

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**

**ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΤΕ**

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ 1

Δρ. ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ ΠΑΠΑΤΣΩΡΗΣ
Καθηγητής

ΣΕΡΡΕΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2015



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons. Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Το έργο αυτό αδειοδοτείται από την Creative Commons Αναφορά Δημιουργού - Παρόμοια Διανομή 4.0 Διεθνές Άδεια. Για να δείτε ένα αντίγραφο της άδειας αυτής, επισκεφτείτε <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.el>.

Χρηματοδότηση

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.

Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο ΤΕΙ Κεντρικής Μακεδονίας**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.

Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



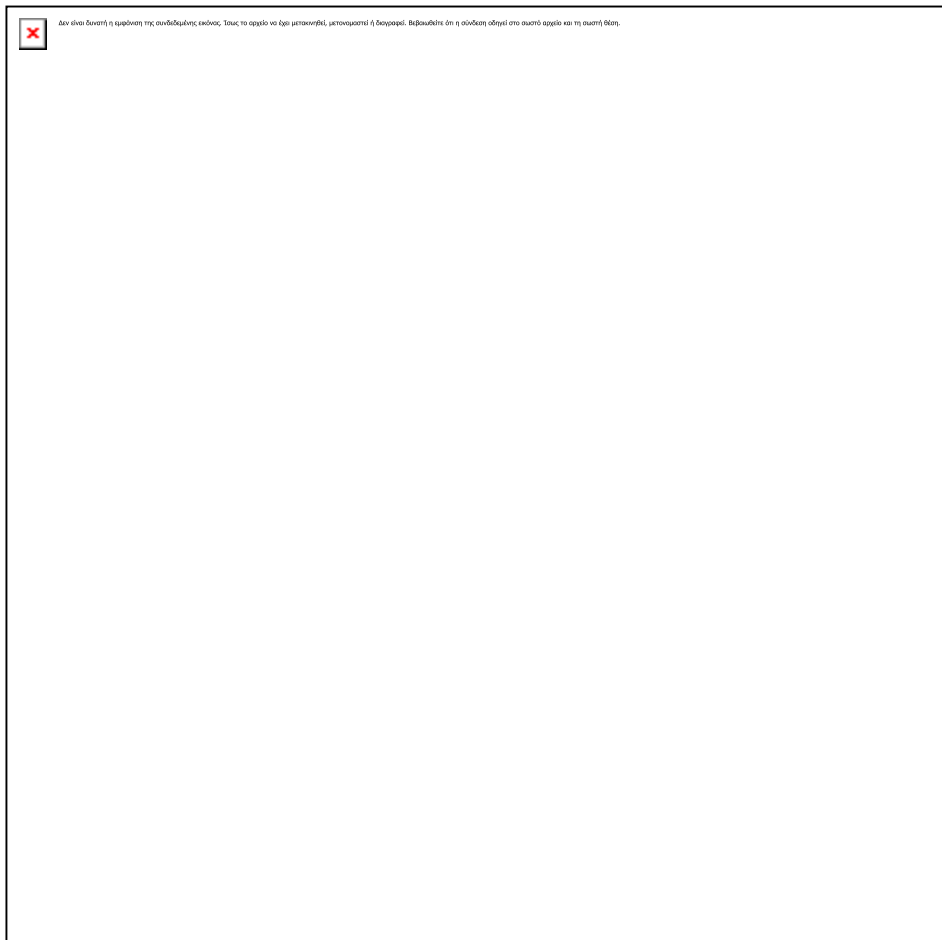
1 Εισαγωγή στις Επικοινωνίες

Πριν ξεινήσει η υλοποίηση πρακτικών συστημάτων επικοινωνιών έλαβε χώρα σειρά σημαντικών ανακαλύψεων στο πεδίο του ηλεκτρομαγνητισμού. Η αρχή έγινε με τον Samuel Morse, ο οποίος ανακάλυψε τον τηλεγράφο το 1837. Χάρη σ' αυτόν κατέστη για πρώτη φορά δυνατή η στιγμιαία επικοινωνία μεταξύ δύο σημείων που μπορούσαν να απέχουν μεταξύ τους πολύ μεγάλη απόσταση. Το 1876 ο Graham Bell ανακαλύπτει το τηλέφωνο και δημιουργεί έτσι την βάση για την ανάπτυξη της βιομηχανίας των τηλεπικοινωνιών. Το 1894 ο Guglielmo Marconi παρουσίασε πρώτος τις δυνατότητες του ασυρμάτου θεμελιώνοντας τον κλάδο των συστημάτων επικοινωνίας ασύρματης μετάδοσης. Το 1908 η ανακάλυψη της τριοδικής λυχνίας κενού από τον Lee DeForest είχε ως αποτέλεσμα την δυνατότητα υλοποίησης πρακτικών διατάξεων ηλεκτρονικής ενίσχυσης ανοίγοντας νέους ορίζοντες στις ασύρματες επικοινωνίες. Μια άλλη σημαντικότερη ανακάλυψη που πρακτικά έφερε την επανάσταση στην ηλεκτρονική ήταν η ανακάλυψη του transistor το 1948 από τους Shockley, Brattain και Bardeen. Οι πλέον πρόσφατες εξελίξεις στο χώρο της ηλεκτρονικής, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα, η ολοκλήρωση πολύ μεγάλης κλίμακας (very large scale integration – VLSI) και οι υπολογιστές, με τις οποίες είμαστε όλοι εξοικειωμένοι, συνετέλεσαν στην ραγδαία εξέλιξη και εξάπλωση των συστημάτων επικοινωνιών σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ανάπτυξη αυτή οδήγησε στην εκρηκτική ώθηση σύνθετων κοινωνικών και οικονομικών δραστηριοτήτων και γιγάντωσε την βιομηχανία των τηλεπικοινωνιών η οποία σήμερα αποτελεί αναπόσπαστο και ουσιώδες τμήμα της λειτουργίας της παγκόσμιας οικονομίας.

1.1 Συστήματα Επικοινωνιών

