

# Adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator

---

Čubaković, Lovro

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:736600>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**

*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**

**Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija**

**ADAPTIVNI INTEGRALNI IMPULSNO FREKVENCIJSKI**  
**MODULATOR**

**Završni rad**

**Lovro Čubaković**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

Osijek, 15.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Lovro Čubaković
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4357, 25.07.2017.
<b>OIB studenta:</b>	01088227472
<b>Mentor:</b>	Izv.prof.dr.sc. Tomislav Matić
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektronika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Vrlo dobar (4)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 2 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 2 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	15.09.2021.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	22.09.2021.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 26.09.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Lovro Čubaković

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4357, 25.07.2017.

**Turnitin podudaranje [%]:**

2

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator**

izrađen pod vodstvom mentora Izv.prof.dr.sc. Tomislav Matić

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak završnog rada</b> .....	<b>2</b>
<b>2. IMPULSNI MODULACIJSKI POSTUPCI</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. Modulacija amplitude impulsa</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2. Modulacija širine impulsa</b> .....	<b>8</b>
<b>2.3. Modulacija položaja impulsa</b> .....	<b>10</b>
<b>2.4. Modulacija frekvencije impulsa</b> .....	<b>12</b>
<b>3. ADAPTIVNI INTEGRALNI IMPULSNO FREKVENCIJSKI MODULATOR</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1. Integralni impulsno frekvencijski modulator</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1.1. Unipolarni IPFM (SS-IPFM)</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1.2. Bipolarni IPFM (DS-IPFM)</b> .....	<b>19</b>
<b>3.2. Primjena adaptivnih tehnika za integralni impulsno frekvencijski modulator</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3. Osnovne izvedbe adaptivnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora</b> .....	<b>22</b>
<b>4. SIMULACIJA ADAPTIVNOG IPFM MODULATORA</b> .....	<b>23</b>
<b>4.1. Simulacijski model IPFM modulatora</b> .....	<b>23</b>
<b>4.2. Vrednovanje rezultata simulacije za idealni IPFM modulator</b> .....	<b>25</b>
<b>4.3. Simulacijski model adaptivnog IPFM modulatora</b> .....	<b>29</b>
<b>4.4. Vrednovanje rezultata simulacije za adaptivni IPFM modulator</b> .....	<b>30</b>
<b>5. ZAKLJUČAK</b> .....	<b>37</b>
<b>LITERATURA</b> .....	<b>38</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>40</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>41</b>

## 1. UVOD

U komunikacijskoj je tehnologiji nužno poruku nošenu električnim signalom, kojeg reprezentiraju veličine poput napona, jakosti struje ili elektromagnetskog vala, dostaviti od prijemne do predajne strane uz što manje vanjskih smetnji, tj. šuma. Zbog toga se uz signal koji nosi informaciju, modulacijski signal, koristi još jedan signal visoke frekvencije kojeg nazivamo prijenosnim signalom. Modulacijski signal mora proći proces modulacije kako bi bio poslan kroz komunikacijski kanal. Prijenosni signal visoke frekvencije, koji ima određenu fazu, frekvenciju i amplitudu, ali ne sadrži informaciju, služi kako bi se modulacijski signal prenio do odredišta poslije modulacije. Modulaciju možemo definirati kao postupak mijenjanja jednog ili više parametara prijenosnog signala ovisno o modulacijskom signalu, a rezultat modulacije je modulirani signal. Elektronički sklop u kojemu se odvija proces modulacije naziva se modulator.

Modulacijske postupke možemo ugrubo sistematizirati na analogne modulacijske postupke (mijenjanje amplitude, faze i frekvencije sinusnog signala), modulacije impulsnih signala (PAM, PWM, PPM, PFM, PCM) te na digitalne modulacijske postupke (PSK, FSK, ASK).

Integralna impulsno frekvencijska modulacija sastoji se od integriranja vrijednosti napona na ulazu u modulator te uspoređivanja te vrijednosti s graničnom vrijednosti (threshold) komparatora. Na početku integriranja integrirani ulazni signal naglo raste te se ta funkcija može opisati kao ramp funkcija. Svaki put kada amplituda napona na izlazu iz integratora dosegne referentnu vrijednost, odnosno vrijednost veću od granične vrijednosti, vrijednost napona na komparatoru naglo opada te modulator generira impuls. Pritom se cijeli sklop resetira te integracija ulaznog modulacijskog signala kreće ispočetka. Na kraju modulacijskog postupka dobiva se modulirani signal kojeg čine niz impulsa gdje razmak između tih impulsa opisuje ulazni signal. Informacija o ulaznom signalu nalazi se u frekvenciji impulsa, odnosno razmaku između njih. Modulirani signal poprima visoku razinu u vrlo kratkim vremenskim intervalima pa zato IPFM modulator karakterizira niska potrošnja energije.

U prvom dijelu rada su matematički opisani analogni impulsni modulacijski postupci, njihova primjena te je svaki modulacijski postupak prikazan pomoću grafa. Navedene su prednosti i nedostaci svakog te su postupci međusobno uspoređeni po tim karakteristikama. U nastavku rada definiran je idealni integralni impulsno frekvencijski modulator pomoću blok shema te je objašnjena njegova podjela na unipolarni i bipolarni IPFM. Za SS-IPFM (single-signed IPFM) i DS-IPFM (double-signed IPFM) dani su valni oblici i pripadajuće matematičko rješenje za valne oblike signala na ulazu i izlazu iz modulatora i integratora. Zatim su opisane adaptivne tehnike te njihova primjena u području integralne impulsno frekvencijske modulacije te je implementiran adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator. Na kraju rada je odrađena simulacija idealnog i adaptivnog IPFM-a u programu Matlab, a blok sheme su izrađene u Simulinku. Za svaku blok shemu simulirani su valni oblici na izlazu iz integratora te je uspoređen ulazni valni oblik i valni oblik signala na izlazu iz modulatora.

### **1.1. Zadatak završnog rada**

Opisati načela rada integralnog impulsno frekvencijskog modulatora. Definirati osnovne arhitekture integralnih impulsno frekvencijskih modulatora s naglaskom na adaptivne tehnike. Izraditi simulacijski model adaptivnog integralno frekvencijskog modulatora te vrednovati rezultate simulacije.

## 2. IMPULSNI MODULACIJSKI POSTUPCI

Za razliku od postupaka moduliranja prijenosnog signala koji je definiran sinusnim valnim oblikom, kod modulacije impulsnih signala prijenosni signal je impulsni signal pravokutnog oblika. Modulirani signali kod kojih se koristi sinusni prijenosni signal zauzimaju najmanju širinu frekvencijskog pojasa jer prijenosni signal (sinus) ima samo jednu frekvencijsku komponentu. U usporedbi s tim, impulsna modulacija rezultira širokopojsnim moduliranim signalom.

Impulsnu modulaciju dijelimo na analgonu i digitalnu.

U analognim tehnikama modulacije mijenjaju se amplituda, širina, pozicija te frekvencija impulsa, stoga analogne tehnike impulsne modulacije možemo svrstati na četiri skupine:

- Modulacija amplitude impulsa (PAM, Pulse Amplitude Modulation).
- Modulacija širine impulsa (PWM, Pulse Width Modulation).
- Modulacija položaja impulsa (PPM, Pulse Position Modulation).
- Modulacija frekvencije impulsa (PFM, Pulse Frequency Modulation).

U digitalnim tehnikama se koristi pulsno-kodna modulacija (PCM, Pulse Code Modulation) kod koje se analogni signal pretvara u digitalni oblik jedinica i nula te se ta modulacija može razviti u delta modulaciju (DM).

Još jedna važna karakteristika impulsnih signala je ta da su diskretni u vremenu te je zato nemoguće modulirati takve signale modulacijskim signalom koji je vremenski kontinuiran, npr. signal govora. Zato je potrebno prije modulacije diskretizirati modulacijski signal po vremenu, a to je izvedivo ako je broj uzoraka po jedinici vremena veći ili jednak dvostruko najvišoj frekvenciji u tom spektru kontinuiranog signala. Ovaj uvjet proizlazi iz teorema uzoraka te je dan formulom [2, str. 414]:

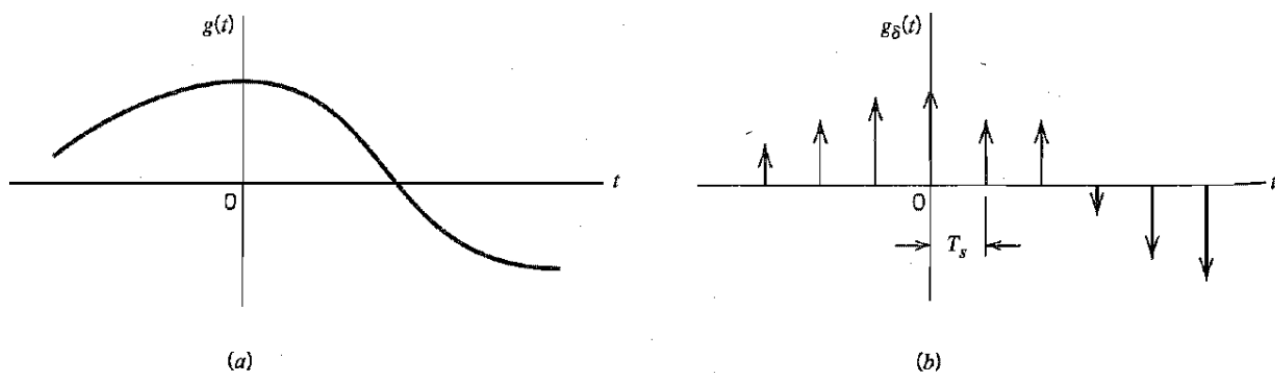


$$T \leq \frac{1}{2f_{maks}}, \quad (2-1)$$

gdje je:

$T$  – period signala koji se uzorkuje (diskretizira po vremenu),

$f_{maks}$  – najveća frekvencija u spektru signala.



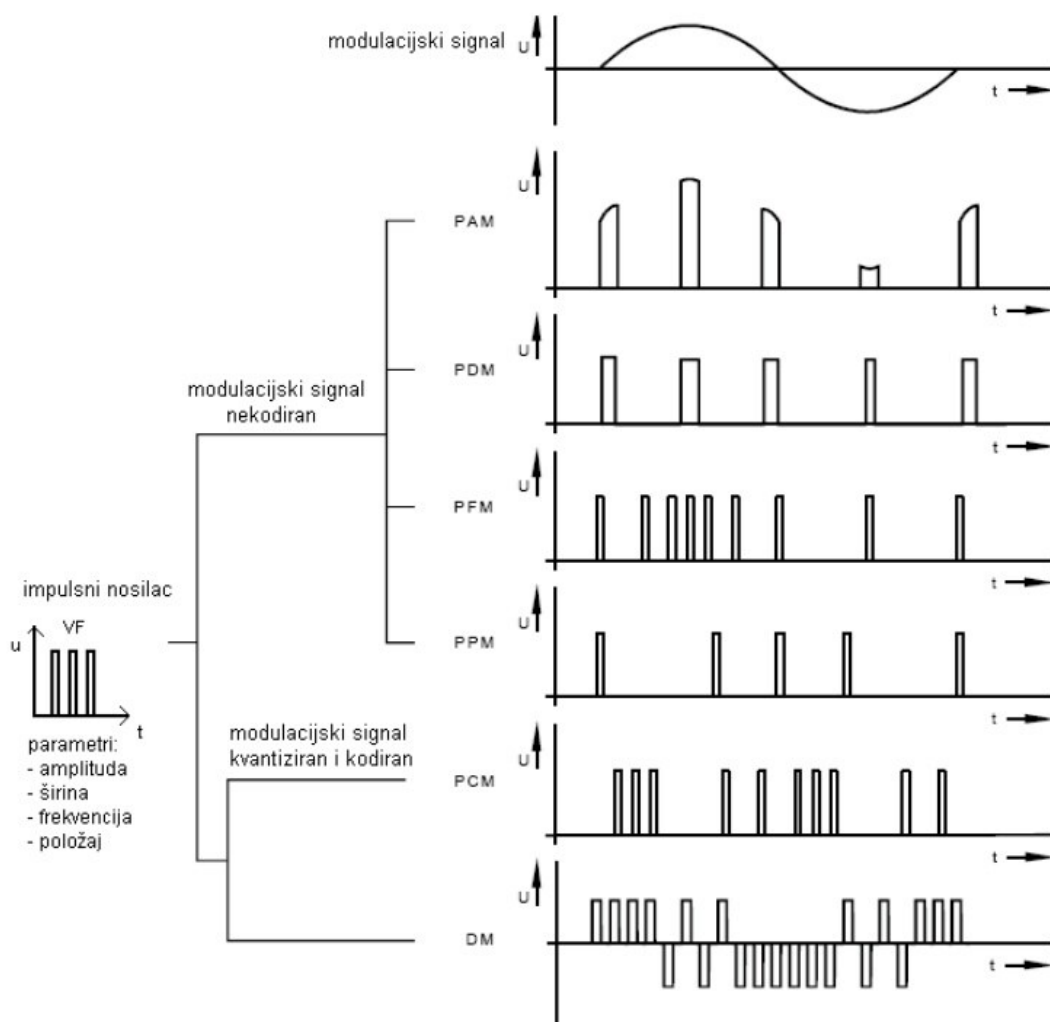
**Slika 2.1.** Proces diskretizacije. (a) Analogni signal. (b) Uzorkovana verzija analognog signala. [1, str. 184]

Na slici 2.2 dan je osnovni pregled valnih oblika impulsne modulacije koji će biti u osnovi obrađeni u sljedećim potpoglavljima, izuzev digitalne impulsno-kodne modulacije (PCM) te delta modulacije (DM) koje nisu tema ovog rada. Naglasak će biti na impulsno-frekvencijskoj modulaciji.

