

Universitatea Națională de Știință și Tehnologie Politehnica București
Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației

Sintetizator audio analogic controlat digital

Proiect de diplomă

rezentat ca cerință parțială pentru obținerea titlului de
Inginer în domeniul inginerie electronică, telecomunicații și
tehnologii informaționale
programul de studii de licență *electronică aplicată*

Conducător științific
S.L. dr. Ing. Victor POPA

Absolvent
Andrei ZGLIMBEA

Anul 2024

TEMA PROIECTULUI DE DIPLOMĂ
a studentului **ZGLIMBEA D. Andrei, 445B**

1. Titlul temei: Sintetizator audio analogic controlat digital

2. Descrierea temei și a contribuției personale a studentului (în afara părții de documentare):

Proiectul presupune realizarea practică a unui sintetizator analogic cu posibilitatea de control digital. Sintetizatorul va conține următoarele module funcționale: oscilatoare controlate în tensiune, amplificatoare controlate în tensiune, filtru controlat în tensiune, mixer, modulatoare în amplitudine, afișaj pentru vizualizarea parametrilor setați și convertor MIDI pentru controloul sintetizatorului. Oscilatoarele controlate în tensiune vor genera analogic forme de undă sinusoidale, triunghiulare, dinte de fierastrău și dreptunghiulare cu factor de umplere stabil. Blocul de amplificare controlat în tensiune va permite realizarea modulației amplitudinii și setarea nivelului semnalului sintetizat. Filtrul controlat în tensiune va fi de tip trece-jos, iar tensiunea de control va modifica frecvența de tăiere și factorul de calitate. Mixerul va suma proporțional toate semnalele generate analogic și le va preamplifica pentru a fi redate pe un difuzor. Modularea amplitudinii va fi realizată digital în două moduri: în primul mod se va genera o anvelopă configuriabilă de tipul ADSR (Attack, Decay, Sustain, Release) pentru semnalul sinetizat, iar în al doilea mod se va utiliza un oscilator de joasă frecvență pentru a modula amplitudinea semnalului și alți parametri cum ar fi frecvența de tăiere și factorul de calitate al filtrului trece-jos. Cu ajutorul convertorului MIDI se va putea controla sintetizatorul, permitând generarea de note muzicale în timp real. Partea digitală va fi implementată pe un microcontroller Arduino, iar partea analogică va fi realizată folosind componente discrete, amplificatoare operaționale și circuite integrate specifice.

3. Discipline necesare pt. proiect:

Microcontrolere, Circuite integrate analogice, Inginerie Audio

4. Data înregistrării temei: 2023-12-18 12:02:33

Conducător(i) lucrare,
Ş.L. dr. ing. Victor POPA

Student,
ZGLIMBEA D. Andrei

Director departament,
Conf. dr. ing. Bogdan FLOREA

Decan,
Prof. dr. ing. Mihnea UDREA

Cod Validare: **7fc2beee24**

Anexa 5

Declarație de onestitate academică

Prin prezenta declar că lucrarea cu titlul "Sintetizator audio analogic controlat digital", prezentată în cadrul Facultății de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației a Universității "Politehnica" din București ca cerință parțială pentru obținerea titlului de *Inginer* în domeniul *Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologi informaționale și* programul de studii Electronică aplicată este scrisă de mine și nu a mai fost prezentată niciodată la o facultate sau instituție de învățămînt superior din țară sau străinătate.

Declar că toate sursele utilizate, inclusiv cele de pe Internet, sunt indicate în lucrare, ca referințe bibliografice. Fragmentele de text din alte surse, reproduse exact, chiar și în traducere proprie din altă limbă, sunt scrise între ghilimele și fac referință la sursă. Reformularea în cuvinte proprii a textelor scrise de către alți autori face referință la sursă. Înțeleg că plagiatul constituie infracțiune și se sanctionează conform legilor în vigoare.

Declar că toate rezultatele simulărilor, experimentelor și măsurătorilor pe care le prezint ca fiind făcute de mine, precum și metodele prin care au fost obținute, sunt reale și provin din respectivele simulări, experimente și măsurători. Înțeleg că falsificarea datelor și rezultatelor constituie fraudă și se sanctionează conform regulamentelor în vigoare.

București, 26.06.2024

Absolvent *Andrei ZGLIMBEA*


(semnătura în original)

Cuprins

Cuprins	5
Lista figurilor.....	9
Lista tabelelor	11
Lista acronimelor.....	12
Introducere.....	13
Capitolul 1. Sintetizatoare audio analogice	15
1.1. Istoricul Sintetizatoarelor Analogice	15
1.2. Tipuri de sintetizatoare analogice	15
1.2.1. Sinteza substractivă.....	16
1.2.2. Sinteza aditivă	16
1.2.3. Sinteza cu modulație în frecvență	16
1.2.4. Sinteza formei de undă.....	16
1.3. Principii de funcționare.....	17
1.3.1. Oscilatoare controlate în tensiune	17
1.3.2. Filtre controlate în tensiune	17
1.3.3. Amplificatoare controlate în tensiune	17
1.3.4. Generatoare de envelopă și oscilatoare de frecvență joasă	17
1.3.5. Interfețe de control.....	18
Capitolul 2. Proiectarea blocurilor de sinteză audio analogice	19
2.1. Convertor tensiune-curent exponențial	20
2.2. Oscilator controlat în frecvență.....	24
2.2.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al OCT-ului	25
2.2.2. Blocurile integrator, comparator și blocul de prelucrare a semnalelor de sincronizare	26
2.2.3. Blocurile amplificator, redresor dublu alternanță și convertor formă de undă triunghiulară-sinusoidală.....	28
2.2.4. Blocurile comparator, mixer și blocul ce prelucrează semnalele pentru PWM.	29
2.3. Filtru controlat în tensiune	31
2.3.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al FCT-ului.....	31
.....	31
2.3.2. Blocul filtru trece-jos	32

2.3.3. Blocul amplificator și blocul ce prelucrează semnalele ce modulează rezonanța	33
2.3.4. Analiza ca sistem a filtrului controlat în tensiune.....	34
2.4. Amplificator controlat în tensiune	37
2.4.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al ACT-ului	38
.....	38
2.4.2. Blocurile AOT și convertor curent-tensiune.....	38
2.5. Sursa de alimentare	39
Capitolul 3. Proiectarea blocurilor de control digital al sintetizatorului audio	41
3.1. Microcontroller	42
3.2. MIDI.....	42
3.3. Generator de anvelope - ADSR	44
3.4. Oscilator de frecvență joasă	45
3.5. Blocurile de interconectare și prelucrare a surselor și căilor de modulație	47
3.5.1. Blocul de control al căilor de modulație	49
3.6. Interfața utilizator.....	50
Capitolul 4. Realizarea practică a sintetizatorului analogic controlat digital	53
Capitolul 5. Testarea sintetizatorului.....	57
Concluzii.....	66
Bibliografie.....	67
Anexa – PCB și carcăsă.....	69

Lista figurilor

Figura 2.1.1 Diagrama bloc a metodei de sinteză utilizate în sintetizatorul dezvoltat	19
Figura 2.2 Schema electrică a convertorului tensiune-curent exponențial	21
Figura 2.3 Schema electrică completă a convertorului tensiune-curent exponențial.....	22
Figura 2.4 Diagrama bloc a oscilatorului controlat în tensiune	24
Figura 2.5 Schema electrică a convertorul tensiune-curent exponențial din cadrul OCT-ului.....	25
Figura 2.6 Schema electrică a convertorul tensiune-curent exponențial din cadrul OCT-ului.....	26
Figura 2.7 Fenomenul de resetare incorectă a procesului de integrare, exemplificare exagerată.....	27
Figura 2.8 Schema electrică a blocurilor amplificator, redresor dublu alternanță și convertor formă de undă triunghiulară-sinusoidală	28
Figura 2.9 Schema electrică a blocurilor comparator, mixer și a blocului ce prelucrează semnalele pentru PWM.....	29
Figura 2.10 Forma de undă dintre de fierăstrău generată conform simulărilor.....	29
Figura 2.11 Forma de undă dreptunghiulară generată conform simulărilor	30
Figura 2.12 Forma de undă sinusoidală generată conform simulărilor.....	30
Figura 2.13 Forma de undă triunghiulară generată conform simulărilor.....	30
Figura 2.14 Diagrama bloc a filtrului controlat în tensiune.....	31
Figura 2.15 Schema electrică a convertorului implementat în FCT	31
Figura 2.16 Schema electrică a blocului FTJ	32
Figura 2.17 Schema electrică a blocului amplificator și a blocului de control al rezonanței	33
Figura 2.18 Simularea blocului amplificator cu tensiunea maximă de control a rezonanței	33
Figura 2.19 Diagrama sistem a filtrului controlat în tensiune [1].....	34
Figura 2.20 Planul s al funcției de transfer atunci când k este zero [1]	35
Figura 2.21 Planul s al funcției de transfer atunci când polii ating axa imaginară [1]	35
Figura 2.22 Răspunsul în frecvență al filtrului complet deschis și k egal cu unu, conform simulărilor	36
Figura 2.23 Răspunsul în frecvență al filtrului complet închis și k egal cu unu, conform simulărilor	36
Figura 2.24 Forma de undă generată de filtru când k este egal cu cinci, fără semnal de intrare, conform simulărilor.....	37
Figura 2.25 Răspunsul în frecvență al filtrului complet închis și k egal cu cinci, conform simulărilor	37
Figura 2.26 Diagrama bloc a amplificatorului controlat în tensiune	37
Figura 2.27 Schema electrică a convertorului implementat în ACT.....	38
Figura 2.28 Schema electrică a amplificatorului	38
Figura 2.29 Semnal prelucrat de ACT, conform simulărilor	39
Figura 2.30 Schema electrică a sursei de alimentare	39
Figura 3.2.1 Diagrama bloc a sintetizatorului audio analogic controlat digital.....	41
Figura 3.2 Diagrama software a sintetizatorului audio controlat digital.....	42
Figura 3.3 Schema electrică a interfeței MIDI.....	43
Figura 3.4 Exemplu de anvelopă generată de sintetizator, vizualizată pe osciloscop	45

Figura 3.5 Exemplu de semnal de frecvență joasă generat de sintetizator, vizualizat pe osciloscop	46
Figura 3.6 Blocurile de generare, interconectare și prelucrare a surselor de modulație hardware	48
Figura 3.7 Schema electrică a blocului de control	49
Figura 4.1 Modelul 3D al PCB-ului asamblat.....	54
Figura 4.2 Modelul 3D al carcasei	55
Figura 5.1 Tensiunile de alimentare +12 V și -12 V măsurate pe sintetizatorul fizic	57
Figura 5.2 Tensiunile de alimentare +5 V și -5 V măsurate pe sintetizatorul fizic	58
Figura 5.3 Tensiunile de alimentare +3 V și -3 V măsurate pe sintetizatorul fizic	58
Figura 5.4 Forma de undă dintre de fierastrău generată de sintetizatorul fizic	59
Figura 5.5 Forma de undă dreptunghiulară generată de sintetizatorul fizic.....	59
Figura 5.6 Semnalul triunghiular generat de sintetizatorul fizic.....	60
Figura 5.7 Unul dintre oscilatoarele de frecvență joasă modulând factorul de umplere al semnalului dreptunghiular	60
Figura 5.8 Semnalul sinusoidal generat de sintetizatorul fizic	61
Figura 5.9 Semnalul de ieșire al FCT-ului generat de sintetizatorul fizic	62
Figura 5.10 Semnalul de ieșire al ACT-ului generat de sintetizatorul fizic.....	62
Figura 5.11 Semnalul dintre de fierastrău a cărui frecvență este modulată de cea de a doua anvelopă	63
Figura 5.12 Semnalul dintre de fierastrău a cărui frecvență este modulată de unul dintre oscilatoarele de frecvență joasă.....	63
Figura 5.13 Semnal de frecvență joasă generat de sintetizatorul fizic, prelucrat la nivelul analogic corespunzător pentru a modula frecvența OCT-ului.....	64
Figura 5.14 Resetarea fazelor semnalelor generate de OCT	64
Figura 5.15 Tensiunea de control a frecvenței OCT-ului generate pe baza mesajelor MIDI primite	65
Figura 5.16 PCB-ul complet asamblat	65

Lista tabelelor

Tabelul 3.1 Mesajele MIDI de interes [15].....	43
Tabelul 3.2 Totalitatea surselor și a căilor de modulație din sintetizatorul dezvoltat.....	47
Tabelul 3.3 Prelucrarea nivelelor surselor de modulație.....	48

Lista acronimelor

ACT - Amplificator Controlat în Tensiune

ADSR - Attack, Decay, Sustain, Release (Atac, Decădere, Susținere, Eliberare)

AO - Amplificator Operațional

AOT - Amplificator Operațional Transconductanță

DAC - Digital to Analog Convertor (Convertor digital - analogic)

FCT - Filtru Controlat în Tensiune

FTB - Filtru Trece Bandă

FTJ - Filtru Trece Jos

FTS - Filtru Trece Sus

MF - Modulație în Frecvență

MIDI - Musical Instrument Digital Interface (Interfața Digitală pentru Instrumente Muzicale)

OCT - Oscilator Controlat în Tensiune

OFJ - Oscilator de Frecvență Joasă

PCB - Printed Circuit Board (Cablaj imprimat)

PWM - Pulse-Width Modulation (Modulare în Lățime de Impuls)

RP - Potențiometru

RV – Rezistor Variabil

Vpp – Tensiune vârf la vârf

Introducere

Scopul acestei lucrări este de a descrie proiectarea și implementarea unui sintetizator audio analogic controlat digital. Acest proiect combină avantajele sintezei analogice, cunoscută pentru calitatea și bogăția sunetului, cu flexibilitatea și controlul precis oferit de tehnologia digitală. Alegerea acestei teme a fost motivată de dorința de a explora și de a combina aceste două domenii, având în vedere interesul personal în muzica electronică și ingineria audio.

Lucrarea va descrie în detaliu procesul de proiectare și implementare al sintetizatorului, inclusiv aspectele teoretice și practice implicate. Aceasta va cuprinde descrierea componentelor analogice și digitale utilizate, modul de integrare a acestora, precum și metodele de testare și validare a performanței sintetizatorului.

În primul capitol, descriu istoria și evoluția sintetizatoarelor audio analogice. Vom explora tipurile de sinteză analogică, inclusiv sinteza substractivă, aditivă, modulația în frecvență și sinteza formei de undă. De asemenea, vor fi prezentate principiile de funcționare ale diferitelor componente analogice esențiale, cum ar fi oscilatoarele, filtrele și amplificatoarele.

În al doilea capitol, abordez proiectarea blocurilor de sinteză audio analogice. Detaliile tehnice vor include convertorul tensiune-curent exponențial, oscilatorul controlat în frecvență, filtrul controlat în tensiune și amplificatorul controlat în tensiune. Vom discuta fiecare componentă în parte, analizând principiile de funcționare, schemele electrice și simulările necesare.

În al treilea capitol, prezint proiectarea blocurilor de control digital al sintetizatorului. Aceasta include utilizarea microcontroller-ului, implementarea interfeței MIDI, generatorul de envelope ADSR, oscilatoarele de frecvență joasă și blocurile de interconectare și prelucrare a surselor și căilor de modulație. Vom detalia modul în care aceste componente digitale sunt integrate și interacționează cu blocurile analogice.

În al patrulea capitol, descriu realizarea practică a sintetizatorului. Aici vom vedea cum a fost implementat proiectul fizic, inclusiv aspectele legate de construcția hardware, montajul componentelor și cablajul necesar.

În al cincilea capitol, testează sintetizatorul analogic. Vom prezenta metodele de testare utilizate pentru a evalua performanța sintetizatorului și rezultatele obținute, inclusiv analiza sunetelor generate și verificarea stabilității și preciziei componentelor.

Proiectul realizat se adresează atât profesioniștilor din domeniul muzicii electronice și al ingineriei audio, cât și pasionaților care doresc să experimenteze cu sunete. Importanța unui astfel de instrument este evidentă în contextul evoluției rapide a tehnologiei muzicale, unde flexibilitatea și controlul precis sunt esențiale. Sintetizatorul dezvoltat în acest proiect oferă utilizatorilor posibilitatea de a crea sunete unice, de a explora noi teritorii muzicale și de a se bucura de o experiență sonoră de înaltă calitate.

Aceste considerente au stat la baza proiectării și implementării sintetizatorului. În continuare, vom explora în detaliu fiecare aspect al proiectului, începând cu istoria și evoluția sintetizatoarelor audio analogice, care au pus bazele tehnologiei utilizate în acest proiect.

Capitolul 1. Sintetizatoare audio analogice

1.1. Istoricul Sintetizatoarelor Analogice

Sintetizatoarele audio analogice au jucat un rol esențial în evoluția muzicii și a tehnologiei sunetului. Dezvoltarea primelor sintetizatoare analogice comerciale în anii 1960 și 1970 a marcat o schimbare revoluționară în producția și manipularea sunetului.

Unul dintre primii și cei mai influenți pionieri în acest domeniu a fost Robert Moog, care a introdus primul sintetizator modular comercial în 1964. Sistemul Moog a revoluționat muzica electronică prin utilizarea oscilatoarelor, filtrorelor și amplificatoarelor controlate în tensiune, permitând muzicianilor să creeze și să manipuleze sunetele în moduri cu totul noi. Succesul sistemului Moog a deschis calea pentru alți inventatori și companii care și-au dezvoltat propriile sintetizatoare, ceea ce a dus la o bogată diversitate de instrumente și tehnici.

Don Buchla, o altă figură semnificativă în istoria sintetizatoarelor analogice, și-a dezvoltat propriile sisteme modulare cam în aceeași perioadă cu Moog. Abordarea lui Buchla a fost mai experimentală, încorporând adesea interfețe de control unice, abandonând claviatura tradițională în favoarea panourilor sensibile la atingere și a altor dispozitive de intrare inovatoare. Buchla a introdus concepte noi și radicale, cum ar fi secvențierea tensiunii și controlul prin gesturi, care au extins posibilitățile creative ale sintetizatoarelor.

Alte contribuții notabile au venit din partea unor companii precum ARP Instruments, fondată de Alan R. Pearlman, și EMS (Electronic Music Studios), cunoscută pentru sintetizatorul VCS3. ARP Instruments a dezvoltat sintetizatoare precum ARP 2600 și ARP Odyssey, care au devenit populare datorită sunetului lor distinct și ușurinței de utilizare. EMS, cu VCS3 și Synthi AKS, au oferit sintetizatoare portabile și versatile, care sunt utilizate pe scară largă în muzica experimentală și în coloanele sonore de film.

Aceste instrumente au fost folosite de muzicieni și trupe celebre, printre care The Beatles, Pink Floyd și Kraftwerk, și au dat naștere muzicii electronice, stabilind locul sintetizatorului în muzica modernă. Succesul și popularitatea acestor sintetizatoare au inspirat numeroși muzicieni să exploreze și să experimenteze cu sunetele electronice, contribuind la apariția unor noi genuri muzicale și stiluri inovatoare.

1.2. Tipuri de sintetizatoare analogice

Sintetizatoarele analogice pot fi clasificate în mai multe tipuri pe baza metodelor de sinteză. Fiecare tip are propriile caracteristici și aplicații distințe în proiectarea sunetului.

1.2.1. Sinteza substractivă

Cea mai comună formă de sinteză analogică, sinteza substractivă implică generarea unei forme de undă bogate în armonici, cum ar fi o formă de undă în dinte de fierastrău sau dreptunghiulară, și apoi utilizarea de filtre pentru a elimina anumite frecvențe. Această metodă permite crearea unei mari varietăți de sunete prin modelarea conținutului armonic al formei de undă. Componentele cheie ale sintetizatoarelor subtractive includ oscilatoare, filtre și generatoare de envelope.

Oscilatoarele produc forme de undă de bază, iar filtrele controlează spectrul de frecvențe prin reglarea frecvenței de tăiere și a rezonanței. Generatoarele de anvelopă controlează dinamica sunetului în timp, folosind parametri precum Attack, Decay, Sustain și Release (ADSR) pentru a modela modul în care evoluează sunetul în timp.

1.2.2. Sinteza aditivă

Această metodă creează sunete prin combinarea mai multor unde sinusoidale, fiecare la frecvențe și amplitudini diferite. Sinteza aditivă se bazează pe principiul conform căruia orice formă de undă complexă poate fi descompusă într-o serie de unde sinusoidale mai simple. Deși este mai puțin frecventă în sintetizatoarele analogice din cauza complexității generării și controlului mai multor oscilatoare, sinteza aditivă oferă un control precis asupra conținutului armonic al sunetului.

Prin ajustarea amplitudinii și fazei fiecărei unde sinusoidale individuale, utilizatorii pot crea sunete cu caracteristici armonice foarte specifice și detaliante. Această metodă este adesea utilizată în sinteza digitală, dar a fost explorată și în unele sintetizatoare analogice de laborator și proiecte experimentale.

1.2.3. Sinteza cu modulație în frecvență

Sinteza MF implică modularea frecvenței unei forme de undă (purtătorul) cu o altă formă de undă (modulatorul) pentru a produce spectre armonice complexe. Deși sinteza MF este mai frecvent asociată cu sintetizatoarele digitale, ea poate fi implementată și în formă analogică. Această metodă este cunoscută pentru crearea de sunete metalice și de clopot care sunt greu de obținut cu alte tipuri de sinteză.

Această metodă de sinteză presupune utilizarea unui oscilator de modulație pentru a varia frecvența unui oscilator purtător, rezultând un spectru de frecvență care se schimbă dinamic în funcție de intensitatea modulației. Acest lucru poate produce sunete complexe și unice, utilizate adesea în muzica electronică și în efectele sonore.

1.2.4. Sinteza formei de undă

În acest tip de sinteză, forma de undă este manipulată direct pentru a crea diferite sunete. Acest lucru poate fi realizat prin circuite de modelare a formei de undă sau prin transformarea între diferite forme de undă. Sinteza formei de undă permite obținerea unor sunete unice care nu sunt ușor de produs prin metodele tradiționale subtractive sau aditive.

Aceasta implică utilizarea unor circuite speciale care modifică forma de undă prin procese precum tăierea, plierea sau distorsionarea. Aceste tehnici pot produce sunete cu texturi și timbre complexe, oferind noi posibilități de proiectare creativă a sunetului.

1.3. Principii de funcționare

Funcționarea sintetizatoarelor analogice se bazează pe generarea și manipularea semnalelor electrice pentru a produce sunet. Componentele cheie implicate în acest proces includ oscilatoare, filtre, amplificatoare și surse de modulație.

1.3.1. Oscilatoare controlate în tensiune

Oscilatoarele sunt principalele surse de sunet într-un sintetizator. Ele generează forme de undă periodice la diferite frecvențe, care servesc ca elemente de bază pentru toate sunetele sintetizate. Formele de undă obișnuite produse de OCT-uri includ unde sinusoidale, dreptunghiulare, triunghiulare și dinte de fierastrău. Fiecare formă de undă are propriile caracteristici timbrale distincte, ceea ce face ca oscilatoarele să fie o componentă crucială în proiectarea sunetului.

Oscilatoarele controlate în tensiune permit modificarea frecvenței undei prin ajustarea unei tensiuni de control aplicate. Acest lucru oferă posibilitatea de a crea efecte de modulație, cum ar fi vibrato și glissando, prin variația continuă a frecvenței oscilatorului.

1.3.2. Filtre controlate în tensiune

Filtrele sunt utilizate pentru a modela timbrul sunetului, permitând trecerea anumitor frecvențe și atenuarea altora. Cele mai comune tipuri de filtre în sintetizatoarele analogice sunt FTJ, FTS și FTB. Filtrele sunt adesea controlate în tensiune, ceea ce înseamnă că frecvența de tăiere și rezonanța lor pot fi modulate prin tensiuni de control, permitând modelarea dinamică a sunetului.

FCT-urile sunt esențiale pentru sculptarea sunetului prin ajustarea spectrului de frecvență. Parametri precum frecvența de tăiere și rezonanța permit utilizatorilor să accentueze sau să atenueze anumite frecvențe, creând sunete mai clare sau mai complexe.

1.3.3. Amplificatoare controlate în tensiune

Amplificatoarele controlează amplitudinea și volumul semnalului. Amplificatoarele controlate în tensiune permit controlul precis al nivelului semnalului pe baza tensiunilor de control, permitând efecte precum tremolo. ACT-urile sunt esențiale pentru a controla intensitatea și dinamica generală a sunetului.

ACT-urile permit, de asemenea, integrarea surselor de modulație, cum ar fi OFJ-urile și generatoarele de anvelopă, pentru a crea variații dinamice în amplitudinea semnalului, adăugând profunzime și expresivitate sunetelor produse.

1.3.4. Generatoare de anvelopă și oscilatoare de frecvență joasă

Generatoarele de anvelopă modeleză caracteristicile de amplitudine și de filtrare ale unui sunet în timp, utilizând parametri precum Attack, Decay, Sustain și Release. Oscilatoarele de frecvență joasă sunt utilizate pentru a modula diverse parametri la frecvențe sub-audio, adăugând mișcare și variație sunetului. Printre aplicațiile comune ale OFJ-urilor se numără vibrato, tremolo și baleierea frecvenței de tăiere a filtrului.

Oscilatoarele de frecvență joasă permit un control precis al modului în care sunetul evoluează în timp, esențial pentru crearea de sunete articulate și expresive. OFJ-urile adaugă mișcare și complexitate sunetelor prin modulații lente și continue, oferind efecte dinamice și variate.

1.3.5. Interfețe de control

Sintetizatoarele analogice pot fi controlate folosind diverse dispozitive de intrare, inclusiv claviaturi, sevențiatoare și tensiuni de control externe. Aceste interfețe permit muzicienilor să interacționeze cu sintetizatorul în timp real, manipulând parametri pentru a crea interpretări expresive și dinamice.

Interfețele de control includ, de asemenea, capacitatea de a integra sintetizatorul cu alte echipamente muzicale, cum ar fi controlerele MIDI, permitând o flexibilitate sporită în ceea ce privește performanța și producția muzicală. Acest lucru face ca sintetizatoarele să fie extrem de versatile și adaptabile la diferite stiluri și contexte muzicale. Prin combinarea acestor componente și a interacțiunilor lor, sintetizatoarele analogice pot produce o gamă largă de sunete, de la tonuri simple la texturi complexe. Flexibilitatea sintetizatoarelor analogice fac din aceasta un instrument puternic atât pentru designerii de sunet, cât și pentru muzicieni.

Prin combinarea acestor componente și a interacțiunilor lor, sintetizatoarele analogice pot produce o gamă largă de sunete, de la tonuri simple la texturi complexe. Flexibilitatea sintezei analogice face din aceasta un instrument puternic atât pentru designerii de sunet, cât și pentru muzicieni.

Capitolul 2. Proiectarea blocurilor de sinteză audio analogice

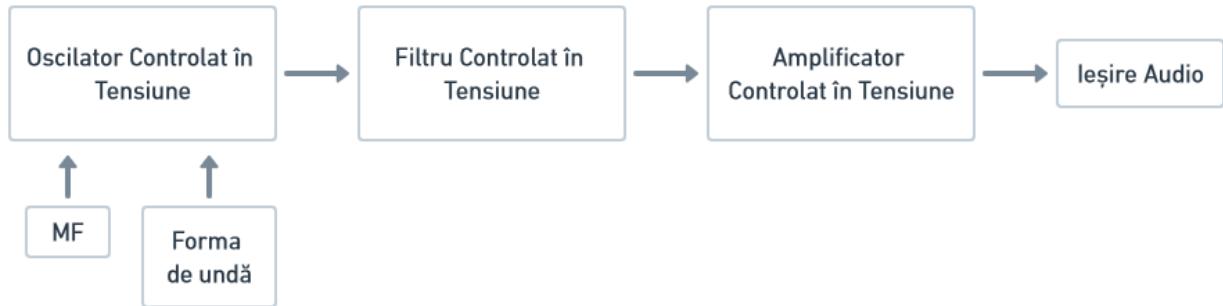


Figura 2.1.1 Diagrama bloc a metodei de sinteză utilizate în sintetizatorul dezvoltat

În acest capitol vom detalia proiectarea blocurilor esențiale sintetizatorului audio analogic. Sintetizatorul dezvoltat urmează principiile de sinteza substractivă 1.2.1, utilizând oscilatoare, filtre și amplificatoare pentru a modela sunetul. În plus, acesta include elemente din diferite metode de sinteză precum sinteza cu modulație în frecvență 1.2.3 și sinteza formei de undă 1.2.4, conform Figura 1.1. Acestea au scopul de a extinde paleta sonoră și de a permite crearea unor sunete mai complexe și variate. Combinarea acestor tehnici fac din acest sintetizator un instrument versatil și puternic, capabil să genereze o gamă largă de sunete, de la tonuri analogice clasice la texturi sonore avansate și experimentale.

