

Sintetizatori frekvencija

Kajin, Antonio

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies, Rijeka / Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:460778>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-09**



Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

ANTONIO KAJIN

SINTETIZATORI FREKVENCIJA

ZAVRŠNI RAD

Rijeka, 2022.

SVEUČILIŠTE U RIJECI
POMORSKI FAKULTET

SINTETIZATORI FREKVENCIJA
FREQUENCY SYNTHESIZERS

ZAVRŠNI RAD

Kolegij: Osnove elektroničkih komunikacija

Mentor: doc. dr. sc. Zoran Mrak

Student/studentica: Antonio Kajin

Studijski smjer: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0069085218

Rijeka, rujan 2022.

Student: Antonio Kajin

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0069085218

IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom Sintetizatori frekvencije izradio samostalno pod mentorstvom doc. dr. sc. Zorana Mraka.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezao s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student



(potpis)

Antonio Kajin

Student: Antonio Kajin

Studijski program: Elektroničke i informatičke tehnologije u pomorstvu

JMBAG: 0069085218

IZJAVA STUDENTA – AUTORA

O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



(potpis)

Antonio Kajin

SAŽETAK

U ovom završnom radu kroz 5 poglavlja opisan je postupak sinteze frekvencije. Prikazani su i objašnjeni primjeri sintetizatora frekvencije za svaki postupak sinteze frekvencije. Detaljnije je obrađena neizravna sinteza frekvencije s faznom zaključanom petljom koja je najčešće korištena vrsta regulacijske petlje u sklopovima sintetizatora frekvencije.

Ključne riječi: Sintetizator frekvencije, fazno zaključana petlja, direktna digitalna sinteza, oscilator.

SUMMARY

In this final assignment, the procedure of frequency synthesis is described in 5 chapters. Frequency synthesizer examples for each frequency synthesis procedure are shown and explained. Indirect frequency synthesis with a phase-locked loop, which is the most used type of control loop in frequency synthesizer circuits, is treated in more detail.

Keywords: Frequency synthesizer, phase-locked loop, direct digital synthesis, oscillator.

SADRŽAJ

SAŽETAK	2
SUMMARY	2
1. UVOD	1
2. SINTENTIZATORI FREKVENCIJA	3
3. IZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE.....	4
3.1. KOHERENTNA IZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE	4
3.2. NEKOHERENTNA IZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE.....	5
4. IZRAVNA DIGITALNA SINTEZA	7
4.1. SINTEZA SINUSNOG SIGNALA	10
4.1.1. Primjer sinteze sinusnog signala	11
5. NEIZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE	14
5.1. SINTEZA POMOĆU ANALOGNE FAZOM ZAKLJUČANE PETLJE.	15
5.2. SINTEZA POMOĆU DIGITALNE FAZOM ZAKLJUČANE PETLJE..	18
6. HIBRIDNA SINTEZA FREKVENCIJE	23
6.1. PRIMJERI HIBRIDNIH SINTETIZATORA FREKVENCIJE	23
7. ZAKLJUČAK	28
8. LITERATURA.....	29
9. KAZALO KRATICA.....	30
10. POPIS SLIKA	31

1. UVOD

Sintetizator frekvencije je elektronički sklop koji generira niz frekvencije iz jedne referentne frekvencije. Sintetizatori frekvencija koriste se u mnogim modernim uređajima kao što su radio prijemnici, televizori, mobilni telefoni, radiotelefoni, CB radio stanice, pretvarači kabelaške televizije, satelitski prijemnici i u *GPS* sustavima. Sintetizator frekvencije za generiranje frekvencija koristi se metodama množenja, dijeljenja, miješanja te pomoću fazno zaključane petlje (*PLL, Phase-Locked Loop*).

Stabilnost i točnost izlazne frekvencije sintetizatora frekvencije ovisi o stabilnosti i točnosti referentne ulazne frekvencije. Slijedom toga, sintetizatori koriste stabilne i točne referentne frekvencije, poput onih koje možemo dobiti pomoću oscilatora s kristalom kvarca. Prije široke upotrebe sintetizatora, radi odabira stanica na različitim frekvencijama, radio i televizijski prijamnici oslanjali su se na ručno podešavanje lokalnim oscilatorom, koji je koristio rezonantni krug sastavljen od induktora i kondenzatora.

Lokalni oscilator je prijemnik prilagodio različitim frekvencijama bilo promjenjivim kondenzatorom, bilo prekidačem koji je odabrao odgovarajući podešeni krug za željeni kanal. Zbog varijacija u temperaturi, starenja komponenata i pomaka frekvencije, rezonantna frekvencija podešenog kruga nije vrlo stabilna, zbog čega se prijemnik odmiče od frekvencije stanice.

Automatsko upravljanje frekvencijom (*AFC, Automatic frequency control*) rješava neke probleme pomicanja frekvencije, ali često je bila potrebna ručna prilagodba. Budući da su frekvencije odašiljača stabilizirane, problem bi mogao riješiti točan izvor fiksnih, stabilnih frekvencija u prijamniku.

Tijekom godina osmišljene su mnoge tehnike za sintetiziranje frekvencija. Neki pristupi uključuju fazno zaključane petlje, kombinacije s dvostrukom ili trostrukom petljom i izravna digitalna sinteza (*DDS*). Izbor pristupa ovisi o nekoliko čimbenika, kao što su

cijena, složenost, veličina koraka frekvencije, brzina prebacivanja, fazni šum. Sintetizatori koji se koriste u komercijalnim radio prijamnicima uglavnom se temelje na petlje zaključane fazom (*PLL*). Mnoge vrste sintetizatora frekvencija dostupne su kao integrirani krugovi, što smanjuje troškove i veličinu samoga sklopa.

2. SINTENTIZATORI FREKVENCIJA

U uređajima za generiranje signala stabilnih frekvencija s diskretnom raspodjelom primjenjuju se tri postupka sinteze: postupci izravne ili neizravne sinteze frekvencije i postupak izravne digitalne sinteze signala.

U postupku izravne sinteze frekvencije dobivaju se signali izlazne frekvencije na osnovi izravne upotrebe niza aritmetičkih operacija na frekvenciju stabilnog izvora signala. Aritmetičke operacije množenja, dijeljenja, zbrajanja i oduzimanja obavljaju se u sklopovima množila, dijelila i miksera frekvencije. Neželjene frekvencijske komponente koje nastaju pri tim procesima potiskuju se odgovarajućim filtrima.

U postupku neizravne sinteze frekvencije izlazni signal generira jedan oscilator (ili više njih) koji je pomoću regulacijske petlje sinkroniziran izvorom stabilne frekvencije. U procesu sinkronizacije prvo se analizira razlika između frekvencija oscilatora i referentnog izvora, a zatim se frekvencija oscilatora usklađuje na zadanu vrijednost. Zbog te analize susrest ćemo ponekad taj postupak pod nazivom postupak sinteze pomoću analize frekvencije. Ovisno o sklopu u kojem se provodi usporedba frekvencija (detektor frekvencije ili detektor faze) razlikujemo petlju zaključanu frekvencijom (*FLL, Frequency-Locked Loop*) ili petlju zaključanu fazom (*PLL, Phase-Locked Loop*).

U postupku izravne digitalne sinteze signala (*DDS, Direct Digital Synthesis*) sastavlja se sinusni oblik izlaznog signala. Prvo se odrede ordinate sinusne funkcije za niz odabranih ekvidistantnih točaka na apscisi. Vrijednosti ordinata generiraju se u binarnome digitalnom obliku i zatim se privode digitalno analognom pretvorniku. Oblik analognog signala pretvornika odgovara stepeničastoj krivulji. Prolaskom kroz filter izgrađuje se oblik krivulje tako da je izlazni signal sintetizatora sinusni signal s vrlo malim izobličenjima.

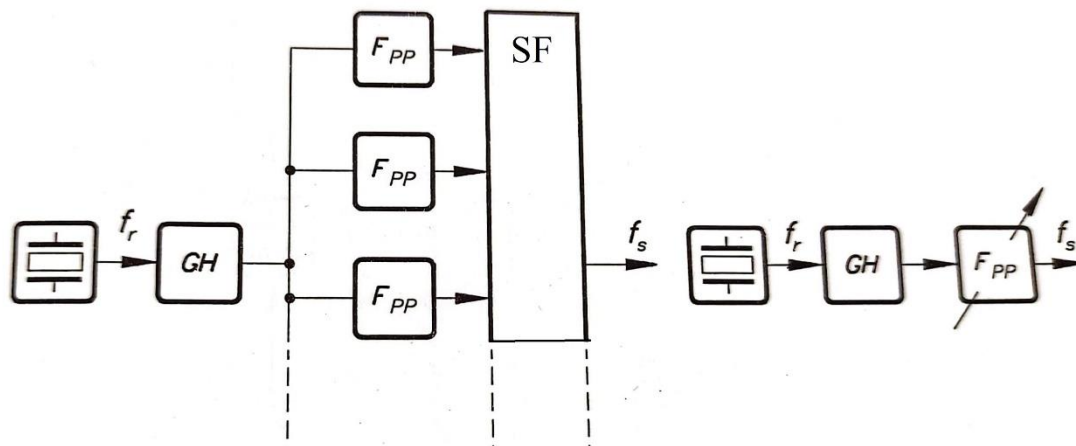
3. IZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE

U sintetizatorima s izravnom sintezom frekvencije generira se cijeli niz frekvencija koje se nalaze u određenom frekvencijskom području. Frekvencijski se spektar oblikuje množenjem, dijeljenjem i miješanjem frekvencija dobivenih iz jednoga ili više stabilnih izvora, referentnih oscilatora. Signal željene frekvencije izdvaja se iz frekvencijskog spektra posebnim filtrom. Prema broju korištenih referentnih izvora razlikujemo koherentnu i nekoherentnu izravnu sintezu frekvencije. U postupcima koherentne sinteze potreban je samo jedan referentni izvor signala stabilne frekvencije, dok postupci nekoherentne sinteze zahtijevaju upotrebu više izvora referentnih signala različitih stabilnih frekvencija.