## 2.1. Modulacija amplitude impulsa

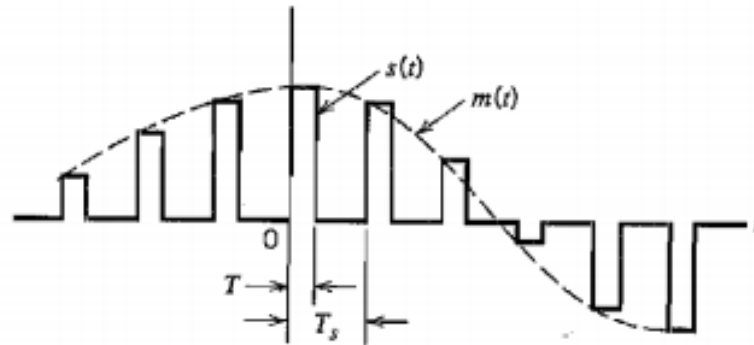
PAM (impulsno-amplitudna modulacija) je najjednostavniji postupak u moduliranju impulsnih signala koja se izvodi na način da se mijenja amplituda impulsa proporcionalno s promjenom razine

modulacijskog signala. Električni impulsi konačnog trajanja mogu biti pravokutnog oblika ili u obliku modulacijskog signala (odrezani pravokutni impulsi). Ako su impulsi u svakom vremenskom trenutku  $t$  i u svakom intervalu impulsa širine  $\tau$  proporcionalni razini modulacijskog signala onda govorimo o prirodnom postupku uzorkovanja. U drugom slučaju, ako su impulsi konstantnog, pravokutnog oblika, onda je slučaj uniforman ili regularan postupak uzorkovanja. Razlikujemo dvije vrste PAM signala, unipolarni PAM signal, kod kojega su svi impulsi jednakog polariteta jer se dodaje DC offset modulacijskom signalu te bipolarni PAM signal kojem se mijenja predznak impulsa.



*Slika 2.2. Valni oblici modulacija impulsnih signala [3, str 62.]*

Valni oblik PAM signala ilustriran je slikom 2.3. Isprekidana krivulja na slici ocrta valni oblik modulacijskog signala  $m(t)$ , a sekvence amplitudno moduliranih pravokutnih impulsa prikazane su kao pune linije odgovarajućeg PAM signala  $s(t)$ .



*Slika 2.3. Valni oblik PAM signala (regularno uzorkovanje) [1, str. 189]*

U sljedećim koracima je matematički razrađen PAM signal sa slike 2.3. koji se prema [1, str. 189-190] definira kao:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s)h(t - nT_s), \quad (2-2)$$

gdje je  $T_s$  period uzorkovanja,  $m(nT_s)$  je uzorak signala  $m(t)$  u trenutku  $nT_s$ , a  $h(t)$  standardni pravokutni impuls amplitude i trajanja  $T$ ,  $h(t)$  definiramo na sljedeći način:

$$h(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t < T \\ \frac{1}{2}, & t = 0, t = T \\ 0, & \text{inače} \end{cases} \quad (2-3)$$

Po definiciji, trenutna uzorkovana vrijednost signala  $m(t)$  određena je sa sljedećim izrazom:

$$m_{\delta}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s)\delta(t - nT_s), \quad (2-4)$$

gdje je  $\delta(t - nT_s)$  delta funkcija s vremenskim pomakom. Konvolucijom  $m_{\delta}(t)$  signala s impulsom  $h(t)$  dobivamo:

$$\begin{aligned} m_{\delta}(t) \star h(t) &= \int_{-\infty}^{\infty} m_{\delta}(\tau)h(t - \tau)d\tau & (2-5) \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s)\delta(t - nT_s) h(t - \tau)d\tau \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - nT_s)h(t - \tau)d\tau \\ &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} m(nT_s) h(t - nT_s). \end{aligned}$$

Iz jednadžbi (2-2) i (2-5) dolazimo do konačnog izraza za PAM signal koji je matematički ekvivalentan konvoluciji signala i impulsa u frekvencijskom području (2-6), odnosno njihovim umnoškom u vremenskom području (2-7):

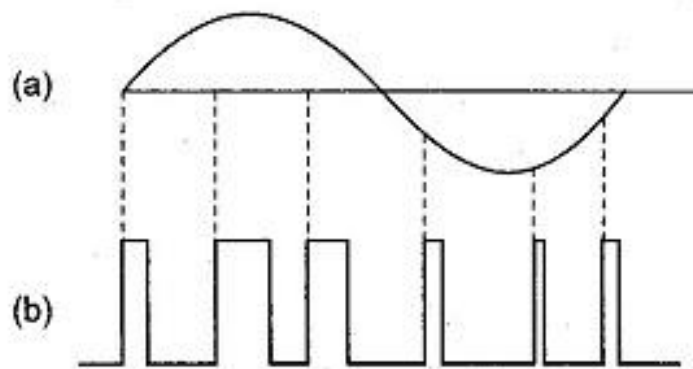
$$s(t) = m_{\delta}(t) \star h(t). \quad (2-6)$$

$$s(t) = m(t) * h(t). \quad (2-7)$$

Odašiljanje samog PAM signala se ne koristi u komunikacijskim tehnikama jer je PAM signal vrlo osjetljiv na smetnje i šum. Omjer signal-šum  $S/N$  (Signal-to-Noise ratio) kod PAM signala sličan je onima u AM modulacijskom postupku.

## 2.2. Modulacija širine impulsa

Impulsno širinska modulacija (PWM) ili modulacija trajanja impusla (PDM, Pulse Duration Modulation) izvodi se na način da se mijenja parametar signala koji se naziva duty cycle, odnosno postotak vremena u kojem je signal u aktivnom stanju (high state). Današnja uporaba PWM modulacijskog postupka najviše je vidljiva u implementaciji PWM čipova u mikrokontrolerima (npr. Arduino, Croduino). Ideja same implementacije takvih čipova je da se digitalno kodira razina analognog signala kako bi se upravljalo radom nekog trošila preko mikrokontrolera (npr. upravljanje brzinom vrtnje DC ventilatora ili motora).



*Slika 2.4. Valni oblik: a) modulacijskog signala; b) PWM signala [4]*

Širina impulsa može se modulirati tako što se mijenja položaj bridova impulsa, odnosno prednjeg, stražnjeg brida ili obaju bridova. Slično kao i kod impulsno-amplitudne modulacije, postupak uzorkovanja može se izvesti na prirodni ili regularni način. Kod prirodnog uzorkovanja, trenutak uzimanja uzorka jednak je trenutku pojave brida impulsa, dok kod regularnog nije.

U sljedećim će se koracima odrediti matematički opis PDM signala prema [2, str. 424-425].

Kod impulsno-širinske modulacije mijenja se vremensko trajanje impulsa. Iz sinusnog modulatorskog oblika proizlazi:

$$\tau(t) = \tau_0 + k_D U_{mm} \sin \omega_m t = \tau_0 (1 + m_D \sin \omega_m t), \quad (2-8)$$

gdje  $\tau_0$  predstavlja vrijeme trajanja impulsa prijenosnog signala,  $\omega_m$  je frekvencija modulatorskog signala,  $U_{mm}$  je vršna vrijednost napona modulatorskog signala, a  $m_D$  je stupanj ili indeks modulacije koji je dan s:

$$m_D = \frac{k_D U_{mm}}{\tau_0}. \quad (2-9)$$

Ako uvrstimo jednadžbu (2-8) u izraz (2-9), uređivanjem dobivamo osnovni izraz kojim je analitički opisan PDM signal:

$$u_{PDM}(t) = \frac{A_{\tau_0}}{T} (1 + m_D \sin \omega_m t) + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \left[ n\pi \frac{\tau_0}{T} (1 + m_D \sin \omega_m t) \right] \cos n\omega_p t. \quad (2-10)$$

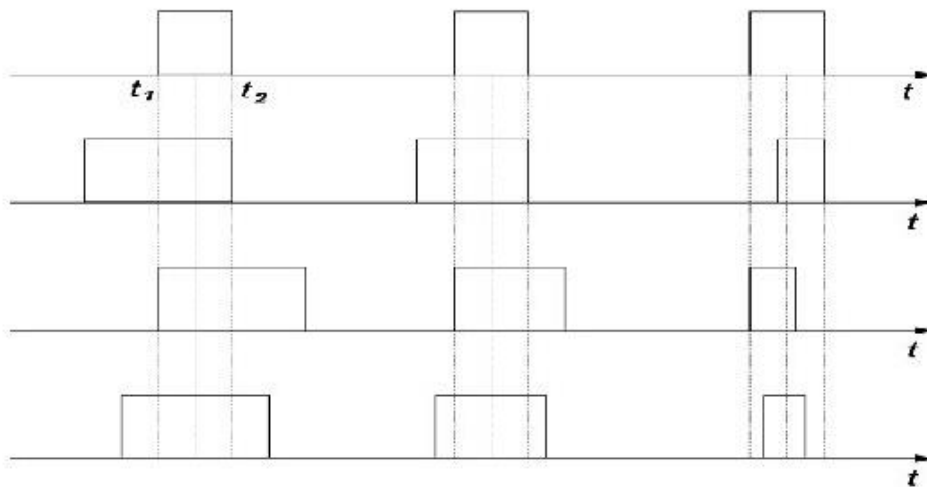
Kod generiranja PDM-signal, potrebno je razinu modulatorskog signala određenu s vrijednostima napona ili struje, pretvoriti u vremensku konstantu. Ta se transformacija obavlja korištenjem pomoćnog signala koji poprima pilasti valni oblik, tako da bi blok shema za generiranje ovakvog signala sadržavala generator pilastog signala te komparator ili Schmittov okidni sklop (ovisno o

položaju brida impulsa). Prednosti PDM postupka naspram PAM modulacijskog postupka su bolja otpornost na šum te veća širina frekvencijskog pojasa.

### 2.3. Modulacija položaja impulsa

Kod impulsno-pozicijske modulacije amplituda i širina impulsa su konstantne veličine, a mijenjaju se njihove pozicije na vremenskoj osi u ovisnosti o amplitudama uzorkovanih vrijednosti modulacijskog signala.

PPM impulsi izvedeni su iz PWM impulsa koji su prikazani na slici 2.5. Vidljivo je kako porastom napona modulacijskog signala razmak između PPM impulsa i referentne vrijednosti raste. Isprekidane crte na slici označavaju referentne linije kako bi se lakše izmjerio pomak PPM impulsa. PPM impulsi označeni s 1,2 i 3 imaju značajniji pomak od referentnih linija zbog porasta napona modulacijskog signala, dok su impulsi označeni s brojevima 4,5,6 i 7 bliži referentnim linijama zbog smanjenja napona modulacijskog signala.



*Slika 2.5. Generiranje PPM impulsa pomoću PWM impulsa: a) nedomulirani nositelj; b) PPM s promjenom prednjeg brida impulsa; c) PPM s promjenom zadnjeg brida impulsa; d) PPM s promjenom prednjeg i zadnjeg brida impulsa [5]*

Širina impulsa može se modulirati tako što se mijenja položaj bridova impulsa, odnosno prednjeg, stražnjeg brida ili obaju bridova. Slično kao i kod pulsno-amplitudne modulacije, postupak uzorkovanja može se izvesti na prirodni ili regularni način. Kod prirodnog uzorkovanja, trenutak uzimanja uzorka jednak je trenutku pojave brida impulsa, dok kod regularnog nije.

