

CERCETĂRI PRIVIND CONCEPȚIA ȘI PROIECTAREA OSCILATOARELOR SINUSOIDALE INTEGRATE ÎN TEHNOLOGIE CMOS

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer

la

Universitatea „Politehnica” din Timișoara

în domeniul

INGINERIE ELECTRONICĂ ȘI TELECOMUNICAȚII

de către

ing. Drăgoi Benjamin

Rezumat

Oscilatoarele sunt circuite esențiale în electronica zilelor noastre. Deși sunt atât de necesare, oscilatoarele sunt de multe ori necunoscute și neînțelese. Mulți electroniști refuză să proiecteze propriile oscilatoare preferând să apeleze la „specialiști în oscilatoare” sau la soluții „de gata” existente pe piață. Frecvențele înalte impun folosirea oscilatoarelor de tip „LC”, și deci folosirea inductoarelor ca și elemente reactive. Utilizarea acestora în oscilatoarele actuale este însă limitată de posibilitățile de integrare a lor în siliciu. Totuși fiabilitatea, prețul redus, puterea consumată mică, dimensiunile reduse, etc., impun pe piață tot mai mult cipurile SOC. Din această contradicție – inductoare greu integrabile și de calitate slabă / necesitatea integrării – s-a născut ideea integrării unor oscilatoare cu inductanțe simulate.

Simularea unei inductanțe sau a unei capacități impune folosirea unor elemente active de circuit. Este evident că limitările elementelor active vor fi transferate în mare parte asupra elementului simulat sub forma unor erori, limitări și neliniarități. Având în vedere că frecvența este parametrul esențial al unui oscilator, se impune alegerea elementului activ de circuit care să poată funcționa la frecvența impusă. Din aceste considerente a reieșit ideea folosirii conveioarelor de curent în rolul de element activ în simularea inductoarelor și capacităților necesare unui oscilator „LC” integrat. Erorile relative produse de oscilatoarele cu CC sunt comparabile cu cele ale oscilatoarelor bazate pe amplificatoarele operaționale, AO, dar se cunoaște că acestea din urmă folosesc în majoritatea cazurilor bucle de reacție negativă, ceea ce duce la limitarea frecvențelor maxime ce pot fi obținute. De exemplu, oscilatorul Wien bazat pe AO și o rețea pasivă simetrică prezintă frecvență maximă posibilă de 16,67%

din produsul bandă*câștig (GBW) [15]. Oscilatoarele cu CC prezintă limitări ale frecvenței maxime de operare din cauza efectelor parazite de ordinul doi (impedanțele terminalelor, capacități parazite, etc.). CC sunt considerate circuite cu performanțe mai bune în frecvență decât AO datorită lipsei caracteristicii – GBW. De asemenea lipsa reacției negative face din CC circuite intrinsec stabile și deci nu mai necesită elemente suplimentare de compensare în frecvență. Din punct de vedere al integrării în siliciu CC sunt mai eficiente decât AO.

În literatura de specialitate au apărut multe articole ce prezintă circuite oscilatoare cu diverse structuri, performanțe și aplicații țintă. Unul dintre cele mai performante circuite oscilatoare în ceea ce privește stabilitatea frecvenței cu temperatura este „cuarțul electronic”. Acest oscilator a fost conceput, proiectat și testat folosind circuite discrete și AO. Pe baza considerentelor de mai sus s-a decis începerea cercetărilor cu scopul proiectării unui oscilator sinusoidal cu dublă simulare bazat pe conveioare de curent.

