

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΤΟΜΕΑΣ Ε: ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ, ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ,
ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ ΚΑΙ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ

ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ
ΕΙΣΑΓΩΓΗ
ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

Αθήνα, Μάρτιος 2008

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Οι σημειώσεις αυτές αποτελούν τη δεύτερη προσπάθεια στα τελευταία χρόνια για να καλυφθούν οι διδακτικές ανάγκες του εργαστηρίου *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ*, το οποίο απευθύνεται στους φοιτητές του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθηνών, οι οποίοι επιλέγουν την κατεύθυνση *ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ*. Στη συγκεκριμένη έκδοση των σημειώσεων καταβλήθηκε ιδιαίτερη προσπάθεια να απαληφθούν λάθη και ασάφειες, που υπήρχαν στην πρώτη, παρόλα αυτά παρατηρήσεις για τις σημειώσεις αυτές είναι ευπρόσδεκτες και καλόν είναι να υποδεικνύονται από τους αναγνώστες στους συγγραφείς αυτών.

Ο σκοπός του εργαστηριακού αυτού μαθήματος είναι η εξοικείωση των φοιτητών με τα συστήματα διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης παλμών (ουσιαστικά περιοδικών παλμοσειρών). Έτσι, στην *Πρώτη* άσκηση περιλαμβάνονται η ανάλυση σημάτων κατά *Fourier*, η έννοια της συνάρτησης μεταφοράς καθώς και η ταξινόμηση διαφόρων φίλτρων (υψιπερατά, βαθυπερατά και ζωνοπερατά) ανάλογα με τη μορφή της συνάρτησης μεταφοράς τους. Τέλος, εξετάζεται η συνάρτηση μεταφοράς ενός *S/N Separator*. Στην *Δεύτερη* άσκηση παρουσιάζεται η διαδικασία της δειγματοληψίας ενός αναλογικού σήματος, δηλαδή η μετατροπή του σε ένα διακριτό ως προς το χρόνο σήμα (δειγματοληπτημένο σήμα), ενώ σημειώνονται οι διαφορές ιδανικής και φυσικής (πραγματικής) δειγματοληψίας. Επίσης, εξετάζεται η δειγματοληψία και κατακράτηση και δίνεται ένας τρόπος ανασύστασης του αρχικού σήματος από το δειγματοληπτημένο και παρουσιάζονται τα προβλήματα της διαδικασίας αυτής, ενώ προτείνονται και διάφοροι τρόποι επίλυσής τους. Η *Τρίτη* άσκηση περιλαμβάνει τις βασικές αρχές της τεχνικής πολυπλεξίας στο πεδίο του χρόνου καθώς και τα προβλήματα υλοποίησής της στην πράξη (*διομιλία*), ενώ δίνονται οι τρόποι επίλυσής των. Στην *Τέταρτη* άσκηση δίνονται οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός διαμορφωτή παλμοκωδικής διαμόρφωσης (*PCM*) και αναλύονται οι επιμέρους διατάξεις που περιλαμβάνει. Τέλος, στην *Πέμπτη* άσκηση εξετάζονται οι βασικές αρχές λειτουργίας ενός διαμορφωτή Δέλτα και ο τρόπος υλοποίησής του.

Θα ήταν παράλειψή μας αν δεν τονίζαμε τη πολύ σημαντική συνεισφορά του Δρ. Γιώργου Λάτσα, στη συγγραφή όσο και στην όσο το δυνατόν καλύτερη παρουσίαση των σημειώσεων αυτών.

ΑΣΚΗΣΗ 1: ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ – ΦΙΛΤΡΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση των ψηφιακών κυκλωμάτων και τεχνικών για την επεξεργασία και τη μετάδοση αναλογικών σημάτων αυξάνει ολοένα και περισσότερο στις μέρες μας. Αιτία αποτελούν τα μεγάλα και πολλά πλεονεκτήματα, τα οποία παρουσιάζουν τα ψηφιακά κυκλώματα τόσο στην επεξεργασία του σήματος όσο και στη μεταφορά του. Για παράδειγμα, μπορεί να αναφερθεί η ανθεκτικότητα των ψηφιακών σημάτων στην επίδραση του θορύβου, που έχει ως αποτέλεσμα τα ψηφιακά συστήματα τηλεπικοινωνιών να εμφανίζουν μεγαλύτερο λόγο σήματος–προς–θόρυβο από τα αναλογικά. Επιπρόσθετα, η επεξεργασία του σήματος τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας είναι ευκολότερη για ένα ψηφιακό σήμα, κυρίως λόγω της συνεχώς αυξανόμενης χρήσης των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Έτσι, ένα ψηφιακό σήμα, αφού υποστεί κατάλληλη κωδικοποίηση, είναι δυνατή η επεξεργασία, η αποθήκευση και η ανάκτησή του σε διαφορετικό χρόνο. Ως **κωδικοποίηση** ενός ψηφιακού σήματος λέγεται η περιγραφή του με προσυμφωνημένες λέξεις, οι οποίες είναι ουσιαστικά οι τιμές του σήματος σε κάποιο αριθμητικό σύστημα, που συνήθως είναι το δυαδικό.

1.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Κάθε σήμα, είτε είναι περιοδικό είτε όχι, μπορεί να περιγραφεί τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Στα συστήματα τηλεπικοινωνιών τα σήματα περιγράφονται συνήθως στο πεδίο της συχνότητας, γιατί η περιγραφή αυτή είναι πιο παραστατική από την αντίστοιχη στο πεδίο του χρόνου, όσον αφορά στις μετατροπές που υφίσταται το σήμα τόσο κατά την επεξεργασία του όσο και κατά τη μετάδοσή του μέσα από τα διάφορα υποσυστήματα. Για την περιγραφή ενός περιοδικού σήματος στο πεδίο της συχνότητας χρησιμοποιείται η ανάπτυξη του σε σειρά *Fourier*, οι βασικές αρχές της οποίας δίνονται περιληπτικά παρακάτω, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες ο αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στη βιβλιογραφία ([1] §1.2, [2] §2.2). Έτσι, ένα περιοδικό σήμα $x(t)$ με θεμελιώδη περίοδο T_0 μπορεί να παρασταθεί ως ένα άθροισμα άπειρων ημιτονοειδών

κυματομορφών, η οποία λέγεται **σειρά Fourier** και μπορεί να γραφεί με διάφορες μορφές. Μία τέτοια μορφή είναι η ακόλουθη:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_x(nf_0) \exp(j2\pi n f_0 t), \quad -\infty < t < +\infty \quad (1.1)$$

όπου n ακέραιος αριθμός, $f_0 = 1/T_0$ είναι η θεμελιώδης συχνότητα και οι συντελεστές $C_x(nf_0)$ δίνονται από τη σχέση:

$$C_x(nf_0) = \frac{1}{T_0} \int_{-T_0/2}^{T_0/2} x(t) \exp(-j2\pi n f_0 t) dt \quad (1.2)$$

Η σειρά *Fourier* της εξίσωσης (1.1) αποτελείται από όρους, οι οποίοι αντιστοιχούν σε διαφορετικές συχνότητες ανάλογα με την τάξη n του εκθέτη, δηλαδή περιλαμβάνει τη συνεχή συνιστώσα (DC) ($n = 0$), τη θεμελιώδη f_0 ($|n| = 1$) καθώς και τις διάφορες αρμονικές nf_0 , για $|n| > 1$. Οι συντελεστές C_x δίνουν το πλάτος του κάθε όρου της σειράς, δηλαδή το πλάτος της κάθε συνιστώσας συχνότητας. Με άλλα λόγια, η ανάλυση του περιοδικού σήματος σε σειρά *Fourier* δίνει όλες τις συνιστώσες συχνότητας, τις οποίες περιλαμβάνει το σήμα. Δηλαδή, η ανάλυση αυτή έδωσε το λεγόμενο **διακριτό φασματικό περιεχόμενο** του περιοδικού σήματος $x(t)$ και η γραφική παράσταση των πλατών των διαφόρων αρμονικών σε συνάρτηση με την τάξη της αρμονικής λέγεται **φάσμα πλάτους του σήματος**.

Αν το σήμα, που πρόκειται να περιγραφεί στο πεδίο της συχνότητας **δεν** είναι περιοδικό, τότε αντί για σειρά χρησιμοποιείται το ολοκλήρωμα *Fourier*, που προκύπτει από τη σειρά *Fourier* στο όριο $T_0 \rightarrow +\infty$. Τότε, το σήμα $x(t)$ γράφεται στη μορφή:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \exp(j2\pi f t) df, \quad -\infty < t < +\infty \quad (1.3)$$

όπου

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi f t) dt, \quad -\infty < f < +\infty \quad (1.4)$$

Στην περίπτωση αυτή το λαμβανόμενο φάσμα είναι συνεχές και η συνάρτηση $X(f)$ λέγεται **Μετασχηματισμός Fourier** του σήματος $x(t)$. Περισσότερες πληροφορίες μπορεί ο αναγνώστης να βρει στη βιβλιογραφία ([1] §1.3, [2] §2.3).

1.3 ΦΙΛΤΡΑ

Πρόκειται για δίθυρες διατάξεις, που έχουν την ιδιότητα να επιτρέπουν τη διέλευση σε κάποιες συχνότητες, ενώ αποκόπτουν κάποιες άλλες. Με βάση την ιδιότητα αυτή τα φίλτρα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- (α) **Χαμηλοπερατά ή χαμηλοδιαβατά φίλτρα** (*Low Pass Filter, LPF*), που επιτρέπουν τη διέλευση σε συχνότητες, οι οποίες είναι μικρότερες από κάποια καθορισμένη.
- (β) **Υψιπερατά φίλτρα** (*High Pass Filter, HPF*), που επιτρέπουν τη διέλευση σε συχνότητες, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από κάποια συγκεκριμένη.
- (γ) **Ζωνοπερατά φίλτρα** (*Band Pass Filter, BPF*), που επιτρέπουν τη διέλευση μιας καθορισμένης περιοχής (μπάντας) συχνοτήτων.

Η συχνότητα, η οποία αποτελεί το όριο διέλευσης για κάθε φίλτρο, λέγεται **συχνότητα αποκοπής**. Είναι προφανές με βάση την παραπάνω διάκριση ότι το χαμηλοπερατό και το υψιπερατό φίλτρο έχουν μία συχνότητα αποκοπής, ενώ το ζωνοπερατό έχει δύο. Επίσης, για το τελευταίο φίλτρο η διαφορά ($\omega_2 - \omega_1$) λέγεται **εύρος ζώνης** του φίλτρου.

Η συμπεριφορά ενός φίλτρου καθορίζεται πλήρως από τη λεγόμενη **συνάρτηση μεταφοράς** του $H(f)$, η οποία είναι ο μετασχηματισμός *Fourier* της κρουστικής απόκρισης του φίλτρου. Ως κρουστική απόκριση $h(t)$ ενός συστήματος ορίζεται η έξοδος αυτού, όταν στην είσοδό του επιβάλλεται η κρουστική συνάρτηση $[x(t) = \delta(t)]$, δηλαδή:

$$H(f) \equiv \frac{F[y(t)]}{F[x(t)]} \quad (1.5)$$

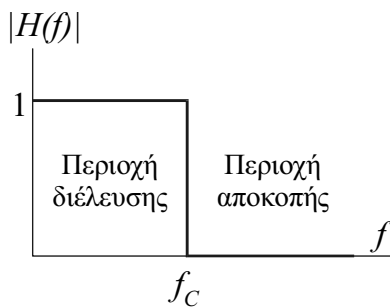
Η συνάρτηση μεταφοράς $H(f)$ είναι μία χαρακτηριστική ιδιότητα ενός γραμμικού χρονικά αμετάβλητου συστήματος. Γενικά, είναι μία μιγαδική συνάρτηση της συχνότητας, η οποία μπορεί να γραφεί στη μορφή $H(f) = |H(f)|\exp[j\angle H(f)]$, όπου η $|H(f)|$ λέγεται **απόκριση πλάτους** και η γωνία $\angle H(f)$ **φάση** ή **γωνία φάσης**. Η γραφική παράσταση του μέτρου $|H(f)|$ και της γωνίας $\angle H(f)$ συναρτήσει της συχνότητας f περιγράφουν τη συμπεριφορά

του συστήματος. Μάλιστα, η γραφική παράσταση του μέτρου λέγεται **χαρακτηριστική καμπύλη** του συστήματος. Τα λογαριθμικά διαγράμματα του μέτρου και της γωνίας της συνάρτησης μεταφοράς λέγονται **διαγράμματα Bode**, και συγκεκριμένα το λογαριθμικό διάγραμμα του μέτρου δίνεται από τη σχέση:

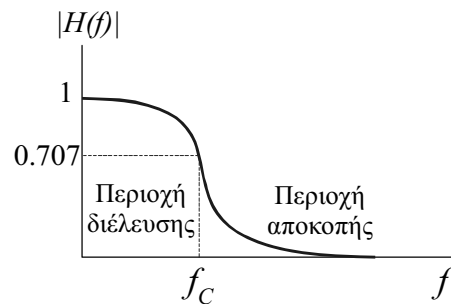
$$|H(f)| \text{ (σε dB)} = 20 \log_{10}[|H(f)|] \quad (1.6)$$

όπου ο όρος $|H(f)|$ της τελευταίας εξίσωσης είναι καθαρός αριθμός.

Τα ιδανικά φίλτρα, τα οποία είναι μη υλοποιήσιμα στην πράξη, έχουν την ιδιότητα να επιτρέπουν την πλήρη διέλευση κάποιων συνιστωσών συχνότητας, ενώ αποκόπτουν πλήρως όλες τις υπόλοιπες. Η χαρακτηριστική καμπύλη είναι εντελώς κατακόρυφη στη συχνότητα αποκοπής (f_c), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.1.



Σχήμα 1.1: Συνάρτηση μεταφοράς ενός ιδανικού χαμηλοπερατού φίλτρου.



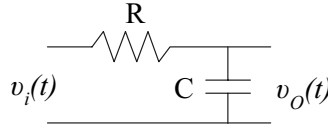
Σχήμα 1.2: Συνάρτηση μεταφοράς ενός πραγματικού χαμηλοπερατού φίλτρου.

Αντίθετα, στα πραγματικά φίλτρα η χαρακτηριστική καμπύλη δεν είναι τόσο απότομη στη συχνότητα αποκοπής f_c (Σχήμα 1.2). Συγκεκριμένα, στα φίλτρα αυτά αφενός εμφανίζεται κάποια μείωση του πλάτους των συνιστωσών συχνότητας, που βρίσκονται στη ζώνη διέλευσης, αφετέρου παρατηρείται σταδιακή μείωση του πλάτους των συχνοτήτων στην περιοχή αποκοπής. Στην περίπτωση αυτή, ως **συχνότητα αποκοπής** ορίζεται η συχνότητα για την οποία το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς $|H(f_c)|$ ισούται με το 0.707 της μέγιστης τιμής του, δηλαδή

$$|H(f_c)| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 \text{ ή ισοδύναμα} \quad (1.7)$$

$$|H(f_c)| = 20 \log \frac{|V_o(f_c)|}{|V_i(f_c)|} = 20 \log \frac{0.707 |V_i(f_c)|}{|V_i(f_c)|} = -3 \text{ dB} \quad (1.8)$$

Η τιμή αυτή της συχνότητας λέγεται και **συχνότητα 3 dB**, αφού αντιστοιχεί σε μείωση του τετραγώνου του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς κατά 3 dB, σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της, όπως προκύπτει από τη τελευταία εξίσωση.



Σχήμα 1.3: Πραγματικό χαμηλοπερατό φίλτρο με R και C .

Ένα πραγματικό χαμηλοπερατό φίλτρο φαίνεται στο Σχήμα 1.3, για το οποίο όταν η είσοδος $v_i(t)$ είναι της μορφής:

$$v_i(t) = V_i \exp(j2\pi ft) \quad (1.9)$$

τότε η έξοδος του δίνεται από τη σχέση $v_o(t) = V_o \exp[j(2\pi ft + \varphi)]$, οπότε η συνάρτηση μεταφοράς ισούται:

$$H(\omega) = \frac{V_o(\omega)}{V_i(\omega)} = \frac{Z_C}{Z_C + Z_R} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} \quad (1.10)$$

Η τελευταία εξίσωση, θέτοντας $T = RC$, $\omega_c = 1/T$, $f_c = \omega_c/2\pi$ και $f = \omega/2\pi$, γράφεται:

$$H(f) = \frac{1}{1 + j(f/f_c)} \quad (1.11)$$

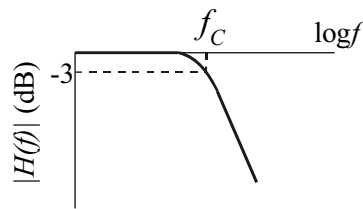
όπου f_c είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου, οπότε το μέτρο και η γωνία της συνάρτησης μεταφοράς είναι αντίστοιχα:

$$|H(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_c)^2}} \quad (1.12)$$

$$\angle H(f) = -\tan^{-1}(f/f_c) \quad (1.13)$$

Το λογαριθμικό διάγραμμα του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς $|H(f)|$ συναρτήσει της συχνότητας f φαίνεται στο Σχήμα 1.4.

Τα φίλτρα, γενικά, χωρίζονται σε ενεργά και παθητικά, ανάλογα με το αν περιέχουν και ενεργά στοιχεία ή μόνο παθητικά. Δεδομένου ότι οι αντιστάσεις και οι πυκνωτές είναι στην πραγματικότητα παθητικά στοιχεία, το φίλτρο του Σχήματος 1.3 είναι παθητικό. Ο ρυθμός εξασθένησης του μέτρου της συνάρτησης μεταφοράς στη συχνότητα αποκοπής (δηλαδή η κλίση της καμπύλης στη συχνότητα αυτή) είναι γενικά μεγαλύτερος στα ενεργά φίλτρα από ότι στα παθητικά.



Σχήμα 1.4: Διάγραμμα Bode του $|H(f)|$ για LPF.

