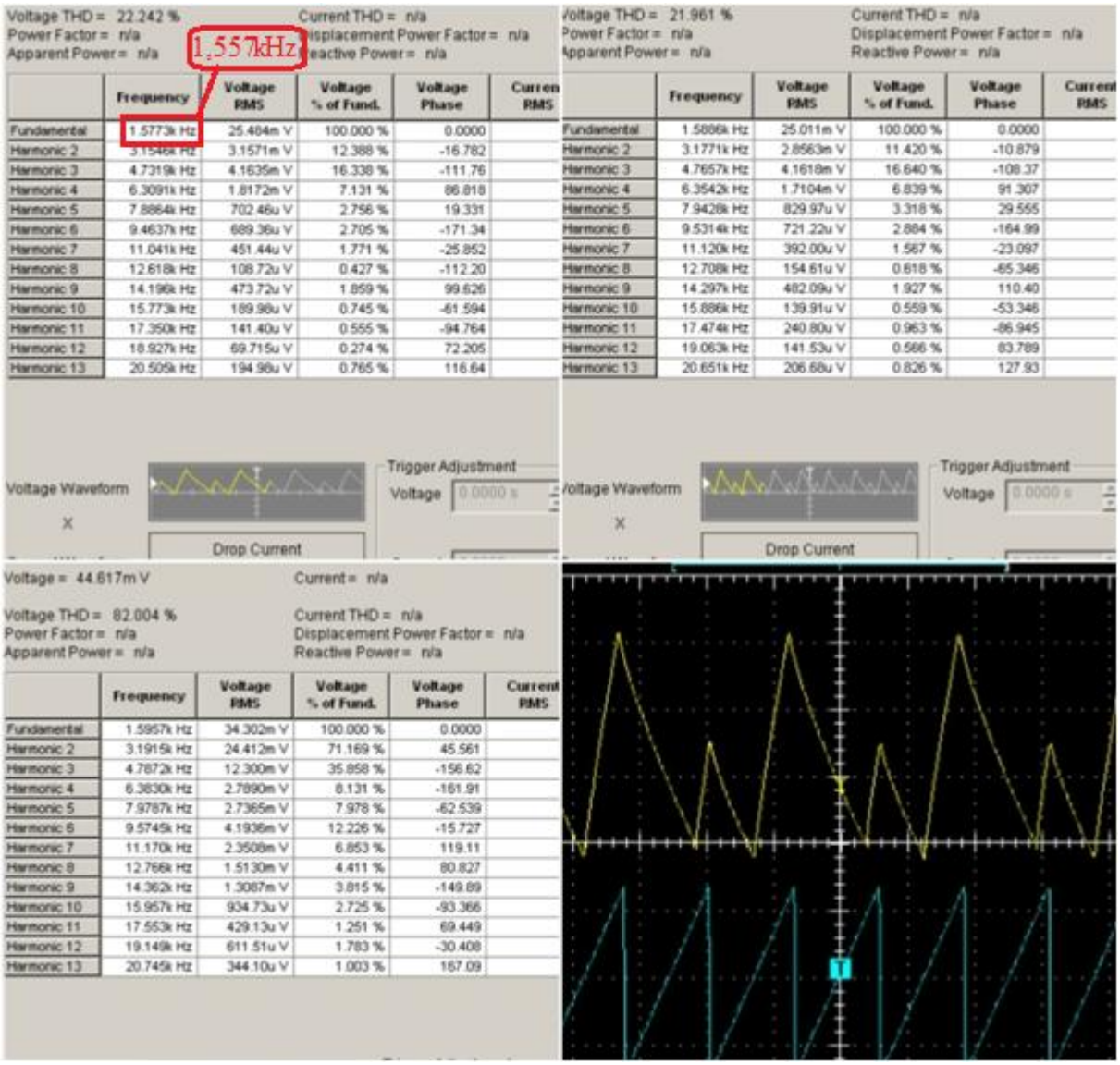
Sl. 5.6. *Isječci harmonijske analize iz HAS-a i valni oblici struje prigušnice i napona rampe*

Iz valnih oblika (Sl.5.6.) zaključeno je da se radi o dvostrukom periodičkom rješenju. Dominantni harmonik je osnovni (3,7453 kHz), ostali harmonici su višekratnici osnovnog (7,49 kHz, 11,236 kHz, 14,981 kHz). Poznato je da se pri dvostrukom periodičkom rješenju pojavljuje i drugi podharmonik kao i nadharmonici koji su višekratnici drugog podharmonika. Uočava se nedostatak WaveStara koje je taj da se ne prikazuje polti harmonik ukoliko on nije

dominantni harmonik, rezultate ovoga ustaljenog stanja dvostrukog periodičkog rješenja možemo dovesti u svezu s rezultatima osnovnog periodičkog rješenja.