Primul capitol al tezei conține rezultatele documentării privitoare la CC (fig.1) și se dorește a fi o sinteză sumară a informațiilor culese de către autor. În urma analizei a peste 400 de articole în domeniu (din care doar cele mai importante sunt trecute în lista bibliografică) s-a simțit nevoia realizării unei clasificări a CC după diverse criterii. Deoarece în cei peste 40 de ani de existență a CC au apărut foarte multe variante și versiuni, autorul propune o matrice generalizată a CC cu trei porturi. Cu ajutorul acestei matrici generalizate pot fi sintetizate conveioarele de generația I, II, III, conveioarele inversate - ICC, conveioarele controlate în curent - CCC și cele cu câștig de curent $X/Z - kCC$. Din lucrările găsite în literatură au fost selectate și analizate critic, cele mai semnificative oscilatoare construite cu CC.

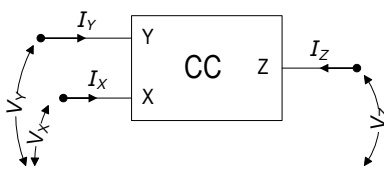


Fig.1. Conveiorul de curent

Matricea generalizată a CC cu trei porturi este:

$$\begin{bmatrix} I_Y \\ V_X \\ I_Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Y \\ I_X \\ V_Z \end{bmatrix}$$

Documentarea și analiza conveioarelor de curent a sugerat posibilitatea utilizării pentru scopul propus a conveioarelor de curent de generația I, CCI. Capitolul 2 se ocupă de proiectarea CC și în special de proiectarea CCI. S-a prezentat o metodă de proiectare a conveioarelor de curent de generația I - CCI bidirecționale cu auto-polarizare (fig.2) și s-a dedus relația de calcul a curentului de auto-polarizare. S-au analizat matematic performanțele unui CCI și anume: rezistența de intrare R_X , rezistența de intrare R_Y și rezistența de ieșire R_Z .

Au fost abordate și conveioarele de generația a II-a și s-a propus o metodă de proiectare a acestora prin partajarea în blocuri analogice elementare (care pot fi ușor proiectate și dimensionate), derivarea specificațiilor fiecărui bloc elementar (din specificațiile de performanță ale CCII) și proiectarea efectivă a fiecărui bloc în parte.

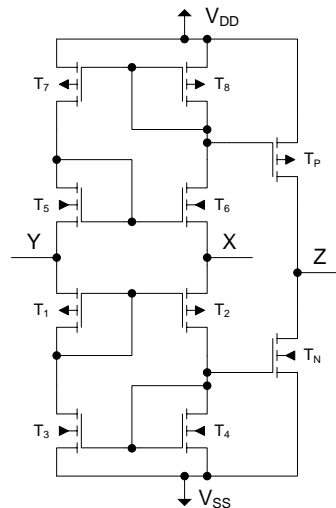


Fig.2. Schema cu tranzistoare MOS CCI+ bidirecțional cu autopolarizare

Cercetarea și dezvoltarea în microelectronică se bazează în foarte mare parte pe simulare. Acest proces intervine în toate fazele dezvoltării unui proiect de circuit integrat și este de obicei mare consumator de timp și resurse de calcul. Pentru a rezolva (parțial) această problemă, s-a propus un macromodel de simulare pentru CCI (fig.3), care aproximează foarte bine CCI original cu tranzistoare MOS (fig.2). Acest model poate înlocui orice CCI cu orice topologie. Chiar înlocuind CCI cu topologia cea mai simplă, se obține o reducere a timpului de simulare de 3,8 ori.

