



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA
DIN BUCUREȘTI**



**Școala Doctorală de Electronică, Telecomunicații
și Tehnologia Informației**

Decizie nr.128 din 09-11-2023

REZUMAT TEZĂ DE DOCTORAT

Ing. Anca Mihaela DRĂGAN (VASILE)

**CIRCUITE INTEGRATE DE JOASĂ PUTERE
PENTRU SENZORI**

**INTEGRATED CIRCUITS WITH LOW POWER FOR
SENSORS**

COMISIA DE DOCTORAT

Prof. Dr. Ing. Ion MARGHESCU Univ. Politehnica din București	Președinte
Prof. Dr. Ing. Gheorghe BREZEANU Univ. Politehnica din București	Conducător de doctorat
Prof. Dr. Ing. Adrian GRAUR Univ. Stefan cel Mare din Suceava	Referent
CS1. Dr. Ing. Raluca MULLER IMT din București	Referent
Conf. Dr. Ing. Gheorghe PRISTAVU Univ. Politehnica din București	Referent

BUCUREȘTI 2023

Mulțumiri

Mulțumesc tuturor celor care au contribuit la realizarea tezei mele de doctorat!

Mulțumiri deosebite îi acord conducătorului meu de doctorat, Prof. Dr. Ing. Gheorghe Brezeanu pentru îndrumarea și suportul științific oferit permanent pe tot parcursul programului doctoral. De asemenea, vreau să îi mulțumesc pentru sprijinul moral oferit, fiind motorul realizării prezentei lucrări de doctorat. Totodată, îi sunt recunoscătoare pentru răbdarea și dedicarea dânsului în vederea parcursului meu profesional, având un real impact în dezvoltarea mea ca inginer.

Tot la categoria mulțumiri speciale, vreau să le mulțumesc membrilor comisiei de îndrumare formată din Conf. Dr. Ing. Florin Drăghici, Dr. Ing. Vlad Anghel și Dr. Ing. Răzvan Pușcașu, întrucât mi-au fost alături încă din timpul programului de licență și în tot parcursul activității doctorale, prin suportul lor științific, academic, dar și moral.

Profit de ocazie să le mulțumesc colegilor mei din cadrul firmei ON Semiconductor cu care am împărtășit multe păreri tehnice de-a lungul timpului, dar și momente care mi-au făcut viața de student doctorant și tânăr inginer mult mai frumoasă. Mulțumiri speciale vreau să îi adresez kolegei mele, Ing. Alina Neguț, care mi-a oferit sprijinul său tehnic la fiecare pas. Tot în rubrica specială, vreau să îi mulțumesc colegului meu Ing. Andrei Enache cu care am colaborat mult pentru realizarea lucrărilor științifice și a celor două brevete de invenție. Totodată, doresc să îi mulțumesc domnului Ing. Adrian Tache pentru suportul științific oferit pentru dezvoltarea tezei de doctorat. De asemenea, vreau să îi mulțumesc colegului meu Dr. Ing. Cristian Tudoran pentru sprijinul său oferit de-a lungul timpului.

Aș dori să le mulțumesc membrilor comisiei, Prof. Dr. Ing. Adrian Graur, CS1. Dr. Ing. Raluca Muller și Conf. Dr. Ing. Gheorghe Pristavu pentru acceptul danșilor de a-mi examina teza de doctorat.

Nu în ultimul rând, doresc să ofer mulțumiri speciale soțului meu, Ing. Rareș Vasile, care m-a susținut încă de la începutul activității mele doctorale și mi-a oferit permanent în primul rând sprijin moral, dar și suport tehnic. Tot pe filiera familiei, vreau să adresez mulțumiri speciale părinților mei care m-au încurajat de fiecare dată și mi-au dat impulsurile de care am avut nevoie în parcursul meu profesional, dar mai ales în dezvoltarea mea umană.

Cuprins

INTRODUCERE.....	1
1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat	1
1.2 Scopul tezei de doctorat	1
1.3 Conținutul tezei de doctorat	1
CAPITOLUL 2 - SENZORI DE TEMPERATURĂ ȘI CIRCUITE DE PRELUCRARE A SEMNALULUI DE IEȘIRE.....	3
2.1 Tipuri de senzori de temperatură	3
2.2 Parametrii DTS I ² C	4
2.3 Aplicații tipice.....	4
CAPITOLUL 3 - SENZORUL DE TEMPERATURĂ DIGITAL CU INTERFAȚĂ SERIALĂ I ² C (DTS I ² C).....	5
3.1 Schema bloc. Principiu de funcționare.....	5
3.2 Circuitul DTS.....	5
3.3 Circuitul de control digital (CTRL DIG)	7
3.4 Interfața serială I ² C	7
3.5 Concluzii.....	7
CAPITOLUL 4 - CIRCUITE AUTOZERO PENTRU DTS I ² C ÎN TEHNOLOGIE CMOS EEPROM.....	8
4.1 Referința de tensiune DTS I ² C.....	8
4.2 Arhitectura standard a circuitului autozero	9
4.3 Arhitectura autozero îmbunătățită.....	10
4.4 Comparație circuite auto-zero standard și îmbunătățit.....	11
4.5 Comparație REF DTS I ² C cu circuitele autozero standard și îmbunătățit	11
4.6 Rezultate experimentale DTS I ² C cu arhitectura autozero îmbunătățită.....	12
CAPITOLUL 5 - CIRCUITE DE IEȘIRE PENTRU DTS I ² C ÎN TEHNOLOGIE CMOS EEPROM	12
5.1 Introducere	12
5.2 Circuite de ieșire în contra timp (push-pull). Varianta standard	13
5.3 Etaj de ieșire în contratimp. Arhitectura nouă.....	14
5.4 Comparație circuite digitale push pull pentru I2C U _{Fm} și SPI.....	15
5.5 Arhitectura standard de tip open drain	16
5.6 Arhitectura îmbunătățită de tip open drain.....	17
5.7 Comparație circuite de ieșire de tip open drain pentru I2C HS.....	18
5.8 Rezultate experimentale DTS I2C HS cu arhitectura open drain îmbunătățită ...	19

CAPITOLUL 6 - SENZORUL EEPROM DTS I ² C HS ÎN TEHNOLOGIE CMOS EEPROM	20
6.1 Introducere	20
6.2 Metode de ajustare a erorilor.....	21
6.3 Circuitul de ajustare EEPROM pentru DTS I ² C HS	21
6.4 Arhitectura îmbunătățită EEPROM DTS I ² C HS	22
6.5 Comparație EEPROM DTS I ² C HS cu alți senzori digitali integrați	25
CONCLUZII	25
7.1 Rezultate obținute	25
7.2 Contribuții originale	27
7.3 Lista Lucrărilor Publicate.....	28
7.4 Perspective de Continuare a Cercetării	30
BIBLIOGRAFIE	30

Capitolul 1

Introducere

1.1 Prezentarea domeniului tezei de doctorat

Senzorii de temperatură (TS) reprezintă aproximativ 15% din vânzările totale înregistrate pentru senzorii de pe piața semiconductoare, datorită domeniului extins de utilizare. Segmentul bunurilor de uz comun includ din ce în ce mai multe echipamente noi și performante, în speță module de memorie tot mai rapide și mai eficiente energetic. Candidatul cel mai potrivit pentru astfel de aplicații este senzorul de temperatură digital cu interfață serială integrată care monitorizează temperatura întregului sistem.

1.2 Scopul tezei de doctorat

Proiectarea, simularea, implementarea în siliciu, măsurarea și caracterizarea unui senzor de temperatură cu interfață serială integrată este scopul tezei de doctorat. În vederea obținerii unor performanțe înalte se impun o serie de cerințe pentru a putea fi competitiv pe piața TS:

- tensiune de alimentare cât mai redusă,
- eroare de temperatură cât mai mică,
- gamă extinsă de temperaturi detectate,
- arie minimă consumată,
- frecvențe de lucru ridicate,
- interfață serială compatibilă cu aplicația aleasă.

1.3 Conținutul tezei de doctorat

Teza este împărțită în patru părți. În prima parte se vor trece în revistă principalele topologii de senzori de temperatură. În a doua parte, se va prezenta structura standard a unui senzor digital. Se vor pune în evidență neajunsurile, limitările tehnologice și punctele sensibile ale arhitecturii prezentate. În partea a treia se vor prezenta soluțiile inovatoare propuse care aduc îmbunătățiri topologiei standard a DTS-ului. Acestea vor fi analizate atât prin simulări, cât și prin rezultate experimentale. Ultima parte este destinată arhitecturii noi a senzorului care înglobează toate îmbunătățirile și prezintă performanțele obținute. Toate acestea vor fi expuse în cele șase capitole ale tezei.

Capitolul II debutează cu clasificarea senzorilor de temperatură cei mai căutați. Se va prezenta fiecare tip de senzor, modul de funcționare, caracteristica de temperatură, precum și circuitul de prelucrare al semnalului de ieșire. Studiul topologiilor continuă cu prezentarea parametrilor specifici. De asemenea, se va realiza o scurtă comparație a performanțelor, ilustrând importanța fiecărui senzor în funcție de aplicația aleasă. Se insistă pe familia senzorilor digitali, ce reprezintă o variantă optimă în multe aplicații: pentru module de memorie întâlnite într-un DIMM, în domeniul medical și în domeniul auto.

Capitolul III prezintă structura unui senzor de temperatură digital format din circuitul propriu zis care interpretează temperatura, alături de circuitul digital de control și interfața serială care permite comunicarea cu un sistem digital. Circuitul propriu-zis este alcătuit dintr-un bloc ce detectează temperatura cu ajutorul unei tensiuni analogice și un convertor analog digital care prelucrează tensiunea analogică într-un format digital. Circuitul digital de control preia temperatura binară și o transmite interfeței seriale. Un alt rol al circuitului de control este acela de a genera un semnal de alertă, dacă temperatura obținută este în afara domeniului de funcționare, resetând astfel întregul sistem. Fiecare circuit al arhitecturii senzorului este analizat. De asemenea, se prezintă neajunsurile topologiei clasice:

- circuitele folosite în partea analogică trebuie să furnizeze tensiuni/curenți constanți în timp, astfel încât citirea temperaturii în format digital să fie corectă;
- circuitele de ieșire digitale au frecvențe de lucru reduse și tensiune de alimentare ridicată;
- necesitatea unui circuit de ajustare pentru obținerea unei erori de temperatură minime.

Capitolul IV tratează circuitul auto-zero folosit în cadrul referinței de tensiune, parte componentă a senzorului propriu-zis. Rezultatele simulate ale referinței arată o fugă în timp considerabilă a tensiunii de referință obținută mai ales la temperaturi și tensiuni înalte. Acest lucru este cu atât mai pronunțat cu cât intervalul de timp investigat este mai mare. Driftul în timp al circuitului are un real impact asupra tensiunilor analogice pentru senzor, deoarece produce citiri incorecte de temperatură. În acest capitol se propune un circuit autozero inovator pentru eliminarea driftului în timp obținut în varianta clasică.

În capitolul V sunt prezentate arhitecturi îmbunătățite de circuite de ieșire ale senzorului digital. Noile tendințe ale dezvoltării senzorilor cu interfață digitală necesită frecvențe de lucru cât mai înalte pentru tensiuni de alimentare cât mai joase. Două circuite noi de ieșire:

- circuitul de tip push pull este analizat în cadrul interfețelor I²C de tip Ultra Fast Mode și SPI,
- circuitul de tip open drain pentru interfața I²C de tip High Speed.

Aceste circuite, cu frecvențe rapide la tensiuni de alimentare joase sunt validate prin simulări și măsurători. Datele experimentale au probat superioritatea circuitului open drain pentru interfața I²C de tip High Speed.

Capitolul VI cuprinde arhitectura nouă a sensorului cu soluțiile inovatoare prezentate în capitolele patru și cinci. Sunt evidențiate performanțele sensorului digital din punct de vedere al acurateții în evaluarea temperaturii. În plus, este propus un circuit de trimerare digital cu ajutorul celulelor de memorie EEPROM pentru ajustarea erorii de temperatură. Sensorul de temperatură digital cu interfață digitală de tip High Speed și circuit de ajustare EEPROM este validat în siliciu. Sunt investigate experimental 25 de circuite încapsulate în vederea analizării erorii de temperatură a sensorului.

În capitolul de concluzii se vor trece în revistă rezultatele obținute în cadrul tezei de doctorat, vor fi expuse contribuțiile originale, precum și lista lucrărilor științifice publicate, care au rezultat în urma cercetărilor. Se vor prezenta direcțiile de cercetare viitoare, având în vedere predicțiile pe piața senzorilor de temperatură.

Capitolul 2

Senzori de temperatură și circuite de prelucrare a semnalului de ieșire

2.1 Tipuri de senzori de temperatură

Senzorul de temperatură este un circuit care detectează temperatura mediului și o reprezintă sub forma unei mărimi fizice dependente de temperatura citită [1] [2] [3]. Există mai multe tipuri de familii de senzori de temperatură: senzori rezistivi și senzori electronici. Sensorii rezistivi au ca element termosensibil o rezistență cu coeficient pozitiv cu temperatura (PTC) și respectiv cu coeficient negativ de temperatură (NTC). Sensorii electronici sunt circuite electronice care se clasifică în funcție de circuitul de prelucrare al semnalului de ieșire în: senzori analogici (ATS) și senzori digitali (DTS).

Tendențele moderne arată folosirea senzorilor digitali cu interfață serială integrată pentru modulele de memorie DIMM (Dual In Line Memory Modules) [4]. Rolul sensorului este de a monitoriza temperatura memoriilor. Datorită integrării sensorului cu o interfață serială, DTS poate comunica cu un microcontroller (CPU).

2.2 Parametrii DTS I²C

În teza de doctorat sunt propuse noi arhitecturi de senzori de temperatură digitali. De aceea în secțiunea de față se precizează parametrii acestor senzori (DTS), deși mulți dintre ei sunt general valabili pentru orice senzor de temperatură. În plus, pentru a fixa ideile în continuare se compară trei familii comerciale de DTS din punct de vedere al acestor parametrii specifici: N34TS00, N34TS04 și TMP1075 (**Tabel 2.1**).

