

DIGITALNI GENERATORI SINUSNOG VALNOG OBLIKA POGODNI ZA IMPLEMENTACIJU U LOGIČKI NIZ

Tomislav Švedek

KLJUČNE RIJEČI: digitalni generatori sinusnog valnog oblika, Walshove funkcije, logički nizovi, pulsno- kodna modulacija (PCM), pulsno-širinska modulacija (PWM), delta modulacija (DM).

SAŽETAK: U članku je dan pregled arhitektura digitalnih generatora sinusnog valnog oblika pogodnih za realizaciju u logičkom nizu. Pregled je rađen na osnovu zahtjeva da se referentni trofazni sustav sinusoida realizira sa manje od 200 2-NI ekvivalentnih sklopova i to u logičkom nizu bez specijaliziranih ROM ćelija.

DIGITAL SINE-WAVE GENERATOR SUITABLE FOR THE GATE ARRAY IMPLEMENTATION

KEY WORDS: digital sine-wave generators, Walsh functions, gate arrays, pulse-code modulation (PCM), pulse- width modulation (PWM), delta modulation (DM).

ABSTRACT: In the article the review of digital sine-wave generator architectures suitable for the implementation in gate array is given. The goal is implementation of the three-phase sine-wave reference generator in ROM-less gate array with less than 200 gates.

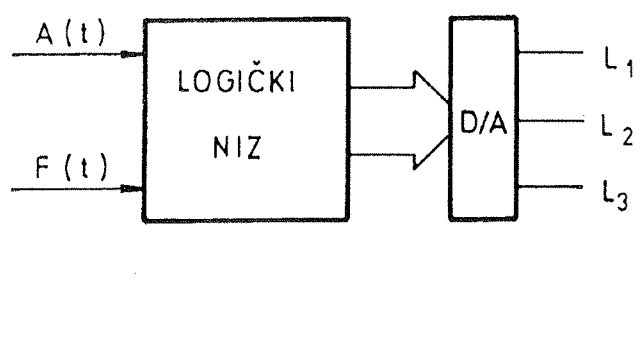
1. UVOD

U industrijskoj elektronici česta je potreba za sklopovima koji mogu generirati razne valne oblike - pravokutne, trokutaste, sinusne. Takvi sklopovi koriste se u upravljačkoj elektronici elektromotornih pogona, u sistemima za mjerenje električkih veličina, A/D konverziji. U klasičnoj izvedbi na tiskanoj pločici (PCB) ili u debelom filmu, ti u biti nelinearni sklopovi sastoje se obično od komparatora, operacionih pojačala, otpornika, kondenzatora i dioda. Izravno preslikavanje u MOS tehniku je nemoguće iz razloga što neke od tih komponenata imaju u toj tehnici nezadovoljavajuće karakteristike. Kao kod filtera i A/D konvertera u MOS tehnici i ovdje je potrebno pronaći specifična sklopovska rješenja kojima će biti moguće ostvariti zadanu funkciju, u ovom slučaju generiranje zadanog valnog oblika.

Ako je takav sklop potrebno realizirati u logičkom nizu (engl. gate-array), izbor sklopovskih rješenja je još uži. U ovom radu opisuje se analiza podobnosti pojedinih metoda digitalnog generiranja referentnog trofaznog sustava sinusoida za implementaciju u logički niz manje složenosti. Zahtjevi na takav sklop su:

- * mogućnost kontinuiranog upravljanja amplitudom i frekvencijom,
- * implementacija pomoću manje od 200 ekvivalentnih 2-NI sklopova u logičkom nizu bez specijaliziranih ROM ćelija,
- * jednostavna D/A konverzija izvan logičkog niza (slika 1).

Postoji nekoliko načina digitalnog generiranja sinusnog signala, od kojih su:



Slika 1: struktura generatora referentnog trofaznog sustava sinusoida

- 1) filtracija osnovnog harmonika iz pravokutnog valnog oblika,
- 2) sinteza pomoću Walshovih funkcija i
- 3) isčitavanje iz ROM look-up tabela, najpogodniji za implementaciju u logički niz.