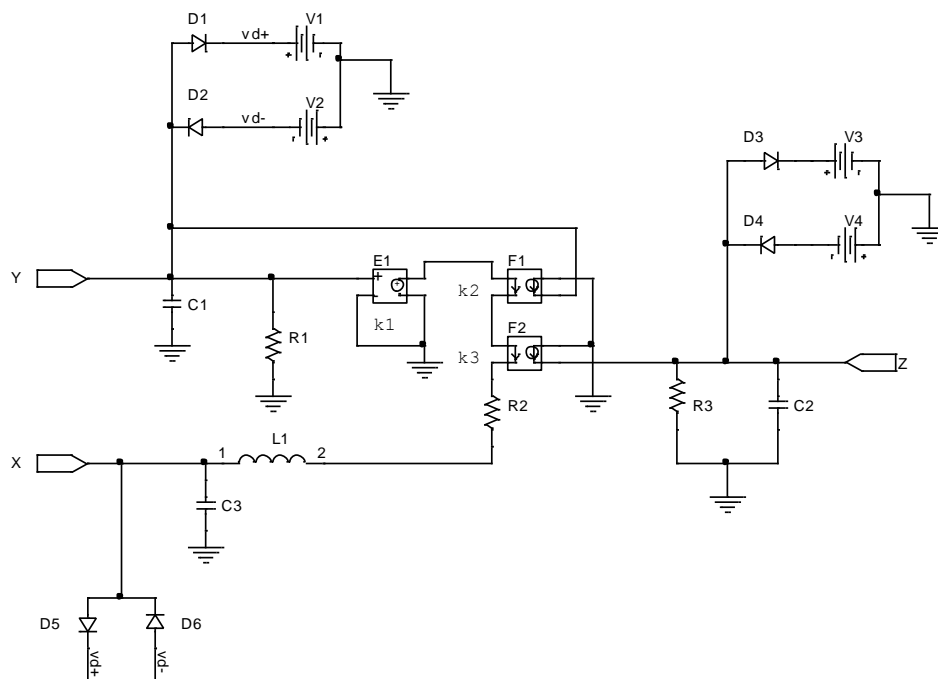


Fig.3. Macromodel pentru CCI+

Elementul central al tezei este oscilatorul sinusoidal propus în Capitolul 3 (fig.4). Acest circuit se compune din două elemente reactive, L și C, simulate cu ajutorul conveioarelor de curent CCI. Circuitele care simulează elementele reactive se numesc NIC

(*negative impedance convertor*) și NAIC (*negative admittance / impedance convertor*). NAIC cu CCI este un circuit original (fig.5).

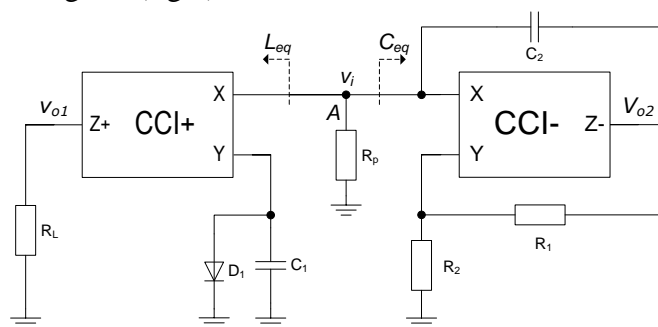


Fig.4. Oscilator cu dublă simulare cu CCI

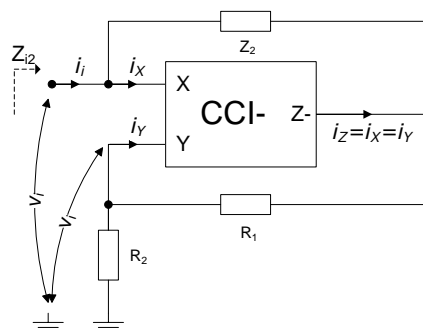


Fig.5. NAIC cu CCI-

S-a analizat acest oscilator și s-au dedus condiția de oscilație, frecvența de oscilație și factorul de calitate. Pentru acestea s-au luat în considerare CCI ideale. Circuitul propus, la rezonanță, când este îndeplinită condiția de oscilație, funcționează cu factor de calitate $Q \rightarrow \infty$. În oscilator mai există un al doilea circuit rezonant, care are frecvența de oscilație identică cu cea principală dar factorul de calitate este finit. Acest circuit este tot de tipul „LC” și este format dintr-o capacitate și o inductanță L^* formată cu ajutorul a două CCI (un circuit original). Acest circuit rezonant secundar asigură reducerea distorsiunilor pe care le-ar introduce sistemul de reglare a amplitudinii oscilațiilor. Acesta este format din diode și permite menținerea automată a condiției de Q infinit a circuitului oscilant principal.

