

Capitolul 5

SINTETIZOARE DE FRECVENȚĂ

5.1 GENERALITĂȚI

Sintetizoarele sunt echipamente capabile să furnizeze oscilații cu frecvență variabilă în trepte, într-o gamă foarte mare și cu o stabilitate ridicată, utilizând una sau mai multe surse de referință.

Ideea de realizare a sintetizatoarelor a venit de la necesitatea unui număr mare de frecvențe radio pentru unele sisteme de comunicații, soluția utilizării mai multor oscilatoare cu cuarț nefiind posibilă atât din considerente economice, dar și tehnice.

Dezvoltarea telecomunicațiilor în general, și a comunicațiilor radio în particular, a dus la perfecționarea acestor echipamente, obținându-se în prezent caracteristici foarte ridicate cum ar fi furnizarea unui număr foarte mare de frecvențe (peste 10^7), cu pași foarte mici (chiar de 0,001 Hz) și în game foarte extinse (de la JF până la UHF sau SHF).

Parametrii caracteristici ai unui sintetizor sunt cei specifici unei surse de oscilații purtătoare (tipul și nivelul oscilațiilor, stabilitatea frecvențelor, impedanța de ieșire etc.) la care se adaugă:

- gama frecvențelor furnizate;
- numărul de frecvențe (canale) sau numărul de trepte (de pași);
- rezoluția (valoarea treptei);
- timpii de stabilire a frecvenței după o comutare cu o treaptă și între frecvențele extreme;
- modalitatea de prescriere a frecvențelor;
- modalitatea de afișare a frecvențelor etc.

Sintetizorul este un echipament complex al cărui preț, volum și consum de energie sunt într-o scădere continuă, în prezent devenind posibilă utilizarea lui și în echipamentele de radiorecepție de larg consum.

Sinteza frecvenței se poate realiza prin două tehnici:

- *tehnica sintezei necoerente*, în care frecvențele se obțin prin combinarea frecvențelor semnalelor generate de mai multe oscilatoare cu cristale de cuarț comutabile;
- *tehnica sintezei coerente*, în care se folosește o singură sursă de referință și se realizează prin următoarele procedee:
 - sinteza directă;
 - sinteza catalitică;
 - sinteza indirectă.

5.2 SINTEZA NECOERENTĂ

Principiul sintezei necoerente rezultă din schema prezentată în figura 5.1.

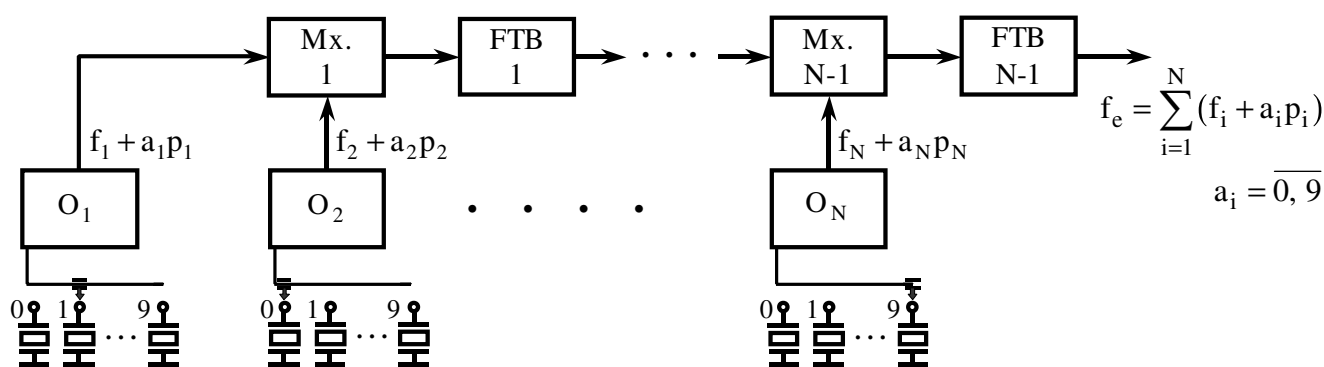


Fig. 5.1 Sinteza necoerentă a frecvenței.

Sintetizorul constă din N decade, fiecare decadă i fiind formată dintr-un oscilator cu 10 cristale de cuarț comutabile ale căror frecvențe diferă prin multiplii pasului p_i corespunzător decadei. Semnalele sunt mixate succesiv, și cu FTB se separă componentele sumă (ca în figură) sau diferență.

Dacă

$$p_{i+1} = 10p_i \Rightarrow f_e = \sum_{i=1}^N (f_i + 10^{i-1} a_i p) = f_0 + \sum_{i=1}^N 10^{i-1} a_i p, \quad f_0 = \sum_{i=1}^N f_i, \quad p = p_1 \quad (5.1)$$

Numărul de frecvențe generate este 10^N , iar pasul sintetizorului este $p = p_1$.

Utilizarea unui număr mare de cristale, $10N$, constituie principalul *dezavantaj* al acestei tehnici, din care cauză nu mai este folosită în prezent.

5.3 SINTEZA COERENTĂ DIRECTĂ

În sinteza directă, frecvența sursei de referință se multiplică și se divide, iar semnalele rezultate în urma acestei operații se combină în mixere urmate de FTB.

În practică se utilizează mai multe metode:

a) - Metoda multiplicării și divizării simple

Această metodă este utilizată când sunt necesare simultan un număr mic de frecvențe fixe și stabile, așa cum rezultă și din exemplul prezentat în figura 5.2.

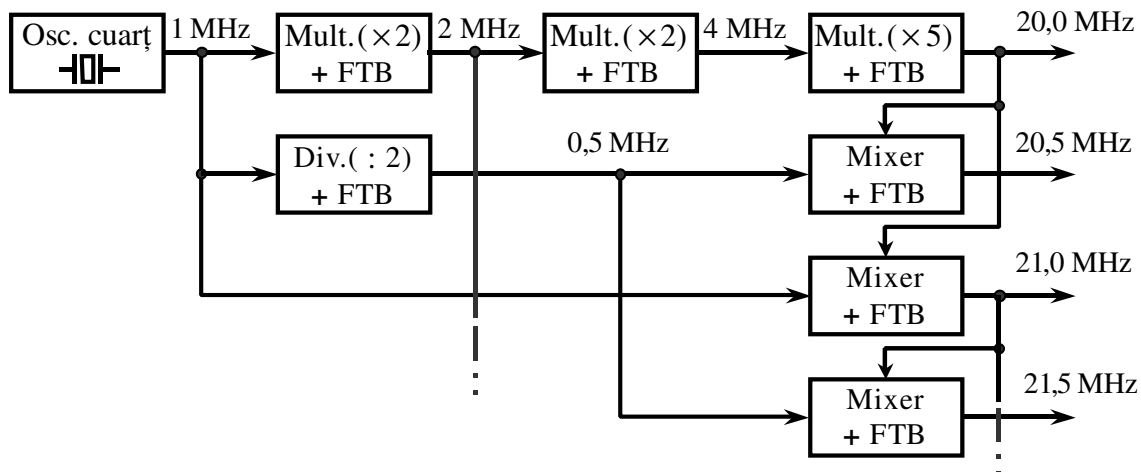


Fig. 5.2 Sinteza coerentă directă a frecvenței: metoda multiplicării și divizării simple.

Acest tip de sintetizor se folosește și ca subansamblu pentru sintetizoarele mai performante.

b) - Metoda sintezei cu decade

Această metodă permite obținerea unui număr mare de frecvențe cu pași mici.