3.1. KOHERENTNA IZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE

Slika 1. predložuje mogućnost dobivanja niza frekvencija samo pomoću množila frekvencije. Signal referentnog oscilatora s kristalom privodi se generatoru harmonika GH koji na svom izlazu daje signal bogat višim harmonicima. Prema blok-shemi na slici 1. izobličeni se signal privodi cijelom nizu filtara usklađenih na više harmonike signala referentnog izvora. Željena frekvencija bira se selektorom frekvencije SF koji propušta signal željene frekvencije na izlazne priključnice sintetizatora. Filtar s promjenjivim elementima zamjenjuje svojim djelovanjem više filtara i selektor frekvencije. Korak frekvencije sintetizatora odgovara toj frekvenciji referentnog izvora $\Delta f = f_r$. Teškoće pri upotrebi tog postupka nastaju u potiskivanju neželjenih frekvencijskih komponenata jer korak frekvencije sintetizatora, dakle razmak između dvaju harmonika, ovisi o karakteristikama gušenja filtera. Umjesto množila može se koristiti djelitelj frekvencija, pa se u tom slučaju na izlazu pojavljuju frekvencije $f_r/2$, $f_r/3$, $f_r/4$, ..., f_r/N . Ograničenja u broju i koraku mogućih

frekvencija sintetizatora znatno se smanjuju uz postupke množenja, dijeljenja i miješanja. To zapravo znači da se provodi sinteza frekvencije.



Slika 1. Postupak koherentne izravne sinteze frekvencije

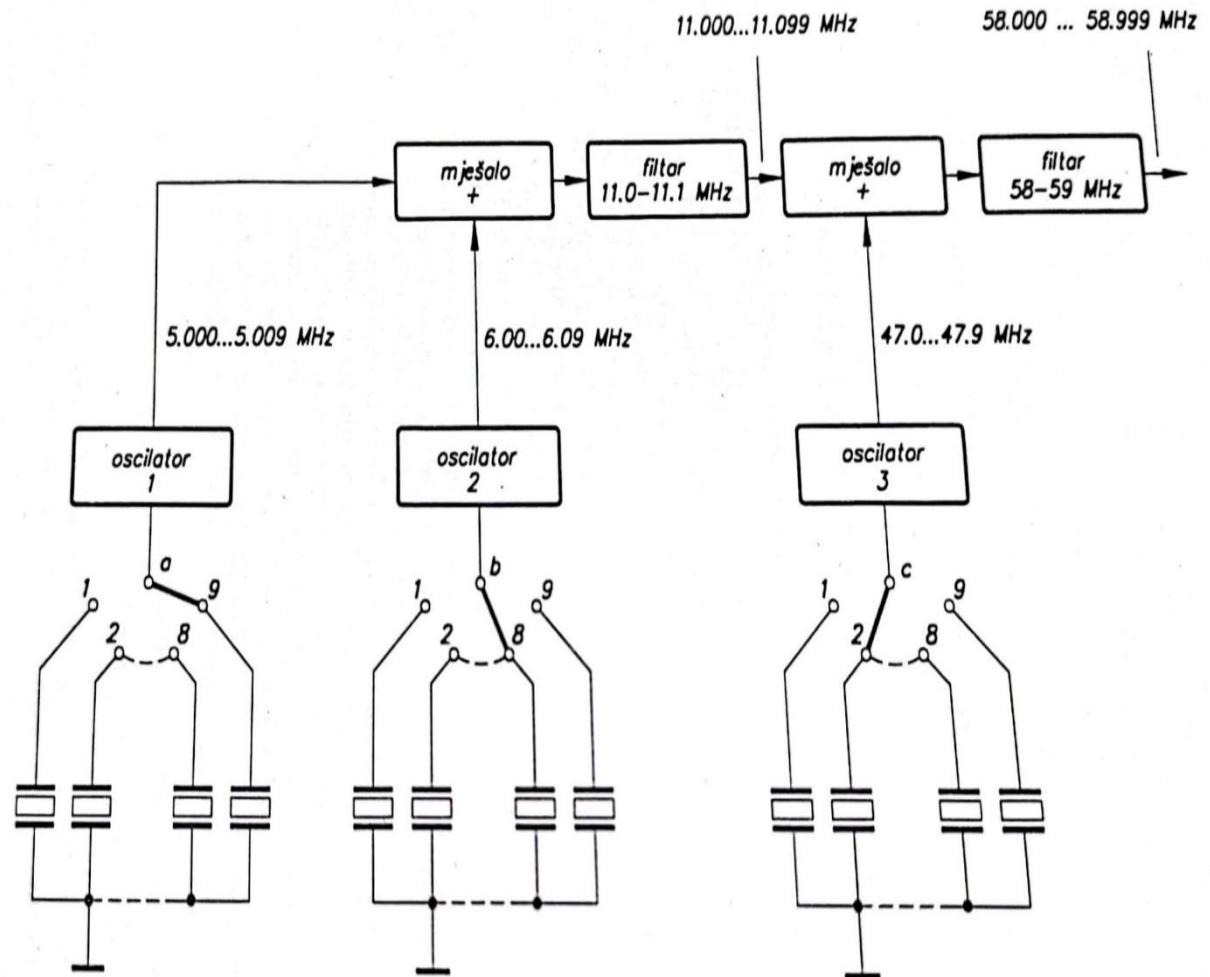
Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

3.2. NEKOHERENTNA IZRAVNA SINTEZA FREKVENCije

Na slici 2. primjer je sintetizatora koji koristi postupak nekoherentne izravne sinteze frekvencije. U sklopu se upotrebljavaju tri referentna oscilatora. Svaki od njih može generirati signal deset stabilnih frekvencija, jer se u sklopu svakog oscilatora izabire jedan od deset, raspoloživih kristala. Kristali su odabrani tako da bi omogućili dekadsko biranje frekvencije.

Stabilnost i točnost frekvencije izlaznog signala sintetizatora ovisi o stabilnosti i točnosti frekvencija svih referentnih signala. Ova obilježja sintetizatora mogu se poboljšati kombiniranjem postupaka miješanja gdje se koristi zbroj i postupaka gdje se koristi razlika frekvencija komponenata miješanja. Izlazni signali različitih frekvencija su nekoherentni

zbog diskontinuiteta koji nastaju pri prikapčanju signala u pojedinim referentnim oscilatorima.



Slika 2. Blok shema sintetizatora s nekoherentnom izravnom sintezom frekvencije

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

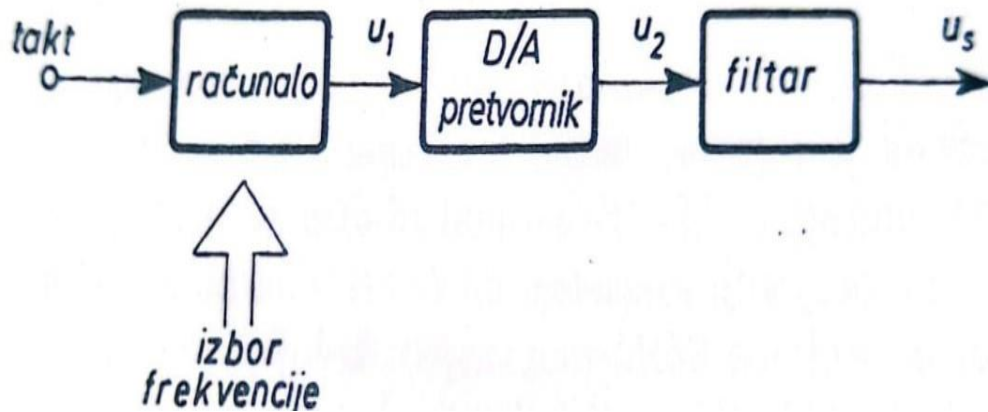
4. IZRAVNA DIGITALNA SINTEZA

Postupak izravne digitalne sinteze signala znatno se razlikuje od prije analiziranih postupaka sinteze frekvencije. Izlazni je signal temeljne jedinice sintetizatora digitalnog oblika, tj. on odgovara nizu binarnih brojeva. Svaki od tih brojeva određuje razinu uzorka rezultirajućeg analognog izlaznog signala sintetizatora. Slika 3. predoduje temeljnu blokshemu postupka digitalne sinteze signala. Temeljnu jedinicu sintetizatora čini jedno računalo kojim upravlja taktni signal. Računalom se određuje razina uzoraka izlaznog signala u_s u diskretnim vremenskim trenucima. Frekvencija taktnog signala odgovara frekvenciji uzoraka, odnosno ona diktira trajanje vremenskog intervala između trenutaka u kojima se određuje razina izlaznog signala. Digitalni se signal koji daje računalo privodi digitalno-analognom pretvorniku. Izlazni je signal pretvornika stepeničasta oblika, ali on slijedi valni oblik signala. Filtrom se oblikuje izlazni signal pretvornika, čime on postaje kontinuiranog oblika. Izbor frekvencije, a ponekad i valnog oblika, izlaznog signala sintetizatora obavlja se digitalnim signalom koji se privodi jedinici računala.