5.2.2. Druga radna točka

Dvostruko periodičko rješenje pri ulaznom naponu E=23,63 V. Pri dvostrukom periodičkom rješenju se pojavljuje drugi podharmonik.



	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS
Fundamental	1.5773k Hz	25.484m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	3.1546k Hz	3.1571m V	12.388 %	-16.782	
Harmonic 3	4.7319k Hz	4.1635m V	16.338 %	-111.76	
Harmonic 4	6.3091k Hz	1.8172m V	7.131 %	86.818	
Harmonic 5	7.8864k Hz	702.46u V	2.756 %	19.331	
Harmonic 6	9.4637k Hz	689.36u V	2.705 %	-171.34	
Harmonic 7	11.041k Hz	451.44u V	1.771 %	-25.852	
Harmonic 8	12.618k Hz	108.72u V	0.427 %	-112.20	
Harmonic 9	14.196k Hz	473.72u V	1.859 %	99.626	
Harmonic 10	15.773k Hz	189.98u V	0.745 %	-61.594	
Harmonic 11	17.350k Hz	141.40u V	0.555 %	-94.764	
Harmonic 12	18.927k Hz	69.715u V	0.274 %	72.205	
Harmonic 13	20.505k Hz	194.98u V	0.765 %	116.64	

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS
Fundamental	1.5886k Hz	25.011m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	3.1771k Hz	2.8563m V	11.420 %	-10.879	
Harmonic 3	4.7657k Hz	4.1618m V	16.640 %	-108.37	
Harmonic 4	6.3542k Hz	1.7104m V	6.839 %	91.307	
Harmonic 5	7.9428k Hz	829.97u V	3.318 %	29.555	
Harmonic 6	9.5314k Hz	721.22u V	2.884 %	-164.99	
Harmonic 7	11.120k Hz	392.00u V	1.567 %	-23.097	
Harmonic 8	12.708k Hz	154.61u V	0.618 %	-65.346	
Harmonic 9	14.297k Hz	482.09u V	1.927 %	110.40	
Harmonic 10	15.886k Hz	139.91u V	0.559 %	-53.346	
Harmonic 11	17.474k Hz	240.80u V	0.963 %	-86.945	
Harmonic 12	19.063k Hz	141.53u V	0.566 %	83.789	
Harmonic 13	20.651k Hz	206.68u V	0.826 %	127.93	

	Frequency	Voltage RMS	Voltage % of Fund.	Voltage Phase	Current RMS
Fundamental	1.5957k Hz	34.302m V	100.000 %	0.0000	
Harmonic 2	3.1915k Hz	24.412m V	71.169 %	45.561	
Harmonic 3	4.7872k Hz	12.300m V	35.858 %	-156.62	
Harmonic 4	6.3830k Hz	2.7890m V	8.131 %	-161.91	
Harmonic 5	7.9787k Hz	2.7365m V	7.978 %	-62.539	
Harmonic 6	9.5745k Hz	4.1936m V	12.226 %	-15.727	
Harmonic 7	11.170k Hz	2.3508m V	6.853 %	119.11	
Harmonic 8	12.766k Hz	1.5130m V	4.411 %	80.827	
Harmonic 9	14.362k Hz	1.3087m V	3.815 %	-149.89	
Harmonic 10	15.957k Hz	934.73u V	2.725 %	-93.366	
Harmonic 11	17.553k Hz	429.13u V	1.251 %	69.449	
Harmonic 12	19.149k Hz	611.51u V	1.783 %	-30.408	
Harmonic 13	20.745k Hz	344.10u V	1.003 %	167.09	

Sl. 5.7. *Isječci harmonijske analize iz HAS-a i karakteristični valni oblici*

Iz tablica se može zaključiti da je dominantni harmonik identificiran pri frekvenciji 1,5773 kHz, odnosno javlja se podharmonik dvostruko manje frekvencije no dominantni harmonik osnovnog periodičkog rješenja pri istoj vremenskoj bazi (3,2051 kHz). Pojava drugog podharmonika se očekivala na dvostruko manjoj frekvenciji nego osnovni harmonik te je on ujedno i dominantni

harmonik (25,484 mV). Osnovni harmonik je izmjeren pri 3,1546 kHz, dok su svi ostali harmonici nadharmonici višekratnici frekvencije drugog harmonika (1,5773 kHz x3=4,731 kHz, 1,5773 kHz x4= 6,309kHz, 1,5773kHz x5=7,886 kHz).

6. ZAKLJUČAK

Mogućnost harmonijske analize u WaveStaru ovisi o ograničenosti osciloskopa Tektronix TD 224. Vrijednost minimalne vremenske baze, prihvatljive za WaveStar, ovisi o temeljnoj periodi izmjeničnog pravokutnog valnog oblika. Za zadani valni oblik periode 20 ms pri vremenskim bazama: 50 μs/ds, 100 μs/ds, 250 μs/ds program daje do znanja da je potrebno povećati vremensku bazu. Maksimalna vremenska baza za koju WaveStar radi ispravnu harmonijsku analizu je 50 ms/ds.