U sljedećim koracima opisan je matematički postupak određivanja PPM signala [2].

Prijenosni signal kojeg opisuje periodičan slijed PPM impulsa određen je jednačbom (2-11):

$$u_p(t) = \frac{A\tau}{T} + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T} \cos n\Phi(t), \quad (2-11)$$

gdje je:  $\Phi(t) = \omega_p(t)$ , trajanje perioda impulsa označeno je s  $\tau$ , a period modulacijskog signala s  $T$ . Analitički opis PPM signala se dobije tako da se nadomjesti rastuća linearna faza sa sljedećom funkcijom:

$$\Phi(t) = \omega_p t + k_p U_{mm} \sin \omega_m t = \omega_p t + \Delta\Phi \sin \omega_m t. \quad (2-12)$$

Iz izraza (2-12) zaključujemo da je relativna faza proporcionalna s razinom modulacijskog signala koji se u određenom trenutku poklapa sa sredinom PPM impulsa. Dobiveni opis PPM signala je dan izrazom (2-13):

$$u_{PPM}(t) = \frac{A\tau}{T} + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T} \cos n(\omega_p t + \Delta\Phi \sin \omega_m t). \quad (2-13)$$

Impulsno pozicijska modulacija se najčešće koristi u TDM sustavima. Omjer signal-šum ima povoljnija obilježja nego kod PWM(PDM) postupka, a i snaga moduliranog signala je bolje iskorištena od ostalih modulacijskih postupaka. Ima više postupaka generiranja ovoga signala. Najučinkovitiji postupak je postupak dobivanja iz PDM signala koji uključuje sklopove kao što su



monostabilni multivibrator ili blocking-oscilator koji se okidaju deriviranim tankim impulsima iz PDM impulsa.

## 2.4. Modulacija frekvencije impulsa

Impulsno-frekvencijska modulacija (PFM) je vrsta impulsne modulacije kod koje se kontinuirani signal pretvara u niz impulsa određenih frekvencijom koja je proporcionalna s amplitudom tog kontinuiranog signala. Preciznije, frekvencija svakog impulsa mijenja se ovisno o amplitudi modulacijskog signala pri čemu širina impulsa ostaje konstantne veličine. Po svojim karakteristikama, impulsno-frekvencijska modulacija je vrsta pulsno-pozicijske modulacije (PPM). PFM signal čini niz impulsa koji imaju konstantnu amplitudu te jako kratki period trajanja, a njihova frekvencija nosi podatak o modulacijskom signalu. PFM signali se danas jako rijetko koriste jer se dio informacija koje prenosi modulacijski signal izgubi tijekom procesa modulacije. Unazad 20-ak godina, najviše se sklopovlja s PFM modulatorima razvilo u svrhu istraživanja ljudskog živčanog sustava.

Prema Abbottovoj tezi [6], razlikujemo tri metode impulsno-frekvencijske modulacije:

1. Sigma impulsno frekvencijska modulacija ( $\Sigma$ PFM)
  - Integralna impulsno frekvencijska modulacija (IPFM).
  - Neuralna impulsno frekvencijska modulacija (NPFM)
2. Naponsko-frekvencijski pretvarač (V/F converter).
3. *Unified States Sample & Hold* (USSH).

Kod sve četiri metode PFM modulacije koristi se neki oblik integriranja što dovodi do karakteristika niskopropusnog filtriranja. Većina PFM metoda je slična jedna drugoj, ali kad je riječ o demodulacijama PFM signala, one se razlikuju jedna od druge. Postoji pet metoda demodulacije PFM signala: mjerenje perioda, niskopropusno filtriranje 1. reda, niskopropusno filtriranje 2. reda, filtriranje konačnim brojem impulsa te prebrojavanjem impulsa u fiksnom vremenskom periodu.

Ovaj rad će se bazirati na prvoj metodi, sigma impulsno frekvencijskoj modulaciji, konkretno na IPFM-u. To je najzastupljenija metoda PFM modulacije. Matematički je izravna i lako je razumljiva. Druga se metoda, V/F pretvarač, može implementirati u analognim sklopovima određenih funkcija. Zadnja metoda, USSH, je izrazito nelinearna. Koristi se matematička funkcija kako bi se riješio problem nepovezanosti i diskontinuiteta kod IPFM-a te općenito omogućava pojednostavljivanja analize PFM sustava.

Prema [2], analitički izraz koji opisuje generirani PFM signal glasi:

$$u_{PFM}(t) = \frac{A\tau}{T} + A \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin \frac{n\pi\tau}{T} \cos n(\omega_p t + \frac{\Delta\omega}{\omega_m} \sin\omega_m t), \quad (2-14)$$

gdje je A amplituda PFM signala, T period PFM signala,  $\tau$  period trajanja impulsa,  $\omega_p$  frekvencija prijenosnog signala,  $\omega_m$  frekvencija modulacijskog signala, a  $\Delta\omega$  razlika između  $\omega_p$  i  $\omega_m$ .

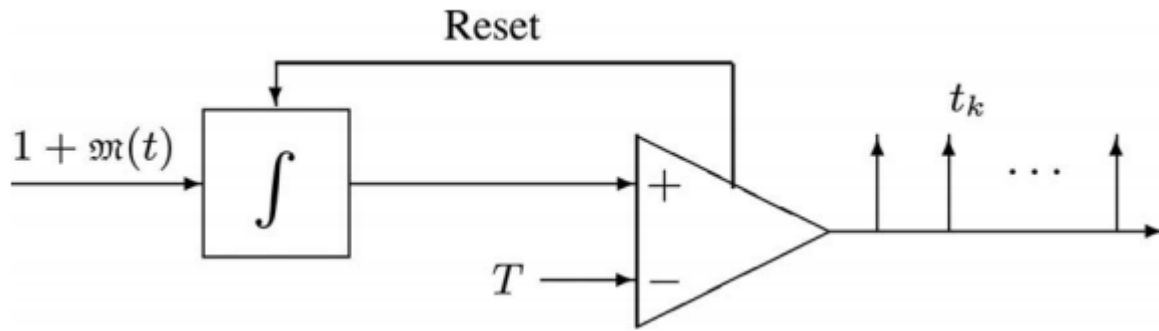
U današnje vrijeme glavni razlog usavršavanja i korištenja impulsno frekvencijske modulacije je izravna kontrola ljudskog živčanog sustava čija je svrha neuralno upravljanje protezama ruku ili nogu putem perifernog živčanog sustava (PNS, peripheral nervous system). Direktna kortikalna kontrola robotskim manipuliranjem je usavršena korištenjem velikog broja neuralnih signala koji se moduliraju pomoću IPFM i NPFM modulatora.

### **3. ADAPTIVNI INTEGRALNI IMPULSNO FREKVENCIJSKI MODULATOR**

Kod integralne impulsno frekvencijske modulacije, modulator proizvodi impuls zadane amplitude i određenog vremenskog razmaka između dva uzastopna impulsa svaki put kada vremenski integral ulaznog signala dosegne vrijednost praga ili graničnu vrijednost (threshold magnitude). Integrator se resetira nakon svakog impulsa kako bi sljedeća integracija uvijek kretala od nule. Proizvoljan ulazni signal se tako pretvara u niz impulsa čija frekvencija ponavljanja (broj impulsa po sekundi) varira ovisno o amplitudi ulaznog signala. Informacija modulacijskog signala je sadržana u vremenskoj razlici/frekvenciji impulsa. Maksimalna vrijednost signala na izlazu je prisutna tijekom vrlo kratkih impulsa te zbog toga ovaj modulator karakterizira niska vrijednost duty cyclea (signal je aktivan u vrlo kratkim vremenskim periodima), a s time i niska potrošnja energije.

#### **3.1. Integralni impulsno frekvencijski modulator**

Blok shema IPFM-a koji će biti analiziran u ovom potpoglavlju nalazi se na slici 3.1. Modulator se sastoji od integratora, komparatora te sklopa za resetiranje integratora. Integrator obavlja osnovnu matematičku operaciju integriranja što znači da je napon na izlazu iz modulatora vremenski proporcionalan naponu na ulazu u integrator. Sljedeći sklop koji je vrlo bitan za rad IPFM modulatora je komparator. Komparator uspoređuje dvije vrijednosti napona na ulazu te na izlazu daje binarni signal ovisno o odnosu ulaznih signala. Sklop za resetiranje integratora služi za ponovni proces generiranja IPFM impulsa svaki put kada amplituda izlaznog napona na integratoru dosegne graničnu vrijednost, odnosno kada izlaz na komparatoru naglo padne na najnižu amplitudu.



**Slika 3.1.** Blok dijagram idealnog IPFM-a [8]

Prema [7], ako  $u(t)$  označava signal na ulazu,  $y(t)$  signal na izlazu,  $x(t)$  izlaz iz integratora, a  $r$  vrijednost praga (threshold value), sljedeće dvije jednačbe opisuju ponašanje IPFM blokovskog dijagrama sa slike 3.1.:

$$\frac{dx(t)}{dt} = u(t) - r \operatorname{sgn}(x)\delta(|x| - r), \quad (3-1)$$

$$y(t) = \operatorname{sgn}(x)\delta(|x| - r). \quad (3-2)$$

Frekvencija niza impulsa dana je s [6]:

$$f = \frac{u_0}{r} \text{ [Hz]}, \quad (3-3)$$

a period istoga niza računa se kao [6]:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{r}{u_0} \text{ [s]}. \quad (3-4)$$

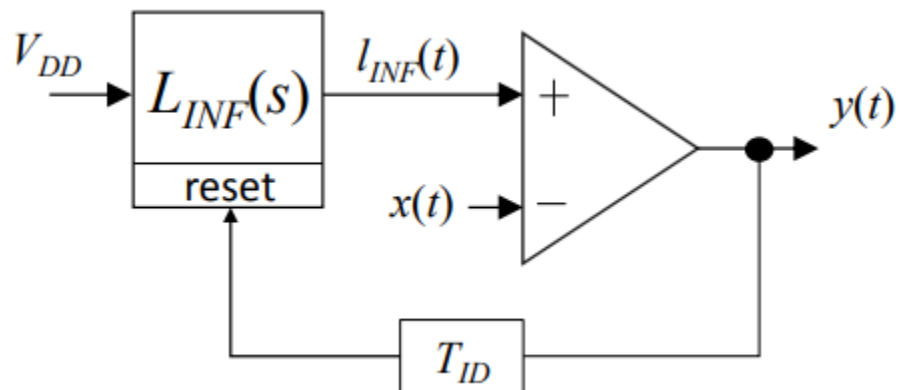
gdje je  $\operatorname{sgn}(x) = \pm 1$  ovisno o predzanku  $x$ , a  $\delta$  označava jedinični impuls (Diracova delta fukcija). Izraz s desne strane jednačbe (3-1) predstavlja resetiranje vrijednosti  $x$  na nulu odmah nakon što nastupi impuls na izlazu.

Izlaz iz integratora u modelu IPFM-a sa slike 3.1. može biti opisan kao kontinuirana funkcija:

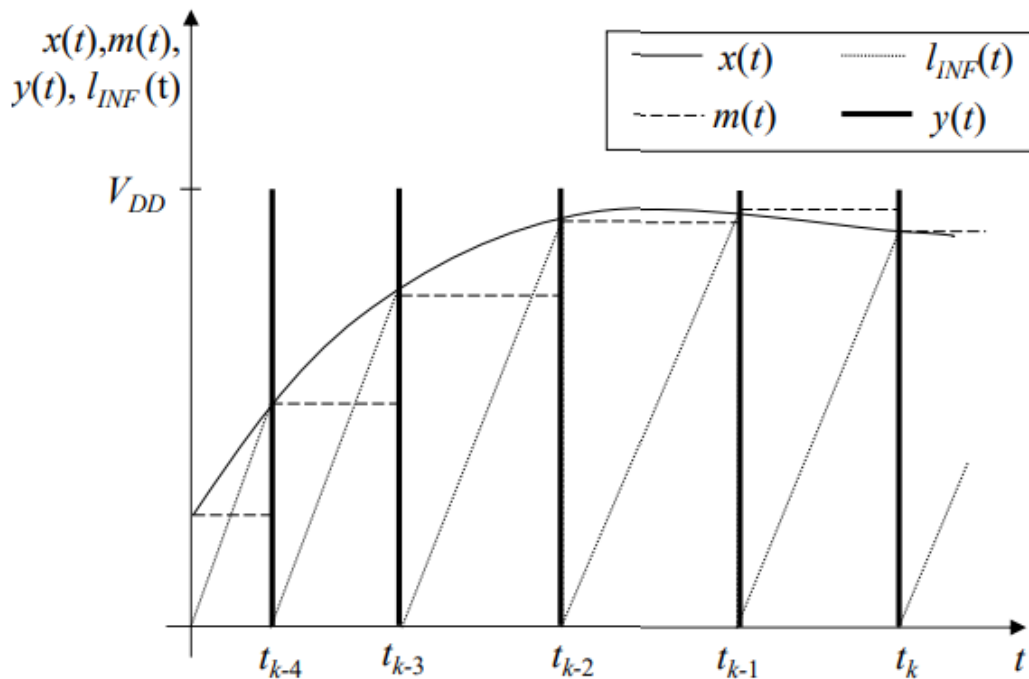
$$k(t) = \int_0^t \frac{1 + m(\tau)}{T} d\tau, \quad (3-5)$$

gdje je  $k(t)$  linearna funkcija koja određuje ponavljanje svakog impulsa  $t_k$  na izlazu modulatora, a  $m(\tau)$  je modulacijski signal.