Echipamentele sunt realizate din decade conectate în serie. Fiecare decadă asigură modificarea unei cifre a_i din numărul zecimal care exprimă frecvența și conține:

- un generator de armonice (dispozitiv care deformează semnalul oscilatorului de referință, de exemplu prin limitare și derivare, mărindu-i conținutul de frecvențe armonice);
- două FTB comutabile în trepte (10 trepte);
- un mixer;
- un divizor de frecvențe cu 10.

Sintetizoarele directe de acest tip pot fi realizate cu *decade neidentice* sau *identice*.

Schema unui sintetizor cu decade neidentice la care fiecare decadă lucrează la altă frecvență, și ca urmare FTB sunt diferite de la decadă la decadă, este dată în figura 5.3.

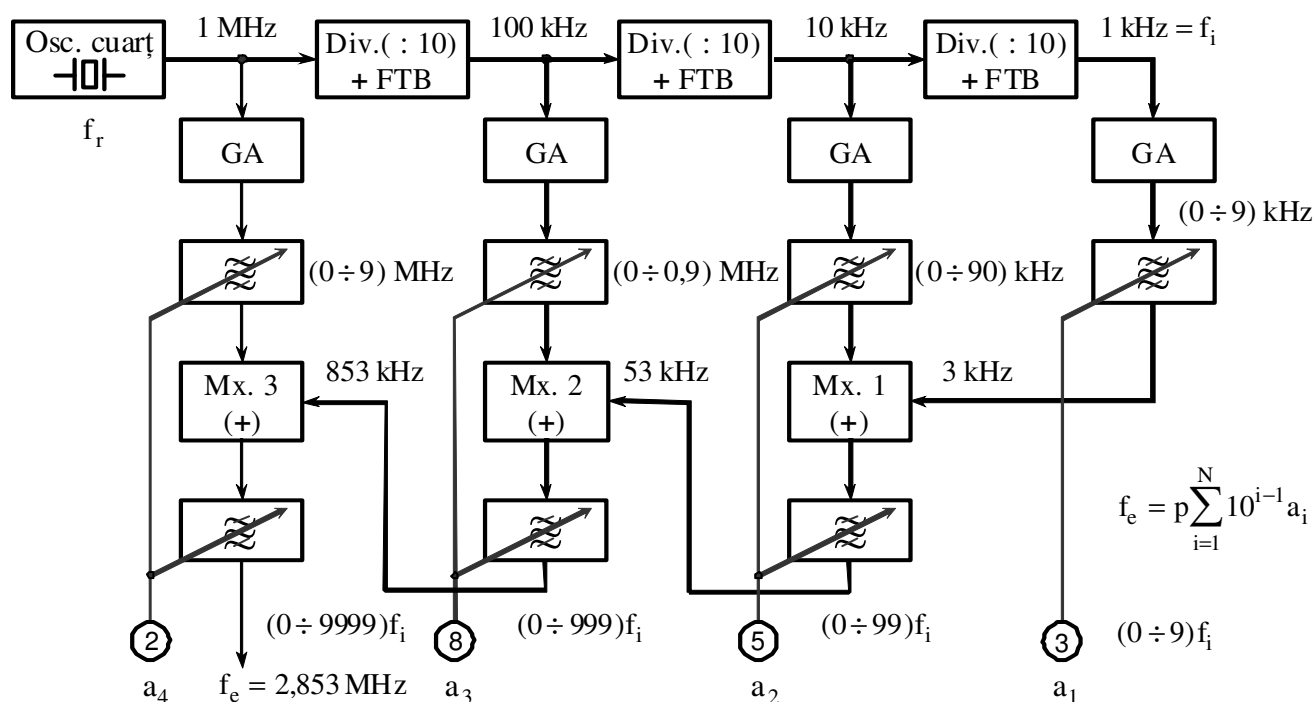


Fig. 5.3 Sintetizor cu 4 decade în serie neidentice ($n = 10^4$ frecvențe, $p = 1$ kHz).

În practică, este întotdeauna mai avantajoasă utilizarea în echipamente a cât mai multe subansamble identice. Schema unui sintetizor cu decade identice este prezentată în figura 5.4.

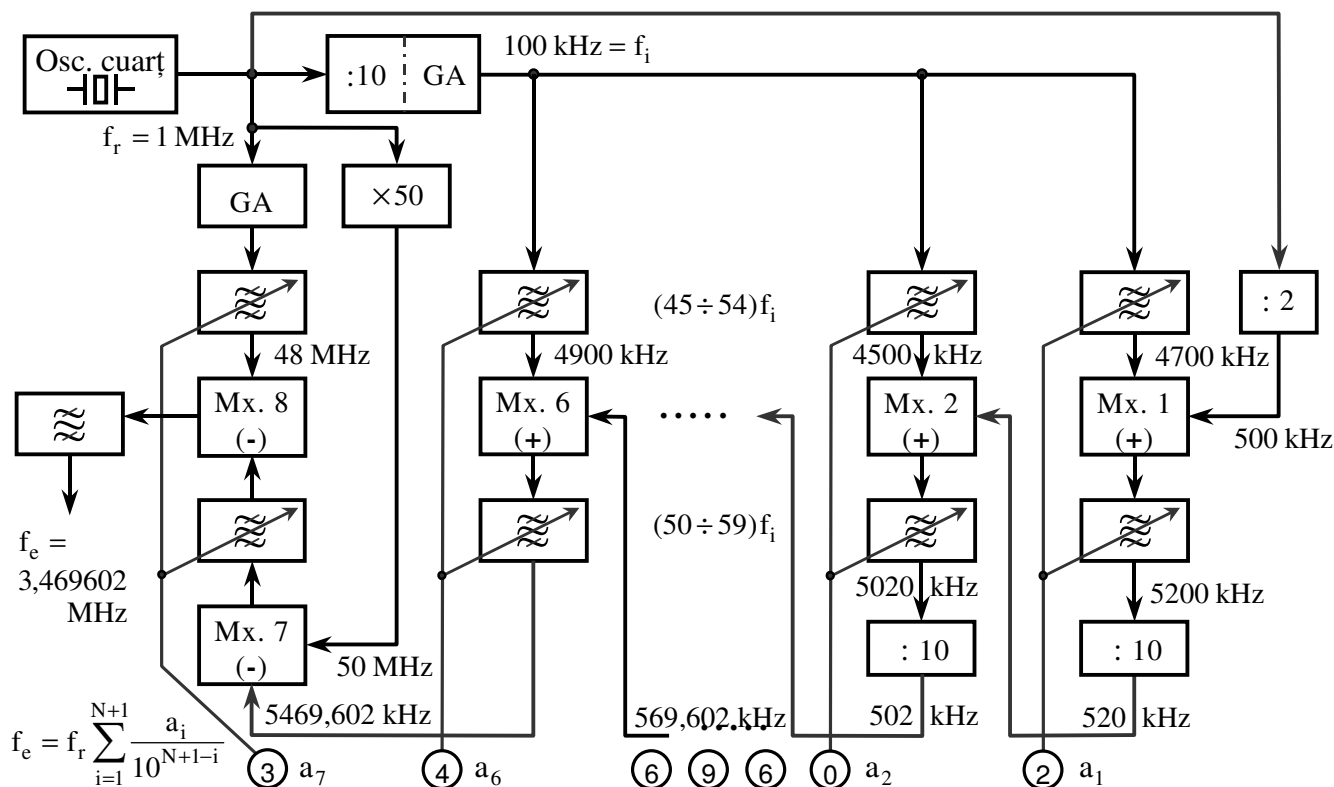


Fig. 5.4 Sintetizor cu $N = 6$ decade identice.