Tabel 2.1 Parametrii specifici ai trei familii de DTS

Parametru	Valoare limită	Produce
Gama de temperaturi	-20...125°C	N34TS00/04
	-55...125°C	TMP1075
Tensiunea de alimentare	2.2...5.5V	N34TS04
	1.6 ...5.5V	TMP1075
	1.7...1.9V	N34TS00
Eroarea de temperatură	±3°C (-20...125°C)	N34TS00/04
	±2°C (-55...125°C)	TMP1075
Curent consumat	1000 μA (-20...125°C)	N34TS04
	500 μA (-20...125°C)	N34TS00
	15 μA (-40...125°C)	TMP1075
Frecvența de lucru pentru interfața [MHz]	0.001...0.4MHz – modul Fast	N34TS00/04
	0.001...1MHz – modul Fast +	N34TS04
	0.001...3.4MHz – modul High Speed	TMP1075

2.3 Aplicații tipice

Variatatea folosirii senzorilor de temperatură este foarte mare. Aplicațiile cuprind sectoare importante, de la domeniul medical, unde detectarea temperaturii trebuie să aibă o acuratețe foarte înaltă, către domeniul auto, unde monitorizarea temperaturii este esențială, până la bunurile de uz general precum laptopurile, serverelor sau stațiile de gaming, unde performanțele termice ale memorilor integrate sunt de un real interes. În orice sector ales, senzorul trebuie să detecteze temperaturi cu o eroare de temperatură minimă și să funcționeze într-o anumită gamă de tensiuni de alimentare.

În cadrul tezei se va studia senzorul de temperatură digital cu interfață serială integrată pentru modulele de memorie DDR4 de actualitate întâlnite într-un DIMM. Se va urmări funcționarea senzorului conform cu cerințele impuse de standardul JEDEC.

Capitolul 3

Senzorul de Temperatură Digital cu Interfață Serială I²C (DTS I²C)

3.1 Schema bloc. Principiu de funcționare

Senzorul de temperatură digital este un circuit integrat proiectat pentru a măsura temperatura și a monitoriza performanțele termice ale unui sistem digital [4] [5]. Circuitul detectează temperatura mediului și o prelucrează într-un format digital. În situația în care temperatura măsurată depășește intervalul optim de funcționare, senzorul activează un semnal de alertă, determinând dezactivarea întregul sistem [6] [7].

Senzorul cu interfața serială I²C (DTS I²C) conține doi pini pentru realizarea comunicării digitale: un pin de intrare al magistralei seriale de ceas (SCL) și un pin bidirecțional al magistralei seriale de date (SDA). Semnalul SCL este folosit pentru stabilirea frecvenței de lucru pentru comunicația digitală, iar SDA este utilizat pentru schimbul de date dintre sistemul digital și senzor. De asemenea, detectorul conține un pin de alimentare V_{DD} , pinul de masă GND și pinul de ieșire ALERT, folosit pentru dezactivarea întregului sistem digital.

Schema bloc DTS I²C (**Fig.3.1**) este formată din circuitul propriu-zis DTS, un bloc de control digital și interfața I²C. Senzorul prelucrează temperatura detectată într-un format digital TEMP. Temperatura în format binar este transmisă circuitului de control, care compară această temperatură cu intervalul optim de funcționare al sistemului, rezultând ieșirea ALERT. Interfața permite comunicarea senzorului cu un CPU, transmițând magistralei SDA temperatura detectată de senzor.

3.2 Circuitul DTS

Circuitul DTS propriu-zis (**Fig.3.1**) este format dintr-o referință de tensiune și un convertor analog digital [8] [9] [10] [11]. Referința oferă la ieșire o tensiune constantă (V_{REF}). De asemenea, circuitul conține elementul termosensibil al senzorului, întrucât are o componentă care măsoară temperatura mediului sub forma unui curent dependent de temperatura detectată (I_{PTAT}) [12]. V_{REF} , I_{REF} și I_{PTAT} sunt folosiți pentru a converti temperatura într-un format digital [13]. Blocul ADC compară diferența

curenților analogici (I_{REF} , I_{PTAT}) cu tensiunea de referință (V_{REF}) și oferă la ieșire temperatura TEMP pe 12 biți.

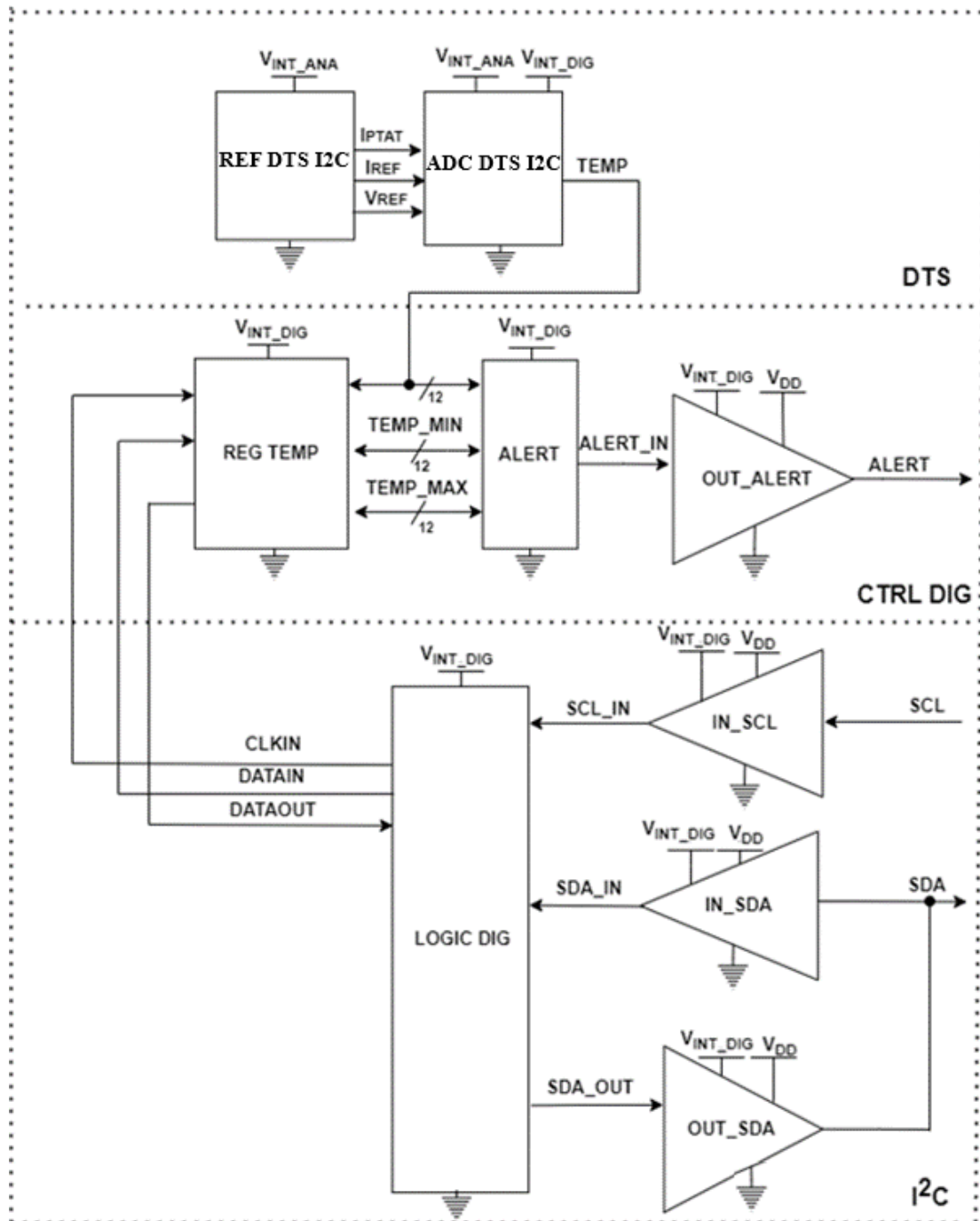


Fig. 3.1 Schema bloc DTS I²C detaliată

3.3 Circuitul de control digital (CTRL DIG)

Circuitul de control digital (**Fig.3.1**) monitorizează performanțele termice ale senzorului în intervalul optim de funcționare. Blocurile componente sunt regiștrii de temperatură, generatorul de semnal alertă și circuitul de ieșire. CTRL DIG conține trei regiștrii de temperatură: TEMP, TEMP_MIN și TEMP_MAX. Blocul ALERT compară aceste temperaturi cu cea înregistrată de DTS, generând un semnal de alertă.

3.4 Interfața serială I²C

Modulul de memorie și circuitul DTS comunică cu ajutorul unei interfețe digitale prin transmiterea datei bit cu bit (**Fig.3.1**) [14] [15]. Interfața serială I²C este un protocol de comunicație care permite mai multe moduri de operare, iar majoritatea dintre ele folosesc un circuit de ieșire de tip open-drain (open-drain buffer) pentru transmiterea datelor. În acest caz, se încadrează interfata digitală I²C de tip Standard, Fast, Fast+ și High Speed. Aceste interfețe pot lucra la frecvențe de până la 3.4MHz.

În cadrul interfețelor digitale de tip I²C există și posibilitatea transmiterii datelor cu ajutorul unui circuit de ieșire de tip push-pull (push-pull buffer), folosit în interfața serială I²C UfM (Ultra-FastMode), care permite frecvențe de lucru de până la 5MHz [16]. Există interfețe rapide care folosesc mai multe magistrale pentru comunicație – SPI lucrează până la 10MHz. De asemenea, în literatura de specialitate apar noi abordări ale interfeței I³C care transmite datele cu o frecvență de 12.5MHz.

3.5 Concluzii

În capitolul de față este prezentat senzorul de temperatură digital cu interfață serială I²C, urmărind cerințele de proiectare impuse de memoriile de tip DDR4 și standardul JEDEC.

Circuitul DTS propriu zis oferă o tensiune de referință, precum și curentul direct proporțional cu temperatura detectată. Este necesară analiza tensiunii de referință pe parcursul intervalului de conversie pentru o citire corectă a temperaturii detectate. În capitolul 4 se prezintă îmbunătățiri ale arhitecturii circuitelor de autozero din componența DTS. Soluțiile inovatoare pentru circuitele de autozero reduc variația în timp a tensiunii de la ieșirea referinței. Din punct de vedere al acurateții senzorului, se remarcă necesitatea ajustării referinței de tensiune în vederea reducerii erorii de temperatură. În capitolul 6, se va prezenta un circuit de ajustare pentru senzor.

Din punct de vedere al comunicării senzorului cu un CPU este studiată interfața I²C. Un punct sensibil al interfeței sunt circuitele de ieșire care dictează frecvența de lucru necesară transferului de date. În capitolul 5 se vor studia tipurile de circuite de ieșire pentru interfețele rapide.

Capitolul 4

Circuite autozero pentru DTS I²C în tehnologie CMOS EEPROM

4.1 Referința de tensiune DTS I²C

Referința de tensiune a circuitului DTS propriu zis (REF DTS I²C) este ilustrată în **Fig.4.1**. Aceasta conține o serie de circuite autozero (AZ) utilizate pentru eliminarea offsetului. Referința propriu zisă este implementată în procesul tehnologic 0.18 μ m CMOS EEPROM cu tranzistoare de tip LV. Pentru monitorizarea referinței de tensiune la nivel de testare, este utilizat un circuit autozero în configurație repetoare implementat cu tranzistoare de tip HV (TEST REF DTS I²C).

În urma simulărilor în mediul HSPICE, s-a observat o fugă considerabilă în timp a tensiunii de referință V_{REF} pe parcursul intervalului de conversie, producând citiri incorecte de temperatură. Blocurile responsabile pentru fuga în timp observată în simulare sunt circuitele autozero. Astfel, se va investiga în continuare arhitectura autozero, precum și referința de tensiune cu circuitele AZ.

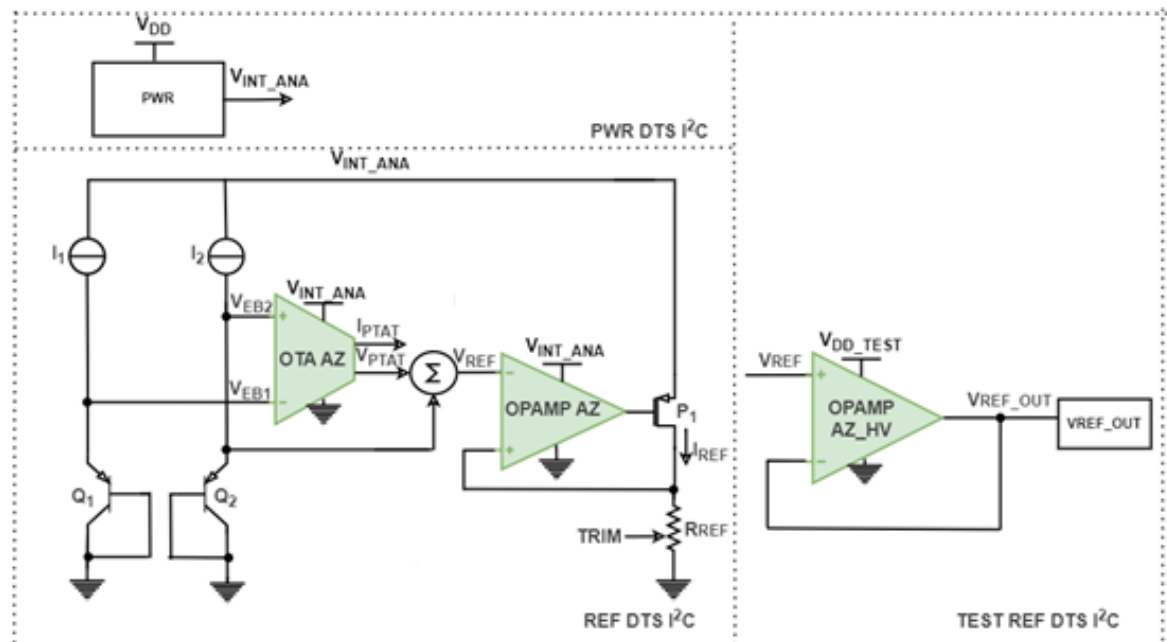


Fig. 4.1 Referința de tensiune DTS I²C

4.2 Arhitectura standard a circuitului autozero

Schema bloc a circuitului AZ standard este reprezentată în Fig.4.2. Pentru DTS I²C, tehnica autozero presupune aplicarea unui număr finit de pulsuri pentru comanda comutatoarelor S₁ – S₅. După eliminarea offsetului amplificatorului principal (G_m), bucla de reacție formată din etajul de ieșire (R) și amplificatorul secundar (G_m') este dezactivată. Analiza în timp a tensiunii de la ieșirea circuitului autozero standard (V_{OUT}), precum și a tensiunilor de la intrarea etajului G_m' (V_{INM}', V_{INP}') este ilustrată în Fig.4.3.