Blocurile analogice au fost realizate după modelele primelor sintetizatoare analogice, urmând principiile și designurile demonstrează în cursul [1], cartea [2] și site-ul [3]. Aceste surse oferă o bază solidă pentru înțelegerea principiilor și tehnicilor de sinteză analogică, evidențiind importanța componentelor pasive, amplificatoarelor operaționale, amplificatoarelor operaționale transconductanță și al tranzistoarelor în construirea circuitelor de sinteză.

Proiectarea blocurilor analogice include detalii despre convertorul de tensiune în curent exponențial, oscilatorul controlat în tensiune, filtrul controlat în tensiune, amplificatorul controlat în tensiune și sursa de alimentare.

Un aspect cheie al acestui sintetizator este utilizarea convertoarelor exponențiale tensiune-curent pentru a reproduce controlul în tensiune al blocurilor analogice. Fiecare bloc utilizează o versiune a unui astfel de convertor pentru a asigura precizia și stabilitatea necesare în generarea și procesarea semnalelor audio.

În continuare, vom explora în detaliu proiectarea fiecărui bloc. Vom examina principiile de funcționare, schema electrică și simulările fiecărui bloc, evidențiind modul în care aceste componente lucrează împreună pentru a produce sunete variate.

2.1. Convertor tensiune-curent exponențial

Convertorul tensiune-curent exponențial este un element esențial în proiectarea sintetizatoarelor audio analogice, deoarece permite controlul precis al frecvenței și amplitudinii semnalelor audio în funcție de tensiunea aplicată. Această variație exponențială este importantă pentru sintetizatoarele audio, deoarece permite o scalare logaritmică a frecvenței, similară cu percepția umană a sunetului. Acest convertor este utilizat pentru a asigura funcționarea corectă a OCT-ului, FCT-ului și ACT-ului.

Modul de realizare al convertorului pornește de la modelul Ebers-Moll pentru tranzistorul bipolar, ce descrie legea exponențială dintre curentul de colector I_C al tranzistorului și tensiunea aplicată între terminalele bază și emitor $V_{BE} = V_B - V_E$.

$$I_C = I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T} - 1\right) \approx I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) [A] \Leftrightarrow I_C \gg I_S \quad (2.1)$$

Deoarece caracteristicile tranzistorului bipolar variază semnificativ cu temperatura, apar anumite dificultăți în implementarea convertorului. Pentru a asigura funcționarea corectă, este necesară compensarea acestor variații. Principalii parametri ce variază cu temperatura sunt, în primul rând tensiunea termică $V_T = \frac{k \cdot T}{q} [V] = 26mV \Leftrightarrow T = 298K$, în al doilea rând curentul de saturare al tranzistorului I_S . Aaron Lanterman menționează în cursul său următoarea regulă generală: „ I_S se dublează la fiecare 10 grade Kelvin, iar că dintre cele două variații ale parametrilor tranzistorului bipolar, variația curentului de saturare I_S este mult mai problematică decât cea a tensiunii termice V_T ” [1].

Pentru a compensa efectul curentului de saturare I_S folosim o pereche de tranzistoare bipolare în configurația de amplificator diferențial cu scopul de a genera sau consuma curent, conform Figura 2. Ideal cele două tranzistoare au caracteristicile identice și sunt împachetate sub forma unui singur circuit integrat, deoarece ne dorim ca acestea să fie termocuplate astfel ca parametrii lor să se modifice identic cu temperatura. Deoarece folosim o pereche de tranzistoare în configurație diferențială putem scrie pe baza formulei (2.1) următoarea relație:

$$\begin{aligned} \frac{I_{freq}}{I_{ref}} &= \frac{I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE2}}{V_T}\right)}{I_S \cdot \exp\left(\frac{V_{BE1}}{V_T}\right)} \Rightarrow I_{freq} = I_{ref} \cdot \exp\left(\frac{V_{BE2} - V_{BE1}}{V_T}\right) \\ \Leftrightarrow I_{freq} &= I_{ref} \cdot \exp\left(\frac{[V_{B2} - V_E] - [V_{B1} - V_E]}{V_T}\right) = I_{ref} \cdot \exp\left(\frac{V_{B2} - V_{B1}}{V_T}\right) = I_{ref} \cdot \exp\left(-\frac{V_{B1}}{V_T}\right) [A] \quad (2.2) \\ \Leftrightarrow V_{B2} &= 0V \end{aligned}$$

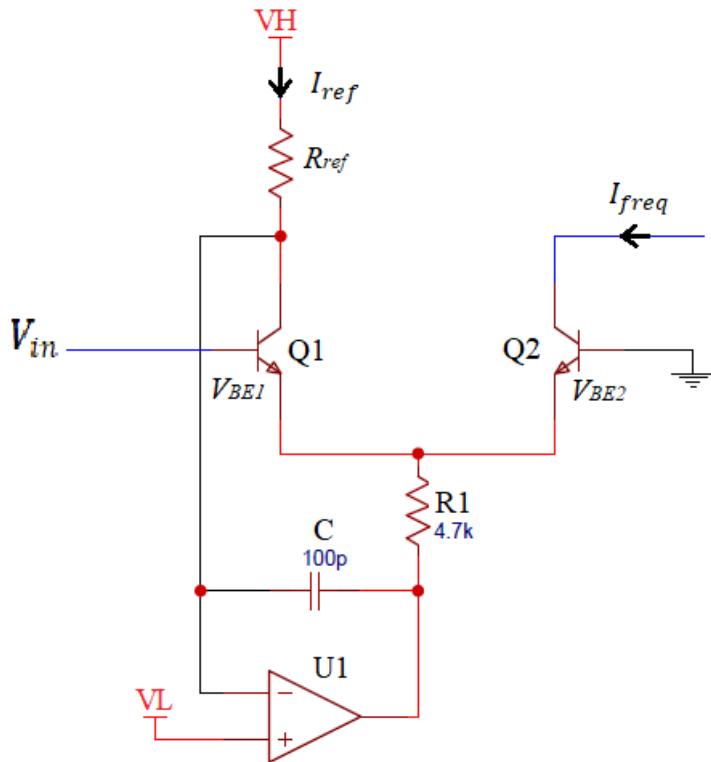


Figura 2.2 Schema electrică a convertorului tensiune-curent exponențial

AO-ul U1 are rolul de a seta tensiunea aflată la unul din terminalele rezistorului R_{ref} pentru a putea determina curentul I_{ref} , acest fapt are loc deoarece AO-ul, prin bucla de reacție, va încerca să țină tensiunile de la intrările sale egale. Astfel, în cazul convertorului din Figura 3, putem scrie următoarea relație legată de I_{ref} :

$$I_{ref} = \frac{VH - VL}{R_{ref}} [A] \quad (2.3)$$

Condensatorul C aflat pe bucla de reacție a AO-ului este folosit pentru stabilitatea circuitului, iar rezistorul R1 determină curentul maxim ce poate trece prin tranzistoare, acesta trebuie dimensionat astfel încât curentul de ieșire al convertorului I_{freq} să nu se satureze.

Pentru controlul parametrilor sintetizatoarelor analogice se folosește standardul de 1 V/Octavă, ce presupune ca la o schimbare de 1 V la intrarea convertorului, curentul de ieșire I_{freq} se dublează pe baza curentului de referință I_{ref} . Pentru ca această modificare a curentului de ieșire să se realizeze la o schimbare de 1 V, tensiunea aplicată în baza tranzistorului V_{B1} trebuie scalată corespunzător, deoarece obținem dublarea curentului de referință la o diferență de tensiune egală cu:

$$\ln(2) \cdot V_T = \ln(2) \cdot 26mV = 17.3mV \quad [4] \quad (2.4)$$

Aaron Lanterman demonstrează metoda de determinare și configurare a standardului 1 V/Octavă și metodele de compensare a temperaturii folosite în sintetizatoarele audio analogice [1].

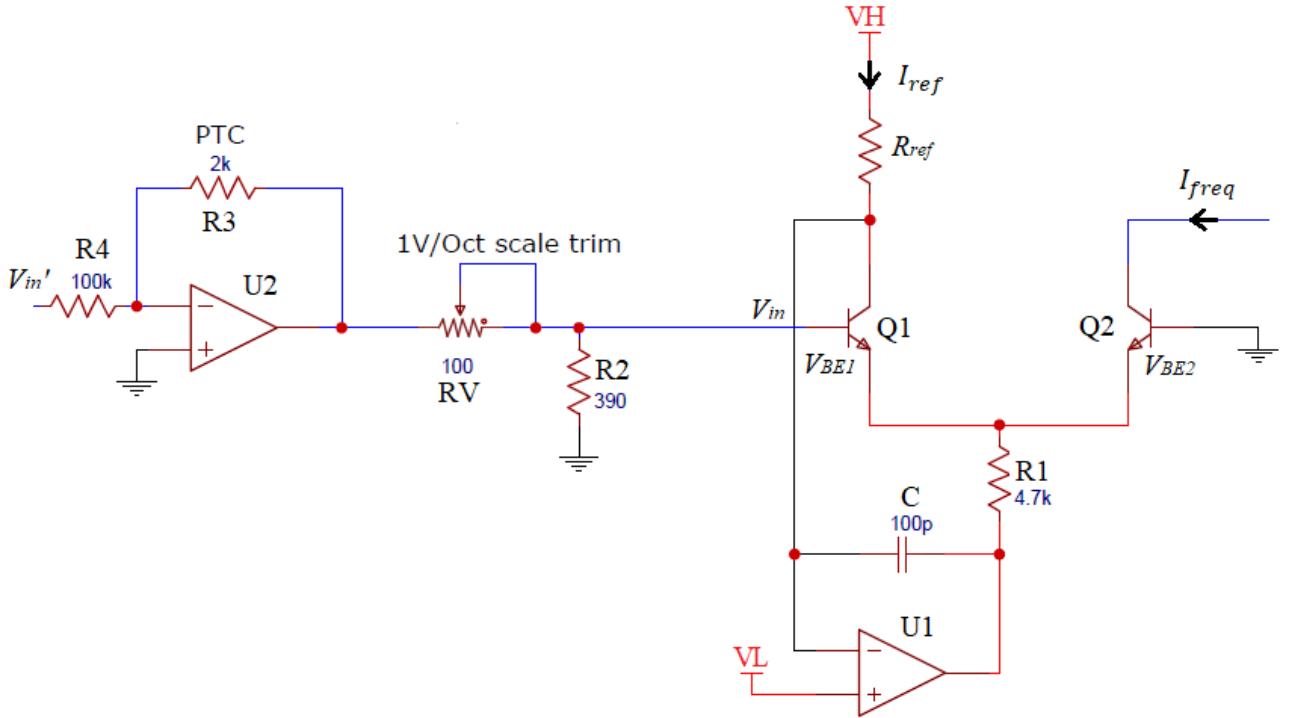


Figura 2.3 Schema electrică completă a convertorului tensiune-curent exponențial

Pe baza relației (2.4) se observă că gama de tensiuni de intrare a convertorului este foarte mică, astfel utilizăm AO-ul U2 și divizorul rezistiv format din RV și R2 pentru a putea utiliza o gama de tensiuni mult mai mare și pentru configurația 1 V/Octavă. Deoarece U2 este în configurație de amplificator inversor vom scăpa și de semnul minus din fața termenului V_{B1} din formula (2.2) iar acesta ne oferă posibilitatea de a însuma mai multe semnale ce au ca scop modularea parametrilor blocurilor analogice, astfel oferind mai multe intrări.

Dacă notăm cu $S = \frac{R3}{R4} \cdot \frac{R2}{R2 + RV}$ factorul de scalare al tensiunii V'_{in} formula (2.2) devine:

$$I_{freq} = I_{ref} \cdot \exp\left(\frac{S \cdot V'_{in}}{V_T}\right) [A] \quad (2.5)$$

Astfel plecând de la această formula putem începe configurarea pentru 1 V/Octavă. Întrebarea pe care trebuie să ne o punem este “Ce diferență de tensiune trebuie aplicată astfel încât să obținem o dublare a curentului I_{freq} ? ” [1]. Această întrebare este exemplificată în următoarea relație matematică:

$$2I_{freq} = I_{ref} \exp\left(\frac{S[V'_{in} + \Delta V'_{in}]}{V_T}\right) [A] \quad (2.6)$$

Prin împărțirea relației (2.6) la (2.5) obținem următorul rezultat:

$$2 = \exp\left(\frac{S\Delta V'_{in}}{V_T}\right) \Rightarrow \ln(2) = \frac{S\Delta V'_{in}}{V_T} \Rightarrow S = \frac{V_T \ln(2)}{\Delta V'_{in}} = \frac{26mV \cdot 0.6931}{1V} \approx 0.018 \approx \frac{1}{55.5} \quad (2.7)$$

Astfel am dedus că factorul de scalare S trebuie să fie egal cu $\frac{1}{55.5}$ pentru a obține dublarea

currentului de ieșire. Pe baza convertorului din Figura 3 putem exemplifica dimensionarea rezistoarelor ce formează factorul de scalare S, presupunând că rezistorul variabil RV este setat la mijloc.

$$S = \frac{R3}{R4} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} = \frac{2k}{100k} \cdot \frac{440}{490} = 0.02 \cdot 0.89 = 0.0179 \approx 0.018$$

Astfel am reușit să compensăm efectul curentului de saturatie al tranzistoarelor și să configurăm standardul de 1 V/Octave. Totuși efectul tensiunii termice este încă prezent iar calculele facute până în acest punct se bazează pe faptul că convertorul va funcționa la temperatura de 298K, dar scopul nostru este a putea utiliza sintetizatorul la parametri normali indiferent de temperatura ambientă. Pentru a compensa și efectul tensiunei termice soluția este de a folosi un element ce este dependent de temperatura în același mod ca și tensiunea termică [1], în cadrul circuitului de scalare a tensiunii de intrare. Astfel vom folosi un termistor PTC în locul rezistorului R3 a cărui coeficient trebuie dimensionată astfel încât să compensăm efectul lui V_T . Această dimensionare este exemplificată în următoarele relații, pe baza formulei unui termistor PTC:

$$R3 = R_0 [1 + coef(T - T_0)] \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{R3}{R4} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} &= S = \frac{V_T \cdot \ln(2)}{\Delta V'_{in}} \Leftrightarrow \left\{ \frac{R_0 [1 + coef(T - T_0)]}{R4} \right\} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{\ln(2)}{\Delta V'_{in}} = \frac{k \ln(2) [T_0 + (T - T_0)]}{q \Delta V'_{in}} \\ &\Leftrightarrow \left\{ \frac{R_0 [1 + coef(T - T_0)]}{R4} \right\} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} = \frac{kT_0}{q} \cdot \frac{\ln(2)}{\Delta V'_{in}} + \frac{k \ln(2) (T - T_0)}{q \Delta V'_{in}} \\ &\Leftrightarrow \left\{ \frac{R_0 [1 + coef(T - T_0)]}{R4} \right\} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} = \frac{kT_0}{q} \cdot \frac{\ln(2)}{\Delta V'_{in}} + \frac{kT_0}{qT_0} \cdot \frac{\ln(2)(T - T_0)}{\Delta V'_{in}} \\ &\Leftrightarrow \left\{ \frac{R_0 [1 + coef(T - T_0)]}{R4} \right\} \cdot \frac{R2}{R2 + RV} = V_{T_0} \cdot \frac{\ln(2)}{\Delta V'_{in}} + \frac{V_{T_0}}{T_0} \cdot \frac{\ln(2)(T - T_0)}{\Delta V'_{in}} \end{aligned}$$

Folosind notația $S_0 = \frac{V_{T_0} \ln(2)}{\Delta V'_{in}}$ putem asocia termenii din stanga relației cu cei din dreapta și astfel putem deduce valoarea coeficientului termistorului necesar.

$$\Leftrightarrow \frac{R_0}{R4} \cdot \frac{R2}{R2+RV} + \frac{R_0 \text{coef}(T-T_0)}{R1} \cdot \frac{R2}{R2+RV} = S_0 + \frac{S_0}{T_0}(T-T_0)$$

$$\frac{R_0 \text{coef}}{R1} \cdot \frac{R2}{R2+RV} = \frac{S_0}{T_0}$$

$$\text{coef} = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{298K} = 0.0034$$

Astfel observăm că în locul rezistorului R3 trebuie să folosim un termistor PTC de $2\text{ k}\Omega$ cu un coeficient de 3400 ppm. În comerț se găsesc termistoare de $2\text{ k}\Omega$ cu un coeficent de 3300 ppm, acesta fiind tipul de termistor utilizat în acest sintetizator.

În concluzie convertorul tensiune-curent exponențial este esențial pentru funcționarea stabilă și precisă a sintetizatoarelor audio analogice. Implementarea corectă a acestui convertor necesită compensarea variațiilor de temperatură și configurarea standardului de 1 V/Octavă pentru a asigura un control precis al frecvenței și amplitudinii semnalelor audio. Utilizarea tranzistoarelor potrivite și a termistorilor PTC permite menținerea stabilității performanței în diverse condiții de temperatură, contribuind astfel la calitatea și fiabilitatea sintetizatorului.

2.2. Oscilator controlat în frecvență

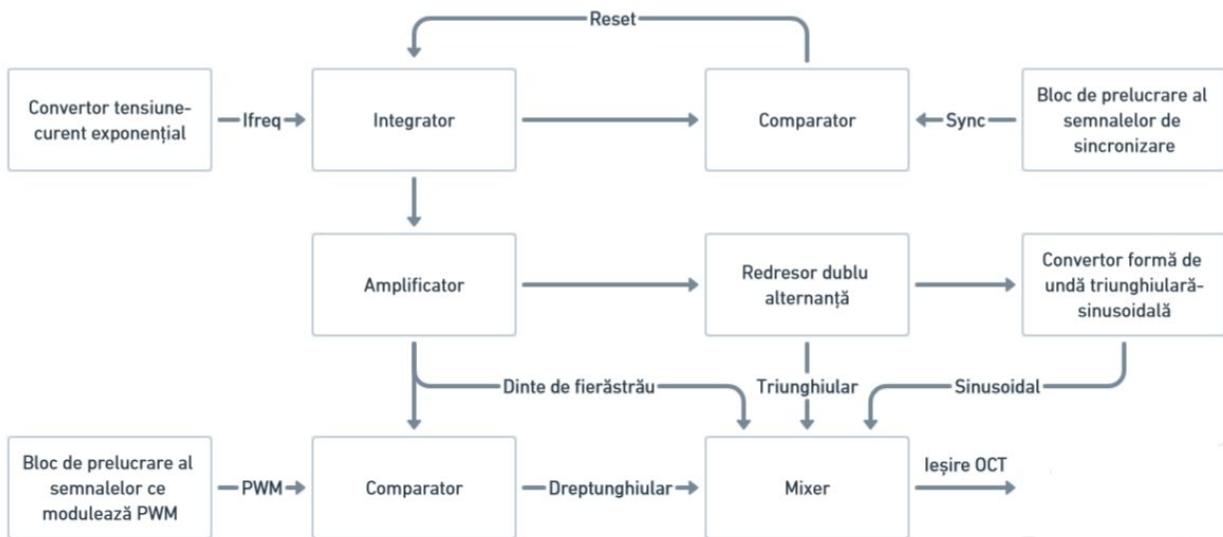


Figura 2.4 Diagrama bloc a oscilatorului controlat în tensiune

Un oscilator controlat în tensiune este un circuit electronic care generează un semnal periodic, cu forme de undă precum dinti de fierastrău, triunghiular, sinusoidal și dreptunghiular, a cărui frecvență este determinată de o tensiune de control aplicată la intrare. OCT-urile sunt componente

esențiale în diverse aplicații, inclusiv sintetizatoarele audio, unde sunt utilizate pentru a genera tonuri muzicale care pot fi modulate în funcție de tensiunea de control, permitând crearea de sunete dinamice și variate.

Oscilatorul dezvoltat în cadrul acestui sintetizator are un nucleu de tip dinte de fierastrău și este capabil să oscileze stabil și să genereze formele de undă corect în intervalul de frecvențe 27.5 Hz – 1760 Hz. Acest domeniu corespunde unui interval de șase octave în spectrul muzical A0-A6. Astfel atunci când tensiunea aplicată oscilatorului este zero acesta va oscila la frecvența de 27.5 Hz iar la fiecare schimbare de 1 V a tensiunii de control oscilatorul va genera semnale cu o frecvență cu o octavă mai sus sau mai jos. Această relație exponențială între tensiune și frecvență este importantă pentru acordarea precisă a instrumentului și pentru reproducerea exactă a notelor muzicale și exemplifică rolul convertorului tensiune-current exponențial.

În continuare vom descrie blocurile ce compun oscilatorul controlat în tensiune în ordinea dată de fluxul semnalului.

2.2.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al OCT-ului

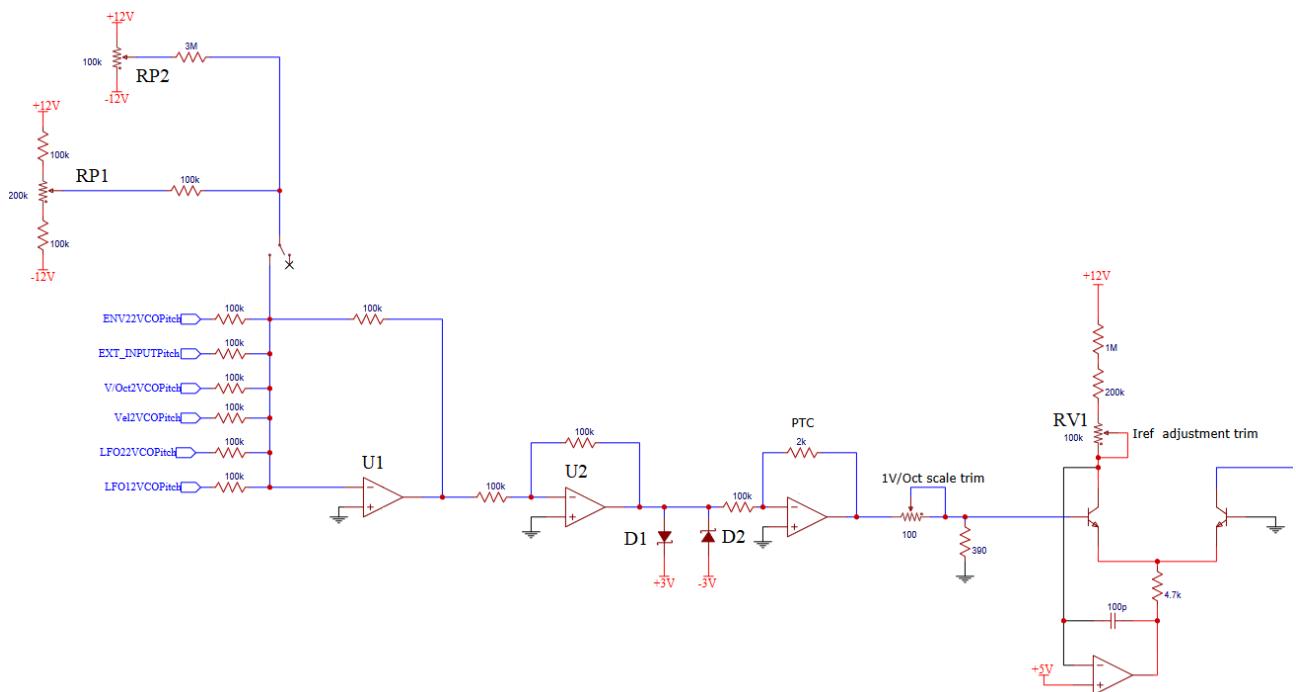


Figura 2.5 Schema electrică a convertorului tensiune-curent exponențial din cadrul OCT-ului

Acest convertor a fost realizat urmând metodele descrise în 2.1. Frecvența oscilatorului poate fi reglată prin diferite semnale, astfel implementând metoda de sinteză MF, conform Figura 1, sau prin intermediul a două potențiometre, RP2 fin și RP1 grosier, ce pot fi deconectate printr-un întrerupător de utilizator. Toate aceste intări sunt însumate de AO-ul U1, ulterior AO-ul U2 și diodele Schottky au rolul de a limita tensiunea aplicată astfel încât oscilatorul să oscileze în domeniul său stabil. O altă particularitate a acestui convertor este că pe lângă rezistorul variabil ce are rolul de a face calibrarea pentru 1 V/Octavă mai există încă un rezistor variabil RV1 ce are rolul de a calibra curentul de referință. Acest convertor folosește tranzistoare NPN, astfel el va trage curent din următorul bloc al OCT-ului.

Pe baza formulei (2.3) putem calcula curentul de referință al acestui convertor. Presupunem că RV1 este setat la valoarea maximă de $100\text{ k}\Omega$.

$$I_{ref} = \frac{12 - 5}{10^6 + 200 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3} = \frac{7}{1.3 \cdot 10^6} = 5.38\mu A$$

2.2.2. Blocurile integrator, comparator și blocul de prelucrare a semnalelor de sincronizare

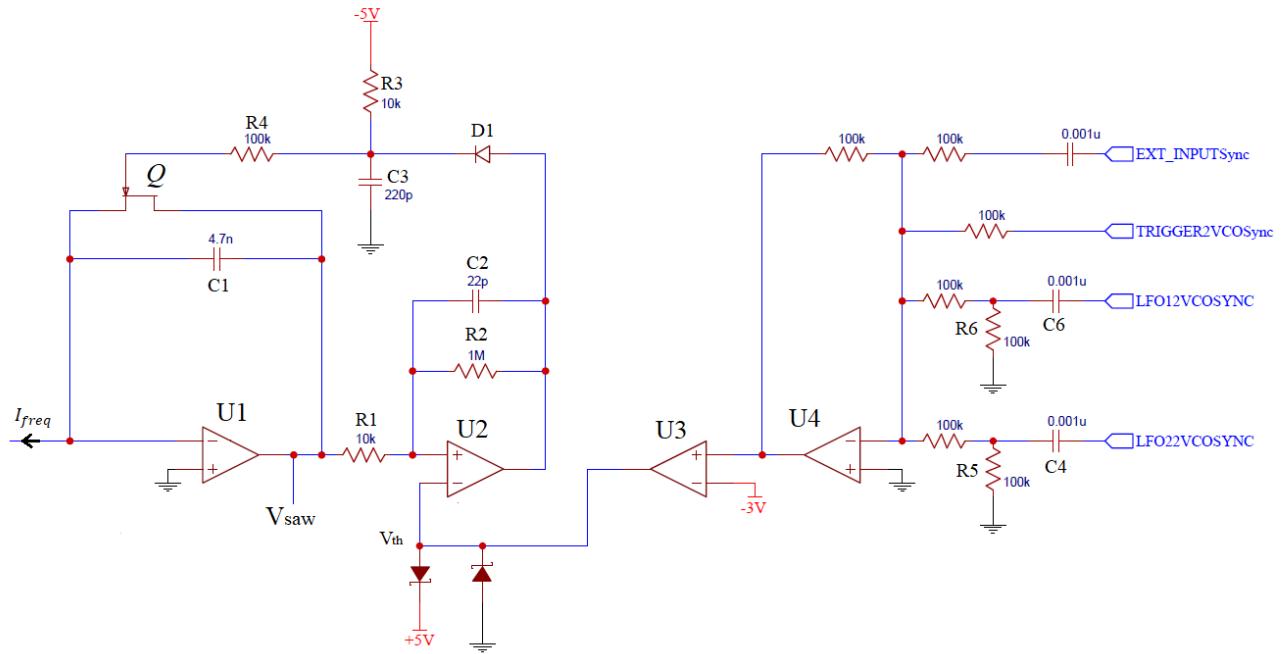


Figura 2.6 Schema electrică a convertorului tensiune-curent exponential din cadrul OCT-ului

Curentul I_{freq} generat de convertor servește ca intrare pentru blocul integrator format din AO-ul U1, condensatorul de integrare C1 și tranzistorul N-JFET Q. Conform amplificatorului integrator putem scrie următoarea relație:

$$V_{saw}(t) = \frac{1}{C} \int_0^t I_{freq} d\tau [V] \quad (2.9)$$

Pentru a face analiza mai ușoară putem presupune că I_{freq} este constant, în plus V_{th} pragul la care resetăm procesul de integrare este și tensiunea maximă a formei de undă, astfel putem rescrie formula (2.9).

$$V_{th} = \frac{I_{freq}}{C} T_0 [V] \quad (2.10)$$

Unde T_0 este perioada și f_0 frecvența semnalului generat:

$$T_0 = \frac{V_{th} \cdot C}{I_{freq}} [s] \quad (2.11)$$

$$f_0 = \frac{I_{freq}}{V_{th} \cdot C} \quad (2.12)$$

Astfel prin blocul integrator generăm o tensiune ce crește liniar în timp care este apoi comparată de blocul format din AO-ul U2, rezistoarele R1,R2 și condensatorul C2, ce are rolul de a detecta cand tensiunea generată de integrator atinge pragul V_{th} și de a reseta procesul de integrare prin intermediul tranzistorului Q, ce scurtcircuitează condensatorul când canalul lui este deschis, astfel obținându-se o formă de undă periodică.