Općenita blokovska shema IPFM-a dana je slikom 3.1. Pomoću slika 3.2. i 3.3. definiran je modificirani IPFM [9].



**Slika 3.2.** Blok shema modificiranog IPFM-a [9]



Slika 3.3. Valni oblici IPFM-a sa slike 3.2. [9]

### 3.1.1. Unipolarni IPFM (SS-IPFM)

Prema [8], blok shema na slici 3.2. prikazuje modificirani idealni model IPFM-a. Osnovni način funkcioniranja unipolarnog IPFM-a dan je valnim oblicima sa slike 3.3. gdje je analogni ulazni signal  $x(t)$  (puna krivulja), izlazni signal iz integratora  $l_{INF}(t)$  (točkasta linija), modulirani signal  $m(t)$  (isprekidana linija), kontinuirana vrijednost između dva uzastopna impulsa  $x(t)$  i signal na izlazu iz IPFM-a  $y(t)$  (podebljana puna crta).

Modulirani signal  $m(t)$  predstavlja uzorkovanu verziju analognog ulaznog signala pohranjenu u vremenskoj razlici između dva uzastopna IPFM impulsa. Analogni ulazni napon IPFM-a  $x(t)$  predaje se komparatoru na invertirajući ulaz, dok se integrator napaja konstantnim naponom  $V_{DD}$ . Zbog konstantnog napona na ulazu integratora, nagib signala na izlazu integratora  $l_{INF}(t)$  je konstantan. Izlazni signal iz modulatora  $y(t)$  je niz pravokutnih impulsa čija je vremenska razlika između dva uzastopna impulsa proporcionalna analognom ulaznom signalu  $x(t)$ . Tijekom vremenskog intervala između dva uzastopna IPFM impulsa  $[t_{k-1}, t_k]$  na izlazu iz modulatora,

integrator će proizvesti izlazni signal s konstantnom amplitudom. Amplituda izlaznog signala u trenutku  $t_k$  ovisi o vrijednosti analognog ulaznog signala  $x(t_k)$ . Ako je signal na izlazu iz integratora u trenutku  $t_{k-1}$  jednak 0, amplituda signala  $l_{INF}(t_k)$  u trenutku  $t_k$  jednaka je [9]:

$$l_{INF}(t_k) = \int_{t_{k-1}}^{t_k} \frac{V_{DD}}{\tau_{INF}} dt = \frac{V_{DD}}{\tau_{INF}} (t_k - t_{k-1}) = x(t_k), \quad (3-7)$$

gdje  $\tau_{INF}$  predstavlja vremensku konstantu integratora  $L_{INF}(s)$ .

Prema (3-7), vremenska razlika između dva uzastopna impulsa na izlazu IPFM-a je proporcionalna analognom signalu na ulazu [9]:

$$(t_k - t_{k-1}) = \frac{\tau_{INF}}{V_{DD}} x(t_k). \quad (3-8)$$

Da bi se zadovoljio uvjet za uspješnu pretvorbu napona u vrijeme, apsolutna vrijednost derivacije iz izlaza integratora  $L_{INF}(s)$  mora biti puno viša od maksimalne apsolutne vrijednosti derivacije ulaznog signala  $\frac{dx(t)}{dt}$ . Stoga, analogni ulazni signal mora biti pojasno ograničen. Za sinusoidne ulazne signale, maksimalna frekvencija analognog signala na ulazu trebala bi biti takva da je zadovoljena sljedeća nejednakost [9]:

$$\frac{1}{\tau_{INF}} \gg \max \left( \left| \frac{dx(t)}{dt} \right| \right). \quad (3-9)$$

Pogreška pri pretvorbi iz analogne vrijednosti u vremensku domenu definira se kao razlika između ulaznog signala  $x(t)$  i moduliranog signala  $m(t)$  [9]:

$$\varepsilon = x(t) - m(t). \quad (3-10)$$

Modulirani signal  $m(t)$  je konstanta u intervalu između dva impulsa. Kao što je prikazano na slici 3.3., njegova vrijednost je jednaka vrijednosti ulaznog signala  $x(t)$  na početku intervala između dva impulsa. Zato je u intervalu  $[t_k, t_{k-1})$  modulirani signal jednak [9]:

$$m(t) = x(t_{k-1}), t \in [t_k, t_{k-1}). \quad (3-11)$$

Ukupna pogreška  $\varepsilon_k$  u intervalu  $[t_k, t_{k-1})$  jednaka je integralu razlike  $x(t)$  i  $m(t)$  [9]:

$$\varepsilon_k = \int_{t_{k-1}}^t [x(t) - m(t)] dt = \int_{t_{k-1}}^t [x(t) - x(t_{k-1})] dt. \quad (3-12)$$

### 3.1.2. Bipolarni IPFM (DS-IPFM)

Kao što se može zaključiti iz potpoglavlja 3.1.1. blok shema sa slike 3.2. odgovara unipolarnim analognim signalima na ulazu. Ako je potrebno dovesti analogni bipolarni signal na ulaz, ulazni signal mora biti pomaknut u područje pozitivnih vrijednosti između 0 i vrijednosti napona  $V_{DD}$ . Na taj način sinusoidni signal na ulazu  $x(t) = V_{DD} \sin(\omega t)$  koji se predaje na invertirajući ulaz komparatora postaje [9]:

$$x(t) = \frac{V_{DD}}{2} + \frac{V_{DD}}{2} \sin(\omega t). \quad (3-13)$$

Ukupna pogreška  $\varepsilon_k$  jednaka je [8]:

$$\varepsilon_k = \frac{V_{DD}}{2\omega} [\cos(\omega t_{k-1}) - \cos(\omega t_k)] - \frac{V_{DD}}{2} \sin(\omega t_{k-1})(t_k - t_{k-1}). \quad (3-14)$$

Uvrštavanjem jednadžbe (3-8) u (3-14) dobivamo izraz za ukupnu pogrešku  $\varepsilon_k$  [9]:

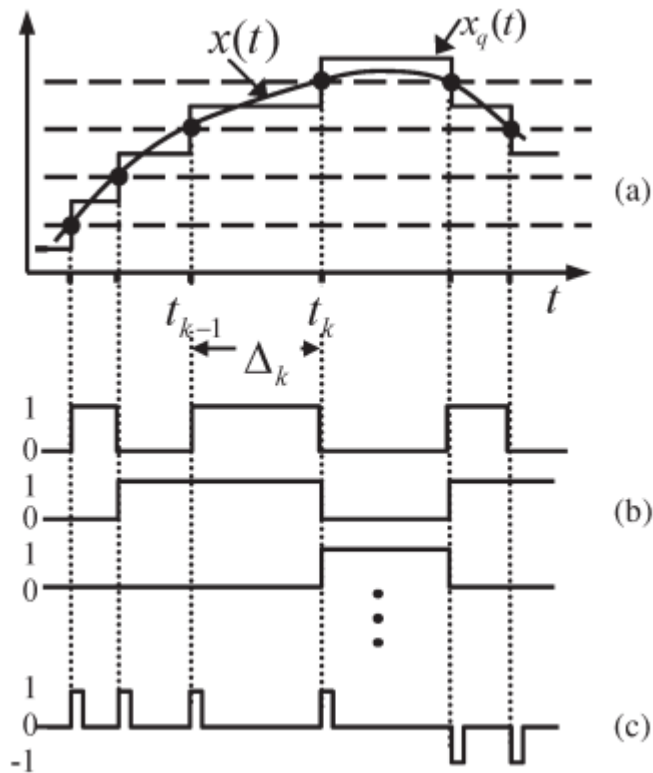


$$\begin{aligned}
\varepsilon_k &= \frac{V_{DD}}{2\omega} [\cos(\omega t_{k-1}) - \cos(\omega t_k)] - \sin(\omega t_{k-1}) \frac{V_{DD}\tau_{INF}(2 - \cos(\omega t_k))}{4} \quad (3-15) \\
&= \frac{V_{DD}}{4\omega} [2 \cos(\omega t_{k-1}) - 2 \cos(\omega t_k) - \omega\tau_{INF}\sin(\omega t_{k-1})(2 \\
&\quad - \cos(\omega t_k))].
\end{aligned}$$

Ako je pojačanje integratora  $1/\tau_{INF} \gg \omega$  te ako je  $2 \cos(\omega t_{k-1}) - 2 \cos(\omega t_k) \approx 0$  onda je  $\omega\tau_{INF} \ll 1$ . Stoga, prema izrazu (3-15),  $\varepsilon_k \approx 0$  [9].

### 3.2. Primjena adaptivnih tehnika za integralni impulsno frekvencijski modulator

Ideja adaptivnih tehnika je da se zamjeni uobičajeno uniformno uzorkovanje kontinuiranih signala kod mješovitih strujnih krugova koji sadržavaju i analogne i digitalne signale (npr., ADC i DAC). Prema Shannon-Nyquistovom teoremu za uzorkovanje signala se koristi frekvencija koja je minimalno dvostruko veća od najveće frekvencijske komponente uzorkovanog signala. U slučaju kada se na ulazu pojavi signal male frekvencije ili ga uopće nema, visoka frekvencija uzorkovanja je nepotrebna te rezultira velikom disipacijom snage i neefikasnošću. Od nekoliko predloženih neuniformnih metoda uzorkovanja, u krugovima koji zahtjevaju analogno-digitalne pretvornike (ADC) ili digitalno-analogne (DAC), najviše se koristi event-based uzorkovanje kod kojeg se uzima uzorak signala samo kada se dogodi nešto specifično („event“) vezano za ulazni signal. Najkorištenija vrsta event-based uzorkovanja je uzorkovanje na temelju prelaska razine (Level Crossing (LC) sampling). LC metoda uzorkuje ulazni signal samo ako amplituda signala prekorači unaprijed određenu graničnu vrijednost (threshold). S time brzina uzorkovanja sporog signala može biti vrlo mala te se može uštediti puno energije.



**Slika 3.4.** (a) Ulazni signal, LC uzorci te kvantizirani signal. (b) Digitalizirani signal nakon kvantizacije. (c) Delta-modulacija sa slike b [10]

Kontinuirani ulazni signal  $x(t)$  sa slike 3.4. se uspoređuje sa nizom diskretnih amplitudnih razina (isprekidane linije). Uzorci se spremaju svaki put kada se prijeđe jedna od tih razina. Parovi  $(t_k, x(t_k))$  predstavljaju prikaz ulaznog signala. Nema takta pri kojem se obavlja uzorkovanje, već su vrijednosti ulaznog signala niske frekvencije i male amplitude uzorkovani manje u vremenu nego one ulazne vrijednosti signala koje imaju visoku frekvenciju i veću amplitudu.