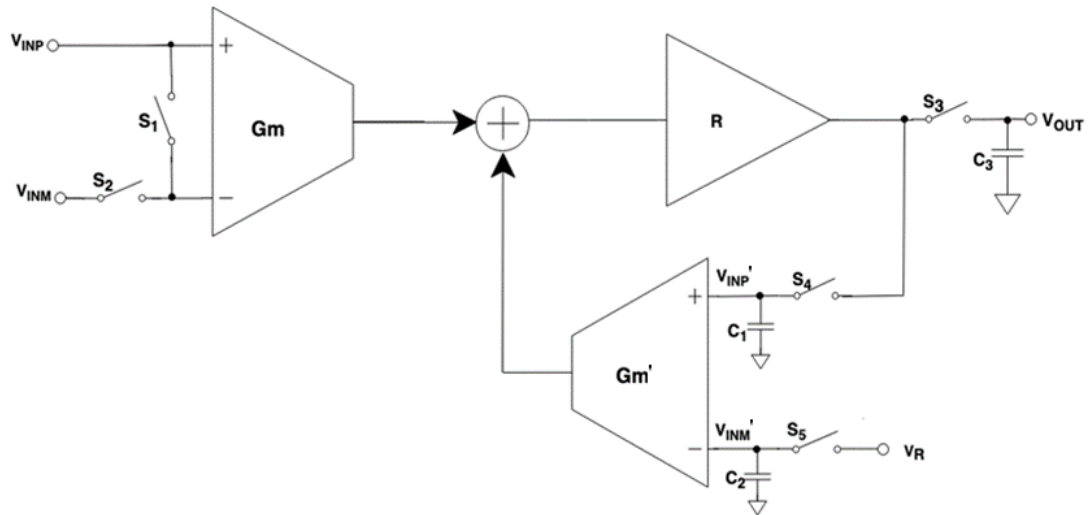


Fig. 4.2 Circuit autozero standard – schema bloc

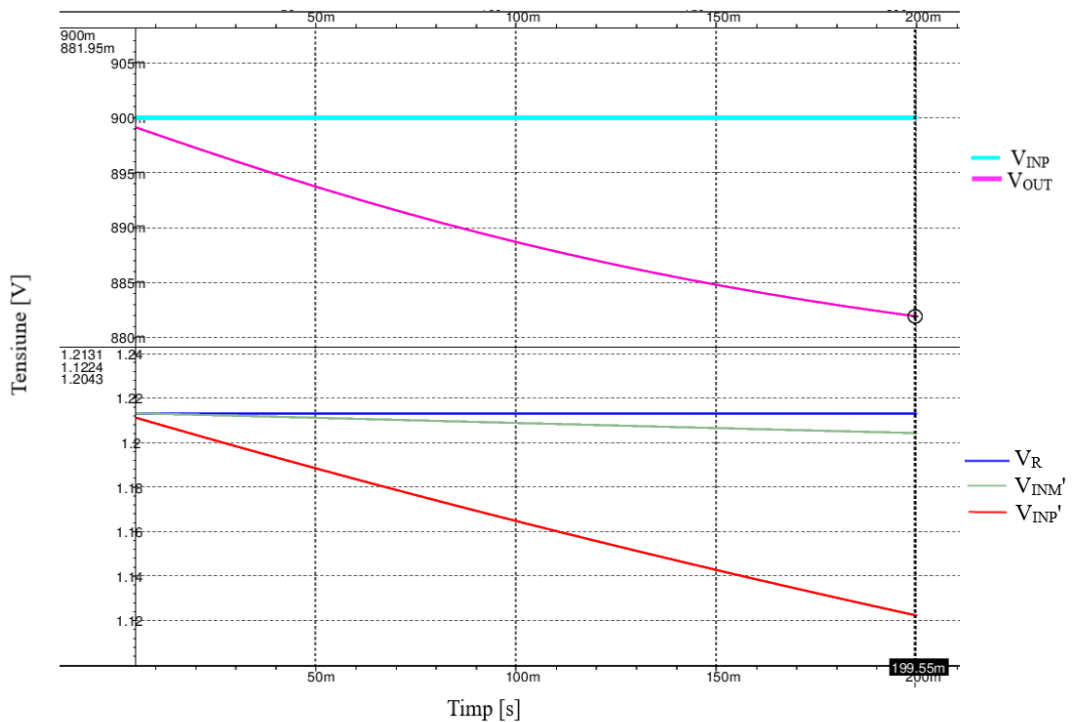


Fig. 4.3 Comportamentul circuitului autozero standard în 200ms la 25°C

4.3 Arhitectura autozero îmbunătățită

Arhitectura circuitului AZ îmbunătățit este ilustrată în **Fig.4.4**. Circuitul propus include o serie de comutatoare noi: S_6, S_7, S_8, S_9 , care asigură același potențial pe intrările amplificatorului secundar (Gm') [17]. Configurația simetrică formată din S_8 și S_9 asigură același potențial pe unul din capetele comutatoarelor S_4, S_5 . De asemenea, căderea de tensiune egală pe comutatoarele S_6 și S_7 permite tensiuni egale pe intrările amplificatorului secundar. Analiza în timp a tensiunii de la ieșirea circuitului propus (V_{OUT}), precum și a tensiunilor de la intrarea etajului Gm' (V_{INM}' , V_{INP}') este ilustrată în **Fig.4.5**.

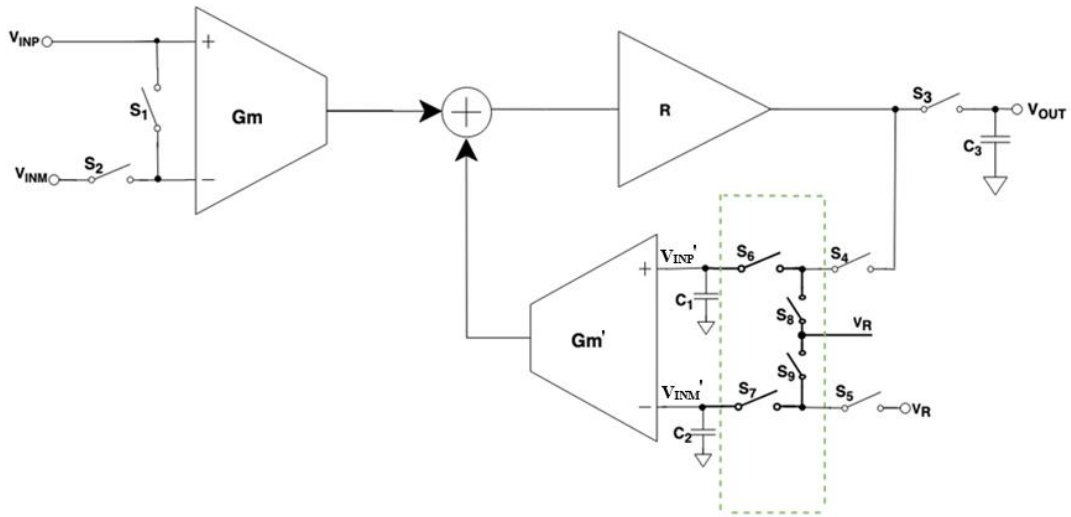


Fig. 4.4 Circuit autozero îmbunătățit – Schemă bloc

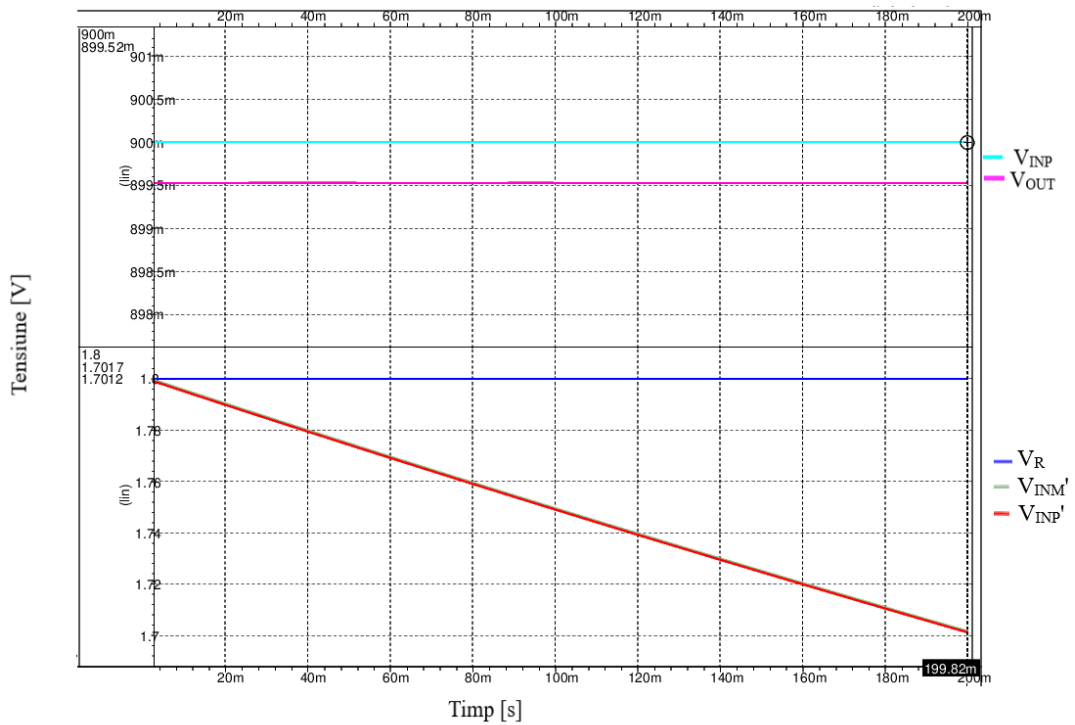


Fig. 4.5 Comportamentul circuitului autozero îmbunătățit în 200ms la 25°C

4.4 Comparație circuite auto-zero standard și îmbunătățit

Circuitele autozero (Fig.4.2, 4.4) implementate cu tranzistoare de tip HV au fost comparate cu ajutorul simulărilor HSPICE de tip PVT. În Fig.4.3 poate remarca o fugă de 20mV a tensiunii de ieșire V_{OUT} pentru intervalul de timp investigat. Acest drift în timp este din ce în ce mai pronunțat odată cu creșterea temperaturii și scăderea tensiunii de alimentare. Fuga în timp a lui V_{OUT} se datorează potențialelor diferite de la intrarea etajului G_m . Fig.4.5 confirmă echilibrarea potențialelor V_{INP} , V_{INM} , precum și eliminarea driftului în timp a tensiunii de ieșire V_{OUT} în cazul arhitecturii îmbunătățite din Fig.4.4. De asemenea, simulări de tip Monte Carlo au fost luate în considerare. În toate situațiile, s-a observat eliminarea driftului în timp al tensiunii de la ieșirea circuitului autozero propus (Fig.4.4).

4.5 Comparație REF DTS I²C cu circuitele autozero standard și îmbunătățit

Referința de tensiune (Fig.4.1) cu circuitele autozero standard (Fig.4.2) și REF DTS I²C cu arhitectura AZ propusă (Fig.4.3) au fost comparate cu ajutorul simulărilor HSPICE de tip PVT și Monte Carlo. În Fig.4.6 este prezentată analiza în timp a tensiunii de referință cu arhitectura AZ standard ($V_{REF_AZ_V0}$), precum și cea îmbunătățită ($V_{REF_AZ_V1}$) la 1.8V pentru 25°C. În toate scenariile investigate (simulări PVT și MC), $V_{REF_AZ_V1}$ este constantă pe parcursul intervalului de conversie al senzorului, în timp ce $V_{REF_AZ_V0}$ are o fugă în timp considerabilă.

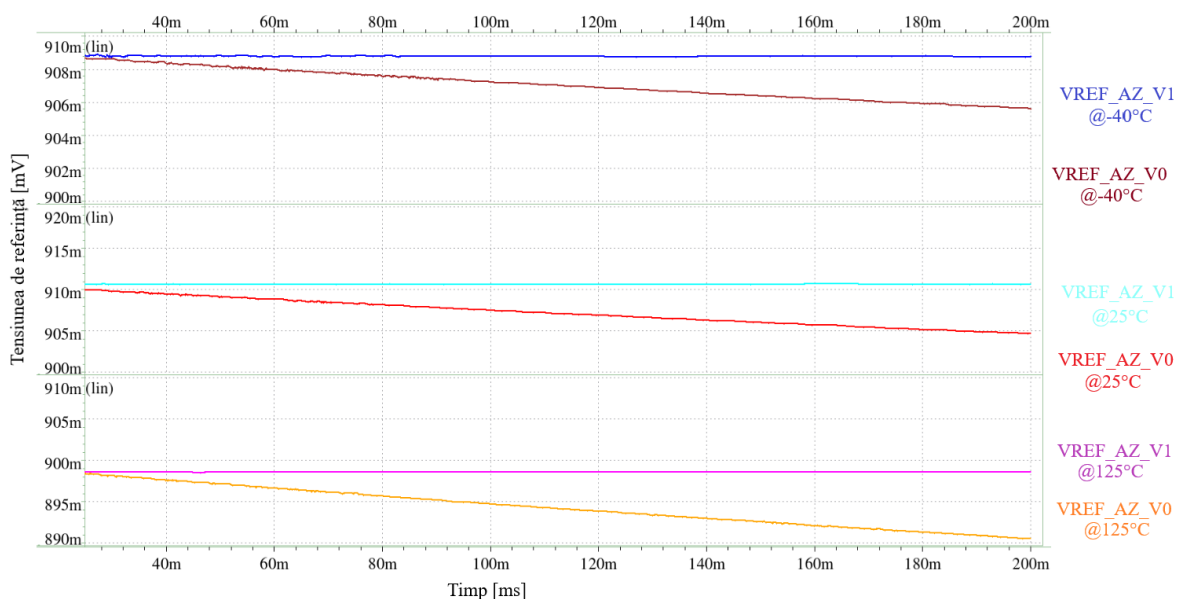


Fig. 4.6 Analiza în timp a tensiunii de referință la 1.8V

4.6 Rezultate experimentale DTS I²C cu arhitectura autozero îmbunătățită

Senzorul DTS I²C cu arhitectura îmbunătățită de tip autozero (**Fig.4.4**) a fost implementat în siliciu. Circuitul a fost validat prin măsurători la nivel de plachetă pentru tensiuni de alimentare de $V_{DD} = 1.8V$ și $V_{DD_TEST} = 3V, 3.0V$ la temperaturi de 25°C, 50°C și 90°C. În **Fig. 4.7** se urmărește comportamentul tensiunii de referință V_{REF_OUT} pentru 5s la 90°C. Tensiunea V_{REF_OUT} este egală cu 930 mV pe întregul interval de timp investigat. Captura de pe osciloscop (**Fig. 4.7**) confirmă rezultatele simulate în **Fig. 4.6**, unde tensiunea de referință obținută cu arhitectura AZ propusă este constantă în timp pe întreg intervalul de măsură.