Un fenomen nedorit ce poate să aibă loc în procesul de generare al formei de undă este explicat de Aaron Lanterman în felul următor: "Datorită faptului că tranzistorul Q nu realizează un scurtcircuit perfect al condensatorului C1 atunci când are loc resetarea procesului de integrare, timpul în care C1 se descarcă este mai mare decât ne dorim și acesta poate să înceapă să se încarce din nou până să se fi descărcat complet ceea ce duce la declanșarea eronată a comparatorului și generarea incorectă a formei de undă" [1]. Acest fenomen este exemplificat în Figura 7.

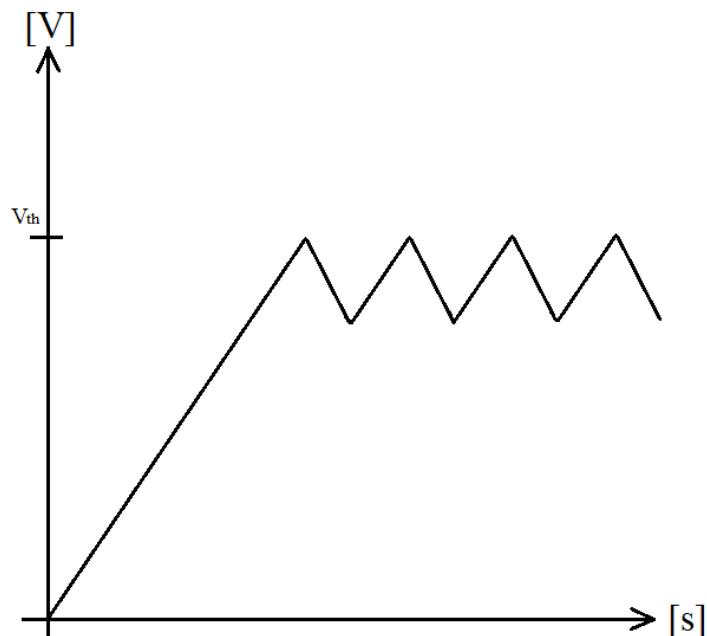


Figura 2.7 Fenomenul de resetare incorectă a procesului de integrare, exemplificare exagerată

Soluția pentru această problemă este să introducem în circuit o constantă de timp ce are rolul de încetini sistemul, astfel acordând destul timp pentru descărcarea condensatorului. Această constantă de timp este formată din rezistorul R1 și condensatorul C2 și are valoarea:

$$\tau = R1 \cdot C2 = 10 \cdot 10^3 \cdot 22 \cdot 10^{-12} = 0.22 \mu s$$

Ieșirea comparatorului este redresată pe alternanță pozitivă prin dioda D1, ce apoi controlează poarta tranzistorului Q. Rezistorul R3 are rolul de a ține potențialul din poarta tranzistorului la un nivel de -5V [5], adică canalul tranzistorului este închis pe alternanță negativă a comparatorului, iar rezistorul R4 și condensatorul C3 sunt folosite pentru stabilitate.

O particularitate a acestui OCT este că nivelul de prag V_{th} poate fi modificat, astfel resetându-se faza formei de undă generate cu scopul de a obține timbre sonore complexe. Această funcționalitate este implementată prin blocul de prelucrare a semnalelor de sincronizare format din AO-urile U3, U4 împreună cu componente pasive asociate și diodele Schottky. Unele dintre tensiunile aplicate la această intrare trec print-un FTS format de exemplu din R5 și C4 pentru a le transforma forma de undă în una asemănătoare unui impuls, ulterior U4 însumează toate aceste intrări și U3 le compară cu un nivel convenabil ales iar tensiunea rezultată este limitată între nivelele corespunzătoare.

2.2.3. Blocurile amplificator, redresor dublu alternanță și convertor formă de undă triunghiulară-sinusoidală

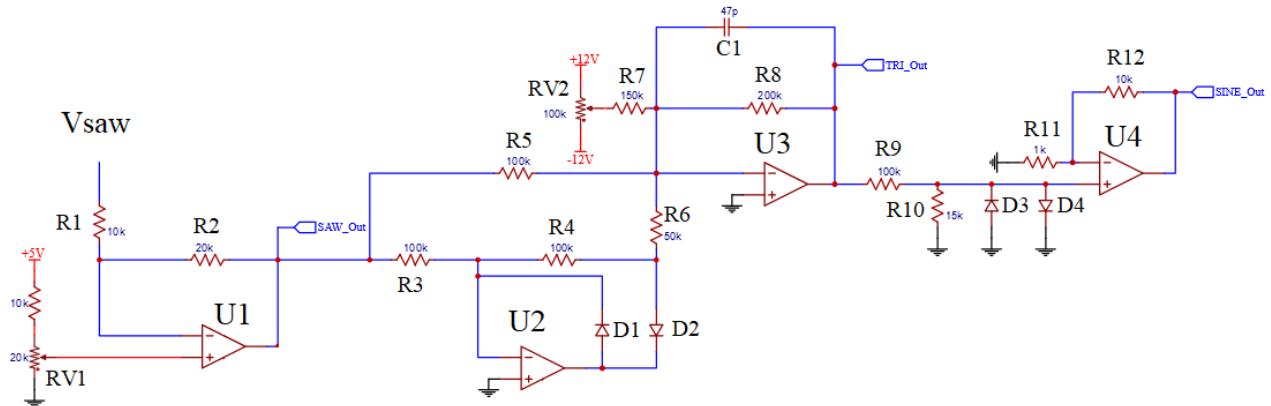


Figura 2.8 Schema electrică a blocurilor amplificator, redresor dublu alternanță și convertor formă de undă triunghiulară-sinusoidală

Semnalul periodic generat de blocul integrator are o amplitudine de 5 Vpp și o componentă continuă de 2.5 V. Ne-am dorit ca amplitudinea semnalelor audio să fie de 10 Vpp și fără componentă continuă, astfel prin blocul amplificator format din AO-ul U1 și rezistoarele R1,R2 amplificăm semnalul V_{saw} la nivelul dorit, iar prin rezistorul variabil RV1 calibrăm semnalul astfel încât să eliminăm componenta continuă. Astfel am generat forma de undă dinte de fierastrău finală.

Pentru generarea semnalului triunghiular folosim blocul redresor dublu alternanță [6], format din AO-ul U2 și componente pasive asociate. Prin RV2 se calibrează forma de undă pentru a obține un semnal triunghiular cât mai corect. Condensatorul C1 are rolul de a curăța imperfecțiunile redresării dublu alternanță ce se manifestă prin varfuri nedorite.

Forma de undă sinusoidală este generată pe baza semnalului triunghiular căruia îi rotunjim vârfurile folosind neliniaritățile diodelor. Astfel prin divizorul rezistiv format din R9 și R10 atenuăm semnalul triunghiular până la un nivel la care putem să exploatăm aceste neliniarități, ulterior prin diodele D3 și D4 formăm semnalul sinusoidal, iar prin AO-ul U4 și R11,R12 îl aducem la nivelul de 10 Vpp.

2.2.4. Blocurile comparator, mixer și blocul ce prelucrează semnalele pentru PWM

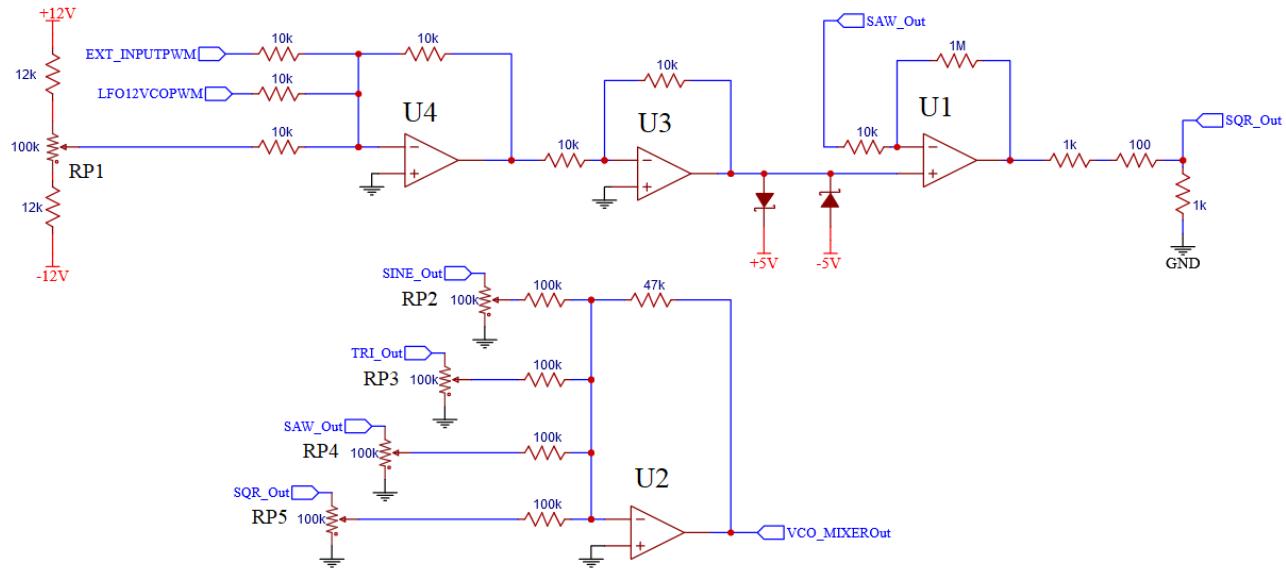


Figura 2.9 Schema electrică a blocurilor comparator, mixer și a blocului ce prelucrează semnalele pentru PWM

Pe baza semnalului dinte de fierăstrău generat anterior 2.2.3 generăm forma de undă dreptunghiulară căreia îi putem controla factorul de umplere. Blocul comparator este implementat de AO-ul U1 iar tensiunea lui de prag determină factorul de umplere al semnalului generat. Blocul de prelucrare pentru semnalele PWM este realizat de AO-urile U4,U3, diode și rezistoarele asociate. Factorul de umplere poate fi controlat de utilizator și prin potențiometrul RP1. Ulterior ieșirea blocului comparator este adusă la nivelul de 10 Vpp.

Blocul mixer este implementat prin AO-ul U2, care are rolul de a însuma toate cele patru forme de undă generate. Selectia formei de undă finale se realizează de către utilizator prin potențiometrele RP2, RP3, RP4, RP5 oferind posibilitatea de a genera forme de undă mai complexe, astfel implementând metoda de sinteză a formei de undă, conform Figura 1.

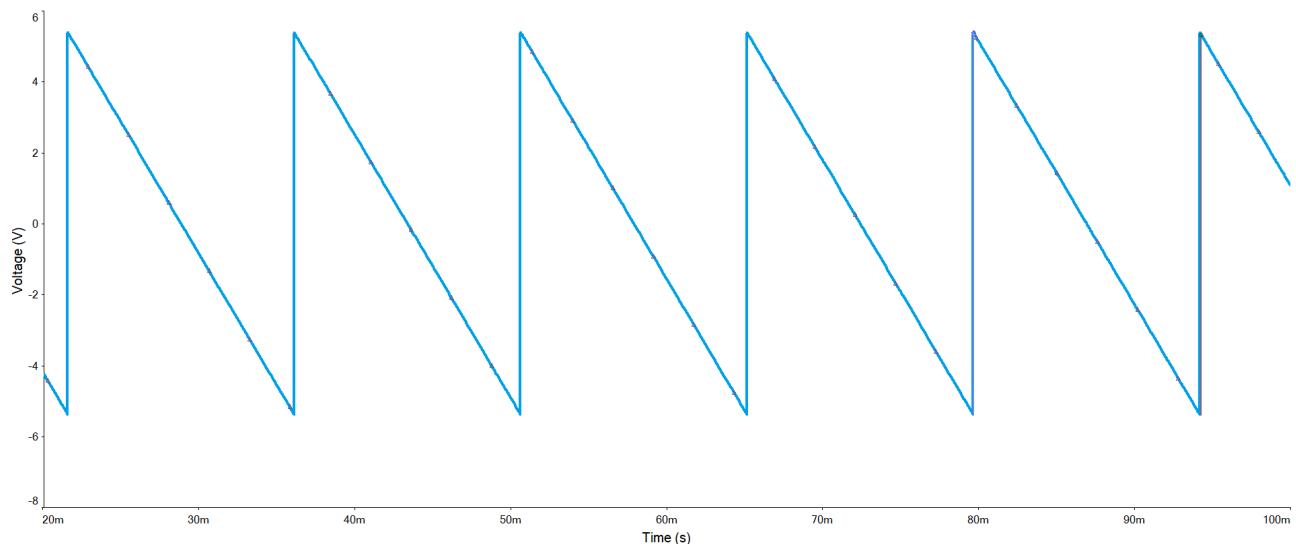


Figura 2.10 Forma de undă dinte de fierăstrău generată conform simulărilor

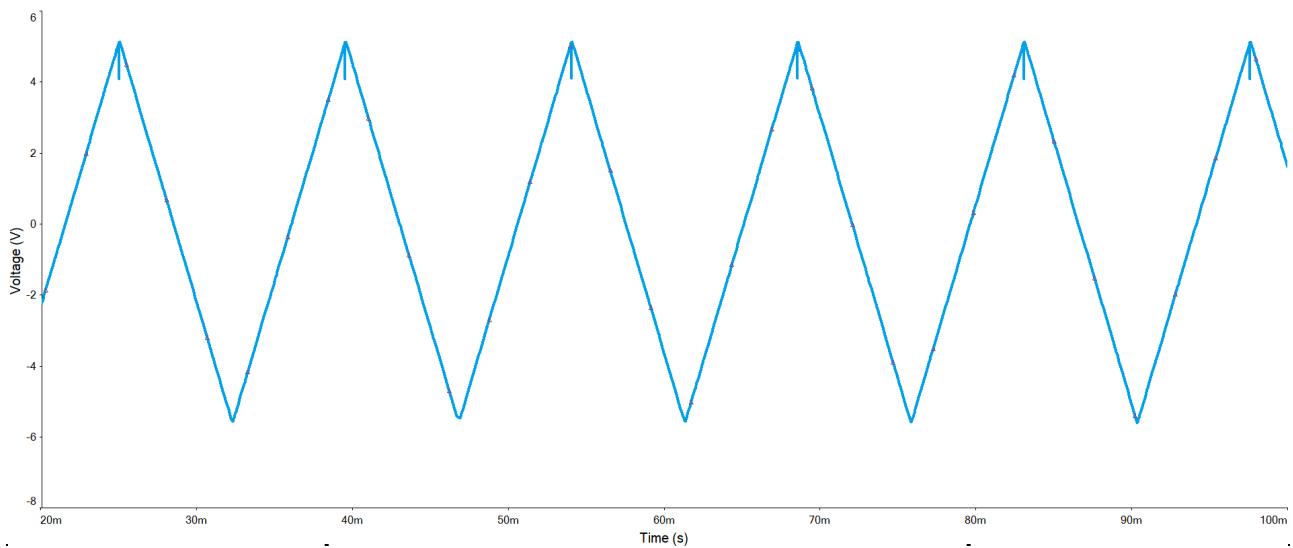


Figura 2.13 Forma de undă triunghiulară generată conform simulărilor

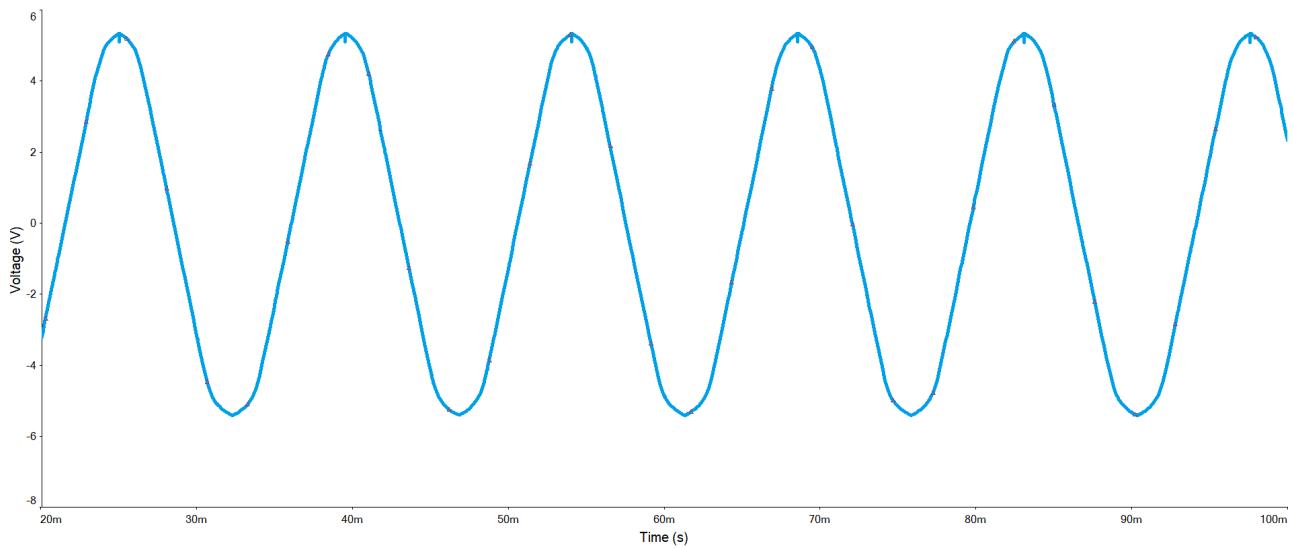


Figura 2.12 Forma de undă sinusoidală generată conform simulărilor

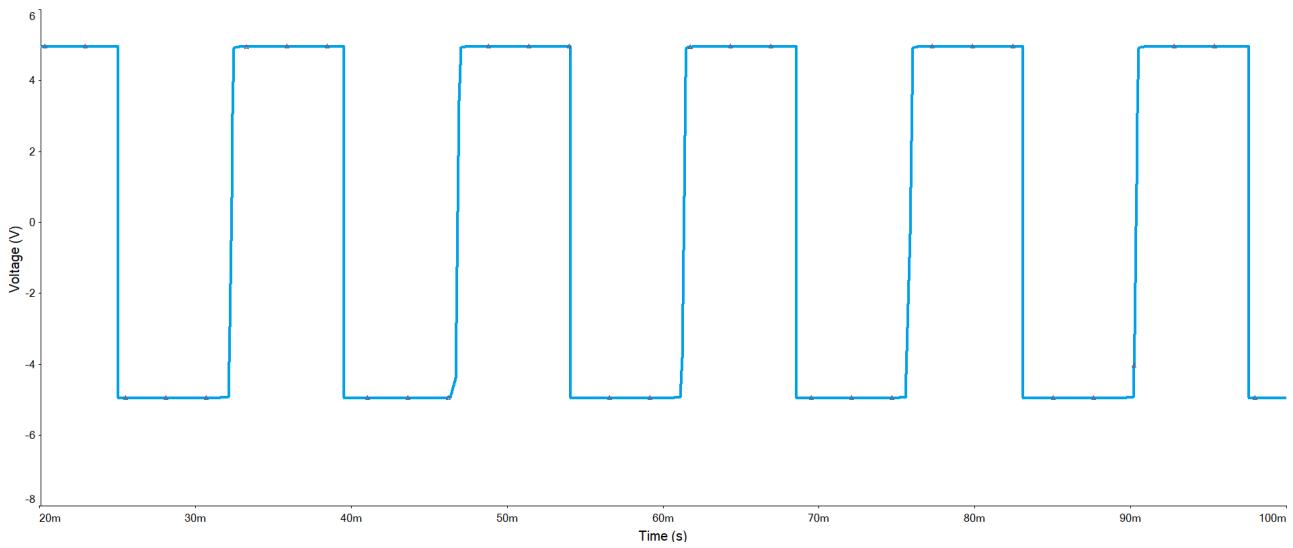


Figura 2.11 Forma de undă dreptunghiulară generată conform simulărilor

2.3. Filtru controlat în tensiune

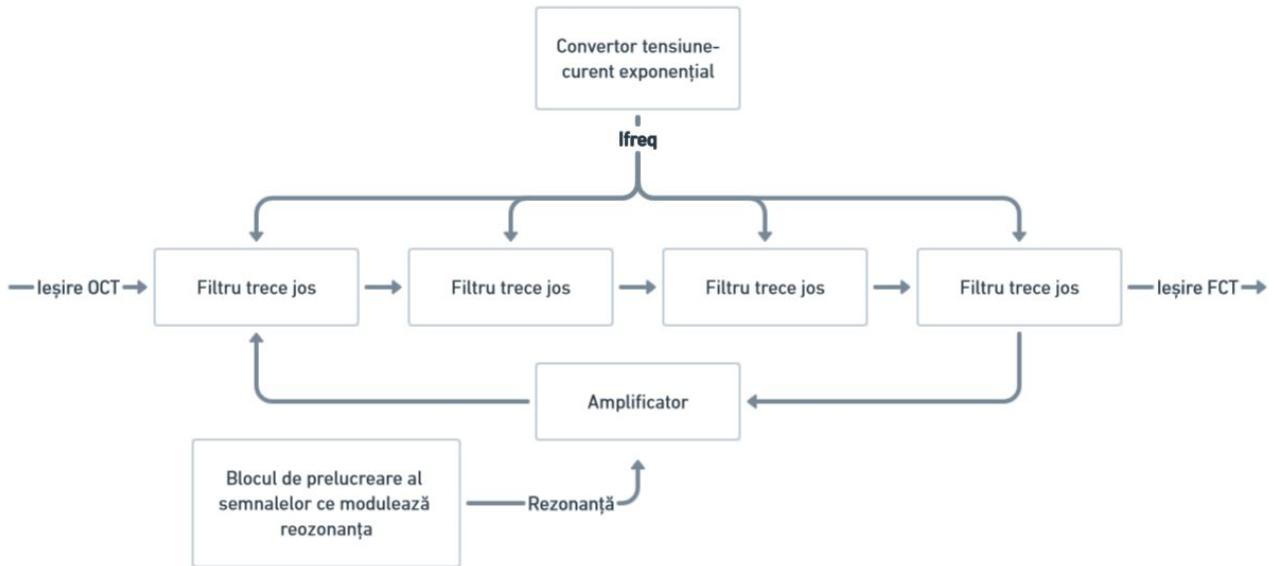


Figura 2.14 Diagrama bloc a filtrului controlat în tensiune

Filtrul controlat în tensiune este un circuit electronic care permite ajustarea dinamică a frecvenței de tăiere prin aplicarea unei tensiuni de control. FCT-urile sunt esențiale în sintetizatoarele audio analogice pentru modelarea și modificarea spectrului frecvenței semnalelor audio. Parametri principali ai unui OCF includ frecvența de tăiere și rezonanța, care pot fi modulate pentru a crea sunete dinamice și expresive.

FCT-ul implementat este un filtru trece-jos resonant, de ordinul patru. Când factorul de amplificare de pe bucla de reacție este egal cu unu atunci filtrul are un răspuns în frecvență de tip Butterworth, cu o frecvență de tăiere minima de 132 Hz și maximă de 20 KHz.

2.3.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al FCT-ului

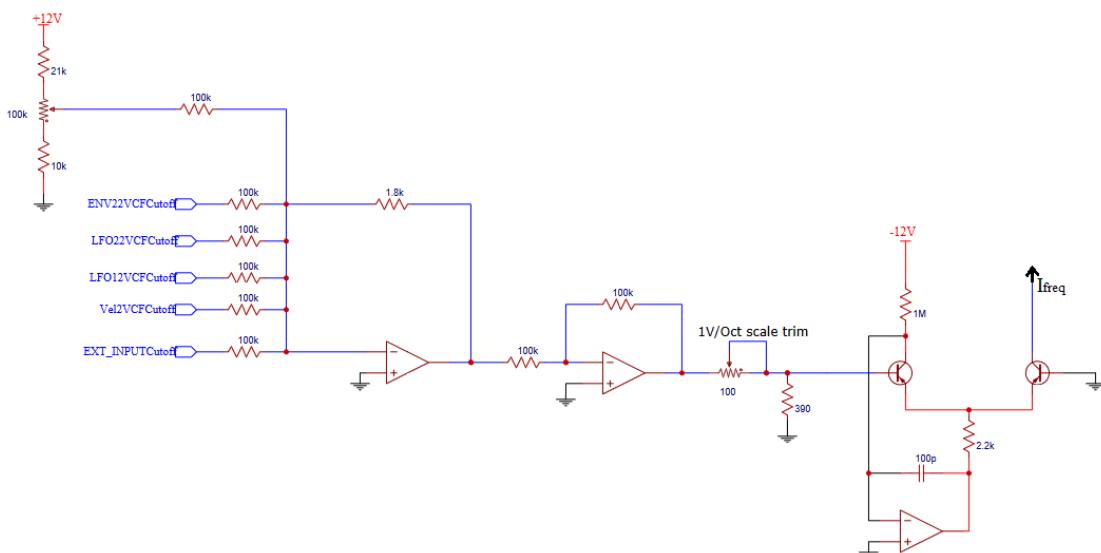


Figura 2.15 Schema electrică a convertorului implementat în FCT

În cadrul convertorului din filtrul controlat în tensiune nu este necesară utilizarea termistorului deoarece variațiile subtile ale frecvenței de tăiere nu sunt la fel de perceptibile ca în cazul oscillatorului 2.2.1. O particularitate a acestui convertor este că folosește tranzistoare bipolare PNP pentru a acomoda metoda de implementare a controlului în tensiune din cadrul filtrului, ceea ce rezultă că tensiunea din baza tranzistorului trebuie să fie pozitivă.

2.3.2. Blocul filtru trece-jos

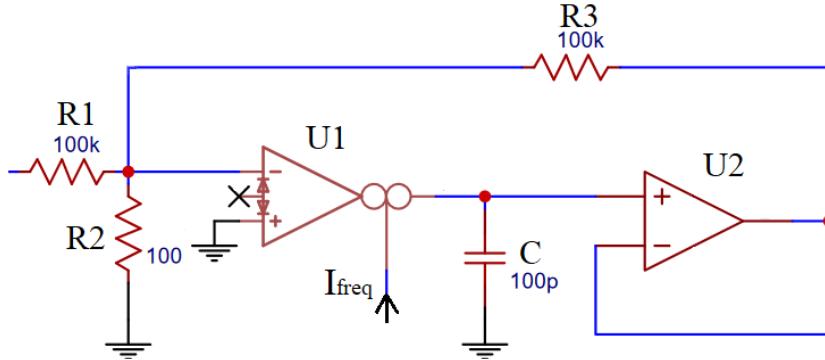


Figura 2.16 Schema electrică a blocului FTJ

Pornind de la topologia unui FTJ pasiv de tip RC putem implementa controlul în tensiune prin utilizarea unui amplificator operational transconductanță în configurația de resistor controlat în curent, această structură fiind cascadată de patru ori.

