

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΕΛΕΤΗ ΝΕΑΣ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ
ΤΣΙΜΠΟΥΚΑ ΚΩΝ/ΝΟΥ
(ΑΜ:6118)

Σύνθεση Συχνοτήτων



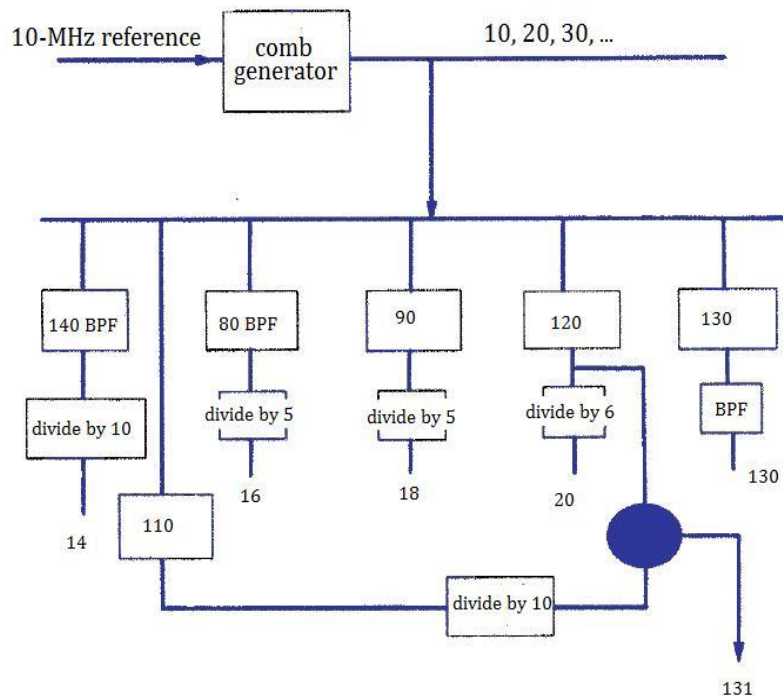
Βασικοί Παράμετροι Συνθετών

- Περιοχή Συχνοτήτων (Range)
- Ανάλυση Συχνότητας (Step)
- Ταχύτητα Μεταγωγής
- Θόρυβος φάσης

Ανασκόπηση Τεχνικών Σύνθεσης Συχνοτήτων

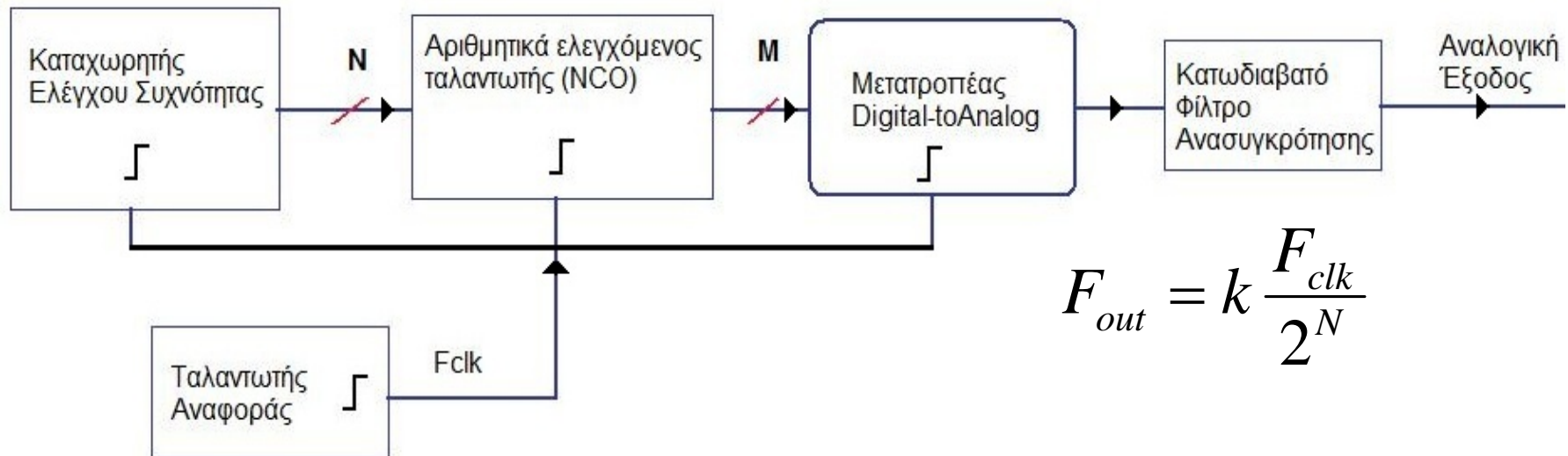
- Άμεση Αναλογική Σύνθεση (Direct Analog Synthesis-DAS)
- Άμεση Ψηφιακή Σύνθεση (Direct Digital Synthesis-DDS)
- Έμμεση Ψηφιακή Σύνθεση (Indirect Digital Synthesis)

Άμεση Αναλογική Σύνθεση



- Πλεονεκτήματα
 - Καλή ποιότητα σήματος εξόδου
- Μειονεκτήματα
 - Πολλές συχνότητες αναφοράς
 - Πολύπλοκη λειτουργία
 - Επαναλαμβανόμενα επίπεδα λειτουργίας
 - Μικρή Περιοχή Κάλυψης
 - Μέγεθος συσκευών
 - Δεν διατηρεί την φάση (λόγω διαιρετών)