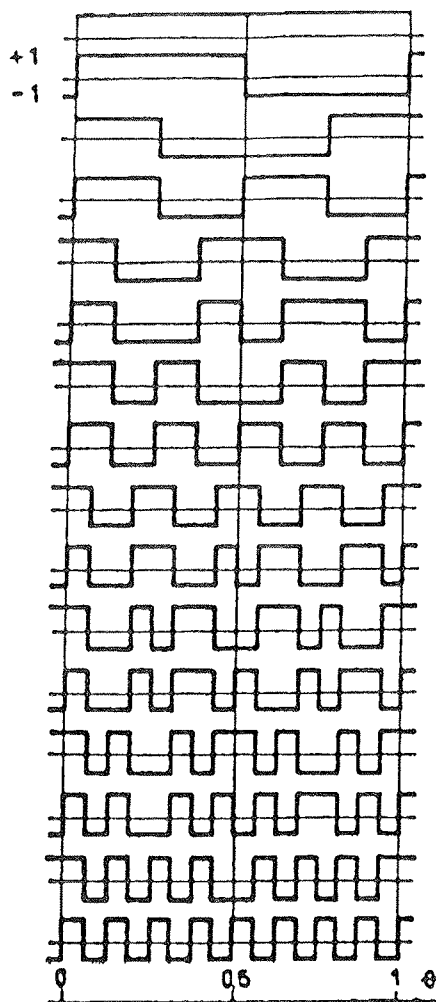
2. IZDVAJANJE OSNOVNOG HARMONIKA IZ SIGNALA PRAVOKUTNOG VALNOG OBLIKA

Prva metoda je ujedno i najjednostavnija. Temelji se na činjenici da amplitudni spektar pravokutnog signala sadrži osnovni harmonik f_1 i harmonike višeg reda. Korištenjem niskopropusnog filtera višeg reda osnovni harmonik se može izdvojiti bez značajnih izobličenja. Kako se kontinuiranom promjenom odnosa impuls-pauza (engl. duty-cycle modulation) u spektru pravokutnog signala kontinuirano mijenja i udio osnovnog harmonika, to je na taj način moguće upravljati amplitudom

generiranog sinusnog signala i to u opsegu od 0 do 100%. Zahtjev za upravljanjem promjenom frekvencije traži uz promjenu frekvencije pravokutnog signala adekvatnu adaptaciju granične frekvencije NF filtera, kako bi generirani sinusni signal zadržao isti faktor izobličenja. To predstavlja očito ograničenje ove metode. Kombinacijom djelitelja moguće je generirati digitalni trofazni signal precizno definiranog faznog odnosa, čija simetrija nakon filtriranja ovisi znatno o uparenosti (engl. matching) karakteristika NF filtera.

3. SINTEZA POMOĆU WALSHOVIH FUNKCIJA

Ova metoda daje stepeničastu aproksimaciju sinusnog valnog oblika /lit 1,2/. Realizacija je moguća vrlo jednostavnim logičkim sklopovima i D/A konverterom (otporničkom težinskom mrežom). Na slici 2 je prikazan sustav Rademacherovih i Walshovih funkcija (baze N=16). Rademacherove funkcije za N=16 predstavljaju izlaze binarnog djelitelja sa 16. Potpuni sustav Walshovih funkcija dobiva se jednostavnom logičkom operacijom EX-ILI nad pojedinim Rademacherovim funkcijama. Sustav Walshovih funkcija je ortogonalan sustav, što znači da

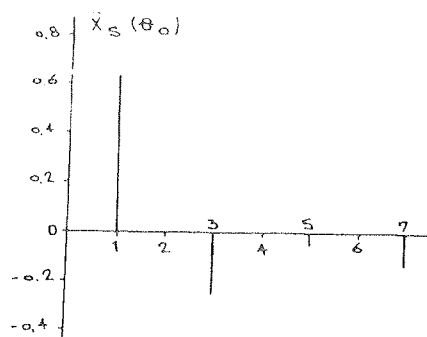


Slika 2: sustav Rademacherovih i Walshovih funkcija baze N=16

se bilo koji valni oblik $X(\Phi)$ može razviti u Fourierov red na bazi Walshovih funkcija:

$$X(\Phi) = \sum_{j=1}^N D(j) \text{wal}(j, \Phi) \quad (1)$$

Ovdje $X'(\Phi)$ označava razvoj u konačan red, $D(j)$ predstavlja koeficijente konačnog reda, a $\text{wal}(\Phi, j)$ Walshove funkcije iz sustava baze N. Ako signal $\sin(2\pi\Phi)$ razvijemo u red prema jedn.(1) dobiveni koeficijenti $D(j)$ poprimaju vrijednosti kao u Tablici 1. Na slici 3 je prikazan amplitudni spektar signala $\sin(2\pi\Phi)$ na sustavu Walshovih funkcija baze N=16. Sa slike je vidljivo da za tu bazu u sintezi sinusnog signala sudjeluju samo četiri Walshove funkcije. Uz definirane koeficijente $D(j)$ moguće je pomoću tih Walshovih funkcija sintetizirati sinusni valni oblik. Svako od njih potrebno je tada pridijeliti vrijednost koeficijenta $D(j)$ - težinski faktor, i zatim izvršiti sumiranje. Apsolutna vrijednost koeficijenata $D(j)$ proporcionalna je vrijednosti otpornika u D/A konverteru, dok se negativna vrijednost dobiva komplementiranjem sekvence odgovarajuće Walshove funkcije. Na slici 4 je prikazan sintetizirani valni oblik sinusoide.

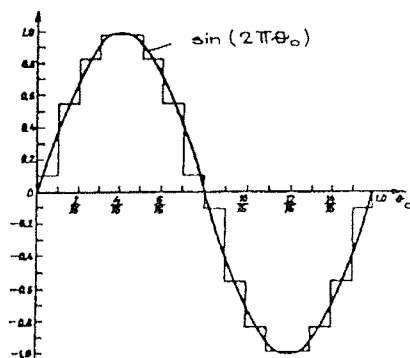


Slika 3: amplitudni spektar sinusnog signala na sustavu Walshovih funkcija baze N=16

J	D(j)
1	0,636
5	-0,265
9	-0,052
13	-0,128

Tablica 6.1. Vrijednosti koeficijenata $D(j)$

Realizacija ovog tipa generatora referentne sinusoide vrlo je jednostavna (mogućnost izravnog preslikavanja u MOS tehnologiju), pri čemu se otpornička mreža mora izvesti izvan sklopa diskretnim elementima (za N=16 sa četiri otpornika) - slika 5. Upravljanje frekvencijom je moguće kontinuiranom promjenom frekvencije takta generatora Walshovih funkcija, dok se upravljanje

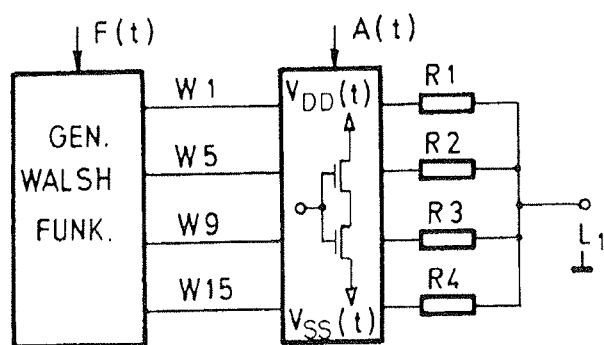


Slika 4: sintetizirani sinusni valni oblik

amplitudom može realizirati modulacijom amplitudnih vrijednosti logičkih stanja izlaza sklopa. Nelinearnost tako generirane sinusoide ovisi o točnosti omjera težinskih otpornika. Izlazni signal je vrlo jednostavno filtrirati (izraženiji tek 15-ti harmonik), te je za razliku od prethodne metode bez promjene granične frekvencije NF filtera moguće postići znatno širi dijapazon promjene frekvencije sinusnog signala uz manju degradaciju karakteristika. Fazni odnos trofaznog sustava sinusoide je precizno definiran djeljiteljem, te eventualna neuparenost karakteristika filtera znatno manje utiče na njegovu simetriju. Za trofazni sustav je potrebno koristiti tri identična D/A konvertera.

4. SINTEZA POMOĆU ROM "LOOK-UP" TABELA

Treći tip čija je primjena i najrasprostranjenija u mnogim sklopovskim rješenjima, omogućava aproksimaciju analognog sinusnog signala generiranjem digitalnog niza dobivenog pulsno- kodnom (PCM), pulsno širinskom (PWM), ili delta (DM) modulacijom sinusnog valnog oblika. U sva tri slučaja generator se sastoji od ROM memorije u koju je upisana sinusoide (dio ili cijeli period), logike i D/A konvertera.