Aaron Lanterman explică modul de utilizare a unui AOT ca un rezistor variabil în curent în modul următor: “Un mod de a privi rolul unui rezistor într-un circuit este că acesta generează un curent pe baza rezistenței privind diferența de tensiune dintre terminalele sale. Astfel putem folosi un AOT în locul rezistorului deoarece acesta are ieșirea în curent și putem folosi intrarea sa diferențială pentru a privi diferența de tensiune” [1]. Prin modificarea curentului de control se modifică parametrul transconductanță g_m al AOT-ului.

Astfel putem scrie următoarea relație legată de frecvența de tăiere a filtrului:

$$f_C = \frac{g_m}{2\pi C} = \frac{19.2 \cdot I_{freq}}{2\pi C} [\text{Hz}] \quad (2.13)$$

AO-ul U2 are rolul de a repeta tensiunea astfel încât U1 sau etajele următoare să nu tragă curent din condensatorul C, fapt ce ar modifica frecvența de tăiere într-un mod nedorit.

Deoarece diferența de tensiune dintre intrările AOT-urilor nu ar trebui să depășească câteva zeci de mV [7], este nevoie să folosim un divizor rezistiv la intrarea acestuia. Pentru terminalul ce privește tensiunea de la intrare divizorul este format din R1 și R2, iar pentru terminalul ce privește tensiunea de la ieșire divizorul este format din R3 și R2 în paralel cu R1, dar deoarece $R_1, R_3 \gg R_2$ putem spune că R2 în paralel cu R1 este aproximativ egal cu R2. Notăm rezistoarele de valoare mare cu R_M și pe cele cu valoare mică R_m , astfel putem rescrie formula (2.13).

$$f_C = \frac{\left[\frac{R_m}{R_M + R_m} \right] \cdot g_m}{2\pi C} \approx \frac{\left[\frac{R_m}{R_M} \right] \cdot g_m}{2\pi C} [\text{Hz}] \quad (2.14)$$

Deoarece la intrarea filtrului atenuăm semnalul pentru funcționarea corectă a AOT-urilor [7], la ieșirea lui semnalul este amplificat înapoi la nivelul de 10 Vpp.

2.3.3. Blocul amplificator și blocul ce prelucrează semnalele ce modulează rezonanța

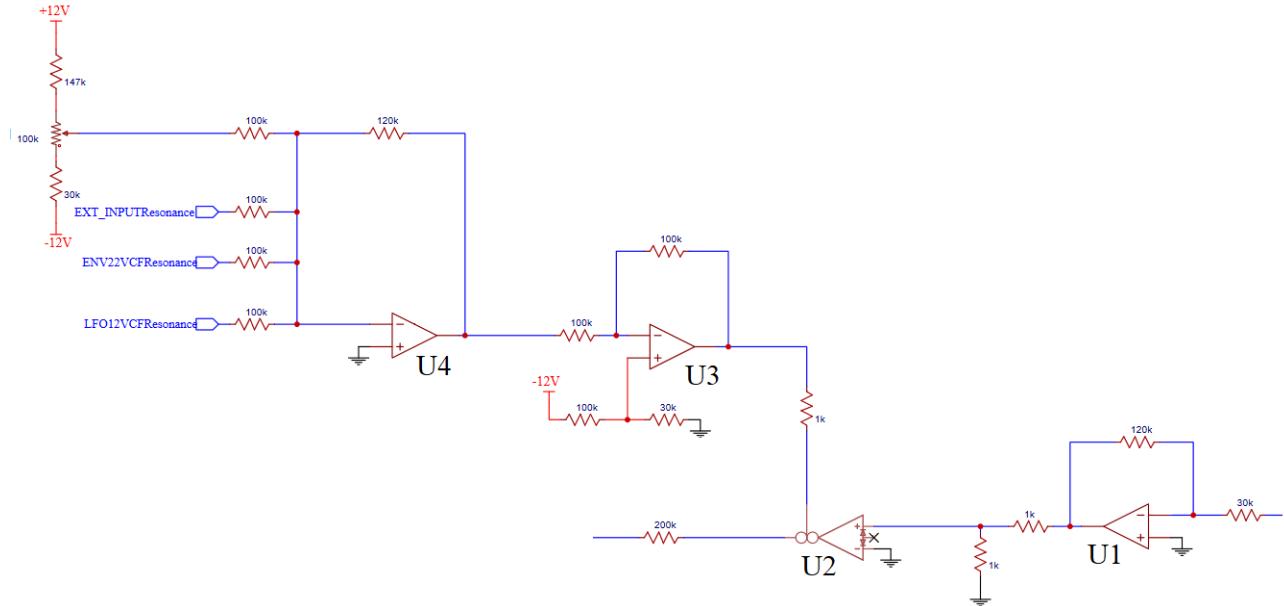


Figura 2.17 Schema electrică a blocului amplificator și a blocului de control al rezonanței

Controlul rezonanței se face prin bucla de reacție și prin modificarea factorului de amplificare a acesteia. AO-ul U1 și componentele pasive asociate atenuază semnalul de ieșire al filtrului la nivelul necesar pentru intrarea AOT-ului U2. Acesta este amplificatorul de pe bucla de reacție iar prin modificarea curentului său de control modificăm factorul de amplificare. AO-urile U3 și U4 au rolul de a genera curentul de control necesar pentru AOT-ul U2, pe baza semnalelor de control, iar acesta nu trebuie să depășească 2 mA [7]. Blocul amplificator este capabil să genereze un factor de amplificare k egal cu 5.

Sonda de tensiune PR4 este aflată la ieșirea ultimului bloc FTJ și putem observa că măsoară o tensiune de 3.9 Vpp. Sonda PR9 se află la ieșirea blocului amplificator și măsoară o tensiune de 22.7 Vpp. Prin împărțirea celor două valori obținem valoarea factorului de amplificare $k = \frac{22.7}{3.9} = 5.82$

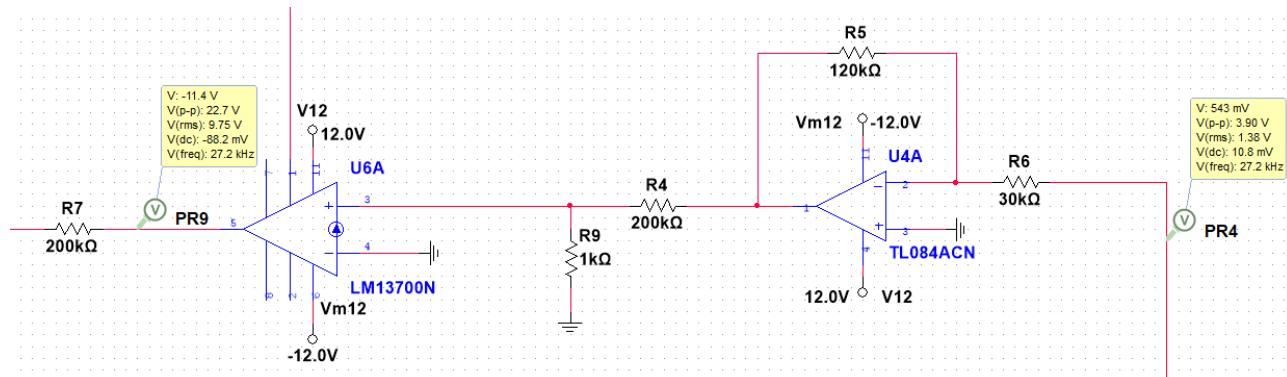


Figura 2.18 Simularea blocului amplificator cu tensiunea maximă de control a rezonanței

2.3.4. Analiza ca sistem a filtrului controlat în tensiune

Aaron Lanterman realizează și descrie analiza ca sistem a filtrului controlat în tensiunea [1]:

Funcția de transfer a unui FTJ, cum ar fi cel prezentat în 2.3.2, pe baza căreia putem să îi calculăm valoarea la frecvența de tăiere, este următoarea:

$$H_1(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (2.15)$$

$$H_1(j\omega) = \frac{\omega_c}{j\omega + \omega_c} \Rightarrow H_1(j\omega_c) = \frac{\omega_c}{j\omega_c + \omega_c} = \frac{1}{j+1} = \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{\pi}{4}}$$

Astfel funcția de transfer pentru un filtru de ordinul patru este:

$$H_4(s) = \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right)^4 \Rightarrow H_4(j\omega_c) = \left(\frac{\omega_c}{\omega_c + \omega_c} \right)^4 = \frac{1}{4} e^{-j\pi} = -\frac{1}{4} \quad (2.16)$$

Pe baza acestei relații putem deduce că semnalul de intrare este defazat cu 180° la frecvența de tăiere, astfel prin folosirea a patru filtre cascade și a unei bucle de reacție negativă, la frecvența de tăiere vom obține reacție pozitivă ce rezultă într-un vârf în răspunsul în frecvență. Prin modificarea factorului de amplificare k de pe bucla de reacție putem controla câtă reacție pozitivă o să avem. Aceasta este metoda prin care obținem caracterul rezonant al filtrului.

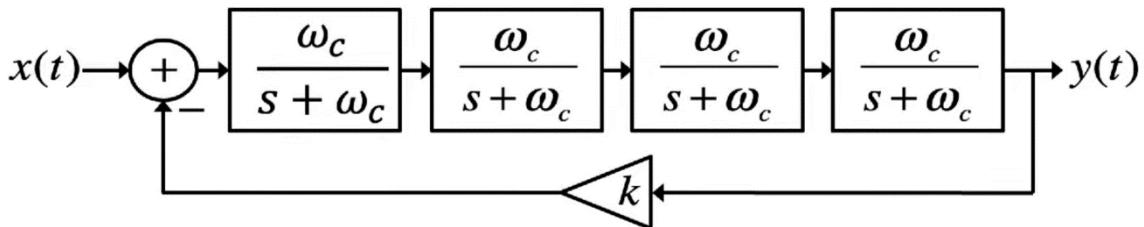


Figura 2.19 Diagrama sistem a filtrului controlat în tensiune [1]

Putem scrie funcția de transfer a filtrului în buclă închisă:

$$H_{4F}(s) = \frac{H_4(s)}{1 + kH_4(s)} = \frac{\left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right)^4}{1 + k \left(\frac{\omega_c}{s + \omega_c} \right)^4} = \frac{\omega_c^4}{(s + \omega_c)^4 + k\omega_c^4} \quad (2.17)$$

Pentru a afla polii acestei funcții de transfer trebuie ca $(s + \omega_c)^4 + k\omega_c^4 = 0$.

Dacă facem notația $s' = s + \omega_c$ relația anterioră devine $s'^4 = -k\omega_c^4$, de unde rezultă:

$$\Rightarrow s'^2 = j\sqrt{k\omega_c^2}, -j\sqrt{k\omega_c^2} = e^{j\frac{\pi}{2}}\sqrt{k\omega_c^2}, e^{-j\frac{\pi}{2}}\sqrt{k\omega_c^2}$$

$$\Rightarrow s' = e^{j\frac{\pi}{4}}\sqrt[4]{k\omega_c}, e^{-j\frac{\pi}{4}}\sqrt[4]{k\omega_c}, -e^{j\frac{\pi}{4}}\sqrt[4]{k\omega_c}, -e^{-j\frac{\pi}{4}}\sqrt[4]{k\omega_c}$$

$$\Rightarrow s' = e^{\frac{j\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c}, e^{-j\frac{\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c}, e^{-j\frac{3\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c}, e^{j\frac{3\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c}$$

$$\Rightarrow s = e^{\frac{j\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c}, e^{-j\frac{\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c}, e^{-j\frac{3\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c}, e^{j\frac{3\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c}$$

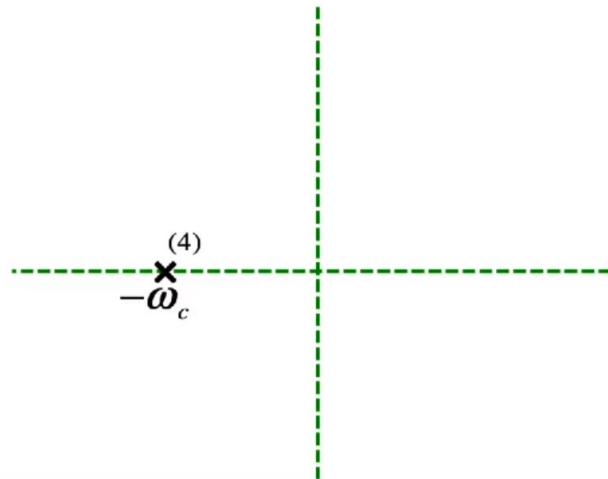


Figura 2.20 Planul s al funcției de transfer atunci când k este zero [1]

Pe măsură ce creștem k cei patru poli se vor îndepărta de originea ω_c până când doi dintre cei patru poli vor atinge axa imaginară.

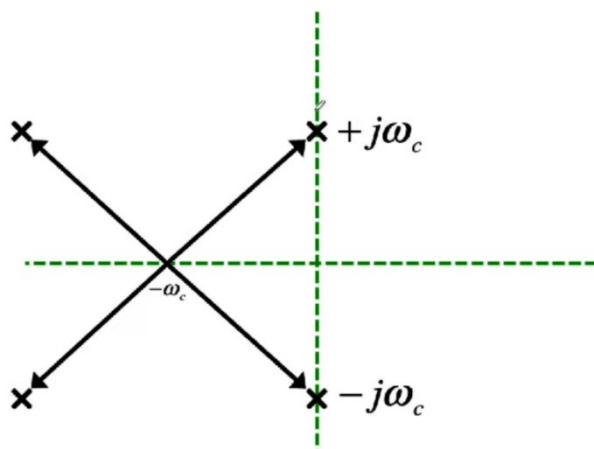


Figura 2.21 Planul s al funcției de transfer atunci când polii ating axa imaginară [1]

Când acest fenomen are loc sistemul devine instabil și începe să oscileze. Interesul nostru este să determinăm valoarea lui k la care acest fapt are loc. Pentru a determina această valoare trebuie să pornim de la relația polului pozitiv ce atinge axa imaginară și să egalăm cu zero partea sa reală.

$$s = e^{\frac{j\pi}{4}\sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}}j \right) \sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c$$

$$0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt[4]{k}\omega_c - \omega_c \Rightarrow \sqrt{2} = \sqrt[4]{k} \Rightarrow k = 4, s = +j\omega_c$$

Astfel am dedus că pentru un k egal cu patru sistemul începe să oscileze. Această informație a fost luată în considerare la dimensionarea blocului amplificator și a blocului de control al acestuia 2.3.3 din cadrul FCT-ului realizat, scopul fiind de a avea prezent acest fenomen deoarece redă un sunet caracteristic utilizat des în muzica electronică.

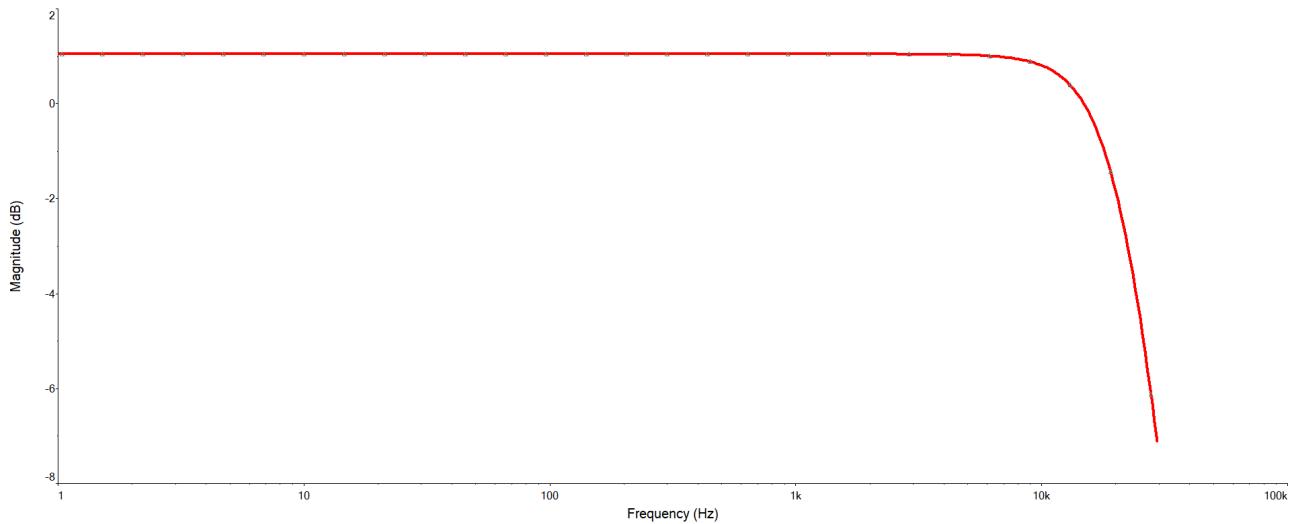


Figura 2.22 Răspunsul în frecvență al filtrului complet deschis și k egal cu unu, conform simulărilor

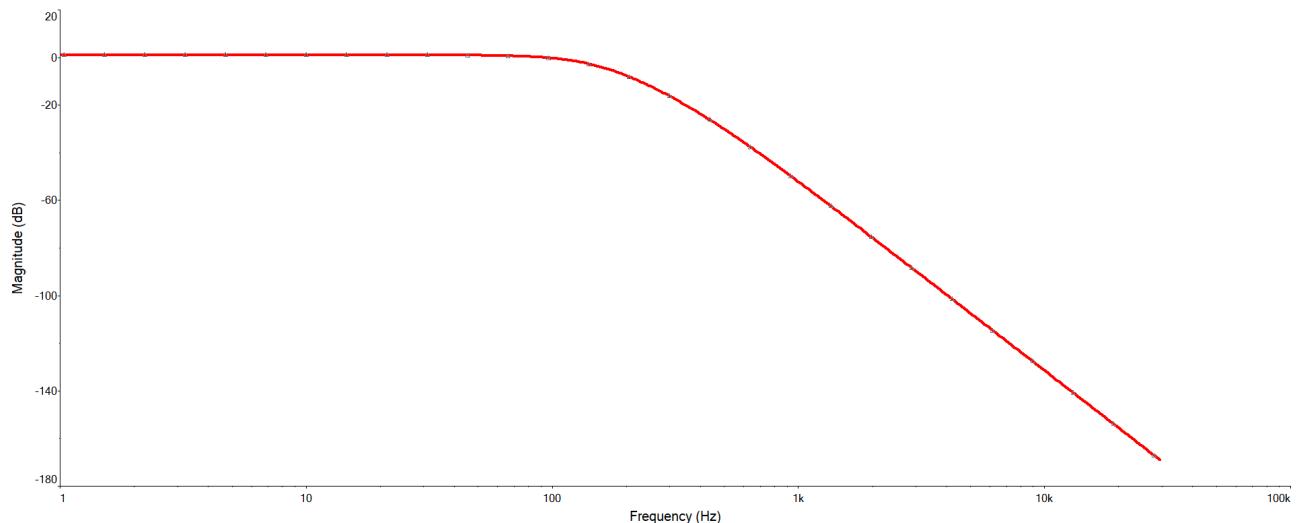


Figura 2.23 Răspunsul în frecvență al filtrului complet închis și k egal cu unu, conform simulărilor

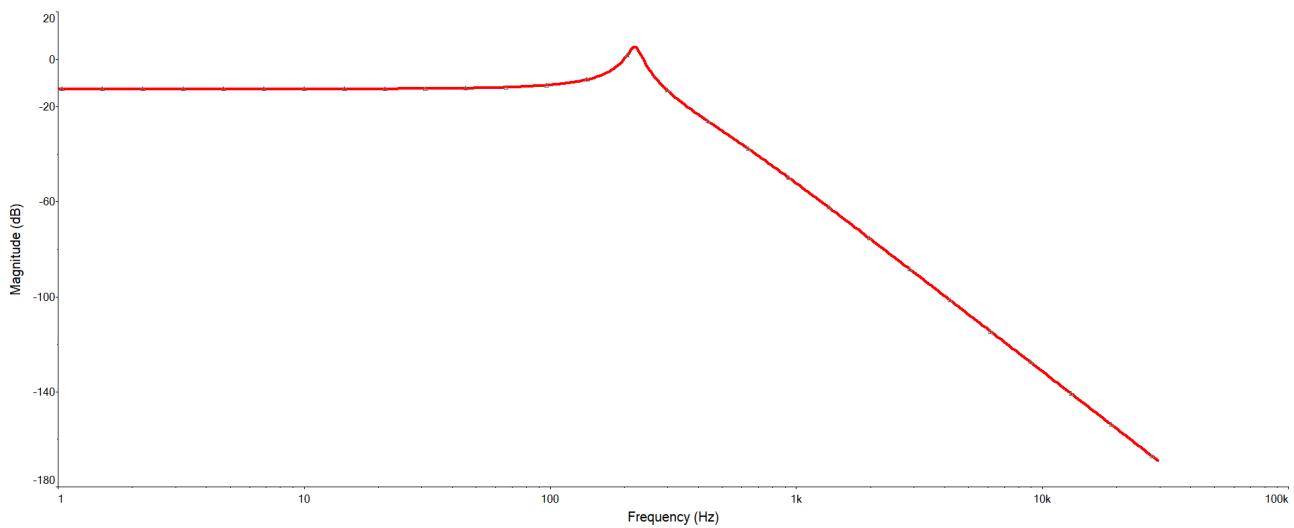


Figura 2.25 Răspunsul în frecvență al filtrului complet închis și k egal cu cinci, conform simulărilor

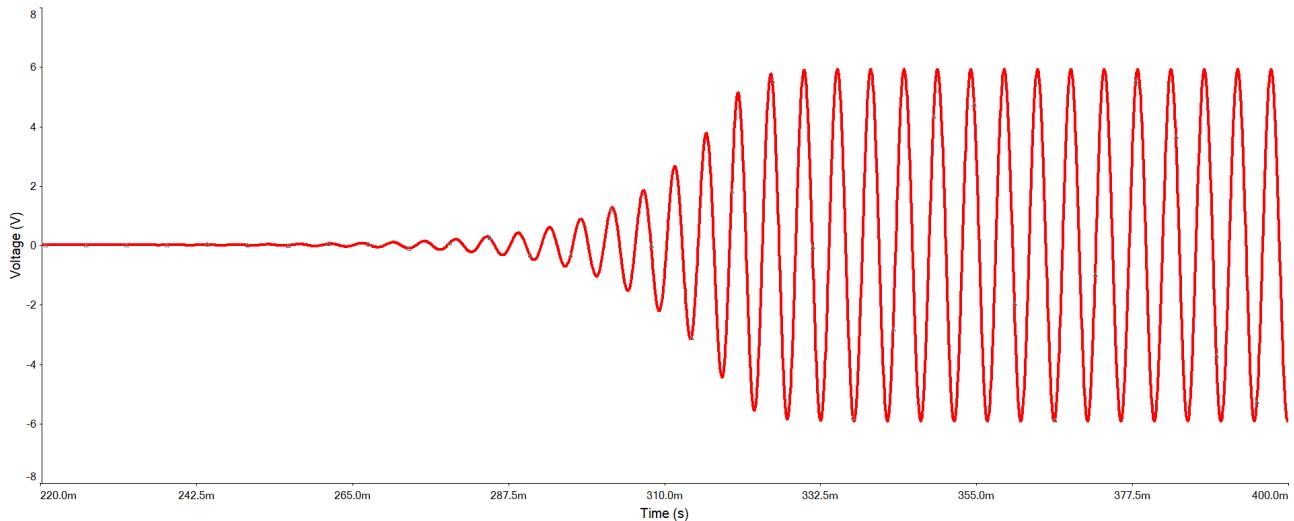


Figura 2.24 Forma de undă generată de filtru când k este egal cu cinci, fără semnal de intrare, conform simulărilor

2.4. Amplificator controlat în tensiune

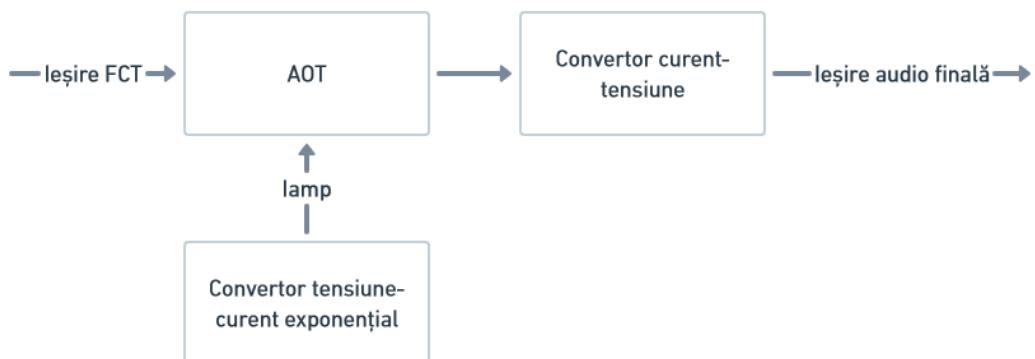


Figura 2.26 Diagrama bloc a amplificatorului controlat în tensiune

Amplificatorul controlat în tensiune este un circuit electronic care ajustează amplitudinea unui semnal de intrare în funcție de o tensiune de control aplicată. ACT-urile sunt componente esențiale în sintetizatoarele audio analogice, permitând controlul precis asupra volumului și dinamica sunetului până la nivele imperceptibile. Amplificatorul implementat are rolul și de a amplifica semnalul audio final, astfel sintetizatorul poate fi folosit cu diferite tipuri de difuzoare cu o putere a semnalului suficientă.

2.4.1. Blocul convertor tensiune-curent exponențial al ACT-ului

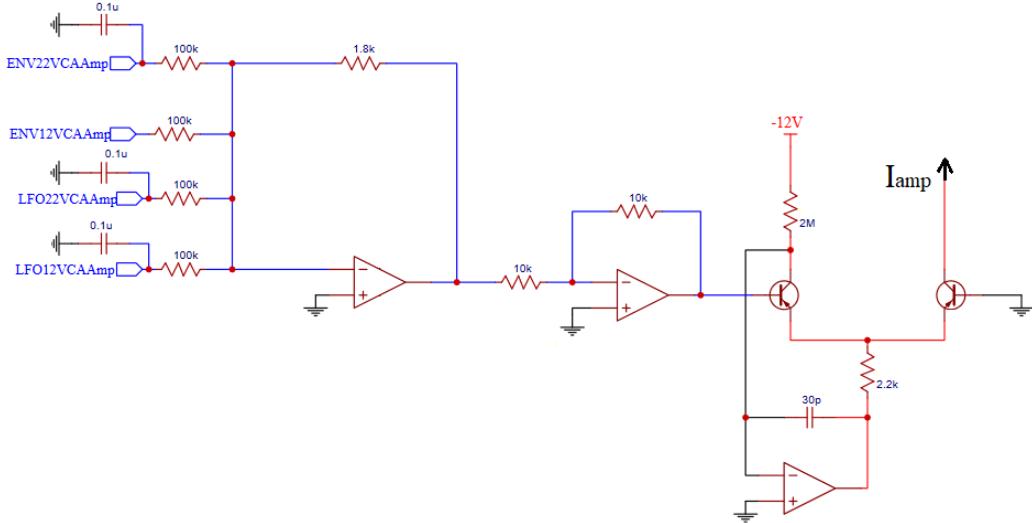


Figura 2.27 Schema electrică a convertorului implementat în ACT

Asemănător convertorului din cadrul FCT-ului 2.3.1 nu este necesară utilizarea termistorului deoarece variațiile subtile ale amplitudinii nu sunt la fel de perceptibile ca în cazul oscillatorului 2.2.1. Ca și în 2.3.1, acest convertor folosește tranzistoare bipolare PNP pentru a acomoda metoda de implementare a controlului în tensiune din cadrul amplificatorului, de asemenea nu este necesară calibrarea standardului 1V/Octavă.