Άμεση Ψηφιακή Σύνθεση



Πλεονεκτήματα

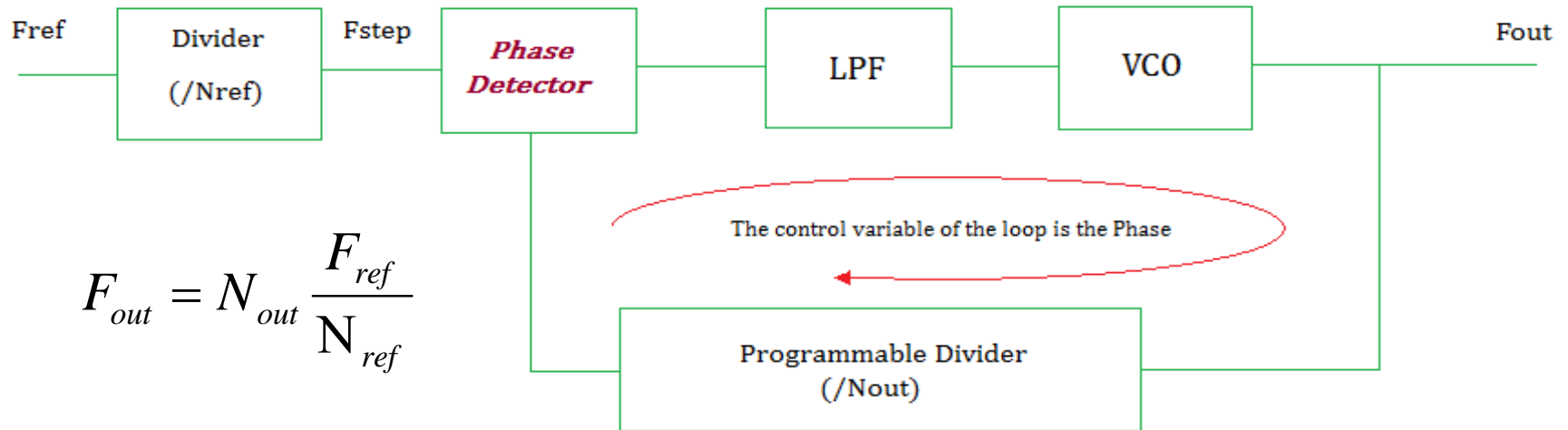
- Μεγάλο φάσμα συχνοτήτων
- Υψηλή ταχύτητα μεταγωγής
- Compact μικρές συσκευές
- Συμβατότητα με σύγχρονα ψηφιακά συστήματα
- Βελτιωμένα χαρακτηριστικά θορύβου φάσης
- Καλή ποιότητα σήματος

Μειονεκτήματα

- Σημαντική κατανάλωση ισχύος
- Κόστος
- Ο θόρυβος εξόδου εξαρτάται από τα bits του DAC (-6M dB)
- Δημιουργία Spurs λόγω της λειτουργίας του αριθμητικά-ελεγχόμενου ταλαντωτή

Έμμεση Ψηφιακή Σύνθεση

(Phase Locked Loop)



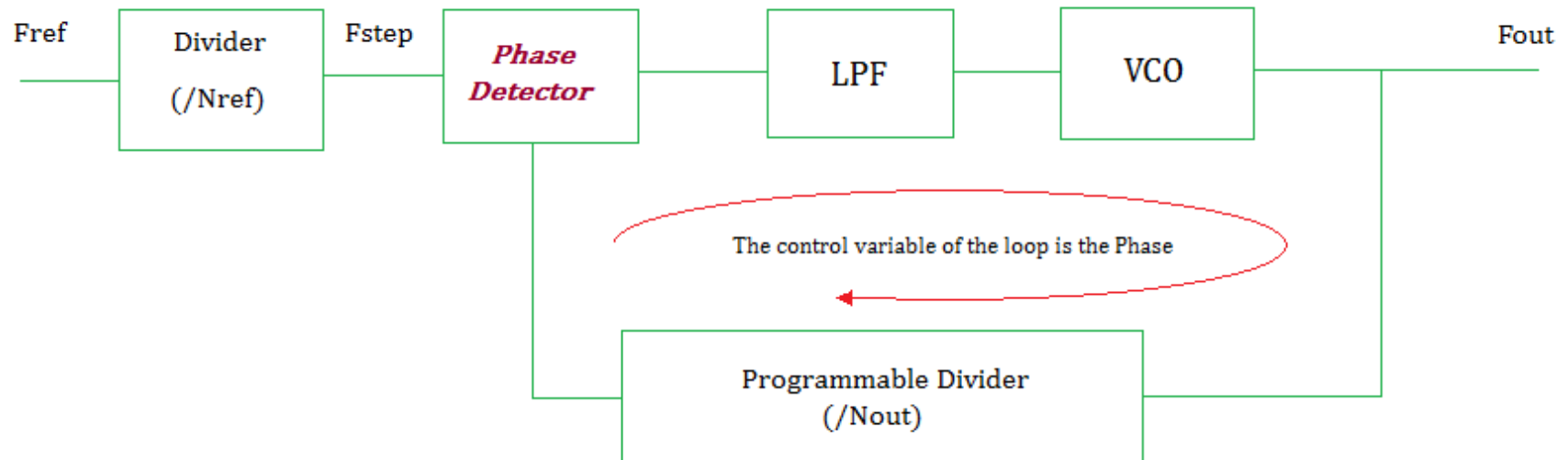
□ Πλεονεκτήματα

- Φθηνή και εύκολη υλοποίησης
- Μικρός όγκος κατασκευής
- Μικρή κατανάλωση ισχύος
- Ποιότητα εξόδου
- Απόρριψη θορύβου φάσης