Sinteza signala provodi se u području digitalnog signala pomoću binarnih aritmetičkih operacija. Digitalna sinteza signala ima, dakle, obilježja izravnog postupka pa se zato i naziva izravnom digitalnom sintezom signala (*DDS, Direct Digital Synthesis*). Pri izravnoj sintezi frekvencije izvode se analogne aritmetičke operacije s frekvencijama jednog signala ili više njih.

Korištenjem digitalne sinteze frekvencije otvorene su mnoge mogućnosti pri projektiranju uređaja za generiranje frekvencije, u rasponu od metoda koje se temelje na fazno zaključanoj petlji (*PLL*) za sintezu vrlo visokih frekvencija, do dinamičkog programiranja izlaza digitalno-analognog pretvarača (*DAC*) za generiranje proizvoljnih valnih oblika na niže frekvencije. No, *DDS* metoda brzo postaje prihvaćena za rješavanje zahtjeva za generiranjem frekvencije (ili valnog oblika) u komunikacijama i industrijskim

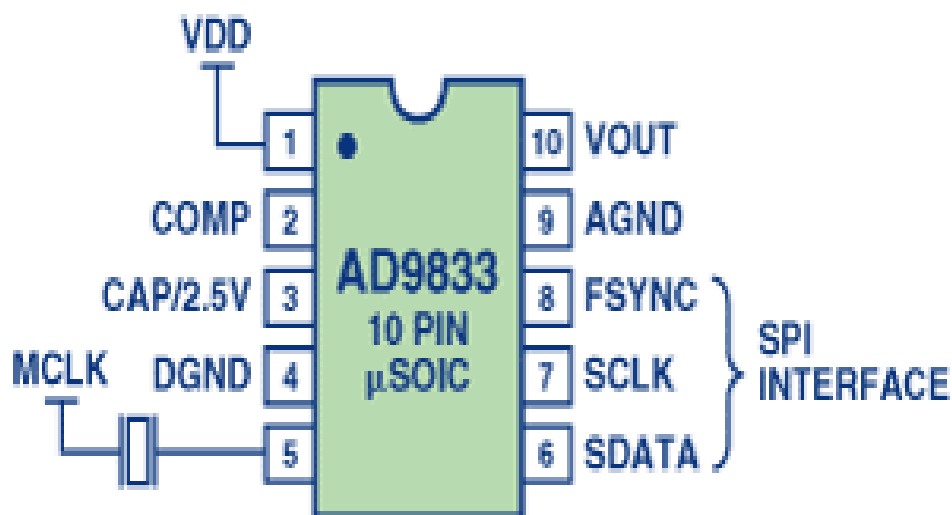
primjenama jer IC uređaji s jednim čipom mogu generirati programibilne analogne izlazne valne oblike jednostavno i uz visoku rezoluciju i točnost.



Slika 3. Blok shema postupka izravne digitalne sinteze signala

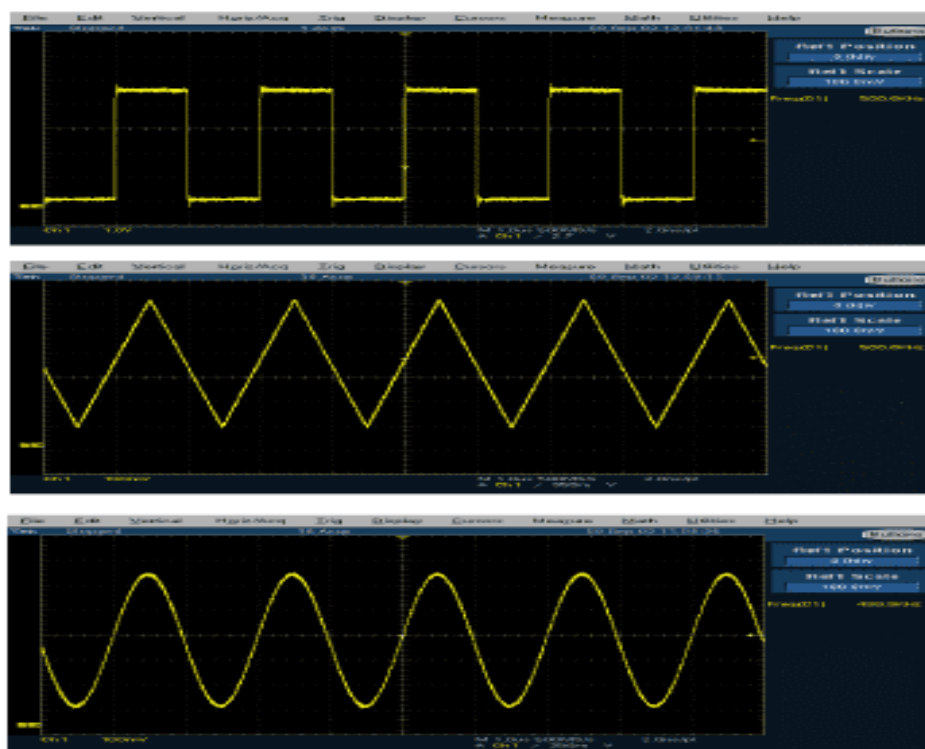
Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

Nadalje, stalna poboljšanja procesne tehnologije i dizajna rezultirala su razinama troškova i potrošnje energije koji su prije bili nezamislivo niski. Na primjer, AD9833, programibilni generator valnog oblika temeljen na DDS-u (Slika 4), koji radi na 5,5 V s taktom od 25 MHz, troši maksimalnu snagu od 30 milivata.



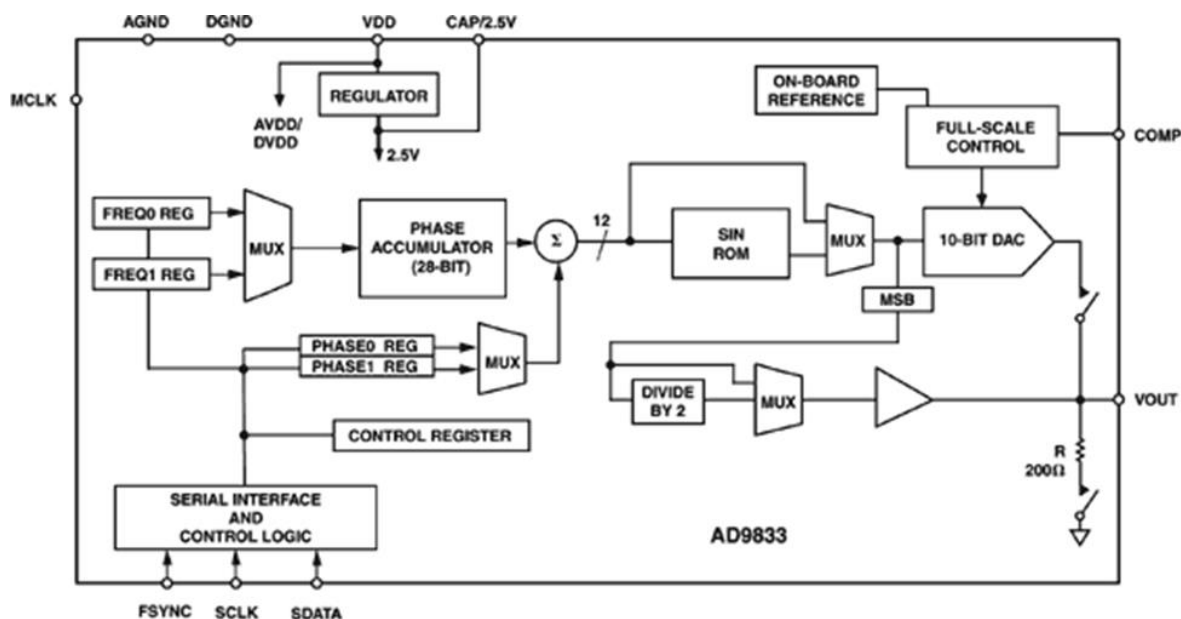
Slika 4. Integrirani krug AD9833

Izvor: https://www.analog.com/-/media/images/analog-dialogue/en/volume-38/number-3/articles/all-about-direct-digital-synthesis/dds_fig-01.gif?la=en&imgver=1



Slika 5. Spektar izlaznog signala sklopa integriranog kruga AD9833

Izvor: https://www.analog.com/-/media/images/analog-dialogue/en/volume-38/number-3/articles/all-about-direct-digital-synthesis/dds_fig-02.gif?la=en&imgver=1



Slika 6. Blok shema integriranog kruga AD9833

Izvor: <https://www.best-microcontroller-projects.com/image-files/ad9833-block-diagram.jpg?ezimgfmt=rs:591x316/rscb1/ng:webp/ngcb1>

4.1. SINTEZA SINUSNOG SIGNALA

Digitalna se sinteza sinusnog signala obavlja u dva koraka. U prvome se koraku određuje argument sinusne funkcije, ili trenutna faza sinusnog signala u konačnom broju vremenski ekvidistantnih trenutaka unutar jedne periode signala. U drugom se koraku ustanovljuju vrijednosti sinusne funkcije za izračunate vrijednosti argumenta, tj. razine uzoraka sinusnog signala u određenim vremenskim trenucima unutar periode signala.