2.4.2. Blocurile AOT și convertor curent-tensiune

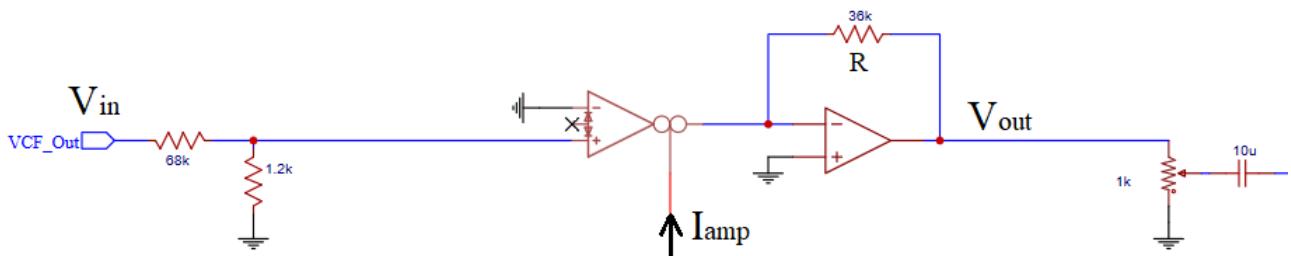


Figura 2.28 Schema electrică a amplificatorului

Amplificatorul operational transconductanță este blocul ce controlează direct amplitudinea semnalului. Controlul parametrului transconductanță se face prin curentul I_{amp} generat de convertor. Deoarece ieșirea AOT-ului este un curent, folosim un convertor curent-tensiune

implementat printr-un AO și rezistorul R. Pe baza relației dintre intrarea și ieșirea AOT-ului [7] și a convertorului curent-tensiune [8] putem scrie următoarea relație:

$$V_{out} = -R \cdot \frac{1}{2V_T} \cdot I_{amp} \cdot V_{in}[V] \quad (2.18)$$

Faptul că inversăm forma de undă nu reprezintă o problemă deoarece urechea umană nu percep diferența dintre o formă de undă și inversul acesteia.

În final reglajul volumului se face de utilizator printr-un potențiometru dimensionat astfel încât să ofere sintetizatorului o impedanță de ieșire adecvată iar semnalul audio este decuplat în curent continuu în cazul în care s-au acumulat astfel de componente în cadrul circuitelor.

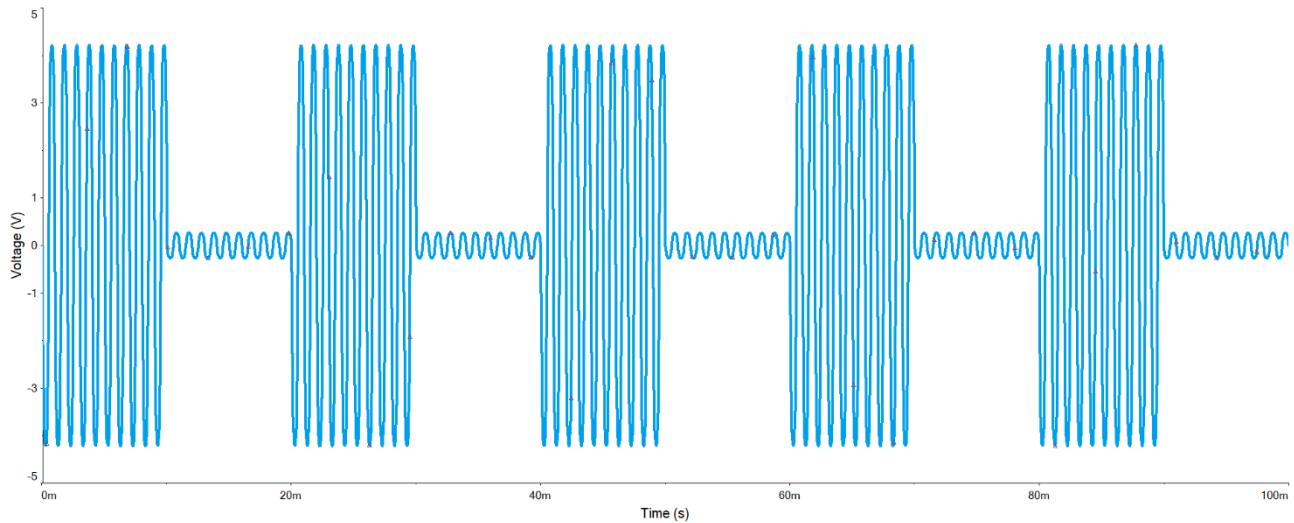


Figura 2.29 Semnal prelucrat de ACT, conform simulărilor

2.5. Sursa de alimentare

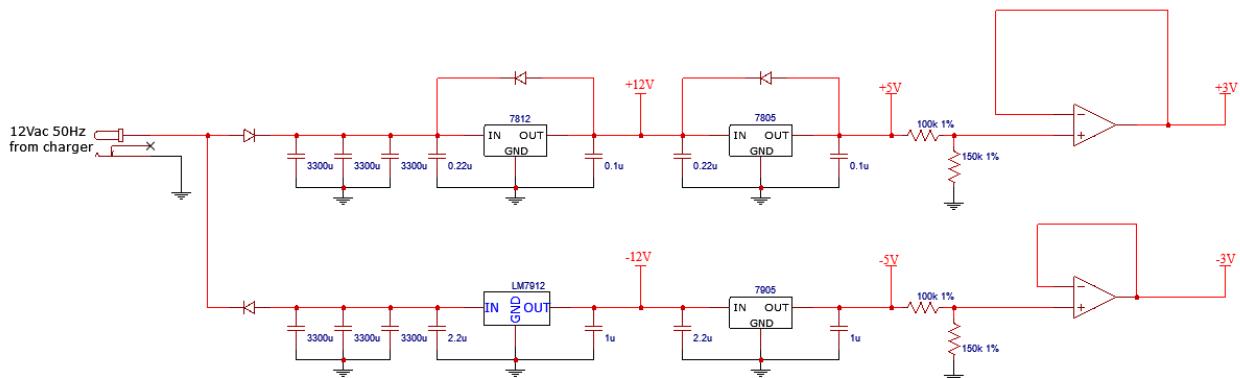


Figura 2.30 Schema electrică a sursei de alimentare

Pentru alimentarea sintetizatorului am ales să folosesc un alimentator AC-AC de 12 V și 800 mA. Pe baza simulărilor și a fișelor tehnice a componentelor și circuitelor integrate folosite în

sintetizator am dedus că acesta ar trebui să consume maxim în jur de 500 mA, majoritatea curentului fiind consumat de circuitele digitale. Deoarece tensiunea de alimentare este alternativă aceasta trebuie convertită în tensiune continuă pentru a alimenta blocurile sintetizatorului.

Pornind de la tensiunea generată de încărcător, în partea de sus a schemei tensiunea este redresată pe alternația pozitivă iar în partea de jos pe cea negativă prin diodele respective. Ulterior tensiunile sunt filtrate prin bancuri de condensatoare, fiecare banc având o capacitate totală de 9.9 mF. După filtrare tensiunile sunt stabilizate la nivelele de +12 V, 5 V și -12 V, -5 V prin utilizarea unor circuite integrate stabilizatoare de tensiune cu componentele asociate conform [9], [10]. Deoarece tensiunile de +3 V și -3 V sunt folosite cel mai puțin în cadrul sintetizatorului am ales să le generez folosind divizoare rezistive iar apoi aceste tensiuni sunt repeteate folosind un AO.

Circuitele integrate din blocurile analogice sunt alimentate la +12 V și -12V, iar cele din blocurile digitale la +5 V. Tensiunile de +3 V și – 3V, împreună cu +5V și -5V sunt folosite pentru a limita anumite semnale sau pentru a genera alte tensiuni locale necesare pentru translatarea nivelor anumitor semnale.

Capitolul 3. Proiectarea blocurilor de control digital al sintetizatorului audio

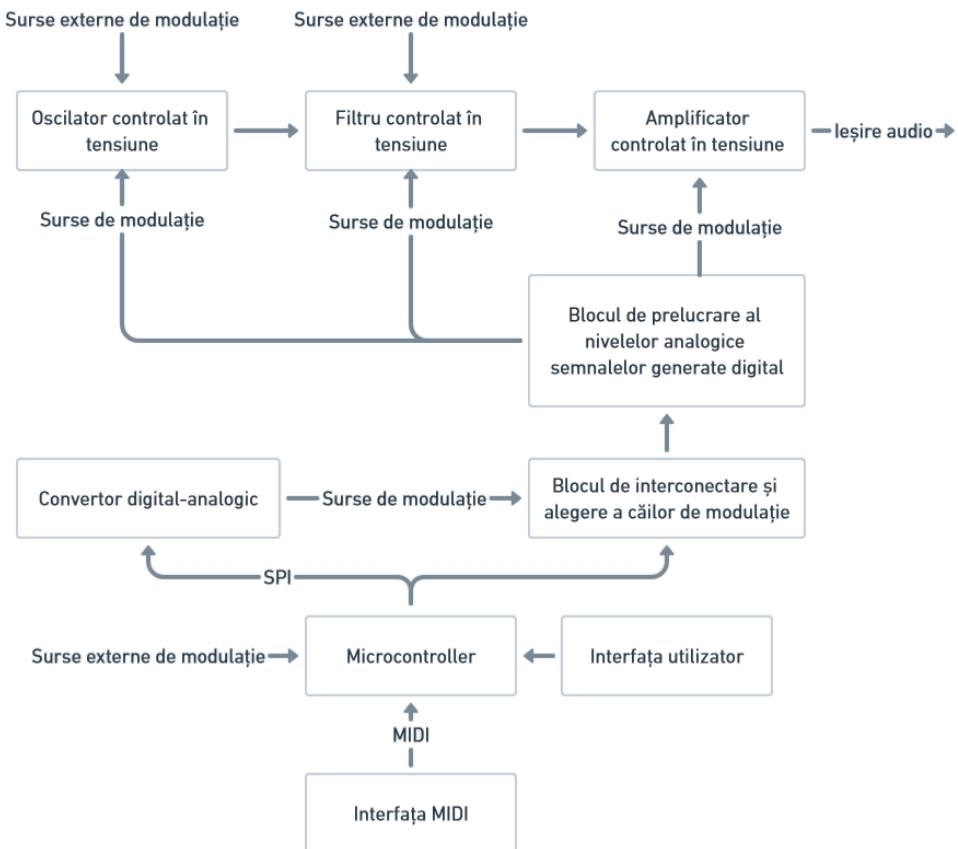


Figura 3.2.1 Diagrama bloc a sintetizatorului audio analogic controlat digital

Controlul digital este esențial în proiectarea sintetizatoarelor moderne, oferind numeroase avantaje în generarea și modularea sunetelor. În cazul sintetizatorului dezvoltat, controlul digital are rolul de a genera sursele de modulație și de a gestiona modul în care aceste surse influențează blocurile analogice. Controlul digital facilitează o gamă largă de variații sonore și permite ajustări precise ale parametrilor audio.

Un alt avantaj major al controlului digital este posibilitatea de integrare MIDI. MIDI este un protocol standardizat care transmite informații despre note, sincronizare și alte metode de control între diferite dispozitive muzicale. Având în vedere că sintetizatorul dezvoltat nu dispune de clape sau secvențiere internă, folosirea protocolului MIDI este necesară pentru utilizarea sintetizatorului. Astfel MIDI permite controlul sintetizatorului, facilitând performanțele live și producția muzicală.

În plus, controlul digital îmbunătățește considerabil interfața utilizator, oferind o experiență intuitivă și mai flexibilă utilizatorului. Prin intermediul acestei interfețe, utilizatorii pot accesa și modifica rapid parametrii sintetizatorului, personalizându-și astfel sunetele în funcție de nevoi.

3.1. Microcontroller

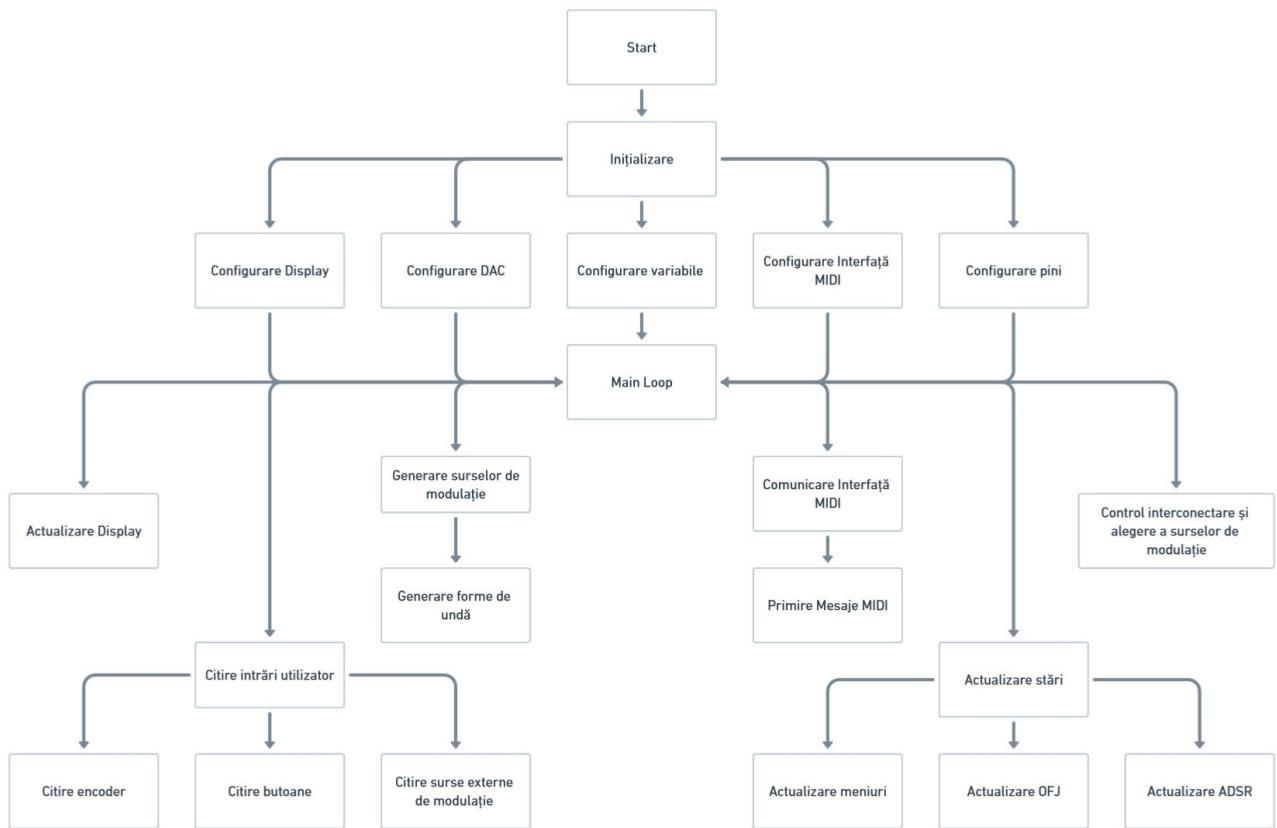


Figura 3.2 Diagrama software a sintetizatorului audio controlat digital

Pentru implementarea controlului digital am ales să folosesc o placă de dezvoltare Raspberry Pi Pico pe care am programat-o în mediul de dezvoltare Arduino IDE în limbajele C/C++. Arduino IDE este un software open-source pentru scrierea, compilarea și încărcarea codului pe plăcile de dezvoltare compatibile Arduino. Aceasta oferă o interfață simplă pentru programare și include numeroase exemple și librării pentru a facilita dezvoltarea proiectelor electronice.

Librăriile pe care le-am folosit sunt MIDI.h [11] și SoftwareSerial.h pentru decodificarea mesajelor MIDI, SPI.h pentru comunicarea cu convertoarele digital-analogice, ADSR.h [12] și LFO.h [13] pentru generarea formelor de undă ce corespund generatorului de envelope și oscilatorului de frecvență joasă și Wire.h împreună cu U8g2lib.h [14] pentru programarea display-ului din interfață utilizator.

Convertorul digital-analogic utilizat este MCP4822 ce funcționează pe doisprezece biți și dispune de două canale. Acesta comunică cu microcontroller-ul prin protocolul SPI și poate genera tensiuni până la 4 V. Configurarea DAC-urilor a fost realizată urmând fișa lor tehnică. [15]

3.2. MIDI

MIDI (Interfața Digitală pentru Instrumente Muzicale) este un standard de comunicație care leagă diferite entități implicate în generarea, stocarea și interpretarea performanțelor muzicale. Acesta permite instrumentelor muzicale electronice și computerelor să comunice între ele prin intermediul unui limbaj comun și a unui protocol standardizat.

MIDI se bazează pe o interfață fizică și electrică standard, utilizând conectori de tip DIN cu 5 pini pentru transmiterea mesajelor. Transmisia datelor se face asincron la o rată de 31,25 kilobauds, folosind o buclă de curent unipolar de 5 mA. Mesajele MIDI sunt structurate în tipuri precum mesaje de note, schimbări de program și mesaje de control, care coordonează diferite aspecte ale performanței muzicale, cum ar fi volumul și utilizarea pedalei de susținere. Un controller MIDI poate fi o claviatură muzicală sau un secvențiator MIDI, care trimite fluxuri automate de instrucțiuni pentru interpretarea muzicii.

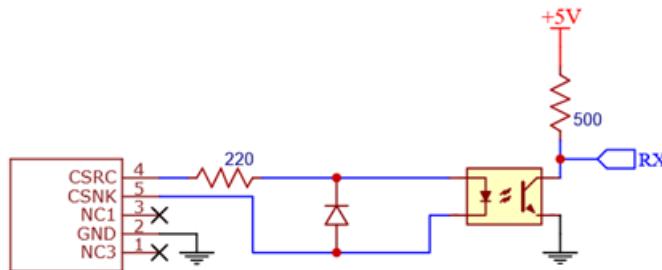


Figura 3.3 Schema electrică a interfeței MIDI

Într-o singură linie de comunicație MIDI există șaisprezece canale disponibile. Sintetizatorul dezvoltat este programat să primească mesajele trimise doar pe primul canal, această limitare este datorată modului de implementare a decodificării mesajelor MIDI utilizând librăria MIDI.h [11], deoarece selecția canalului se face în funcția setup.

Byte de Status	Byte de Date	Descriere
0x80	0kkkkkkk 0vvvvvv	Eveniment Note Off. Acest mesaj este trimis când o notă este eliberată. (kkkkkkkk) este numărul notei și (vvvvvvv) este velocity.
0x90	0kkkkkkk 0vvvvvv	Eveniment Note On. Acest mesaj este trimis când o notă este apăsată. (kkkkkkkk) este numărul notei și (vvvvvvv) este velocity.
0xF8	-	Ceas de Timp (Timing Clock). Trimis de 24 de ori pe sfert de notă atunci când este necesară sincronizarea.

Tabelul 3.1 Mesajele MIDI de interes [15]

Pe baza mesajului Note On generăm tensiunea de control a oscilatorului, ce respectă standardul de 1 V/Oct, și determină frecvența la care acesta va oscila și implicit nota muzicală corespunzătoare, iar nivelul de amplitudine al sunetului final este determinat de parametrul velocity, ce reprezintă intensitatea cu care a fost apăsată clapa. La primirea mesajului Note Off amplificatorul controlat în tensiune 2.4. va reduce nivelul semnalului audio până în punctul în care acesta nu va mai fi percepțut. Pentru generarea tensiunii de control a oscilatorului și a tensiunii determinate de velocity folosim un convertor digital-analogic. Mesajul de ceas este folosit în cazul oscilatoului de

frecvență joasă, acesta poate să oscileze la frecvențe calculate pe baza a diferite intervale de timp determinate de semnalul de ceas.

O particularitate a acestei implementări este că trebuie să deplasez notele muzicale citite prin MIDI cu o octavă în jos pentru a le citi corect. Pe baza semnalului de ceas calculez BPM-ul măsurând timpul necesar pentru a citi cele douăzeci și patru de mesaje de ceas.

```
if (MIDI.read()) {
    byte type = MIDI.getType();
    switch (type) {
        case midi::Clock:
            if (midiClockCount == 0) {
                startTime_midi = micros();
            }
            midiClockCount++;
            if (midiClockCount == 24) {
                elapsedTime = micros() - startTime_midi;
                float quarterNoteDuration = elapsedTime / 24.0;
                bpm = 60000000.0 / quarterNoteDuration / 25;
                midiClockCount = 0;
            }
            break;
        case midi::NoteOn:
            if (!noteOnReceived) {
                noteOnReceived = true;
                gateOpen = true;
                velocity = MIDI.getData2();
                env1_amp = velocity / 127.0;
                noteNumber = constrain(MIDI.getData1() - 0xC, 21, 93);
                noteNumber = 42 * (noteNumber - 21);
            }
            break;
        case midi::NoteOff:
            if (noteOnReceived) {
                noteOnReceived = false;
            }
            break;
        default:
            break;
    }
}
```

3.3. Generator de anvelope - ADSR

Generatorul de anvelope are rolul de a controla parametri dinamici ai sunetului, cum ar fi Attack, Decay, Sustain și Release (ADSR), de asemenea acesta poate fi folosit și pentru a modula diferiți parametri ai blocurilor analogice cu scopul de a genera sunete complexe.

Acesta a fost dezvoltat folosind librăria ADSR.h [12] ce este implementată folosind tabele de lookup, bazate pe ecuații cu diferențe finite. Librăria ne permite să declarăm și să instanțiem obiecte

de tip ADSR pe care le generăm folosind un convertor digital-analogic. De asemenea prin intermediul librăriei putem controla parametri anvelopelor și momentul de declanșare și de închetare a acestora.

Sintetizatorul analogic controlat digital dispune de două anvelope exponențiale a căror parametri pot fi modificați utilizând interfața utilizator. Prima anvelopă este conectată direct la ACT și declanșată la primirea mesajului MIDI Note On, pe unul din canalele DAC-ului, iar amplitudinea acestei anvelope este determinată direct de parametrul velocity. Cea de a doua anvelopă poate fi declanșată de diferite surse interne cât și externe și poate fi trimisă către diferiți parametri ai blocurilor analogice. Amplitudinea și parametri săi sunt controlate direct de utilizator, iar aceasta este generată pe celălalt canal al DAC-ului.

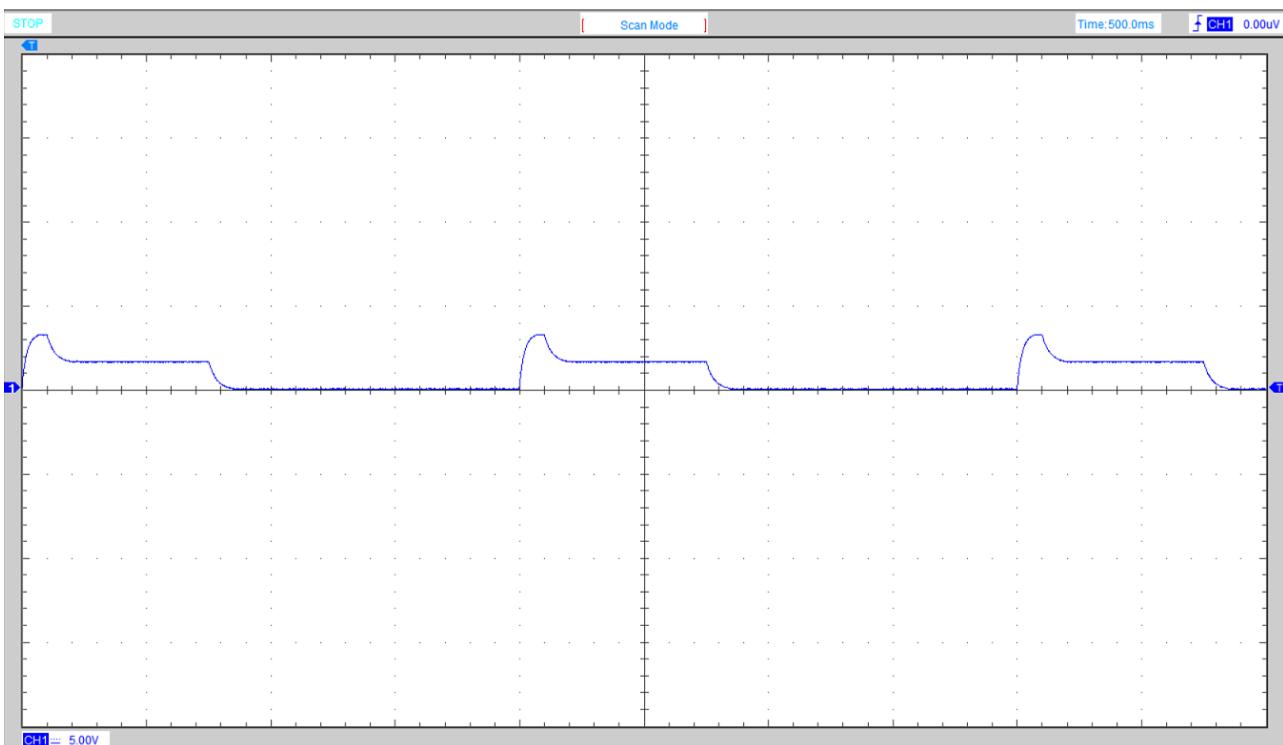


Figura 3.4 Exemplu de anvelopă generată de sintetizator, vizualizată pe osciloscop

3.4. Oscilator de frecvență joasă

Un oscillator de frecvență joasă generează semnale periodice cu frecvențe joase, de ordinul a câteva zeci de Hz sau mai puțin. Aceste semnale sunt utilizate pentru a modula diferiți parametri ai sunetului, cum ar fi frecvența, amplitudinea sau frecvența de tăiere, adăugând mișcare și complexitate sunetului.

Sintetizatorul dezvoltat dispune de două oscilatoare de frecvență joasă ce pot oscila cu frecvențe de la 1 Hz până la 200 Hz, fiecare generat pe căte un canal al DAC-ului. Acestea au fost dezvoltate folosind librăria LFO.h [13] ce folosește tabele de lookup pentru implementare. Librăria ne permite să declarăm și să instanțiem obiecte de tip OFJ, cărora le putem controla parametri

precum frecvența, amplitudinea, forma de undă, modul de funcționare și avem posibilitatea de a reseta fază OFJ-urilor.