□ Μειονεκτήματα

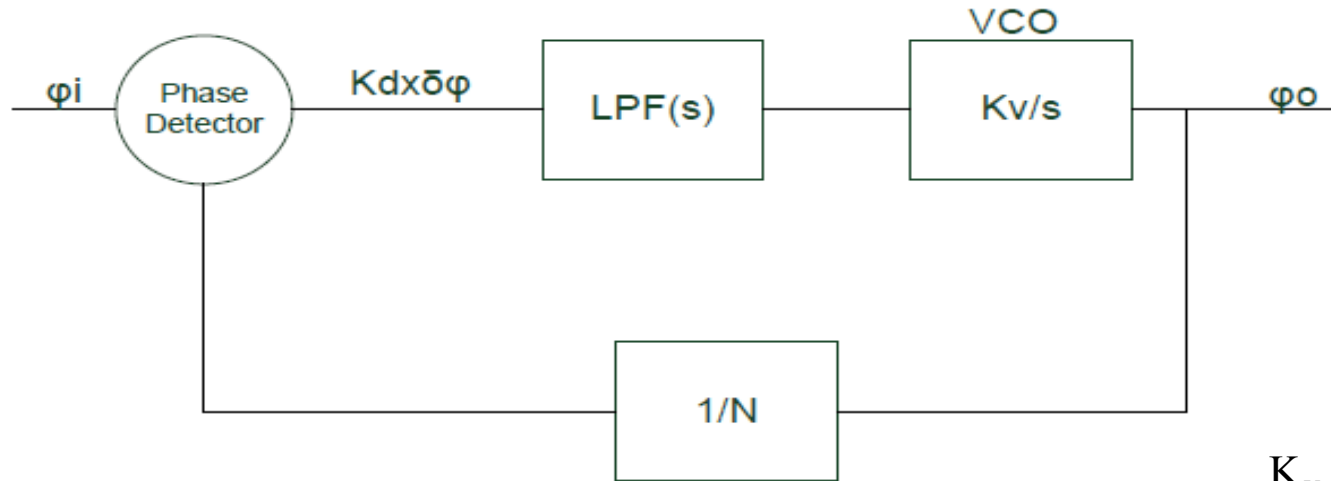
- Αργός ρυθμός δειγματοληψίας της διαφοράς φάσης
- Ταυτόχρονα γρήγορη σύγκλιση και μικρό βήμα συχνότητας
- Κίνδυνος μετάπτωσης του βρόχου σε αστάθεια

Πρόβλημα Έμμεσης Σύνθεσης Συχνοτήτων



- Συχνότητα (F_{step})
- Συχνότητα Δειγματοληψίας Φάσης ($=F_{step}$)
- Θόρυβος Δειγματοληψίας Φάσης (ανάδειξη μόνο DC συνιστώσας με την χρήση του LPF)

Συνάρτηση Μεταφοράς Βρόχου PLL



Η συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος :

$$H(s) = \frac{K_d LPF(s) \frac{K_v}{s}}{1 + K_d LPF(s) \frac{K_v}{s} \frac{1}{N}}$$

Σημαντικό ρόλο στην ποιότητα εξόδου του παραγόμενου σήματος παίζει η σωστή σχεδίαση και η επιλογή του τύπου του φίλτρου. Τρεις είναι οι βασικές μορφές του φίλτρου που χρησιμοποιούνται ευρέως:

- Το *lag* φίλτρο
- Το *lead-lag* φίλτρο
- Το ενεργό φίλτρο

Ανάλογα με την επιλογή του φίλτρου καθορίζεται και ο τύπος του βρόχου.

Βασικό μειονέκτημα συνθέτη PLL και αντιμετώπιση από την καινούργια σχεδίαση

- Σημαντικότερο μειονέκτημα συμβατικού συνθέτη συχνοτήτων PLL:
 - Δεν μπορεί ταυτόχρονα να έχει μικρό χρόνο σύγκλισης και μικρή συχνότητα βήματος.
- Το σύστημα που μελετάμε στη εργασία αυτή:
 - Αντιμετωπίζει το παραπάνω μειονέκτημα.
 - Ταυτόχρονα διατηρεί και επαυξάνει την δυνατότητα των απλών συνθετών να απορρίπτουν τον θόρυβο φάσης, δίνοντας έτσι πολύ καλή ποιότητα σήματος εξόδου.

Νέα Τεχνική σύνθεσης συχνοτήτων (PLL)

Η φιλοσοφία της νέας τεχνικής βασίζεται στο γεγονός ότι μπορούμε με έναν συγκεκριμένο υπολογισμό να προσδιορίσουμε τα στιγμιαία χαρακτηριστικά ενός ημιτονικού σήματος (συχνότητα, φάση και πλάτος) αν γνωρίζουμε τις τιμές του σε τρεις διαδοχικές στιγμές.

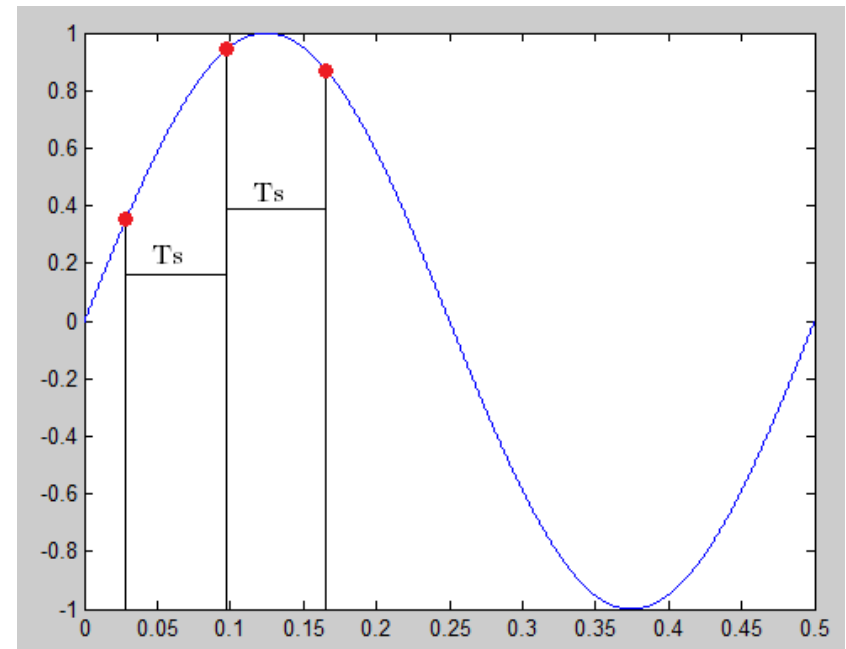
Υπολογισμός της συχνότητας εξόδου

Δειγματοληπτώντας το σήμα εξόδου και παίρνοντας τρία διαδοχικά σημεία, όπως στο σχήμα, έχουμε:

$$\begin{aligned}x_1 &= A \cdot \sin(2\pi F_{out} \cdot t + \theta_1) & x_1 &= A \sin(\phi_1) \\x_2 &= A \cdot \sin(2\pi F_{out} \cdot t + \theta_2) \Rightarrow & x_2 &= A \sin(\phi_2) \\x_3 &= A \cdot \sin(2\pi F_{out} \cdot t + \theta_3) & x_3 &= A \sin(\phi_3)\end{aligned}$$