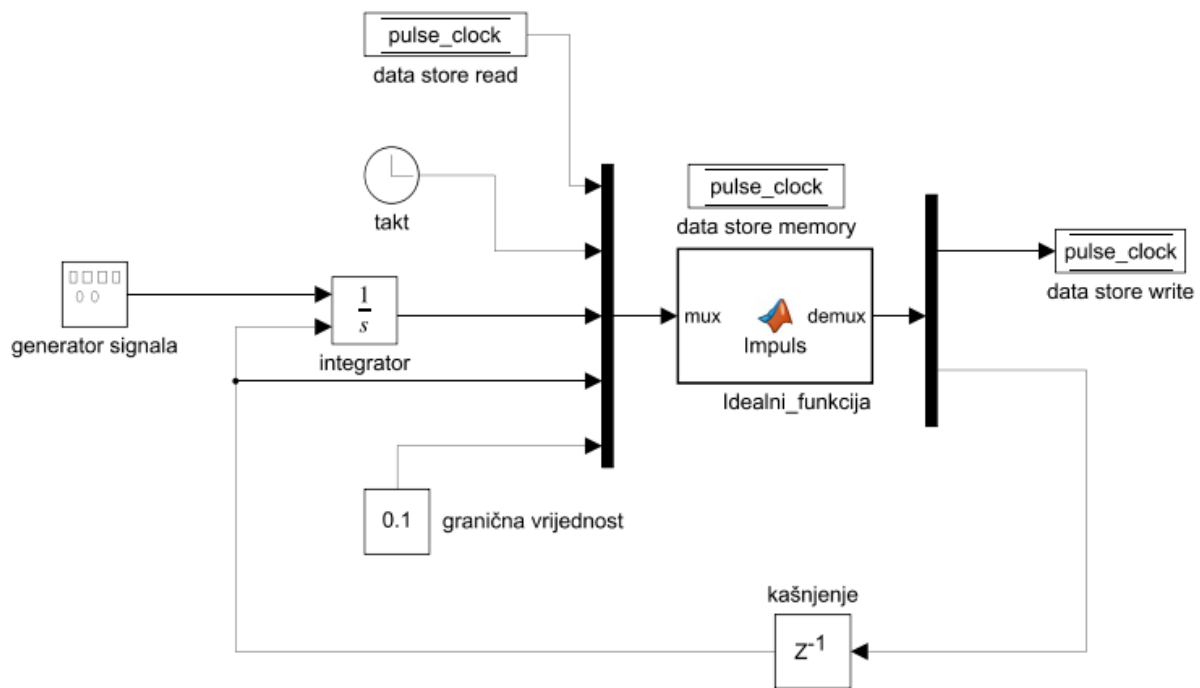
### **3.3. Osnovne izvedbe adaptivnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora**

Za razliku od idealnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora, adaptivni će modulator, ovisno o širini impulsa, integrirati ulazni signal adaptivno mijenjajući konstantu integracije. Izvedba adaptivnog modulatora najbližnja je blokovskoj shemi idealnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora sa slike 4.1. Umjesto bloka unit delay uvodi se blok delay koji predstavlja kašnjenje ulaznog signala u integrator prema specificiranim uzorcima. U ovom slučaju su to impulsi koji se generiraju na izlazu modulatora. Također, pred ulaz na integrator te pred reset integratora uvode se sklopke kojima se „odabire“ pravilna konstanta integracije te pravilni blok kašnjenja koji se dovodi na reset integratora. U ovom slučaju je funkcija koja generira impulse nepotrebna jer je shema izvedena pomoću komparatora koji uspoređuje integrirani signal s graničnom vrijednošću (threshold).

## 4. SIMULACIJA ADAPTIVNOG IPFM MODULATORA

Simulacija adaptivnog IPFM modulatora je napravljena u programu Matlab pomoću blok shemi izrađenih u Matlabovom osnovnom paketu Simulink. Za početak su simulirane osnovne, neadaptivne, izvedbe unipolarnog i bipolarnog IPFM-a. U drugom dijelu je odrađena simulacija adaptivnog IPFM modulatora.

### 4.1. Simulacijski model IPFM modulatora



**Slika 4.1.** Blokvska shema idealnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora

```

function demux = Pulse(mux)

demux = [-1,-1];

mag = 1;
pulse_clock = mux(1);
clock = mux(2);
input = mux(3);
last_out = mux(4);
threshold = mux(5);

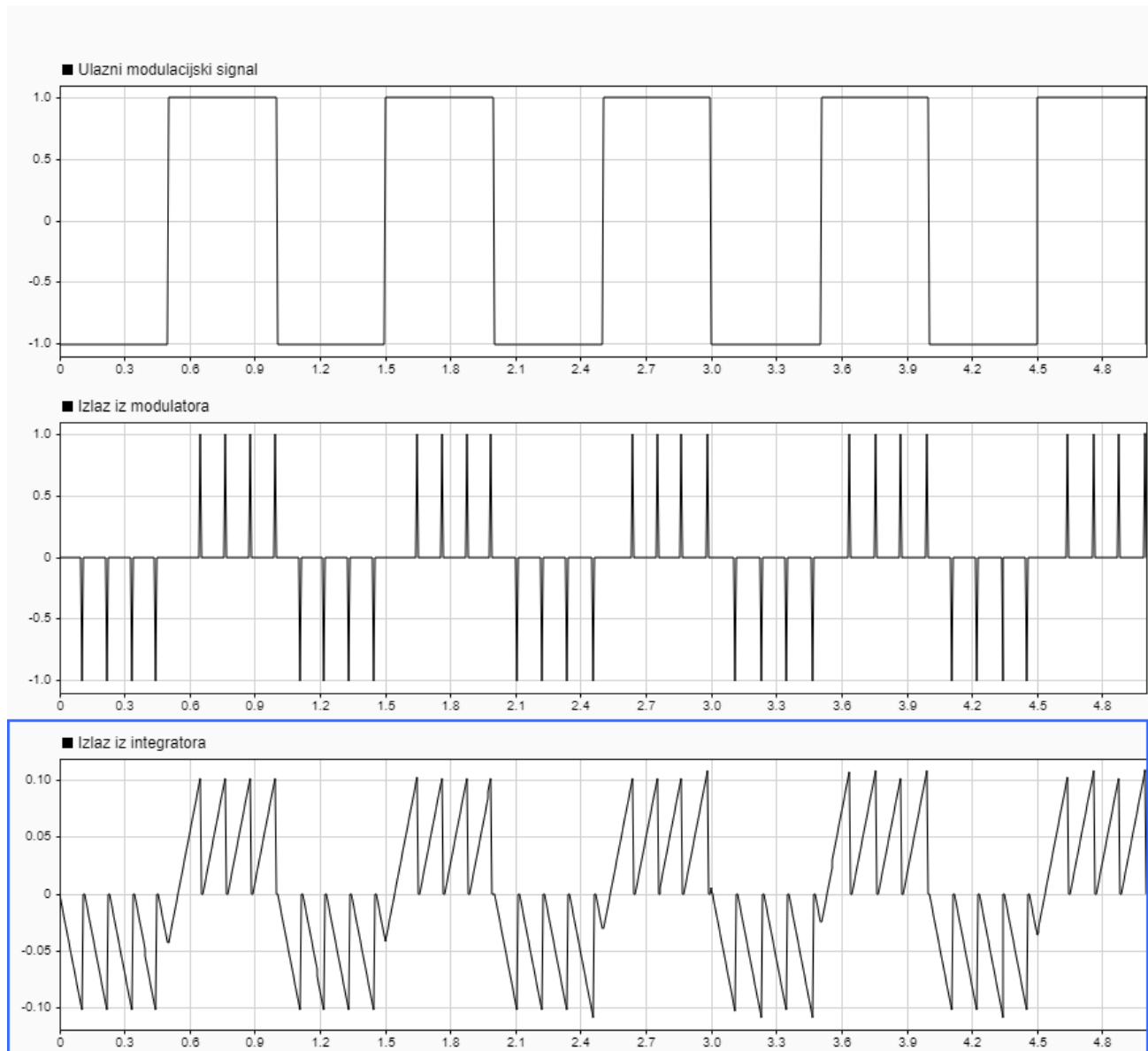
if and(pulse_clock == 0, and(input < threshold, input > -threshold))
    out_pulse = 0;
    pulse_clock = 0;
elseif and(pulse_clock == 0, input >= threshold)
    out_pulse = mag;
    pulse_clock = clock;
elseif and(pulse_clock == 0, input <= -threshold)
    out_pulse = -mag;
    pulse_clock = clock;
else
    out_pulse = 0;
    pulse_clock = 0;
end

demux(1) = pulse_clock;
demux(2) = out_pulse;

```

**Slika 4.2.** Funkcija koja generira impuls amplitude definirane u tijelu funkcije kada vrijednost signala dosegne graničnu vrijednost [6, str. 107]

## 4.2. Vrednovanje rezultata simulacije za idealni IPFM modulator

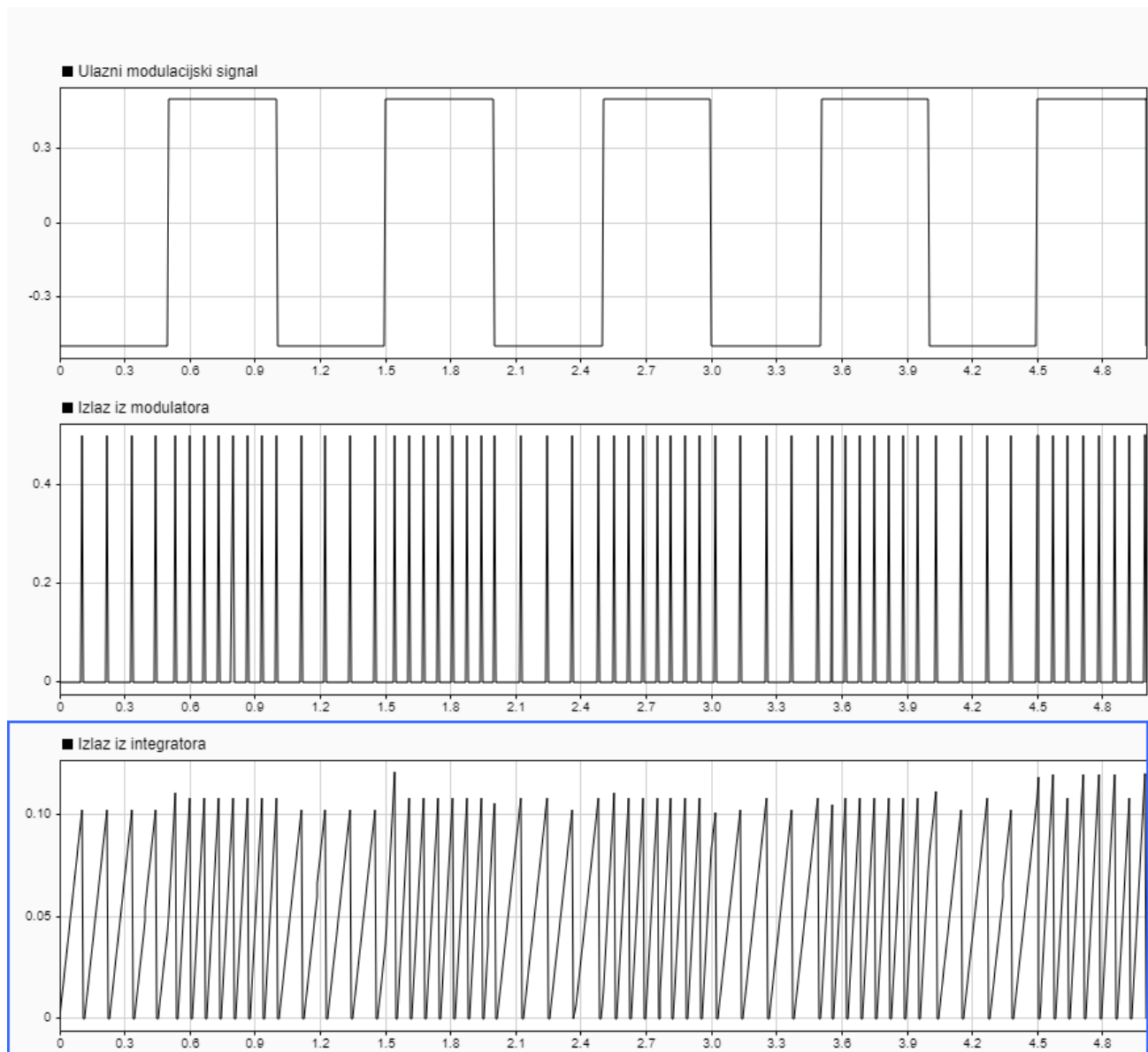


**Slika 4.3.** *Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz  $x$  pravokutni signal za shemu sa slike 4.1.*

Slika 4.3. prikazuje bipolarne IPFM impulse na izlazu iz modulatora i integratora te ako je ulaz pravokutni signal frekvencije  $f = 1 \text{ Hz}$  uz graničnu vrijednost  $r = 0.1$  te amplitudu  $A = 1 \text{ V}$ .

Radi lakšeg vizualnog grafičkog prikaza, u funkciji koja je prikazana slikom 4.2. impulsi su ograničeni vrijednošću amplitude 1. Iz slike je vidljivo da se radi o bipolarnom IPFM modulatoru čija je shema definirana Simulink blokovskim modelom sa slike 4.1.

Koristeći jednadžbe (3-3) i (3-4) dobivamo impulse čije su karakteristike  $f = 10 \text{ Hz}$  te  $T = 0.1 \text{ s}$ . Također, na početku generiranja impulsa,  $p = 0$ . Zato što je  $p(0) = 0$ , odnosno izlaz iz integratora  $l_{INF}(0) = 0$ , može se primjetiti kašnjenje prije nego se emitira prvi impuls. Taj prvi impuls koji se emitira nakon prijelaza iz negativne u pozitivnu vrijednost kasni između  $T$  i  $2T$  sekundi.