Pentru verificarea conceptului, oscilatorul propus a fost simulat folosind CCI ideale și componente pasive reale (disponibile în tehnologia folosită). Pentru că una dintre caracteristicile cele mai importante ale unui oscilator este stabilitatea (frecvenței și amplitudinii) cu temperatura s-a urmărit îmbunătățirea acestor performanțe. Datorită factorului de calitate ce tinde spre infinit, stabilitatea termică a frecvenței este dată de stabilitatea termică a produsului $R_1 R_2 C_1 C_2$ și este egală cu suma coeficienților termici ai termenilor din produs. Totuși, elementele pasive reale și diodele de reglare a amplitudinii, prin capacitățile și rezistențele parazite, respectiv capacitatea de joncțiune, schimbă relația de definire a frecvenței de oscilație, și implicit și relația de calcul a stabilității termice a frecvenței. Modificarea ariei diodelor de reglare a amplitudinii implică modificarea capacității de joncțiune a acestora, capacitate ce apare în paralel cu una dintre capacitățile de impunere a frecvenței de oscilație. S-a observat că modificarea ariei diodelor poate duce la compensarea termică a frecvenței. Astfel, s-a obținut pentru circuitul din Capitolul 3 o stabilitate a

frecvenței cu temperatura ce poate fi redusă până la $1,69 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ (în condițiile unei stabilități a amplitudinii oscilațiilor de $3,41 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$) iar stabilitatea amplitudinii oscilațiilor poate fi redusă până la $1,96 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ (în condițiile unei stabilități a frecvenței de $7,85 \cdot 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$). THD-ul obținut este $<0,1\%$.

Capitolul 4 și Capitolul 5 implementează oscilatorul propus cu circuite CCI reale (fig.6). În Capitolul 4 se folosește CCI cu topologie clasică iar în Capitolul 5 se propune o nouă topologie de CCI – bazată pe oglinzi de curent „autocascodă” (fig.7).