Παρατηρώντας το σχήμα,
βλέπουμε ότι ισχύει:

$$\begin{aligned}\phi_1 &= \phi_2 - 2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}} \\ \phi_3 &= \phi_2 + 2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}}\end{aligned}$$



Υπολογισμός της συχνότητας εξόδου

Έτσι εκφράζοντας τα τρία σημεία με την ίδια γωνία, έχω:

$$x_1 = A \sin(\phi_2 - 2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}})$$

$$x_2 = A \sin(\phi_2)$$

$$x_3 = A \sin(\phi_2 + 2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}})$$

Κάνοντας χρήση γνωστών τριγωνομετρικών εξισώσεων :

$$x_1 = A \cdot [\sin \phi_2 \cdot \cos(2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}}) - \cos \phi_2 \cdot \sin(2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}})]$$

$$x_2 = A \cdot \sin \phi_2$$

$$x_3 = A \cdot [\sin \phi_2 \cdot \cos(2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}}) + \cos \phi_2 \cdot \sin(2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}})]$$

Υπολογισμός της συχνότητας εξόδου

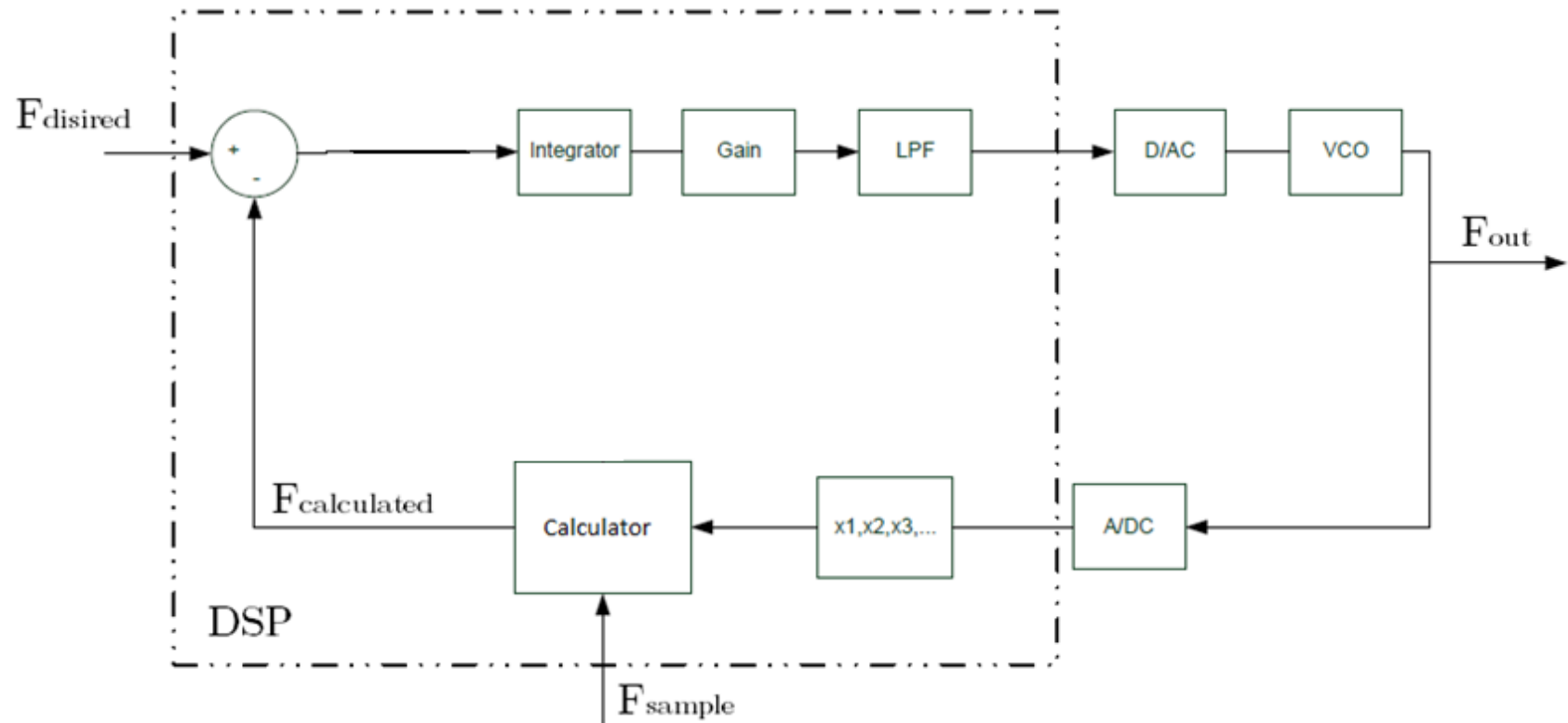
Προσθέτουμε x_1 και x_3 και διαιρούμε με το $2x_2$, απαλείφοντας όρους:

$$\frac{x_1 + x_3}{2x_2} = \frac{2 \cdot A \cdot \sin \phi_2 \cdot \cos(2\pi \frac{F_{out}}{F_{sample}})}{2 \cdot A \cdot \sin \phi_2} \Rightarrow$$

Και καταλήγουμε στην συνάρτηση που θέλουμε να υλοποιεί ο Calculator:

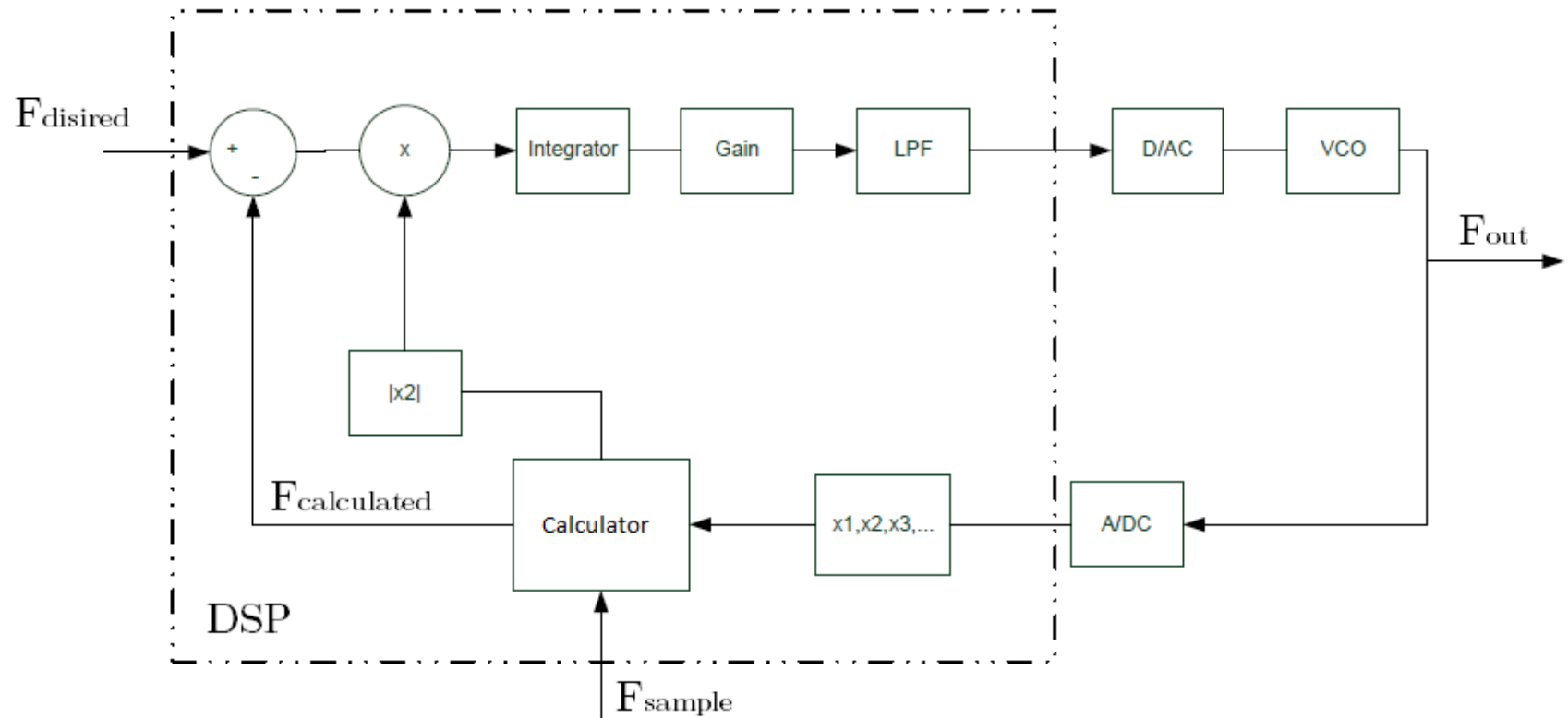
$$F_{calculated} = F_{out} = \frac{F_{sample}}{2\pi} \cos^{-1}\left(\frac{x_1 + x_3}{2x_2}\right)$$

Σχηματικό Διάγραμμα Νέας Τεχνικής σύνθεσης συχνοτήτων (PLL)



Διόρθωση Σφάλματος

(Πολλαπλασιασμός με $|x_2|$)



Σημαντικά χαρακτηριστικά νέας σχεδίασης

□ Λειτουργικά χαρακτηριστικά

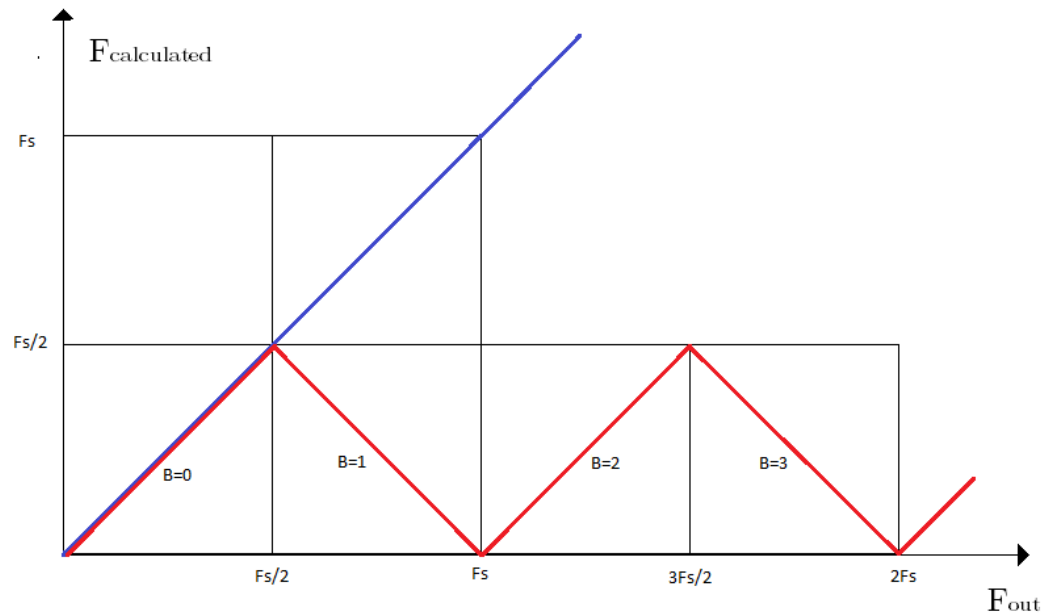
- Μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας
 - Μικρός χρόνος σύγκλισης.
 - Υψηλή απόρριψη θορύβου φάσης.
 - Ποιότητα σήματος εξόδου.
- Μικρή συχνότητα βήματος μη εξαρτώμενη από την συχνότητα δειγματοληψίας

□ Τεχνικά χαρακτηριστικά

- Υλοποίηση PFD με την χρήση συστήματος που δειγματοληπτεί το σήμα εξόδου με μεγάλη συχνότητα (που μπορούμε να ορίσουμε αυθαίρετα και με βάση τις ανάγκες μας).
- Ο υπολογισμός της διαφοράς φάσης είναι «αριθμητικός», η φάση αναφοράς δηλαδή είναι μία τιμή στο σύστημα υπολογισμού.
- Η ρύθμιση της τιμής αυτής καθορίζει την συχνότητα εξόδου καθώς και το βήμα της.
- Συνεπώς, το βήμα του συνθέτη καθορίζεται από την ακρίβεια των αριθμητικών πράξεων του προτεινόμενου PFD.