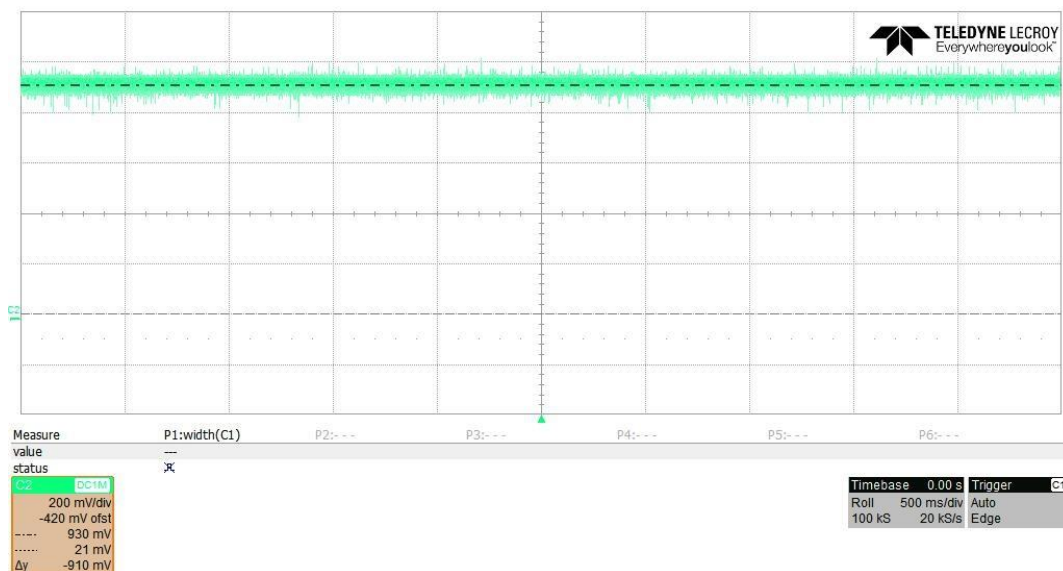


Fig. 4.7 Captură de pe osciloscop pentru V_{REF_OUT} la 3.0 V și 90°C

Capitolul 5

Circuite de ieșire pentru DTS I²C în tehnologie CMOS EEPROM

5.1 Introducere

Senzorul DTS I²C conține o interfață serială care permite comunicarea cu CPU. În funcție de protocolul de comunicație folosit, se alege circuitul de ieșire

corespunzător. De exemplu, interfețele I²C de tip Standard, Fast Mode (FM), FastMode+ (FM+) și High Speed (HS) lucrează cu un circuit de ieșire de tip open drain. Acestea funcționează pentru frecvențe de până la 3.4MHz (HS), $C_B = 550\text{pF}$ (FM+), $I_{OL} = 20\text{mA}$ (Standard). Interfețele de tip I²C Ultra FastMode (UFm) și SPI folosesc un circuit de ieșire de tip push pull. Astfel de interfețe lucrează la frecvențe de până la 10MHz, $C_B = 30\text{pF}$ și curenți de sarcină de $\pm 3\text{mA}$. Sunt targetate interfețele rapide pentru comunicarea cu CPU de actualitate. Se vor investiga circuitele de ieșire de tip push pull la frecvențele de lucru impuse de interfețele I²C UFm și SPI, precum și circuitele de ieșire de tip open drain pentru interfața I²C HS.

5.2 Circuite de ieșire în contra timp (push-pull).

Varianta standard

Circuitul push pull standard prezentat în **Fig. 5.1** a fost proiectat în procesul tehnologic $0.18\mu\text{m}$ CMOS EEPROM și a fost testat în mediul de simulare HSPICE pentru tensiuni de alimentare de la 1.6V la 5.6V, temperaturi de la -40°C la 125°C , $f_{IN} = 5\text{MHz}$ și $C_L = 30\text{pF}$. În **Tabel.5.1** sunt prezentați parametrii circuitului, unde se observă un timp de propagare (t_{pHL}) de maxim 28.1ns obținut la 1.6V, reprezentând $\sim 60\%$ din timpul total de transmisie al datei pentru I²C UFm. De asemenea, Interfața SPI impune un timp maxim de transfer al datei de 25ns. Pentru oricare din cele două interfețe, circuitul în contratimp standard din **Fig.5.1** nu poate funcționa la frecvența de lucru impusă pentru întreg domeniu de tensiuni de alimentare.

Pentru tensiuni joase de 1.6V, întârzierea dată doar de răspunsul etajului final (t_{D_NI} , t_{D_PI}) reprezintă aproximativ jumătate din timpul total de propagare la ieșirea circuitului standard (**Tabel.5.1**). De asemenea, un contributor semnificativ al întârzierii timpului de propagare îl deține circuitul de nesuprapunere, reprezentând $\sim 40\%$ din t_{pHL} . Circuitul push pull clasic (**Fig.5.1**) la 5.6V oferă timpi de propagare de 4 ori mai reduși (**Tabel.5.1**), întrucât majoritatea blocurilor componente sunt proiectate cu tranzistoare de tip HV. Aceste dispozitive răspund mult mai lent pentru 1.6V, rezultând timpi de propagare considerabili pentru tensiuni LV.

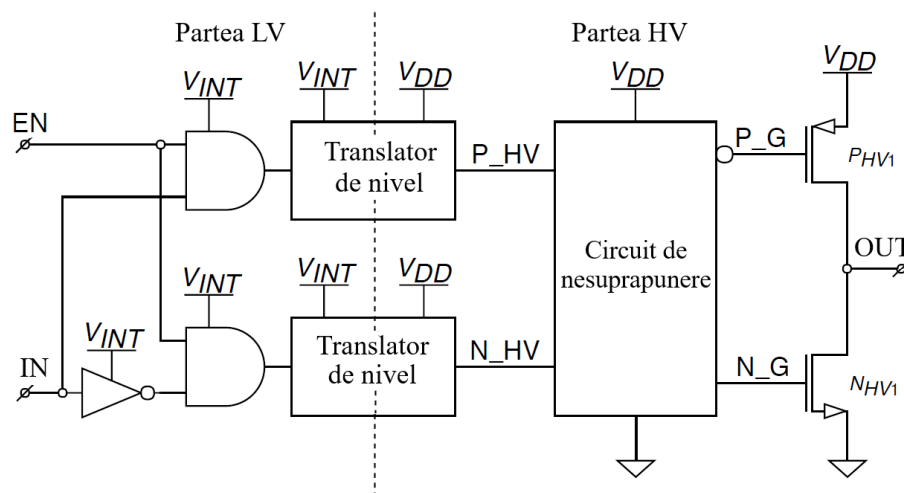


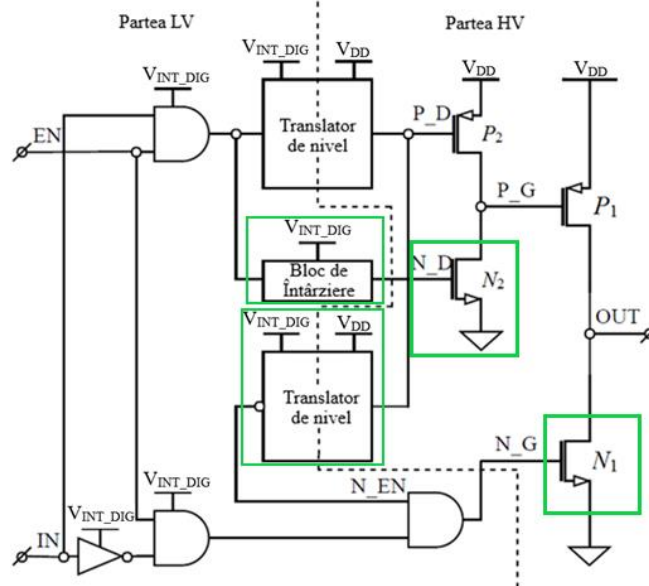
Fig. 5.1 Schema electrică a circuitului de ieșire standard în configurație push-pull

Tabel 5.1 Parametrii circuitului de ieșire de tip push-pull standard

Parametru	Tensiunea de alimentare	Valoare		
		Min	Typ	Max
t_r [ns]	1.6V	6.2	8.0	9.3
	5.6V	1.2	1.4	1.8
t_f [ns]	1.6V	5.2	6.7	7.5
	5.6V	0.9	1.2	1.5
t_{pLH} [ns]	1.6V	19.8	25.5	28.1
	5.6V	5.5	6.7	7.5
t_{pHL} [ns]	1.6V	16.8	20.8	24.8
	5.6V	4.4	5.9	6.2
$t_{D_{NI}}$ [ns]	1.6V	9.8	11.6	13.9
	5.6V	0.96	0.98	1.07
$t_{D_{PI}}$ [ns]	1.6V	5.3	5.9	7.0
	5.6V	0.6	1.2	1.6
t_{NOV_R} [ns]	1.6V	8.4	9.2	12.3
	5.6V	1.14	1.2	1.6
t_{NOV_F} [ns]	1.6V	4.3	5.2	6.9
	5.6V	0.5	0.6	0.7
I_{DD} @ 5MHz [mA]	1.6V	0.342	0.347	0.356
	5.6V	1.26	1.28	1.31

5.3 Etaj de ieșire în contratimp. Arhitectura nouă

Circuitul push-pull îmbunătățit este figurat în **Fig.5.2**. Noutatea circuitului propus presupune adăugarea unui tip de tranzistor nMOS HV cu o tensiune de prag mai mică decât cea folosită anterior (**Fig.5.1**) pentru tranzistorul N_1 [15] [18]. În acest fel, comanda tranzistorului final poate fi de tip LV, reducând întârzierea dată de dispozitivele de tip HV. Același tip de tranzistor este folosit pentru comanda lui P_1 . Circuitul de deplasare al semnalelor de comandă P_G și N_G este de asemenea modificat în vederea reducerii timpului de propagare.

**Fig. 5.2** Schema electrică a circuitului de ieșire în configurație push-pull îmbunătățită

În **Tabel.5.2** sunt prezentați parametrii circuitului nou, unde se observă o îmbunătățire de ~ 50% a timpului de propagare la 1.6V, fiind acceptat de interfețele I²C U_{Fm} și SPI [14]. De asemenea, se observă o scădere de 15% a consumului de curent, întrucât majoritatea pieselor din circuit sunt de tip LV pentru varianta nouă.

Tabel 5.2 Parametrii circuitului de ieșire de tip push-pull îmbunătățit

Parametru	Tensiunea de alimentare	Valoare		
		Min	Typ	Max
t_r [ns]	1.6V	5.7	6.7	8.6
	5.6V	1.4	1.6	1.9
t_f [ns]	1.6V	1	1.2	1.4
	5.6V	1.2	1.4	1.8
t_{PLH} [ns]	1.6V	8.9	11.0	14.2
	5.6V	5.6	6.7	8.5
t_{PHL} [ns]	1.6V	6.9	9.0	12.5
	5.6V	6.2	7.7	10.5
t_{D_NI} [ns]	1.6V	6.4	6.7	7.1
	5.6V	4.5	4.9	5.6
t_{D_PI} [ns]	1.6V	3.7	4.0	4.7
	5.6V	0.7	0.77	0.97
t_{NOV_R} [ns]	1.6V	4.0	4.6	5.8
	5.6V	3.9	4.2	5.1
t_{NOV_F} [ns]	1.6V	2.6	3.1	3.2
	5.6V	4.7	4.9	5.5
I_{DD} @5MHz [mA]	1.6V	0.295	0.297	0.303
	5.6V	1.027	1.031	1.036

5.4 Comparație circuite digitale push pull pentru I²C U_{Fm} și SPI

Interfețele I²C U_{Fm} și SPI sunt proiectate în procesul tehnologic 0.18μm CMOS EEPROM [14]. Circuitele push pull din **Fig.5.1, 5.2** au fost comparate din punct de vedere al timpului de transmisie al datei ($t_{VD, DAT}$). Rezultatele simulate în mediul HSPICE de tip PVT ale parametrului de interes pentru cele două interfețe cu arhitecturile de ieșire în contratimp standard (OUT_V0) și îmbunătățit (OUT_V1) sunt prezentate în **Fig.5.4, 5.5**. Pentru fiecare tip de interfață investigată sunt adăugați parametrii unor produse care folosesc același protocol de comunicație (PCU9661 pentru I²C U_{Fm} – **Fig.5.4** și CAT25128, NXH5014 pentru SPI – **Fig.5.5**). Timpul de transmisie al datei cu arhitectura îmbunătățită prezentată în **Fig.5.2** prezintă îmbunătățiri de peste 50% față de varianta clasică pentru tensiuni de sub 1.9V (**Fig.5.4, 5.5**). De asemenea, performanțele interfețelor cu circuitul propus sunt mult mai bune decât cele obținute cu produsele investigate pentru întreg domeniul de tensiuni de alimentare (**Fig.5.4, 5.5**).