1.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

- (α) Στις διατάξεις του Σχήματος 1.5 των μονάδων COM-6A2 και COM-6A1 της κονσόλας εργασίας, χρησιμοποιώντας τη γεννήτρια παραγωγής σημάτων εφαρμόστε στην είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 1 Volt και συχνότητας από 10 Hz μέχρι 10 kHz, σε βήματα 1×10^i Hz, 3×10^i Hz, 5×10^i Hz, $i = 1, 2, 3$. Για καθεμία συχνότητα του σήματος εισόδου μετρήστε το πλάτος του σήματος εξόδου με τη βοήθεια του παλμογράφου, φροντίζοντας το πλάτος του σήματος εισόδου να είναι πάντοτε ίσο με 1 Volt. Στη συνέχεια, κατασκευάστε τα αντίστοιχα διαγράμματα BODE για το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς. Σημειώνεται ότι σε όλες τις περιπτώσεις η κατακόρυφη συνιστώσα των διαγραμμάτων δίνεται από τη σχέση:

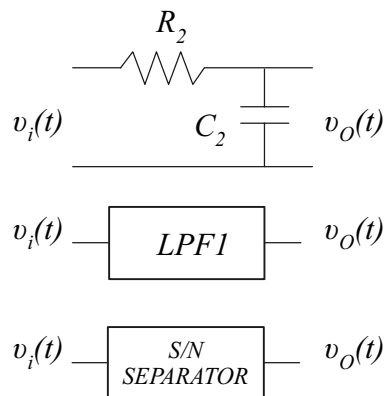
$$A \text{ (dB)} = 20 \log_{10} \frac{v_o}{v_i} \quad (1.14)$$

όπου v_o και v_i είναι τα πλάτη των σημάτων στην έξοδο και στην είσοδο, αντίστοιχα, του S/N separator.

- (β) Κατατάξτε τις διατάξεις ανάλογα με τη συνάρτηση μεταφοράς, που εμφανίζουν. Ποια είναι η συμπεριφορά των αντίστοιχων ιδανικών διατάξεων; Ποια είναι η λειτουργία του S/N Separator; Να βρεθούν οι ρυθμοί μείωσης του πλάτους εξόδου

στις αντίστοιχες συχνότητες αποκοπής σε dB/οκτάβα και dB/δεκάδα. Ως **δεκάδα** ονομάζεται η περιοχή συχνοτήτων από συχνότητα f μέχρι συχνότητα $10f$, ενώ ως **οκτάβα** η περιοχή συχνοτήτων από συχνότητα f μέχρι συχνότητα $2f$.

- (γ) Να βρεθεί η συχνότητα για την οποία η διάταξη *S/N Separator* δίνει σήμα εξόδου ίσου πλάτους με το σήμα εισόδου. **Σημείωση:** Για την διάταξη *S/N Separator* ο σχετικός διακόπτης της μονάδας να τοποθετηθεί και στις δύο θέσεις f_1 και f_2 .



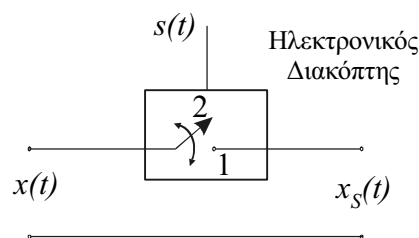
Σχήμα 1.5.

ΑΣΚΗΣΗ 2: ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΑΝΑΛΟΓΙΚΩΝ ΣΗΜΑΤΩΝ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ψηφιακό σήμα διακριτού χρόνου λέγεται το σήμα, το οποίο είναι διακριτό τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς την τιμή (πλάτος) του. Η διαδικασία της διακριτοποίησης ως προς το χρόνο ενός αναλογικού σήματος ή γενικά ενός σήματος συνεχούς ως προς το χρόνο λέγεται **δειγματοληψία**, που είναι ουσιαστικά μία διαδικασία λήψης της τιμής του σήματος σε τακτά χρονικά διαστήματα. Η υλοποίηση της διαδικασίας αυτής μπορεί να παρασταθεί από το σύστημα του ηλεκτρονικού διακόπτη του Σχήματος 2.1. Ο διακόπτης αλλάζει θέση μεταξύ των δύο επαφών (1 και 2) ανάλογα με την τιμή του σήματος $s(t)$ με συχνότητα f_s , η οποία λέγεται **συχνότητα δειγματοληψίας**. Η συχνότητα αυτή αντιστοιχεί στο χρόνο T_s μεταξύ δύο διαδοχικών δειγμάτων του σήματος. Άρα, το δειγματοληπτημένο σήμα $x_s(t)$ μπορεί να θεωρηθεί ότι προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό του αρχικού σήματος $x(t)$ με το σήμα $s(t)$ (συνάρτηση δειγματοληψίας), το οποίο ελέγχει την κατάσταση του διακόπτη, δηλαδή ισχύει η σχέση:

$$x_s(t) = x(t)s(t) \quad (2.1)$$



Σχήμα 2.1: Σύστημα δειγματοληψίας.

2.2 ΘΕΩΡΗΜΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ ΤΟΥ SHANNON

Έστω ένα σήμα $f(t)$ με συνιστώσες συχνότητας μέχρι τη συχνότητα ω_{\max} , επομένως για συχνότητες $|\omega| > \omega_{\max}$ ο μετασχηματισμός *Fourier* του σήματος είναι μηδέν. Τότε οι τιμές του $f(t)$ στα σημεία $t = n\pi/\omega_{\max}$ προσδιορίζουν πλήρως το σήμα, δηλαδή τα δείγματα του πρέπει να απέχουν μεταξύ τους όχι περισσότερο από $T_s = \pi/\omega_{\max}$. Στο πεδίο της

συχνότητας αυτό μεταφράζεται σε επιλογή συχνότητας δειγματοληψίας $f_S \geq 2f_{\max}$, όπου $f_{\max} = \omega_{\max}/2\pi$. Για την αναλυτική παρουσίαση του θεωρήματος της δειγματοληψίας ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην [1] §6.3.

2.3 ΙΔΑΝΙΚΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΣΥΣΤΑΣΗ ΣΗΜΑΤΟΣ

Στην ιδανική δειγματοληψία θεωρείται ότι η συνάρτηση δειγματοληψίας είναι ένα τρένο μοναδιαίων ώσεων, δηλαδή μία σειρά από συναρτήσεις δέλτα, οι οποίες ισαπέχουν χρονικά, δηλαδή:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_S) \quad (2.2)$$

Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση του συστήματος δειγματοληψίας του Σχήματος 2.1, ο διακόπτης παραμένει στη θέση 1 για απειροστά μικρό χρόνο. Τότε, το δειγματοληπτημένο σήμα $x_S(t)$ είναι:

$$x_S(t) = x(t)s(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_S) \quad (2.3)$$

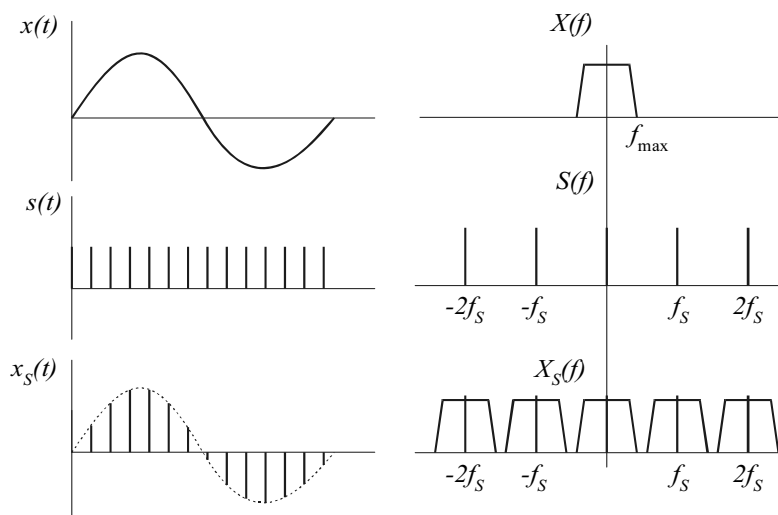
και ο μετασχηματισμός *Fourier* του παραπάνω σήματος είναι:

$$X_S(f) = f_S X(f) + f_S [X(f - f_S) + X(f + f_S) + X(f - 2f_S) + X(f + 2f_S) + \dots] \quad (2.4)$$

Δηλαδή το φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος $x_S(t)$ προκύπτει από την επανάληψη του φάσματος του αρχικού σήματος με συχνότητα f_S . Τα σήματα $x(t)$, $s(t)$, $x_S(t)$ καθώς και τα φάσματά τους για την περίπτωση ενός τυχαίου σήματος $x(t)$ φαίνονται στο Σχήμα 2.2. Σημειώνεται ότι το σήμα $x(t)$ θεωρείται χαμηλού αρμονικού περιεχομένου, δηλαδή ο μετασχηματισμός *Fourier* αυτού περιέχει μόνο συχνότητες μικρότερες από κάποια οριακή f_{\max} ($X(f) = 0$, για $|f| > f_{\max}$), καθώς επίσης και ότι ισχύει η σχέση $f_S > 2f_{\max}$.

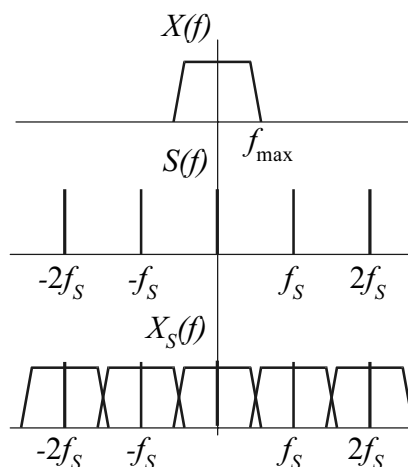
Η αντίστροφη διαδικασία της δειγματοληψίας, που έχει ως σκοπό την ανάκτηση του αρχικού σήματος, λέγεται **ανασύσταση** του σήματος. Από τα φάσματα του αρχικού και του δειγματοληπτημένου σήματος του Σχήματος 2.2, γίνεται φανερό ότι το φάσμα του αρχικού σήματος μπορεί να ανακτηθεί, όταν από το δειγματοληπτημένο σήμα αποκοπούν

όλες οι συχνότητες f , οι οποίες είναι μεγαλύτερες από την f_{\max} . Αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα με τη χρήση ενός χαμηλοπερατού φίλτρου με συχνότητα αποκοπής $f_C = f_{\max}$.



Σχήμα 2.2: Ιδανική δειγματοληψία συνεχούς σήματος με $f_S > 2f_{\max}$.

Για να είναι δυνατή η ανασύσταση του αρχικού σήματος, απαραίτητη προϋπόθεση είναι να μην υπάρχει επικάλυψη μεταξύ των επαναλήψεων του φάσματος του αρχικού σήματος στο φάσμα του δειγματοληπτημένου. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν ικανοποιείται η συνθήκη του θεωρήματος δειγματοληψίας ($f_S \geq 2f_{\max}$).



Σχήμα 2.3: Αλλοίωση του φάσματος σήματος όταν $f_S < 2f_{\max}$.

Από τα Σχήματα 2.2 και 2.3, τα οποία αναφέρονται στις περιπτώσεις $f_S > 2f_{\max}$ και $f_S < 2f_{\max}$, αντίστοιχα, είναι προφανής η ισχύς του θεωρήματος του Shannon. Μάλιστα

στην περίπτωση κατά την οποία $f_s < 2f_{\max}$, από το Σχήμα 2.3 γίνεται φανερό ότι υπάρχει επικάλυψη των επαναλήψεων του φάσματος του αρχικού σήματος, το οποίο έχει σαν αποτέλεσμα την αλλοίωσή του (*aliasing*).

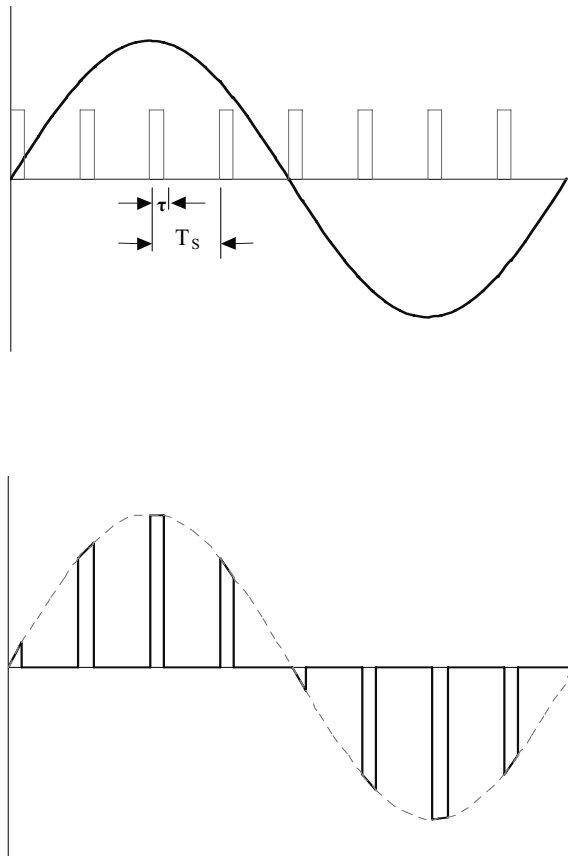
2.4 ΦΥΣΙΚΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ

Όσα αναφέρθηκαν στις προηγούμενες παραγράφους ισχύουν μόνο θεωρητικά, αφού στην πράξη υπάρχουν αρκετά προβλήματα, τα οποία είναι:

- α) Δεν υπάρχει σήμα χαμηλού αρμονικού περιεχομένου, δηλαδή σήμα για το οποίο να ισχύει $X(f) = 0$ για $|f| > f_{\max}$. Βέβαια, το πλάτος του φάσματος για αρκετά σήματα μειώνεται σημαντικά πέρα από κάποια συχνότητα, δηλαδή υπάρχει μία συχνότητα f_{\max} , τέτοια ώστε η ισχύς ή η ενέργεια του σήματος μέχρι αυτή τη συχνότητα να είναι τουλάχιστον το 95% της συνολικής. Μάλιστα, για να αποφευχθεί αλλοίωση του σήματος από την επικάλυψη του υπολειπόμενου τμήματος του φάσματος με το επόμενο, είναι δυνατόν αυτό να αποκοπεί με τη χρήση ενός κατάλληλου φίλτρου (χαμηλοπερατού), πριν από τη διαδικασία της δειγματοληψίας (*anti-aliasing filter*).
- β) Δεν υπάρχει στην πράξη ιδανικό χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο να έχει τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν, αφού τα πραγματικά χαμηλοπερατά φίλτρα δεν αποκόπτουν τελείως τις συχνότητες, οι οποίες είναι μεγαλύτερες από τη συχνότητα αποκοπής, αλλά απλά μειώνουν σημαντικά το πλάτος τους. Έτσι, κατά την ανασύσταση του αρχικού σήματος, δεν γίνεται πλήρης αποκοπή των συχνοτήτων του δειγματοληπτημένου φάσματος, οι οποίες δεν υπήρχαν στο φάσμα του αρχικού σήματος. Το πρόβλημα, το οποίο προκύπτει, επιλύεται επιλέγοντας $f_s > 2f_{\max}$, ενώ όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ των δύο συχνοτήτων, τόσο αυξάνει η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επαναλήψεων του φάσματος του αρχικού σήματος, οπότε τόσο καλύτερη ανασύσταση γίνεται.
- γ) Τέλος, δεν υπάρχει στην πράξη συνάρτηση $\delta(t)$ και συνεπώς ούτε τρένο ώσεων.

Τα δύο πρώτα προβλήματα επιλύονται με τις μεθόδους που αναφέρθηκαν, ενώ το τρίτο αντιμετωπίζεται με την προσέγγιση της συνάρτησης $\delta(t)$ από ορθογώνιο παλμό, πολύ μικρής διάρκειας, οπότε στην περίπτωση αυτή το τρένο ώσεων αντικαθίσταται από σειρά

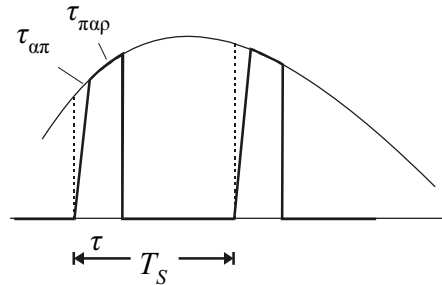
ορθογώνιων περιοδικών παλμών. Αν η περίοδος και η διάρκεια των παλμών είναι T_s και τ , αντίστοιχα, τότε ο παλμός αυτός θα παρακολουθεί το αρχικό σήμα για χρονικό διάστημα ίσο με τη διάρκειά του τ . Σημειώνεται ότι η διάρκεια του παλμού τ λέγεται και **χρόνος ανοίγματος**. Στο Σχήμα 2.4 έχουν σχεδιαστεί το αρχικό σήμα, το τρένο παλμών και το δειγματοληπτημένο σήμα. Το τελευταίο αποτελείται από πλήθος παλμών, των οποίων το πλάτος είναι το πλάτος του αρχικού σήματος μέσα στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα κάθε φορά. Η μέθοδος αυτή δειγματοληψίας λέγεται **φυσική δειγματοληψία**. Βασικό μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι το πλάτος του δείγματος δεν παραμένει σταθερό σε όλη τη διάρκεια του παλμού.



Σχήμα 2.4: Φυσική δειγματοληψία.

Επειδή το σήμα εξόδου (δειγματοληπτημένο) δεν παίρνει ακαριαία τη μέγιστη τιμή του, ο χρόνος ανοίγματος χωρίζεται σε δύο τμήματα. Από αυτά το πρώτο αντιστοιχεί στο χρόνο, ο οποίος χρειάζεται ώστε η έξοδος να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή του πλάτους, και λέγεται **χρόνος απόκτησης** $\tau_{απ}$ (*acquisition time*). Το δεύτερο τμήμα αντιστοιχεί στο

χρονικό διάστημα κατά το οποίο ο παλμός παρακολουθεί το αρχικό σήμα εισόδου και λέγεται **χρόνος παρακολούθησης** $\tau_{\text{παρ}}$ (*tracking time*). Η μορφή ενός τέτοιου παλμού φαίνεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Μορφή παλμών δειγματοληπτημένου σήματος.