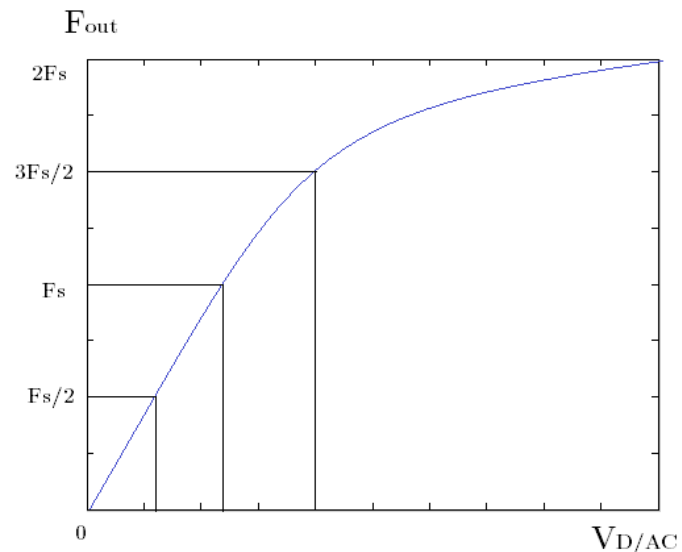
Πρόβλημα Γραμμικότητας συστήματος με βάση την παραπάνω $F_{\text{calculated}}$

- Ενώ καταφέραμε με τον παραπάνω υπολογισμό να προσδιορίζουμε την συχνότητα εξόδου του συνθέτη με ακρίβεια, παρόλα αυτά μπορούμε να υπολογίσουμε ($F_{\text{calculated}}$) συχνότητες μόνο από 0 μέχρι $F_s/2$ (κόκκινη γραμμή).
- Η επιθυμητή συμπεριφορά είναι η γραμμική (μπλε γραμμή).



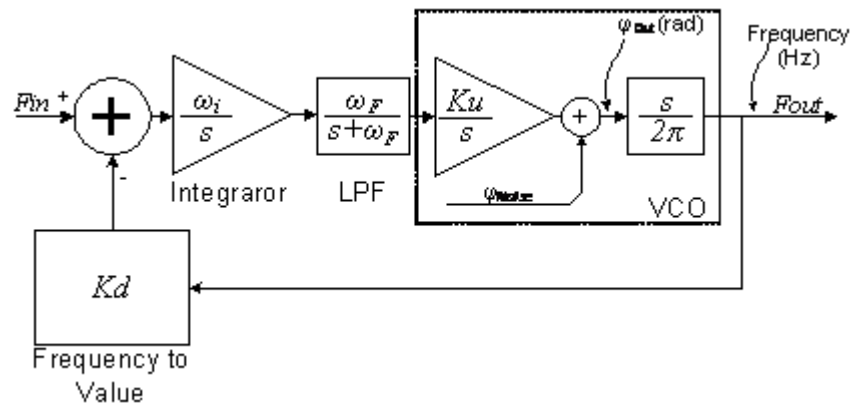
Διορθωμένη $F_{calculated}$

- Η εξίσωση που μας εξασφαλίζει αυτή την γραμμική συμπεριφορά που επιθυμούμε είναι η :
$$F_{calculated} = \left(B + \frac{1}{2} + (-1)^B \frac{1}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{x_1 + x_3}{2x_2} \right) - \frac{1}{2} \right) \cdot \frac{F_s}{2}$$
- Όπου B , η παράμετρος που μας δείχνει σε ποιά περιοχή βρισκόμαστε, και ορίζεται: $B = \text{floor} \left(\frac{2F_{desired}}{F_s} \right)$.
- Η συχνότητα εξόδου εξαρτάται άμεσα από την τάση οδήγησης του VCO $V_{D/AC}$.
- Για να παράγουμε τελικώς συχνότητες μεγαλύτερες από την $F_s/2$, θα πρέπει ο D/AC που οδηγεί το VCO να ρυθμιστεί κατάλληλα.



Ανάλυση Συστήματος

- Το Block διάγραμμα του συστήματος:



- Η συνάρτηση μεταφοράς του είναι : $H(s) = \frac{F_{out}(s)}{F_{in}(s)} = \frac{\frac{\omega_i}{s} \cdot \frac{\omega_F}{s + \omega_F} \cdot \frac{Ku}{s} \cdot \frac{s}{2\pi}}{1 + Kd \cdot \frac{\omega_i}{s} \cdot \frac{\omega_F}{s + \omega_F} \cdot \frac{Ku}{s} \cdot \frac{s}{2\pi}} Hz$
- Και αφού : $H(s) = \frac{1}{Kd} \cdot \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$
- Έχουμε ότι η φυσική συχνότητα είναι : $\omega_n = \sqrt{\omega_i \cdot \omega_F \cdot Kv \cdot Kd}$
- Ενώ ο συντελεστής απόσβεσης : $\zeta = \sqrt{\frac{\omega_F}{4 \cdot \omega_i \cdot Kv \cdot Kd}}$