Ο σκοπός ενός συστήματος επικοινωνίας είναι η μεταφορά πληροφορίας από ένα σημείο σε κάποιο άλλο με την βοήθεια κάποιου μέσου του οποίου οι φυσικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται για την μετάδοση της πληροφορίας. Στο Σχήμα 1-1 παρουσιάζεται διαγραμματικά ένα σύστημα επικοινωνιών με τα διάφορα δομικά του στοιχεία (βαθμίδες). Προκειμένου να καταστεί εφικτή η μετάδοση της πληροφορίας

(φωνή, μουσική, εικόνα, δεδομένα υπολογιστών) το σήμα εισόδου πρέπει αρχικά να διέλθει από τον λεγόμενο **μετατροπέα εισόδου (input transducer)**. Η αποστολή του μετατροπέα εισόδου είναι η μετατροπή της ενέργειας της αρχικής μορφής της πληροφορίας σε άλλη μορφή αξιοποιήσιμη από τις επόμενες βαθμίδες του συστήματος επικοινωνίας. Ο μετατροπέας εισόδου συνήθως μετατρέπει την ενέργεια της πληροφορίας σε ηλεκτρική ενέργεια, παράγοντας στην έξοδό του μια κυματομορφή τάσης ή ρεύματος. Για παράδειγμα στην κλασσική περίπτωση μετάδοσης ομιλίας μέσω μιας τηλεφωνικής συσκευής, το διάφραγμα στο ακουστικό μετατρέπει τα ακουστικά κύματα που προκύπτουν από τις δονήσεις της φωνής σε ηλεκτρική τάση.



Σχήμα 1-1. Διαγραμματική περιγραφή ενός συστήματος επικοινωνιών.

Στη συνέχεια το ηλεκτρικό σήμα, που περιέχει το περιεχόμενο της πληροφορίας, διέρχεται δια της διατάξεως του **διαμορφωτή (modulator)**. Η λειτουργία της διαμόρφωσης είναι κεντρική στη θεωρία των επικοινωνιών. **Διαμόρφωση**

(**modulation**) είναι η διαδικασία με την οποία το σήμα της πληροφορίας υπερτίθεται σε ένα σήμα υψηλότερης συχνότητας –που ονομάζεται **φορέας (carrier)**– προκειμένου να μεταδοθεί αποτελεσματικά στο μέσο διάδοσης. Έτσι, η πληροφορία μεταδίδεται ουσιαστικά στην υψηλή συχνότητα του φορέα, η οποία και ‘μεταφέρει’ το περιεχόμενό της. Είναι βεβαίως διαισθητικά ευνόητο ότι προκειμένου να αποσπάσουμε την πληροφορία στο δέκτη (δηλαδή στο άλλο άκρο της επικοινωνιακής ζεύξης) πρέπει να λάβει χώρα η αντίστροφη διαδικασία. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται **αποδιαμόρφωση (demodulation)**. Στο σημείο αυτό μπορεί κανείς να αναρωτηθεί για την σκοπιμότητα των αντίστροφων αυτών διαδικασιών της διαμόρφωσης και αποδιαμόρφωσης. Η εξήγηση είναι ότι το εύρος ζώνης που καταλαμβάνουν τα διάφορα σήματα που μεταφέρουν ωφέλιμη πληροφορία είναι κοινό, και επομένως η ταυτόχρονη μετάδοσή τους θα ήταν αδύνατη γιατί το ένα θα παρεμβάλλε το άλλο. Επιπροσθέτως, λόγω του ότι το φάσμα που καταλαμβάνουν τα σήματα που μεταφέρουν ωφέλιμη πληροφορία αντιστοιχεί σε χαμηλές συχνότητες, είναι αδύνατη η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων εκπομπής καθόσον οι σχετικές κεραιές θα έπρεπε να έχουν τεράστιες διαστάσεις¹. Για παράδειγμα στην περίπτωση της ανθρώπινης φωνής της οποίας το τυπικό φάσμα εκτείνεται από 30Hz έως 3kHz (μήκη κύματος 10,000km και 100km, αντίστοιχα), το ελάχιστο μήκος κεραιάς θα έπρεπε να είναι της τάξεως εκατοντάδων χιλιομέτρων! Τη λύση στο πρόβλημα αυτό παρέχει η διαδικασία της διαμόρφωσης που επιτρέπει την διάδοση του χαμηλών συχνοτήτων περιεχομένου της πληροφορίας με την επιλογή κατάλληλου υψίσυχνου φορέα.