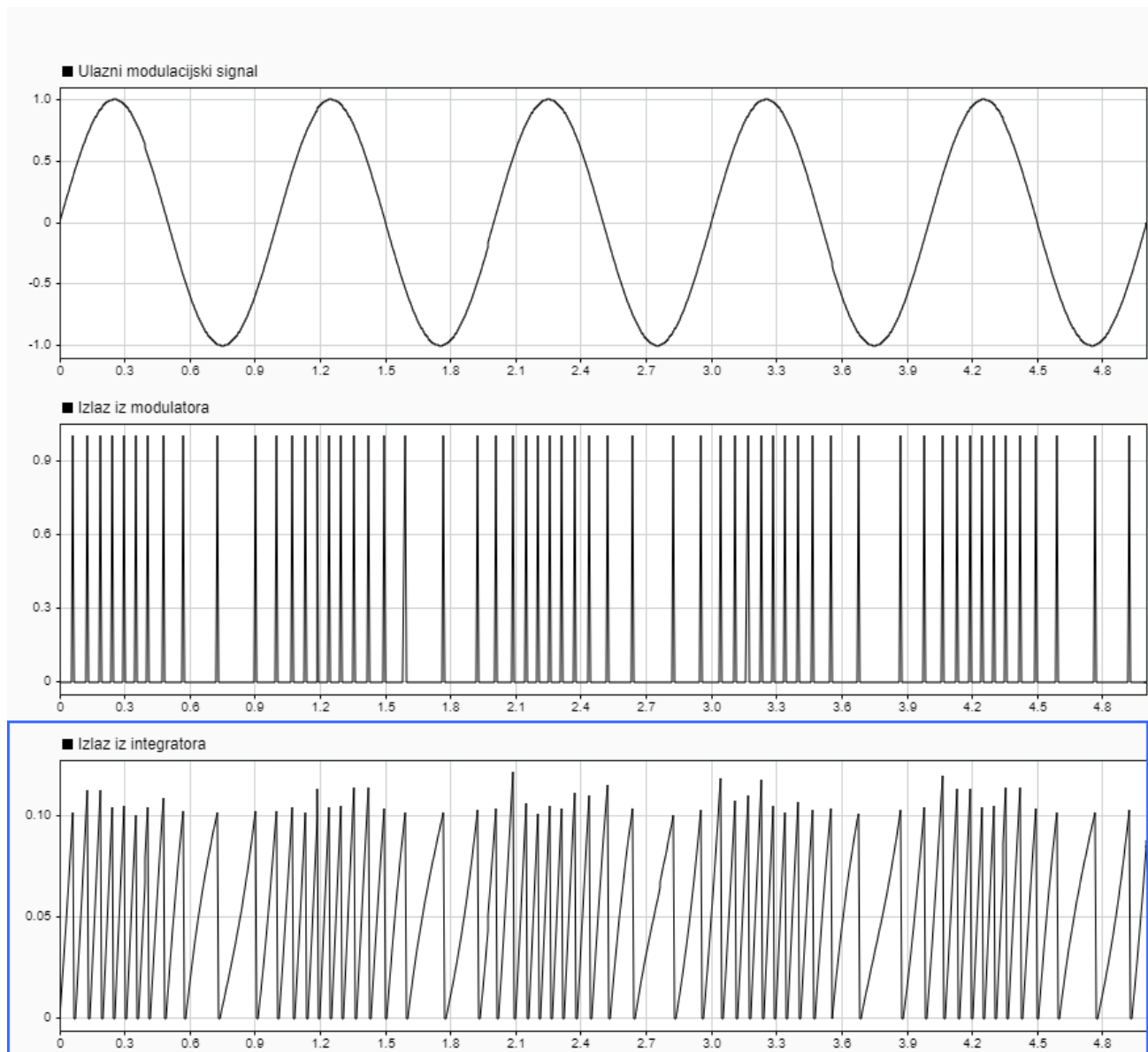


**Slika 4.4.** *Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz  $x$  pravokutni signal za shemu sa slike 4.1.*



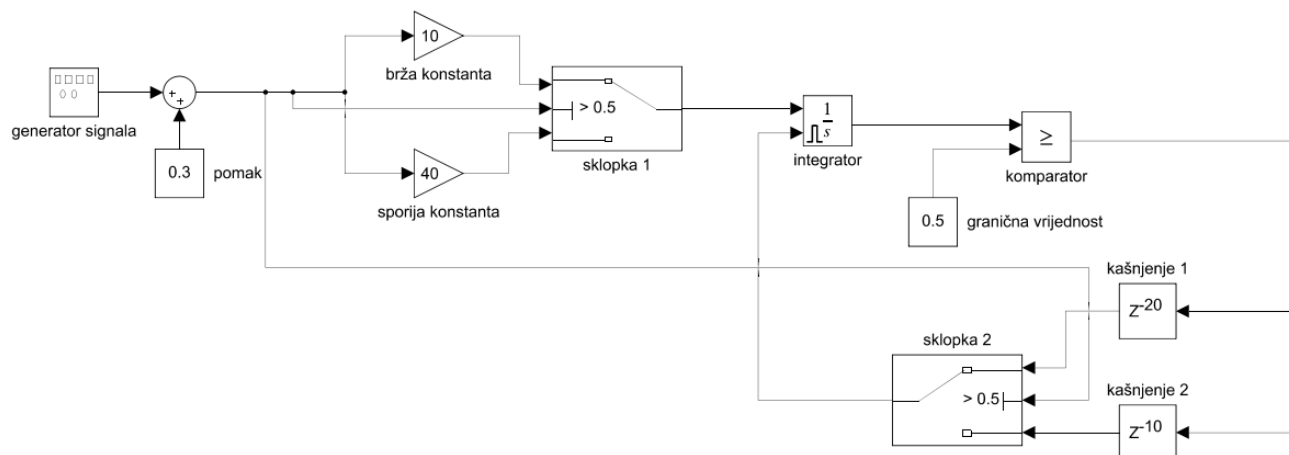
Slika 4.4. prikazuje unipolarne IPFM impulse na izlazu iz modulatora i integratora ako je na ulaz doveden pravokutni signal frekvencije  $f = 1 \text{ Hz}$ , amplitude  $A = 0.5 \text{ V}$ . U ovom slučaju se radi o unipolarnom IPFM modulatoru zato što vrijednost signala na izlazu iz integratora  $p$ , odnosno  $l_{INF}(t)$  nikada ne opada, stoga se ne emitiraju negativni impulsi (vidljivo na slici 4.4.).

Koristeći jednačbe (3-3) i (3-4) dobivamo impulse čija je frekvencija  $f = 10 \text{ Hz}$  te  $T = 0.1 \text{ s}$  za  $x_0 = 1$ , a za  $x_0 = 2$ ,  $f = 20 \text{ Hz}$  i  $T = 0.05 \text{ s}$ . Kod unipolarnog IPFM – a, kašnjenje prilikom emitiranja prvog je manje ili jednako vrijednosti perioda  $T$ .



**Slika 4.5.** *Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz  $x$  sinusoidni signal frekvencije  $f = 1$  Hz, amplitude  $A = 1$  V za shemu sa slike 4.1.*

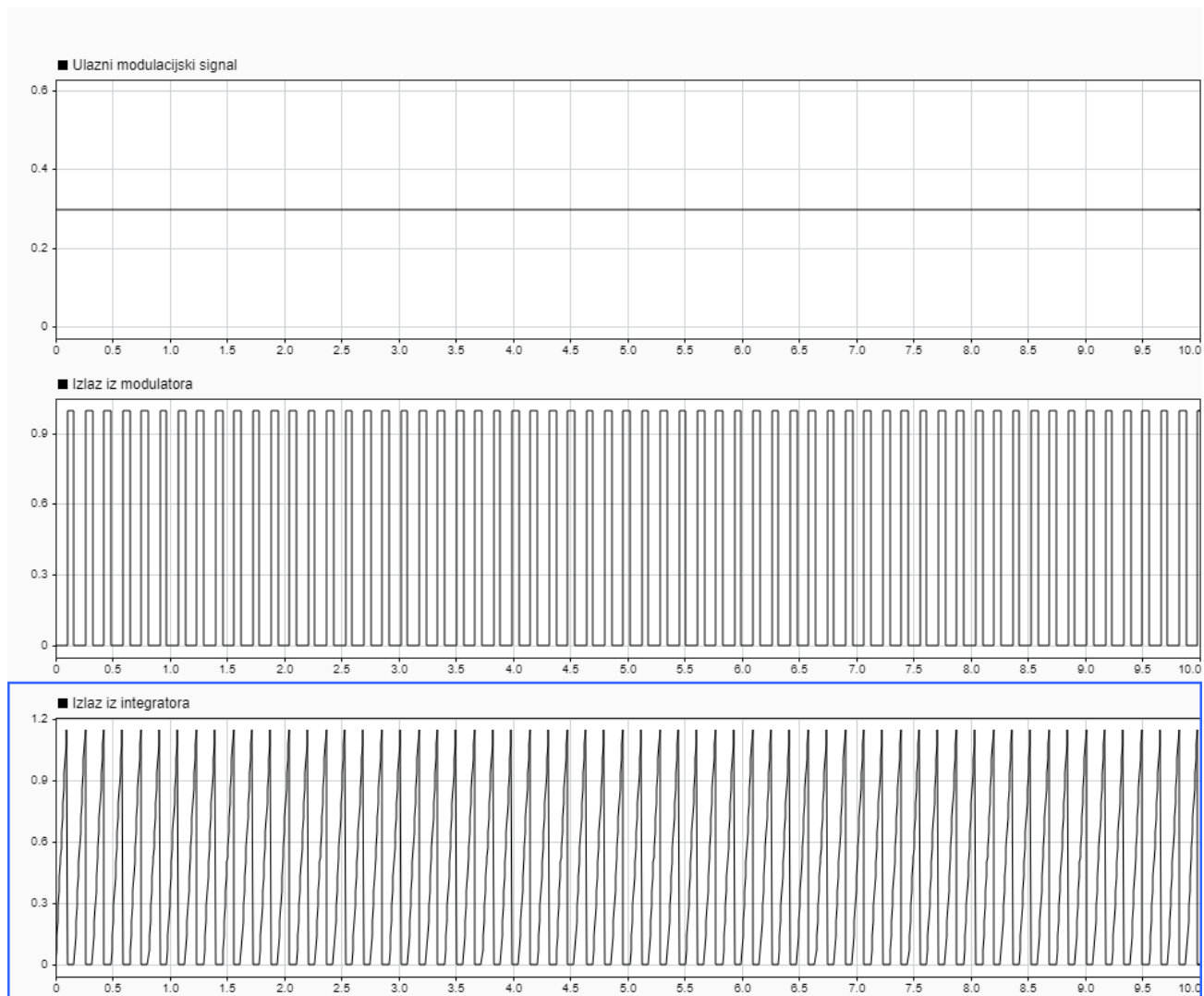
### 4.3. Simulacijski model adaptivnog IPFM modulatora