Vremenski razmak između trenutaka u kojima se određuje razina uzorka jednak je periodi taktnog signala $T = 1/f_T$, gdje je f_T njegova frekvencija. Neka izlazni signal sintetizatora bude:

$$u_s(t) = U_{sm} \sin \omega_s t = U_{sm} \sin \Phi \quad (1)$$

U prvom koraku valja izračunati vrijednosti trenutnih faza signala za koje će se određivati razina signala. Neka se razina sinusnog signala određuje u n ekvidistantnih točaka unutar periode. Odgovarajuće trenutne faze tada iznose:

$$\Phi_x = \frac{2\pi}{n} * f_T * x \quad (2)$$

Tu je x normirana diskretna vremenska varijabla. Pošto se izračuna trenutna faza, ustanovljuju se razine odgovarajućih uzoraka sinusnog signala prema jednadžbi (1). Podaci o razinama sinusne funkcije za diskretne vrijednosti argumenta pohranjeni su u memoriji jedinice računala. Pri tome se upotrebljava memorija sa stalnim sadržajem, tzv. *ROM* (*ROM*, *Read-Only Memory*), koja služi samo za čitanje podataka. Podatak o trenutnoj fazi Φ_x tada odgovara adresi jedinice memorije u kojoj se nalazi podatak o razini $\sin \Phi_x$. Čitanjem sadržaja odgovarajućih jedinica memorije dobiva se digitalni signal koji se privodi digitalno-analognom pretvorniku.

4.1.1. Primjer sinteze sinusnog signala

Na slici 7. vidimo primjer sinteze jedne periode sinusnog signala na temelju 16 uzoraka. Perioda je signala, dakle, podijeljena na 16 jednakih dijelova koji određuju 16 ekvidistantnih točaka. Svako od 16 diskretnih stanja trenutne faze Φ_x pridružuje se binarni broj koji se sastoji od četiri binarne znamenke. Taj binarni broj određuje adresu jedinice ROM-memorije u kojoj je podatak o odgovarajućoj razini sinusne funkcije. Cikličkim čitanjem odgovarajućih jedinica memorije dobiva se digitalni signal u_1 koji, nakon pretvorbe u analogni oblik, odgovara signalu u_2 prema slici 7. Razlika između susjednih diskretnih

stanja trenutne faze, odnosno korak trenutne faze prema jednadžbi (2), iznosi $2\pi f_T/n$. Udvostruči li se taj korak, odnosno smanji broj uzoraka na polovicu, udvostručuje se frekvencija izlaznog signala sintetizatora. Najviša je frekvencija izlaznog signala sintetizatora ograničena uvjetom iz teorema uzoraka. Pri upotrebi digitalnih sintetizatora signala zahtijeva se da frekvencija uzoraka bude dvostruko veća od one koju kao minimalnu propisuje teorem uzoraka. Frekvencija uzoraka mora, dakle, biti barem četiri puta viša od najviše frekvencije izlaznog signala sintetizatora. Najviša je frekvencija izlaznog signala sintetizatora prema tome:

$$F_{\text{smaxs}} = \frac{F_t}{4} = \frac{1}{4} * T \quad (3)$$

Najniža je frekvencija izlaznog signala sintetizatora određena najvećim brojem uzoraka unutar jedne periode signala koju može dati sintetizator. Taj je broj jednak n , a on je i jednak broju podataka o razinama sinusne funkcije u *ROM*-memoriji sintetizatora. Najniža će frekvencija izlaznog signala sintetizatora prema tome biti:

$$f_{\text{smin}} = \frac{f_T}{n} = \frac{1}{nT} \quad (4)$$

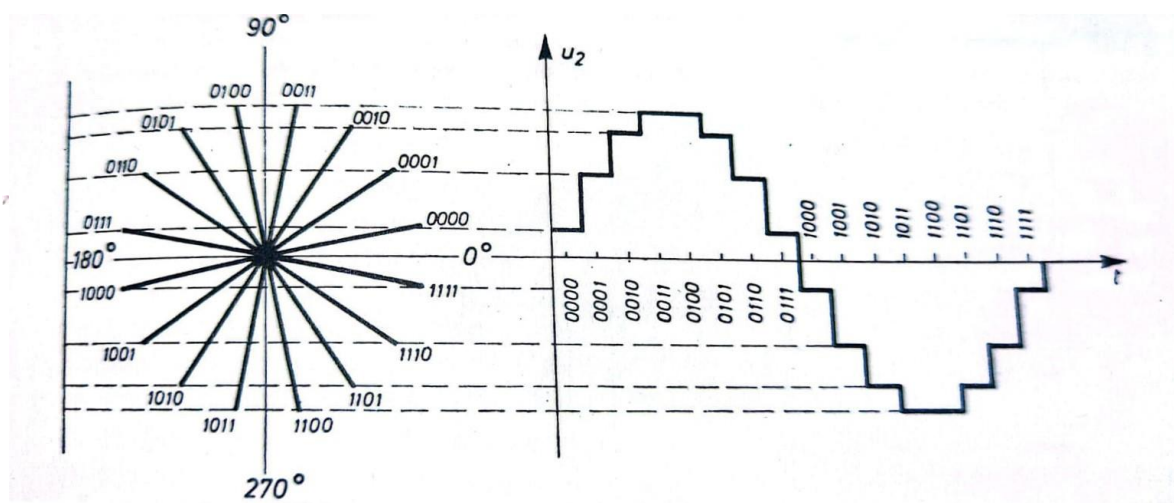
Frekvencija izlaznog signala sintetizatora može se mijenjati od f_{min} do f_{smaxs} u koracima od po:

$$\Delta f = \frac{f_T}{n} * \frac{1}{nT} \quad (5)$$

Frekvencija izlaznog signala sintetizatora odabire se pomoću broja k koji može poprimiti cjelobrojne vrijednosti od 1 do $n/4$. Faktorom k određuje se korak trenutne faze s obzirom na minimalnu vrijednost. Za neku vrijednost faktora k korak trenutne faze iznosi $2\pi k f_T/n$, pa je frekvencija izlaznog signala sintetizatora:

$$f_s = k * \frac{f_t}{n} \quad (6)$$

U primjeru na slici 7. faktor k može poprimiti vrijednosti od 1 do 4. On određuje adrese jedinica memorije iz kojih će se uzimati podaci. To se izvodi tako da se binarni broj k pribraja binarnom broju koji je određivao adresu jedinice memorije u prethodnom taktom intervalu. Neka bude npr. $k = 2$, ili u binarnom obliku 0010. Ako je u nekom trenutku „pročitani” podatak iz jedinice memorije s adresom 1011, u sljedećem će se taktom intervalu „čitati” podatak iz jedinice memorije s adresom $1011 + 0010 = 1101$.



Slika 7. Digitalna sinteza sinusnog signala za $n = 16$

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

5. NEIZRAVNA SINTEZA FREKVENCIJE

U neizravnom postupku sinteze frekvencije izlazni se signal sintetizatora dobiva iz naponom upravljanoj oscilatoru (*VCO*) koji se nalazi u jednoj regulacijskoj petlji. Osim namještanja željene frekvencije signala, zadatak je regulacijske petlje da održava i visoku stabilnost frekvencije. Ona, naime, smanjuje sve promjene frekvencije oscilatora u petlji, a koje su posljedica raznih poremećaja. Fazom zaključana petlja (*PLL*) najčešće je korištena vrsta regulacijske petlje u sklopovima sintetizatora. Može se koristiti bilo analogna bilo digitalna petlja.

Sintetizatori koji se temelje na neizravnom postupku sinteze jednostavne su konstrukcije. Jedinice sintetizatora najčešće su izvedene u obliku monolitnih integriranih sklopova (komparatori faze, programibilna i stalna dijelila, operacijska pojačala, a ponekad i *VCO*). Postupak omogućuje da se dobiju signali u relativno širokome frekvencijskom pojasu. Širina tog pojasa ograničena je područjem mogućih frekvencija naponom upravljanoj oscilatoru. Prespajanjem više sklopova *VCO* može se proširiti frekvencijsko područje sintetizatora. Sintetizator sam po sebi prigušuje neželjene frekvencijske komponente, pa se dobiva vrlo čisti spektar izlaznog signala.

Vrijeme namještanja frekvencije, relativno je dugo i da bi se spriječilo dugotrajno namještanje frekvencije, sintetizator se u temeljnom obliku ne upotrebljava za dobivanje signala s vrlo malim korakom frekvencije. Kombinirajući više faznih petlji u sklopu sintetizatora ostvaruje se fina rezolucija uz zadovoljavajuće vrijeme namještanja.

Osobine sintetizatora u pogledu šuma ne određuje samo izvor referentnog signala sa svojim obilježjima kao kod izravne sinteze. One ovise i o šumu naponom upravljanoj oscilatoru te o širini pojasa filtra u petlji koja, pak, određuje stupanj kojim petlja reducira šum oscilatora *VCO*. S poboljšanjem osobina kapacitivnih dioda i upotrebom malo šumnih visokofrekvencijskih bipolarnih ili unipolarnih tranzistora znatno se poboljšavaju osobine

oscilatora VCO u pogledu šuma. Zbog toga je ova vrsta sintetizatora pogodna i onda kad se zahtijeva vrlo dobra kvaliteta s obzirom na šum.