Υπάρχουν τρεις βασικές μέθοδοι με τις οποίες επιτυγχάνεται η υπέρθεση του σήματος πληροφορίας χαμηλής συχνότητας σε φορέα υψηλής συχνότητας. Έστω ότι ο υψίσυχνος φορέας περιγράφεται από την κυματομορφή τάσης:

$$(1.1) \quad v = V_p \cdot \sin(\omega \cdot t + \Phi),$$

όπου v είναι η στιγμιαία τιμή του φορέα, V_p το πλάτος της τάσης, $\omega=2\pi f$ η κυκλική συχνότητα και Φ είναι η γωνία φάσης. Μεταβάλλοντας κάθε μία από τις τρεις

¹ Προκειμένου μια κεραιά να είναι αποδοτική όσον αφορά στη μετατροπή των οδηγούμενων κυμάτων σε ακτινοβολούντα ηλεκτρομαγνητικά κύματα, θα πρέπει οι φυσικές της διαστάσεις να είναι τουλάχιστον ίσες

τελευταίες παραμέτρους, δηλαδή το πλάτος, τη συχνότητα ή τη γωνία φάσης ανάλογα με τις μεταβολές του σήματος της πληροφορίας προκύπτει και το αντίστοιχο είδος διαμόρφωσης. Έτσι εάν μεταβάλλεται το πλάτος του φορέα ώστε να ‘παρακολουθεί’ τις αλλαγές του σήματος της πληροφορίας, τότε έχουμε **διαμόρφωση κατά πλάτος (amplitude modulation – AM)**. Αντίστοιχη μεταβολή της συχνότητας ή της φάσης του φορέα έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή **διαμόρφωσης συχνότητας (frequency modulation – FM)** και **διαμόρφωσης φάσης (phase modulation – PM)**, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 1-1 παρουσιάζει το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων και τον αντιστοιχούντα διεθνή συμβολισμό.

Συχνότητα	Ονομασία	Συντομογραφία
30 – 300Hz	Extremely Low Frequency	ELF
300Hz – 3000Hz	Voice Frequency	VF
3 – 30kHz	Very Low Frequency	VLF
30 – 300kHz	Low Frequency	LF
300kHz – 3MHz	Medium Frequency	MF
3 – 30MHz	High Frequency	HF
30 – 300MHz	Very High Frequency	VHF
300MHz – 3GHz	Ultra High Frequency	UHF
3 – 30GHz	Super High Frequency	SHF
30 – 300GHz	Extremely High Frequency	EHF

Πίνακας 1-1. Το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων.

Μετά την περάτωση της διαδικασίας της διαμόρφωσης, το σήμα ενισχύεται και υφίσταται περαιτέρω επεξεργασία (όπως λόγου χάρη κατάλληλη κωδικοποίηση) πριν εγκαταλείψει τον πομπό για να μεταδοθεί στο **μέσο διάδοσης (transmitting medium)**. Η διάδοση μπορεί να λάβει χώρα είτε ασύρματα στον ελεύθερο χώρο με τη χρήση κεραιών, είτε ενσύρματα εντός κυματοδηγούμενων μέσων, όπως γραμμές μεταφοράς, κυματοδηγοί μικροκυμάτων ή οπτικές ίνες. Ανάλογα με το μέσο διάδοσης διαχωρίζουμε τις επικοινωνίες σε **ασύρματες (wireless)** και **ενσύρματες (wireline) επικοινωνίες (communications)**. Το μεταδοθέν σήμα λαμβάνεται από την μονάδα του συστήματος που ονομάζεται **δέκτης (receiver)**. Η αποστολή του δέκτη είναι να αποκαταστήσει το ληφθέν σήμα έτσι ώστε να καταστεί δυνατή η κατ’

προς το 1/10 του μήκους κύματος της ακτινοβολίας.