Sintetizorul poate genera frecvențe în gama $0 \div 9,999999$ MHz cu pasul de 1 Hz.

Multiplicatorul cu 50, mixerele 7 și 8 și FTB corespunzătoare permit stabilirea gamei de frecvență necesară. De exemplu dacă multiplicarea se face cu 40, gama va fi $10 \div 19,999999$ MHz.

Sintetizoarele cu decade, deși permit generarea unui număr mare de frecvențe cu pași mici, pun probleme dificile la realizarea comutatoarelor și a monoacordului, sunt voluminoase și au preț ridicat. Din aceste motive sunt folosite mai rar în instalațiile de radioemisie și radiorecepție.

5.4 SINTEZA COERENTĂ CATALITICĂ

În tehnica sintezei catalitice, frecvența furnizată se obține prin selectarea unei armonice a frecvenței de referință (eventual divizată) folosind metoda heterodinării (dublă sau triplă mixare urmată de filtrare). Această tehnică se mai numește și principiul lui Wadley.

Se știe că separarea unor armonice de ordin mare cu ajutorul FTB este greu de obținut sau chiar imposibil, deoarece aceste filtre trebuie să fie de bandă foarte îngustă, cu atenuare mare în banda de oprire și cu caracteristică translatabilă, din care cauză nu pot fi realizabile. Filtrele ceramice sau cu cuarț au $Q > 1000$, dar nu sunt acordabile.

De aceea, această problemă se rezolvă prin heterodinare, schema de principiu fiind reprezentată în fig. 5.5.

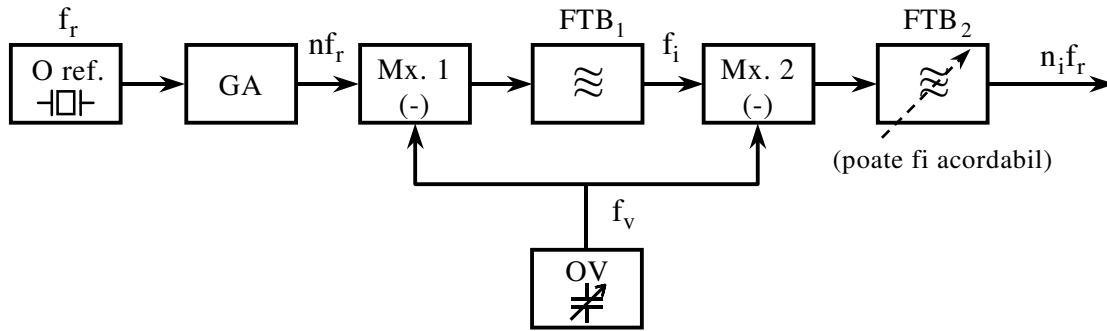


Fig. 5.5 Principiul heterodinării.

Semnalul de referință este mixat cu semnalul unui oscilator acordabil de frecvență variabilă, f_v . Semnalul obținut este filtrat de un FTB-FI având frecvența centrală fixă ceea ce permite să fie realizat cu performanțe ridicate folosind circuite de filtrare ceramice, cu cuarț etc. Prin varierea frecvenței f_v , diversele componente armonice care trebuie selectate sunt translatate pe rând în banda de trecere a filtrului,

$$f_i = f_v - n f_r = ct \quad (5.2)$$

Pentru a elimina instabilitatea OV se face o a doua mixare cu semnalul de frecvență f_v urmată de filtrarea trece bandă cu FTB₂, care poate avea o bandă mult mai mare decât FTB₁, și frecvența la ieșire este

$$f_e = f_v - f_i = n f_r \quad (5.3)$$

Deși stabilitatea OV nu afectează stabilitatea frecvenței furnizate de sintetizor, ea trebuie să se mențină între anumite limite pentru ca semnalul FI să poată trece prin FTB-FI, adică

$$2\Delta f_r \leq B_{FTB_1} \quad (5.4)$$

Totodată este necesar ca $B_{FTB_1} < f_r$ - ecartul dintre două armonice consecutive. Practic, se ia

$$B_{FTB_1} \cong (0,5 \div 0,6) f_r \quad (5.5)$$

și rezultă

$$f_v < \frac{f_r}{2\varepsilon_v} \quad (5.6)$$

Un exemplu de sintetizor catalitic simplu care lucrează între 3÷12 MHz cu rezoluția $p = 15$ kHz este reprezentat în figura 5.6.

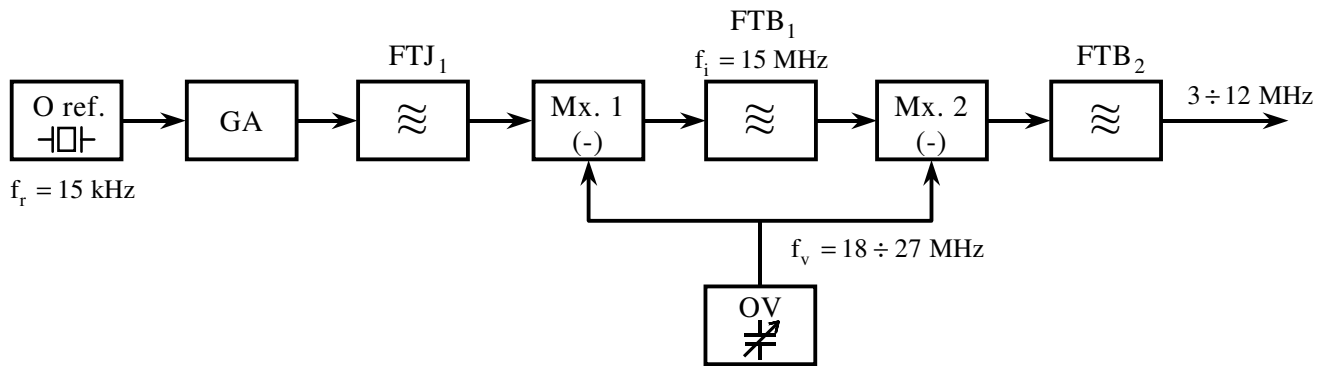


Fig. 5.6 Sintetizor catalitic.

În baza relației (5.5), dacă se dimensionează

$$B_{FTB_1} \leq 0,5f_r = 7,5 \text{ kHz} \quad (5.7)$$

atunci rezultă

$$\Delta f_v \leq 3,75 \text{ kHz} \quad \Rightarrow \quad \epsilon_v < 10^{-4} \quad (5.8)$$

și inegalitatea (5.6) este verificată.

Pentru FTB_2 este necesară condiția

$$B_{FTB_2} \leq 3 \text{ MHz} \quad (B_{FTB_2} \cong B_{FTB_1}) \quad (5.9)$$

unde valoarea maximă se alege astfel încât filtrul să elimine semnalul având frecvența

$$(mf_v + lf_i) \text{ unde } m, l \in \mathbb{Z}, m \neq 1, l \neq -1 \quad (5.10)$$

cu valoarea cea mai apropiată de frecvența utilă $(f_v - f_i)$.