Η συνάρτηση δειγματοληψίας στην περίπτωση της φυσικής δειγματοληψίας μπορεί να περιγραφεί αναλυτικά από τη σχέση:

$$s(t) = \begin{cases} 1, & nT_S - (\tau/2) \leq t \leq nT_S + (\tau/2) \\ 0, & nT_S + (\tau/2) \leq t \leq (n+1)T_S - (\tau/2) \end{cases}, \quad n = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.5)$$

η οποία μπορεί να γραφεί σε σειρά *Fourier* ως εξής:

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \exp(j2\pi n f_S t) \quad (2.6)$$

με

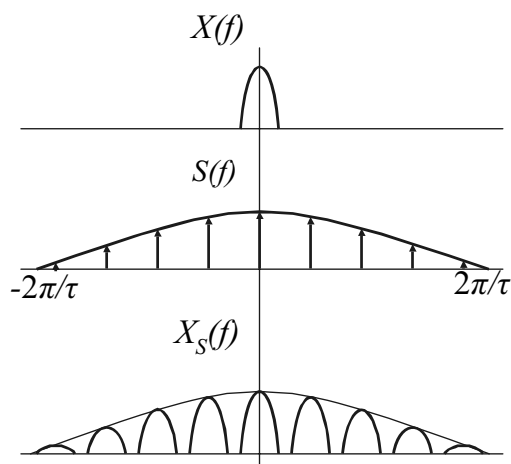
$$C_n = (f_S \tau) \text{sinc}(n f_S \tau) = d \text{sinc}(n f_S \tau) \quad (2.7)$$

όπου

$$\text{sinc}(y) = \frac{\sin(\pi y)}{\pi y} \quad (2.8)$$

Ο λόγος $d = \tau/T_S$ λέγεται **κύκλος δραστηριότητας** (*duty cycle*) και από την εξίσωση (2.7) προκύπτει: $C_0 = d > C_{\pm 1} > C_{\pm 2} > \dots$. Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος της κάθε αρμονικής συνιστώσας του φάσματος του σήματος δειγματοληψίας $s(t)$ μειώνεται με την αύξηση της τάξης της αρμονικής, με άμεση συνέπεια το ίδιο να ισχύει και για το φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος $x_S(t)$. Το γεγονός αυτό κάνει την ανάκτηση του αρχικού σήματος στην φυσική δειγματοληψία ευκολότερη από την ιδανική, εφόσον το σήμα είναι

χαμηλού αρμονικού περιεχομένου, δεδομένης της μη ύπαρξης ιδανικών φίλτρων, και αυτό γιατί στη φυσική δειγματοληψία το χαμηλοπερατό φίλτρο πρέπει να μηδενίζει τα πλάτη συνιστωσών, τα οποία είναι ήδη μειωμένα σε σχέση με την ιδανική δειγματοληψία. Έτσι, η τιμή, την οποία έχουν αποκτήσει μετά το φίλτρο τα πλάτη αυτά, είναι σημαντικά μικρότερη στην φυσική δειγματοληψία. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι μετά την ανασύσταση το πλάτος του σήματος εξόδου θα έχει μειωθεί έναντι του αρχικού, αφού θα έχει πολλαπλασιαστεί με τον παράγοντα $d < 1$. Τα φάσματα των σημάτων $x(t)$, $s(t)$ και $x_s(t)$ φαίνονται στο Σχήμα 2.6.



Σχήμα 2.6: Φάσματα σημάτων στην φυσική δειγματοληψία.

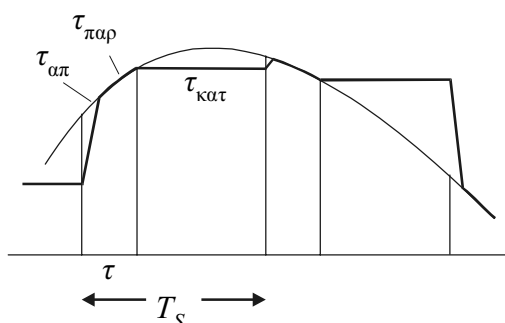
Ως μέτρο για την αξιολόγηση του σήματος που ανακτήθηκε στο δέκτη, δηλαδή το κατά πόσο περιέχει ή όχι ανεπιθύμητες συνιστώσες συχνότητας, οι οποίες δεν υπήρχαν στο αρχικό σήμα, χρησιμοποιείται ο **λόγος σήματος–προς–θόρυβο** (*Signal-to-Noise Ratio*, S/N). Ουσιαστικά, πρόκειται για το λόγο της μέσης ισχύος του σήματος προς τη μέση ισχύ του θορύβου, δηλαδή των ανεπιθύμητων συνιστωσών, που μετρείται σε dB και δίνεται από τη σχέση:

$$S/N \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{\overline{x^2(t)}}{\overline{n^2(t)}} \quad (2.9)$$

όπου $x(t)$ και $n(t)$ είναι το σήμα και ο θόρυβος, αντίστοιχα.

2.5 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΚΑΤΑΚΡΑΤΗΣΗ (SAMPLING AND HOLDING)

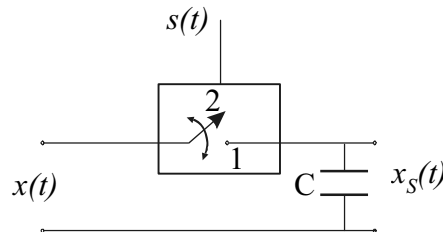
Όπως προαναφέρθηκε, η φυσική δειγματοληψία παρουσιάζει το μειονέκτημα ότι το πλάτος του κάθε δείγματος στο δειγματοληπτημένο σήμα δεν παραμένει σταθερό. Σε πολλές περιπτώσεις, όπου απαιτείται η περαιτέρω επεξεργασία του σήματος σε ψηφιακή ή διακριτή μορφή, είναι απαραίτητο το πλάτος των δειγμάτων να παραμένει σταθερό. Σε τέτοιες περιπτώσεις χρησιμοποιείται η μέθοδος της **δειγματοληψίας με κατακράτηση**, στην οποία, μετά το τέλος του χρόνου παρακολούθησης ενός δείγματος, το πλάτος του κάθε δείγματος διατηρείται σταθερό μέχρι την αρχή του επομένου. Η μορφή των παλμών φαίνεται στο Σχήμα 2.7, όπου ο χρόνος $T_S - \tau$ λέγεται **χρόνος κατακράτησης**.



Σχήμα 2.7: Δειγματοληψία και κατακράτηση.

Η διατήρηση του πλάτους του δείγματος γίνεται με τη χρήση ενός στοιχείου με μνήμη στην έξοδο του συστήματος δειγματοληψίας, το οποίο λειτουργεί ως στοιχείο κατακράτησης. Ένα τέτοιο στοιχείο είναι ένας πυκνωτής κατάλληλης χωρητικότητας C , ο οποίος συνδέεται στην έξοδο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Η τιμή της χωρητικότητας C του πυκνωτή καθορίζεται σε σχέση με δύο παράγοντες. Πρώτον, πρέπει το γινόμενο αυτής με την αντίσταση του διακόπτη στη θέση 1 να είναι **αρκετά μικρό**, ώστε ο πυκνωτής να παίρνει σε σχετικά μικρό χρόνο την τιμή του σήματος εισόδου $x(t)$. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή του χρόνου απόκτησης. Δεύτερον, το γινόμενο της χωρητικότητας C με την αντίσταση εισόδου της διάταξης, που συνδέεται στην έξοδο της διάταξης δειγματοληψίας και κατακράτησης, να είναι πολύ μεγάλο. Έτσι, ο χρόνος εκφόρτισης του πυκνωτή είναι πολύ μεγάλος, οπότε το πλάτος του σήματος $x_S(t)$, όταν ο διακόπτης είναι στη θέση 2 παραμένει πρακτικά σταθερός, δηλαδή επιτυγχάνεται κατακράτηση της τιμής. Συνεπώς, η τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή επιλέγεται σε

συνδυασμό με τις τιμές των δύο αυτών αντιστάσεων, από τις οποίες η πρώτη πρέπει να είναι πολύ μικρή, ενώ η δεύτερη πρακτικά άπειρη. Τέλος, η διάρκεια τ των παλμών του σήματος $s(t)$ επιλέγεται μικρή, για λόγους που θα γίνουν πιο κατανοητοί στην επόμενη άσκηση.



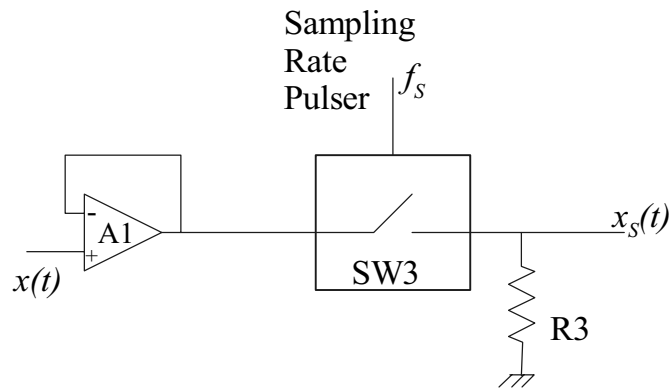
Σχήμα 2.8: Διάταξη δειγματοληψίας και κατακράτησης.

Η διαδικασία της δειγματοληψίας, όπως αυτή περιγράφηκε στις προηγούμενες παραγράφους, ορίζεται ως **διαμόρφωση πλάτους παλμών** (*Pulse Amplitude Modulation, PAM*), γι' αυτό και το δειγματοληπτημένο σήμα λέγεται και **σήμα PAM**.

2.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.6.1 Φυσική Δειγματοληψία

- (α) Πραγματοποιείτε τη διάταξη του Σχήματος 2.9. Στη συνέχεια, επιλέξτε παλμούς δειγματοληψίας συχνότητας $f_s = 4 \text{ kHz}$ και χρόνου ανοίγματος $\tau = 25 \text{ } \mu\text{sec}$ και εφαρμόστε στην είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2 Volts και συχνότητας 1 kHz. Να παρατηρηθεί και να σχεδιαστεί το σήμα εξόδου σε σχέση με το σήμα εισόδου και το σήμα δειγματοληψίας. Εξηγήστε τη λειτουργία του κυκλώματος.
- (β) Συνδέστε στην έξοδο της διάταξης του Σχήματος 2.9 τη διάταξη *LPF1*. Εφαρμόστε στην είσοδο το ίδιο ημιτονικό σήμα, όπως και προηγουμένως, ενώ για σήμα δειγματοληψίας επιλέξτε παλμούς συχνότητας 10 kHz με άνοιγμα $\tau = 10 \text{ } \mu\text{sec}$. Τι παρατηρείτε για το σήμα εξόδου και την ομοιότητά του με το σήμα εισόδου; Σχολιάστε. Μεταβάλλοντας το άνοιγμα των παλμών δειγματοληψίας παρατηρήστε το σήμα εξόδου και σχολιάστε. Τι συμβαίνει για πολύ μεγάλο άνοιγμα παλμών;



Σχήμα 2.9: Κύκλωμα δειγματοληψίας.

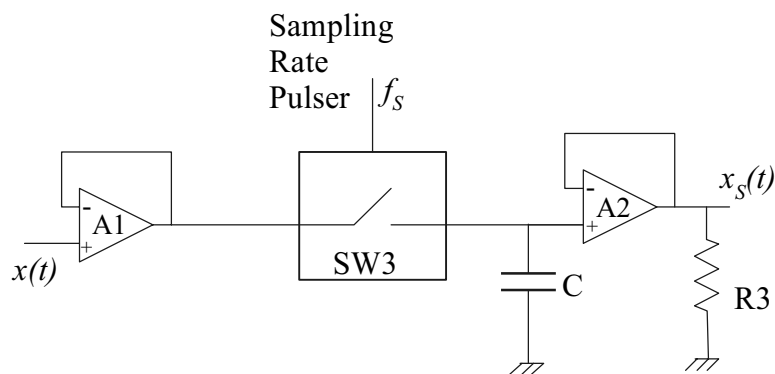
2.6.2 Δειγματοληψία και Κατακράτηση

- (α) Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του Σχήματος 2.9, αφού αφαιρέσετε τη μονάδα απομόνωσης $A1$ και συνδέσετε στην έξοδο του κυκλώματος και παράλληλα προς την αντίσταση R_3 έναν από τους πυκνωτές C_1 , C_2 ή C_3 . Χρησιμοποιώντας παλμούς δειγματοληψίας συχνότητας 10 kHz και ανοίγματος 10 μsec και εφαρμόζοντας στην είσοδο ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2 Volts και συχνότητας 1 kHz, παρατηρείστε το σήμα εξόδου. Αντικαθιστώντας τον πυκνωτή με καθέναν από τους άλλους δύο, παρατηρείστε, σχεδιάστε και σχολιάστε τη μεταβολή του σήματος εξόδου με τη τιμή της χωρητικότητας του πυκνωτή.
- (β) Προσθέστε στο κύκλωμα τη μονάδα απομόνωσης $A1$, όπως στο Σχήμα 2.9 καθώς και τη μονάδα απομόνωσης $A2$ μεταξύ πυκνωτή και αντίστασης. Τότε το κύκλωμα φαίνεται στο Σχήμα 2.10. Επαναλάβετε τη διαδικασία του προηγούμενου βήματος.
- (γ) Για τη μέτρηση του λόγου σήματος-προς-θόρυβο (S/N) όλης της διάταξης δειγματοληψίας και ανασύστασης ενός σήματος συνδέεται το στοιχείο S/N Separator στην έξοδο της διάταξης ανασύστασης. Όπως έγινε φανερό από την άσκηση 1, το στοιχείο αυτό είναι ουσιαστικά ένα φίλτρο, το οποίο επιτρέπει στην πράξη τη διέλευση μιας μόνο συχνότητας (ουσιαστικά μιας πολύ στενής ζώνης συχνοτήτων), η οποία ονομάζεται **συχνότητα διέλευσης**. Εφαρμόζοντας ένα ημιτονοειδές σήμα στην είσοδο της διάταξης δειγματοληψίας προστίθεται σ' αυτό θόρυβος από την ίδια τη διάταξη, δηλαδή και άλλες συνιστώσες συχνότητας. Αποτέλεσμα αυτού είναι ότι το σήμα στην είσοδο του S/N Separator περιέχει σήμα

μαζί με θόρυβο. Όμως, **μόνο** όταν η συχνότητα διέλευσης του *S/N Separator* συμπίπτει με τη συχνότητα του αρχικού ημιτονοειδούς σήματος, τότε το τελευταίο θα περάσει από τον *S/N Separator*, και επομένως το σήμα στην έξοδο αυτού θα περιέχει κυρίως το αρχικό σήμα (μαζί με ένα αμελητέο ουσιαστικά ποσό θορύβου).

Για το σκοπό αυτό συνδέστε στην έξοδο του κυκλώματος του Σχήματος 2.10 το φίλτρο *LPF1*, το οποίο πραγματοποιεί την ανασύσταση του αρχικού σήματος, και στην έξοδο αυτού το στοιχείο *S/N Separator*. Στην είσοδο του κυκλώματος δειγματοληψίας και κατακράτησης εφαρμόστε ένα ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2 Volts και συχνότητας ίσης με τη συχνότητα, η οποία βρέθηκε στο βήμα (β) της Άσκησης 1, δηλαδή την τιμή της συχνότητας διέλευσης f_1 του *S/N Separator*. Χρησιμοποιώντας τον παλμογράφο, μετρήστε το πλάτος του σήματος στην είσοδο και την έξοδο του *S/N Separator* και υπολογίστε το λόγο σήματος-προς-θόρυβο με τη βοήθεια της σχέσης:

$$S/N \text{ (dB)} = 10 \log_{10} \frac{1}{\left(\frac{v_i}{v_o}\right)^2 - 1} \quad (2.10)$$



Σχήμα 2.10: Κύκλωμα δειγματοληψίας και κατακράτησης.

ΑΣΚΗΣΗ 3: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑΣ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ (*TIME DIVISION MULTIPLEXING, TDM*)

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

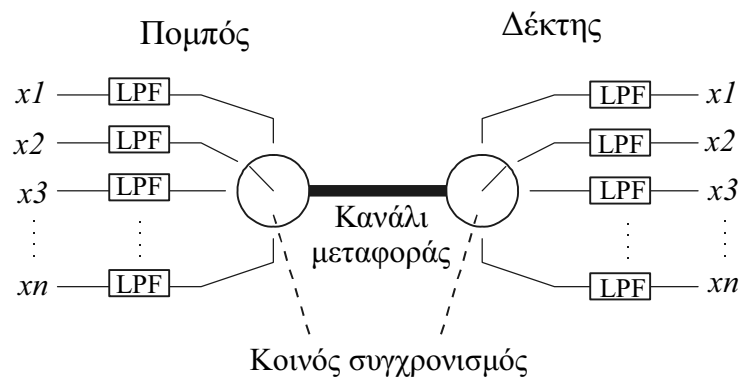
Ένα από τα βασικά προβλήματα, τα οποία υπάρχουν στις τηλεπικοινωνίες, είναι η όσο το δυνατόν μείωση του κόστους για τη ταυτόχρονη μεταφορά πολλών σημάτων, αφού είναι γνωστό ότι για τη μεταφορά ενός σήματος από ένα σημείο σε ένα άλλο χρειάζεται να υπάρχει κάποιο κανάλι (διάυλος) μεταφοράς του σήματος. Ένα τέτοιο κανάλι μπορεί να είναι ένα καλώδιο, μία οπτική ίνα, είτε ακόμα και ένα σύστημα κεραιών πομπού–δέκτη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Προκειμένου να σταλεί ένα πλήθος από σήματα, είναι απαραίτητη η χρήση ισάριθμων καναλιών, το οποίο συνεπάγεται σημαντική αύξηση του κόστους. Βέβαια μία λύση του προβλήματος αυτού είναι η κατάλληλη διαμόρφωση των σημάτων, ώστε να είναι δυνατή η ταυτόχρονη μεταφορά τους μέσα από το ίδιο κανάλι. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή με το όνομα **πολυπλεξία σημάτων**, και υπάρχουν στην πράξη δύο είδη πολυπλεξίας: η **πολυπλεξία με διαίρεση συχνότητας** και η **πολυπλεξία με διαίρεση χρόνου**. Εδώ, θα μελετηθεί η δεύτερη μέθοδος, ενώ για περισσότερες λεπτομέρειες για την πρώτη ο αναγνώστης μπορεί να ανατρέξει στην βιβλιογραφία [1] §4.5.

3.2 ΠΟΛΥΠΛΕΞΙΑ ΜΕ ΔΙΑΙΡΕΣΗ ΧΡΟΝΟΥ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Άσκηση 2, για την πλήρη περιγραφή ενός σήματος περιορισμένου εύρους ζώνης, αρκεί η χρήση μερικών μόνο δειγμάτων του, τα οποία έχουν ληφθεί από το αρχικό σήμα σε τακτά χρονικά διαστήματα. Ο χρόνος μεταξύ αυτών καθορίζεται από τη μέγιστη συχνότητα του σήματος, δηλαδή αν θέλει κανείς να μεταφέρει το σήμα μέσω ενός καναλιού, αρκεί να μεταφέρει μερικά δείγματά του. Όμως, όπως έγινε φανερό, μεταξύ των δειγμάτων υπάρχει αρκετός κενός χώρος (χρονικό διάστημα), στον οποίο δεν αποστέλλεται τίποτα. Αν το χρονικό αυτό διάστημα χρησιμοποιηθεί για την αποστολή δειγμάτων ενός δεύτερου σήματος, τότε γίνεται "ταυτόχρονη" μεταφορά δύο σημάτων μέσα από το ίδιο κανάλι. Ουσιαστικά, δηλαδή, γίνεται μεταφορά των δειγμάτων των δύο σημάτων εναλλάξ. Για το λόγο αυτό η λέξη *ταυτόχρονη* βρίσκεται σε εισαγωγικά. Το σύστημα, το οποίο εκτελεί τη διαδικασία αυτή, λέγεται **σύστημα πολυπλεξίας TDM**.