Pri automatskim postavkama, odstupanje rezultata harmonijske analize izmjeničnog pravokutnog valnog oblika napona ampitude 10 V i frekvencije 50Hz, bez obzira na vremensku bazu, je 3%, što je tehnički prihvatljivo. Najveća odstupanja se javljaju pri najvećoj vremenskoj bazi (50 ms/ds) i za najveći harmonik (7.) i iznose 6,19 %.

Za zadani valni oblik napona i pri zadanim vremenskim bazama rezultati dobiveni u WaveStaru kada je minimalni vremenski interval manji od temeljne periode signala (20 ms), su valjani. Tada je stvarni vremenski interval uzorkovanja približno jednak temeljnoj periodi signala. Kada se minimalni vremenski interval povećava preko vrijednosti temeljne periode, rezultati dobiveni u WaveStaru postaju netočni. WaveStar daje točne rezultate za izmjenični pravokutni valni oblik napona pri svim ručno postavljenim vremenskim intervalima uzorkovanja podataka koji su manji od temeljne periode valnog oblika.

Mjerenjem harmonijskog sadržaja struje prigušnice istosmjernog silaznog pretvarača 7V/1A pri dvostrukom periodičkom rješenju, za ulazni napon 23,03 V WaveStar ne prikazuje polti harmonik. Obilježje WaveStara je da za dvostruko periodičko rješenje, pri određenim ulaznim naponima ne prikazuje drugi podharmonik ni njegove višekratnike, nego samo višekratnike dominantnog harmonika. Također u tabličnom prikazu HAS-a ne prikazuje prvi harmonik, što otežava uspoređivanje s ostalim harmonicima.

LITERATURA

[1] P. Predragović, Mjerenje harmonijskog sadržaja struja i napona osciloskopom tektronix TDS224, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek.

[2] https://sh.wikipedia.org/wiki/Generator_signala, pristup ostvaren 19.2.2017.

[3] A. Crnković Diplomski rad, Identifikacija ustaljenih stanja odabranog istosmjernog silaznog pretvarača harmonijskom analizom, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek 2012.

[4] M.Čengić Završni rad, Mjerenje harmonijskog sadržaja osciloskopom Tektronix i programskom podrškom WaveStar, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek 2012.

[5] http:// www.tehnicka-skola-karlovac.hr /maturalna_pitanja/ 9_8istosmjerni_ pretvarac. Php, pristup ostvaren 20.2.2017.

[6] I.Flegar, Elektronički energetski pretvarači; Zagreb 2010.

[7] N. Benković, Diplomski rad, Režim rada silaznog pretvarača, N. Benković, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, Osijek 2001.

[8] M.Bulić Diplomski rad, Kaotični režimi rada silaznog pretvarača, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek 2000.

[9] I. Brnjevarac, Diplomski rad, Snimanje bifurkacijskih dijagrama izravnih pretvarača napona pomoću WaveStar-a i Matlab-a, Elektrotehnički fakultet Osijek, Osijek, 2015.

SAŽETAK

Objašnjeno je korištenje WaveStara. Napravljena je harmonijska analiza WaveStarom izmjeničnog pravokutnog napona amplitude 10 V i frekvencije 50 Hz. Ispitano je kako na harmonijsku analizu utječu promjene vremenske baze i vremenskog intervala uzorkovanja podataka. Dana su ograničenja pri prikupljanju rezultata analize odabranog valnog oblika. Napravljena je analiza harmonijskog sadržaja struje prigušnice istosmjernog pretvarača.

Ključne riječi: vremenski interval uzorkovanja podataka, vremenska baza, istosmjerni pretvarač napona, WaveStar

SUMMARY

It is explained usage of WaveStar. Harmonic analysis of squre wave is made by WaveStar. Peak voltage is 10 V and frequency is 50 Hz. Harmonic analysis by WaveStar is tested by changing time base and cycle width. There are limitations in squre wave harmonic analysis. Harmonic analysis of choke˙s current in boost converter.

Key words: cycle width, time base, boost converter, WaveStar

ŽIVOTOPIS

Matej Leko rođen je 07.08.1992. godine u Đakovu. Osnovnu školu završio je u Satnici Đakovačkoj 2007., a te iste godine upisuje Isusovačku klasičnu gimnaziju u Osijeku. Srednju školu završava 2011. s odličnim uspjehom te iste upisuje Elektrotehnički fakultet u Osijeku izravnim upisom. Godine 2014. završava preddiplomski studij Elektrotehnike, smjer elektroenergetika, te stječe naziv sveučilišni prvostupnik (baccalarus) inženjer elektrotehnike. Godine 2014. upisuje prvu godinu Diplomskog studija Elektrotehničkog fakulteta, smjer elektroenergetika.