Slika 5: realizacija generatora referentne sinusoide pomoću generatora Walshovih funkcija (jedna faza)

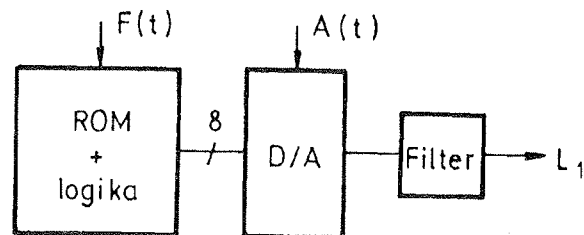
4.1. PCM kodiranje

Kod PCM kodiranja sinusoide se obično uzorkuje u 256 točaka, a svakoj od njih se pridjeljuje kodna riječ duljine 8 bitova. Za upis cijele sinusoide potrebno je stoga zauzeti $256 \times 8 = 2048$ bitova ROM memorije. Pomoću upravljačke logike isčitavaju se redom sve točke sinusoide (paralelni 8-bitni kod) koje se zatim pomoću 8-bitnog D/A konvertera transformiraju u diskretne amplitudne vrijednosti (slika 6). Frekvencija se može mijenjati kontinuiranom promjenom frekvencije takta. Dijapazon upravljanja frekvencijom je vrlo širok i ograničava ga samo izlazni filter koji guši više harmonike stepeničastog sinusnog signala. Amplitudu je moguće kontinuirano mijenjati promjenom referentnog napona D/A konvertera. Trofazni sustav traži trostruko veći ROM, dodatnu logiku i tri D/A konvertera.

4.2. PWM modulacija

Modulacija širine ili trajanja impulsa (engl. PWM-Pulse Width Modulation) karakterističan je modulacijski postupak za impulsne prijenosne sisteme koji nema ekvivalenta među kontinuiranim postupcima modulacije sinusnog signala. Kod PWM signala je informacija sadržana u trenutku pojave impulsa pa se zato taj postupak zajedno sa modulacijom položaja i frekvencije impulsnog signala ubraja u postupke modulacije vremenskog parametra impulsnog prijenosnog signala (engl. PTM-Pulse Time Modulation). Budući da su u spektru PWM signala dominantne komponente modulacionog signala, demodulacija se izvodi pomoću jednostavnog filtera s niskopropusnom karakteristikom. Ta karakteristika PWM modulacije pruža dodatnu mogućnost primjene ovog generatora i kod regulacije brzine vrtnje električnog motora gdje u procesu demodulacije njegov namot služi kao NF filter, te je demodulirana veličina sinusna struja. Stoga je ovaj generator sinusnog valnog oblika najinteresantniji jer u kombinaciji sa NF filterom može poslužiti za generiranje referentnog trofaznog sustava sinusoide, ali i za generiranje upravljačkih impulsa kod regulacije brzinom vrtnje motora. Digitalni PWM modulatori se prema načinu realizacije dijele na:

1) PWM generatore realizirane pomoću brojala,



Slika 6: realizacija generatora pomoću ROM "look-up" zapisa PCM kodirane sinusoide

2) PWM generatore sa programskim (software) generiranjem PWM sinusnog signala i

3) PWM generatore realizirane pomoću ROM look-up zapisa.

Ova treća grupa digitalnih PWM generatora sinusnog signala je i najprimjerenija za implementaciju u logički niz zadanih karakteristika, a može se podijeliti na dvije podgrupe:

4.2.1. ROM zapis PCM kodiranih PWM impulsa

Svaki pojedini impuls dobiven simulacijom PWM modulacije sinusnog valnog oblika diskretizira se i označava jednom n-bitnom PCM riječju te upisuje u ROM. Obično pod kontrolom mikroprocesora iz ROM-a isčitane PCM kodne riječi se pomoću up/down brojila pretvaraju u PWM impulse. Kod realizacije trofaznog sistema utrostručuje se neophodna logika (brojila) te sklopovska realizacija može biti vrlo složena.

4.2.2. ROM zapis uzorkovane PWM sekvence

Kompletni PWM impulsni niz (sekvenca) dobiven simulacijom PWM modulacije jedne periode sinusoide upisuje se u ROM memoriju. Uzorkovanje te sekvence provodi se vrlo visokom frekvencijom takta kako bi se unijela što manja greška kvantizacije položaja prednjeg i zadnjeg brida PWM impulsa. Naime, taj položaj je na vremenskoj osi analogna veličina. Za ovaj pristup je potrebna velika ROM memorija, ali se zato generiranje svodi na isčitavanje PWM sekvence iz ROM-a (nepotrebna up/down brojila). Kod oba PWM generatora frekvencija sinusnog signala se može mijenjati kontinuirano promjenom frekvencije isčitavanja iz ROM tabele. Budući da se D/A konverzija provodi na NF filteru, to je za jednu vrijednost vremenskih konstanti filtera dijapazon promjena frekvencije ograničen (manje no kod metode 2., ali znatno više no kod metoda 3. i 4.1).