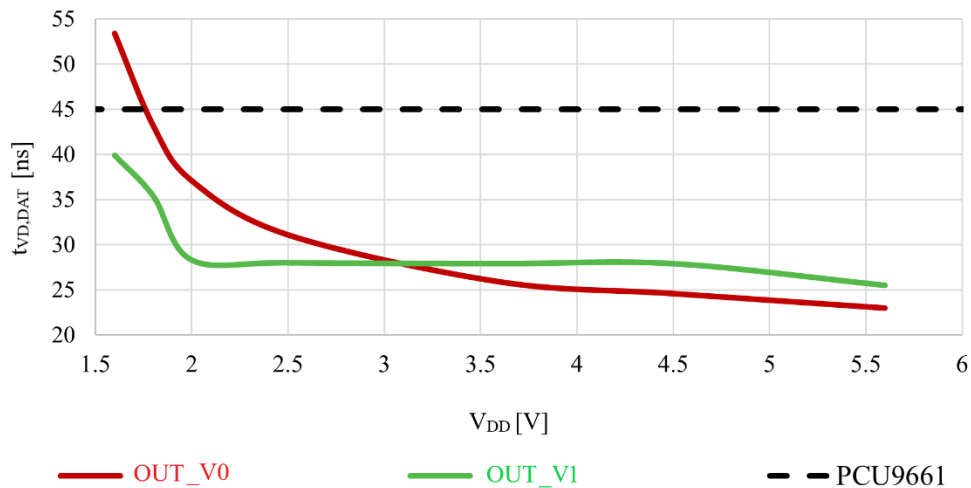


Fig. 5.4 $t_{VD, DAT}$ pentru I2C UFM folosind circuitele push-pull investigate

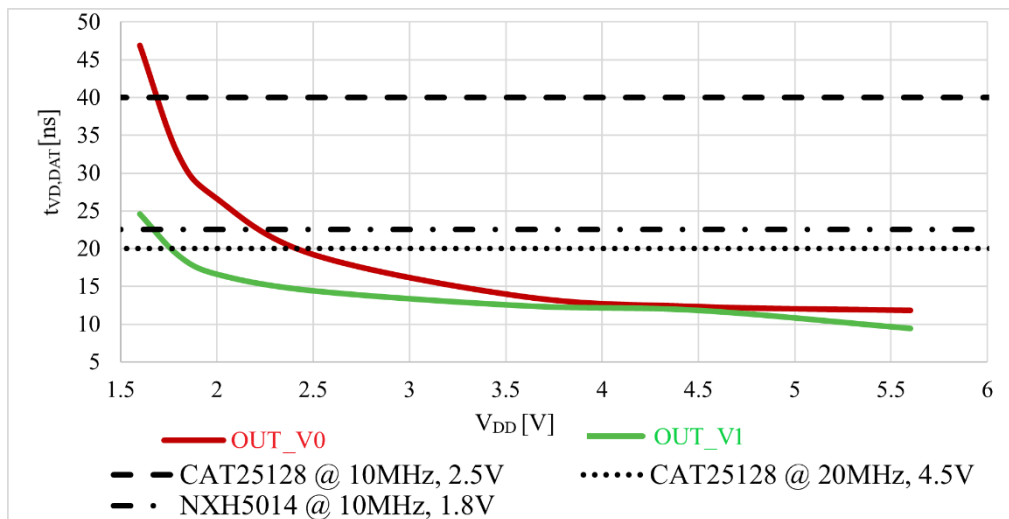


Fig. 5.5 $t_{VD, DAT}$ pentru SPI folosind circuitele push-pull investigate

5.5 Arhitectura standard de tip open drain

În cele ce urmează se studiază circuitele de ieșire de tip open drain recomandate pentru un alt de interfață: I²C HS (3.4MHz). Sunt vizate aceleași aplicații care folosesc interfețele digitale pentru senzorii de temperatură digitali. Circuitul open drain standard (**Fig. 5.6**) a fost proiectat în procesul tehnologic 0.18μm CMOS EEPROM și a fost testat în mediul de simulare HSPICE pentru tensiuni de alimentare de la 1.6V la 5.6V, temperaturi de la -40°C la 125°C, $f_{IN} = 3.4\text{MHz}$, $R_{EXT} = 500\Omega$ și $C_L = 100\text{pF}$. Specific acestui tip de circuit este etajul final cu drena în gol, la borna căruia se adaugă o rezistență externă către tensiunea de alimentare. În **Tabel.5.3** sunt prezentați parametrii circuitului, unde se observă un timp de propagare de maxim 120.71ns, fiind de ~ 2 ori mai mare decât specificația impusă de interfața I²C HS.

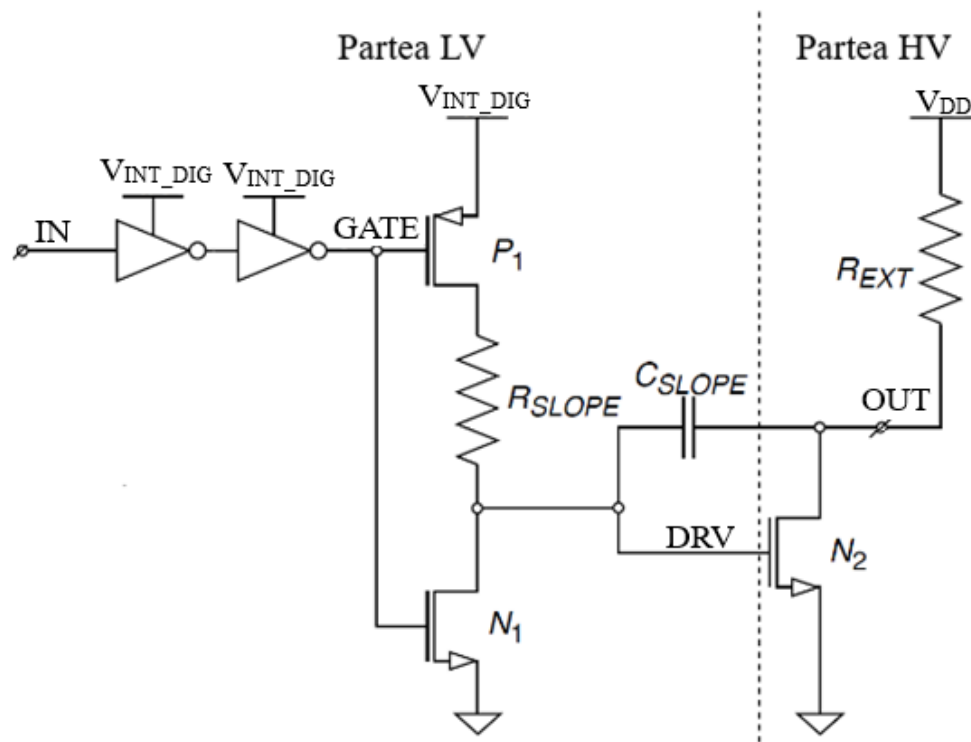


Fig. 5.6 Schema electrică a circuitului open drain în topologie standard

Tabel 5.3 Parametrii circuitului open drain standard

Parametru	Tensiunea de alimentare	Valoare		
		Min	Typ	Max
t_r [ns]	1.6V	111.43	111.72	111.78
	5.6V	110.67	110.78	110.83
t_f [ns]	1.6V	25.03	34.58	56.02
	5.6V	44.16	56	72.07
t_{pLH} [ns]	1.6V	18.74	24.44	36.46
	5.6V	32.27	34.68	39.21
t_{pHL} [ns]	1.6V	40.87	66.61	105.8
	5.6V	66.49	88.39	120.71
$I_{V_{INT_DIG}}$ @ 3.4MHz [μ A]	1.6V	3.09	4.3	5.89
	5.6V	3.66	5.08	6.55

5.6 Arhitectura îmbunătățită de tip open drain

Noutatea circuitului open drain îmbunătățit (**Fig. 5.8**) presupune adăugarea tranzistorului P_2 cu scopul de a crește viteza de lucru a tranzistorului N_2 plasat la ieșirea circuitului [19]. Tranzistorul adăugat este comandat de lanțul format dintr-o serie de porți logice, un circuit Trigger Smith și o referință de tensiune alcătuită din rezistența R_{PU} și tranzistorul N_3 . Circuitul îmbunătățit a fost implementat în procesul tehnologic $0.18\mu\text{m}$ CMOS EEPROM și a fost investigat în aceleași condiții ca și circuitul standard. În **Tabel.5.4** sunt prezentați parametrii circuitului propus. Se poate observa o reducere de peste 50% a timpului de propagare cu noua arhitectură pe întreg domeniul de tensiuni de alimentare. Din punct de vedere al curentului consumat, se observă valori cu 20% mai mari datorită folosirii mai multor dispozitive pentru realizarea unui circuit mai rapid.

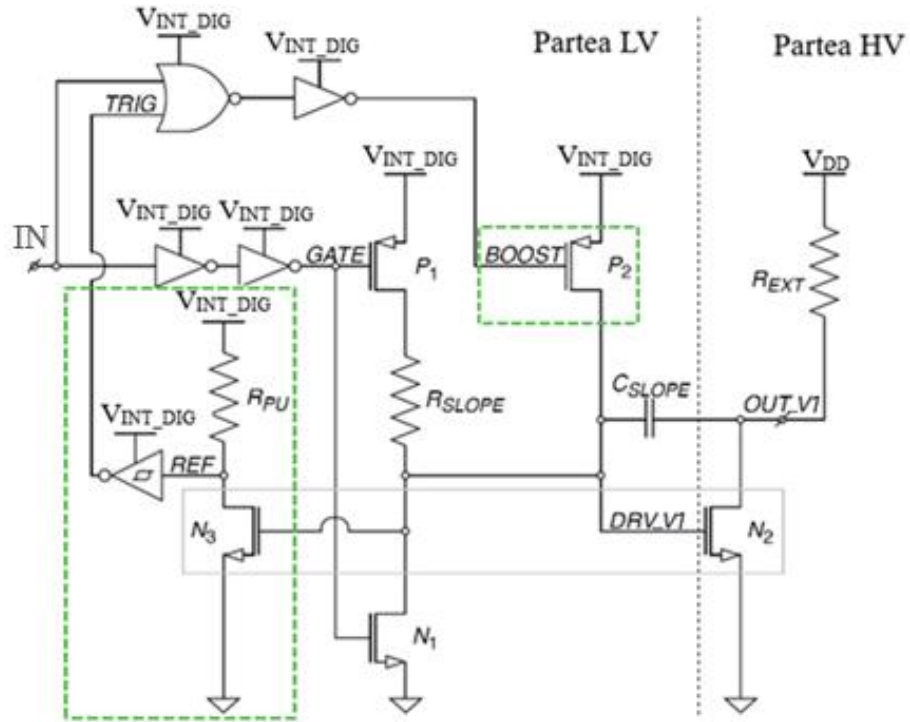


Fig. 5.7 Schema electrică a circuitului open drain îmbunătățit

Tabel 5.4 Parametrii circuitului open drain îmbunătățit

Parametru	Tensiunea de alimentare	Valoare		
		Min	Typ	Max
t_r [ns]	1.6V	111.07	111.31	111.36
	5.6V	109.96	110.31	110.55
t_f [ns]	1.6V	23.13	34.72	56.02
	5.6V	49.97	56.02	73.60
t_{PLH} [ns]	1.6V	17.81	24.24	36.26
	5.6V	32.27	34.68	39.21
t_{PHL} [ns]	1.6V	6.63	15.5	35.27
	5.6V	37.66	44.64	58.45
$avg(i_{V_{INT_DIG}})$ @ 3.4MHz [μ A]	1.6V	4.90	6.47	8.72
	5.6V	5.81	7.7	10.09

5.7 Comparație circuite de ieșire de tip open drain pentru I2C HS

Interfața I²C HS este proiectată în procesul tehnologic 0.18 μ m CMOS EEPROM [19]. Circuitele open drain din Fig.5.6, 5.7 au fost comparate din punct de vedere al timpului de transmisie al datei ($t_{HD,DAT}$). Rezultatele simulate în mediul HSPICE de tip PVT ale parametrului de interes pentru interfața cu arhitecturile de ieșire standard (OUT_V0) și îmbunătățit (OUT_V1) sunt prezentate în Fig.5.8.

Parametrul $t_{HD,DAT}$ rezultat cu ajutorul circuitului open drain îmbunătățit (OUT_V1) prezintă valori de două ori mai bune decât cele obținute cu varianta clasică a arhitecturii de ieșire (OUT_V0). Această îmbunătățire se menține pe tot intervalul de

tensiuni de alimentare analizate (**Fig.5.8**). Valorile obținute pentru $t_{HD,DAT}$ sunt comparate în **Fig.5.8** cu valorile raportate pentru acest parametru pentru două produse comerciale ce folosesc protocolul de comunicație I²C HS: TMP112 [20] și N34TS108 [21]. Timpul de propagare evaluat pe arhitectura îmbunătățită a circuitului open drain este mai mic decât cel al produselor comerciale în toată gama de variație a alimentării (1.6...5.6V).