αρχήν ανίχνευσή του (αποδιαμόρφωση) και η περαιτέρω επεξεργασία (π.χ. αποκωδικοποίηση) που θα οδηγήσει στην πλήρη ανάκτηση του αρχικού περιεχομένου του σήματος της πληροφορίας. Τέλος, το ανακτημένο σήμα που περιέχει την αρχική πληροφορία ενισχύεται (αν είναι απαραίτητο) και προωθείται στον **μετατροπέα εξόδου (output transducer)**, ο οποίος συντελεί την αντίστροφη διαδικασία από αυτή του μετατροπέα εισόδου.

Υπάρχουν δύο βασικοί περιοριστικοί παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση ενός συστήματος επικοινωνίας: ο **ηλεκτρικός θόρυβος (electrical noise)** και το **εύρος ζώνης (bandwidth)** το οποίο καταλαμβάνει το μεταδιδόμενο σήμα. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν αντικείμενο διαπραγματεύσεως των επομένων παραγράφων.

1.2 Ηλεκτρικός Θόρυβος

Ως ηλεκτρικός θόρυβος ορίζεται κάθε ανεπιθύμητη στάθμη τάσης ή ρεύματος που εμφανίζεται στην έξοδο του δέκτη. Ο στάθμη του σήματος του θορύβου στο σημείο που αυτός δημιουργείται είναι γενικά πολύ μικρή, και συνήθως της τάξεως των λίγων μικροβόλτ (μV). Είναι επομένως εύλογο το ερώτημα πως σήματα θορύβου τόσο μικρής στάθμης μπορούν να δημιουργήσουν σοβαρά προβλήματα στη λειτουργία ενός δέκτη. Ένας δέκτης όμως είναι μια πολύ ευαίσθητη διάταξη που λαμβάνει σήματα εξίσου πολύ μικρής στάθμης τα οποία και ενισχύει πριν οδηγηθούν στην έξοδό του. Για παράδειγμα η πρώτη βαθμίδα εισόδου ενός τυπικού δέκτη FM (ραδιόφωνο) δέχεται συχνά σήματα στάθμης μικρότερης των $10\mu\text{V}$.

1.2.1 Εξωτερικός θόρυβος

Εάν ο θόρυβος που εμφανίζεται στο δέκτη οφείλεται σε εξωγενείς παράγοντες, δηλαδή προσκτάται κατά την διάδοση του σήματος στο μέσο διάδοσης, ονομάζεται **εξωτερικός θόρυβος (external noise)**. Πηγές εξωτερικού θορύβου αποτελούν η ανθρώπινη δραστηριότητα, η ατμόσφαιρα και το διάστημα.

1.2.1.1 Ανθρωπογενής θόρυβος

Η πλέον επιβαρυντική συνιστώσα εξωτερικού θορύβου οφείλεται στη λεγόμενη ανθρώπινη δραστηριότητα. Ο θόρυβος αυτός ονομάζεται **ανθρωπογενής θόρυβος (man-made noise)**. Με τον όρο ανθρώπινη δραστηριότητα εννοούμε όλους τους μηχανισμούς που δημιουργούν σπινθήρες και εν γένει έντονα ηλεκτρικά μεταβατικά φαινόμενα, όπως η ανάφλεξη κινητήρων, λαμπτήρες φθορισμού και διακοπτικές λειτουργίες (εκκίνηση και παύση) σε ηλεκτρικούς κινητήρες. Ο ανθρωπογενής θόρυβος ακτινοβολείται από τις πηγές παραγωγής του δια μέσου της ατμόσφαιρας ακριβώς με τον ίδιο τρόπο που μια κεραία ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο θόρυβος αυτός έχει τυχαίο συχνοτικό περιεχόμενο και είναι ιδιαίτερα εμφανής σε συχνότητες μέχρι περίπου 500MHz. Άλλη σημαντική πηγή παραγωγής ανθρωπογενούς θορύβου αποτελούν οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2.1.2 Ατμοσφαιρικός θόρυβος

Ο **ατμοσφαιρικός θόρυβος (atmospheric noise)** προκαλείται από διάφορα ηλεκτρικής φύσεως φυσικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στην γήινη ατμόσφαιρα. Οι κεραυνοί αποτελούν την κυριότερη αιτία παραγωγής του ατμοσφαιρικού θορύβου. Γίνεται άμεσα αντιληπτός κατά την ακρόαση προγράμματος σταθμού μεσαίων κυμάτων όταν εκδηλώνονται κεραυνοί κοντά στην περιοχή που ευρίσκεται ο δέκτης. Το συχνοτικό περιεχόμενο του ατμοσφαιρικού θορύβου εκτείνεται σε όλο το φάσμα συχνοτήτων αλλά το πλάτος κάθε συνιστώσας είναι αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας. Έτσι για συχνότητες μεγαλύτερες των 20MHz ο ατμοσφαιρικός θόρυβος εξασθενεί σημαντικά και δεν αποτελεί σημαντικό παράγοντα υποβάθμισης επικοινωνιακών συστημάτων.