Στο δέκτη ενός τέτοιου συστήματος, η πρώτη διεργασία, που πρέπει να γίνει, είναι ο διαχωρισμός των δειγμάτων του κάθε σήματος, ώστε τελικά να μπορέσει να κάνει την ανασύσταση των αρχικών σημάτων. Προκειμένου να είναι αυτό δυνατό, πρέπει ο πομπός και ο δέκτης να είναι συγχρονισμένοι. Επειδή συνήθως ο πομπός και ο δέκτης βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση, αυτό συνεπάγεται ότι πρέπει να αποστέλλονται και κάποια σήματα συγχρονισμού μαζί με τα υπόλοιπα σήματα. Για την περίπτωση των αναλογικών σημάτων ένα τέτοιο σήμα μπορεί να είναι ένας παλμός, ο οποίος πρέπει να ξεχωρίζει από τους παλμούς των άλλων σημάτων, π.χ. ένας παλμός διαφορετικής πολικότητας, και ο οποίος πρέπει να αποστέλλεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Στην περίπτωση των ψηφιακών σημάτων το σήμα συγχρονισμού είναι συνήθως ακολουθίες παλμών.

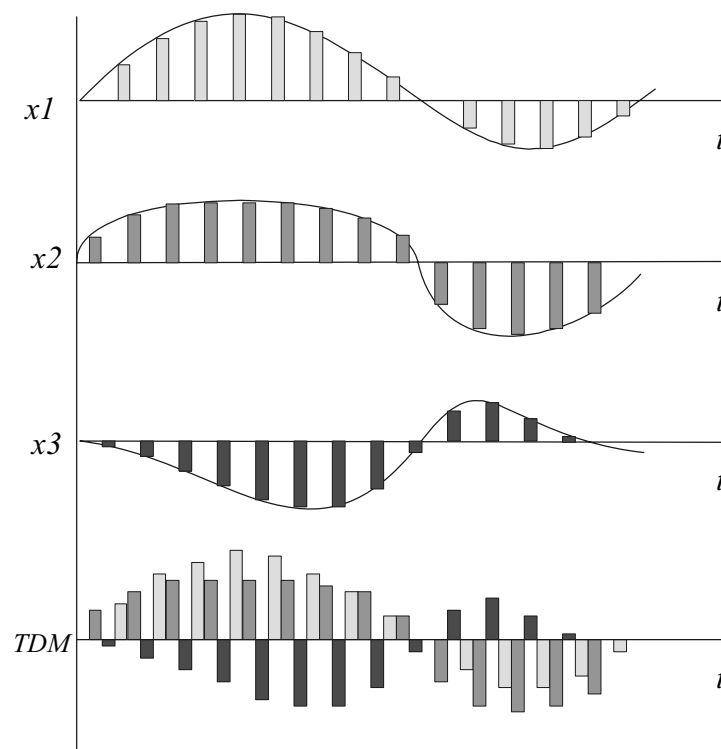
Με βάση τα όσα ειπώθηκαν παραπάνω, αν f_s είναι η συχνότητα δειγματοληψίας των σημάτων, τότε η περίοδος δειγματοληψίας τους, που είναι και ο χρόνος που διαρκεί η λήψη ενός δείγματος από κάθε σήμα, είναι ίσος με $T_s = 1/f_s$. Επομένως, αν το άνοιγμα του κάθε δείγματος είναι τ , τότε μέσα σε χρόνο T_s χωράνε $n = T_s/\tau$ το πλήθος δείγματα. Άρα, τόσα είναι και τα σήματα που μπορούν να "αναμιχθούν" από το σύστημα πολυπλεξίας για να αποσταλούν ταυτόχρονα.



Σχήμα 3.1: Γενική μορφή συστήματος πολυπλεξίας με διαίρεση χρόνου TDM-PAM.

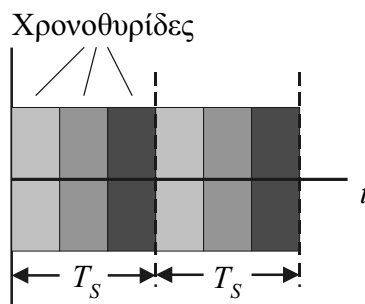
Για να γίνει πιο κατανοητή η λειτουργία ενός συστήματος πολυπλεξίας σημάτων με διαίρεση χρόνου, έστω το σύστημα που φαίνεται στο Σχήμα 3.1 και που είναι ανάλογο ενός πραγματικού κυκλώματος πολυπλεξίας. Αυτό αποτελείται από έναν περιστροφικό διακόπτη, ο οποίος συνδέει το κανάλι αποστολής με καθένα από τα σήματα κυκλικά. Στο άλλο άκρο του καναλιού, στο δέκτη, ένας όμοιος διακόπτης, σε συγχρονισμό με τον πρώτο, συνδέει το κανάλι με καθεμία από τις εξόδους των σημάτων. Εφόσον υπάρχει

σωστός συγχρονισμός, τότε είναι εφικτός ο διαχωρισμός των δειγμάτων των σημάτων. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.1, τόσο στις εισόδους του πολυπλέκτη στον πομπό, όσο και στις εξόδους της αντίστοιχης διάταξης του δέκτη (αποπλέκτης), υπάρχουν φίλτρα *LPF*. Τα φίλτρα στις εισόδους του πολυπλέκτη χρησιμοποιούνται για να αποκόψουν τις συχνότητες $f > f_s/2$, για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην Άσκηση 2 (*anti-aliasing filters*). Αντίστοιχα, τα φίλτρα στις εξόδους του αποπλέκτη εκτελούν την ανασύσταση των σημάτων, όπως σε ένα σύστημα ανασύστασης δειγματοληπτημένου σήματος, που επίσης αναφέρθηκε στην Άσκηση 2.



Σχήμα 3.2: Αρχικά σήματα, τα δείγματα αυτών και το σήμα μετά την πολυπλεξία.

Στο Σχήμα 3.2 έχουν σχεδιαστεί τρία σήματα, τα οποία πρόκειται να μεταφερθούν μέσω ενός καναλιού, και για τα οποία χρησιμοποιείται σύστημα πολυπλεξίας. Στο σχήμα αυτό φαίνονται, επίσης, τα δείγματα που λαμβάνονται από το καθένα σήμα, χωρίζοντας την περίοδο δειγματοληψίας σε τρία ίσα μέρη (*χρονοθυρίδες*). Το σήμα στην έξοδο του πολυπλέκτη περιέχει τα δείγματα και των τριών σημάτων. Τέλος, στο Σχήμα 3.3 φαίνεται ο διαχωρισμός της περιόδου δειγματοληψίας σε χρονοθυρίδες, καθεμία από τις οποίες χρησιμοποιείται από ένα σήμα σε κάθε περίοδο.



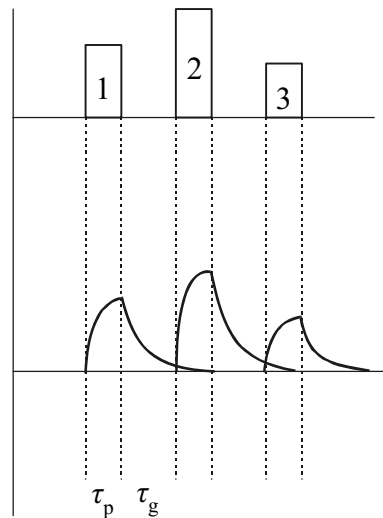
Σχήμα 3.3: Χωρισμός της περιόδου δειγματοληψίας σε 3 χρονοθυρίδες.

3.3 ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΕΝΑ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟ ΚΑΝΑΛΙ – ΔΙΟΜΙΛΙΑ (*CROSSTALK*)

Έχει ήδη ειπωθεί ότι για την "ταυτόχρονη" αποστολή πολλών σημάτων μέσα από το ίδιο κανάλι, η περίοδος δειγματοληψίας χωρίζεται σε τόσες χρονοθυρίδες, όσα είναι και τα προς μετάδοση σήματα. Με τον τρόπο αυτό μπορεί θεωρητικά το κανάλι να χωριστεί σε ισάριθμα λογικά κανάλια, μέσα από τα οποία μεταφέρονται τα σήματα. Βέβαια στο προηγούμενο παράδειγμα, οι χρονοθυρίδες αυτές τοποθετήθηκαν η μία δίπλα στην άλλη, χωρίς κάποιο χρονικό κενό μεταξύ τους.

Ωστόσο, στα πραγματικά συστήματα η έλλειψη χρονικού κενού μεταξύ των χρονοθυρίδων δημιουργεί πρόβλημα στη μεταφορά των σημάτων, το οποίο οφείλεται στο γεγονός ότι ένα πραγματικό κανάλι δεν έχει σταθερή (κατά μέτρο) συνάρτηση μεταφοράς, δηλαδή δεν αφήνει όλες τις συχνότητες να περάσουν εξίσου, αλλά λειτουργεί ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο. Βέβαια, τα σήματα, που μεταφέρονται μέσα από το κανάλι, είναι τετραγωνικοί παλμοί (δείγματα), που έχουν πεπερασμένο πλάτος στο πεδίο του χρόνου, δηλαδή έχουν συγκεκριμένη χρονική διάρκεια. Το φάσμα των δειγμάτων αυτών στο πεδίο των συχνοτήτων περιορίζεται, όταν διέρχονται από το πραγματικό κανάλι μεταφοράς, αφού κόβονται οι υψηλές συχνότητες. Αυτός ο περιορισμός στο πεδίο των συχνοτήτων μεταφράζεται σε διαπλάτυνση (άπλωμα) των παλμών στο πεδίο του χρόνου, δηλαδή, η χρονική τους διάρκεια αυξάνει. Το άπλωμα αυτό φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Είναι φανερό ότι αν οι χρονοθυρίδες δεν έχουν χρονικό διάστημα μεταξύ τους (χρόνος ασφαλείας τ_g), αυτό το άπλωμα έχει ως αποτέλεσμα ο κάθε παλμός να εισέρχεται στη γειτονική χρονοθυρίδα. Κάτι τέτοιο δημιουργεί σοβαρό πρόβλημα, καθώς συμβαίνει αλληλεπίδραση μεταξύ των

γειτονικών καναλιών, που δεν είναι πλέον ανεξάρτητα. Η αλληλεπίδραση αυτή εισάγει θόρυβο στα μεταφερόμενα σήματα και το φαινόμενο αυτό λέγεται **διομιλία** (*crosstalk*). Αντίθετα, αν μεταξύ των θυρίδων υπάρχει επαρκής χρόνος ασφαλείας, τότε η διομιλία πρακτικά μηδενίζεται.



Σχήμα 3.4: Άπλωμα των παλμών κατά τη μεταφορά τους μέσα από πραγματικό κανάλι.

3.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

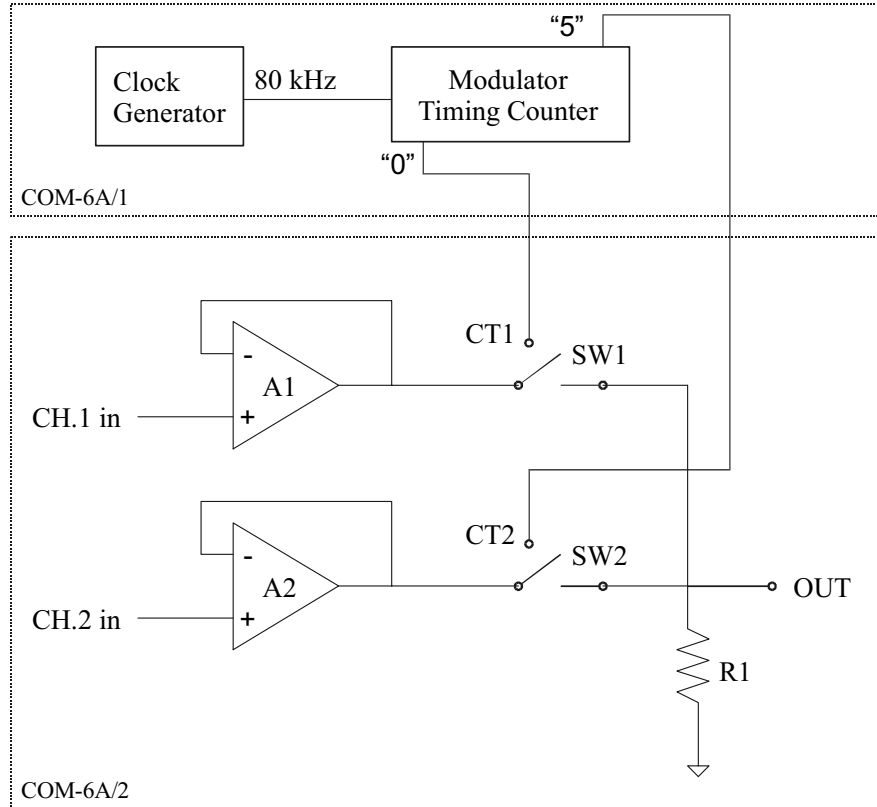
3.4.1 Σύστημα Πολυπλεξίας TDM-PAM

Χρησιμοποιώντας τα στοιχεία των μονάδων COM-6A/1 και COM-6A/2 της κονσόλας εργασίας, κατασκευάστε το κύκλωμα του Σχήματος 3.5. Τροφοδοτείστε την είσοδο *CH.1 in* με ημιτονοειδές σήμα πλάτους 2 Volts και συχνότητας 2 kHz καθώς και την είσοδο *CH.2 in* με ημιτονοειδές σήμα πλάτους 1 Volt και συχνότητας 2 kHz. Παρατηρείστε στον παλμογράφο το σήμα στην έξοδο του κυκλώματος.

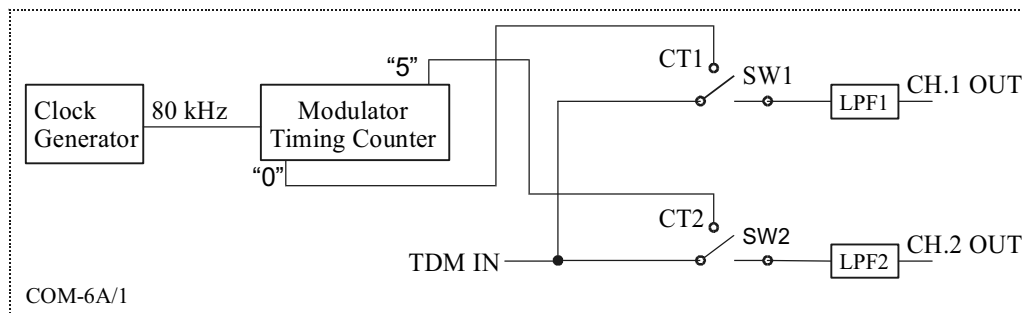
3.4.2 Δέκτης TDM-PAM

Ο δέκτης ενός συστήματος TDM-PAM φαίνεται στο Σχήμα 3.6. Αφού κατασκευάσετε το κύκλωμα, συνδέστε στην είσοδό του την έξοδο του πομπού του Σχήματος 3.4. Αυξήστε τη συχνότητα του σήματος εισόδου στο κανάλι 1 σε 3 kHz

και μειώστε αυτή του σήματος στο κανάλι 2 σε 1.5 kHz. Παρατηρήστε το σήμα στις δύο εξόδους του δέκτη με τη βοήθεια του παλμογράφου. Είναι το σήμα αυτό ένα καθαρό ημίτονο; Γιατί;



Σχήμα 3.5: Σύστημα πολυπλεξίας TDM-PAM.



Σχήμα 3.6: Δέκτης σήματος TDM-PAM.

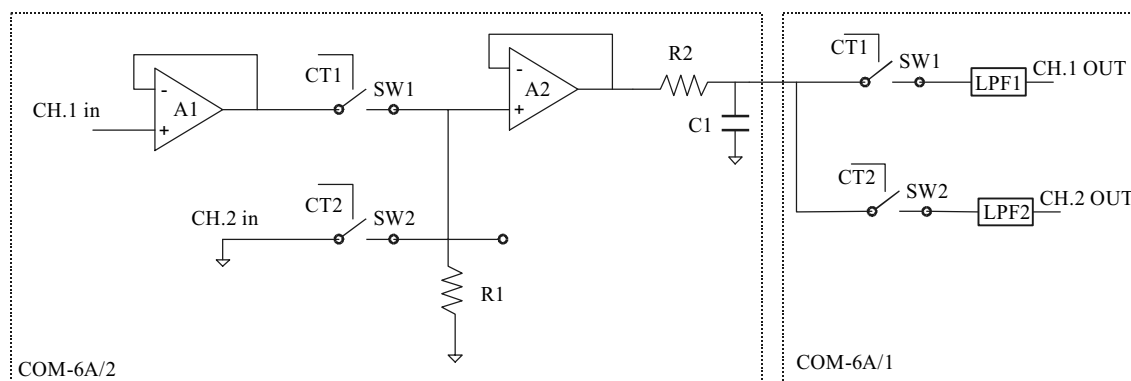
3.4.3 Διομιλία σε Σύστημα TDM-PAM

Για τη μελέτη του φαινομένου της διομιλίας μεταξύ των καναλιών σε ένα σύστημα πολυπλεξίας TDM-PAM, θα χρησιμοποιηθεί το κύκλωμα του Σχήματος 3.7. Το φίλτρο, που σχηματίζουν τα στοιχεία R_2 και C_1 προσομοιώνει το κανάλι μεταφοράς του σήματος

TDM. Συνδέστε την είσοδο *clock* του *Modulator Timing Counter* με την έξοδο 160 kHz του ρολογιού. Συνδέστε τις εισόδους *CT1* πομπού και δέκτη με την έξοδο "1" του *Modulator Timing Counter* και τις εισόδους *CT2* με την έξοδο "2". Τροφοδοτείστε την είσοδο *CH.1* με ημιτονοειδές σήμα πλάτους 4 Volts και συχνότητας 2 kHz, ενώ την είσοδο *CH.2* γειώστε τη. Με τη βοήθεια του παλμογράφου παρατηρήστε το σήμα στις εξόδους *CH.1 OUT* και *CH.2 OUT*. Τι σήμα λαμβάνετε σε κάθε κανάλι; Έπρεπε να υπάρχει σήμα στην έξοδο *CH.2 OUT*; Πώς το εξηγείτε αυτό; Συνδέστε τις εισόδους *CT2* πομπού και δέκτη διαδοχικά στις υπόλοιπες εξόδους του *Modulator Timing Counter*. Παρατηρείτε κάποια διαφορά στο σήμα της εξόδου *CH.2 OUT*; Εξηγήστε. Επίσης, μετρήστε για καθεμία θέση σύνδεσης το πλάτος των σημάτων στα δύο κανάλια εξόδου. Από τα πλάτη αυτά υπολογίστε τις *rms* τιμές καθώς και τη σχετική διομιλία, που ορίζεται από τη σχέση:

$$RCT = \frac{V_{CH2(rms)}}{V_{CH1(rms)}} \quad (3.1)$$

Με βάση τις τιμές αυτές χαράζετε τη γραφική παράσταση της σχετικής διομιλίας σαν συνάρτηση του χρόνου ασφαλείας μεταξύ των χρονοθυρίδων και σχολιάστε το αποτέλεσμα.