5.1. SINTEZA POMOĆU ANALOGNE FAZOM ZAKLJUČANE PETLJE

Sinteza frekvencije pomoću analogne fazom sinkronizirane zamke susreće se i pod nazivom koherentna neizravna sinteza frekvencije. Slika 8. prikazuje načelnu blok-shemu takva sintetizatora. Signal u grani povratne veze miješa se sa signalom u_h stabilne frekvencije. Frekvencija izlaznog signala miksera odgovara razlici frekvencija ulaznih signala miksera u_s i u_h :

$$f_2 = f_s - f_h \quad (7)$$

Nakon sinkroniziranja petlje frekvencija f_2 jednaka je frekvenciji f_r ulaznog signala petlje u_r koji se naziva referentnim signalom, odnosno:

$$f_r = f_s - f_h \quad (8)$$

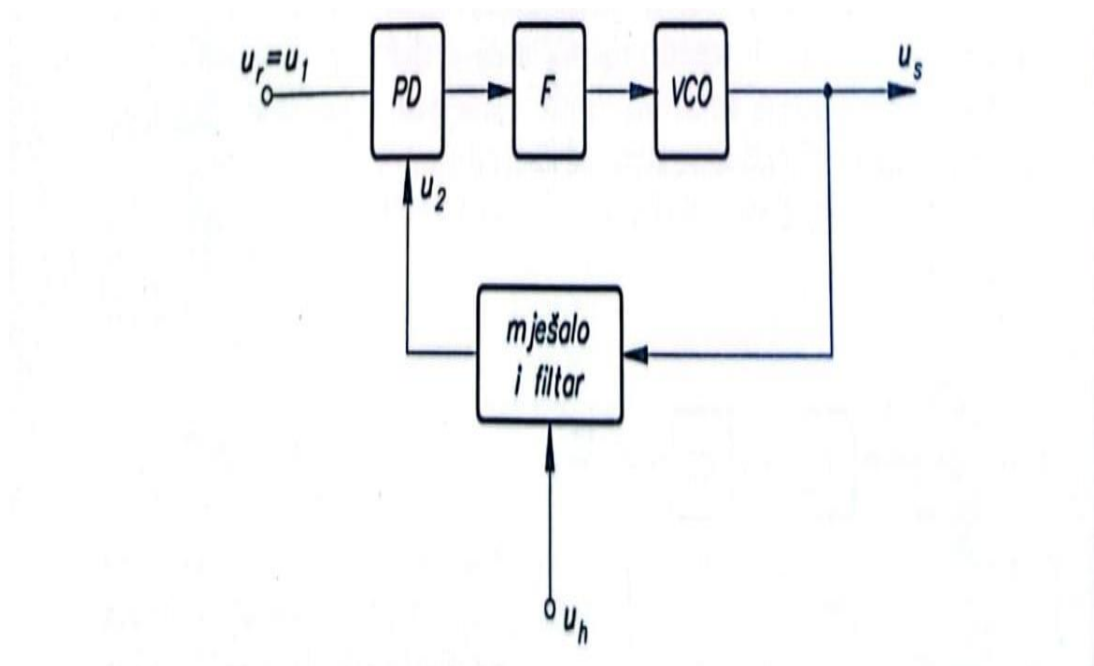
Taj rezultat pokazuje da je frekvencija izlaznog signala sintetizatora u_s jednaka:

$$f_s = f_r + f_h \quad (9)$$

Ona odgovara zbroju referentne frekvencije i frekvencije signala koji se privodi mikseru. Ako se frekvencije f_r i f_s odabiru iz dva neovisna skupa diskretnih frekvencija, onda ostvarujemo mogućnost biranja frekvencije izlaznog signala sintetizatora prema jednadžbi(8). Frekvencije f_r i f_s odabiru se pomoću odgovarajućih selektora frekvencije kao

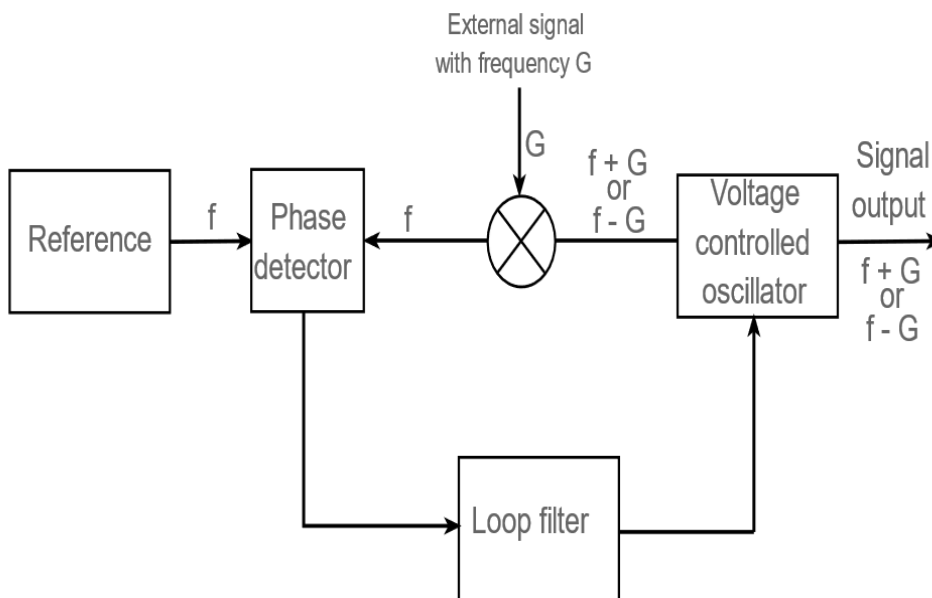
i u postupku izravne sinteze frekvencije. Radno područje frekvencija sintetizatora ograničeno je širinom područja sinkronizacije fazom sinkronizirane petlje.

Postupak sinteze frekvencije ima dosta sličnosti s izravnim postupkom sinteze. Sintetizator s analognim *PLL-om* daje izlazni signal s manjim sadržajem neželjenih frekvencijskih komponenti u odnosu na izravni sintetizator.



Slika 8. Blok shema sintetizatora frekvencije s analognom PLL

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.



Slika 9. Blok shema analognog sintetizatora frekvencije

Izvor: <https://www.electronics-notes.com/images/frequency-synthesizer-pll-analogue-basic-01.svg>

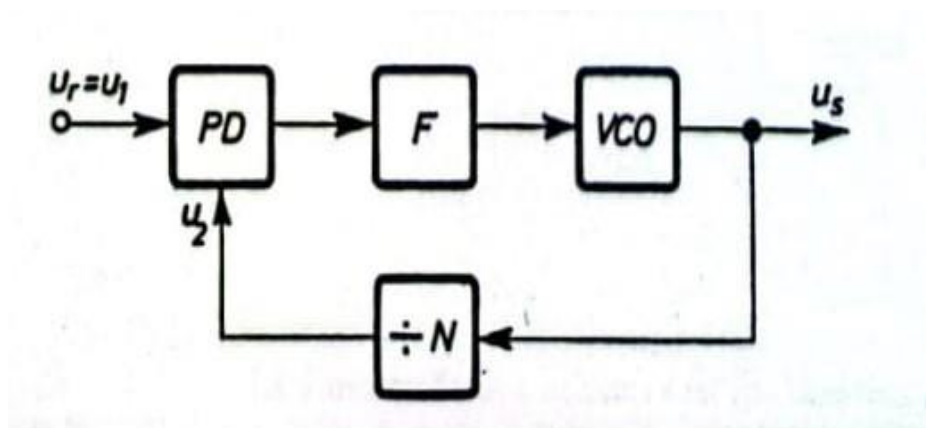
Analogni sintetizator ima pomak frekvencije postavljen u petlju, a to znači da će *VCO* raditi na različitoj frekvenciji od one usporedne frekvencije petlje. Način na koji fazno zaključana petlja, *PLL*, radi s ugrađenim mikserom može se analizirati na isti način koji je korišten za petlju s djeliteljem.

Kada je petlja zaključana, signali koji ulaze u fazni detektor su na potpuno istim frekvencijama. Mikser dodaje pomak jednak frekvenciji signala koji ulazi u drugi priključak miksera. Za ilustraciju načina na koji to funkcionira uključene su brojke. Ako referentni oscilator radi na frekvenciji od 10 MHz, a vanjski signal je na 15 MHz, tada *VCO* mora raditi na 5 MHz ili 25 MHz. Obično je petlja postavljena tako da mikser mijenja frekvenciju prema dolje i u jednom i drugom slučaju oscilator će raditi na 25 MHz.