1.2.1.3 Διαστημικός θόρυβος

Το όρισμα του **διαστημικού θορύβου (space noise)** είναι η ακτινοβολία των αναρίθμητων άστρων του διαστήματος. Διακρίνεται σε **ηλιακό θόρυβο (solar noise)** και **κοσμικό θόρυβο (cosmic noise)**. Ο ηλιακός θόρυβος είναι περιοδικής εντάσεως και φθάνει στο μέγιστό της κάθε έντεκα χρόνια (ηλιακός κύκλος). Ο κοσμικός θόρυβος οφείλεται στην ακτινοβολία όλων των υπολοίπων άστρων που αν και κατά περίπτωση είναι σχεδόν αμελητέα, λόγω του μεγάλου πλήθους των δημιουργούν

αθροιστικά μια μικρή, αναγνωρίσιμη δε συνιστώσα θορύβου. Ο διαστημικός θόρυβος περιέχει συχνοτικές συνιστώσες από 8MHz έως 1.5GHz. Αξιζει να σημειωθεί ότι αν και περιέχει συνιστώσες μικρότερες από τα 8MHz, οι συχνότητες αυτές απορροφώνται από την Ιονόσφαιρα και δε φθάνουν τελικά στην επιφάνεια του πλανήτη μας. Η Ιονόσφαιρα είναι η περιοχή της ατμόσφαιρας που εκτείνεται περίπου από 100km έως 1000km στην οποία συνυπάρχουν ελεύθερα ιόντα και ηλεκτρόνια σε τέτοιες συγκεντρώσεις που είναι ικανές να επηρεάσουν την διάδοση ραδιοκυμάτων για συχνότητες μέχρι περίπου τα 30MHz.

1.2.2 Εσωτερικός θόρυβος

Στην περίπτωση που ο θόρυβος προκαλείται από τις βαθμίδες του ιδίου του δέκτη ονομάζεται **εσωτερικός θόρυβος (internal noise)**. Επομένως, στο θόρυβο που έχει ήδη αναπτυχθεί κατά την διαδρομή στο μέσο διάδοσης (εξωτερικός θόρυβος), προστίθεται ακόμη μια συνιστώσα θορύβου πριν το σήμα φθάσει στην έξοδό του.



Σχήμα 1-2. Διάδοση θορύβου στις πρώτες δύο ενισχυτικές βαθμίδες ενός δέκτη.

Η πρώτη βαθμίδα του δέκτη είναι αυτή που συνεισφέρει σημαντικά στο επίπεδο της στάθμης του εσωτερικού θορύβου, διότι στη βαθμίδα αυτή το ωφέλιμο σήμα ευρίσκεται στην ελάχιστη στάθμη του. Παρά το γεγονός ότι όλες οι ακόλουθες βαθμίδες του δέκτη εισαγάγουν θόρυβο, οι συνεισφορές τους είναι συνήθως αμελητέες σε σχέση με το θόρυβο που εισάγεται από την πρώτη βαθμίδα. Στο

Σχήμα 1-2 παρουσιάζεται η διάδοση του εξωτερικού και εσωτερικού θορύβου στις πρώτες δύο βαθμίδες ενός δέκτη. Για το λόγο αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό να σχεδιάζεται με ιδιαίτερη προσοχή και με το κατά δυνατόν καλύτερα χαρακτηριστικά θορύβου η πρώτη βαθμίδα κάθε δέκτη ενός συστήματος επικοινωνίας.