Σχήμα 3.7: Κύκλωμα μελέτης διομιλίας σε σύστημα TDM-PAM.

ΑΣΚΗΣΗ 4: ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΛΜΟΚΩΔΙΚΗΣ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην Άσκηση 2 μελετήθηκε η δειγματοληψία αναλογικών σημάτων, η οποία αποτελεί το πρώτο στάδιο κατά τη μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό. Το σήμα που προκύπτει είναι κβαντισμένο ως προς το χρόνο, όχι όμως και ως προς το πλάτος του. Προκειμένου το σήμα να μετατραπεί σε καθαρά ψηφιακό σήμα, πρέπει να κβαντιστεί και ως προς το πλάτος του. Επιπρόσθετα, για να είναι εύκολη η επεξεργασία του στη μορφή αυτή, χρειάζεται να κωδικοποιηθεί, δηλαδή να περιγραφεί με κωδικές λέξεις. Ένα σύστημα παλμοκωδικής διαμόρφωσης (*Pulse Code Modulation, PCM*) αναλαμβάνει να διεκπεραιώσει αυτά τα δύο βήματα. Το δειγματοληπτημένο σήμα κβαντίζεται ως προς την τιμή του πλάτους του και στη συνέχεια κωδικοποιείται σε λέξεις. Οι λέξεις αυτές ουσιαστικά εκφράζουν την τιμή του πλάτους των δειγμάτων του αρχικού σήματος στο δυαδικό σύστημα.

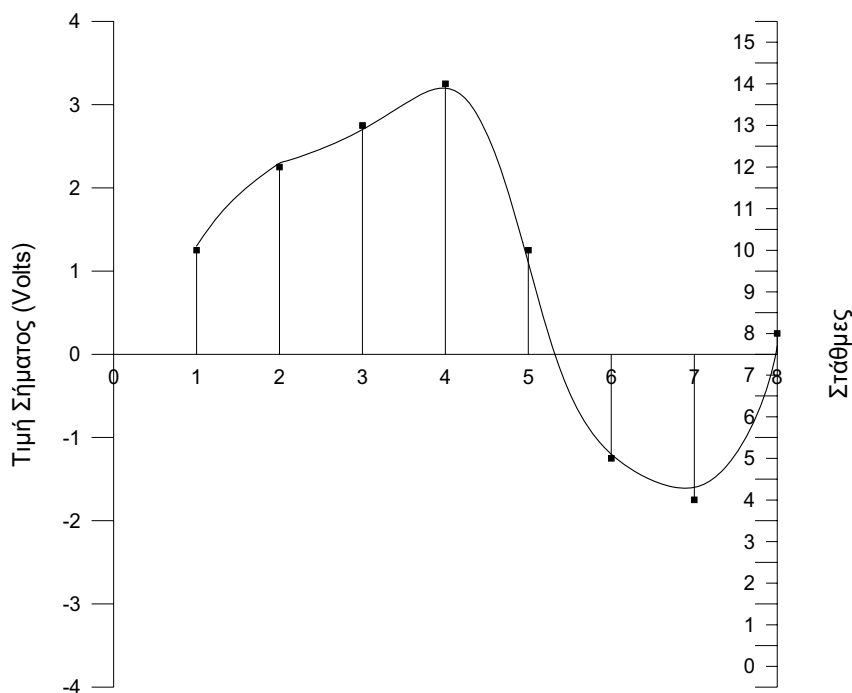
4.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ *PCM*

4.2.1 Κβάντιση και Κωδικοποίηση

Το πρώτο στάδιο κατά την παλμοκωδική διαμόρφωση είναι η κβάντιση των δειγμάτων του δειγματοληπτημένου σήματος ως προς την τιμή του πλάτους τους. Αυτή συνεπάγεται τον περιορισμό των τιμών πλάτους των δειγμάτων σε ένα πεπερασμένο πλήθος τιμών. Για το σκοπό αυτό αρχικά επιλέγεται το πλήθος των επιτρεπομένων τιμών και στη συνέχεια η περιοχή, μέσα στην οποία παίρνει τιμές το πλάτος των δειγμάτων, χωρίζεται σε ισάριθμα διαστήματα. Τέλος, γίνεται στρογγυλοποίηση των τιμών των δειγμάτων στην πλησιέστερη επιτρεπτή στάθμη. Έτσι, οι τιμές που προκύπτουν για τα πλάτη των δειγμάτων ανήκουν σε ένα πεπερασμένο σύνολο τιμών. Κατά την κβάντιση υφαισέρχεται ένα σφάλμα (**σφάλμα κβάντισης**), το οποίο οφείλεται στη στρογγυλοποίηση των τιμών των δειγμάτων και το οποίο προκαλεί αλλοίωση του σήματος. Όμως είναι προφανές ότι όσο περισσότερες είναι οι επιτρεπόμενες στάθμες, τόσο μικραίνει το σφάλμα αυτό και επομένως μειώνεται η αλλοίωση του σήματος.

Το δεύτερο βήμα της παλμοκωδικής διαμόρφωσης είναι η κωδικοποίηση του σήματος. Σε αυτήν, αρχικά γίνεται η αρίθμηση των σταθμών και στη συνέχεια αντί το σήμα να περιγράφεται από τις πραγματικές του τιμές, αφού έχει στρογγυλοποιηθεί στις διάφορες

στάθμες, περιγράφεται από τον αριθμό της κάθε στάθμης, ο οποίος αντιστοιχεί σε κάποια συγκεκριμένη τιμή σήματος. Οι αριθμοί αυτοί μπορούν να εκφραστούν στο δυαδικό σύστημα αρίθμησης, γεγονός που κάνει ευκολότερη τη μεταφορά, την επεξεργασία αλλά και την αποθήκευση του σήματος. Η ακολουθία των δυαδικών αριθμών, που δίνουν τις στάθμες για τα δείγματα του δειγματοληπτημένου, λέγεται **σήμα PCM**.



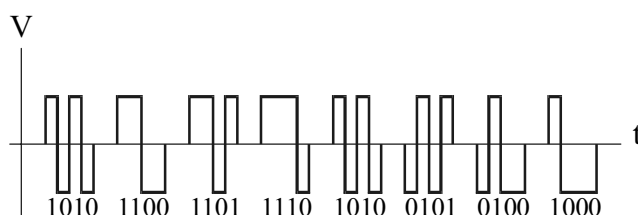
Σχήμα 4.1: Κβάντιση και Κωδικοποίηση Σήματος.

Έστω λοιπόν το σήμα του Σχήματος 4.1, το οποίο παίρνει τιμές από -4 V έως $+4\text{ V}$ (αριστερός κατακόρυφος άξονας). Το διάστημα αυτό χωρίζεται σε 16 στάθμες, οι οποίες αριθμούνται από το 0 μέχρι το 15 (δεξιός κατακόρυφος άξονας). Με τη διαδικασία της δειγματοληψίας του σήματος προκύπτουν τα δείγματα, που φαίνονται στον Πίνακα 4.1 καθώς και στο Σχήμα 4.1, τα οποία και στρογγυλοποιούνται στις πλησιέστερες στάθμες. Τότε, αρκεί να γίνει περιγραφή του σήματος με τους αριθμούς των σταθμών, στις οποίες στρογγυλοποιήθηκαν οι τιμές των δειγμάτων. Στον Πίνακα 4.1 δίνονται οι τιμές των δειγμάτων, οι πλησιέστερες στάθμες σε Volts και ο αντίστοιχος κωδικός αριθμός τους, στο δεκαδικό και στο δυαδικό σύστημα. Η ακολουθία των δυαδικών αριθμών αποτελεί το κωδικοποιημένο σήμα *PCM*, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 4.2.

Πίνακας 4.1.

Τιμή Δείγματος (V)	1,3	2,3	2,7	3,2	1,1	-1,2	-1,6	0,1
Πλησιέστερη στάθμη (V)	1,25	2,25	2,75	3,25	1,25	-1,25	-1,75	0,25
Αριθμός στάθμης	10	12	13	14	10	5	4	8
Δυαδικός Κώδικας	1010	1100	1101	1110	1010	0101	0100	1000

Το πλήθος των επιτρεπόμενων σταθμών κατά την κβάντιση εξαρτάται από τον αριθμό των ψηφίων των δυαδικών αριθμών, που χρησιμοποιούνται για την κωδικοποίηση του σήματος. Αν n ο αριθμός των ψηφίων των δυαδικών αριθμών, τότε ο αριθμός των σταθμών δίνεται από τη σχέση $N = 2^n$. Πρέπει να τονιστεί ότι το πόσο μικρό σφάλμα κβάντισης μπορεί να έχει το σύστημα εξαρτάται από τον αριθμό των bits. Όμως όσο πιο πολλά είναι τα bits, τόσο μεγαλύτερη ακρίβεια έχει το σύστημα PCM (μικρότερο σφάλμα κβάντισης) αλλά και τόσο πιο πολύπλοκο είναι.



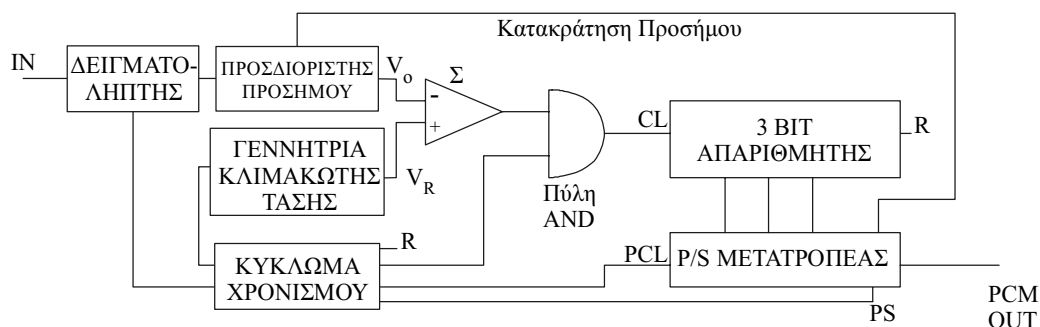
Σχήμα 4.2: Σήμα PCM.

Σημείωση: Είναι δυνατή η αντιστοίχιση της πιο αρνητικής τάσης με τον μέγιστο κωδικό αριθμό καθώς και η αντιστοίχιση της τάσης 0 V στον αριθμό "0". Στο παραπάνω παράδειγμα η πιο αρνητική τάση αντιστοιχεί στον κωδικό αριθμό "0". Τότε για την περιγραφή του σήματος χρησιμοποιούνται θετικές και αρνητικές στάθμες, δηλαδή στάθμες 0, ± 1 , ± 2 , κλπ. Για την περιγραφή αυτών στο δυαδικό σύστημα, το πρώτο ψηφίο χρησιμοποιείται σαν πρόσημο, συνήθως "0" για πρόσημο (+) και "1" για (-).

4.3 ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ PCM

Ένα σύστημα διαμόρφωσης PCM δίνεται στο Σχήμα 4.3, όπου το αρχικό σήμα εφαρμόζεται στην είσοδο IN . Ο δειγματολήπτης κάνει τη δειγματοληψία του σήματος, ενώ ο προσδιοριστής προσήμου σε συνδυασμό με το συγκριτή Σ και τη γεννήτρια κλιμακωτής

τάσης κβαντίζουν το σήμα σε επιτρεπόμενες στάθμες. Ο απαριθμητής κωδικοποιεί το σήμα σε δυαδική μορφή, ενώ ο P/S μετατροπέας (*Parallel to Serial*) στέλνει σειριακά στην έξοδο *PCM OUT* τα ψηφία του κωδικοποιημένου σήματος δημιουργώντας το σήμα *PCM*. Το κύκλωμα χρονισμού συγχρονίζει τη λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του συστήματος. Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η λειτουργία του κάθε τμήματος.

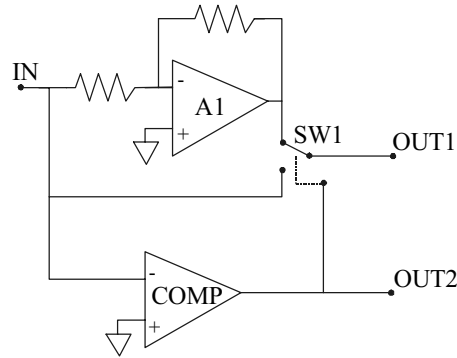


Σχήμα 4.3: Σύστημα διαμόρφωσης PCM.

4.3.1 Προσδιοριστής Προσήμου

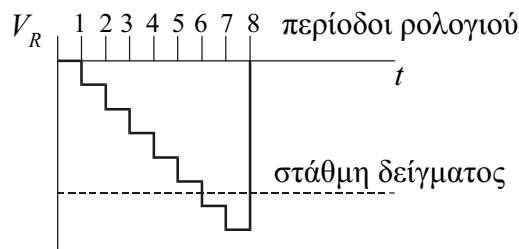
Το κύκλωμα προσδιορισμού προσήμου δίνεται στο Σχήμα 4.4. Αποτελείται από έναν ενισχυτή αντιστροφής με τελεστικό (*AI*) και ένα συγκριτή (*COMP*). Στην έξοδο *OUT1* λαμβάνεται το αρνητικό μέτρο του σήματος εισόδου (*IN*), δηλαδή $V_{out1} = -|V_{in}|$. Στην έξοδο *OUT2* λαμβάνεται το πρόσημο του σήματος εισόδου, δηλαδή λαμβάνεται θετική τάση +5 V ή λογικό "1" (τάση τροφοδοσίας $+V_{cc}$ του τελεστικού) όταν το σήμα εισόδου είναι αρνητικό, και τάση -5 V ή λογικό "0" (τάση $-V_{cc}$) όταν το σήμα εισόδου είναι θετικό.

Όταν το σήμα εισόδου είναι θετικό, ο διακόπτης *SW1* συνδέεται στην έξοδο του ενισχυτή διαφοράς, οπότε η τάση στην έξοδο *OUT1* είναι $V_{out1} = -V_{in}$, αφού $V_{in} > 0$. Αυτό επιτυγχάνεται συνδέοντας στον ακροδέκτη ελέγχου του διακόπτη το πρόσημο του σήματος εισόδου, δηλαδή την έξοδο *OUT2*. Έτσι, στην περίπτωση κατά την οποία το σήμα εισόδου είναι θετικό, τότε στον ακροδέκτη ελέγχου του διακόπτη *SW1* εφαρμόζεται τάση -5 V. Αντίθετα, όταν το σήμα εισόδου είναι αρνητικό, τότε η έξοδος *OUT2* εφαρμόζει στον ακροδέκτη ελέγχου του διακόπτη *SW1* τάση +5 V. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο διακόπτης να συνδεθεί απευθείας στο σήμα εισόδου. Η έξοδος *OUT1* οδηγείται στο συγκριτή Σ του Σχήματος 4.3, ενώ η έξοδος *OUT2* στον P/S μετατροπέα.



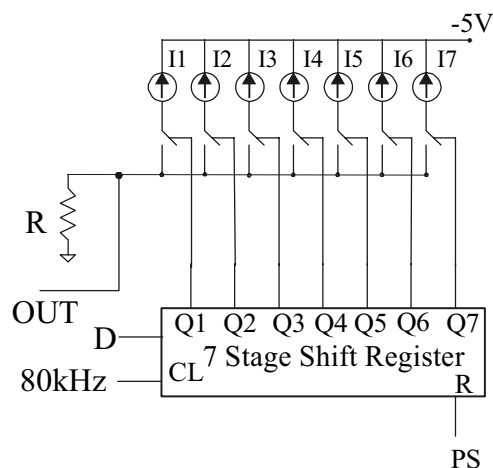
Σχήμα 4.4: Κύκλωμα προσδιορισμού προσήμου.

4.3.2 Γεννήτρια Κλιμακωτής τάσης



Σχήμα 4.5: Έξοδος γεννήτριας κλιμακωτής τάσης.

Η γεννήτρια αυτή δίνει στην έξοδό της μία κλιμακωτή τάση της μορφής του Σχήματος 4.5, ενώ το κύκλωμά της φαίνεται στο Σχήμα 4.6. Και στις δύο περιπτώσεις έχει θεωρηθεί ότι το σύστημα PCM έχει 4 bits, ενώ για την κωδικοποίηση θεωρήθηκαν στάθμες με πρόσημο, δηλαδή επτά (7) θετικές και επτά (7) αρνητικές. Η γεννήτρια κλιμακωτής τάσης αποτελείται από έναν καταχωρητή ολίσθησης επτά (7) θέσεων, καθεμία από τις οποίες είναι συνδεδεμένη με τον ακροδέκτη ελέγχου ενός διακόπτη. Ο κάθε διακόπτης συνδέει μία πηγή ρεύματος στο ένα άκρο μιας αντίστασης, το άλλο άκρο της οποίας είναι γειωμένο. Όταν μία πηγή ρεύματος είναι συνδεδεμένη στο άκρο της αντίστασης, τότε αυτή διαρρέεται από ρεύμα, οπότε εμφανίζεται τάση στα άκρα της. Όσο πιο πολλές θέσεις Q_i του καταχωρητή ολίσθησης έχουν λογικό "1", τόσο πιο πολλές πηγές ρεύματος έχουν συνδεθεί με την αντίσταση, οπότε τόσο μεγαλύτερη (κατά μέτρο) είναι η τάση στα άκρα της.



Σχήμα 4.6: Γεννήτρια κλιμακωτής τάσης.