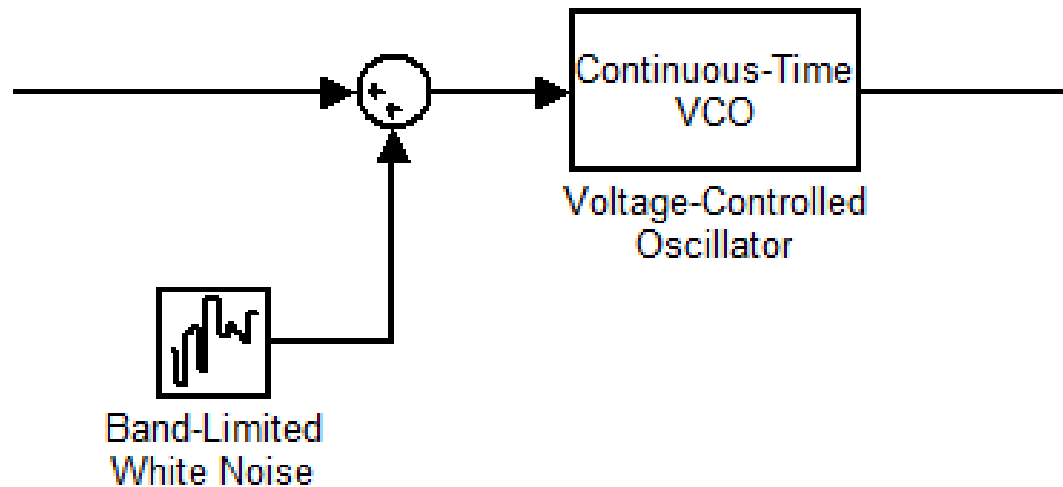
Ανάλυση Συστήματος δευτέρου βαθμού

- Η απόρριψη θορύβου φάσης του συστήματος δευτέρου βαθμού είναι:
$$H_{NR}(s) = \frac{1}{1 + \frac{s}{2\pi} Kd \frac{\omega_i}{s} \cdot \frac{\omega_F}{s + \omega_F} \frac{Ku}{s}}$$
- Η απόρριψη θορύβου φάσης μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της φυσικής συχνότητας και του συντελεστή απόσβεσης ζ :
$$H_{NR}(s) = \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$
- Αυτό συνεπάγεται ότι το σύστημα συμπεριφέρεται σαν ένα συνηθισμένο υψιπερατό φίλτρο δευτέρου βαθμού.
- Μια σημαντική ιδιότητα αυτής της τοπολογίας είναι η απόρριψη του θορύβου φάσης του VCO, ιδιότητα που έχουν οι PLL συνθέτες γενικά.

Εξομοιώσεις Συστήματος

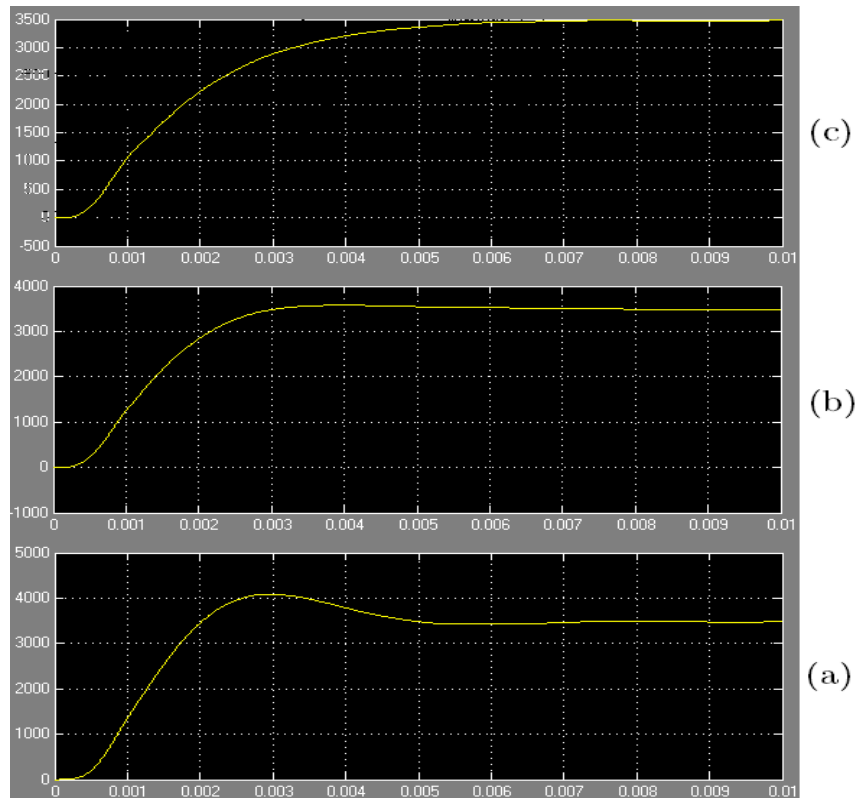
- Παραπάνω είδαμε πως μπορούμε να ελέγχουμε τον βρόχο μέσω των βασικών παραμέτρων της συνάρτησης μεταφοράς του ω_n και ζ .
- Με δεδομένα ω_n , ζ , K_v και K_d , μπορούμε να προσδιορίσουμε την συνάρτηση μεταφοράς του ολοκληρωτή και του κατωδιαβατού φίλτρου: $\frac{\omega_i}{s} \cdot \frac{\omega_F}{s + \omega_F}$.
- Αφού :
$$\omega_i = \frac{\omega_n}{2\zeta K_v K_d}$$
$$\omega_F = 2\zeta\omega_n$$
- Ενώ μπορούμε να εκτιμήσουμε τον χρόνο σύγκλισης του βρόχου από τον : $t_s = \frac{\pi\sqrt{2}}{\omega_n}$

Εισαγωγή θορύβου στο VCO



- Επειδή όμως το VCO εισάγει στο σύστημα ένα θόρυβο, μπορούμε και εμείς στις εξομοιώσεις να εισάγουμε ένα θόρυβο στην είσοδο του VCO και να δούμε πως συμπεριφέρεται το φασματικό περιεχόμενο της εξόδου του συνθέτη.