Dacă se dorește o rezoluție mai mică decât f_r se folosește combinarea mai multor decade, unde o decadă se poate realiza fie prin *metoda triplei mixări*, fie prin *metoda dublei mixări*.

a) - Metoda triplei mixări

Această metodă de sinteză folosește N decade identice, câte una pentru fiecare cifră zecimală a valorii frecvenței de ieșire. Schema unei decade este prezentată în figura 5.7.

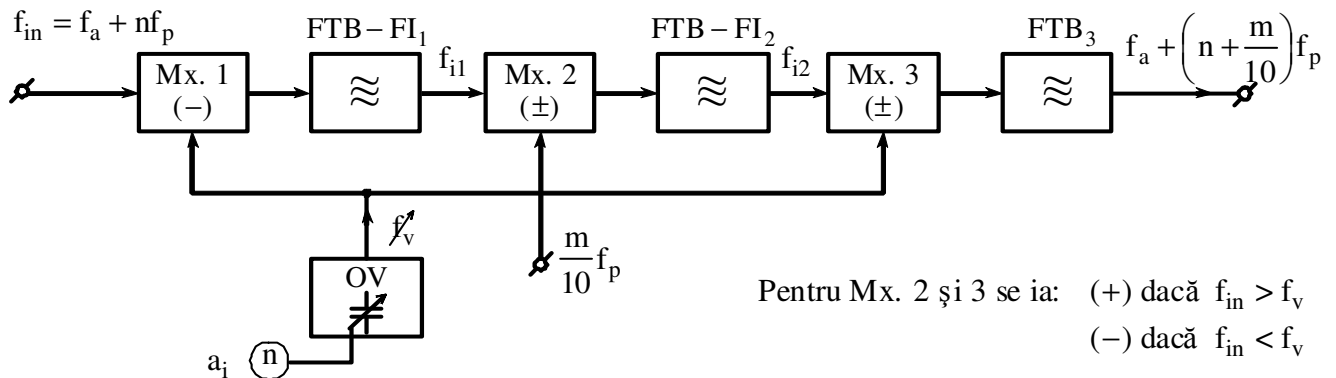


Fig. 5.7 Schema bloc a unei decade folosind metoda triplei mixări.

Se observă că în lanțul de FI se injectează cu ajutorul $Mx.2$ o frecvență adițională $m/10f_p$, unde $m/10$ variază în 10 trepte din 0,1 în 0,1 ($m = 0 \div 9$). Dacă frecvența semnalului la intrare

variază tot în 10 trepte ($n_{\max} - n_{\min} + 1 = 10$), atunci semnalul la ieșire poate varia în 100 trepte de frecvență cu valoarea $0,1f_p$ fiecare.

Filtrele FTB – FI₁ și FTB – FI₂ sunt de bandă îngustă dar realizarea lor nu ridică probleme fiind pe frecvențe fixe. Filtrul FTB₃ este de bandă largă.

Un exemplu de sintetizor cu 3 decade identice are schema din figura 5.8.

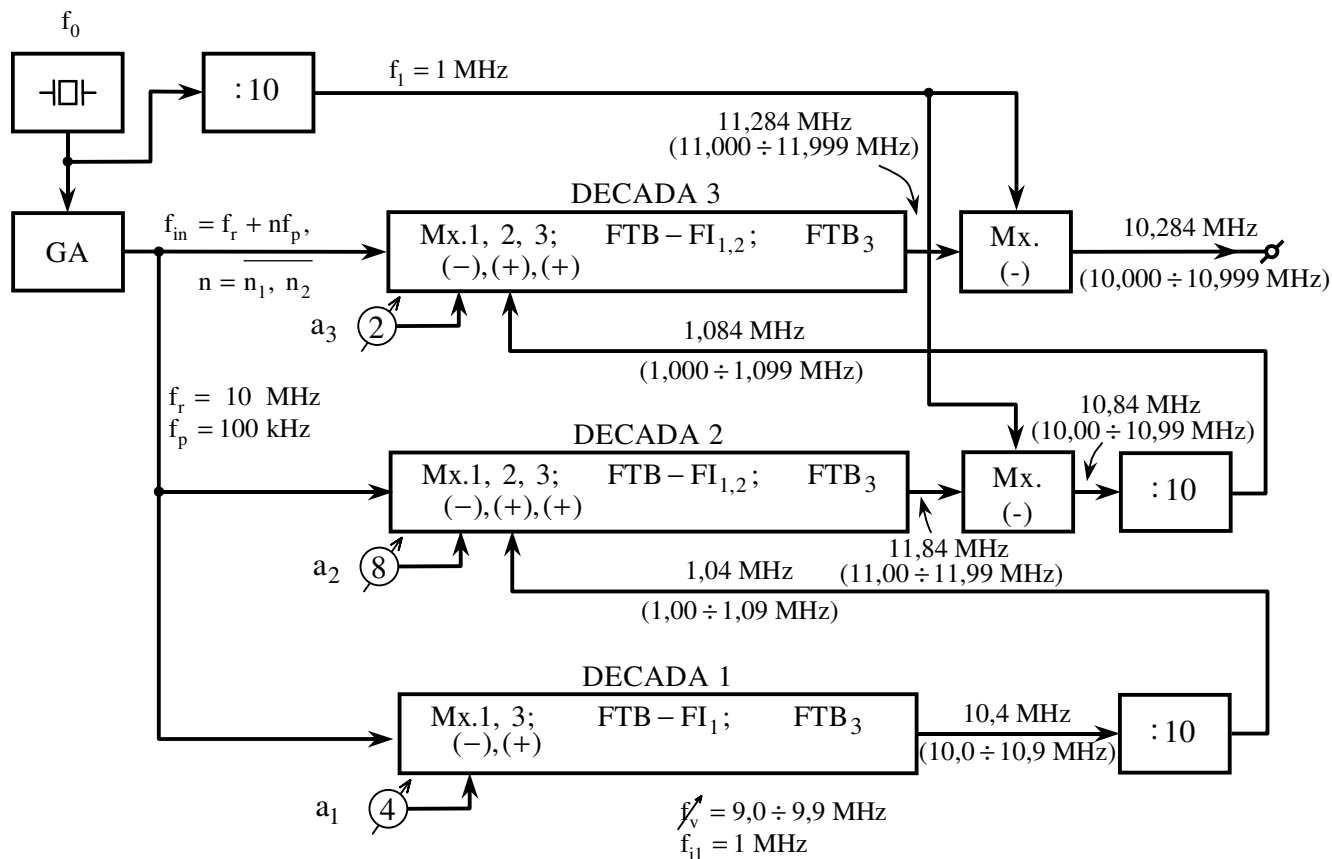


Fig. 5.8 Sintetizor catalitic cu 3 decade utilizând metoda triplei mixări.

Se observă că prima decadă nu mai are nevoie de Mx. 2, iar pasul unei decade este de 10 ori mai mare decât al decadei precedente astfel că

$$f_e = f_r + \sum_{i=1}^3 a_i p_i = f_r + a_3 f_p + a_2 \frac{f_p}{10} + a_1 \frac{f_p}{100} \quad (5.11)$$

Gama frecvențelor de lucru se alege prin proiectarea generatorului de armonici GA care poate avea o schemă de tipul celei prezentate de figura 5.9.