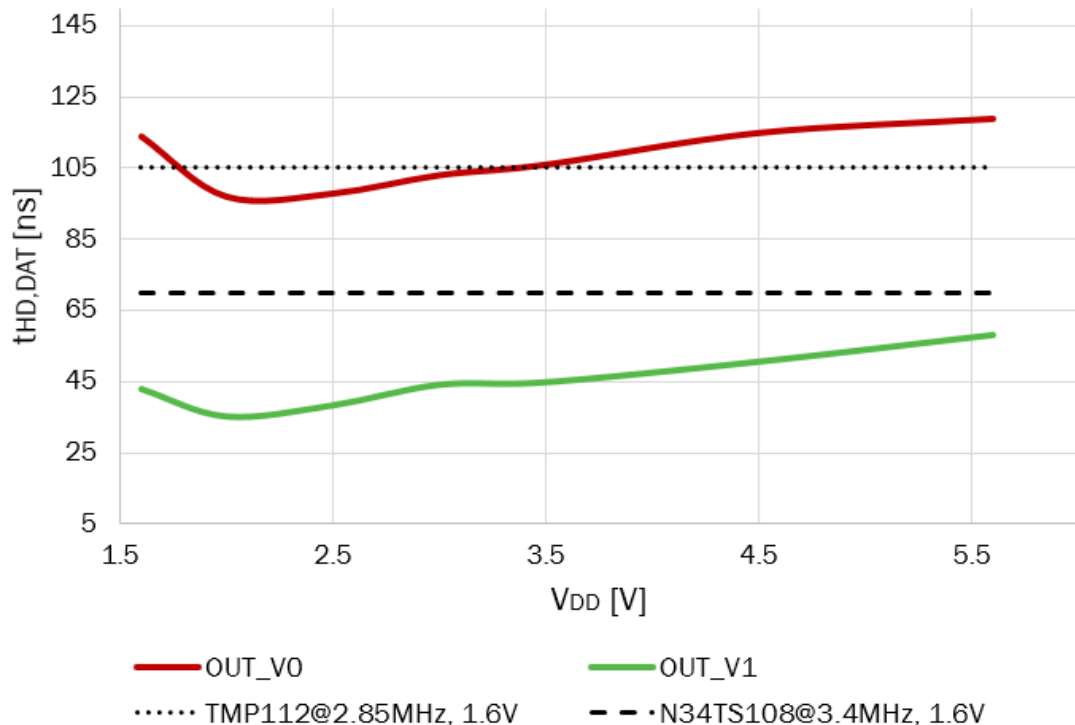


Fig. 5.8 $t_{HD,DAT}$ pentru I²C HS

5.8 Rezultate experimentale DTS I2C HS cu arhitectura open drain îmbunătățită

Senzorul integrat (3.3) cu interfața digitală I²C HS care conține circuitul de ieșire propus în **Fig. 5.3** este implementat în siliciu și măsurat pe structuri încapsulate. În **Fig. 5.9** este investigat parametrul $t_{HD,DAT}$ pentru două circuite încapsulate DTS I²C HS. Acestea sunt măsurate în temperatură (-40°C, 25°C, 90°C, 125°C) pentru tensiuni de la 1.6V la 3.6V la $f_{SCL} = 3.4\text{MHz}$ [22].

Timpul de transmisie al datei investigat în **Fig. 5.9** prezintă valori între 61.18ns și 85.74ns cu variația temperaturii și a tensiunii aplicate. Valoarea maximă este obținută la 1.6V și -40°C, iar valoarea minimă este atinsă la 125°C și 1.9V. Se observă o variație mai mare a timpului de transmisie la tensiuni joase cuprinse între 1.6V și 1.9V.

Măsurătorile obținute în **Fig. 5.9** prezintă o îmbunătățire de 30% față de valorile simulate cu arhitectura clasică open drain pe întreg intervalul de tensiuni de alimentare investigate (t_{HD,DAT_V0}). Totuși, rezultatele măsurate sunt cu ~ 40% mai mari decât rezultatele simulate cu arhitectura îmbunătățită (t_{HD,DAT_V1}). Acest lucru se datorează

faptului că nu doar circuitele de ieșire introduc întârzieri pe calea de transmisie a datei. Circuitele de intrare ale interfeței seriale (IN_SDA, IN_SCL - Fig.3.3) conțin o serie de piese proiectate pentru domeniul HV care pot determina întârzieri considerabile în propagarea datelor.

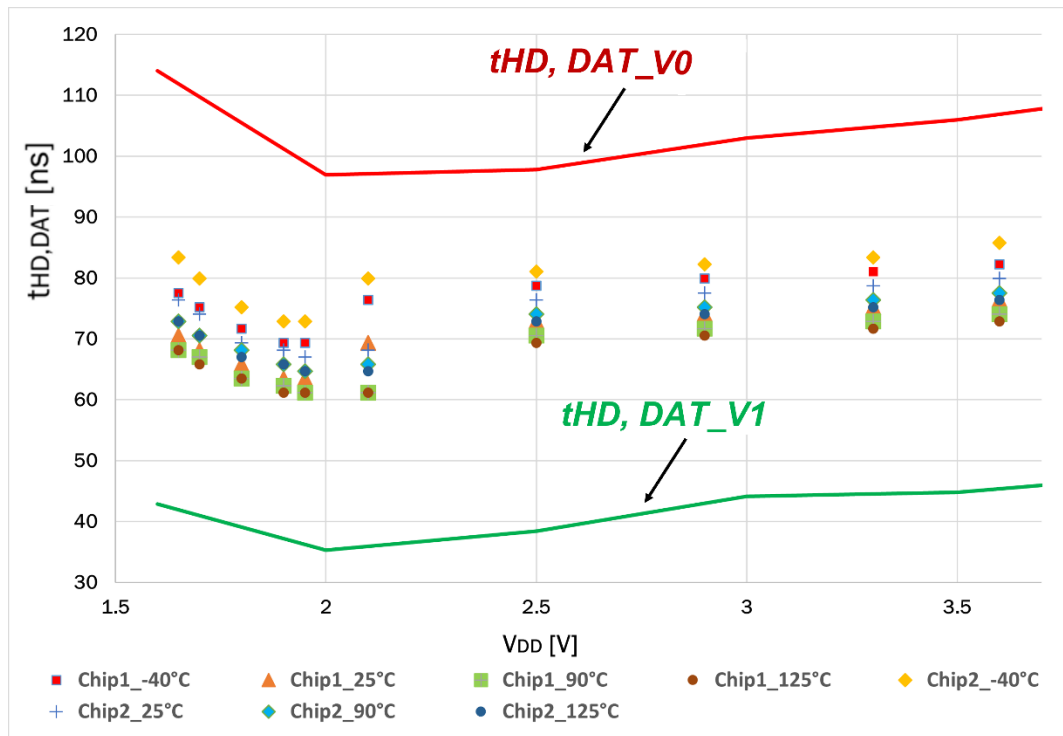


Fig. 5.9 $t_{VD, DAT_{HL}}$ - Rezultate experimentale VS. Simulări PVT

Capitolul 6

Senzorul EEPROM DTS I²C HS în tehnologie CMOS EEPROM

6.1 Introducere

Senzorul de temperatură digital (EEPROM DTS I²C HS) care conține referința de tensiune cu circuitele autozero propuse (Fig.4.4), precum și interfața I²C HS cu arhitectura îmbunătățită de tip open drain (Fig.5.7) a fost implementat în procesul tehnologic 0.18μm CMOS EEPROM. Pentru obținerea performanțelor legate de acuratețe se investighează în continuare circuitele de ajustare a erorii. Se trimerează

referința de tensiune cu ajutorul celulelor de memorie EEPROM în vederea obținerii unei erori minime de temperatură.

6.2 Metode de ajustare a erorilor

Senzorii DTS necesită o ajustare pentru obținerea cerințelor dorite prin aplicarea unui cod digital de trim. Metodele convenționale presupun modificarea permanentă a circuitului cu ajutorul laserului (“laser fuse”) sau prin alterarea siguranțelor de metal (“metal fuse”). De asemenea, există metoda de ajustare folosind celulele programabile o singură dată (OTP), precum și celulele de memorie EEPROM. Beneficiul utilizării celulelor EEPROM pentru ajustarea senzorului permite folosirea unui număr crescut de coduri digitale pentru calibrarea circuitului cu un cost redus de producție.

6.3 Circuitul de ajustare EEPROM pentru DTS I²C HS

Schema bloc a circuitului de ajustare EEPROM (EEPROM TRIM) pentru senzorul integrat este ilustrată în **Fig.6.1**. Două celule EEPROM (EEPROM_L și EEPROM_R) sunt folosite pentru obținerea unui bit de trim programabil. Aceste două celule de memorie sunt programate cu ajutorul unui bloc dedicat (PROG EEPROM) cu dată complementară. În funcție de cum sunt programate celulele EEPROM, se obțin valori de 0 sau 1 logic pentru semnalul de ieșire OUT.

Avantajul folosirii acestui tip de circuit este posibilitatea reprogramării celulelor ori de câte ori este necesar. Pentru ajustarea senzorului integrat se folosesc 16 circuite de ajustare, respectiv 32 de celule de memorie EEPROM. Astfel, semnalul de trimerare va fi un cod digital pe 16 biți, care va oferi 2^{16} combinații de ajustare.

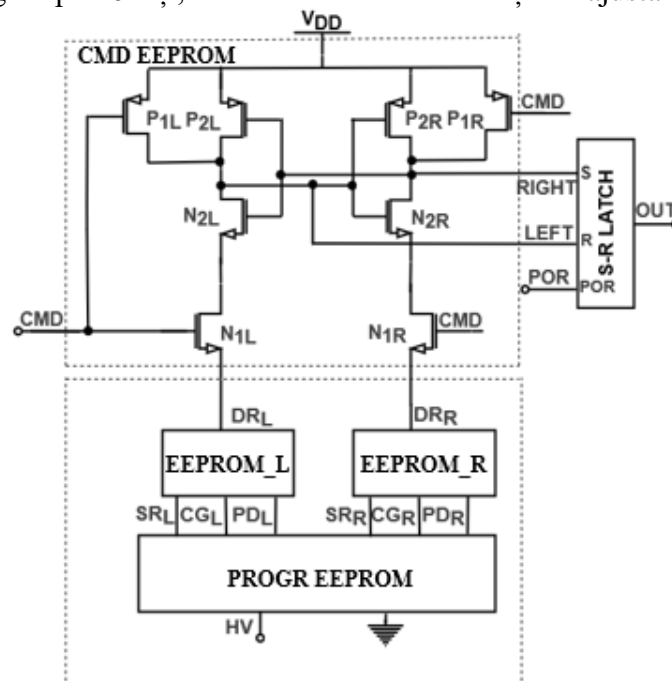


Fig.6.1 Schema bloc a circuitului de ajustare EEPROM (EEPROM TRIM)

6.4 Arhitectura îmbunătățită EEPROM DTS I²C HS

Schema senzorului EEPROM DTS I²C HS este prezentată în **Fig.6.2**. Circuitul propus conține senzorul DTS I²C (**Fig.3.1**), precum și 16 circuite de ajustare EEPROM TRIM prezentate în **Fig. 6.1**. Detectorul de temperatură integrat cu interfața I²C de tip High Speed conține toate îmbunătățirile prezentate în capitolele 4 și 5: referința de tensiune DTS I²C cu circuitele autozero propuse (**Fig. 4.3**), precum și interfața I²C HS cu arhitectura nouă a blocului de ieșire în topologie open drain (**Fig. 5.7**). De asemenea, senzorul DTS I²C HS conține integrat circuitul EEPROM TRIM (**Fig. 6.1**) care este folosit pentru ajustarea REF DTS I²C (**Fig. 4.1**) în vederea obținerii unei erori minime de temperatură pentru senzorul integrat.

Varianta completă a EEPROM DTS I²C HS (**Fig.6.2**) a fost implementată în siliciu în procesul tehnologic 0.18μm CMOS EEPROM [23]. S-au realizat teste și măsuratori pe plachetă și pe structuri încapsulate la diverse temperaturi (de la -20...125°C) și tensiuni de alimentare (de la 1.7V la 3.6V). Datele experimentale sunt comparate cu simulările.

Pentru ajustarea erorii de temperatură, se trimerează referința de tensiune REF DTS I²C, obținându-se diverse valori ale curentului de referință în funcție de codul de trim aplicat (**Fig.6.3(a)**). În acest fel, se obține plaja de corecție a temperaturii (**Fig.6.3(b)**). În procesul de testare, este ales codul digital optim pentru care se obține acuratețea dorită.

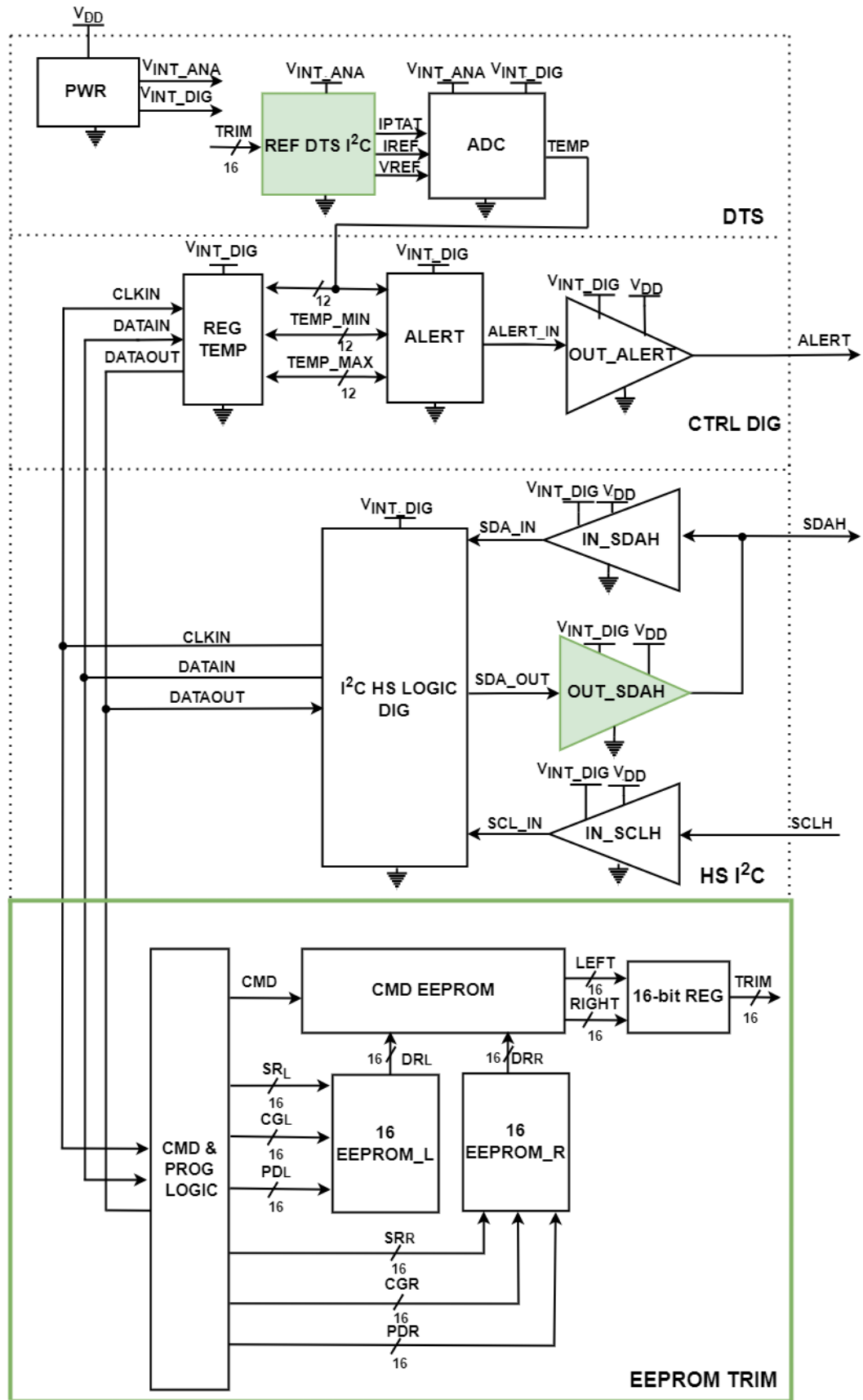


Fig.6.2 Schema bloc EEPROM DTS I²C HS

Dependența curentului de referință I_{REF} al senzorului EEPROM DTS I^2C HS (**Fig. 6.2**) în funcție de temperatură și de codul de trim aplicat este investigată în simulare HSPICE și este reprezentată în **Fig.6.3(a)**. În urma analizei de curent continuu, I_{REF} poate fi ajustat între $7.5\mu A$ și $8.5\mu A$ în funcție de codul de trim aplicat. Folosind codurile de trim minim (toți cei 16 biți sunt 0) și maxim (toți cei 16 biți sunt 1) se poate obține plaja de corecție a temperaturii reprezentată în **Fig.6.3(b)**. Senzorul EEPROM DTS I^2C HS (**Fig.6.2**) poate fi ajustat între $\pm 30^\circ C$ (**Fig.6.3(b)**). Alegerea codului de trim optim pentru obținerea acurateții dorite se realizează la nivel de circuit încapsulat.