5.2. SINTEZA POMOĆU DIGITALNE FAZOM ZAKLJUČANE PETLJE

Digitalnu fazom zaključanu petlju znatno je prikladnije koristiti u sklopu sintetizatora frekvencije od odgovarajuće analogne petlje. Razlog tome je u većoj širini područja sinkroniziranja i bržem prijelazu s jedne na drugu frekvenciju. Osim toga digitalna se petlja lakše spreže s digitalnim sklopovima za izbor i upravljanje frekvencijom sintetizatora. Slika 10. prikazuje temeljnu blok-shemu sintetizatora frekvencije s digitalnom fazom zaključanom petljom. U granu povratne veze petlje uključuje se sklop dijelila frekvencije s faktorom dijeljenja N . Petlji se privodi referentni signal u_r stabilne frekvencije f_r . U ovome najjednostavnijem slučaju referentni signal u_r odgovara ulaznom signalu petlje u_1 . Frekvencija signala u_2 je N puta manja od frekvencije izlaznog signala sintetizatora, odnosno:

$$f_2 = \frac{f_s}{N} \quad (10)$$



Slika 10. Blok shema sintetizatora frekvencije s digitalnom fazom sinkroniziranom petljom

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

Nakon sinkroniziranja petlje postaje $f_2 = f_r$ ili :

$$f_s = N * f_r \quad (11)$$

Frekvencija izlaznog signala sintetizatora je N puta viša od frekvencije referentnog signala. S promjenom faktora dijeljenja na N_1 npr. mijenja se frekvencija izlaznog signala, i nakon sinkroniziranja petlje ona je:

$$f_{s1} = N_1 * f_r \quad (12)$$

Mijenja li se veličina faktora dijeljenja dijelila u grani povratne veze, mijenja se frekvencija oscilatora VCO , odnosno frekvencija izlaznog signala sintetizatora. Promjene su frekvencije diskretne zbog diskretnih promjena faktora dijeljenja koji poprima samo cjelobrojne vrijednosti. Najmanja promjena frekvencije izlaznog signala nastaje pri promjeni veličine faktora dijeljenja za jedan i ona iznosi:

$$\Delta f = f_r \quad (13)$$

Trenutna faza signala dobiva se kao integral trenutne frekvencije. Prema tome, trenutna faza $\Theta_2(p)$ izlaznog signala dijelila frekvencije je N puta manja od trenutne faze izlaznog signala sintetizatora $\Theta_s(p)$. Prijenosna funkcija dijelila frekvencije s faktorom dijeljenja N je onda jednaka:

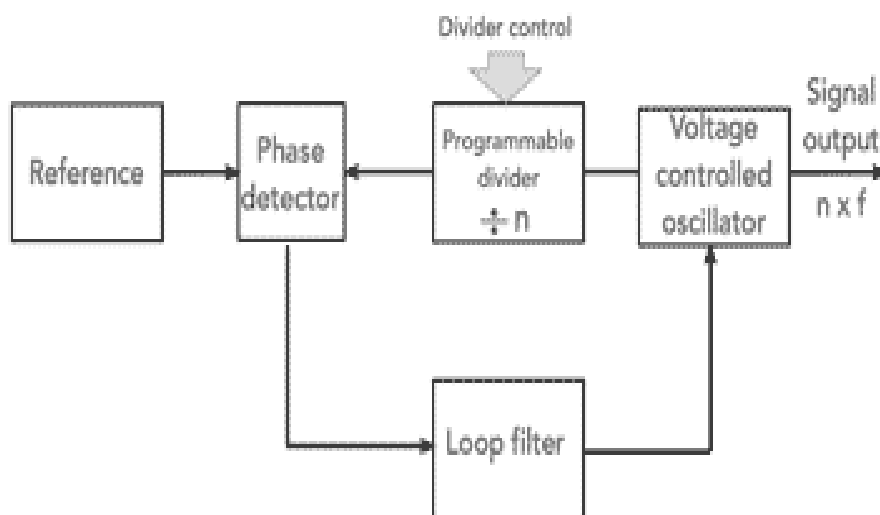
$$\frac{\Theta_2(p)}{\Theta_s(p)} = \frac{1}{N} \quad (14)$$

Digitalni PLL sintetizator frekvencije koristi fazno zaključanu petlju kao osnovu svog rada. Fazno zaključana petlja sastoji se od niza blokova strujnog kruga, faznog detektora,

naponski kontroliranog oscilatora i filtra. Petlja uspoređuje fazu referentnog signala i *VCO*-a i vraća izlaz faznog detektora na upravljački terminal *VCO*-a preko filtra.

Smisao izlaza iz faznog detektora je takav da pokušava povući *VCO* frekvenciju prema referentnoj. Na kraju je postignuta točka u kojoj se na *VCO* upravljački terminal primjenjuje stalni napon. To znači da postoji stalna fazna razlika između referentnog i *VCO* signala. Budući da se fazna razlika ne mijenja, to znači da su frekvencije *VCO* i referenta frekvencija potpuno iste i da je petlja zaključana.

Kako bi iz fazno zaključane petlje razvili digitalni *PLL* sintetizator frekvencije, digitalni djelitelj se postavlja između *VCO* i faznog detektora kako bi se *VCO* frekvencija podijelila. Smještaj programibilnog djelitelja u petlji sintetizatora frekvencije može se vidjeti na slici 11.



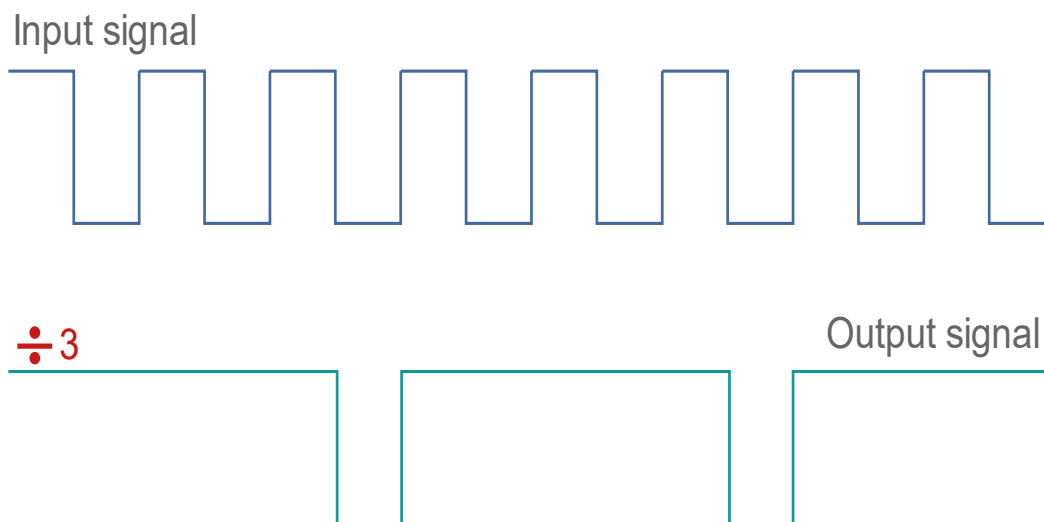
Slika 11. Digitalni sintetizator frekvencije

Izvor: <https://www.electronics-notes.com/images/frequency-synthesizer-pll-digital-basic-01.png>

Programibilni djelitelji ili brojači koriste se u mnogim područjima elektronike. Oni ulaznu frekvenciju dijele s omjera djelitelja (u ovom slučaju s brojem 3) i daju nam valni oblik izlazne frekvencije kao na slici 12.

Kada se djelitelj doda u krug, fazno zaključana petlja (*PLL*) i dalje pokušava smanjiti faznu razliku između dva signala koji ulaze u fazni komparator. Kada je krug zaključan, oba signala koja ulaze u komparator su potpuno iste frekvencije. Da bi ovo bilo točno, naponski kontrolirani oscilator mora raditi na frekvenciji jednakoj frekvenciji usporedbe faza pomnoženoj s omjerom dijeljenja. Može se vidjeti da ako se omjer dijeljenja promijeni za jedan, tada će se naponski kontrolirani oscilator morati promijeniti na sljedeći višekratnik referentne frekvencije. To znači da je frekvencija koraka sintetizatora jednaka frekvenciji koja ulazi u komparator.

Iz rada osnovnog digitalnog sintetizatora frekvencije može se vidjeti da je izlazna frekvencija 'n' puta referentna frekvencija, gdje je 'n' omjer dijeljenja. Promjena omjera dijeljenja za jedan najmanja je promjena frekvencije koja se može napraviti.

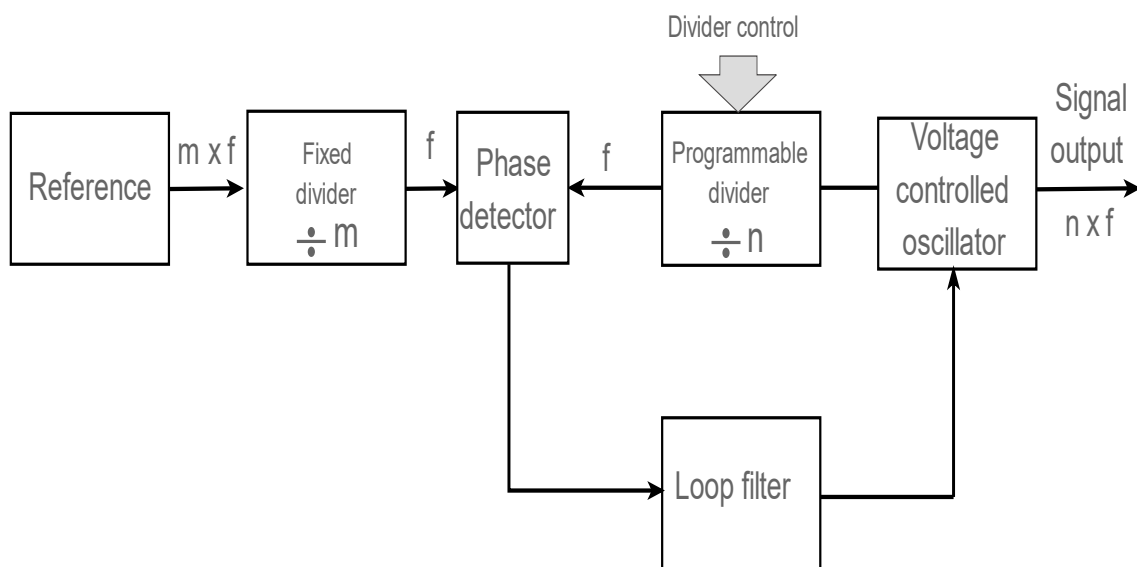


Slika 12. Dijagram digitalnog djelitelja u slučaju omjera dijeljenja s 3

Izvor: [https://www.electronics-notes.com/images/frequency-synthesizer-digital-divider-operation-](https://www.electronics-notes.com/images/frequency-synthesizer-digital-divider-operation-01.svg)