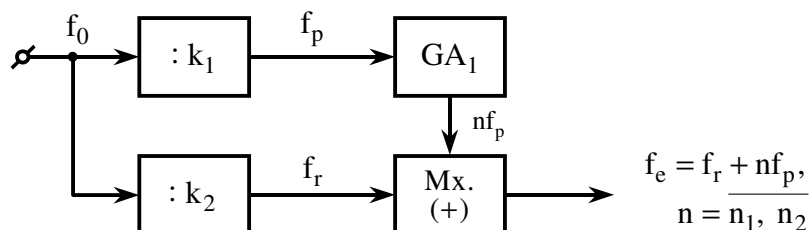


Fig. 5.9 Generarea frecvențelor armonice.

b) - Metoda dublei mixări

Schema bloc a unei decade folosind această metodă este redată de figura 5.10.

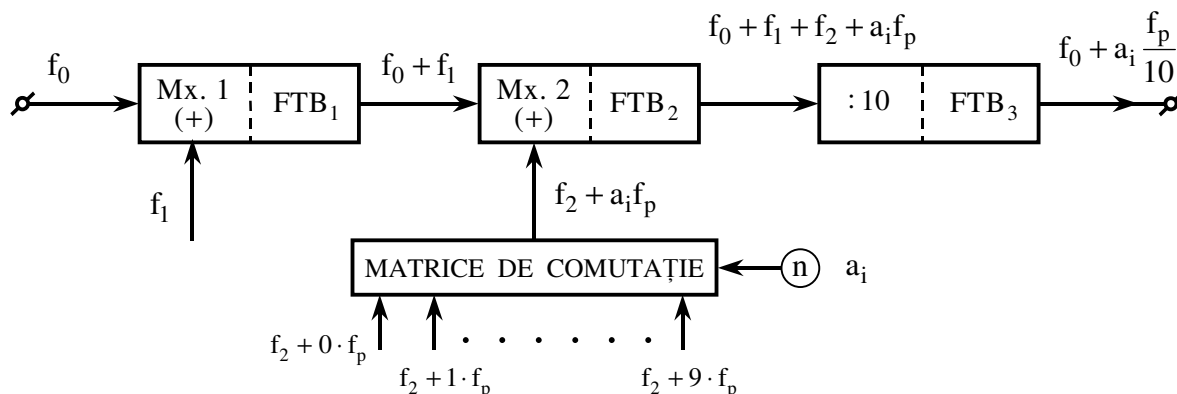


Fig. 5.10 Schema bloc a unei decade folosind metoda dublei mixări.

Frecvențele f_1 și f_2 se aleg așa încât să satisfacă condiția:

$$f_0 + f_1 + f_2 = 10 f_0 \quad (5.12)$$

Obținerea frecvențelor fixe f_0 , f_1 , $f_2 + a_i f_p$ se poate face prin sinteză directă cu multiplicare și divizare simplă.

Un sintetizor cu 3 decade cu selecția armonicelor prin dublă mixare are schema din figura 5.11.

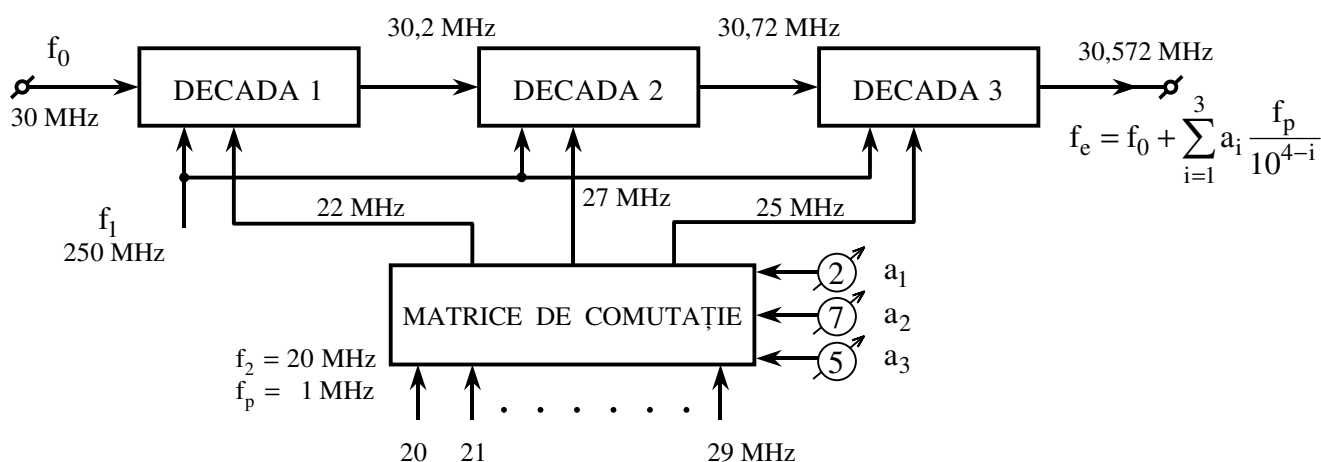


Fig. 5.11 Sintetizor catalitic cu 3 decade utilizând metoda dublei mixări.

Comparativ, metoda dublei mixări față de metoda triplei mixări are următoarele avantaje și dezavantaje:

- avantaje:
 - pașii se obțin prin N comutări electronice comandate în curent continuu, operație mai precisă și mai rapidă decât acordul a N oscilatoare comandate;
 - matricea de comutare este unică pentru toate decadele;
 - pasul poate fi oricât de mic, cel puțin teoretic, aceste sintetizoare fiind cele mai performante din acest punct de vedere.
- dezavantaje:
 - cu toate că la nivel de schemă bloc, sintetizoarele cu dublă mixare sunt mai simple, la nivel de circuit, ele conțin subansamble mai complexe (sintetizor direct, matrice de comutare).

În general, sintetizoarele catalitice, ca și cele directe, deși au cele mai bune performanțe în ceea ce privește numărul frecvențelor generate și al rezoluției, sunt echipamente complexe, voluminoase, cu consum mare de energie și destul de scumpe, din care cauză sunt utilizate din ce în ce mai puțin în instalațiile de radioemisie și radiorecepție.

5.5 SINTEZA COERENTĂ INDIRECTĂ

Sintetizoarele având la bază această tehnică au devenit cele mai utilizate în prezent, și nu datorită performanțelor referitoare la numărul de frecvențe, rezoluție sau calitatea semnalului oferit – unde sunt inferioare sau comparabile cu performanțele sintetizoare realizate prin celelalte tehnici, ci prin avantajele oferite în privința dimensiunilor, consumului de energie și prețului de cost ca o consecință a realizării majorității blocurilor componente cu CI.

Tehnica sintezei coerente indirecte se bazează pe utilizarea buclei cu fază blocată (sau calare de fază - PLL). Această tehnică a profitat la început de circuitele PLL destinate altor domenii. Între timp (de prin 1980) se produc CI-PLL speciale pentru sinteza frecvenței.

Principiile PLL-ului, tipurile, funcționarea, comportarea în regim de urmărire, captura și comportarea la zgomot sunt prezentate în diverse lucrări.

Precizări:

- Pentru sinteza frecvențelor radio *se folosesc* numai:
 - circuitele PLL analogice (la care toate blocurile lucrează analogic);
 - circuitele PLL hibride cunoscute și sub numele de PLL digitale (care au unele blocuri digitale cu excepția FTJ care rămâne analogic).

Nu se folosesc circuite PLL total digitale deoarece tehnica lor nu este în prezent destul de bine pusă la punct. Acestea se pot folosi numai la sinteza frecvențelor joase, de aici apărând unele confuzii în practică!