Formele de undă disponibile sunt sinusoidală, triunghiulară, dinte de fierastrău și dreptunghiulară cu un factor de umplere de 50%. Fiecare OFJ are două moduri de funcționare: modul Free în care frecvența este selectată de utilizator și modul Locked în care frecvența este calculată pe baza anumitor intervale discrete 3.2. selectate de utilizator.

```
lfo1.setWaveForm(lfo1_waveformIndex);
lfo1.setAmpl(lfo1_amp);
if (!lfo1Mode) {
    lfo1.setMode(lfo1Mode);
    lfo1.setMode0Freq(lfo1_freq, micros());
} else {
    lfo1.setMode(lfo1Mode);
    lfo1.setMode1Bpm(bpm);
    lfo1.setMode1Rate(lfo1_rate);
}
```

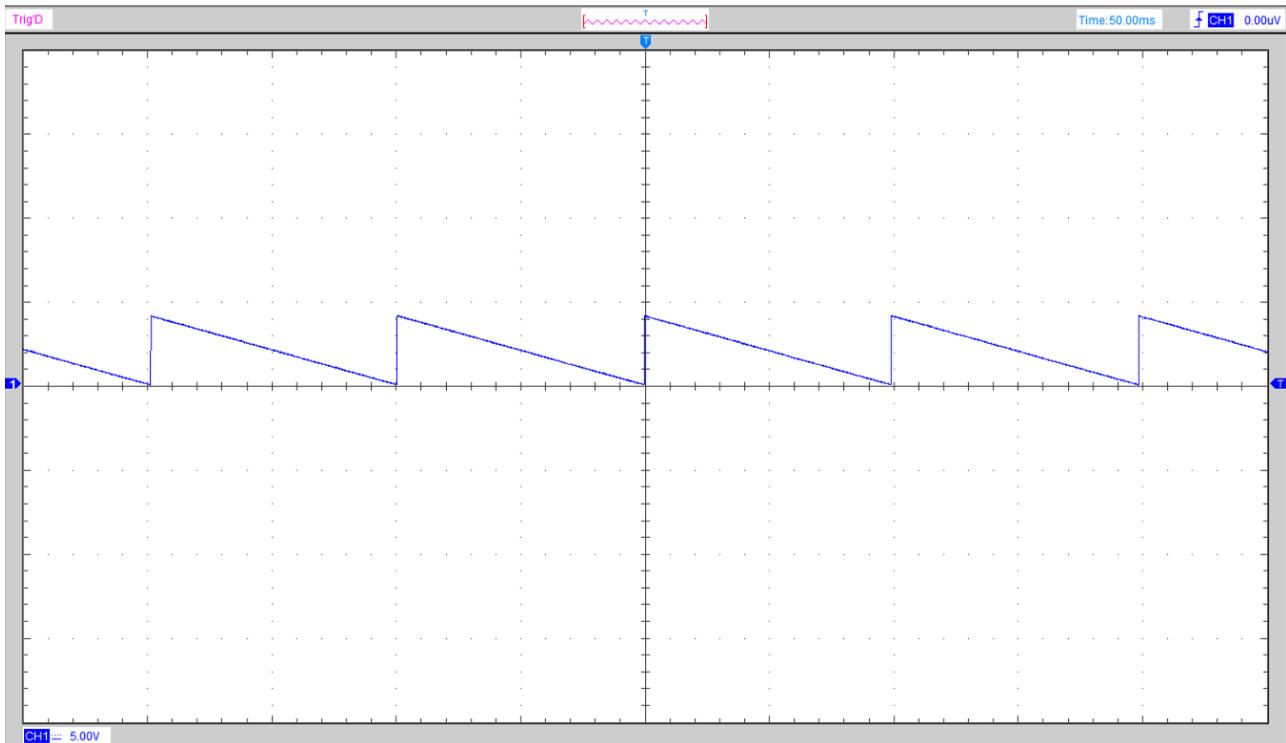


Figura 3.5 Exemplu de semnal de frecvență joasă generat de sintetizator, vizualizat pe osciloscop

3.5. Blocurile de interconectare și prelucrare a surselor și căilor de modulație

Blocurile de interconectare și prelucrare a căilor de modulație joacă un rol esențial în funcționarea sintetizatorului audio dezvoltat. Acestea permit surselor de modulație generate digital să controleze parametrii blocurilor analogice, facilitând astfel crearea și manipularea sunetului într-un mod precis și flexibil.

Sursele de modulație controlează diverse aspecte ale blocurilor analogice, precum frecvența OCT-ului, frecvența de tăiere a FCT-ului și amplitudinea semnalului audio prin ACT. Blocurile de interconectare și prelucrare a căilor de modulație asigură că aceste semnale de control sunt distribuite și procesate corect, pentru a obține efectele sonore dorite.

În dezvoltarea acestor blocuri, a trebuit să acord o atenție deosebită pentru a preveni ca zgomotul digital să afecteze calitatea sunetului, prin filtrarea semnalelor generate digital. Am dezvoltat acest sintetizator astfel încât să existe un număr considerabil de modalități de modulație, folosindu-mă de toate resursele microcontroller-ului, cu scopul de a oferi utilizatorului nenumărate moduri de a genera și personaliza sunete.

Sintetizatorul dezvoltat dispune de un număr total de 29 de căi de modulație, dintre care 22 sunt interne și generate de sintetizator iar restul de 7, 5 pentru blocurile analogice și 2 pentru blocurile digitale, sunt externe și pot proveni de la orice alt echipament. Dintre aceste 22 de căi de modulație 5 sunt implementate software și restul de 17 sunt implementate hardware.

	Ansamblul parametrilor ce pot fi modulați									
Sursa de modulație	Niciuna	Pitch	PWM	Sync	Cutoff	Res	Amp	ENV2 Trigger	OFJ1 Sync	OFJ2 Sync
ENV 2	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗	✗	✗
OFJ 1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
OFJ 2	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✗
Nota muzicală	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Velocity	✓	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✗	✓
Trigger	✓	✗	✗	✓	✗	✗	✗	✓	✓	✓
ENV2 EXT Trigger	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗
OFJ2 EXT Sync	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓

Tabelul 3.2 Totalitatea surselor și a căilor de modulație din sintetizatorul dezvoltat

Semnalul de Trigger este un impuls generat la primirea mesajului de Note On 3.2. și poate fi folosit pentru resetarea fazelor oscilatoarelor sau pentru declanșarea envelopelor, acesta este controlat direct de microcontroller. Envelopa 2 poate fi declanșată și de o sursă externă, la fel și pentru resetarea fazelor celui de al doilea oscillator de joasă frecvență.

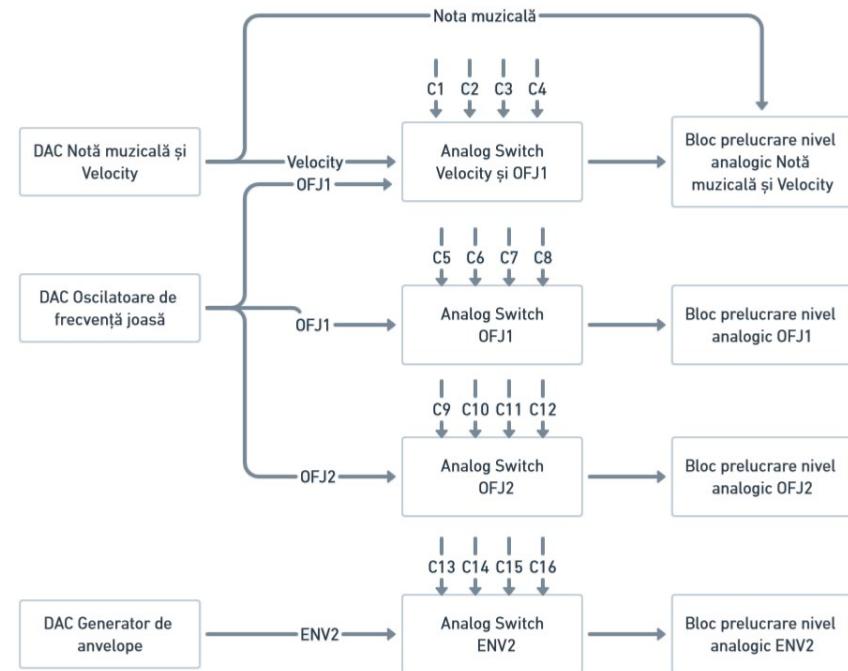


Figura 3.6 Blocurile de generare, interconectare și prelucrare a surselor de modulație hardware

Fiecare sursă de modulație este conectată fizic la toate blocurile analogice ce modifică parametrul dorit Tabel 2. Inițial toate aceste căi de modulație sunt închise iar atunci când utilizatorul dorește să moduleze un anumit parametru cu o anumită sursă de modulație, calea respectivă este deschisă. Modul de implementare al controlului acestor căi a fost realizat utilizând circuite integrate de tip Analog Switch [17] cu patru canale, care deschid canalul la nivelul logic 1.

Deoarece fiecare circuit ce controlează parametrii blocurilor analogice necesită anumite nivele de semnal pentru controlul corect și complet al acestora, fiecare sursă de modulație trebuie prelucrată și adusă la nivelele analogice necesare. Pe baza la vom exemplifica cum trebuie prelucrat fiecare semnal.

Sursa de modulație	Ansamblul parametrilor ce pot fi modulați					
	Pitch [-3,3] V	PWM [-5,5] V	Sync >3 V	Cutoff [0,8] V	Res [-8,0] V	Amp [0,4] V
ENV 2	FTS, x1.5	✗	✗	x2	x(-2)	x1
OFJ 1	FTS, x1.5	FTS, x2.5	x1	x2	x(-2)	x1
OFJ 2	FTS, x1.5	✗	x1	x2	✗	x1
Trigger	✗	✗	x1	✗	✗	✗
Velocity	x2 - 3	✗	✗	x2	✗	ENV1
Nota muzicală	x2 - 3	✗	✗	✗	✗	✗

Tabelul 3.3 Prelucrarea nivelelor surselor de modulație

3.5.1. Blocul de control al căilor de modulație

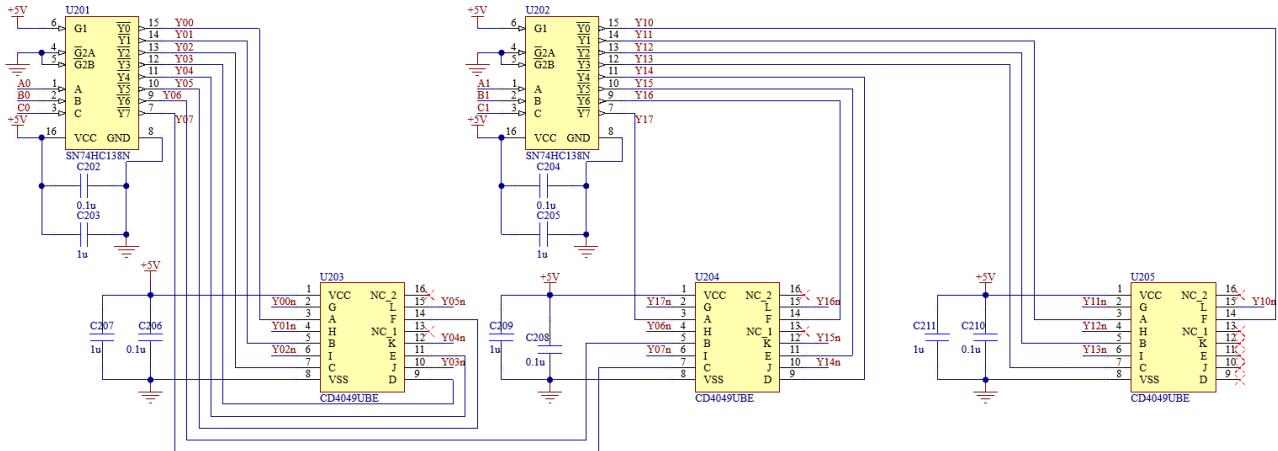


Figura 3.7 Schema electrică a blocului de control

Deoarece folosim patru circuite de tip Analog Switch ar fi fost nevoie să folosim un total de șaisprezece pini de uz general ai microcontroller-ului pentru a controla toate canalele, ceea ce nu era posibil de realizat. Astfel folosim circuite integrate Demultiplexor/Decodor 3-8 [18] ce ne permit să reducem numărul de pini folosiți la șase. Deoarece demultiplexoarele aduc linia selectată la nivelul logic 1 și pe restul 0 a trebuit să utilizez circuite integrate cu porti logice NOT [19] pentru a inversa liniile, astfel putem controla canalele Switch-urilor corect.

Următoarea secvență de cod gestionează căile de modulație ale anvelopei doi:

```

switch (env2_pathsIndex) {
    case 0:
        setVoltage(ENV_dac_cs, mcp4822_channel_a, 0);
        break;
    case 1:
        setVoltage(ENV_dac_cs, mcp4822_channel_a, env2.getWave(micros()) * env2_amp);
        digitalWrite(A_1, LOW);
        digitalWrite(B_1, LOW);
        digitalWrite(C_1, HIGH);
        break;
    case 2:
        setVoltage(ENV_dac_cs, mcp4822_channel_a, env2.getWave(micros()) * env2_amp);
        digitalWrite(A_1, HIGH);
        digitalWrite(B_1, LOW);
        digitalWrite(C_1, HIGH);
        break;
    case 3:
        setVoltage(ENV_dac_cs, mcp4822_channel_a, env2.getWave(micros()) * env2_amp);
        digitalWrite(A_1, LOW);
        digitalWrite(B_1, HIGH);
        digitalWrite(C_1, HIGH);
        break;
    case 4:

```

```

        setVoltage(ENV_dac_cs, mcp4822_channel_a, env2.getWave(micros()) * env2_amp);
        digitalWrite(A_1, HIGH);
        digitalWrite(B_1, HIGH);
        digitalWrite(C_1, HIGH);
        break;
    default:
        break;
}

```

3.6. Interfața utilizator

Interfața utilizator reprezintă contactele directe pe care îl are utilizatorul cu sintetizator, oferind mijloacele necesare pentru a controla și personaliza sunetele generate. O interfață bine proiectată nu doar facilitează accesul rapid și intuitiv la diverse funcții și setări, dar și îmbunătățește semnificativ experiența utilizatorului. Scopul este de a oferi utilizatorului o experiență cât mai plăcută și productivă, asigurând în același timp un control precis asupra tuturor parametrilor și funcțiilor sintetizatorului.

Controlul parametrilor blocurilor analogice se face direct prin setarea potențiometrelor disponibile, pe când interfața pentru blocurile digitale conține afișaj pe display OLED, cinci butoane tactile și un encoder rotativ. Display-ul utilizat comunica cu microcontroller-ul prin protocolul I2C și are rolul de a afișa meniurile disponibile. Sintetizatorul dispune de trei meniuri: Generator de anvelopă, Oscilator de frecvență joasă și Meniu de modulație. În meniul Generator de anvelopă utilizatorul poate modifica parametrii celor două envelope generate. În meniul Oscilator de frecvență joasă utilizatorul poate modifica parametrii celor două oscilatoare. În Meniu de modulație utilizatorul poate selecta destinațiile surselor de modulație. Navigarea prin meniuri se realizează utilizând encoderul rotativ iar modificarea parametrilor se face tot prin encoder împreună cu cele cinci butoane.

Următoarea secvență de cod este folosită pentru afișajul pe display:

```

void updateDisplay(int submenu) {
    u8g2.clearBuffer();
    if (enterLFOMenu) {
        u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
        u8g2.drawStr(0, 15, "LFO");
        u8g2.drawStr(27, 15, String(LFOindex).c_str());
        u8g2.drawLine(0, 19, 128, 19);
        u8g2.setFont(u8g2_font_5x7_mr);
        u8g2.drawStr(5, 30, "Waveform: ");
        u8g2.drawStr(5, 39, "Mode: ");
        if (LFOindex == 1) {
            displayLFOParameters(lfo1Mode, lfo1_waveformIndex, lfo1_freq,
lfo_mode1_rateStrings[lfo1_rateIndex], lfo1_amp);
        } else if (LFOindex == 2) {
            displayLFOParameters(lfo2Mode, lfo2_waveformIndex, lfo2_freq,
lfo_mode1_rateStrings[lfo2_rateIndex], lfo2_amp);
        }
    } else if (enterENVMenu) {

```

```

u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
u8g2.drawString(0, 15, "ENV");
u8g2.drawString(27, 15, String(ENVindex).c_str());
u8g2.drawLine(0, 19, 128, 19);
if (ENVindex == 1) {
    displayENVParameters(ENVindex, env1_attack, env1_decay, env1_sustain,
env1_release, env1_amp);
} else if (ENVindex == 2) {
    displayENVParameters(ENVindex, env2_attack, env2_decay, env2_sustain,
env2_release, env2_amp);
}
} else if (enterMODMenu) {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.drawString(0, 15, "MOD");
    u8g2.drawLine(0, 19, 128, 19);
    u8g2.setFont(u8g2_font_5x7_mr);
    u8g2.drawString(5, 30, "LF01: ");
    u8g2.drawString(5, 39, "LF02: ");
    u8g2.drawString(5, 47, "ENV2: ");
    u8g2.drawString(4, 55, "Trigger: ");
    u8g2.drawString(5, 63, "Velocity: ");
    u8g2.drawString(115, 63, "%");
    u8g2.drawString(50, 30, String(lfo1_paths[lfo1_pathsIndex]).c_str());
    u8g2.drawString(50, 39, String(lfo2_paths[lfo2_pathsIndex]).c_str());
    u8g2.drawString(50, 47, String(env2_paths[env2_pathsIndex]).c_str());
    u8g2.drawString(50, 55, String(trigger_paths[trigger_pathsIndex]).c_str());
    u8g2.drawString(50, 63, String(velocity_paths[velocity_pathsIndex]).c_str());
    u8g2.drawString(85, 63, String(velocityPercent * 100).c_str());
} else {
    u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB08_tr);
    u8g2.drawString(0, 15, "Menu");
    u8g2.drawLine(0, 19, 128, 19);
    switch (submenu) {
        case 0:
            u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB24_tr);
            u8g2.drawString(30, 58, "LFO");
            break;
        case 1:
            u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB24_tr);
            u8g2.drawString(30, 58, "ENV");
            break;
        case 2:
            u8g2.setFont(u8g2_font_ncenB24_tr);
            u8g2.drawString(30, 58, "MOD");
            break;
        default:
            break;
    }
}
u8g2.sendBuffer();

```

Următoarea secvență de cod reprezintă un fragment din funcția pentru encoderul rotativ:

```
void read_encoder() {
    static uint8_t old_AB = 3;
    static int8_t encval = 0
    static const int8_t enc_states[] = { 0, -1, 1, 0, 1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, 1, 0, 1,
-1, 0 };
    int changevalue;
    old_AB <= 2;
    if (digitalRead(ENC_A))
        old_AB |= 0x02; /
    if (digitalRead(ENC_B))
        old_AB |= 0x01;
    encval += enc_states[(old_AB & 0x0f)];
    if (encval > 3) {
        changevalue = 1;
        if ((micros() - _lastIncReadTime) < _pauseLength) {
            changevalue = _fastIncrement * changevalue;
        }
        _lastIncReadTime = micros();
        if (enterLFOMenu) {
            if (digitalRead(btn0) == LOW) {
                if (LFOindex == 1) {
                    lfo1_waveformIndex = (lfo1_waveformIndex + 1) % 5;
                } else if (LFOindex == 2) {
                    lfo2_waveformIndex = (lfo2_waveformIndex + 1) % 5;
                }
            } else if (digitalRead(btn1) == LOW) {
                if (LFOindex == 1) {
                    lfo1Mode = !lfo1Mode;
                }
                if (LFOindex == 2) {
                    lfo2Mode = !lfo2Mode;
                }
            }
        }
    }
}
```

Capitolul 4. Realizarea practică a sintetizatorului analogic controlat digital

Realizarea practică a sintetizatorului analogic controlat digital implică îmbinarea precisă a tehnologiilor analogice și digitale pentru a crea un instrument muzical versatil și performant. Proiectarea PCB-ului reprezintă o etapă critică în realizarea sintetizatorului, asigurând interconectarea optimă a componentelor și minimizarea interferențelor și zgomotului. Un design bine realizat al PCB-ului facilitează funcționarea stabilă și eficientă a circuitelor analogice și digitale.

PCB-ul a fost realizat în două straturi în tehnologie THT și are ca dimensiune douăzeci și cinci cm lățime și opt-sprezece cm lungime. Plasarea componentelor a fost realizată astfel încât să faciliteze interfața utilizator dar în același timp să existe o separare între blocurile de alimentare, cele digitale și cele analogice, pentru a nu exista interferențe ce ar putea afecta calitatea sunetului. În același timp, în procesul de plasare, am ținut cont de fluxul de semnal pentru a asigura un transfer de semnal eficient. Fiecare circuit integrat, împreună cu componentele sale asociate, au fost amplasate strategic în apropierea acestuia. Această metodă de dispunere a fost esențială nu doar pentru a minimiza distorsiunile și interferențele, ci și pentru a facilita un traseu de semnal scurt și direct între componente. Prin reducerea distanței dintre componentele interconectate, reușim să menținem integritatea semnalelor. Astfel plasarea atentă a componentelor contribuie semnificativ la stabilitatea și eficiența întregului sistem.

Traseele de pe PCB au fost proiectate pentru a asigura atât o alimentare stabilă, cât și un transfer eficient al semnalelor. Am utilizat trasee cu o lățime uniformă de 0.3 mm. Această dimensiune a traseelor este capabilă să conducă curenti de până la 1 A, asigurând astfel o marjă de siguranță suficientă pentru a preveni supraîncălzirea și pierderile de energie. Pe baza plasării corecte a componentelor, am utilizat plane de alimentare, în special pentru circuitele digitale, pentru a asigura o distribuție uniformă a energiei. Sintetizatorul utilizează plane de masă pe ambele straturi ale PCB-ului. Aceste plane de masă sunt conectate între ele prin intermediul unor via stitches [20] (traversări de straturi), asigurând astfel o conexiune solidă și continuă. Această configurație ajută la stabilizarea potențialului de masă pe întregul PCB și la reducerea zgomotului, îmbunătățind performanța generală a circuitelor atât analogice, cât și digitale. Am proiectat traseele de pe primul strat să fie verticale, iar pe cele de pe al doilea strat să fie orizontale. Astfel, între toate traseele, precum și sub și deasupra lor, există un plan de masă, minimizând interferențele electromagnetice. De asemenea, conectorul MIDI, cel de alimentare, ieșirea audio și portul USB al microcontrollerului au fost plasate pe marginea PCB-ului, în timp ce sursele externe de modulație se conectează prin conectori aflați pe PCB.

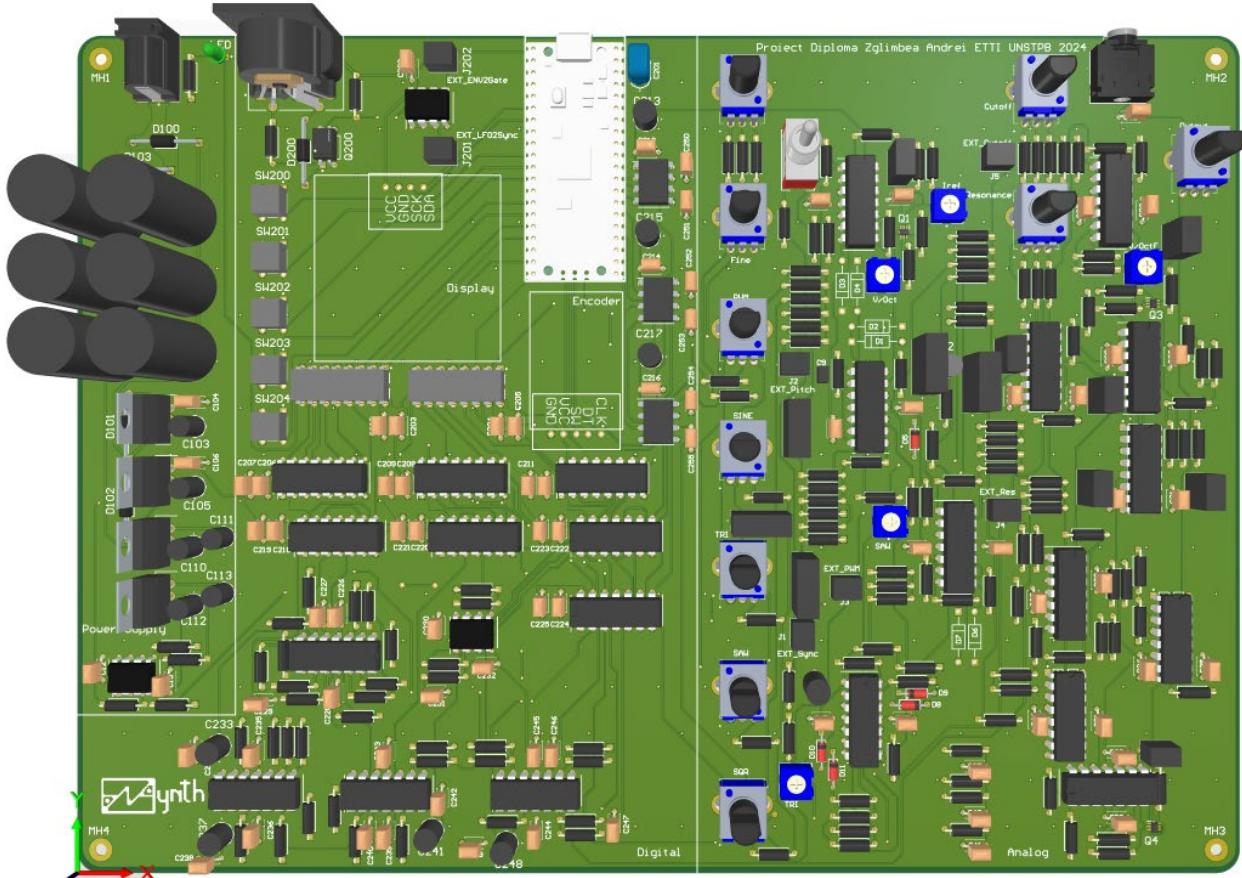




Figura 4.2 Modelul 3D al carcasei

Pe lângă funcționalitate, carcasa include și elemente estetice. De exemplu, inscripționarea logo-ului proiectului pe partea frontală a carcasei. Logo-ul, reprezentând denumirea „Zynth” cu un design modern și stilizat, este poziționat astfel încât să fie vizibil și să adauge un aspect profesional dispozitivului. Aceasta nu doar că va spori atractivitatea vizuală a sintetizatorului, dar va contribui și la identitatea sa de brand.

Astfel, realizarea carcasei sintetizatorului nu doar că va proteja componentele interne, dar va asigura și o utilizare intuitivă și plăcută, oferind în același timp un aspect profesionist și atrăgător.

Capitolul 5. Testarea sintetizatorului

Acest capitol prezintă procesul de testare și problemele întâlnite, precum și măsurările efectuate pentru a evalua performanța sintetizatorului.

În urma asamblării, am constatat că există mai multe erori atât în proiectarea PCB-ului cât și în procesul de asamblare. Aceste erori au afectat funcționarea corectă a sintetizatorului, în special a părții analogice. Deși partea digitală funcționează conform așteptărilor, partea analogică prezintă probleme semnificative.

O problemă majoră a fost identificată în blocul de alimentare. Datorită montării incorecte a condensatoarelor de filtrare, acestea fiind polarizate, acest bloc nu a funcționat conform specificațiilor, ducând la defectarea unui circuit integrat din blourile analogice, ulterior această greșală a fost corectată dar defecțiunile au fost făcute deja. De asemenea, pe PCB, footprint-ul potențiometrelor nu s-a potrivit cu cele folosite, astfel doi dintre cei trei pini ai acestora fiind inversați, ceea ce a împiedicat reglarea corespunzătoare a parametrilor audio.

Pentru a evalua performanța sintetizatorului, am realizat o serie de măsurători ale formelor de undă generate de circuitele fizice. Aceste măsurători au fost efectuate utilizând un osciloscop și sunt prezentate mai jos.