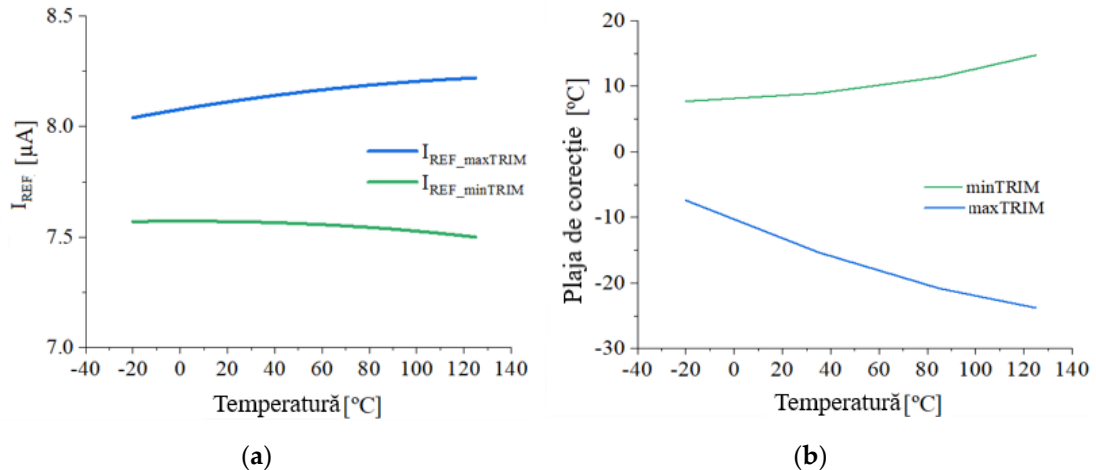


Fig.6.3 (a) I_{REF} în funcție de TRIM; (b) Plaja de corecție a temperaturii

Senzorul EEPROM DTS I^2C HS (**Fig. 6.2**) este ajustat cu un cod digital optim în timpul procesului de testare pentru fiecare circuit încapsulat. În **Fig. 6.4** este reprezentată eroarea măsurată pentru 5 circuite EEPROM DTS I^2C HS la 1.8V pe întreg domeniul de temperatură. Se poate observa o acuratețe de $\pm 1^\circ C$. Pentru majoritatea circuitelor testate, eroarea variază cu $\pm 0.5^\circ C$ în gama de temperaturi măsurate.

Investigațiile au continuat pentru încă 20 de circuite încapsulate, supuse la temperaturi între $-20\dots 125^\circ C$ și tensiuni de alimentare de 1.7V...1.9V. Rezultatele măsurate cuprind erori între $-1.0^\circ C$ și $+1.56^\circ C$ (min, max). Media erorii la 1.8V pe întreaga plajă de temperaturi detectate este centrată pe $0.44^\circ C$ cu o deviație standard de $0.44^\circ C$.

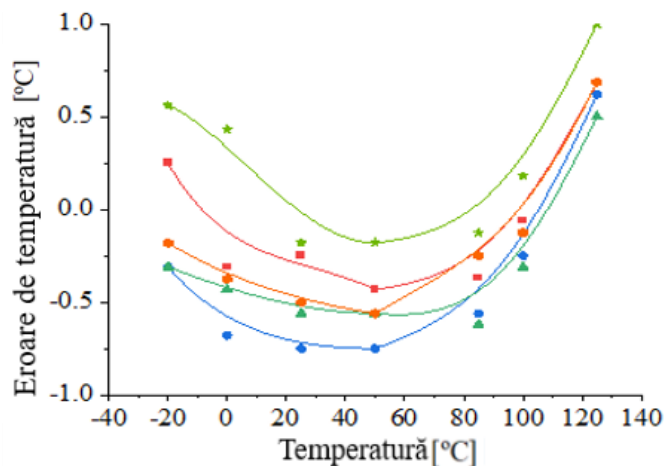


Fig. 6.4 Eroarea măsurată pentru 5 EEPROM DTS I^2C HS la 1.8V

6.5 Comparație EEPROM DTS I2C HS cu alți senzori digitali integrați

Performanțele sensorului propus (**Fig.6.2**) sunt comparate cu patru familii de senzori digitali de actualitate. Sensorul propus funcționează până la 3.4MHz, ca și TMP1075 și N34TS108. Eroarea de temperatură oferită de EEPROM DTS I²C HS este cu $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ mai mică decât N34TS00 și N34TS04. Din punct de vedere al curentului disipat, sensorul propus consumă până la 4 ori mai puțin decât N34TS00/04. Aria ocupată de sensorul propus este de ~3 ori mai mică decât N34TS00 și N34TS04.

Tabel 6.1 Comparație EEPROM DTS I²C HS cu patru familii de DTS

Circuit integrat	Tensiunea de alimentare [V]	Gama de temperaturi [°C]	Eroare de temperatură [°C]	Frecvența de lucru pentru interfață [MHz]	Curent consumat [μA]	Arie consumată [mm ²]	Aplicație tipică
EEPROM DTS I ² C HS	1.7...3.6	-20...125	+1.56/-1.0	3.4	235	2.07	DDR4
N34TS00	1.7...1.9	-20...125	± 3	0.4	500	2x3x0.75	DDR4
N34TS04	2.2...5.5	-20...125	± 3	1	1000	2x3x0.75	DDR4
TMP1075	1.6...5.5	-55...125	± 2	3.4	15	1.9	Electronice
N34TS108	1.4...3.6	-40...125	± 1	3.4	6	0.96	Electronice

Capitolul 7

Concluzii

7.1 Rezultate obținute

Lucrarea de doctorat este consacrată senzorilor de temperatură digitali cu interfață serială integrată utilizați în cadrul modulelor de memorie DDR4. Pentru acest sistem s-au proiectat și implementat blocuri noi de mică putere: circuitul autozero, circuitele de ieșire digitale de tip open drain și push-pull, circuitul de ajustare al sensorului cu celule EEPROM. Sensorul de temperatură cu interfață serială I2C de tip High Speed ajustat cu celule de memorie EEPROM (EEPROM DTS I2C HS) este

implementat în tehnologia CMOS EEPROM de $0.18\mu\text{m}$ și de joasă tensiune. Funcționarea circuitului a fost validată prin măsuratori pe structuri încapsulate. În ultimul rând, sunt analizate performanțele sensorului propus în raport cu produse similare de pe piața semiconductoare.

Capitolul 2 oferă o vedere de ansamblu asupra câtorva topologii de senzori de temperatură și asupra circuitelor de prelucrare a semnalului de la ieșire. Au fost trecuți în revista parametrii de interes ai senzorilor de temperatură digitali cu interfață serială fiind din ce în ce mai căutați pe piața semiconductoare a modulelor de memorie DIMM.

Capitolul 3 a prezentat arhitectura sensorului de temperatură digital formată din circuitul propriu zis de detecție și prelucrare a temperaturii, circuitul de control digital precum și interfața serială care realizează comunicarea cu sistemul digital.

Tot în cadrul capitolului 3 au fost prezentate tipurile de interfețe digitale care pot realiza comunicarea dintre sensorul propriu zis și CPU. Au fost trecute în revistă tipurile de interfeță I²C, precum și frecvența de lucru impusă de protocol. În funcție de modul de interfață ales, este necesar un anume circuit de ieșire digital care poate fi de tip open drain sau push-pull.

Capitolul 4 este dedicat circuitului de autozero din componența referinței de tensiune a sensorului propriu zis. Acest bloc servește pentru eliminarea offsetului. Mai întâi, se studiază prin simulări HSPICE o arhitectură standard de circuit autozero proiectată în tehnologia CMOS EEPROM de $0.18\mu\text{m}$. S-a constatat o fugă considerabilă în timp a tensiunii de referință pe măsură ce temperatura crește, la tensiuni de alimentare joase. Acest comportament are un impact negativ asupra funcționalității întregului sensor, deoarece tensiunea de referință trebuie să fie constantă pe parcursul intervalului de timp în care se realizează conversia analog digitală (cca 200ms). Un drift în timp poate fi decisiv pentru evaluarea temperaturii. Astfel, a fost propusă o arhitectură nouă pentru circuitul autozero care să elimine fenomenul observat în simulare. Varianta propusă asigură o tensiune constantă. Acest comportament a fost probat prin simulări PVT și Monte Carlo.

De asemenea, referința de tensiune cu circuitul propus a fost testată în siliciu pentru validarea arhitecturii noi a circuitului autozero. S-au realizat măsuratori la nivel de plachetă pentru temperaturi de la 25°C la 90°C , tensiuni de test de la 2.7V la 3.3V pe diverse intervale de timp 200ms și 5s. Capturile de pe osciloscop confirmă o tensiune constantă pentru întreg domeniul de temperatură și timp menționate.

În capitolul 5 sunt investigate circuite de ieșire ale interfețelor seriale (I²C HS, I²C UFM, SPI). Mai întâi, s-au trecut în revistă arhitecturile în topologie clasică. Noile tendințe ale dezvoltării senzorilor pentru DIMM necesită interfețe care lucrează la viteze cât mai rapide și tensiuni de alimentare cât mai joase.

Interfața I²C UFM lucrează la frecvențe de 5MHz cu o capacitate de sarcină de 50pF și curenți de sarcină de 3mA. Arhitectura clasică a circuitului de tip push pull a fost proiectată și simulată pentru 1.6...5.6V, $-40...125^{\circ}\text{C}$, cu variația procesului tehnologic. Timpul de propagare maxim obținut cu varianta clasică este de 28.1ns, reprezentând mai mult de 25% din semiperioada frecvenței de lucru. Acest lucru poate influența negativ transmiterea corectă a datelor în cadrul interfeței digitale analizate. Astfel, se propune o arhitectură nouă pentru topologia push-pull care să satisfacă cerințele impuse de interfețele rapide de actualitate. Circuitul propus este analizat în aceleași condiții ca cel clasic. Cele două arhitecturi de circuite de ieșire au fost incluse în cadrul a două interfețe: SPI și I²C UFM. Circuitul propus este cu 50% mai rapid în ambele cazuri.

Tot în capitolul 5 a fost proiectat în procesul tehnologic $0.18\mu\text{m}$ CMOS EEPROM circuitul clasic de ieșire de tip open-drain și a fost simulat pentru 1.6...5.6V,

-40...125°C la frecvența de lucru a interfeței I²C HS de 3.4MHz. Timpul maxim de răspuns al circuitului este de 130ns, limitând propagarea informației la viteze de până la 1.7MHz. O arhitectură nouă pentru circuitul de tip open drain este propusă pentru eliminarea neajunsurilor topologiei clasice. În aceleași condiții de simulare, performanțele circuitului nou sunt superioare cu peste 50%, rezultând un timp maxim de propagare de 58ns.

Mai mult decât atât, sensorul de temperatură cu interfața I²C HS care conține circuitul propus de tip open drain este implementat în siliciu. Timpul de propagare cu arhitectura nouă a fost măsurat la temperaturi de la -40°C până la 125°C și tensiuni de alimentare de la 1.6V la 3.6V pe structuri încapsulate, rezultând valori cuprinse între 61.13ns și 85.74ns. Astfel, a fost validată folosirea circuitului nou de tip open drain pentru interfața I²C HS a sensorului de temperatură digital.

Capitolul 6 a prezentat sensorul de temperatură digital care înglobează toate îmbunătățirile propuse în capitolele 4 și 5. În plus, au fost investigate modalitățile de ajustare a sensorului digital în vederea obținerii unei erori de temperatură impuse de aplicația aleasă. Pentru modulele de memorie este țintită o eroare de temperatură de ±2°C în gama de temperaturi cuprinsă între -20...125°C pentru tensiuni de alimentare de la 1.7V la 3.6V. Metoda de ajustare folosind celulele de memorie EEPROM a fost considerată ca fiind cea mai eficientă pentru sensorul integrat.

Senzorul de temperatură digital cu interfața digitală I2C High Speed și circuit de ajustare EEPROM a fost proiectat în procesul tehnologic CMOS EEPROM de 0.18μm și implementat în siliciu. S-au efectuat măsuratori pe 25 de circuite încapsulate, la temperaturi cuprinse între -20...125°C și tensiuni de alimentare de 1.7V...1.9V. Din măsuratori rezultă o eroare absolută de temperatură cu valori între -1.0°C și +1.56°C.

Tot în capitolul 6 a fost comparat sensorul propus cu patru familii de senzori comerciali pe piața semiconductoare. EEPROM DTS I2C propus prezintă performanțe comparabile cu produsele N34TS00 și N34TS04 din punct de vedere al domeniului temperaturilor detectate, precum și al tensiunilor de alimentare. În schimb, eroarea de temperatură oferită de EEPROM DTS I2C HS este mai mică cu aproximativ ±0.5°C față de N34TS00 și N34TS04. De asemenea, din punct de vedere al curentului disipat, sensorul propus consumă până la 4 ori mai puțin decât circuitul N34TS04. Aria ocupată de EEPROM DTS I2C HS este de aproximativ 3 ori mai redusă decât produsele N34TS00 și N34TS04.