- În ceea ce privește ordinul PLL-ului, cele folosite aproape în exclusivitate sunt cele de ordinul 2 (la care FTJ - are un pol) deoarece sunt capabile să urmărească salturile de fază cu eroare nulă, salturile de frecvență (rampă de fază) cu eroare mică și accelerațiile de fază cu eroare practic constantă dacă FTJ este activ și bucla cu câștig mare. Foarte rar se utilizează cele de ordinul 3 (FTJ cu 2 poli) deoarece analiza lor este extrem de complicată.

- În sintetizoare, frecvența trebuie modificată în limite largi și în această situație autocaptura fie nu se poate produce fie durează foarte mult. De aceea sunt necesare aplicarea procedeelor de forțare a capturii, cel mai indicat fiind procedeul bazat pe discriminarea de frecvență.

- Deoarece PLL-ul se comportă ca un FTS pentru zgomotul dat de OCT, la sintetizoarele folosind o referință cu o bună stabilitate pe termen lung și PLL cu OCT cu o bună stabilitate pe termen scurt, se obțin semnale cu o bună stabilitate și pe termen scurt și pe termen lung.

a) - Sinteza frecvenței cu PLL analogice

Se bazează pe principiul buclei de translație a frecvenței prin mixare, principiu reprezentat de figura 5.12.

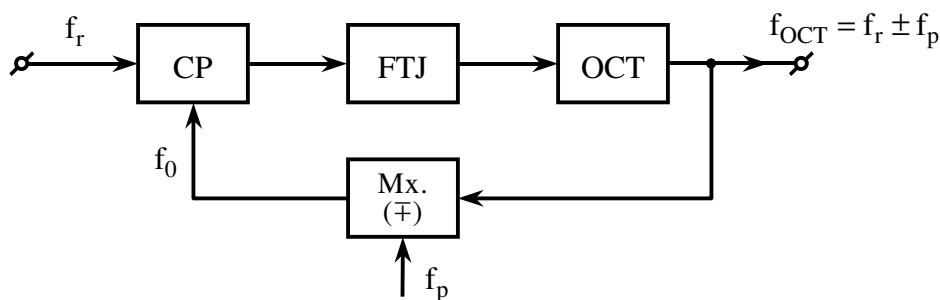


Fig. 5.12 Principiul buclei de translație.

Când bucla este calată, semnalele aplicate la intrările comparatorului de fază CP au frecvențele egale:

$$f_r = f_0 = f_{OCT} \pm f_p \Rightarrow f_{OCT} = f_r \pm f_p \quad (5.13)$$

Bucloa se proiectează să se caleze pe una din aceste două frecvențe f_{OCT} și se iau măsuri pentru a nu se cala pe cealaltă numită *frecvență imagine* (vezi fig.5.13), fenomen ce are loc în mod deosebit, atunci când OCT este conceput să oscileze într-o bandă largă.

Relația de legătură între cele două frecvențe se deduce scriind:

$$\begin{aligned} f_{OCT1} &= f_r - f_p && \text{– frecvența dorită} \\ f_{OCT2} &= f_r + f_p && \text{– frecvența nedorită} \\ f_{OCT2} - f_{OCT1} &= 2f_p \Rightarrow f_{OCT2} = f_{OCT1} + 2f_p \end{aligned} \quad (5.14)$$

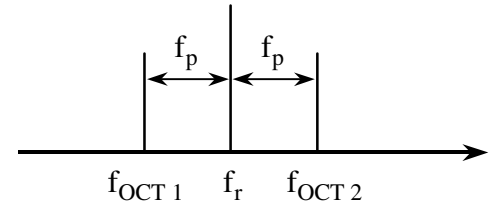


Fig. 5.13 Frecvențele de calare ale buclei.

Sintetizoarele cu PLL analogice sunt de două tipuri:

- cu injecție serie,
- cu injecție paralel.

Sintetizoare cu injecție serie

Aceste sintetizoare utilizează în mod practic decade identice, deoarece funcționează la frecvențe apropiate. Fiecare decadă are la bază principiul buclei de translatare prezentat anterior.

Schema sintetizorului cu injecție serie este prezentată în figura 5.14.

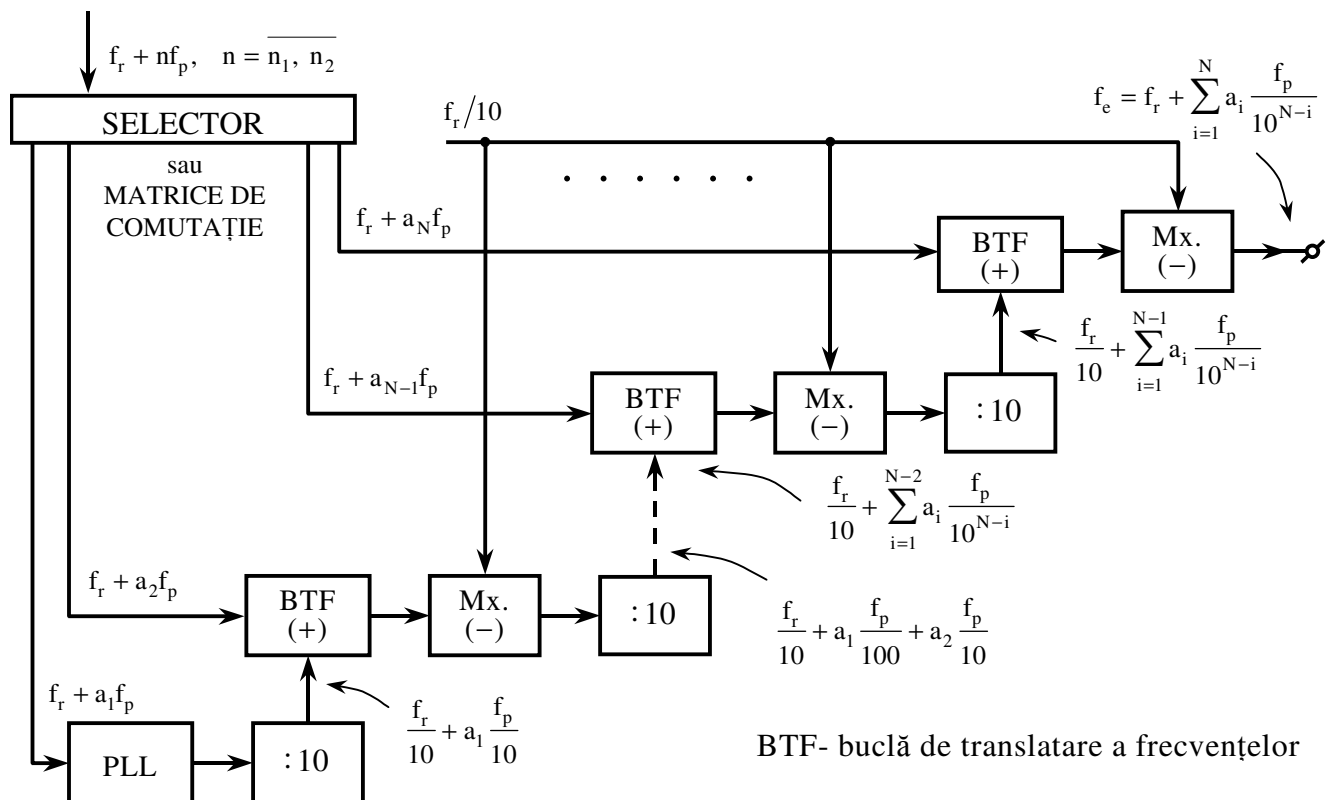


Fig. 5.14 Sintetizor cu PLL analogice cu injecție serie.