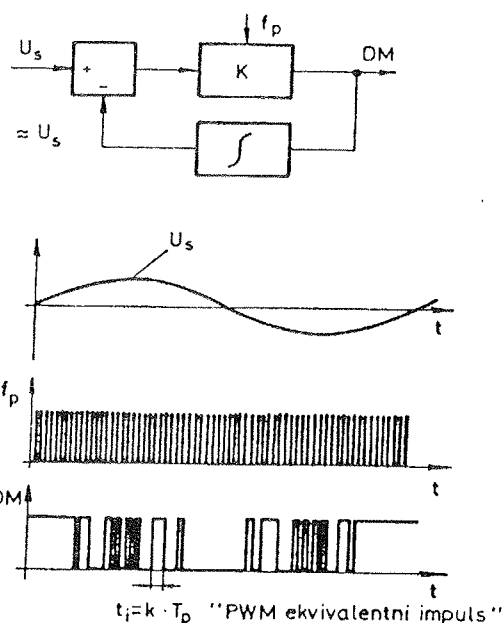
Upravljanje amplitudom generiranog sinusnog signala moguće je na dva načina. Jedan se sastoji u tome da se za K diskretnih amplituda generiranog sinusnog signala ($m_1, m_2, \dots, m_K$) u ROM pohrani K sekvenci PWM impulsa, čime se dobiva diskretna promjena amplitude generirane sinusoide (veći ROM). Drugi način pretpostavlja ROM zapis samo jedne PWM sekvence (manji ROM), nad kojom se nakon toga provodi postupak duty-cycle modulacije (složenija logika), čime se dobiva mogućnost kontinuirane promjene amplitude generirane sinusoide.

4.3. Delta modulacija

Osnovni nedostatak metoda iz točke 4.2., gledajući definirane uvjete implementacije generatora u logički niz

male složenosti, je potreba relativno velike ROM memorije što je posljedica uzorkovanja PWM sekvence vrlo visokom frekvencijom. Zbog tog ograničenja potrebno je primijeniti drugi tip modulacije koji inherentno sadrži postupak diskretizacije po vremenu (manji ROM), a po karakteristikama izlaznog signala je vrlo sličan PWM modulaciji. Tom zahtjevu može udovoljiti delta modulacija [lit 3].

DM predstavlja posebnu vrstu pulsno-kodne modulacije (PCM) - slika 7. Dok se kod PCM modulacije prenose kvantizirani uzorci modulirajućeg signala koji predstavljaju zaokruženu vrijednost njegovih amplituda u trenucima uzorkovanja, kod delta modulacije se prenosi informacija o promjeni trenutne vrijednosti amplitude signala u odnosu na prethodnu vrijednost.



Slika 7: princip dobivanja delta moduliranog signala i sličnost generiranog impulsnog niza sa PWM nizom

Kvalitativna usporedba spektra PWM signala i spektra DM signala ukazuje na zajedničku osobinu, a to je da i jedan i drugi sadrže snažno izražen spektar modulirajućeg signala (u ovom slučaju komponentu sinusoidalne pobude f_1). Osnovni harmonik se dakle izdvaja pomoću niskopropusnog filtra [lit 4].

Budući da ekvivalentna ROM memorija mora biti mala jer se gradi pomoću osnovnih logičkih elemenata (NAND, NOR), a treba generirati trofazni sustav sinusoide, to je omjer frekvencije uzorkovanja i frekvencije osnovnog harmonika (f_p / f_1) potrebno odabrati takvim:

- * da se dobije što bolji odnos $S/\tilde{S}$,
- * da taj broj bude što manji kako bi što manji bio i ekvivalentni ROM, i

* da taj broj bude djeljiv sa tri.