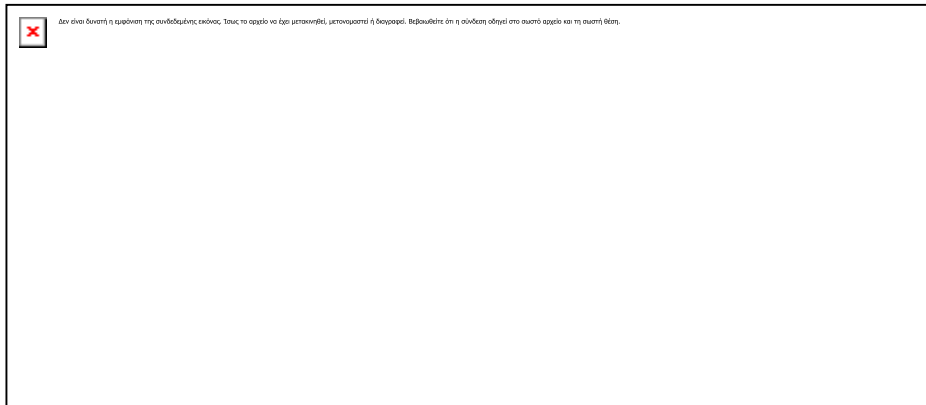
1.2.2.1 Θερμικός θόρυβος

Υπάρχουν δύο βασικά είδη θορύβου που δημιουργούνται στα ηλεκτρονικά εξαρτήματα. Το πρώτο είδος οφείλεται στη θερμική αλληλεπίδραση μεταξύ ελεύθερων ηλεκτρονίων και παλλομένων ιόντων εντός ενός αγωγού. Η θερμική αλληλεπίδραση προκαλεί την τυχαία μεταβολή του ρυθμού άφιξης των ηλεκτρονίων σε κάθε άκρο του ηλεκτρονικού στοιχείου δημιουργώντας έτσι μια διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο άκρων. Λόγω της εξάρτησης του είδους του θορύβου αυτού από την θερμοκρασία, ο θόρυβος αυτός ονομάζεται **θερμικός (thermal noise)**. Μελετήθηκε δε συστηματικά από τον J B Johnson στα 1928 και πολλές φορές ονομάζεται επίσης και **θόρυβος Johnson**. Το συχνοτικό του περιεχόμενο εκτείνεται ισομερώς σε όλο το φάσμα ραδιοσυχνοτήτων και για το λόγο αυτό αποκαλείται και **λευκός θόρυβος² (white noise)**. Σύμφωνα με τον Johnson η ισχύς P_n του θορύβου που αναπτύσσεται στα άκρα μιας ωμικής αντίστασης δίδεται από την εξίσωση:

$$(1.2) \quad P_n = k \cdot T \cdot \Delta f ,$$

όπου $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ είναι η σταθερά του Boltzmann, T η θερμοκρασία της αντίστασης σε Kelvin και Δf το εύρος ζώνης εντός του οποίου θεωρείται η λειτουργία της αντίστασης σε Hz. Αξιοσημείωτο είναι ότι η ισχύς θορύβου είναι ευθέως ανάλογη του εύρους ζώνης εντός του οποίου πραγματοποιείται η μέτρησή της. Η εξήγηση για αυτό είναι ότι ο θόρυβος είναι ουσιαστικά μια τάση που μπορεί να περιγραφεί στατιστικά από μια τυχαία μεταβλητή με γνωστή μέση m τιμή, αλλά μη προβλέψιμη στιγμιαία τιμή πλάτους και συχνότητα. Έτσι όσο περισσότερες συχνότητες (δηλαδή μεγαλύτερο εύρος ζώνης) λαμβάνονται υπόψη στη μέτρηση της τάσεως θορύβου, τόσο αυξάνει η τιμή της.

Ανακαλώντας ότι η ισχύς P που καταναλίσκεται σε μια ωμική αντίσταση R συνδέεται με την τάση E που εμφανίζεται στα άκρα της δια μέσου της σχέσης $P=E^2/R$, καθίσταται δυνατός ο υπολογισμός της *rms* τιμής της τάσεως θορύβου e_n που δημιουργείται από δεδομένη ωμική αντίσταση. Στο Σχήμα 1-3 παρουσιάζεται το ηλεκτρικό ανάλογο της διαδικασίας παραγωγής θερμικού θορύβου σε μια ωμική αντίσταση.



Σχήμα 1-3. Ηλεκτρικό ανάλογο της διαδικασίας παραγωγής θερμικού θορύβου σε ωμική αντίσταση.

Ο θερμικός θόρυβος εντός της αντιστάσεως φορτίου R_L παράγεται από μια πηγή τάσης πλάτους e_n και εσωτερικής αντίστασης R . Ο θόρυβος λαμβάνει την μέγιστη τιμή στην αντίσταση φορτίου όταν $R=R_L$, σύμφωνα με το γνωστό από τη θεωρία ανάλυσης κυκλωμάτων θεώρημα μέγιστης μεταφοράς ισχύος. Στην περίπτωση αυτή έχουμε:

$$(1.3) \quad P_n = \frac{(e_n/2)^2}{R} = kT \cdot \Delta f,$$

και λύνοντας ως προς την τάση θορύβου:

$$(1.4) \quad e_n = \sqrt{4kT \cdot \Delta f \cdot R}.$$

Η στιγμιαία τιμή της τάσεως θορύβου δεν είναι προβλέψιμη αλλά γενικά λαμβάνει μέγιστες τιμές που δεν ξεπερνούν το ένα δέκατο της ενεργού τάσης που προσδιορίζεται από την Εξίσωση (1.4). Ο θερμικός θόρυβος που εμφανίζεται σε

² Η ονομασία λευκός θόρυβος προέρχεται από την Οπτική, όπου το λευκό φως περιέχει όλες τις οπτικές συχνότητες ή χρώματα.