7.2 Contribuții originale

Lucrarea de față cuprinde o serie de elemente originale, diseminate în decursul perioadei de cercetare în diverse publicații. Acestea includ brevete de invenție, conferințe de specialitate, jurnale științifice și evenimente de profil. Sunt evidențiate următoarele aspecte cu caracter original:

- Sinteze din literatura de specialitate privind:
 - Piața senzorilor de temperatură integrați;
 - Senzorii de temperatură digitali cu interfață serială integrată pentru modulele de memorie DDR4: arhitecturi, parametrii, mod de funcționare, aplicații.
- Arhitecturi îmbunătățite pentru câteva blocuri interne ale sensorului de temperatură digital:

- Circuite de auto-zero folosite în cadrul referinței de tensiune DTS I²C. Acest circuit a făcut obiectul unui brevet de invenție US [2].
- Circuit de ieșire de tip push-pull pentru interfața serială I²C Ultra Fast Mode [8], [9]. Acest circuit a făcut obiectul unui brevet de invenție US [4].
- Circuit de ieșire de tip open drain pentru interfața serială I²C High Speed [1], [6], [7].
- Circuit de ajustare cu celule de memorie EEPROM pentru trimerarea senzorului de temperatură digital, în vederea optimizării performanțelor sale [3], [5].
- Implementarea în siliciu în tehnologia CMOS EEPROM de 0.18 μm a sistemului EEPROM DTS I²C HS și separat a unor blocuri interne cu arhitectură nouă propuse pentru senzorul de temperatură digital:
 - Senzorul de temperatură EEPROM DTS I²C HS cu circuitul de ajustare EEPROM [3].
 - Circuitul îmbunătățit auto-zero cu tranzistoare de tip LV și HV pentru eliminarea driftului în timp al tensiunii de referință [2].
 - Circuitul îmbunătățit de ieșire în configurație open drain pentru interfața I²C HS [4], [8], [9].
- Simulări standard, PVT și Monte Carlo pentru mai multe tipuri de senzori de temperatură integrați cu diverse interfețe seriale și a tuturor blocurilor interne din componența senzorului integrat. S-au simulat pentru comparație circuite componente în varianta standard din literatură precum și varianta îmbunătățită propusă în teză.
- Validarea prin comparații simulări și măsurători a funcționării corecte a senzorului de temperatură EEPROM DTS I²C HS și a blocurilor interne cu arhitectură îmbunătățită:
 - Validarea funcționării senzorului în gama de temperaturi de la -20...125°C, tensiuni de alimentare de la 1.6...3.6V și frecvențe de transmisie a datei de 3.4MHz.
 - Validarea noului circuit auto-zero în siliciu cu ajutorul măsurătorilor la nivel de plachetă pentru diverse temperaturi și tensiuni de alimentare.
 - Validarea interfeței I²C HS cu noul circuit de ieșire de tip open drain în siliciu. Sunt realizate măsurători la nivel de circuite încapsulate pentru diverse temperaturi și tensiuni de alimentare [1].
 - Validarea EEPROM DTS I²C HS.
- Comparația senzorului EEPROM DTS I²C HS propus cu patru familii de senzori de temperatură digitali cu interfață serială integrată comercializați pe piața semiconductoare.

7.3 Lista Lucrărilor Publicate

Mai jos sunt listate lucrările proprii cu tematica tezei de doctorat. În aceste lucrări au fost inserate toate contribuțiile originale prezentate în paragraful anterior.

Acest lucru este precizat prin indicațiile bibliografice scrise după fiecare contribuție. Lucrările [10] și [11] au fost publicate înainte începerii programului de doctorat. Conținutul lor a ajutat la stabilirea tematicii tezei de doctorat și a direcțiilor de dezvoltare a cercetării.

[1] **A Dragan (Vasile)**, A. Negut, A. Enache, I. Hurez, V. Anghel, G. Brezeanu, “*In Focus: Data Hold Time for Temperature Sensors with High Speed I2C Interface*”, in **Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS)**, 2023, 11-13 Oct. 2023, BDI, Sinaia, Romania, **IEEE**, DOI: 10.1109/CAS59036.2023.10303655.

[2] **A. Dragan**, A. Enache, A. Negut, A. Tache, “*Auto-Zero Amplifier for Reducing Output Voltage Drift Over Time*”, Patent, **US11283419 B2**, Mar.22, 2022.

[3] **A. Dragan (Vasile)**, A. Negut, A. Tache, G. Brezeanu, “*A Digital Improvement – Trimming a Digital Temperature Sensor with EEPROM Reprogrammable Fuses*”, **Sensors** **2021**, 21(5), 1700, Mar. 2021, Q2 (2023) IF=3.9, ISI, **WOS:000628544800001**, DOI: 10.3390/s21051700.

[4] A. Enache, **A. Dragan**, A. Tache, “*Digital Buffer Circuit*”, Patent, **US10707872 B1**, Jul. 7, 2020.

[5] **A. Dragan (Vasile)**, A. Negut, A. Tache, G. Brezeanu, “*A Reprogrammable Fuse with EEcells for trimming a Temperature Sensor*”, **Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS)**, 2020, 07-09 Oct. 2020, Sinaia, Romania, pp. 111-114, ISI, **WOS:000637264600025**, DOI: 10.1109/CAS50358.2020.9268008.

[6] **A. Dragan**, A. Enache, A. Negut, A. Tache, G. Brezeanu, “*An improved digital output buffer for a digital temperature sensor with an I2C high speed interface*”, **Solid State Electronic Letters**, Volume 1, Issue 2, Jul 2019, pp 147-151 (2019),**SCOPUS**, DOI: 10.1016/j.ssel.2020.01.003.

[7] **A. Dragan**, A. Enache, A. Negut, A.M. Tache, G. Brezeanu, *A Fast Response Output Buffer for an I2C High Speed Interface*, **Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS)**, 2019, 09-11 Oct. 2019, Sinaia, Romania, pp. 141-144, ISI, **WOS:000514295300029**, DOI: 10.1109/SMICND.2019.8924012.

[8] **A. Dragan**, A. Enache, A. Negut, A.M. Tache, G. Brezeanu, *An Improved I/O Pin for Serial Communication Interfaces*, **Romanian Journal of Information Science and Technology (ROMJIST)**, Vol.22, no. 2, 2019, pp 158-180, Q2(2023) IF=3.5, ISI, **WOS:000472166600006**.

[9] **A. Dragan**, A. Enache, A. Negut, A.M. Tache, G. Brezeanu, *A High Performance Mixed-Voltage Digital Output Buffer*, **Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS)**, Oct. 2018, 10-12 Oct.2018, Sinaia, Romania, pp 179-182, ISI, **WOS:000514386700034**, DOI: 10.1109/SMICND.2018.8539840.

[10] **A. Dragan**, A. Negut, A. Enache, V. Anghel, G. Brezeanu, *Charge retention of a Floating gate Transistor for a Reset Controller*, **Romanian Journal of Information Science and Technology (ROMJIST)**, Vol.21, no. 1, 2018, pp 34-48, ISI, Q2(2023), IF=3.5, **WOS:000433876800003**.

[11] **A. Dragan**, A. Negut, V. Anghel, A. Enache G. Brezeanu, *A matter of isolation — A reset controller using Deep N-Well and floating gate technologies*, **Proceedings of**

the International Semiconductor Conference (CAS), Oct. 2017, 11-14 Oct.2017, Sinaia, Romania, pp 297-300, DOI: 10.1109/SMICND.2017.8101230, ISI, WOS:000425844500066.

Lista de lucrări originale include:

- 2 brevete de invenție cu indicativul **B**;
- 7 lucrări **ISI**:
 - 3 articole în reviste Q2 (2023): o revistă cu **IF = 3.5** și alta cu **IF = 3.9**;
 - 4 lucrări în volumele conferinței CAS;
- 1 lucrare **IEEE**;
- 1 lucrare **SCOPUS**.

7.4 Perspective de Continuare a Cercetării

Cercetarea viitoare va avea în vedere proiectarea și implementarea în siliciu a senzorului de temperatură digital cu interfață serială I³C pentru modulele de memorie DDR5, fiind generația următoare lui DDR4. Cerințele unui astfel de senzor presupun viteze de transmisie de până la 12.5MHz cu acuratețe de $\pm 1^\circ\text{C}$ pentru temperaturi cuprinse între $-55...150^\circ\text{C}$ și tensiuni de alimentare de la 1.4V. De asemenea, se va lua în calcul funcționarea interfeței I³C pentru tensiuni de alimentare de la 1V, capacități de sarcină de 30pF și curenți de sarcină de $\pm 4\text{mA}$.

Un punct de plecare al proiectării senzorului cu interfața I³C este circuitul de ieșire de tip push-pull propus în această lucrare care lucrează la frecvențe de până la 10MHz, tensiuni de alimentare de la 1.6V, capacități de sarcină de 30pF și curenți de sarcină de $\pm 3\text{mA}$. De asemenea, au fost demarate investigații pentru a testa circuitul de ieșire în topologie push-pull de la 1V și 12.5MHz, arhitectura inovatoare fiind propusă în cadrul brevetului de invenție:

- A. Enache, **A. Dragan**, A. Tache, “*Digital Buffer Circuit*”, Patent, US10707872 B1, Jul. 7, 2020.

Bibliografie

- [1] S. Byun, „Categorization and Characterization of Time Domain CMOS Temperature Sensor,” *Sensors*, vol. 20, nr. 6700, pp. 1-21, 2020.
- [2] G. C. M. Meijer, G. Wang și A. Heidary, „3-Smart temperature sensors and temperature sensor systems,” în *Smart Sensors and MEMSs*, Woodhead Publishing, 2018, pp. 57-85.
- [3] B. Yousefzadeh și K. A. A. Makinwa, „A BJT-Based Temperature-to-Digital Converter With a $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 3 σ -Inaccuracy From -40°C to $+180^\circ\text{C}$ Using Heat-er-Assisted Voltage Calibration,” *IEEE Journal of Solid State Circuits*, vol. 55, nr. 2, pp. 369-377, 2020.
- [4] „NXP Semiconductor, DDR memory module temp sensor with integrated SPD, 3.3V”.
- [5] G. C. M. Meijer, G. Wang și A. Heidary, 3 - Smart temperature sensors and temperature sensor systems, In Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Smart Sensors and

- MEMs (Second Edition), Woodhead 370 Publishing, 2018, pp. 57-85, ISBN 9780081020555,, 2018.
- [6] „ON Semiconductor, Low-Voltage Digital Temperature Sensor N34TS108, Foaie de catalog”.
- [7] „Texas Instruments, Temperature Sensor with I2C and SMBus Interface with Alert Function in SOT-23 Package TMP101, Foaie de catalog”.
- [8] A. Aita, M. A. P. Pertijs, K. A. A. Makinwa, J. H. Huijsing și G. C. M. Meijer, „Low Power CMOS Smart Temperature Sensor with a batch calibrated inaccuracy of 0.25C (3s) from -70C to 130C,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 13, nr. 5, 2015.
- [9] A. Ballo, G. Bruno, A. D. Grasso și M. V. , „A Compact Temperature Sensor with a resolution FOM of 1.82pJK2,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, nr. 10.
- [10] A. Setiabudi, H. Tamura și K. Tanno, „CMOS Temperature Sensor with Programmable Temperature Range for Biomedical Applications,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 8, nr. 2, 2018.
- [11] A. Aita, M. Pertijs și K. A. A. Makinwa, „A CMOS Smart Temperature Sensor with a Batch-Calibrated Inaccuracy of 0.25 from -70C to 130C,” *2009 IEEE International Solid-State Circuits Conference*.
- [12] M. Caselli, M. Ronchi și A. Boni, „An Integrated Low Power Temperature Sensor for Food Monitoring Applications,” *2021 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, 2021.
- [13] Y. Niu, W. Lu, Y. Zhang, S. Yu și Z. Chen, „A Low-Power Self Calibration Digital Output CMOS Temperature Sensor with 0.1C Inaccuracy from -40C to 85C,” *2017 IEEE 12th International Conference on ASIC (ASICON)*, 2018.
- [14] A. M. Dragan, A. Enache, A. Negut, A. M. Tache și G. Brezeanu, „An Improved I/O Pin for Serial Communication Interfaces,” *Romanian Journal of Information Science and Technology*, vol. 22, pp. 158-180, 2019.
- [15] A. Dragan, A. Enache, A. Negut, A. Tache și G. Brezeanu, „A High Performance Mixed-Voltage Digital Output Buffer,” în *Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS)*, Sinaia, Romania, 2018.
- [16] NXP Semiconductor, „PCU9661, Foaie de catalog,” [Interactiv]. Available: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCU9661.pdf>.
- [17] A. Drăgan. A. Enache. A. Negut. A. Tache , „Auto-Zero Amplifier for Reducing Output Voltage Drift Over Time”. Brevet US11283419B2, 22 Mar 2022.
- [18] A. Enache, A. Dragan și A. Tache, „Digital Buffer Circuit”. Brevet US10707872B2, 7 Jul 2020.
- [19] A. Dragan, A. Enache, A. Negut, A. M. Tache și G. Brezeanu, „A Fast Response Output Buffer for an I2C High Speed Interface,” *2019 International Semiconductor Conference (CAS)*, Sinaia, Romania, pp. pp. 141-144, 2019.

- [20] A. Drăgan. (Vasile), A. Negut, A. Enache, I. Hurez, V. Anghel și G. Brezeanu, „In Focus: Data Hold Time for Temperature Sensors with High Speed I2C Interface,” *Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS), 2023, 11-13 Oct. 2023.*
- [21] A. Drăgan. (Vasile), A. Negut, A. Tache și G. Brezeanu, „A Reprogrammable Fuse with EECells for trimming a Temperature Sensor,” *Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS), 2020, 07-09 Oct. 2020, Sinaia, Romania, pp. 111-114..*
- [22] A. Drăgan. (Vasile), A. Negut, A. Tache și G. Brezeanu, „A Digital Improvement – Trimming a Digital Temperature Sensor with EEPROM Reprogramable Fuses,” *Sensors 2021, 21(5), 1700, Mar. 2021.*