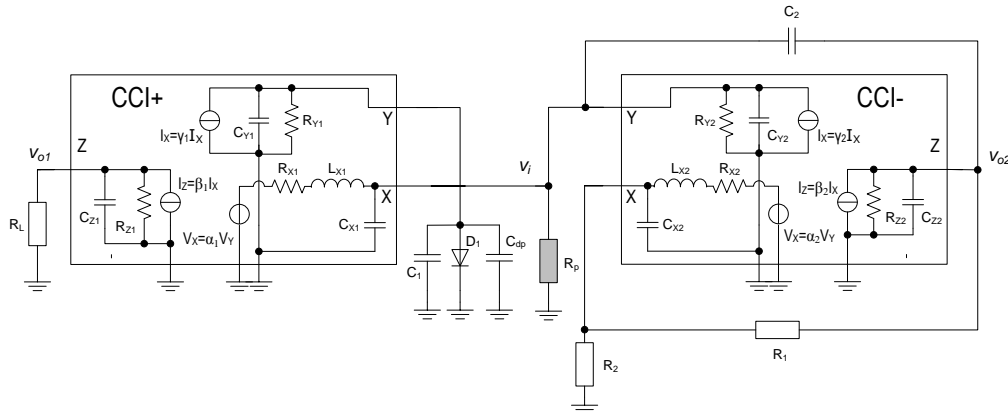


Fig.6. Oscilatorul cu circuitul de reglare a amplitudinii

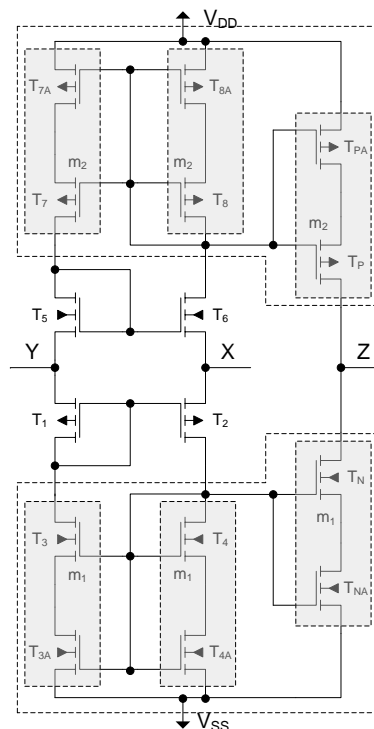


Fig.7. CCI+ cu oglinzi de curent autocascodă

Capitolul 4 face analiza matematică detaliată a NIC, NAIC și oscilatorul real, ținând cont de cele mai semnificative elemente constitutive ale unui CCI real. Performanța de distorsiuni armonice obținută este: $\text{THD} < 1\%$ pe întreg domeniul de frecvențe, și poate fi redus la $\text{THD} = 0,3\%$ pentru cazul generării unei frecvențe fixe. Aceleași performanțe se obțin

și folosind circuitul CCI nou din Capitolul 5. Pe baza metodei de compensare termică prezentată în Capitolul 3, stabilitatea frecvenței cu temperatura pentru structura de CCI simplu (Capitolul 4) poate fi redusă până la $7,37\text{ppm}/^\circ\text{C}$ în condițiile unei stabilități a amplitudinii oscilațiilor de $4,88 \cdot 10^{-3}/^\circ\text{C}$.

Oscilatorul propus este un oscilator în cuadratură dar din cauza neidealităților structurii CCI clasice (rezistențe de intrare paralele și rezistențe de ieșire de valori mici) defazajul real introdus diferă substanțial de 90° . Din aceleași cauze și frecvența de oscilație diferă de cea impusă teoretic prin valorile componentelor pasive. Structura nouă de CCI propusă îmbunătățește caracteristicile de intrare/ieșire: creșterea de 13 ori a rezistenței R_Y și de 7,5 ori a lui R_Z , copierea curentului între porturile X și Y precum și între X și Z se îmbunătățește de 6 ori. Aceste îmbunătățiri sunt obținute în condițiile unei înjumătățiri a curentului de polarizare și păstrând aproximativ aceeași arie activă ca la CCI simplu. Din punct de vedere al defazajului introdus între două ieșiri, oscilatorul realizat cu CCI cu aceasta nouă topologie, arată o eroare mai mică de 2° pe întreg domeniul de frecvențe generabile (fig.8).