Ο καταχωρητής ολίσθησης αποτελείται από επτά (7), στη συγκεκριμένη περίπτωση, μνημονικές θέσεις (στοιχεία *D Flip-Flop*), οι οποίες μπορούν να αποθηκεύσουν ισάριθμα δυαδικά ψηφία. Με κάθε παλμό του ρολογιού *CL* γίνεται ολίσθηση προς τα δεξιά των περιεχομένων των θέσεων αυτών, ενώ η πρώτη παίρνει την τιμή του ακροδέκτη *D*. Ξεκινώντας με μηδενισμένο τον καταχωρητή, δηλαδή όλες οι θέσεις του περιέχουν λογικό "0", με κάθε παλμό του ρολογιού *CL* γίνεται ολίσθηση, οπότε η θέση Q_i παίρνει την τιμή που είχε η θέση Q_{i-1} , ενώ η Q_1 παίρνει την τιμή του *D*. Αν το *D* είναι λογικό "1", τότε με κάθε χτύπο του ρολογιού ο αριθμός των θέσεων του καταχωρητή, που περιέχουν λογικό "1", αυξάνει κατά "1". Στην περίπτωση αυτή, η τάση στα άκρα της αντίστασης αυξάνει (κατά μέτρο) σε κάθε χτύπο του ρολογιού. Έτσι, εμφανίζεται μία κλιμακωτή αύξηση της τάσης στα άκρα της αντίστασης. Αυτή η τάση είναι το σήμα εξόδου της γεννήτριας. Κάθε "σκαλί" της τάσης αυτής αντιστοιχεί σε μία στάθμη για την κβάντιση του σήματος. Ας σημειωθεί ότι επειδή η φορά των πηγών ρεύματος είναι αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4.6, η τάση στα άκρα της αντίστασης, άρα και το σήμα εξόδου, είναι αρνητικά. Επίσης, όταν όλα τα ψηφία του καταχωρητή έχουν γίνει "1", ο καταχωρητής στον επόμενο παλμό του ρολογιού θα μηδενιστεί (με εφαρμογή παλμού στο *Reset*).

4.3.3 Απαριθμητής 3 bit και Συγκριτής

Ένας απαριθμητής έχει την ιδιότητα να "μετράει" χτύπους του ρολογιού. Δηλαδή, ξεκινώντας από την κατάσταση μηδενισμού (μέσω ενός ακροδέκτη *Reset* που διαθέτει),

αυξάνει το περιεχόμενό του (αριθμός στο δυαδικό σύστημα) κατά "1", μέχρι στον ακροδέκτη ελέγχου του να εφαρμοστεί λογικό "1". Ο μέγιστος αριθμός τον οποίο μπορεί να "μετρήσει" εξαρτάται από τον αριθμό των bits του. Αν ο απαριθμητής έχει 3 bits, όπως συμβαίνει στο σύστημα του Σχήματος 4.3, τότε μπορεί να μετρήσει από το 0 μέχρι το 7.

Από την άλλη πλευρά, ο συγκριτής Σ του συστήματος του Σχήματος 4.3 έχει σαν σκοπό την σύγκριση του σήματος εξόδου της κλιμακωτής τάσης V_R με το σήμα εξόδου $OUT1$ V_o του προσδιοριστή προσήμου. Όσο η τάση V_R είναι μεγαλύτερη από την τιμή του V_o (μικρότερη κατά μέτρο), η έξοδος του συγκριτή είναι λογικό "0", δηλαδή -5 V. Έτσι, ο απαριθμητής συνεχίζει να μετράει. Αντίθετα, μόλις η τάση της γεννήτριας γίνει αρνητικότερη της V_o , ο συγκριτής δίνει στην έξοδό του λογικό "1", οπότε ο απαριθμητής σταματάει να αυξάνει.

Κάθε "σκαλί" της τάσης της γεννήτριας αντιστοιχεί σε μία επιτρεπόμενη στάθμη. Αφού ο απαριθμητής αυξάνει την τιμή του κατά "1" με κάθε χτύπο του ρολογιού, όταν σταματήσει να μετράει, θα περιέχει τον αριθμό της στάθμης (κατά μέτρο) που αντιστοιχεί στην τιμή του συγκεκριμένου δείγματος του δειγματοληπτημένου σήματος. Βέβαια, με τη διαδικασία αυτή, δεν γίνεται στρογγυλοποίηση στην πλησιέστερη στάθμη, όπως αναφέρθηκε στην γενική περιγραφή της διαμόρφωσης PCM, αλλά στην αμέσως μεγαλύτερη κατά μέτρο.

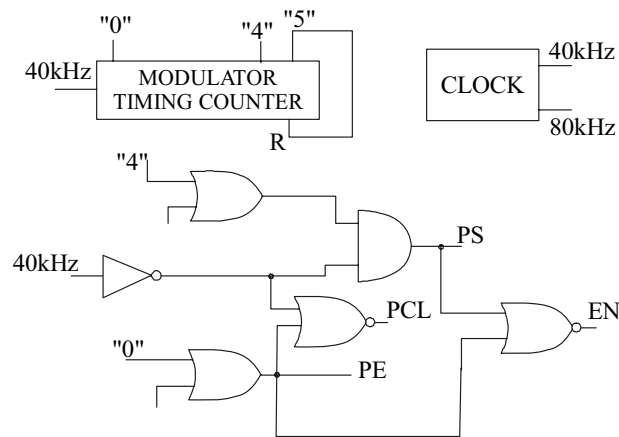
4.3.4 P/S Μετατροπείας

Ο μετατροπείας κάνει μετατροπή παράλληλου σήματος σε σειριακό με σκοπό τη μετάδοσή του μέσα από το σειριακό κανάλι μεταφοράς. Όταν η λειτουργία του απαριθμητή ολοκληρωθεί, ο μετατροπείας, μέσω του κυκλώματος χρονισμού (ακροδέκτης PS), παίρνει εντολή να πάρει το περιεχόμενο του απαριθμητή μαζί με το πρόσημο. Έτσι, ο μετατροπείας τώρα έχει το δυαδικό αριθμό που περιγράφει τη στάθμη του δείγματος. Στη συνέχεια, με χρήση του κυκλώματος χρονισμού (ακροδέκτης PCL), γίνεται αποστολή των ψηφίων bits, που περιέχει σειριακά στο κανάλι μεταφοράς, το οποίο συνδέεται στην έξοδο PCM OUT.

4.3.5 Κύκλωμα Χρονισμού – Λειτουργία Συστήματος PCM

Το κύκλωμα χρονισμού παίζει μεγάλο ρόλο στη λειτουργία του συστήματος, αφού αυτό ελέγχει τη λειτουργία των επιμέρους κυκλωμάτων του συστήματος συγχρονίζοντάς τα

κατάλληλα, ώστε το σύστημα διαμόρφωσης να λειτουργεί. Το κύκλωμα χρονισμού της άσκησης φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Πρόκειται για ένα κύκλωμα, το οποίο δίνει τη δυνατότητα στον P/S μετατροπέα να στέλνει το σήμα PCM, ενώ το υπόλοιπο κύκλωμα επεξεργάζεται το επόμενο δείγμα. Η λειτουργία του βασίζεται στη χρήση δύο ρολογιών με συχνότητες $CL1 = 80 \text{ kHz}$ και $CL2 = 40 \text{ kHz}$.



Σχήμα 4.7: Κύκλωμα χρονισμού.

Ο *Modulator Timing Counter* στη συνδεσμολογία αυτή λειτουργεί σαν απαριθμητής πέντε βαθμίδων. Δηλαδή, με κάθε παλμό του ρολογιού $CL2$ στέλνει έναν παλμό στην επόμενη έξοδό του, ξεκινώντας από την έξοδο "0". Όταν φτάσει στην έξοδο "5" γίνεται *reset*, οπότε ξεκινάει από την αρχή. Η έξοδος PE , η οποία μηδενίζει τον 3 bit απαριθμητή, δίνει λογικό "1" όταν η έξοδος "0" του απαριθμητή 5 βαθμίδων δίνει "1". Η έξοδος PCL , η οποία συγχρονίζει τον P/S μετατροπέα για αποστολή των bits που περιέχει, είναι "1" όταν το ρολόι $CL2$ είναι "1", και το PE είναι "0" (γιατί αποτελεί την έξοδο μιας *NOR* με εισόδους τα δύο σήματα). Η έξοδος PS μηδενίζει τον καταχωρητή ολίσθησης της γεννήτριας κλιμακωτής τάσης. Ο μηδενισμός πρέπει να γίνει, σύμφωνα με όσα έχουν ειπωθεί, όταν το ρολόι $CL1$ βρίσκεται στην 8η περίοδό του, ώστε η κλιμακωτή τάση να έχει 7 "σκαλιά". Δηλαδή, το PS πρέπει να γίνει "1" στο δεύτερο μισό της 4ης περιόδου του $CL2$. Τότε, ο 3 bit απαριθμητής έχει σίγουρα σταματήσει να μετράει, αφού η τιμή του δείγματος πρέπει να είναι μικρότερη κατά μέτρο από την τιμή του 7ου σκαλιού της τάσης V_R . Συνεπώς, το PS μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να δώσει εντολή στον P/S μετατροπέα να πάρει την τιμή του 3 bit απαριθμητή.

Το σήμα *EN* είναι η έξοδος μιας *NOR* με εισόδους τα *PE* και *PS* και επομένως είναι "1" μόνο όταν και τα δύο είναι "0". Το σήμα αυτό χρησιμοποιείται για να ελέγχει πότε θα λειτουργεί η γεννήτρια κλιμακωτής τάσης. Αυτό επιτυγχάνεται τροφοδοτώντας το *EN* στην είσοδο πρώτου ψηφίου *D* του καταχωρητή ολίσθησης. Έτσι, όσο γίνεται ο μηδενισμός του 3 bit απαριθμητή, η γεννήτρια θα είναι ανενεργή, το οποίο επιτυγχάνεται εφόσον ο ακροδέκτης πρώτου ψηφίου *D* του καταχωρητή, μετά το μηδενισμό του, παραμείνει μηδέν.

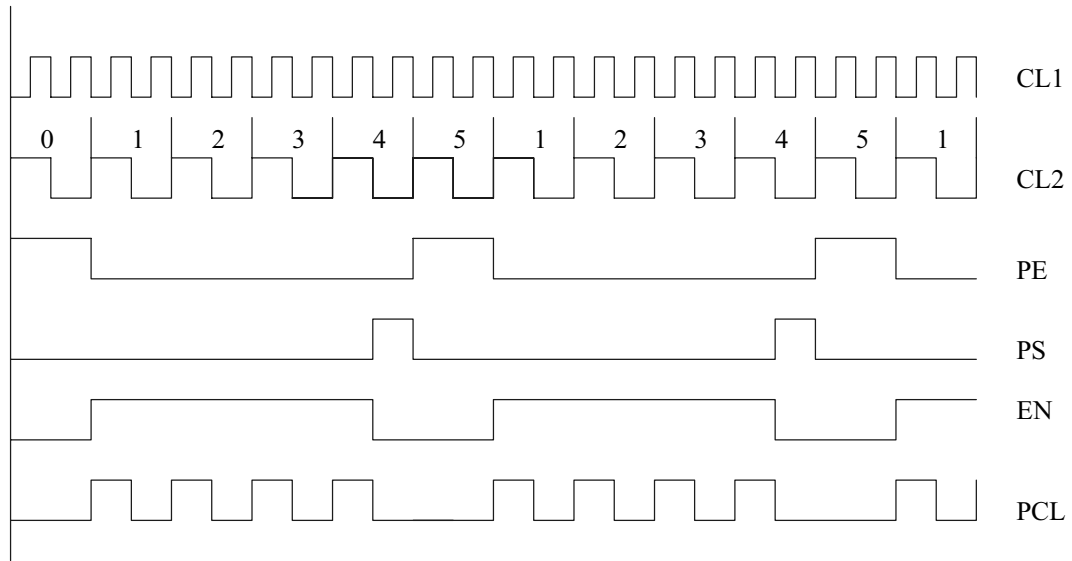
Η όλη λειτουργία του κυκλώματος χρονισμού φαίνεται παραστατικά για κάθε περίοδο των ρολογιών στο Σχήμα 4.8, ενώ η συνοπτική επεξήγηση των επιμέρους τμημάτων του συστήματος στις διάφορες περιόδους του ρολογιού *CL2* είναι:

Περίοδος 0: Λαμβάνεται δείγμα του σήματος. Ο προσδιοριστής προσήμου καθορίζει το πρόσημο και δίνει το μέτρο της τιμής του δείγματος στον συγκριτή. Ο 3 bit απαριθμητής γίνεται *reset* μέσω του *PE*.

Περίοδοι 1, 2, 3, πρώτο μισό της 4: Το χρονικό αυτό διάστημα αντιστοιχεί σε 7 περιόδους του *CL1*. Παράγεται η κλιμακωτή τάση και συγκρίνεται με την τιμή του δείγματος. Για να λειτουργεί η γεννήτρια, το σήμα *EN* είναι "1". Ταυτόχρονα, ο απαριθμητής μετράει στάθμες. Όταν η κλιμακωτή τάση γίνει πιο αρνητική από την τιμή του δείγματος, ο απαριθμητής σταματά. Ο *P/S* μετατροπέας στέλνει στην έξοδο του συστήματος τα bits του αριθμού, που περιγράφουν το προηγούμενο δείγμα. Για το σκοπό αυτό, δέχεται από το *PCL* 4 παλμούς, έναν για κάθε bit που αποστέλλεται. Η αποστολή του 4ου bit διαρκεί ολόκληρη την 4η περίοδο του *CL2*.

Δεύτερο μισό της περιόδου 4: Το *PS* γίνεται "1", οπότε ο *P/S* μετατροπέας παίρνει το περιεχόμενο του απαριθμητή.

Περίοδος 5: Η περίοδος αυτή ταυτίζεται με την περίοδο 0 του επόμενου κύκλου. Δηλαδή, ο κύκλος λειτουργίας του συστήματος έχει ολοκληρωθεί και αρχίζει νέος κύκλος λειτουργίας.

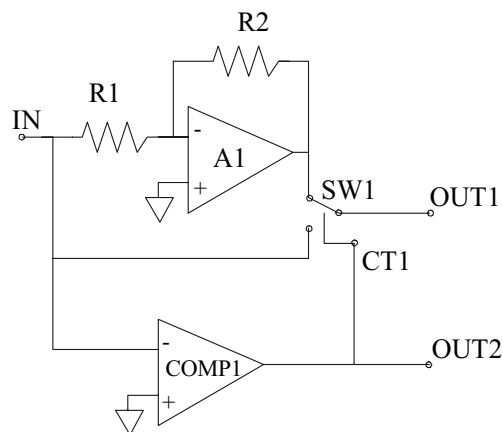


Σχήμα 4.8: Διάγραμμα χρονισμού συστήματος διαμόρφωσης PCM.

4.4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.4.1 Κύκλωμα Προσδιορισμού Προσήμου

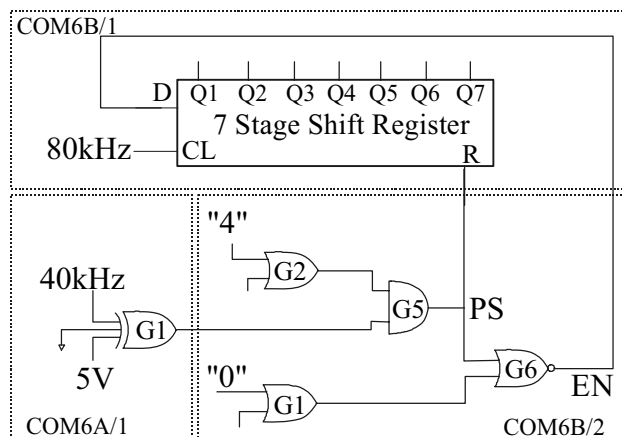
Για τη μελέτη του κυκλώματος προσδιορισμού προσήμου και εξαγωγής του αντίθετου του μέτρου του δείγματος, κατασκευάστε το κύκλωμα του Σχήματος 4.9. Τροφοδοτείστε την είσοδο *IN* με ημιτονοειδές σήμα πλάτους 1 Volt και συχνότητας 1 kHz. Συνδέοντας τον παλμογράφο στις δύο εξόδους *OUT1* και *OUT2*, παρατηρήστε και σχολιάστε τα δύο σήματα.



Σχήμα 4.9.

4.4.2 Καταχωρητής Ολίσθησης

Για τη μελέτη της λειτουργίας του καταχωρητή ολίσθησης σε συνδυασμό με το κύκλωμα χρονισμού υλοποιείτε το κύκλωμα του Σχήματος 4.10. Βραχυκυκλώστε την είσοδο *Reset* του *Modulator Timing Counter* με την έξοδό του "5" (με τον τρόπο αυτό έχετε μετρητή πέντε καταστάσεων) και συνδέστε τις εξόδους του "0" και "4" με τα σημεία του κυκλώματος, που φαίνονται στο Σχήμα 4.10. Συνδέστε το ρολόι 40 kHz στον *Modulator Timing Counter*, καθώς και στο σημείο που φαίνεται στο Σχήμα 4.10. Παρατηρείστε στον παλμογράφο τις εξόδους του καταχωρητή ολίσθησης $Q1$ έως $Q7$ και τα σημεία *CL* και *R*. Σχεδιάστε τα σήματα και με τη βοήθεια αυτών εξηγήστε τη λειτουργία του καταχωρητή. Η πύλη *XOR* στη συνδεσμολογία του Σχήματος 4.10 λειτουργεί σαν πύλη *NOT* με είσοδο το σήμα 40 kHz.



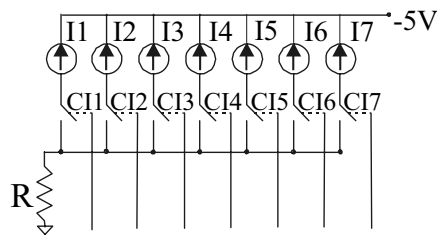
Σχήμα 4.10.

4.4.3 Πηγές Ρεύματος

Ελέγξτε ότι ο διακόπτης *PCM* της μονάδας COM-6B/1 είναι στη θέση *Linear*. Συνδέστε διαδοχικά καθέναν ξεχωριστά από τους ακροδέκτες ελέγχου των πηγών ρεύματος *CTi* με τάση +5 Volts και μετρήστε στον παλμογράφο την τάση στα άκρα της αντίστασης *R*. Στη συνέχεια, τροφοδοτείτε τον *CTI* και προσθέστε διαδοχικά τροφοδοσία και στους άλλους ακροδέκτες, παρατηρώντας την τάση στα άκρα της *R*. Παρουσιάστε και αιτιολογήστε τα αποτελέσματα.