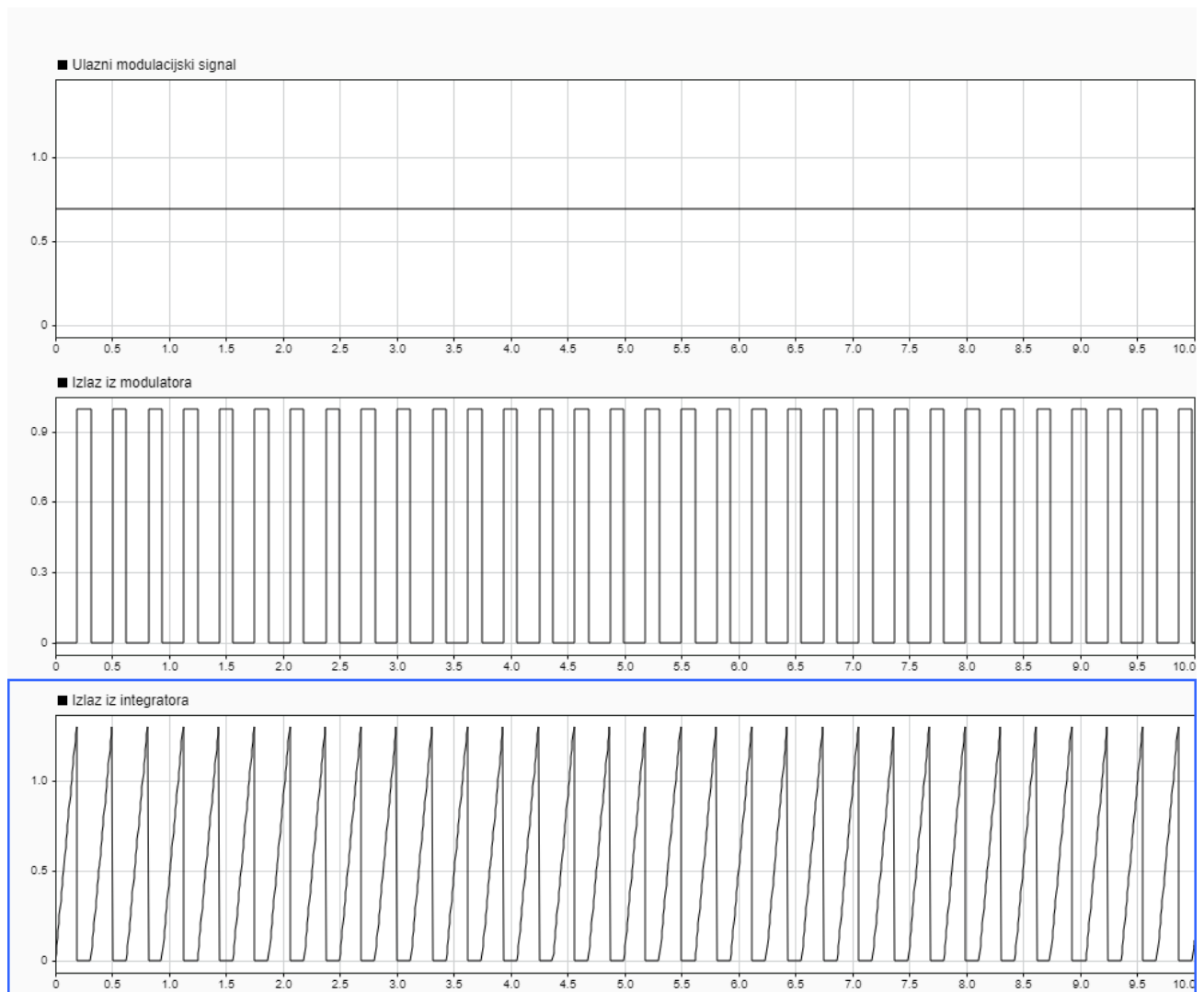
**Slika 4.6.** Blokvska shema adaptivnog integralnog impulsno frekvencijskog modulatora

Na slici 4.6. je prikazana blok shema adaptivnog IPFM modulatora izrađena u simulinku. Pred integrator su dodana dva pojačanja koja opisuju vremenske konstante integracije. Pravilna konstanta integracije se odabire pomoću sklopke 1. Za amplitude ulaznog signala veće ili jednake od 0.5 V, integrator će integrirati bržom vremenskom konstantom, a za amplitude ulaznog signala manje od 0.5 V integrator će integrirati ulazni signal sporijom vremenskom konstantom. Funkcija komparatora je definirana pomoću bloka relacijskog operatora koji uspoređuje dvije vrijednosti na ulazu, a to su integrirani ulazni signal s graničnom vrijednošću komparatora koja iznosi 0.5 V. Ukoliko integrirani signal pređe graničnu vrijednost na izlazu se generiraju impulsi. Zbog dvije vremenske konstante integracije u shemi su dodana i dva bloka za kašnjenje ulaznog signala koji se odabiru pomoću sklopke 2 ovisno o tome integrira li integrator ulazni signal bržom ili sporijom konstantom integracije. Vrijednost bloka pomak je mijenjana ovisno o željenoj srednjoj vrijednosti unipolarnog sinusnog signala kako bi se postigla razina signala ispod ili iznad granične vrijednosti.

#### 4.4. Vrednovanje rezultata simulacije za adaptivni IPFM modulator



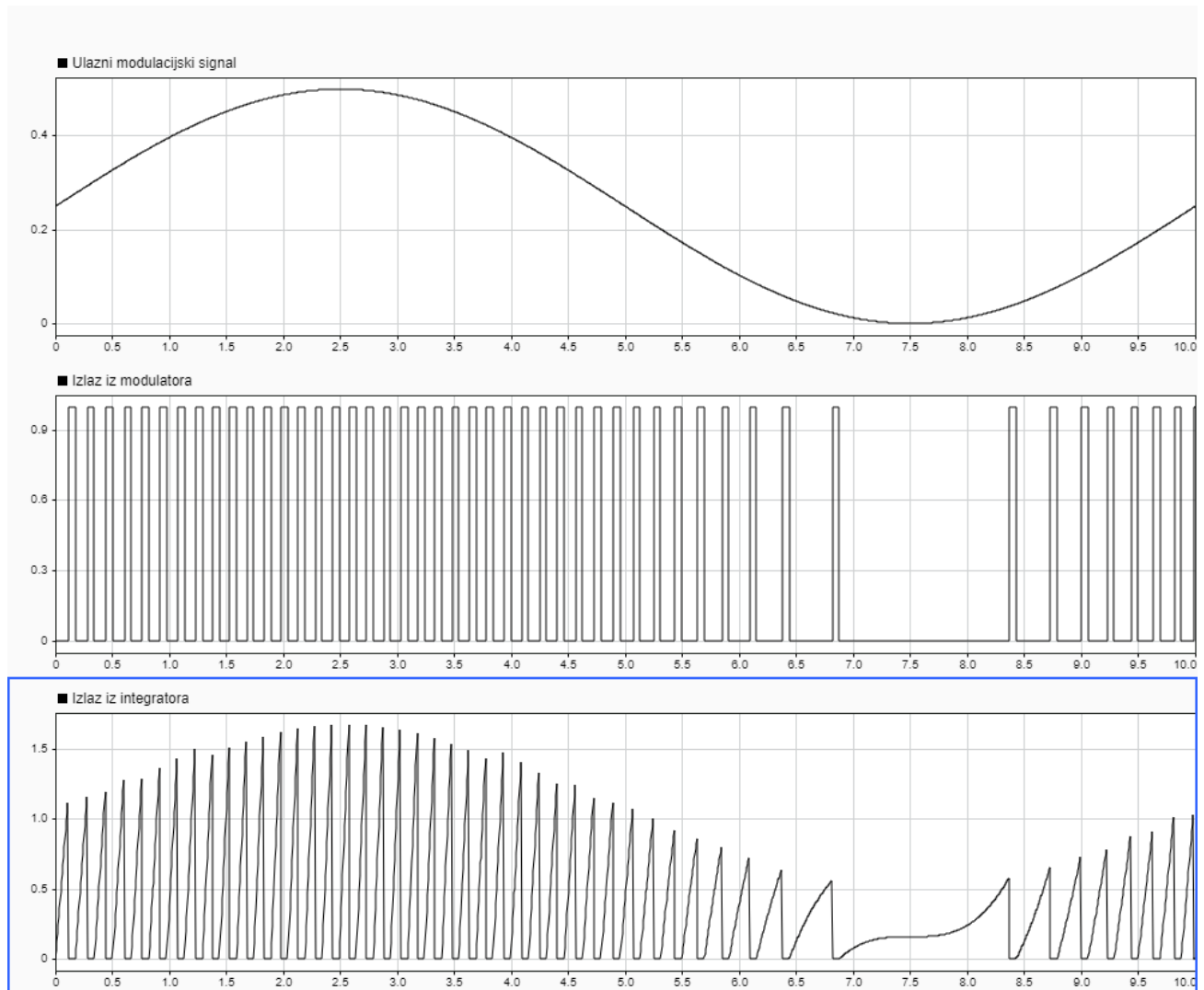
**Slika 4.7.** Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz konstantni izvor napona amplitude  $A = 0.3\text{ V}$  za shemu sa slike 4.6.



**Slika 4.8.** *Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz konstantni izvor napona amplitude  $A = 0.7\text{ V}$  za shemu sa slike 4.6.*

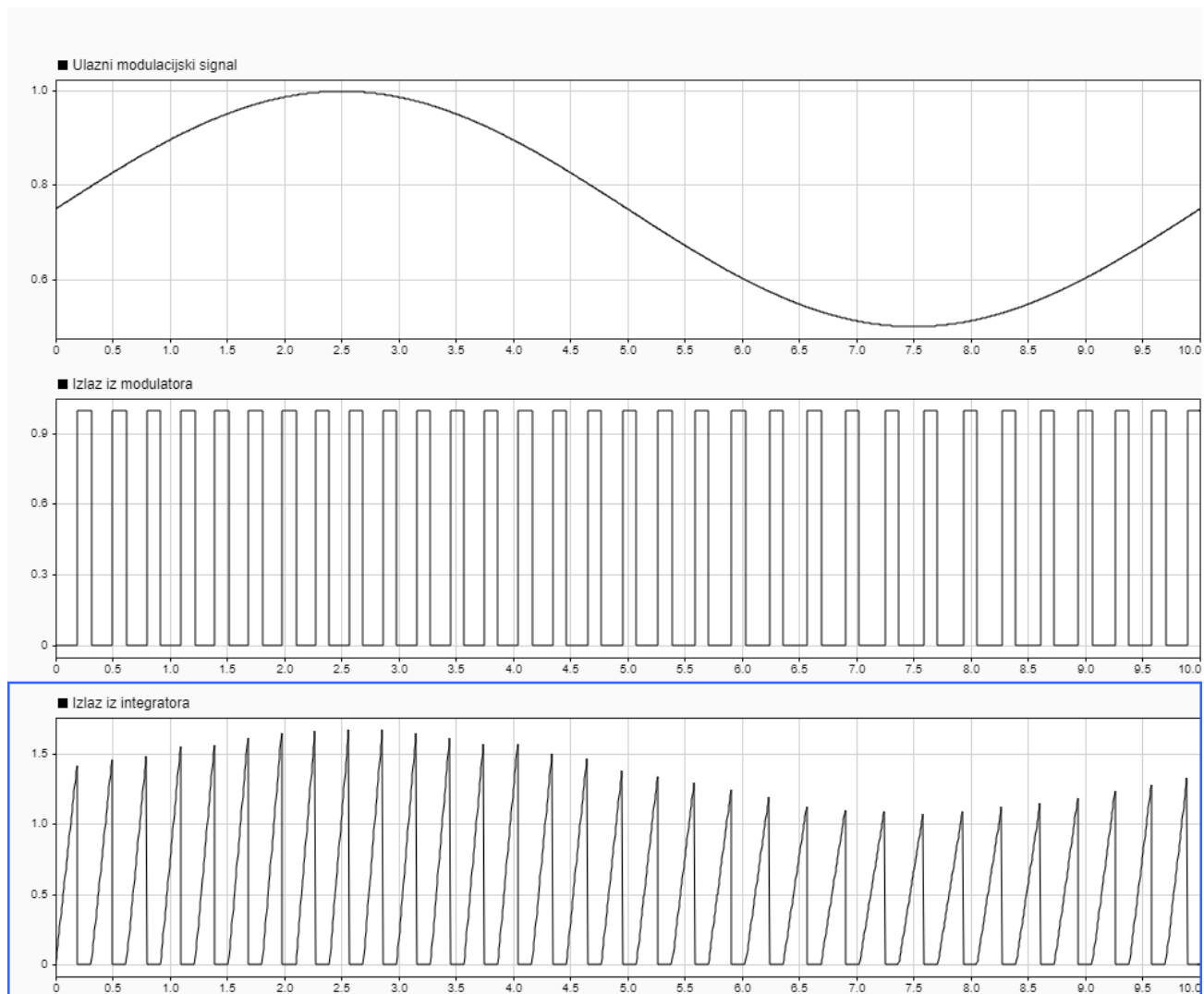
Na slici 4.7. i 4.8. su za pobudu odabrani konstantni izvori napona te je pri tome za blok kašnjenje 1 izabrana vrijednost 20, a za blok kašnjenje 2 vrijednost 10. Ulazni signal koji je prikazan na slici 4.7. se nalazi ispod granične vrijednosti komparatora koja iznosi 0.5 V dok se signal prikazan na slici 4.8. nalazi iznad granične vrijednosti komparatora. Valni oblici na izlazu iz integratora te generirani impulsi na izlazu sa slike 4.8. su rjeđi, odnosno integrator integrira ulazni signal dužom vremenskom konstantom. Za razliku od ulaza sa slike 4.8., ulazni signal sa slike 4.7. koji je ispod granične

vrijednosti na izlazu daje gušći niz impulsa jer integrator integrira ulaz kraćom vremenskom konstantom te je zbog toga vidljivo povećanje frekvencije generiranih impulsa.