πηνία ή πυκνωτές ή γενικά σε οποιοδήποτε ηλεκτρονικό στοιχείο οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στην ωμική συνιστώσα της εμπέδησής των. Η Εξίσωση (1.4) ισχύει για αντιστάσεις περιτυλιγμένου σιδήρου (copper wire-wound resistor), ενώ για όλους τους άλλους τύπους αντιστάσεων η τάση θορύβου είναι ελαφρώς μεγαλύτερη. Αντιστάσεις διαφορετικού τύπου αλλά της ίδιας ωμικής αντίστασης παρουσιάζουν διαφορετικές ιδιότητες αναφορικά στο θόρυβο. Οι απλές, φθηνές και ευρύτατα διαδεδομένες αντιστάσεις άνθρακα έχουν δυστυχώς την χειρότερη απόδοση όσον αφορά στο θόρυβο. Οι αντιστάσεις μεταλλικού στρώματος (metal film resistor) παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά θορύβου, έχουν καλό λόγο αξίας προς απόδοση και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε όλες τις εφαρμογές πλην αυτών που προορίζονται για την υλοποίηση κυκλωμάτων εξαιρετικά χαμηλής στάθμης θορύβου. Την καλύτερη απόδοση (δηλαδή τον λιγότερο δυνατό θόρυβο) έχουν όπως ήδη είπαμε οι αντιστάσεις περιτυλιγμένου σιδήρου, οι οποίες όμως εκτός από ακριβές είναι και ιδιαίτερα ευμεγέθεις. Εν τούτοις, η Εξίσωση (1.4) χρησιμοποιείται συνήθως για τον προσδιορισμό της τάσεως θορύβου για όλους τους προαναφερθέντες τύπους αντιστάσεων.

1.2.2.2 Ημιαγωγικός θόρυβος

Η κύρια συνιστώσα συνεισφοράς στον ημιαγωγικό θόρυβο ονομάζεται **θόρυβος βολής (shot noise)**. Ο θόρυβος βολής οφείλεται στην διακριτή φύση των φορέων ηλεκτρικού ρεύματος σε κάθε είδος ημιαγωγού. Οι φορείς αυτοί, ακόμα και στην περίπτωση διέλευσης συνεχούς (dc) ρεύματος δεν μετακινούνται ακριβώς με τον ίδιο τρόπο ώστε να σχηματίζεται μια σταθερή ροή διότι διατρέχουν τυχαίους και διαφορετικούς δρόμους. Η σχέση (1.5) δίνει σε A την ms τιμή του ρεύματος θορύβου βολής i_n που αναπτύσσεται στα άκρα μιας διόδου ή επαφής $p-n$:

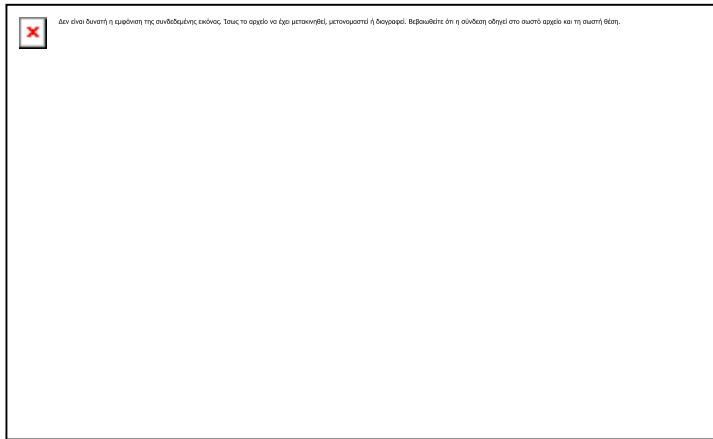
$$(1.5) \quad i_n = \sqrt{2q \cdot I_{dc} \cdot \Delta f},$$