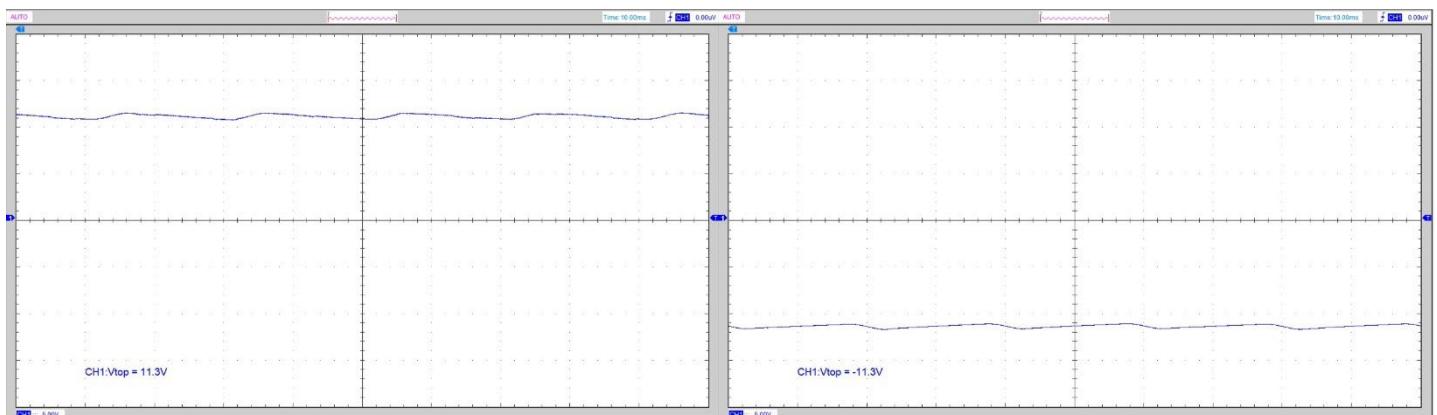


Figura 5.1 Tensiunile de alimentare +12 V și -12 V măsurate pe sintetizatorul fizic

În figura anterioară putem observa cum tensiunile de alimentare folosite pentru blourile analogice nu sunt perfect constante. Acum se datorează filtrării insuficiente a tensiunii de alimentare de la alimentator, atât pe alternanța pozitivă cât și pe cea negativă. Pentru a remedia această problemă ar trebui redimensionată capacitatea totală a blocului sursă de alimentare 2.5. , fiind necesară o capacitate totală mai mare.

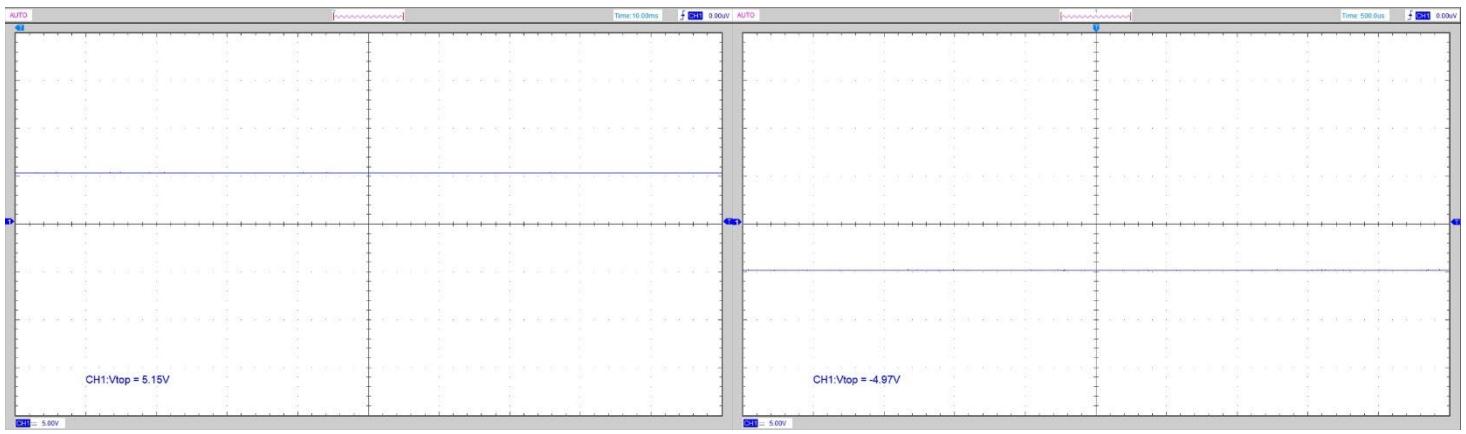


Figura 5.2 Tensiunile de alimentare +5 V și -5 V măsurate pe sintetizatorul fizic

În figura anterioară putem observa cum tensiunile de alimentare +5 V și -5 V nu suferă de aceeași problemă, riplurile din Figura 5.1 nefiind prezente și în cazul acestor tensiuni. Prin utilizarea stabilizatoarelor de tensiuni pentru +5 V și -5 V această problemă este rezolvată.

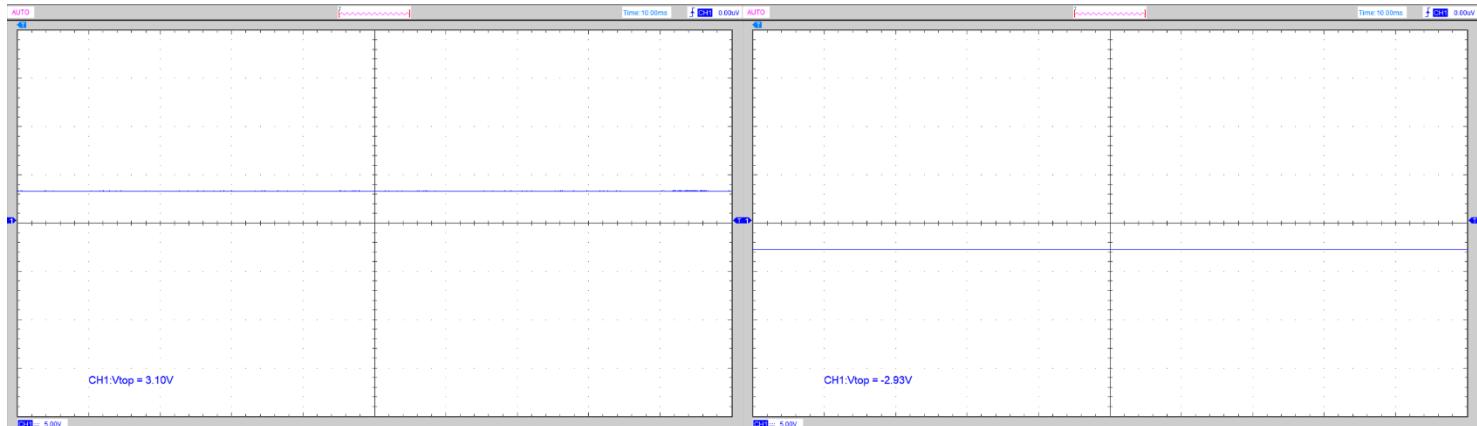


Figura 5.3 Tensiunile de alimentare +3 V și -3 V măsurate pe sintetizatorul fizic

Având în vedere faptul că tensiunile +3 V și -3 V sunt generate pe baza celor de +5 V și -5 V, acestea sunt generate în regulă și sunt constante.

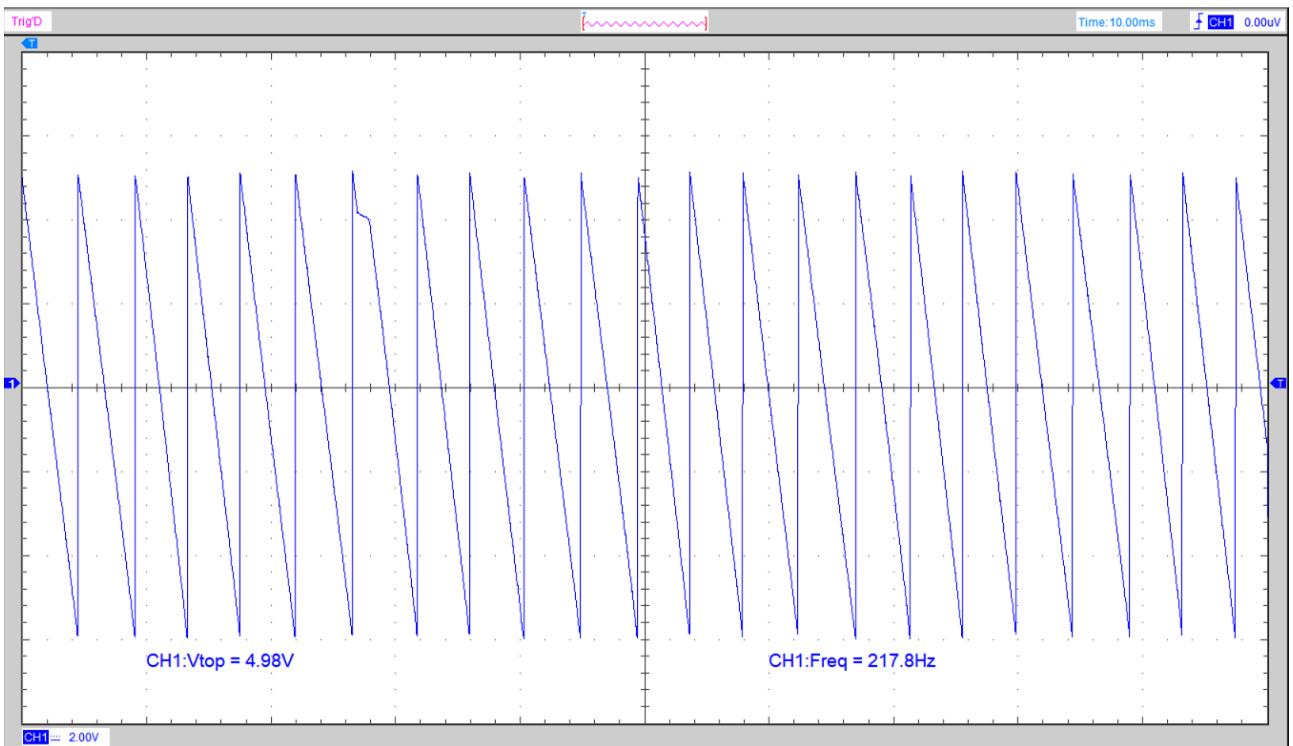


Figura 5.4 Forma de undă dintă de fierastrău generată de sintetizatorul fizic

În această figură putem observa cum semnalul dintă de fierastrău se generează corect și are amplitudinea corespunzătoare. De asemenea controlul în tensiune al frecvenței este funcțional, astfel convertorul tensiune-curent exponential 2.2.1 funcționează corect. Totuși inițial acest convertor nu funcționa, datorită faptului că circuitul integrat cu perechea de tranzistoare vine în pachetul SOT-363, de dimensiuni foarte mici, lipirea acestuia pe PCB a reprezentat o dificultate. Astfel după ce am apăsat efectiv ușor pe acest circuit integrat convertorul a început să funcționeze.

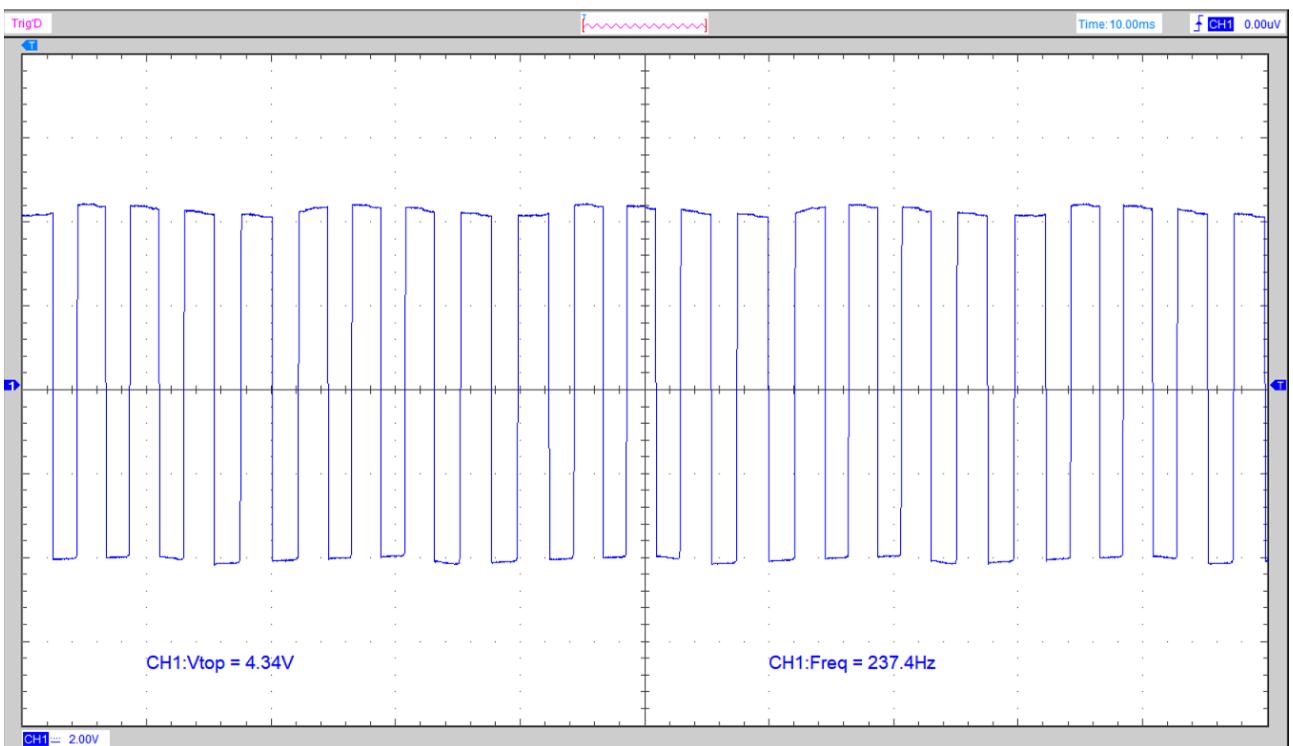


Figura 5.5 Forma de undă dreptunghiulară generată de sintetizatorul fizic

Semnalul dreptunghiular se generează corect și are amplitudinea corespunzătoare. Totuși datorită riplurilor tensiunilor de alimentare prezентate în Figura 5.1 putem observa cum acestea modifică amplitudinea maximă și minima a semnalului dreptunghiular. Controlul factorului de umplere este functional, acesta poate fi modificat de sursele de modulație generate digital, iar prin potențiometru factorul de umplere poate fi modificat doar între 0% și 50% datorită erorii legate de potențiometre prezентate la începutul capitolului.

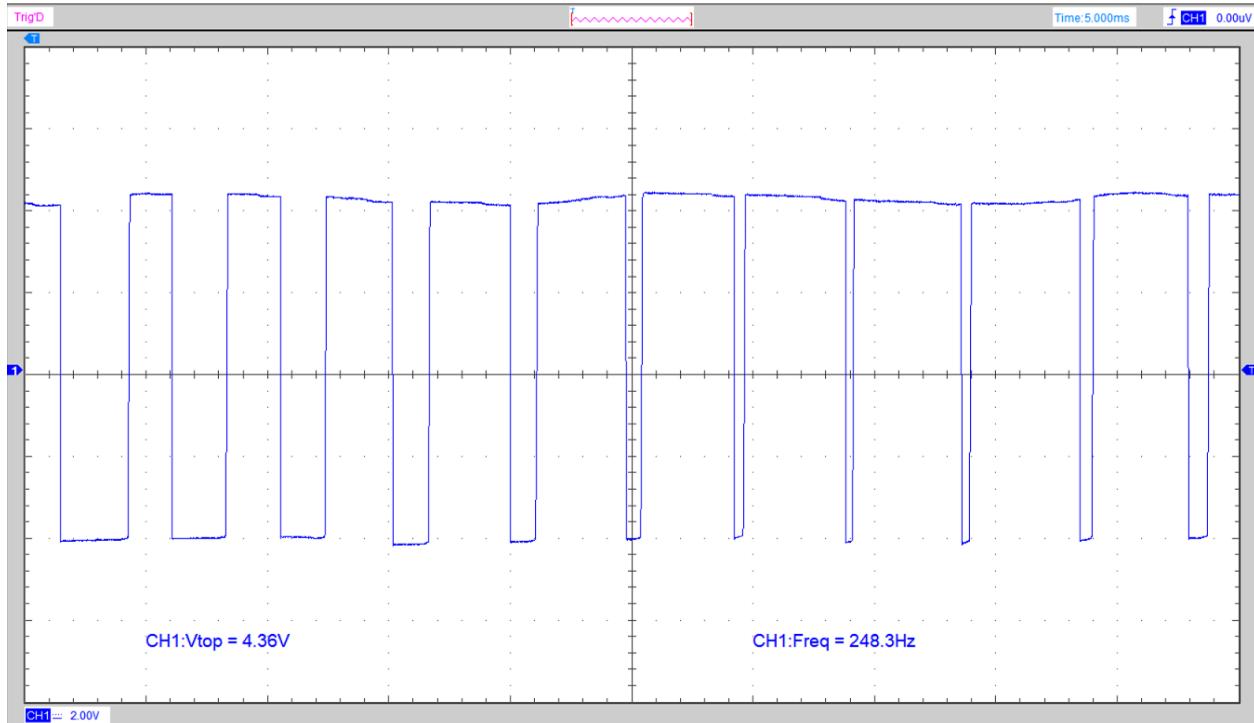


Figura 5.7 Unul dintre oscilatoarele de frecvență joasă modulând factorul de umplere al semnalului dreptunghiular

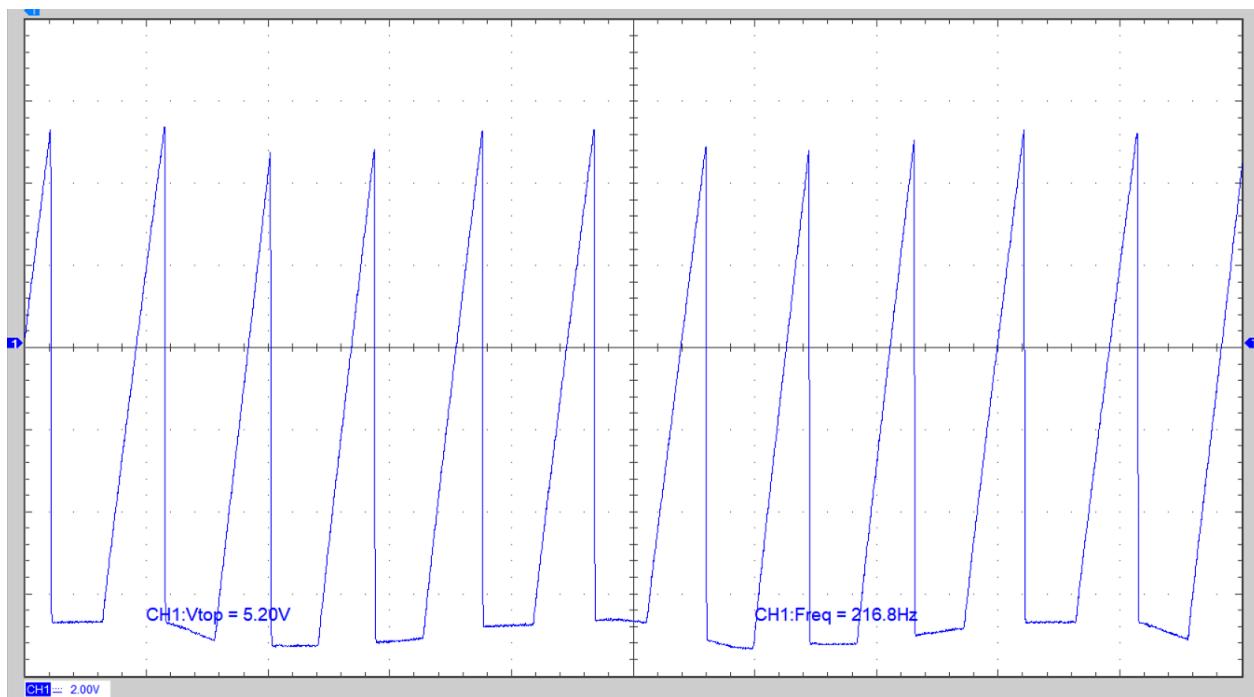


Figura 5.6 Semnalul triunghiular generat de sintetizatorul fizic

Redresarea dublu alternanță a semnalului dintre de fierastrău pentru a genera semnalul triunghiular nu se realizează corect datorită fluctuațiilor în tensiunile de alimentare. Astfel forma de undă triunghiulară generată este foarte asemănătoare cu cea de dintre de fierastrău.

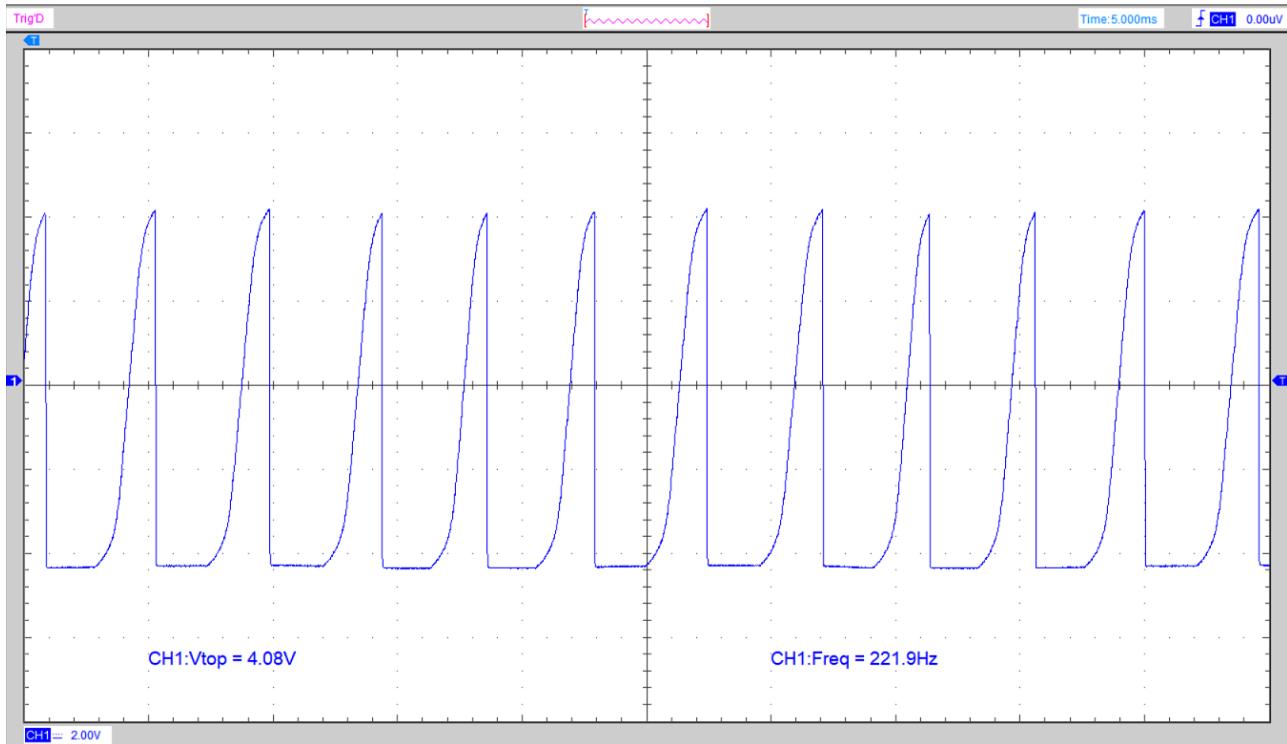


Figura 5.8 Semnalul sinusoidal generat de sintetizatorul fizic

Având în vedere că semnalul sinusoidal este generat pe baza celui triunghiular, nici acesta nu se generează corect. Totuși putem observa cum acest semnal este rotunjit și tinde să semene cu un semnal sinusoidal pentru jumătate de perioadă. Astfel metoda de generare a acestuia este corectă.

Datorită erorii legate de potentiometre, reglajul frecvenței semnalelor generate de oscilator nu poate fi făcut prin acestea pe sintetizatorul fizic.

Eroarea de montare a condensatoarelor de filtrare de la alimentare a dus la defectarea circuitelor integrate cu AOT-uri ce stau la baza blocurilor FCT și ACT. Astfel aceste blocuri nu sunt funcționale pe sintetizatorul fizic. Circuitele integrate cu AOT-uri [7] se găsesc destul de greu în comerț și astfel nu le-am putut înlocui, având la dispoziție doar un număr limitat de astfel de componente.

În figurile următoare putem observa cum și în cazul FCT-ului dar și al ACT-ului, semnalele de ieșire sunt saturate la tensiunile de alimentare. Astfel aceste blocuri nu sunt funcționale, totuși semnalele generate de OCT sunt prezente cu o amplitudine foarte mică la ieșirea sintetizatorului. Astfel am reușit prin amplificarea externă a semnalului audio generat de sintetizator să îl utilizez și să îl testeze, prin conectarea semnalului amplificat la difuzoare.

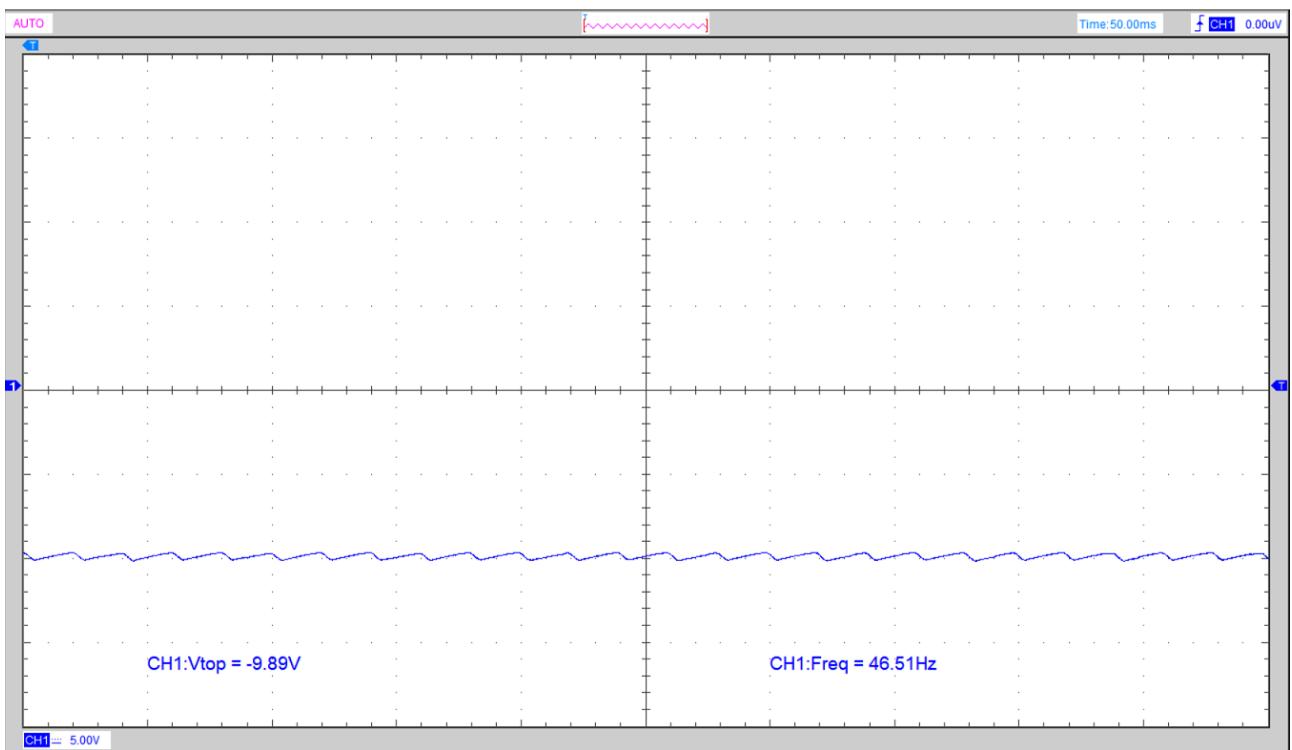


Figura 5.9 Semnalul de ieșire al FCT-ului generat de sintetizatorul fizic

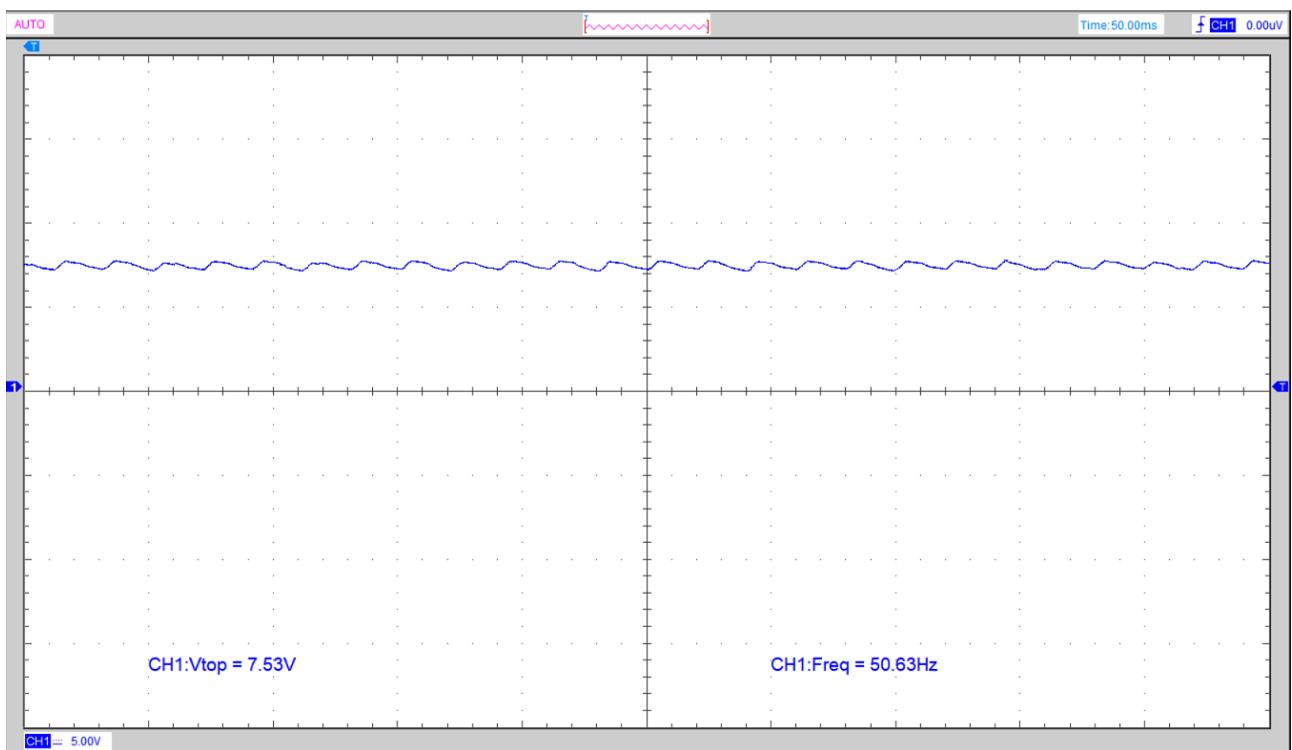


Figura 5.10 Semnalul de ieșire al ACT-ului generat de sintetizatorul fizic

În schimb blocurile digitale ale sintetizatorului sunt perfect funcționale. Interfața utilizator funcționează corespunzător, iar blocurile de control reușesc să moduleze parametrii funcționali ai blocurilor analogice.