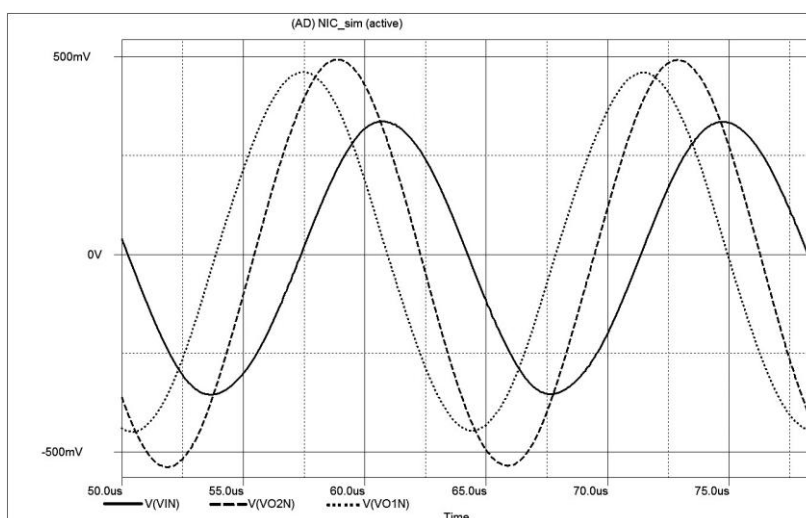


Fig.8. Defazajul între tensiunile la ieșirile oscilatorului cu noul CCI

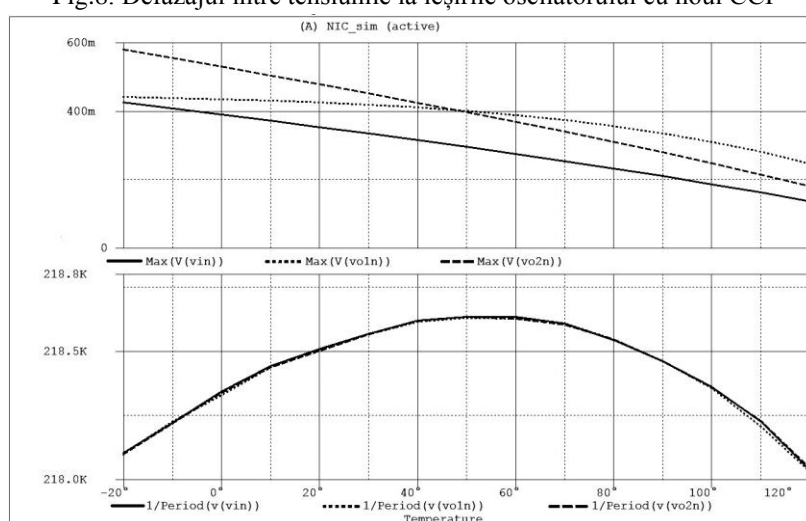


Fig.9. Variația amplitudinilor și frecvenței de oscilație cu temperatura în nodurile v_i , v_{o1} și v_{o2}

Performanțele de stabilitate termică a frecvenței și amplitudinii oscilatorului din Capitolul 5 sunt: 15ppm/°C pentru frecvență și $3,25 \cdot 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ pentru amplitudine (fig.9). Stabilitatea termică a frecvenței este mai slabă decât cea obținută în Capitolul 4 dar este compensată de reducerea drastică a dimensiunilor diodelor de reglare a amplitudinii oscilațiilor – reducere de 31 de ori.

În cadrul tezei au fost aduse numeroase contribuții teoretice și aplicative în domeniul oscilatoarelor sinusoidale „LC” integrabile complet în siliciu. Contribuții teoretice și aplicative au fost aduse și în domeniul conveioarelor de curent de generația I, circuite simple și cu multe aplicații în circuitele mixte analog-digitale.

Dintre contribuțiile teoretice se subliniază următoarele:

1. Clasificarea conveioarelor de curent după diverse criterii: numărul de intrări și de ieșiri, tipul intrări Y , câștigul de curent, mod de lucru diferențial sau simplu și controlabilitate.
2. Propunerea matricei generalizate a CC cu 3 porturi. Cu ajutorul acestei matrice generalizate pot fi sintetizate conveioarele de generația I, II, III, conveioarele inversate - ICC, conveioarele controlate în curent - CCC și cele cu câștig de curent X/Z - kCC.
3. Deducerea relației de calcul a curentului de auto-polarizare pentru un CCI bidirecțional cu auto-polarizare.
4. Analiza matematică a CCI clasic. S-au dedus relațiile de calcul al rezistențelor de intrare R_X și R_Y la un CCI cu structura clasică. S-au analizat influențele elementelor componente – transconductanțe și rezistențe (conductanțe) de ieșire asupra valorii rezistențelor considerate.
5. Propunerea unor macromodele de simulare pentru CCI+ și CCI-.
6. Propunerea unui circuit convertor de admitanța/impedanță negativă NAIC cu CCI- (circuit nou). Se prezintă structura noului circuit și relația impedanței/admitanței de intrare.
7. Propunerea unui nou oscilator cu dublă simulare (L_{eq} și C_{eq}) bazat pe CCI. S-au prezentat baza teoretică, relațiile de calcul, condiția de oscilație, condiția de frecvență, factorul de calitate și diagrama de fază.
8. Propunerea unui circuit ce simulează o inductanță ideală sau (cu o modificare) simulează o inductanță cu pierderi (rezistență de pierderi paralelă). Pe baza acestui circuit s-a construit un circuit oscilant secundar ce a fost prezentat teoretic și care este folosit pentru realizarea unei reglări automate a amplitudinii oscilațiilor și la obținerea automată a condiției de Q infinit.
9. S-a prezentat metoda de compensare termică de ordinul I a frecvenței de oscilație pentru oscilatorul propus, care s-a aplicat concret în Capitolul 4
10. Analiza matematică a circuitelor NIC și NAIC bazate pe CCI reale. În deducerea relațiilor de definiție s-au luat în considerare elementele rezistiv – inductiv – capacitive de intrare și de ieșire ale CCI. S-au dedus relațiile de sensibilitate a impedanțelor celor două circuite NIC și NAIC la diverse elemente de structură.
11. Deducerea relațiilor de definiție a frecvenței de oscilație, condiției de oscilație și a factorului de calitate a circuitului oscilant cu dublă simulare propus. S-au prezentat relațiile