Frecvențele $(f_n + nf_p)$, $n = \overline{n_1, n_2}$, în mod uzual $n_1 = 0$, $n_2 = 9$, pot fi generate de un sintetizor direct.

Cu ajutorul sintetizatoarelor cu PLL cu injecție serie se pot genera un număr mare de frecvențe cu pasul mic, dar fără a atinge performanțele sintetizatoarelor catalitice.

Sinteza cu injecție paralel

Schema bloc a unei decade k folosită în sintetizorul cu injecție paralel este prezentată în figura 3.35.

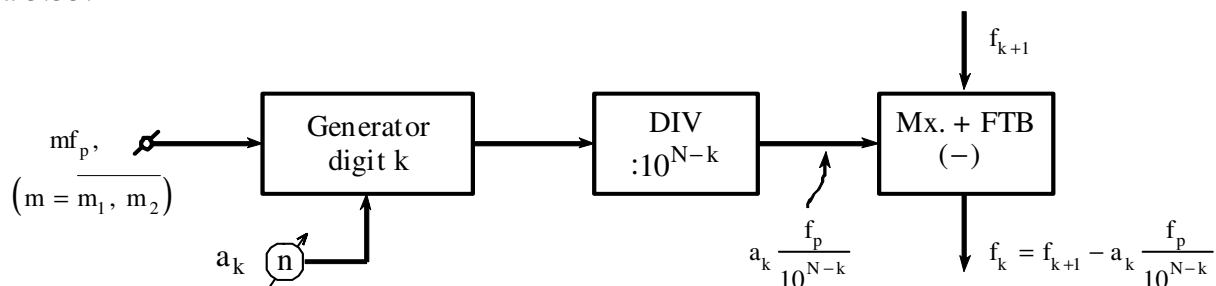


Fig. 5.15 Principiul unei decade utilizată în sintetizorul cu injecție paralel.

Generatoarele pentru digiții k pot fi sintetizoare directe simple, sintetizoare catalitice sau sintetizoare tot cu PLL (vezi fig. 5.16).

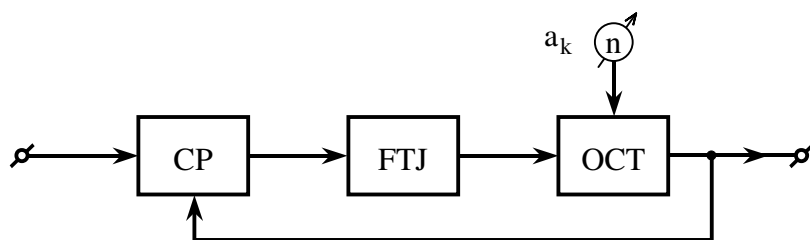


Fig. 5.16 Generator de digit cu PLL.

Sintetizoarele cu injecție paralel folosesc o singură buclă în care frecvențele f_k se injectează cu ajutorul mixerelor. Schema acestui sintetizor este reprezentată în figura 5.17.

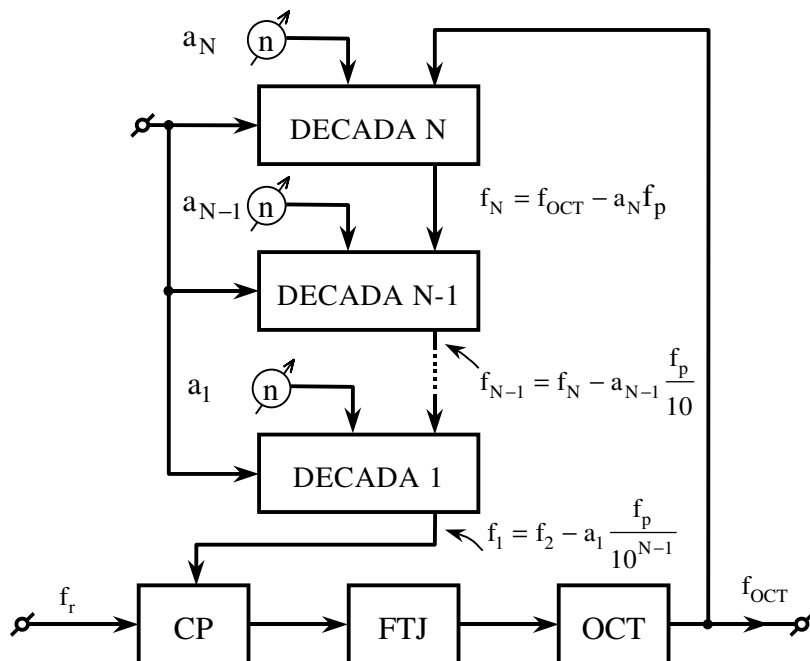


Fig. 5.17 Sintetizor cu PLL analogice cu injecție paralel.

După calarea buclei

$$f_r = f_l = f_{\text{OCT}} - \sum_{i=1}^N a_i \frac{f_p}{10^{N-i}} \quad (5.15)$$

de unde rezultă

$$f_{\text{OCT}} = f_r + \sum_{i=1}^N a_i \frac{f_p}{10^{N-i}} \quad (5.16)$$

Pentru a lărgi gama de frecvență sau pentru a obține pași mai mici, frecvența f_{OCT} poate fi divizată.

Se observă că sinteza prin injecție paralel implică o serie de mixări care au loc în interiorul buclei. Aceste operații au efecte negative asupra stabilității, constituind un dezavantaj foarte important. Acest dezavantaj ca și altele fac ca acest tip de sintetizor să nu fie utilizat atunci când numărul de frecvențe necesare este foarte mare.

b) - Sinteza frecvenței cu PLL conținând blocuri digitale

Se bazează pe principiul multiplicării de frecvență cu PLL, introducând între blocurile OCT și CP, un divizor de frecvență cu N , programabil (vezi figura 5.18).

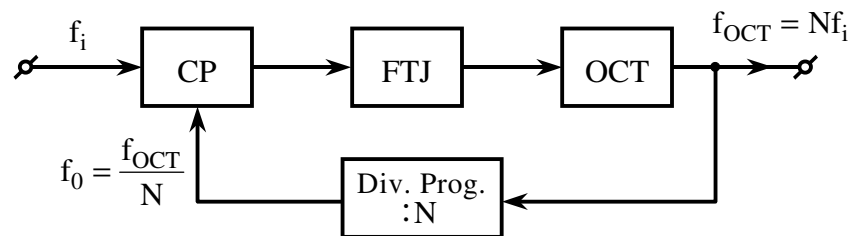


Fig. 5.18 Principiul multiplicării de frecvență cu PLL.

La sincronism

$$f_i = f_0 = \frac{f_{\text{OCT}}}{N} \Rightarrow f_{\text{OCT}} = N f_i \quad (5.17)$$

Dacă se variază $N \in [N_{\min}, N_{\max}]$ rezultă un sintetizor cu $(N_{\max} - N_{\min} + 1)$ trepte și $p = f_i$. Pentru a micșora pasul se utilizează un divizor care să ofere $f_i = f_r / M$, deoarece nu se poate genera f_r de valoare mică și cu o bună puritate spectrală. Variind pe M (3-4 valori) se poate modifica pasul frecvenței de ieșire, $f_{\text{OCT}} = N f_r / M$.