Εξομοιώσεις Συστήματος

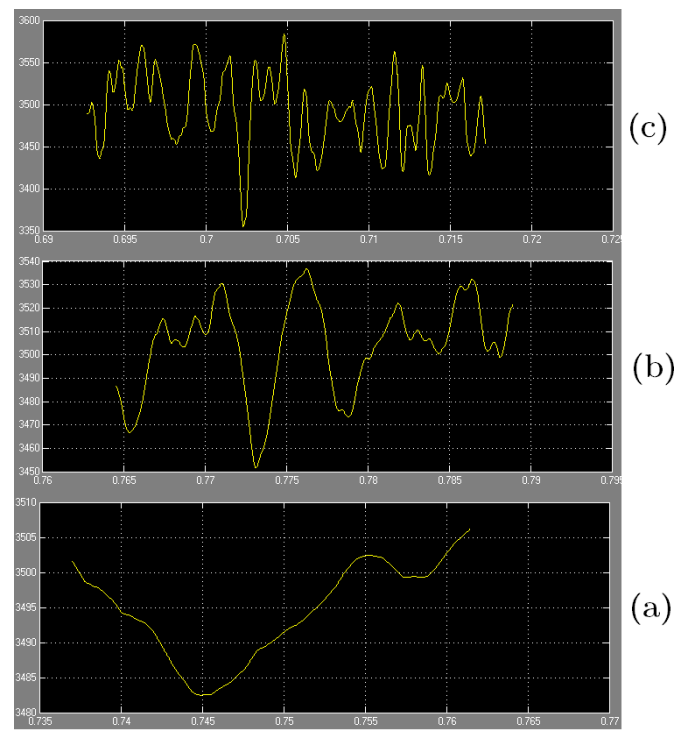
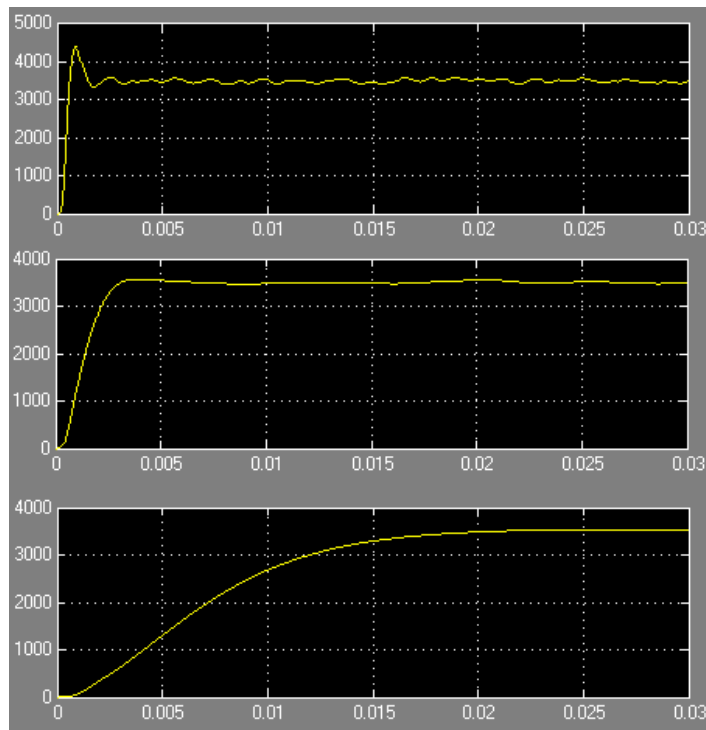


Είσοδος VCO και ταλάντωση για:(a) $\zeta=0.5$ (b) $\zeta=0.707$ (c) $\zeta=1$

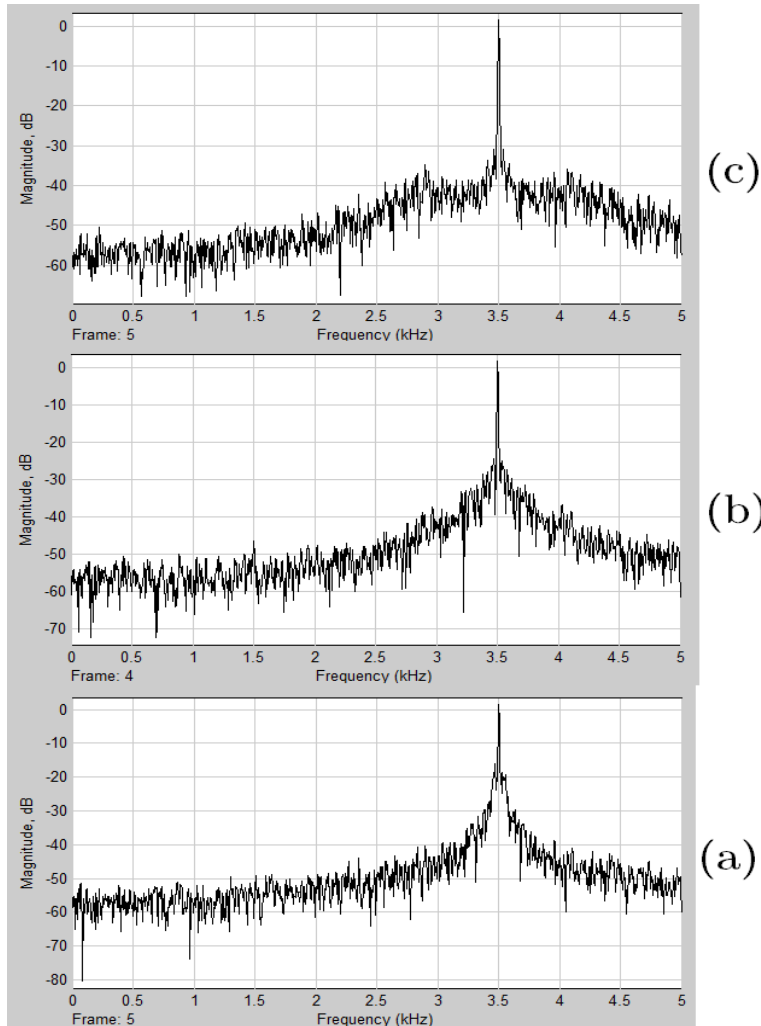
Εξομοιώσεις Συστήματος

Είσοδος VCO και χρόνος σύγκλισης για: (α) $\omega_n=2\pi 50(\text{rad/s})$
(β) $\omega_n=2\pi 250(\text{rad/s})$ (γ) $\omega_n=2\pi 1000(\text{rad/s})$

Είσοδος VCO και σταθερότητα τιμής για : (α) $\omega_n=2\pi 50(\text{rad/s})$
(β) $\omega_n=2\pi 250(\text{rad/s})$ (γ) $\omega_n=2\pi 1000(\text{rad/s})$



Εξομοιώσεις Συστήματος



Phase noise (Παραγωγή 3.5 kHz) για : (a) $\omega_n = 2\pi 50(\text{rad/s})$ (b) $\omega_n = 2\pi 250(\text{rad/s})$ (c) $\omega_n = 2\pi 1000(\text{rad/s})$



Ευχαριστώ για την προσοχή σας

Ερωτήσεις ???