01.svg

Kako bi bolje razumjeli rad sintetizatora opisan je primjer sa stvarnim brojkama. Referentni oscilator može raditi na frekvenciji od 1 MHz. Da bi se postigla najbolja stabilnost i ukupna izvedba, potreban je oscilator s kristalom kvarca, a optimalna izvedba se postiže s oscilatorima koji rade u području - 1 MHz, 5 MHz, 10 MHz. Za veličinu koraka sintetizatora od 12,5 kHz koji se koristi za uskopojasne FM govorne uređaje ili bazne stanice za radio komunikacije, da bi se dobila frekvencija usporedbe faza od 12,5 kHz, sintetizator mora sadržavati digitalni djelitelj frekvencije s fiksnim omjerom dijeljenja od 80 (1 MHz podijeljeno s 80 = 12,5 kHz). Ako izlaz sintetizatora treba raditi između 144 i 146 MHz tada programibilni djelitelj mora biti u stanju pružiti omjer dijeljenja od 11520 do 11680. Ovo je samo primjer i sve prikladne brojke mogu se koristiti za traženi frekvencijski raspon i veličinu koraka. Glavni zahtjev je da omjer dijeljenja ne bude toliko velik da stabilnost petlje ili fazni šum postanu problem.



Slika 13. Neizravni digitalni sintetizator frekvencije

Izvor : <https://www.electronics-notes.com/images/frequency-synthesizer-pll-digital-with-reference-divider-01.svg>

6. HIBRIDNA SINTEZA FREKVENCIJE

Samo najjednostavniji sklopovi sintetizatora frekvencije koriste isključivo jedan postupak sinteze. U složenijih se uređaja obično susreću kombinacije dvaju ili čak svih triju postupaka. Korištenje pojedinog postupka sinteze samo na području gdje on pokazuje svoje prednosti pred ostalima omogućava optimiranje obilježja sintetizatora u pogledu tehničkih osobina (brzo namještanje frekvencije, fina rezolucija, dobra čistoća spektra izlaznog signala, jednostavnost sklopova i sl.) kao i u pogledu dimenzija i cijene uređaja. Sintezu frekvencije koja koristi dva ili sva tri osnovna postupka sinteze nazivamo hibridnom sintezom frekvencije.

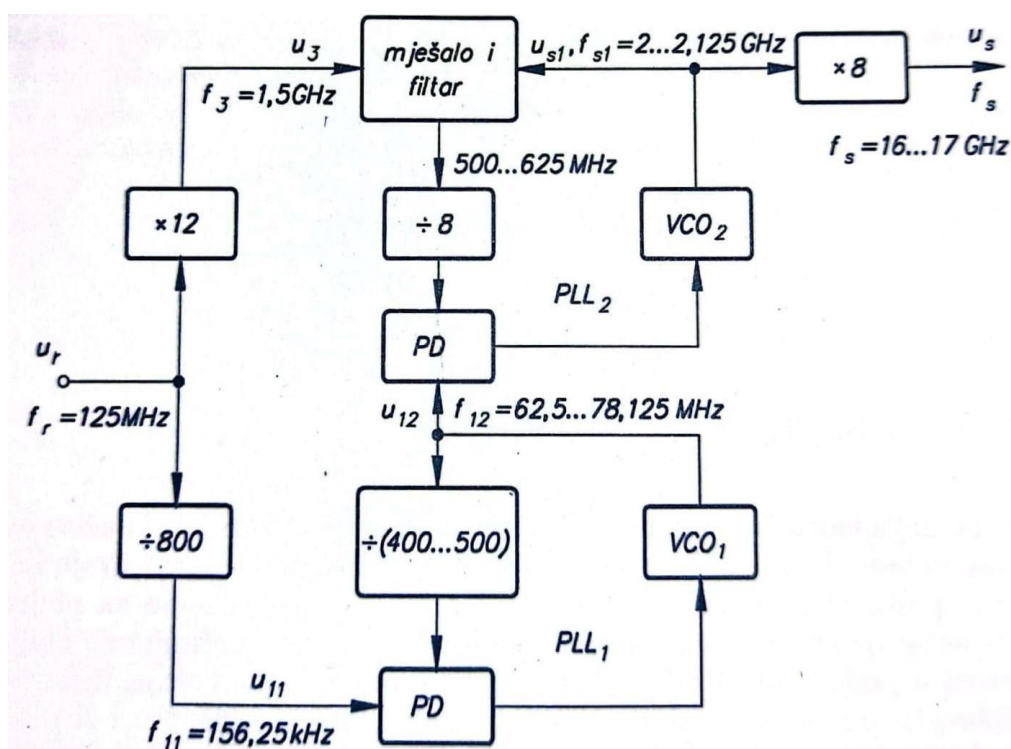
6.1. PRIMJERI HIBRIDNIH SINTETIZATORA FREKVENCIJE

Na slici 14. vidimo primjer jednog mikrovalnog sintetizatora u kojeg su spregnute dvije fazom sinkronizirane petlje. Referentni je signal obiju petlji frekvencije 125 MHz i on se dobiva iz jednoga oscilatora s kristalom kvarca. PLL_1 je tzv. uskopojasna petlja. Izlazni signal te petlje što ga generira VCO_1 , služi kao ulazni signal tzv. širokopojasne petlje PLL_2 . Ulazni signal za PLL_1 nastaje dijeljenjem frekvencije f_r s faktorom 800 ($f_{11} = 156.25$ kHz). Petlja PLL_1 predočuje jedan neizravni sintetizator kojim se dobivaju signali u području $f_{12} = 62.500 \dots 78.125$ MHz. Množenjem frekvencije referentnog signala s faktorom 12 dobiva se signal frekvencije $f_{13} = 1500$ MHz. On se miješa s izlaznim signalom petlje PLL_2 radi snižavanja frekvencije signala u grani povratne veze petlje. U petlji PLL_2 nalazimo dijelilo frekvencije sa stalnim faktorom dijeljenja 8. Frekvencija izlaznog signala te petlje je jednaka:

$$f_{s1} = 8 * f_{12} + f_3 \quad (15)$$

$$f_{s1} = 8 * (62,500 \dots 78,125) + 1500 \text{ [MHz]} \quad (16)$$

Prema jednadžbi 16 izlazni je signal PLL_2 u području frekvencija od 2000...2125 MHz. Frekvencija tog signala može se mijenjati s korakom $\Delta f_{s1} = 8 \cdot \Delta f_{12} = 8 \cdot \Delta f_{11} = 125$ MHz. Množenjem frekvencije signala u_{s1} dobiva se izlazni signal sintetizatora u području od 16.00...17.00 GHz s korakom od 10 MHz.



Slika 14. Hibridni sintetizator frekvencije s dvije fazom sinkronizirane petlje

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

Neizravna sinteza frekvencije često je jako prikladni postupak dobivanja referentnih signala. Uzmimo npr. izravni sintetizator na slici 15. koji primjenjuje iterativni postupak sinteze s bazom 8.

On zahtijeva devet referentnih signala. To su signali frekvencija 112; 114; 116; ... 126 i 16 MHz. Problem dobivanja tih signala možemo riješiti neizravnim sintetizatorom prema slici 16. Odaberimo referentnu frekvenciju cijeloga sintetizatora $f_r = 16$ MHz. Taj će signal

izravno poslužiti za jedan od referentnih signala izravnog sintetizatora. Radi brzog namještanja frekvencije oscilatora u *PLL-u* odabiremo najvišu moguću frekvenciju ulaznog signala petlje. Ona je tada jednaka potrebnoj rezoluciji izlaznog signala petlje. U našem primjeru tada mora biti $f_1 = 2 \text{ MHz}$. Faktor dijeljenja dijelila frekvencije referentnog signala neizravnog sintetizatora je onda jednak:

$$R = \frac{f_r}{f_1} = \frac{16}{2} = 8 \quad (17)$$

Faktor dijeljenja dijelila u grani povratne veze petlje uzimamo $M = 1$ (tj, ne koristimo dijelilo sa stalnim faktorom dijeljenja), a potrebne faktore dijeljenja N izračunavamo pomoću (18):