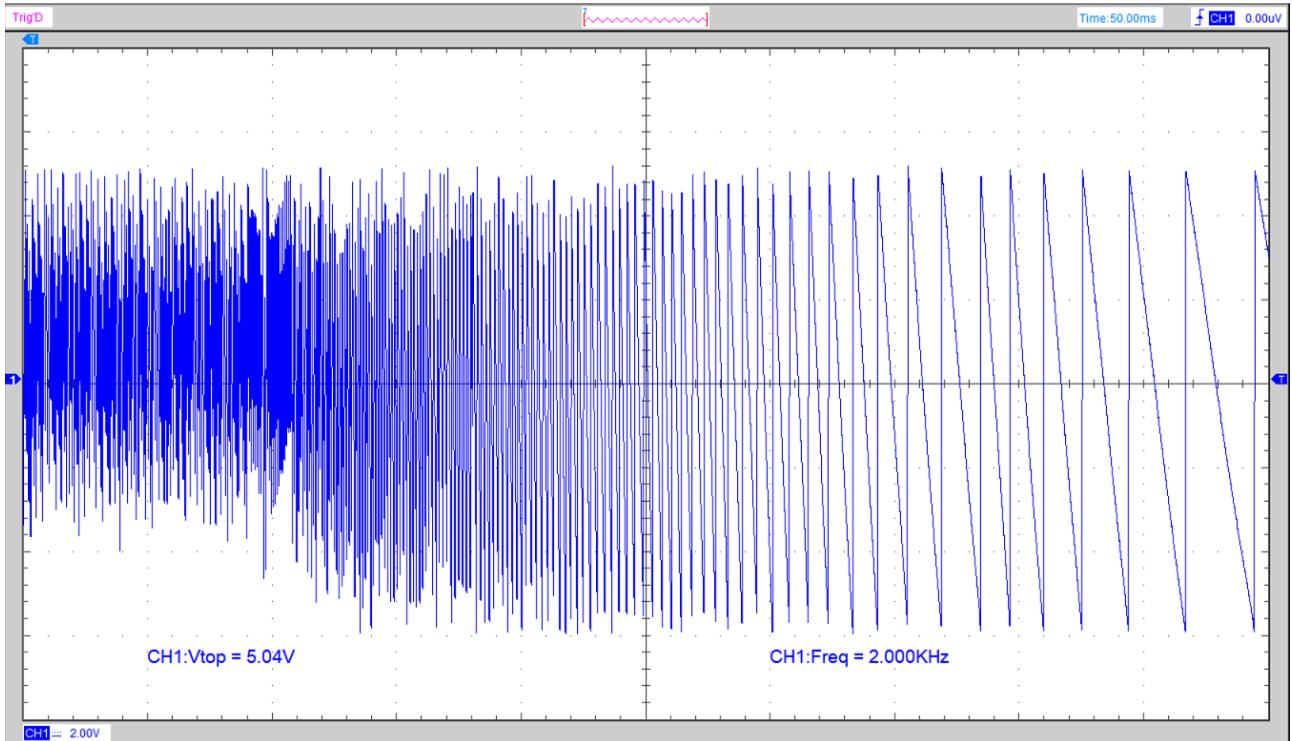


Figura 5.12 Semnalul dintre de fierastrău a cărui frecvență este modulată de unul dintre oscilatoarele de frecvență joasă

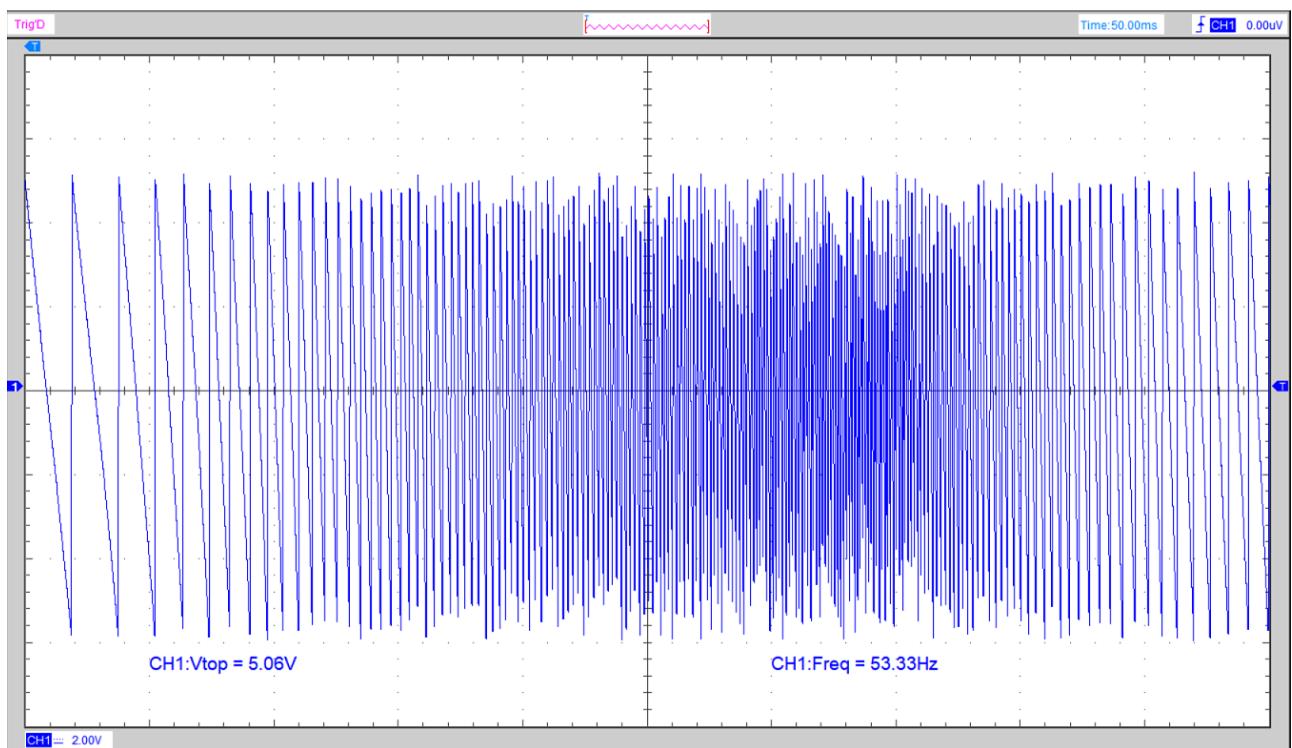


Figura 5.11 Semnalul dintre de fierastrău a cărui frecvență este modulată de cea de a doua anvelopă

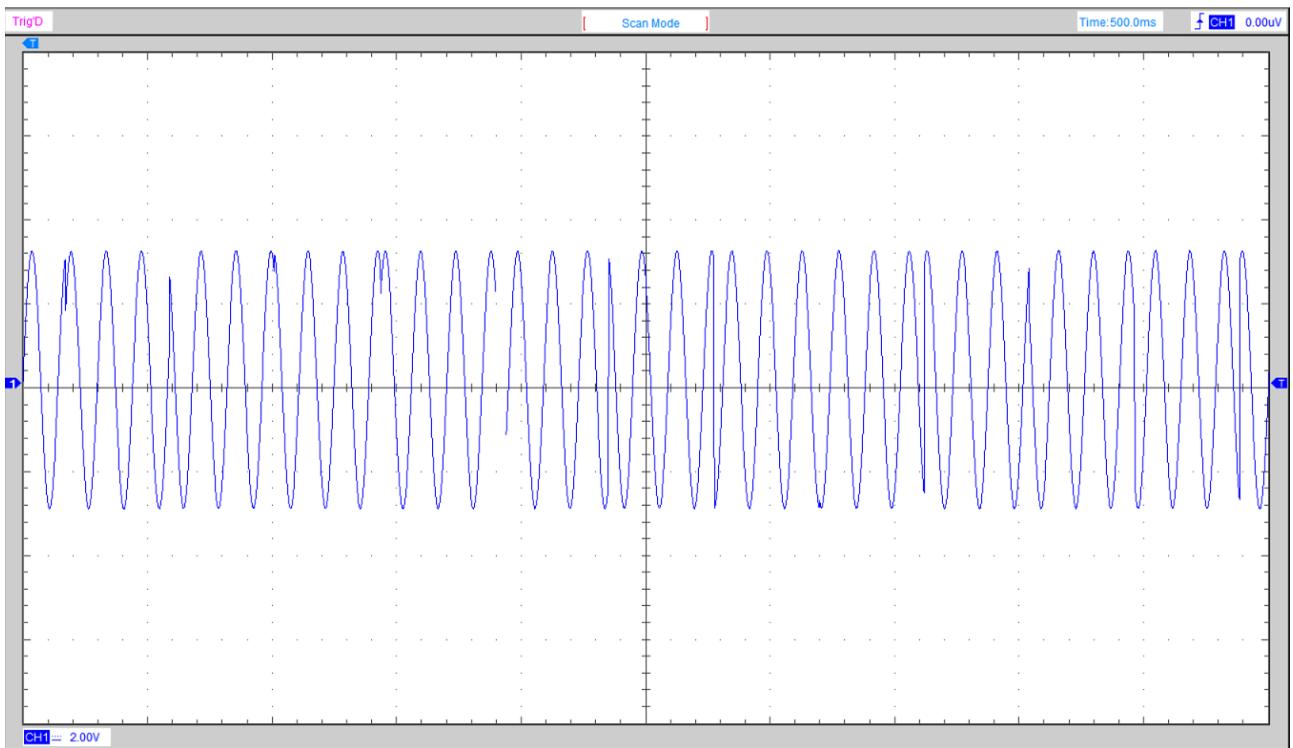


Figura 5.13 Semnal de frecvență joasă generat de sintetizatorul fizic, prelucrat la nivelul analogic corespunzător pentru a modula frecvența OCT-ului

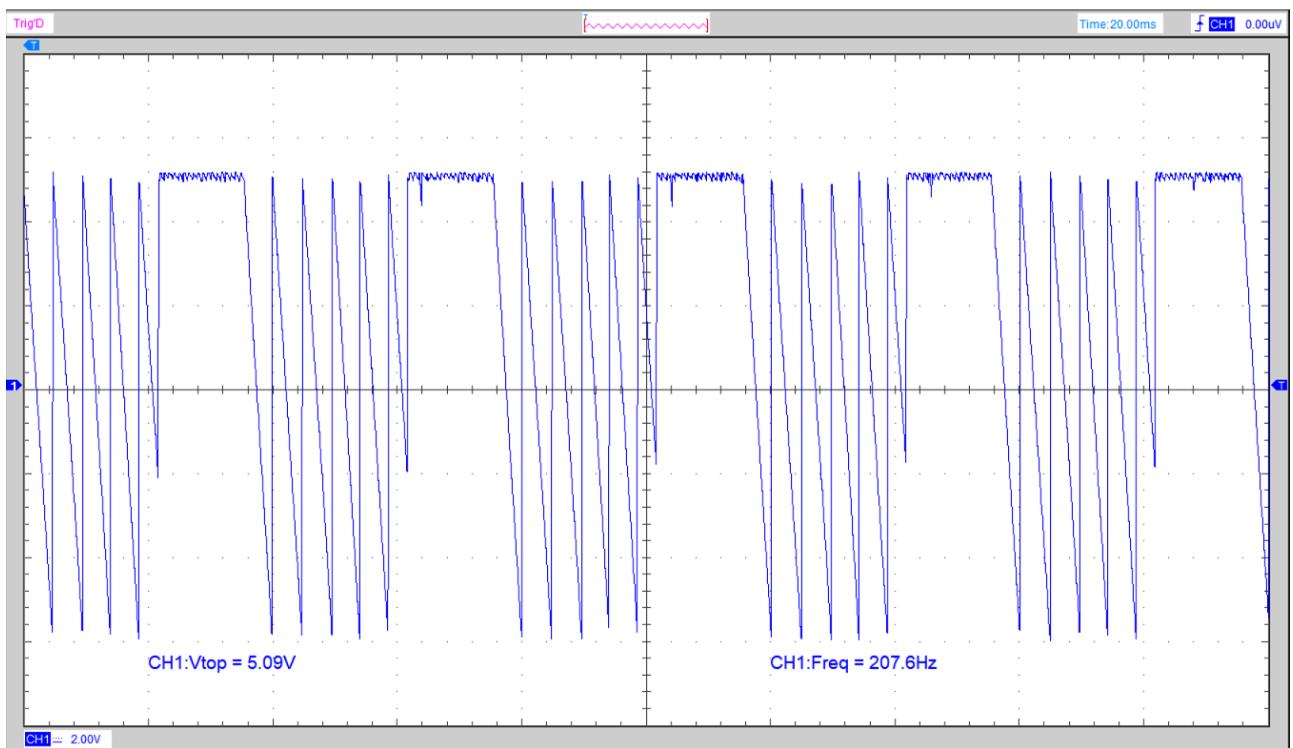


Figura 5.14 Resetarea fazelor semnalelor generate de OCT

În figura anterioară putem observa cum intrarea de sincronizare a OCT-ului este funcțională și poate fi modulată de toate sursele de modulație disponibile. Totuși cîteodată resetarea fazelor semnalelor generate duce la fenomenul explicitat în figura Figura 2.7.

Mesajele MIDI sunt interpretate corect și pe baza acestora se generează tensiunile corespunzătoare notelor muzicale transmise prin MIDI. În figura următoare putem observa cum această tensiune de control se modifică corespunzător pe baza unei secvențe MIDI.

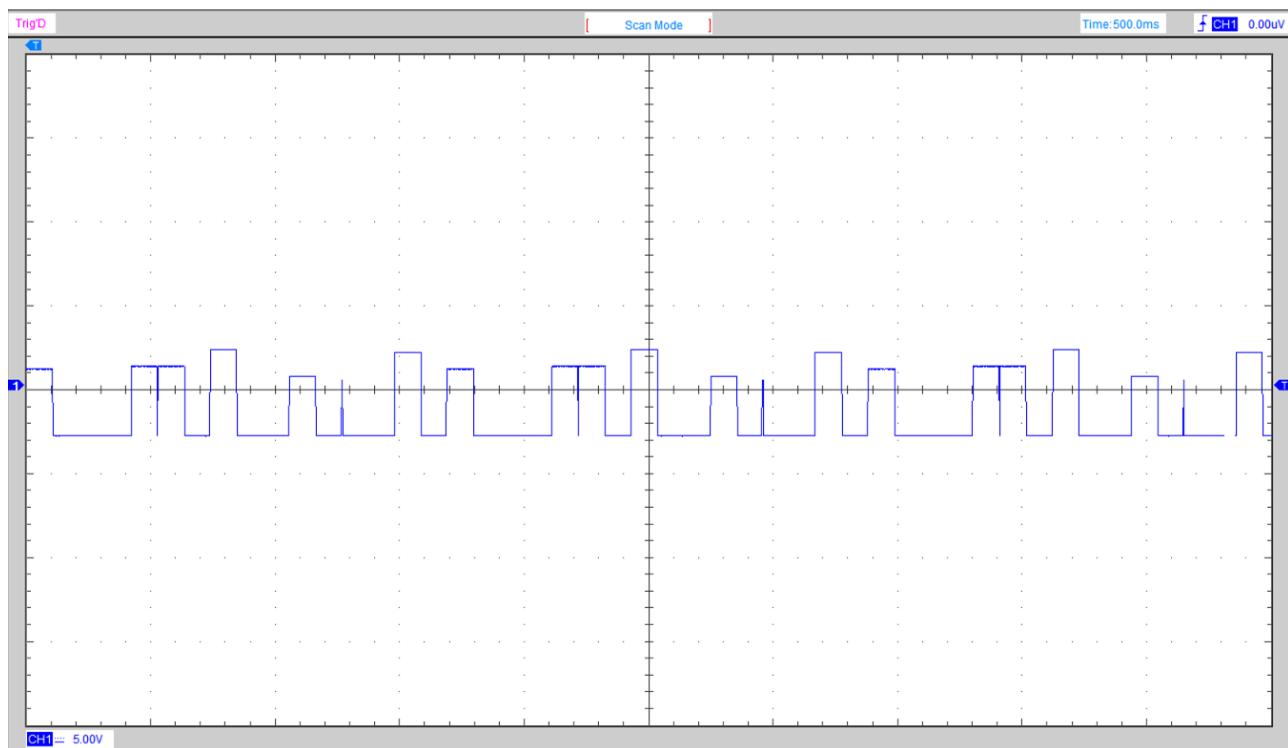


Figura 5.15 Tensiunea de control a frecvenței OCT-ului generate pe baza mesajelor MIDI primite

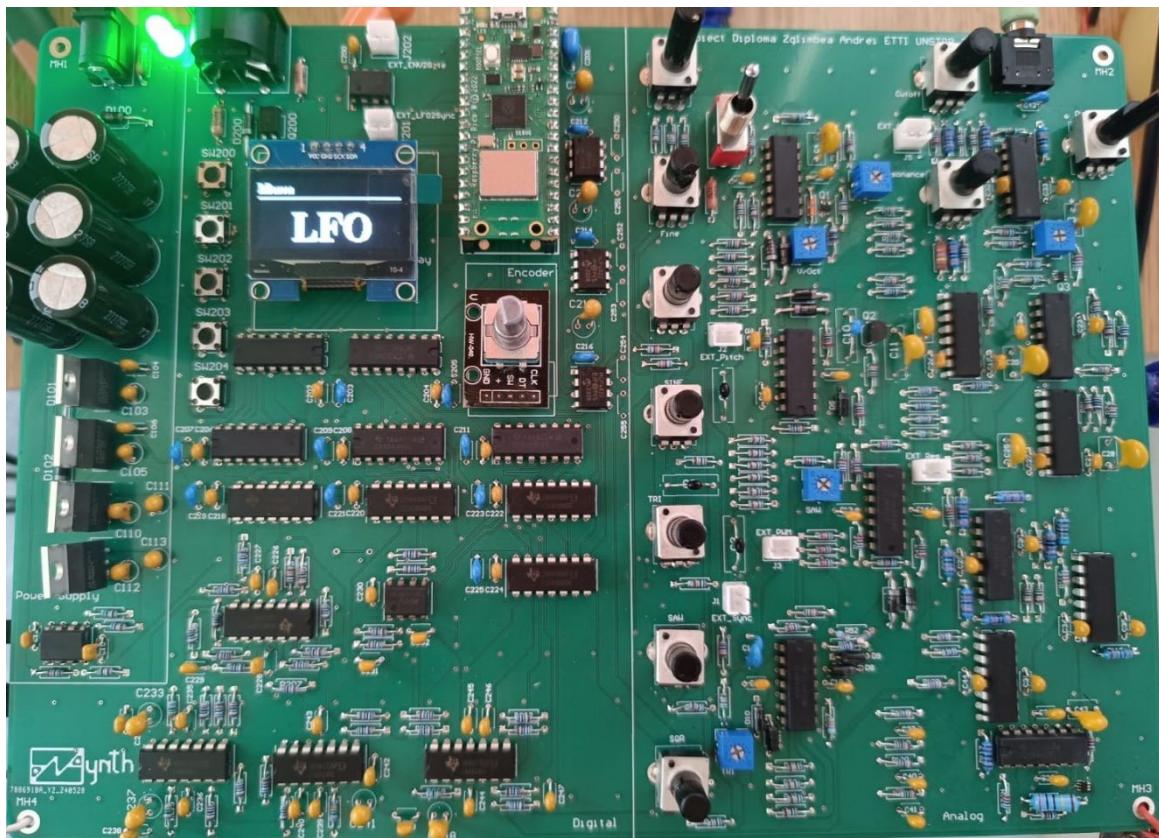


Figura 5.16 PCB-ul complet asamblat

Concluzii

Proiectul sintetizatorului audio analogic controlat digital a fost o experiență educativă și provocatoare, subliniind importanța prototipării și testării riguroase a componentelor analogice. Deși partea digitală a funcționat conform așteptărilor, partea analogică a prezentat numeroase provocări care au afectat performanța generală a sintetizatorului. Totuși, pentru un prim prototip, rezultatele sunt satisfăcătoare și oferă o bază solidă pentru dezvoltări ulterioare.

Este evident că ar fi trebuit să prototipez și să testezi blocurile analogice individual înainte de a finaliza proiectarea PCB-ului. Bazându-mă doar pe simulări, am subestimat complexitatea și posibilele interferențe care pot apărea în circuitele reale. Aceasta ar fi permis identificarea și corectarea problemelor de design înainte de asamblarea finală, asigurând astfel o funcționare mai stabilă și eficientă a sintetizatorului. Asamblarea PCB-ului a necesitat o atenție mai mare, deoarece erori precum montarea incorectă a componentelor din blocul de alimentare și conectarea greșită a potențiometrelor au avut un impact semnificativ asupra funcționării sintetizatorului. Utilizarea serviciilor profesionale de asamblare ar fi redus riscul unor astfel de greșeli și ar fi contribuit la un rezultat final mai robust.

Un alt aspect planificat pentru acest proiect a fost realizarea unei carcase pentru sintetizator. Modelul 3D al carcasei a fost deja conceput, dar din cauza problemelor de funcționare ale sintetizatorului, acest pas a fost omis. Carcasa va trebui realizată odată ce toate problemele funcționale sunt rezolvate, iar designul său va trebui să asigure atât protecția componentelor interne, cât și un acces facil la interfața utilizator.

Pentru a finaliza cu succes acest proiect, următorii pași ar trebui să includă refacerea designului PCB-ului cu o atenție sporită asupra detaliilor și alegerea corectă a footprint-urilor componentelor. De asemenea, este esențială selectarea atentă a componentelor și prototiparea individuală a blocurilor analogice pentru a verifica funcționarea corectă înainte de asamblarea finală..

Acstea măsuri vor asigura că sintetizatorul funcționează conform specificațiilor și că poate fi utilizat pentru producerea și manipularea sunetelor într-un mod eficient și precis. Rectificarea problemelor întâlnite în acest proiect vor duce la îmbunătățirea semnificativă a funcționalității sintetizatorului analogic controlat digital și la finalizarea cu succes a acestuia.

Este important de menționat că în industrie este comun ca mai multe prototipuri să fie fabricate înainte de a ajunge la un produs final. Chiar și după lansarea acestora, există adesea rechemări și rezolvări de bug-uri, subliniind importanța unei abordări iterative și a feedback-ului continuu pentru a asigura calitatea și fiabilitatea produsului final. Această abordare iterativă este esențială nu doar în dezvoltarea sintetizatoarelor audio, dar și în orice proiect de inginerie complexă. Astfel, învățăminte trase din acest proiect vor contribui la îmbunătățirea viitoarelor generații și la dezvoltarea unor produse și mai robuste și mai fiabile.

Bibliografie

- [1] A. Lanterman, „Analog Circuits for Music Synthesis,” Georgia Institute of Technology, 2021. [Interactiv]. Available:
<https://www.youtube.com/playlist?list=PL0UnECWxELQS5bMdWo9VhmZtsCjhjYNcV>.
- [2] H. Chamberlin, Musical Applications of Microprocessors," Hayden Book Company, 1985.
- [3] R. Wilson, „Music from Outer Space,” [Interactiv]. Available:
<https://musicfromouterspace.com/>.
- [4] R. Schmitz, „A tutorial on exponential convertors and temperature compensation,” Aprilie 2000. [Interactiv]. Available: https://www.schmitzbits.de/expo_tutorial/.
- [5] I. Corporation, „J308/J309/J310 JFET Datasheet”.
- [6] D. Das, „Half Wave and Full Wave Precision Rectifier Circuit using Op-Amp,” 29 Aprilie 2020. [Interactiv]. Available: <https://circuitdigest.com/electronic-circuits/half-wave-and-full-wave-precision-rectifier-circuit-using-op-amp>.
- [7] T. Instruments, „LM13700 Dual Operational Transconductance Amplifiers,” 2015.
- [8] T. Instruments, „Current-to-voltage converter circuit for audio DACs,” Ianuarie 2019.
- [9] T. Instruments, „LM7812/7805 Voltage Regulator Datasheet,” Iulie 2016.
- [10] T. Instruments, „LM7912/7905 Voltage Regulator Datasheet,” Mai 2013.
- [11] FortySevenEffects, „Arduino MIDI Library.,” 2024. [Interactiv]. Available:
https://github.com/FortySevenEffects/arduino_midi_library.
- [12] mo-thunderz, „ADSR for Arduino,” 2024. [Interactiv]. Available: <https://github.com/mo-thunderz/adsr>.
- [13] mo-thunderz, „LFO for Arduino,” 2024. [Interactiv]. Available: <https://github.com/mo-thunderz/lfo>.
- [14] O. Kraus, „u8g2: A monochrome graphics library for embedded devices,” [Interactiv]. Available: <https://github.com/olikraus/u8g2>.
- [15] Microchip, „8/10/12-Bit Dual Voltage Output Digital-to-Analog Converter”.
- [16] M. Association, „Summary of MIDI Messages,” 2020.
- [17] T. Instruments, „CD4066B CMOS Quad Bilateral Switch,” Mai 2024.

- [18] T. Instruments, „SNx4HC138 3-Line To 8-Line Decoders/Demultiplexers,” Octombrie 2021.
- [19] T. Instruments, „CD4049UB and CD4050B CMOS Hex Inverting Buffer and Converter,” Iunie 2020.
- [20] Z. Peterson, „Everything You Need to Know About Stitching Vias,” 16 Ianuarie 2023. [Interactive]. Available: <https://resources.altium.com/p/everything-you-need-know-about-stitching-vias>.

Anexa – PCB și carcăsa