simplificate utile în analiza circuitului și în proiectarea practică dar care aproximează cu o eroare de sub 10% relațiile complete și foarte complexe.

12. Analiza matematică și deducerea relațiilor frecvenței de oscilație și a factorului de calitate a circuitului oscilant secundar prezent în sistemul de reglare automată a amplitudinii oscilațiilor. S-au inclus și analizat grafic elementele esențiale și care au influență semnificativă.

13. Conceperea unei noi structuri de CCI – cu oglinzi autocascodă. S-a prezentat necesitatea, baza teoretică, metoda de proiectare și avantajele aduse. Acest tip de CCI permite realizarea unui oscilator sinusoidal „LC” cu performanțe ridicate.

14. Analiza matematică a CCI nou propus. S-au dedus relațiile de definire a rezistențelor de intrare R_X și a rezistenței de ieșire R_Z .

Dintre contribuțiile aplicative aduse de teza de doctorat citez următoarele:

1. Propunerea unei noi metode de proiectare a CCII clasic (Fabre - Normand) bazate pe metoda procedurală de proiectare a circuitelor analogice. Aceasta constă în împărțirea circuitului în blocuri analogice elementare, derivarea specificațiilor fiecărui bloc pe baza specificațiilor de performanță a circuitului și proiectarea individuală a fiecărui bloc elementare pe baza metodei g_m/I_D .

2. Metodă de determinare pe bază grafică a parametrului g_{ds} necesar calculelor manuale de proiectare. Metoda presupune realizarea o singură dată, prin simulare, a unor grafice ce prezintă dependența tensiunii Early (din care se poate obține g_{ds}) de lungimea canalului L și de factorul de inversie IF, pentru diverse tensiuni utile VDS.

3. Aplicarea metodei de compensare termică de ordinul I a frecvenței de oscilație, prezentată în Capitolul 3, prin analiza și alegerea componentelor pasive în funcție de coeficientul de variație termică de ordinul I.

4. Se propune metoda de creștere a stabilității termice a frecvenței cu temperatura prin modificarea ariei diodelor de reglare a amplitudinii. Metoda presupune ridicarea caracteristicilor stabilității termice a frecvenței și amplitudinii oscilației în funcție de dimensiunea geometrică a diodelor și căutarea unui compromis între cerințele de stabilitate.

5. Metoda de proiectare/dimensionare a noului CCI propus în Capitolul 5 folosind efectul RSCE în locul efectului SCE pentru îndeplinirea mai ușoară a condițiilor de aducere în regim de lucru saturat a tuturor tranzistoarelor din circuit.

6. Realizarea unui oscilator sinusoidal cu cuadratura mai aproape de ideală a două tensiuni de ieșire.