**Slika 4.9.** Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz unipolarni sinusni signal frekvencije  $f = 0.1 \text{ Hz}$ , amplitude  $A = 0.25 \text{ V}$  za shemu sa slike 4.6.

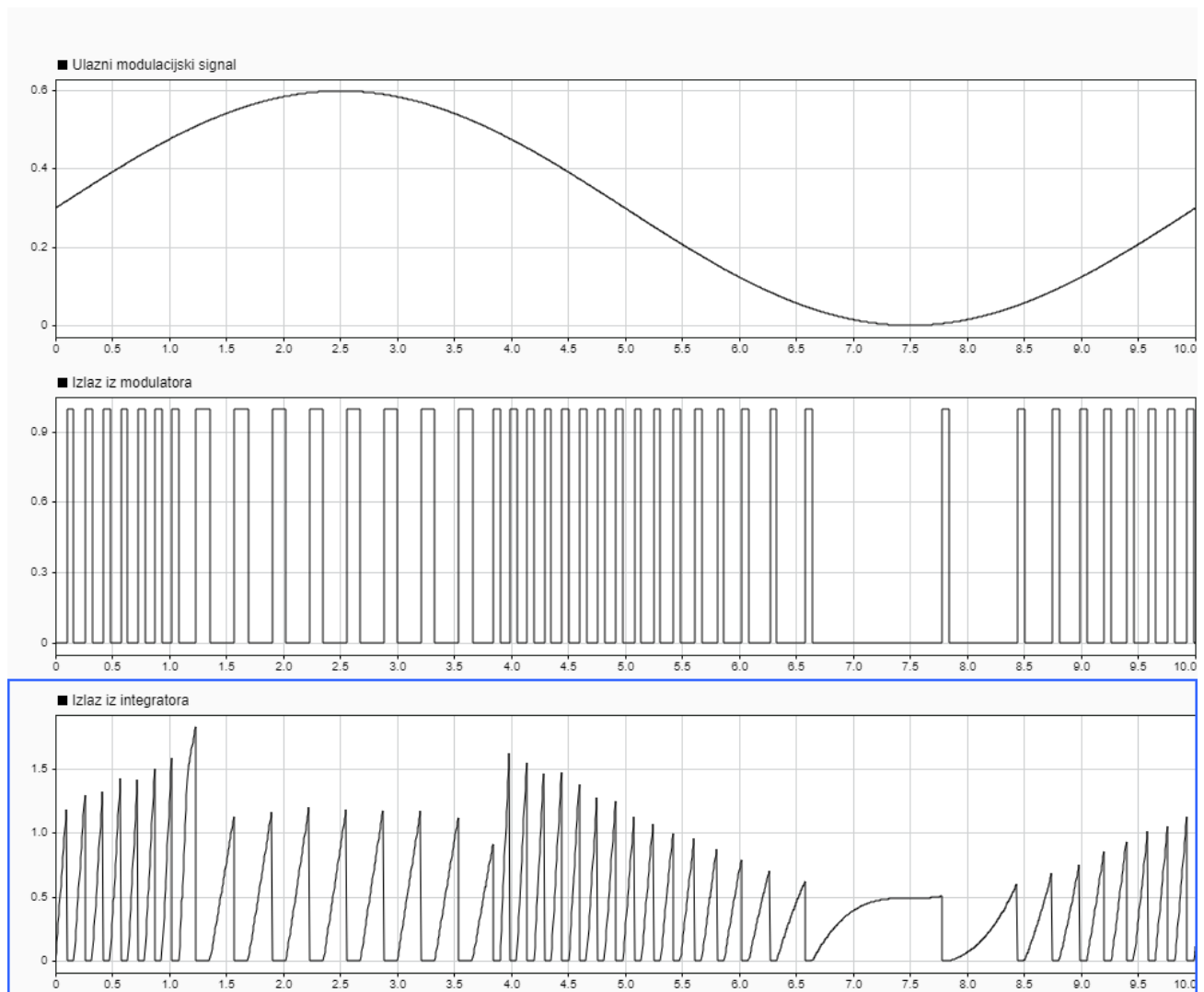
Signal je pomaknut za vrijednost 0.25.



**Slika 4.10.** *Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz unipolarni sinusni signal frekvencije  $f = 0.1$  Hz, amplitude  $A = 0.25$  V za shemu sa slike 4.6.*

*Signal je pomaknut za vrijednost 0.75.*

Slike 4.9. i 4.10. prikazuju generirane impulse na izlazu iz modulatora te valne oblike na izlazu iz integratora ako je na ulaz doveden unipolarni sinusni signal. Ulazni se signal prikazan slikom 4.9. nalazi ispod granične vrijednosti komparatora te je niz impulsa na izlazu za taj signal gušći od niza impulsa na izlazu za ulazni signal sa slike 4.10. Slično kao i kod pobude konstantnim izvorom napona, frekvencija pojavljivanja impulsa na izlazu je veća za ulaz koji je ispod razine thresholda, nego za ulaz koji je iznad razine thresholda. Širina između generiranih impulsa, odnosno njihova frekvencija ovisi o tome kojom se konstantom integrira ulazni signal.



**Slika 4.11.** Ulazni modulacijski signal, izlaz iz modulatora te izlaz iz integratora ako je ulaz unipolarni sinusni signal frekvencije  $f = 0.1 \text{ Hz}$ , amplitude  $A = 0.3 \text{ V}$  za shemu sa slike 4.6.

Signal je pomaknut za vrijednost 0.3.



Na slici 4.11. je vidljiva adaptivna funkcionalnost IPFM modulatora. Na ulaz je doveden unipolarni sinusni signal koji se nalazi ispod i iznad razine granične vrijednosti. Uočljiva je promjena frekvencije impulsa na izlazu iz modulatora u ovisnosti o amplitudi ulaznog signala. Za vrijednosti ulaznog signala koje prelaze graničnu vrijednost od  $0.5\text{ V}$  integrator je integrirao ulazni signal većom vremenskom konstantom, dok je sve vrijednosti ulaznog signala ispod granične vrijednosti integrirao kraćom vremenskom konstantom. Kako bi se omogućila demodulacija, uvedena je razlika u širini impulsa. Impulsi generirani u intervalu gdje je ulazni signal  $u(t) \geq 0.5\text{ V}$  su rjeđi, odnosno imaju manju frekvenciju pojavljivanja od onih koji se nalaze u intervalu gdje je ulazni sinusni signal  $u(t) < 0.5\text{ V}$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Naglasak ovoga rada je na impulsne modulatorske postupke te je opisani adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator. Primjena impulsnih metoda modulacije u svijetu elektronike danas je sve češća. Najzastupljenija metoda impulsno frekvencijske modulacije je integralna impulsno frekvencijska modulacija (IPFM) koja je zajedno s adaptivnim tehnikama tema ovoga rada. Ovisno o predznaku impulsa na izlazu, IPFM može davati samo pozitivne (unipolarni IPFM) ili pozitivne i negativne (bipolarni IPFM) impulse. IPFM okida impulse na izlazu svaki put kada integral signala na ulazu dosegne graničnu vrijednost (threshold) te se integrator resetira nakon svakog od tih impulsa. Kao rezultat se dobiva niz pravokutnih impulsa čija je širina proporcionalna ili obrnuto proporcionalna iznosu amplitude ulaznog signala.

Nakon teorijske definicije IPFM-a, predložena je osnovna izvedba adaptivnog IPFM modulatora koja se bazira na adaptivnom mijenjanju konstante integracije pri integriranju ulaznog signala u ovisnosti o širini generiranih impulsa. Ideja se bazira na nekoliko radova iz područja digitalnih adaptivnih tehnika modulacije kojima se opisuju analogno-digitalni pretvornici [10], [11].

U programu Matlab odrađena je simulacija idealnog i adaptivnog IPFM-a po uzoru na [6]. Sheme sustava su napravljene u Simulinku, a funkcija za idealni IPFM modulator napisana u Matlab skripti. Adaptivni dio modulatora je predstavljen sa dvije konstante integracije koje se mijenjaju ovisno o razini ulaznog signala. Kraća konstanta integracije se koristi za manje amplitude ulaznog signala koje ne prelaze graničnu vrijednost komparatora, a dulja za veće amplitude, odnosno za ulazni signal koji prelazi graničnu vrijednost komparatora.

## LITERATURA

- [1] S. Haykin, Communication systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, 2001.  
Dostupno na: [<https://ict.iitk.ac.in/wp-content/uploads/EE320A-Principles-Of-Communication-CommunicationSystems-4ed-Haykin.pdf>] [20.4.2021.]
- [2] B. Modlic, I. Modlic, Modulacije i modulatori, Školska knjiga, Zagreb, 1995. [20.4.2021.]
- [3] S. Mandarić, Informacije i komunikacije, Strukovna škola Vice Vlatkovića Zadar, Zadar, 2008.  
Dostupno na: [<https://www.slideshare.net/xhelalbislimi1/informacije-i-komunikacije>] [20.4.2021.]
- [4] <https://instrumentationforum.com/t/pulse-width-modulation-pwm/3611> [20.4.2021.]
- [5] <https://slidetodoc.com/impulsna-modulacija-impulsna-modulacija-pripada-grupi-modulacija-kod/> [22.4.2021.]
- [6] J.J. Abbott, Design tools for pulse-frequency-modulated control systems: error analysis and limit-cycle prediction, The University of Utah, Salt Lake City, 2001.  
Dostupno na: [[https://www.telerobotics.utah.edu/uploads/Main/Abbott\\_Thesis.pdf](https://www.telerobotics.utah.edu/uploads/Main/Abbott_Thesis.pdf)] [1.5.2021.]
- [7] J.J. Abbott, Sanford G. Meek, Digital Emulation of Pulse Frequency Modulation for Neuroprosthetic Sensory Feedback, IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, No. 4, Vol. 15, pp. 131 - 135, Mar 2007 [15.5.2021.]
- [8] R. Bailon, G. Laouini, C. Grao, M. Orini, P. Laguna, O. Meste, The Integral Pulse Frequency Modulation Model With Time-Varying Threshold: Application to Heart Rate Variability Analysis During Exercise Stress Testing, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, No. 3, Vol. 58, pp. 642 - 652, Mar 2011 [18.5.2021.]
- [9] T. Matić, L. Šneler, M. Herceg, An Energy Efficient Multi-User Asynchronous Wireless Transmitter for Biomedical Signal Acquisition, IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems, No. 4, Vol. 13, pp. 619-630, Aug 2019 [20.5.2021.]

- [10] Y. Tsvividis, Event-Driven Data Acquisition and Digital Signal Processing—A Tutorial, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, No. 8, Vol. 57, pp. 577 – 581, Aug 2010 [2.6.2021.]
  
- [11] Y. Hou, J. Qu, Z. Tian, M. Atef , K. Yousef, Y. Lian, G. Wang, A 61-nW Level-Crossing ADC With Adaptive Sampling for Biomedical Applications, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, No. 1, Vol. 66, pp. 56 – 60, Jan 2019 [23.6.2021.]

## SAŽETAK

Tema ovog završnog rada je adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator. Na početku su opisani svi analogni impulsni postupci moduliranja signala kojima prethodi općeniti uvod u modulacije. Naglasak je stavljen na metodi moduliranja frekvencije impulsa (PFM) u izvedbi s integratorom. Ovisno o predznaku IPFM-a u ovome radu su dane karakteristike i matematički opis unipolarnog i bipolarnog IPFM-a. Na kraju teorijskog dijela objašnjene su adaptivne tehnike te primjena adaptivnih tehnika u analognoj domeni na dani modulator. Kroz simulaciju u programskom paketu Matlab blokovskim shemama su prikazani modeli idealnog i adaptivnog IPFM-a te su opisani njihovi valni oblici na izlazu iz integratora i modulatora ovisno o karakteristikama signala na ulazu.

**Ključne riječi:** adaptivne tehnike , adaptivni integralni impulsno frekvencijski modulator, impulsni modulacijski postupci, moduliranje frekvencije impulsa

## **SUMMARY**

The topic of this final paper is adaptive integral pulse frequency modulator. At the beginning, all analog pulse signal modulation techniques are described, which are preceded by a general introduction of modulation. The pulse frequency modulation (PFM) method with integration is emphasized. Depending on the sign of IPFM, the characteristics and mathematical description of unipolar and bipolar IPFM are given in this paper. At the end of theoretical part, adaptive techniques are described and their application in the analog domain to a given modulator. By a simulation in the Matlab software package, block diagrams of ideal and adaptive IPFM models are shown as well as description of their waveforms at the output of integrator and modulator depending on characteristics of the input signal.

**Keywords:** adaptive techniques, adaptive integral pulse frequency modulator, pulse modulation techniques, pulse frequency modulation