Când este necesară generarea unui număr mic de frecvențe cu pași mari (10^2 sau 10^3 Hz) se poate folosi direct principiul de mai sus realizând un sintetizor cu un singur circuit PLL. Schema unui astfel de sintetizor este prezentată de figura 5.19.

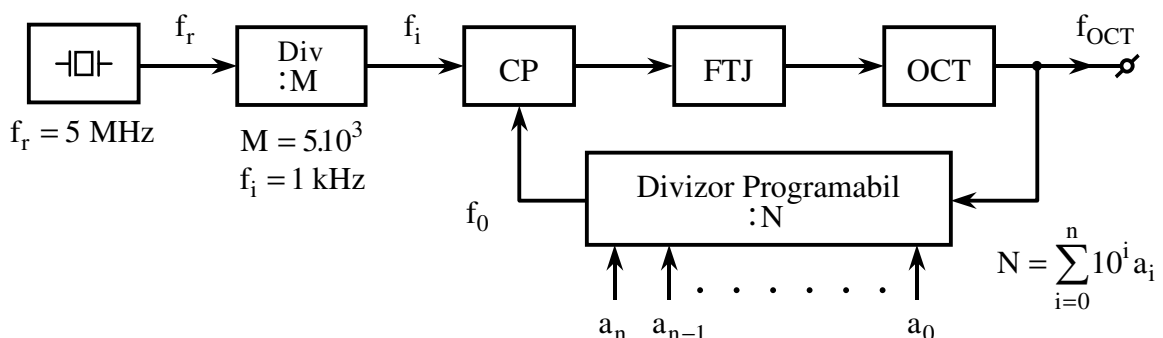


Fig. 5.19 Sintetizor cu PLL conținând blocuri digitale.

Dacă divizorul programabil este cu $n = 5$ decade la care

$$a_0, a_1, a_2, a_3 = \overline{0, 9}, \quad a_4 = \overline{2, 5} \quad (5.18)$$

rezultă: $f_{\text{OCT}} = 20 \div 59,999 \text{ MHz}$ cu $p = 1 \text{ kHz}$ și $n_f = 40.000$.

Acest procedeu de sinteză este foarte atractiv din următoarele motive principale:

- nu utilizează mixere urmate de filtre complicate;
- folosește blocuri digitale cu dimensiuni, consum și prețuri reduse.

De aceea, sintetizoarele de acest tip sunt tot mai mult utilizate în comunicații radio (în emițătoarele de bord pentru nave maritime și aeriene, în radiotelefoanele mobile și portabile, în radioreceptoarele profesionale și de larg consum etc.)

Totuși aceste sisteme, prezintă și o serie de dezavantaje printre care cele mai importante constau în rezoluția mare și limitările în frecvență determinate de funcționarea divizoarelor programabile și a OCT.

Îmbunătățirea unora dintre performanțele sintetizatorului, cu riscul creșterii complexității schemei și a prețului, se poate face folosind două circuite PLL după principiul arătat în figura 5.20.

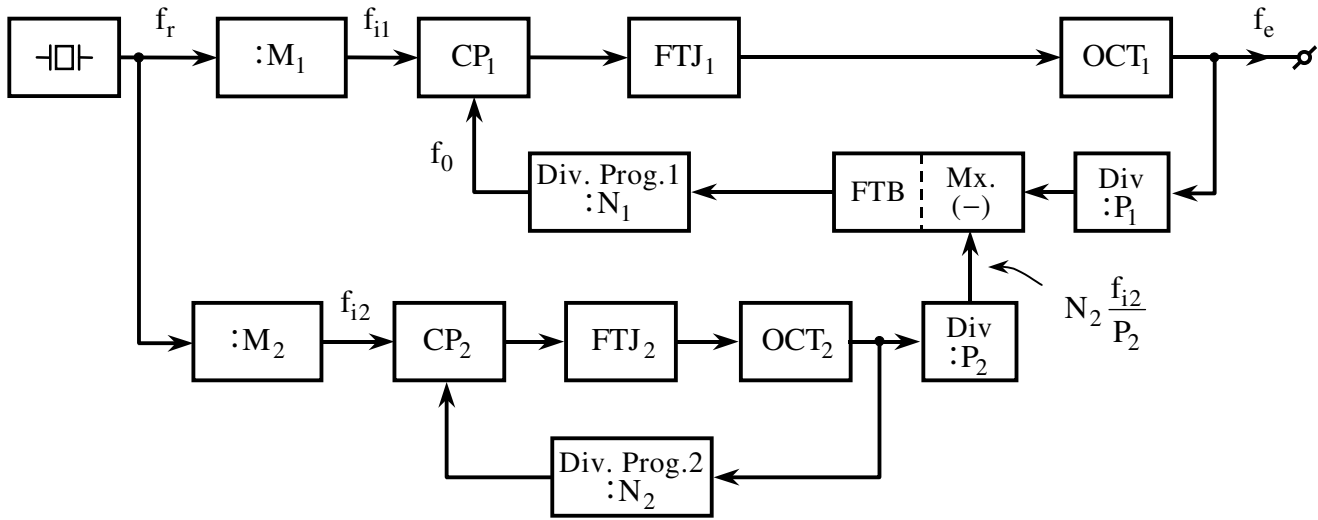


Fig. 5.20 Sintetizor cu două circuite PLL.

La sincronism

$$f_{i1} = f_0 = \frac{1}{N_1} \left(\frac{f_e}{P_1} - N_2 \frac{f_{i2}}{P_2} \right) \Rightarrow f_e = P_1 \left(N_1 f_{i1} + N_2 \frac{f_{i2}}{P_2} \right) \quad (5.19)$$

Pentru

$$\begin{aligned} f_r &= 5 \text{ MHz}, & M_1 &= 5, & M_2 &= 5 \cdot 10^3 \\ N_1 &= 8 \div 97, & N_2 &= 20.000 \div 29.999 & (a_4 - \text{fix}) \\ P_1 &= 1, & P_2 &= 10 \end{aligned} \quad (5.20)$$

se obține

$$\begin{aligned} f_{i1} &= 1 \text{ MHz}, & f_{i2} &= 1 \text{ kHz} \\ f_e &= 10,0000 \div 99,9999 \text{ MHz}, & p &= 100 \text{ Hz}, & n_f &= 9 \cdot 10^5 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Dacă se ia $P_1 = 10$ (toate celelalte valori rămânând constante), atunci caracteristicile sintetizatorului sunt

$$f_e = 100,000 \div 999,999 \text{ MHz}, \quad p = 1 \text{ kHz}, \quad n_f = 9 \cdot 10^5 \quad (5.22)$$

adică are loc o deplasare a domeniului de frecvențe sintetizat, din care cauză divizorul cu P_1 poartă numele de *divizor de prescalare*.

Se observă ușor că stabilind prin proiectare, la valorile necesare, factorii de divizare convenabili se poate realiza: domeniul de frecvență sintetizat, numărul de frecvențe și pasul.

Concluzie

Alegerea unui anumit tip de sintetizor (procedeu de sinteză) se face în funcție de caracteristicile aplicației de rezolvat:

- dacă sunt necesare *performanțe foarte ridicate* în ceea ce privește gama și numărul de frecvențe, pasul și puritatea spectrală, în detrimentul dimensiunii, consumului și prețului de cost, atunci sunt indicate ***sintetizoarele catalitice***.
- în caz contrar, mult mai convenabile sunt ***sintetizoarele indirecte*** folosind circuite PLL, supuse în prezent unei continue perfecționări.