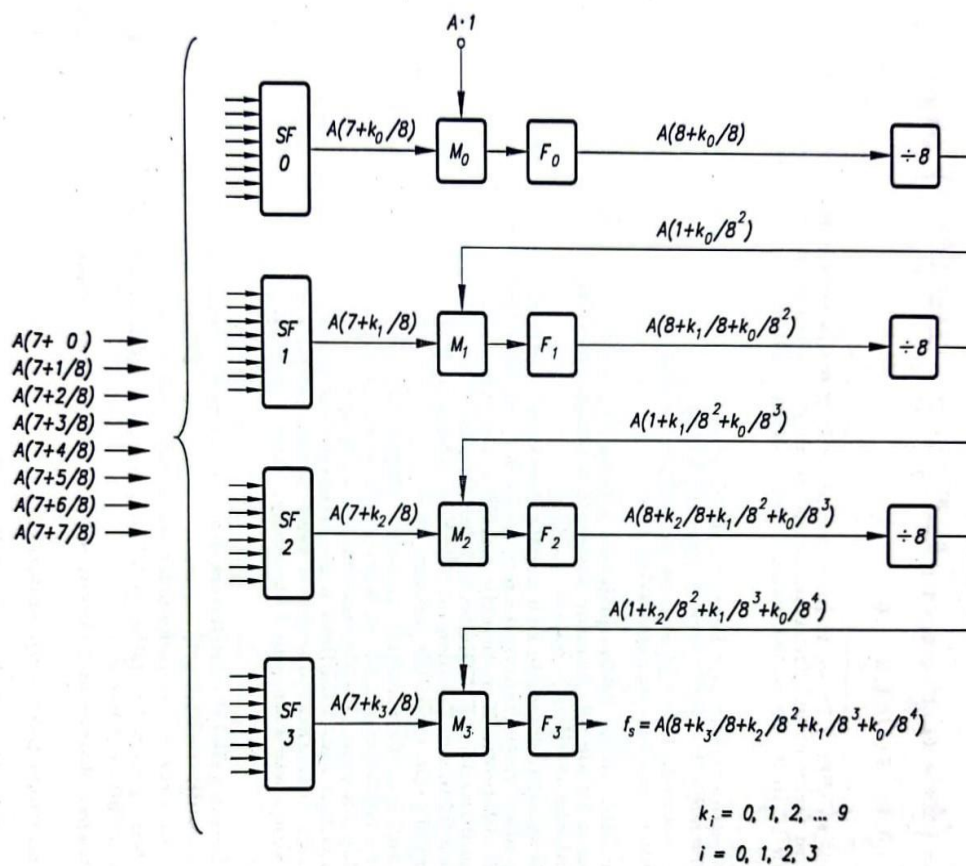
$$\Delta f = M * f_1 = \frac{M}{R} * f_r \quad (18)$$

$$N = R * \frac{f_s}{M} * f_r = 8 * (112...126) / 1 * 16 = 56...63 \quad (19)$$

Svaki od četiriju selektora frekvencije na slici 15 nadomještava se jednim neizravnim sintetizatorom prema slici 16. Parametri toga neizravnog sintetizatora iznose:

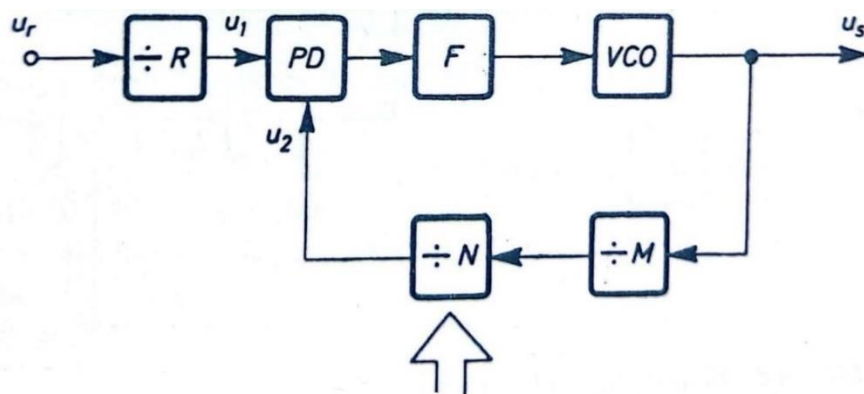
$$f_r = 16 \text{ MHz}, R = 8, N = 56...63 \quad (20)$$

Umjesto selektorima frekvencije SFO, SFI, SF2 i SF3, frekvencije ulaznih signala miješala odabiru se namještanjem potrebnih faktora dijeljenja frekvencije N_0 , N_1 , N_2 i N_3 u odgovarajućim neizravnim sintetizatorima.



Slika 15. Primjer sintetizatora koji primjenjuje iterativni postupak izravne sinteze s bazom 8

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.



Slika 16. Blok shema sintetizatora frekvencije s dijelilom frekvencije referentnog signala

Izvor : Modlic, B., Bartolović, J.: Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb, 1995.

7. ZAKLJUČAK

Zadnjih desetak godina tehnika digitalne sinteze izazvala je zanimanje zbog poboljšanog razvoja digitalne i procesne tehnologije, dizajna i računala. Mnogo raznih uređaja današnjice poput televizora, mobilnih telefona, prijemnika, satelitskih prijemnika koriste sintetizatore frekvencije. Da bi to bilo moguće koriste se tri postupka sinteze, postupci izravne ili neizravne sinteze, frekvencije i postupak digitalne sinteze signala. Signali izravne frekvencije se temelje na osnovi aritmetičkih operacija na frekvenciju stabilnog izvora signala. U postupku neizravne sinteze frekvencije izlazni signal generira jedan oscilator, te zaključno je da je potrebno vrijeme prijelaza s jedne na drugu frekvenciju do 10 ms. Digitalna sinteza signala (*DDS*) odlikuje se prednostima u odnosu na druge tehnike frekvencijske sinteze koje su ranije spomenute, no ima i nedostataka. Ono što ju izdvaja od ostalih je mogućnost generiranja sinusnog signala koji je sinkroniziran s ulaznom frekvencijom, jednostavna struktura i točnost.

PLL se koristi kako bi određeni oscilator održali sinkroniziran, i po fazi i po frekvenciji, s ulaznim signalnom i promijenili mu frekvenciju. Napon greške iz faznog detektora dobijemo ukoliko postoji razlika u frekvenciji ili fazi između dva signala. Stoga, vraćajući fokus na direktnu digitalnu sintezu i njene dobre osobine, *DDS* je našla svoju primjenu u realizacijama koje su ranije bile ograničene samo na primjenu *PLL*.

8. LITERATURA

Knjige:

- [1] : Modlic, B., Bartolović, J. 1995, Miješanje , miješala i sintetizatori frekvencija, Školska knjiga, Zagreb.
- [2] : Modlic, I., Modlic, B. 1982, Visokofrekvencijska elektronika: Modulacija, modulatori, sintetizatori frekvenci, Školska knjiga, Zagreb.
- [3] : Crawford, A.J. 1994, Frequency synthesizer design handbook, Artech house, Norwood.
- [4] : doc. dr. sc. Zoran Mrak : Predavanja iz kolegija Osnove elektroničkih komunikacija

Izvori s interneta:

- [5] : Sofonyas, S, 2019, *Frequency Synthesizers Techniques*,, Information Network Security Agency, online:
file:///C:/Users/Kajin/Downloads/Frequency_Synthesizers_Techniques.pdf
- [6] : Sintetizatori frekvencije, 2020, online:
<https://tfmarket.ru/hr/makeup/sintezatory-chastoty-starikov-o-bazovaya-shema-konstruktivnye-bloki-i.html>
- [7] : Murphy E., Slattery, C., 2004, All About Direct Digital Synthesis, Online:
<https://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/all-about-direct-digital-synthesis.html>
- [8] : What is direct digital synthesis, online:
<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/dds-direct-digital-synthesis-synthesizer-what-is-basics.php>
- [9] : Digital PLL Frequency Synthesizer, online :
<https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/pll-indirect-digital-rf-synthesizer-basics.php>

9. KAZALO KRATICA

AFC - Automatic frequency control - Automatsko upravljanje frekvencijom.....	1
DAC - <i>Digital to analog converter</i> - <i>Digitalno analogni pretvarač</i>	7
DDS - Direct digital synthesis - Direktna digitalna sinteza.....	1
FLL - <i>Frequency-Locked Loop</i> - <i>Frekvencijski zaključana petlja</i>	3
GH - Harmonic generator - Generator harmonika.....	4
GPS - Global Positioning System - Globalni pozicijski sustav.....	1
IC - <i>Integrated circuit</i> - <i>Integrirani krug</i>	8
PLL - <i>Phase-Locked Loop</i> - <i>Fazno zaključana petlja</i>	1
ROM - <i>Read-Only Memory</i> - <i>Memorija za trajnu pohranu</i>	11
SF - Frequency selector - Selektor frekvencije	4
VCO - <i>Voltage controled oscilator</i> - <i>Osililator upravlján naponom</i>	14

10. POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak koherentne izravne sinteze frekvencije.....	5
Slika 2. Blok shema sintetizatora s nekoherentnom izravnom sintezom frekvencije	6
Slika 3. Blok shema postupka izravne digitalne sinteze signala	8
Slika 4. Integriranog krug AD9833	9
Slika 5. Spektar izlaznog signala integriranog kruga AD9833	9
Slika 6. Blok shema integriranog kruga AD9833	10
Slika 7. Digitalna sinteza sinusnog signala za $n = 16$	13
Slika 8. Blok shema sintetizatora frekvencije s analognom PLL	16
Slika 9. Blok shema analognog sintetizatora frekvencije.....	17
Slika 10. Blok shema sintetizatora frekvencije s digitalnom fazom sinkroniziranom petljom	18
Slika 11. Digitalni sintetizator frekvencije	20
Slika 12. Dijagram digitalnog djelatelja u slučaju omjera dijeljenja s 3	21
Slika 13. Neizravni digitalni sintetizator frekvencije	22
Slika 14. Hibridni sintetizator frekvencije s dvije fazom sinkronizirane petlje	24
Slika 15. Primjer sintetizatora koji primjenjuje iterativni postupak izravne sinteze s bazom 8	26
Slika 16. Blok shema sintetizatora frekvencije s djelilom frekvencije referentnog signala	27