Za vrijednost omjera (f_p/f_1) = 384 (broj koji je najbliži vrijednosti kod PCM uzorkovanja sinusoide metodom 4.1, a zadovoljava sve gore postavljene zahtjeve) dobiva se kod trofaznog sustava sinusoida 15 puta manji ROM:

$$\begin{array}{rcl} \text{PCM } 3 \times 256 \times 8 = & 3 \times 2048 = & 6144 \\ \text{DM} & 1 \times 384 = & 384. \end{array}$$

U gornjem primjeru DM logički niz, odnosno DM sekvenca jedne periode sinusnog signala sadrži ukupno 384 bita. Radi poluvalne simetrije sinusnog signala u ROM je dovoljno upisati samo polovinu tog niza (192 bita). Kako je taj broj djeljiv sa tri, ROM memorija se može organizirati tako da je uz minimalan broj dodatnih sklopova moguće simultano isčitavanje sve tri faze trofaznog sustava sinusoida (L1, L2, L3). I ovdje su kao i kod metode 4.2 moguća dva načina upravljanja amplitudom (diskretno i kontinuirano), dok je upravljanje frekvencijom kontinuirano i po dijapazonu promjene ograničeno kao u točki 4.2.

5. UMJESTO ZAKLJUČKA

Digitalni principi generiranja PWM sinusnog signala najpogodniji su za realizaciju u ASIC-ima projektiranim tehnikom logičkih nizova. Međutim, nepostojanje specijaliziranih memorijskih ćelija za formiranje internog ROM-a, te relativno mala složenost korištenih logičkih nizova nameću potrebu iznalaženja sklopovski jednostavnih rješenja. U Tablici 2 je kvalitativno dan pregled svih metoda digitalnog generiranja trofaznog sustava sinusoida koje su pogodne za implementaciju u logički niz manje složenosti. Metode se međusobno razlikuju po kompleksnosti realizacije, dijapazonu i načinu promjene amplitude i frekvencije. Razlikuju se i po tipu D/A konverzije. Metode 4.1. i 4.2.1. posebno, traže relativno veliku ROM memoriju, te je uz neizostavnost njihovog korištenja potrebno predvidjeti i mogućnost korištenja eksterne memorije. S obzirom na dani zahtjev generiranja trofaznog impulsnog sistema delta moduliranih sinusoida upravljive frekvencije i amplitude metoda 4.3. traži najmanje hardware-a i vrlo se lako može implementirati u logički niz male složenosti. Ova metoda je uspješno korištena kod realizacije ASIC-a RK3- 1099.17./lit 5/.

Metoda	Složenost sklopa (2-NI)	Upravljanje amplitudom	Opaska
2	≈ 30	duty-cycle	tri identična filtera (veliko gušenje iznad f_g)
3	≈ 120	modulacija napona izlaznih invertora	tri identične D/A mreže (3 x 4 otpornika); tri identična filtera (15-ti harmonik)
4.1.	≈ ROM (3x1024) + 160	modulacija napona V_{ref} D/A konvertera	tri identična 8-bitna D/A konvertera; tri identična filtera
4.2.1.	≈ ROM (?) + 300	diskretno (m) ili duty-cycle	tri identična filtera
4.2.2.	≈ ROM (?) + ?	diskretno (m) ili duty-cycle	tri identična filtera
4.3.	≈ ROM*(192) + 130 ≈ 200	diskretno (m) ili duty-cycle	tri jednobitna D/A konvertera; tri identična filtera

* ROM izveden pomoću 2-NI osnovnih sklopova

Tablica 2

6. LITERATURA

1/ T.Švedek: "Generator Walsh funkcija kao osnova za realizaciju PSK modulatora" - "Zbornik radova ETAN u pomorstvu" str.384-390, Zadar, lipanj, 1985.

2/ T.Švedek: "Sinteza diskretno fazno moduliranih signala pomoću Walshovih funkcija" - doktorska disertacija, ETF Zagreb, 1986.

3/ R. Steel: Principi delta modulacije (prijevod s engleskog) "SVJAZ", MOSKVA, 1979.

4/ T.Švedek: "Delta modulacija kao alternativa PWM postupku generiranja trofaznog referentnog sistema sinusoida" 23. Jugoslavenska konferencija za ETAN, Novi Sad, lipanj, 1989.

5/ M.Štulić, T.Švedek: "Three-phase pulse system generator of delta-modulated sine-wave designed as ROM-less gate array ASIC" 10 17th YUGOSLAV CONFERENCE ON MICROELECTRONICS, Niš, May, 1989.

Dr. Tomislav Švedek, dipl.ing.
RADE KONČAR - ETI
Baštijanova bb, 41000 Zagreb

Prispelo: 24.8.1989

Sprejeto: 31.8.1989