4.4.4 Γεννήτρια Κλιμακωτής Τάσης

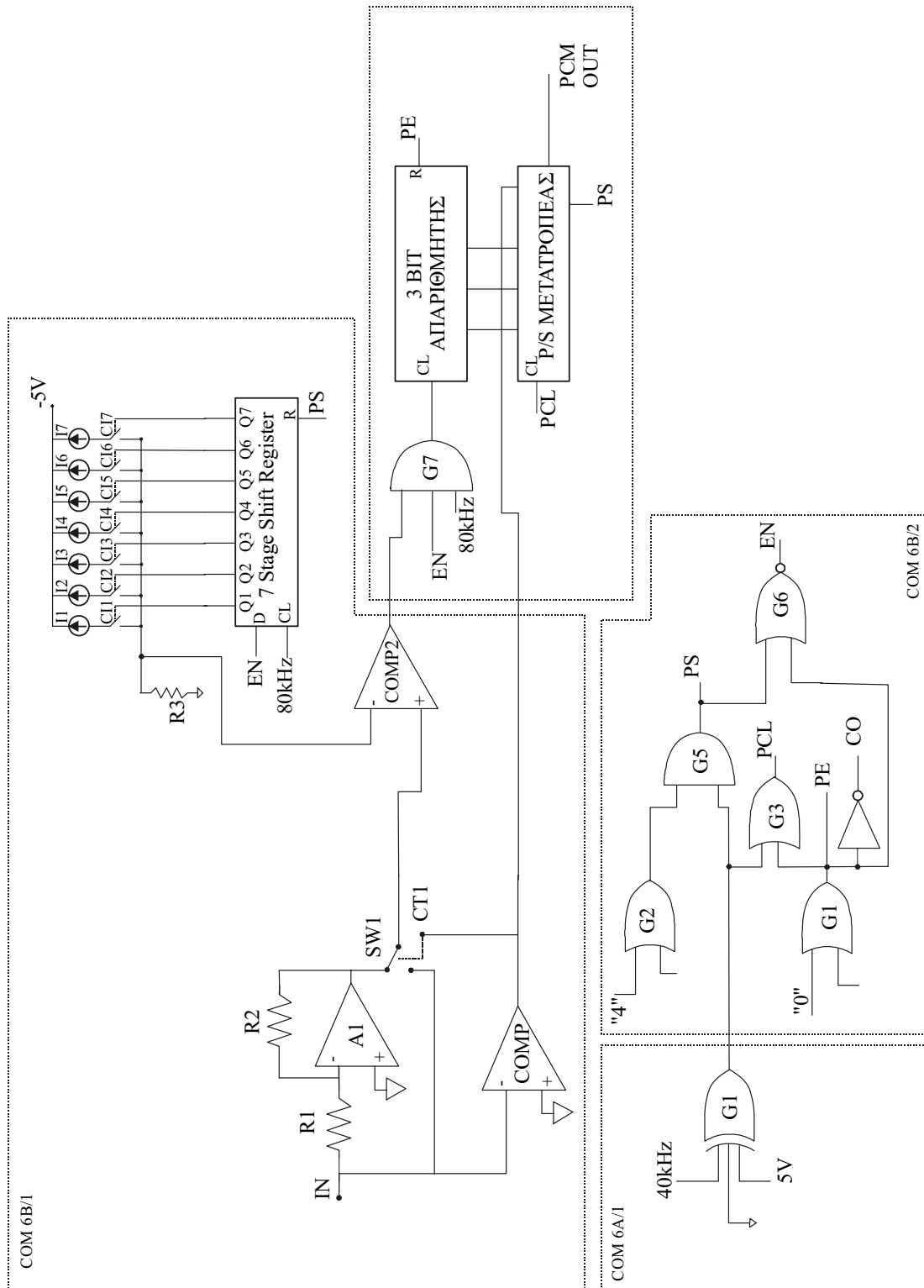
Πραγματοποιείτε το κύκλωμα του Σχήματος 4.10 συνδέοντας τους ακροδέκτες ελέγχου CI_i των πηγών του Σχήματος 4.11 στην αντίστοιχη έξοδο του καταχωρητή Q_i . Παρατηρείτε στον παλμογράφο την τάση στα άκρα της R συναρτήσει του ρολογιού των 80 kHz. Για το σκοπό αυτό μπορείτε να συνδέσετε το ένα κανάλι του παλμογράφου στα άκρα της R και το άλλο στο ρολόι. Σχεδιάστε την έξοδο του παλμογράφου και εξηγήστε την.



Σχήμα 4.11.

4.4.5 Πλήρες Σύστημα Διαμόρφωσης PCM

- (α) Πραγματοποιείτε το πλήρες κύκλωμα διαμόρφωσης PCM του Σχήματος 4.12. Παρατηρείτε το σήμα στους ακροδέκτες PS , EN , PE και PCL και προσπαθήστε να κατανοήσετε τη λειτουργία του κυκλώματος.
- (β) Τροφοδοτείστε το ένα άκρο του ποτενσιόμετρου $P1$ της μονάδας $COM6B2$ με $+5\text{ V}$ και το άλλο άκρο του με -5 V . Συνδέστε τον ακροδέκτη μεσαίας λήψης στην είσοδο του κυκλώματος. Έχοντας συνδέσει τα δύο κανάλια του παλμογράφου στην είσοδο και την έξοδο του κυκλώματος μεταβάλλετε την τάση στην είσοδο με τη βοήθεια του περιστροφικού διακόπτη του ποτενσιόμετρου. Παρατηρήστε το σήμα στην έξοδο του κυκλώματος καθώς το σήμα εισόδου μεταβάλλεται.
- (γ) Εφαρμόστε στην είσοδο του κυκλώματος ημιτονικό σήμα πλάτους 2 V και συχνότητας 100 Hz . Παρατηρήστε το σήμα στην έξοδο.



Σχήμα 4.12: Πλήρες Σύστημα Διαμόρφωσης

ΑΣΚΗΣΗ 5: ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΔΕΛΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

5.1 Η ΛΟΓΙΚΗ ΤΗΣ ΔΕΛΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

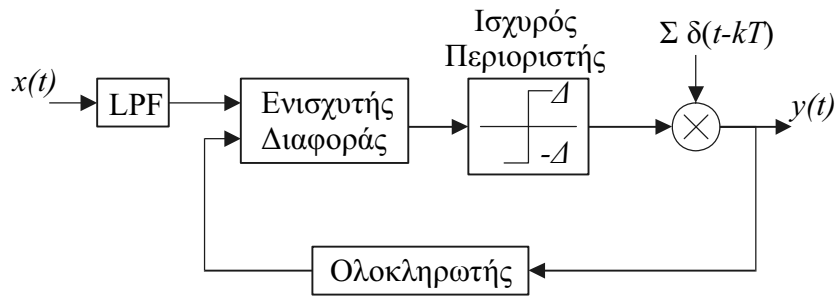
Στα συστήματα διαμόρφωσης, που εξετάστηκαν μέχρι τώρα, το εκπεμπόμενο σήμα μεταφέρει πληροφορία σχετικά με την τιμή του σήματος εισόδου. Αντίθετα, στη Δέλτα διαμόρφωση η μεταδιδόμενη πληροφορία σχετίζεται με τις μεταβολές της τιμής του σήματος, δηλαδή το εκπεμπόμενο σήμα μεταφέρει με κωδικές λέξεις τις μεταβολές του σήματος εισόδου. Για την περιγραφή του σήματος γίνεται χρήση δύο κωδικών λέξεων, μία για αύξηση και μία για μείωση του σήματος.

Για την καλύτερη κατανόηση της αρχής λειτουργίας της διαμόρφωσης αυτής, αρχικά παρουσιάζεται ένα αντίστοιχο μηχανικό πρόβλημα. Έστω μία σκάλα πάνω στην οποία ανεβαίνει και κατεβαίνει ένας άνθρωπος. Προκειμένου να περιγραφεί η θέση του πάνω στη σκάλα, μία μέθοδος είναι να αριθμηθούν τα σκαλιά και να μεταδίδεται ο αριθμός του σκαλιού, στο οποίο αυτός βρίσκεται σε κάθε χρονική στιγμή. Αυτή είναι η προσέγγιση, που ακολουθείται στην διαμόρφωση *PCM*. Μία διαφορετική προσέγγιση είναι να μεταδίδονται οι μετακινήσεις του ανθρώπου, δηλαδή κωδικές λέξεις για "άνοδο" ή "κάθοδο", και επομένως με τον τρόπο αυτό περιγράφεται εξίσου αποτελεσματικά η θέση του ανθρώπου. Την λογική αυτή ακολουθεί το σύστημα της δέλτα διαμόρφωσης.

5.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΜΟΡΦΩΤΗ ΤΗΣ ΔΕΛΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Το *block* διάγραμμα του διαμορφωτή ενός συστήματος δέλτα διαμόρφωσης δίνεται στο Σχήμα 5.1. Το σήμα εισόδου $x(t)$ περνά μέσα από ένα χαμηλοπερατό φίλτρο, το οποίο αποκόπτει συχνότητες που δεν μπορούν να μεταδοθούν από το σύστημα, και στη συνέχεια εισέρχεται σε έναν ενισχυτή διαφοράς. Για να εξασφαλιστεί ότι η έξοδος του συστήματος θα έχει μόνο δύο καταστάσεις, αμέσως μετά τον ενισχυτή υπάρχει ένας περιοριστής, η έξοδος του οποίου οδηγείται σε έναν ολοκληρωτή και ανατροφοδοτείται στον ενισχυτή. Η έξοδος του συστήματος είναι η έξοδος του περιοριστή. Στο σύστημα διαμόρφωσης διακρίνει κανείς ένα ακόμη στοιχείο μετά τον περιοριστή. Το στοιχείο αυτό δέχεται την έξοδο του περιοριστή και την πολλαπλασιάζει με μία σειρά από συναρτήσεις δέλτα, δηλαδή με ένα τρένο ώσεων με περίοδο T . Με τον τρόπο αυτό προκύπτουν στην έξοδο

ένα τρένο ώσεων με περίοδο T και εμβασδόν $\pm A$. Το πρόσημο των συναρτήσεων δέλτα εξαρτάται από το σήμα στην έξοδο του περιοριστή και το εμβασδόν τους είναι το πλάτος του σήματος του περιοριστή. Αν το στοιχείο αυτό δεν υπήρχε, τότε αντί για συναρτήσεις δέλτα θα είχαμε ως έξοδο τετραγωνικό σήμα. Προκειμένου να μελετηθεί διεξοδικά η λειτουργία του κυκλώματος της δέλτα διαμόρφωσης, θα μελετηθεί ξεχωριστά η λειτουργία του κάθε στοιχείου.



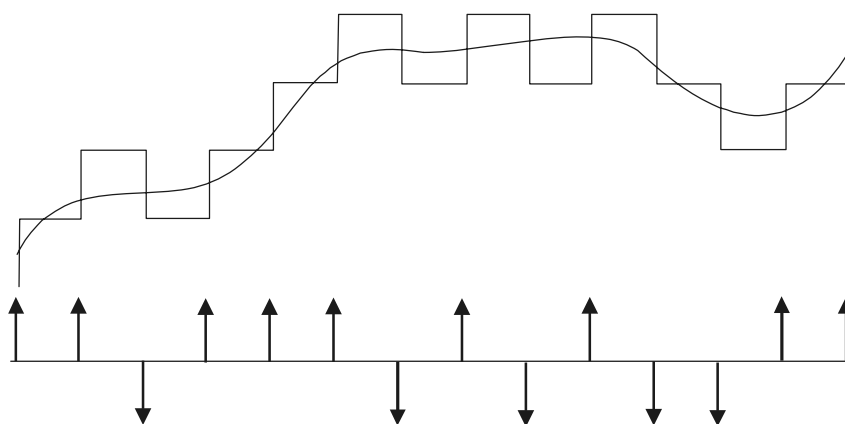
Σχήμα 5.1: Block διάγραμμα του διαμορφωτή δέλτα.

LPF: Το στοιχείο αυτό είναι απαραίτητο για να κόβει συχνότητες, που δεν μπορούν να περάσουν από το σύστημα, για την αποφυγή του προβλήματος της υπερφόρτωσης κλίσης, που θα μελετηθεί λεπτομερέστερα παρακάτω. Προς το παρόν, θεωρείστε ότι δεν έχει καμία επίπτωση στο σήμα.

Ενισχυτής Διαφοράς (Συγκριτής): Ο ενισχυτής διαφοράς υλοποιείται με τη χρήση ενός τελεστικού και χρησιμοποιείται για να κάνει τη σύγκριση ανάμεσα στο σήμα εισόδου και στο σήμα εξόδου του ολοκληρωτή. Όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, το σήμα εξόδου του ολοκληρωτή δημιουργείται με βάση την τελική περιγραφή του σήματος εισόδου από το σύστημα, δηλαδή πρόκειται για μία **προσέγγιση** του αρχικού σήματος. Η διαφορά αυτή είναι αναγκαία προκειμένου να αποφασίσει το κύκλωμα αν θα δοθεί διαταγή "ανόδου" ή "καθόδου" στην έξοδο. Αν δηλαδή η σύγκριση δείξει ότι το σήμα είναι μεγαλύτερο από την προσέγγιση, τότε θα δοθεί εντολή "ανόδου", δηλαδή στην έξοδο του συστήματος διαμόρφωσης λαμβάνεται μία θετική δέλτα συνάρτηση. Αυτή θα έχει σαν συνέπεια την αύξηση του σήματος προσέγγισης στον επόμενο κύκλο. Αντίθετα, αν η σύγκριση δείξει ότι το σήμα είναι μικρότερο από το σήμα προσέγγισης, τότε θα ληφθεί αρνητική δέλτα συνάρτηση στην έξοδο (εντολή "καθόδου") και μείωση του σήματος προσέγγισης στον επόμενο κύκλο.

Περιοριστής: Επειδή δεν είναι βέβαιο ότι ο ενισχυτής διαφοράς δουλεύει συνεχώς στη μη γραμμική περιοχή, εισάγεται ένα κύκλωμα, το οποίο μπορεί να δώσει μόνο δύο τιμές $\pm V$. Με το κύκλωμα αυτό εξασφαλίζεται ότι υπάρχουν μόνο δύο καταστάσεις, οι οποίες αντιστοιχούν στις κωδικές λέξεις "άνοδος" και "κάθοδος".

Πολλαπλασιαστής: Αυτός πολλαπλασιάζει την έξοδο του περιοριστή, η οποία έχει τιμή $\pm V$, με ένα τρένο δέλτα ώσεων. Το αποτέλεσμα είναι μία περιοδική δέλτα συνάρτηση, που έχει θετική ή αρνητική τιμή ανάλογα με το αποτέλεσμα του συγκριτή. Το σήμα αυτό φαίνεται καθαρά στο Σχήμα 5.2.



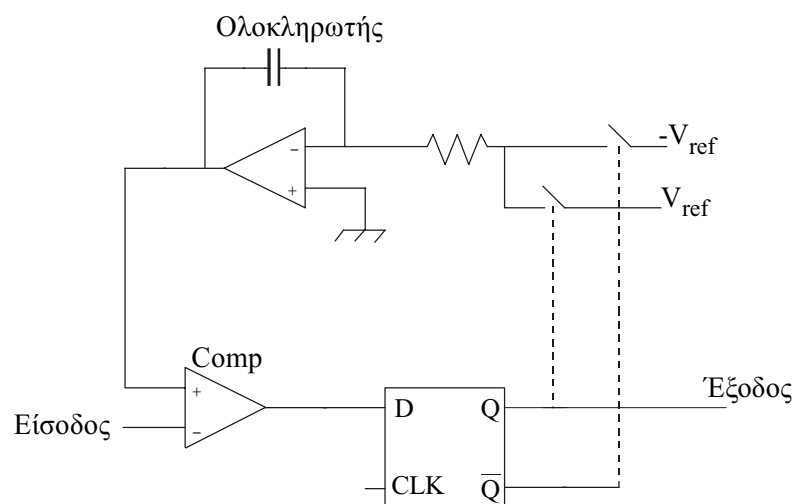
Σχήμα 5.2: Σχηματική αναπαράσταση των τάσεων στην δέλτα διαμόρφωση.

Ολοκληρωτής: Ολοκληρώνοντας τις δέλτα συναρτήσεις, που δίνει στην έξοδο του ο πολλαπλασιαστής, προκύπτει μία τιμή τάσης, η οποία μεταβάλλεται κατά βήματα V και αυξάνει όταν ο συγκριτής δίνει θετική τιμή, ενώ μειώνεται όταν ο συγκριτής δίνει αρνητική τιμή. Καταλαβαίνει κανείς ότι η έξοδος του ολοκληρωτή είναι ουσιαστικά μία κβαντισμένη προσέγγιση του σήματος εισόδου. Το μέγεθος του άλματος στην τάση (V) εξαρτάται από τον ολοκληρωτή καθώς και τα χαρακτηριστικά εξόδου της προηγούμενης βαθμίδας, δηλαδή από τα χαρακτηριστικά των δέλτα συναρτήσεων. Το σήμα φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Με βάση τα παραπάνω, όταν το σήμα εισόδου είναι μεγαλύτερο από την προσέγγιση του, τότε η έξοδος του συστήματος δίνει μία θετική ώση, η οποία ανεβάζει την έξοδο του ολοκληρωτή κατά V . Όταν κάποια στιγμή φτάσει η τιμή της τάσης προσέγγισης να ξεπεράσει την τιμή του σήματος, τότε ο συγκριτής δίνει αρνητική τιμή και η έξοδος του συστήματος είναι μία αρνητική ώση. Η τιμή της προσέγγισης πέφτει και η διαδικασία συνεχίζεται. Στο Σχήμα 5.2 έχουν σχεδιαστεί τα σήματα εισόδου και εξόδου του συστήματος διαμόρφωσης καθώς και της εξόδου του ολοκληρωτή (προσεγγιστικό

σήμα). Συγκεκριμένα, ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος, η καμπύλη γραμμή είναι το σήμα εισόδου και τα βέλη αντιστοιχούν στις θετικές ή αρνητικές δέλτα συναρτήσεις της εξόδου του συστήματος διαμόρφωσης. Τέλος, η τεθλασμένη γραμμή, η οποία αποτελεί την έξοδο του ολοκληρωτή ή αλλιώς η τάση σύγκρισης, ακολουθεί την τάση εισόδου. Ο αναγνώστης, ο οποίος θέλει να μελετήσει βαθύτερα την μαθηματική ανάλυση της δέλτα διαμόρφωσης, παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία [1] §7.6, [2] §10.4.5, 10.4.6.

5.3 ΠΡΑΚΤΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΠΟΜΠΟΥ ΔΕΛΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Το κύκλωμα, το οποίο παρουσιάστηκε παραπάνω, λειτουργεί κάνοντας χρήση ενός τρένου ώσεων. Όμως, στην πράξη ούτε δέλτα συνάρτηση, ούτε και τρένο ώσεων. Επομένως, το στοιχείο, το οποίο πολλαπλασιάζει με τρένο ώσεων παραλείπεται, και η είσοδος του ολοκληρωτή είναι παλμοί τετραγωνικής μορφής, οπότε η έξοδος αυτού έχει τριγωνική μορφή. Αποτέλεσμα αυτού είναι το πραγματικό κύκλωμα του διαμορφωτή να είναι ελαφρά διαφοροποιημένο από το αντίστοιχο σύστημα και φαίνεται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Πρακτικό κύκλωμα του πομπού DM.

Στο πρακτικό κύκλωμα του πομπού της δέλτα διαμόρφωσης, το σήμα εισόδου οδηγείται σε έναν τελεστικό ενισχυτή σε συνδεσμολογία συγκριτή. Ο ενισχυτής αυτός είναι σε κύκλωμα ανοικτού βρόγχου, οπότε λειτουργεί μη γραμμικά. Στη συγκεκριμένη συνδεσμολογία παίζει το ρόλο του συγκριτή και του περιοριστή ταυτόχρονα, παίρνοντας τιμές κόρου $\pm V_{cc}$. Στη συνέχεια, ακολουθεί ένας καταχωρητής τύπου *D Flip-Flop*. Με την βοήθεια του τετραγωνικού παλμού του ρολογιού, ο καταχωρητής αυτός ανανεώνει την

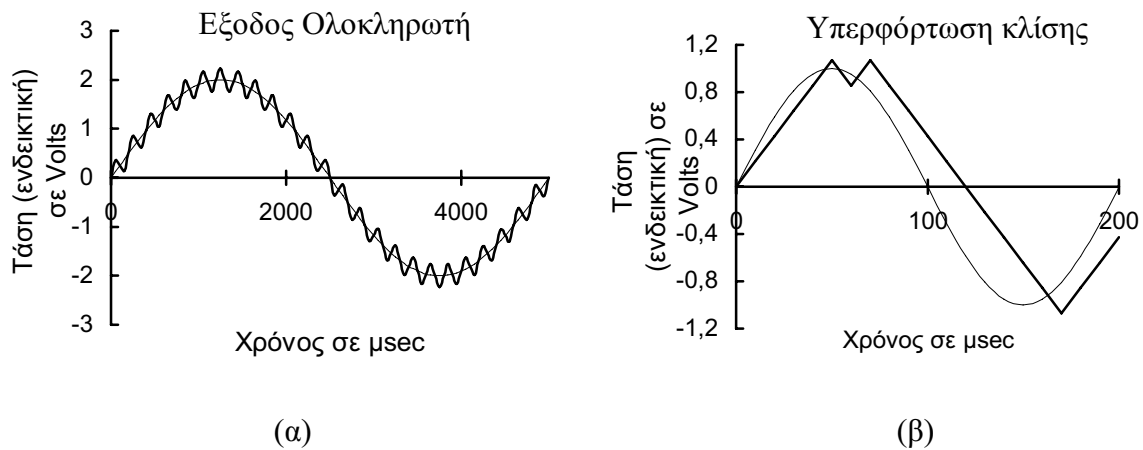
τιμή της εξόδου του με βάση την τιμή στην είσοδό του, δηλαδή με βάση την έξοδο του συγκριτή. Η έξοδος του καταχωρητή αποτελεί την έξοδο του κυκλώματος της δέλτα διαμόρφωσης. Από το Σχήμα 5.3 φαίνεται ότι η έξοδος του κυκλώματος μαζί με τη συμπληρωματική της οδηγούν έναν διπλό διακόπτη, ο οποίος παρέχει τάση $\pm V_{ref}$ στον ολοκληρωτή και λειτουργεί σαν ισχυρός περιοριστής ή σαν κβαντιστής. Ο ολοκληρωτής υλοποιείται με έναν τελεστικό ενισχυτή και ένα ζευγάρι αντίστασης-πυκνωτή. Η τάση στην έξοδο του εξαρτάται από τις τιμές των στοιχείων αυτών (σταθερά ολοκλήρωσης RC). Προκειμένου να γίνει περισσότερο κατανοητό το σημείο αυτό πρέπει κανείς να μελετήσει τη λειτουργία των κυκλωμάτων ολοκλήρωσης-διαφορίσης με τελεστικό ενισχυτή [3] §11.4.1. Η έξοδος του ολοκληρωτή αποτελεί ένα προσεγγιστικό σήμα, το οποίο συγκρίνεται με το σήμα εισόδου του κυκλώματος στο συγκριτή. Όταν το σήμα εισόδου είναι μεγαλύτερο από την προσέγγιση, τότε ο συγκριτής δίνει τάση $-V_{cc}$ στην έξοδο, το *Flip-Flop* έχει έξοδο λογικό "0" στον ακροδέκτη Q και λογικό "1" στον \bar{Q} , η τάση στην είσοδο του ολοκληρωτή γίνεται αρνητική και ίση με $-V_{ref}$ οπότε η τάση στην έξοδο του ολοκληρωτή αυξάνεται. Αντίθετη λειτουργία εκτελεί το κύκλωμα, όταν η τάση του σήματος εισόδου είναι μικρότερη από αυτήν του ολοκληρωτή. Η ανανέωση της τιμής του καταχωρητή *Flip-Flop* ελέγχεται από το σήμα κάποιου ρολογιού, που συνδέεται για το σκοπό αυτό στην κατάλληλη είσοδο του *Flip-Flop*. Είναι προφανές ότι η περίοδος ανανέωσης του *Flip-Flop*, και επομένως και του ρολογιού που το ελέγχει, καθορίζει την περίοδο λειτουργίας του κυκλώματος.

5.4 ΥΠΕΡΦΟΡΤΩΣΗ ΚΛΙΣΗΣ

Το κύκλωμα, το οποίο μόλις περιγράφηκε, δίνει μία διαταγή (άνοδος ή κάθοδος) σε κάθε περίοδο του ρολογιού. Όσο το σήμα εισόδου δεν εμφανίζει μεγάλη κλίση και οι διαταγές είναι αρκετά πυκνές, τότε το σήμα προσέγγισης παρακολουθεί το σήμα εισόδου. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις κατά τις οποίες το σήμα εισόδου έχει απότομες μεταβολές ενώ και η περίοδος του ρολογιού είναι τέτοια, ώστε το σήμα προσέγγισης να μην προλαβαίνει να παρακολουθήσει το σήμα εισόδου. Το αποτέλεσμα αυτού είναι το σήμα προσέγγισης να είναι σημαντικά διαφορετικότερο από το σήμα εισόδου, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται το φαινόμενο **υπερφόρτωσης κλίσης**.

Για μία πιο διεξοδική μελέτη του φαινομένου αυτού, έστω ότι το σήμα εισόδου περιγράφεται στο πεδίο του χρόνου από τη συνάρτηση $x(t)$, η κλίση της οποία σε κάθε χρονική στιγμή t είναι η παράγωγος της $x(t)$. Αν d_{\max} είναι η μέγιστη τιμή της κλίσης αυτής, τότε σε χρόνο ίσο με την περίοδο δειγματοληψίας ή λειτουργίας του κυκλώματος T_s , η τιμή του σήματος εισόδου στο σημείο εκείνο μεταβάλλεται περίπου κατά $d_{\max} T_s$. Εξάλλου, η μεταβολή του προσεγγιστικού σήματος για μία περίοδο T_s είναι ίση με:

$$\Delta = \frac{V_{ref}}{RC} T_s \quad (5.1)$$



Σχήμα 5.4: (α) Κανονική λειτουργία και (β) υπερφόρτωση κλίσης.

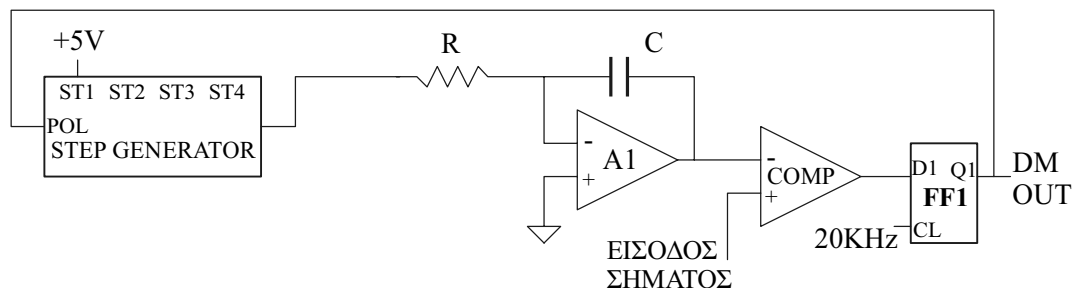
Προκειμένου λοιπόν το προσεγγιστικό σήμα να μπορεί να παρακολουθεί το σήμα στην περίοδο αυτή, θα πρέπει να ισχύει $\Delta \geq d_{\max} T_s$ δηλαδή:

$$\frac{V_{ref}}{RC} T_s \geq d_{\max} T_s \Rightarrow \frac{V_{ref}}{RC} \geq d_{\max} \quad (5.2)$$

Είναι προφανές ότι εφόσον ισχύει η σχέση (5.2) για τη μέγιστη κλίση του σήματος εισόδου, θα ισχύει για κάθε άλλη τιμή της κλίσης. Συνεπώς, το προσεγγιστικό σήμα θα παρακολουθεί το σήμα εισόδου σε κάθε σημείο του. Στο Σχήμα 5.4 δίνονται παραστατικά η κανονική λειτουργία ενός συστήματος δέλτα διαμόρφωσης (α) καθώς και το φαινόμενο της υπερφόρτωσης κλίσης (β).

5.5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.5.1 Λειτουργία του Διαμορφωτή



Σχήμα 5.5: Σύστημα διαμόρφωσης DM.

- α) Πραγματοποιείτε το κύκλωμα διαμόρφωσης του Σχήματος 5.5 και τροφοδοτείστε την κονσόλα με ρεύμα, ενώ η είσοδος του κυκλώματος πρέπει να είναι γειωμένη. Παρατηρείστε την κυματομορφή εξόδου του ολοκληρωτή με τη βοήθεια του παλμογράφου καθώς και την κυματομορφή στην έξοδο του συγκριτή, στην έξοδο του *Step Generator* και στην έξοδο του συστήματος *DM OUT*. Η τροφοδότηση των ST_i με τάση +5 V ρυθμίζει το πλάτος της τάσης V_{ref} των παλμών στην έξοδο του *Step Generator*. Το λογικό σήμα στην είσοδό του (*POL*) ελέγχει το πρόσημο των παλμών αυτών. Αν το θετικό και το αρνητικό εύρος βαθμίδας του διαμορφωτή (θετικό και αρνητικό βήμα στην έξοδο του *Step Generator*) δεν είναι ίσα, τότε η κυματομορφή στην έξοδο του ολοκληρωτή δεν θα είναι σταθερή περιοδική, αλλά θα παρουσιάζει σταδιακή αύξηση ή μείωση. Η ανισότητα αυτή οφείλεται σε ύπαρξη συνεχούς συνιστώσας στο τετραγωνικό περιοδικό σήμα (έστω V_{DC}), η οποία, μετά την ολοκλήρωση, προκαλεί τη σταδιακή μεταβολή της μέσης τιμής του σήματος ανά περίοδο, καθώς έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία συνιστώσας της μορφής $V_{DC}t$. Παρατηρώντας την κυματομορφή στην έξοδο του ολοκληρωτή με την βοήθεια του περιστροφικού ροοστάτη *Step Generator Balance*, ρυθμίστε τη σχέση μεταξύ θετικής και αρνητικής τάσης της μονάδας *Step Generator*, έτσι ώστε η κυματομορφή εξόδου να είναι μεν περιοδική αλλά σταθερή. Εξηγήστε την ανωμαλία, η οποία παρουσιάζεται, όταν η ρύθμιση αυτή δεν γίνει σωστά. Τι συνέπειες μπορεί να έχει στη λειτουργία του κυκλώματος η κακή ρύθμιση;
- β) Παρατηρείστε τη κυματομορφή στις εξόδους του *Step Generator*, του ολοκληρωτή, του συγκριτή και της εξόδου του συστήματος *DM OUT* και εξηγήστε τη λειτουργία

του κυκλώματος. Γιατί η τελευταία κυματομορφή δεν είναι τρένο ώσεων; Παρατηρείστε ότι η κυματομορφή εξόδου είναι μία περιοδική συνάρτηση. Μετρείστε την περίοδο της και εξηγήστε τη μορφή της.

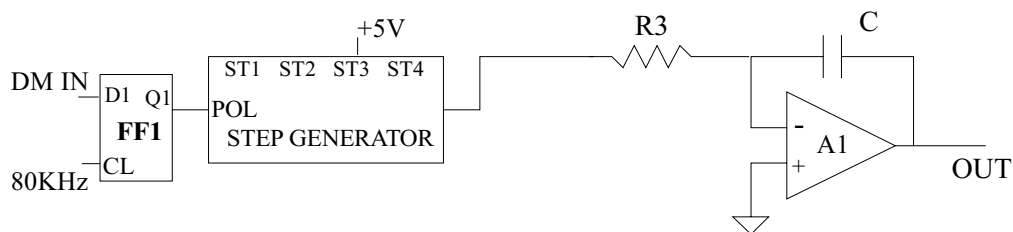
5.5.2 Υπερφόρτωση Κλίσης

- α) Για να παρατηρήσετε το φαινόμενο της υπερφόρτωσης κλίσης συνδέστε τη γεννήτρια συχνοτήτων στην είσοδο του διαμορφωτή και τα δύο κανάλια του παλμογράφου το ένα στην είσοδο και το άλλο στην έξοδο του ολοκληρωτή. Επιλέξτε πλάτος τάσης στη γεννήτρια ίσο με 1 Volt και ξεκινώντας από συχνότητα 100 Hz παρατηρείστε τον τρόπο με τον οποίο ακολουθεί η μία κυματομορφή την άλλη. Αυξήστε τη συχνότητα μέχρι να φτάσετε σε κατάσταση μη κανονικής λειτουργίας (υπερφόρτωση κλίσης) και σημειώστε τη συχνότητα για την οποία παρατηρήσατε οριακή λειτουργία. Συγκρίνετε την τιμή αυτή της συχνότητας με την αντίστοιχη θεωρητική.
- β) Επαναλάβετε την διαδικασία, αφού πρώτα αλλάξετε τη συχνότητα λειτουργίας του ρολογιού από 20 KHz σε 40 KHz και κατόπιν σε 80 KHz. Τι παρατηρείτε; Εξηγήστε τα αποτελέσματα.
- γ) Επιστρέφοντας σε συχνότητα 20 KHz αλλάξτε την τιμή της αντίστασης R και επαναλάβετε την διαδικασία. Παρατηρείτε αλλαγή στη μέγιστη συχνότητα για την οποία δεν εμφανίζεται υπερφόρτωση κλίσης; Αιτιολογείστε. Παρατηρείτε τίποτα άλλο; Εξηγήστε.
- δ) Με βάση τα παραπάνω προτείνετε λύσεις προκειμένου το σύστημα, που έχετε κατασκευάσει, να περιγράφει επιτυχώς σήματα που περιέχουν συχνότητες διπλάσιες από αυτήν που εσείς μετρήσατε σαν οριακή. Τι θυσιάζετε κάνοντας την αλλαγή ως προς την περιγραφή του σήματος;

5.5.3 Μέτρηση Λόγου Σήματος–προς–Θόρυβο

Επειδή το σύστημα της δέλτα διαμόρφωσης λειτουργεί με κωδικές εντολές αναμένεται να έχει σημαντικά μεγάλη τιμή του λόγου σήματος–προς–θόρυβο. Για

τη μέτρηση της ποιότητας μεταφοράς θα χρησιμοποιηθεί και το κύκλωμα αποδιαμόρφωσης. Σημειώνεται ότι για την κατασκευή του αποδιαμορφωτή χρειάζεται να χρησιμοποιηθούν στοιχεία ίδια με εκείνα του διαμορφωτή, έτσι ώστε να αναπαράγεται σωστά το σήμα. Συγκεκριμένα, πρέπει να είναι ίδιες οι αντιστάσεις στους ολοκληρωτές (συνδέστε την αντίσταση R_3), καθώς και ίδια η συχνότητα λειτουργίας των δύο κυκλωμάτων. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστε το κύκλωμα του Σχήματος 5.6 και συνδέστε την είσοδο του με την έξοδο του διαμορφωτή. Στην έξοδο του αποδιαμορφωτή συνδέστε το στοιχείο *S/N Separator*. Σημειώνεται ότι είναι απαραίτητη η σύνδεση της τάσης +5 V **μόνο** στο ST_3 του *Step Generator*, ώστε να δίνει $V_{ref} = 2$ V. Τροφοδοτείστε την είσοδο του διαμορφωτή με ημιτονοειδή τάση πλάτους 0.5 Volt και συχνότητας ίση με τη συχνότητα που βρέθηκε στο βήμα (β) της Άσκησης 1 (συχνότητα διέλευσης f_1 του *S/N Separator*). Μετρήστε το πλάτος του σήματος στην είσοδο και την έξοδο του *S/N Separator* και υπολογίστε το λόγο σήματος–προς–θόρυβο. Στη συνέχεια, αλλάξτε τη συχνότητα του σήματος εισόδου, επιλέγοντας να είναι ίση με τη δεύτερη συχνότητα διέλευσης f_2 του *S/N Separator*, και επαναλάβετε τη μέτρηση και τον υπολογισμό. Συγκρίνετε τις δύο τιμές του λόγου σήματος–προς–θόρυβο μεταξύ τους.



Σχήμα 5.6: Το εργαστηριακό κύκλωμα του αποδιαμορφωτή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ι. Γ. Τίγκελη και Δ. Ι. Φραντζεσκάκη, *Σημειώσεις του μαθήματος: Εισαγωγή στα Συστήματα Τηλεπικοινωνιών*, 1997.
- [2] Κ. Sam Shanmugam, *Ψηφιακά και Αναλογικά Συστήματα Επικοινωνίας*, Μετάφραση Κ. Καρούμπαλου, Εκδόσεις Γ. Πνευματικού, 1991.
- [3] Κ. Καρούμπαλου και Γ. Φιλοκύπρου, *Μαθήματα Ηλεκτρονικής*, 1993.