όπου $q=1.6 \times 10^{-19}C$ είναι το φορτίο του ηλεκτρονίου, I_{dc} το πλάτος του συνεχούς ρεύματος πόλωσης (bias current) σε A , και Δf το σχετικό εύρος ζώνης σε Hz . Δυστυχώς δεν υπάρχει κατάλληλος μαθηματικός τύπος για να υπολογίσουμε την τιμή του συνολικού ρεύματος θορύβου βολής ενός τρανζίστορ για το οποίο οι πηγές του θορύβου βολής είναι οι συνιστώσες των ρευμάτων στις διόδους του εκπομπού-βάσης

(emitter-base) και συλλέκτη-βάσης (collector-base). Έτσι, εάν είναι επιθυμητή η εκτίμηση της συμπεριφοράς ενός τρανζίστορ αναφορικά στο θόρυβο, θα πρέπει κανείς να ανατρέξει στα φυλλάδια προδιαγραφών του κατασκευαστή. Ο θόρυβος βολής στα τρανζίστορ γενικά αυξάνεται αναλογικά με το συνεχές ρεύμα πόλωσης εκτός της περίπτωσης των MOSFETS, όπου εκεί φαίνεται να είναι σχετικά ανεξάρτητος της στάθμης ρεύματος dc.

Μια άλλη συνιστώσα που συνεισφέρει στον ημιαγωγικό θόρυβο είναι ο **θόρυβος χρόνου διέλευσης (transit-time noise)**. Ο χρόνος διέλευσης είναι ο χρόνος που χρειάζεται ένας φορέας ρεύματος (ηλεκτρόνιο ή οπή) για να διασχίσει την επαφή p-n. Όταν ο χρόνος διέλευσης των φορέων καταστεί συγκρίσιμος με αυτόν της περιόδου του σήματος, (αυτό λαμβάνει χώρα σε υψηλές συχνότητες λειτουργίας) κάποιοι από τους φορείς διαχέονται προς την αντίστροφη κατεύθυνση δηλαδή επιστρέφουν προς τον εκπομπό. Στην ουσία ο θόρυβος χρόνου διέλευσης αποτελεί τον κύριο περιοριστικό παράγοντα στις υψηλές συχνότητες καθορίζοντας το άνω όριο της συχνότητας λειτουργίας των ημιαγωγών.

Τέλος, στις πολύ χαμηλές συχνότητες η απόδοση των ημιαγωγών περιορίζεται από τον λεγόμενο **περίσσιο θόρυβο (excess noise)**. Ο περίσσιος θόρυβος είναι ευθέως ανάλογος της θερμοκρασίας και του dc ρεύματος πόλωσης και αντιστρόφως ανάλογος της συχνότητας. Για τούτο το λόγο πολλές φορές αποκαλείται και **θόρυβος $1/f$** . Ο περίσσιος θόρυβος είναι σημαντικός για συχνότητες μικρότερες του 1kHz και θεωρείται ότι οφείλεται στις ατέλειες των κρυσταλλικών επιφανειών των ημιαγωγών οι οποίες μεταβάλλονται με ρυθμό αντιστρόφως ανάλογο της συχνότητας.



Σχήμα 1-4. Γραφική παράσταση του θορύβου ως συνάρτηση της συχνότητας σε ημιαγωγό.

Ο περίσσιος θόρυβος απαντάται τόσο στα τρανζίστορ διπολικής ενώσεως (Bipolar Junction Transistor – BJT) όσο και στα τρανζίστορ πεδίου (Field Effect Transistor – FET). Είναι δε επίσης γνωστός και με την ονομασία ροζ θόρυβος (pink noise). Το Σχήμα 1-4 παρουσιάζει μια τυπική καμπύλη θορύβου για ένα ημιαγωγικό στοιχείο.

1.3 Πρακτικός Χειρισμός του Θορύβου σε Διατάξεις Δεικτών

1.3.1 Λόγος σήματος-προς-θόρυβο

Προκειμένου να αναλύσουμε τις επιπτώσεις του θορύβου στα ηλεκτρικά κυκλώματα και γενικά σε πρακτικές διατάξεις δεικτών, ορίζουμε τον λόγο του σήματος προς το θόρυβο. Ο λόγος σήματος προς θόρυβο S/N (signal-to-noise ratio) εκφράζει το πηλίκιο της ισχύος του ωφελίμου σήματος P_S προς την ισχύ του ανεπιθύμητου θορύβου P_N . Συνήθως εκφράζεται σε decibels, δηλαδή ως λογαριθμικός λόγος:

$$(1.6) \quad \frac{S}{N} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{P_S}{P_N} \right).$$

1.3.2 Παράγοντας θορύβου

Ο λόγος του σήματος προς τον θόρυβο S/N εκφράζει την συσχέτιση του σήματος προς το θόρυβο σε κάποιο συγκεκριμένο σημείο ενός κυκλώματος ή βαθμίδα ενός

δέκτη. Για να εκτιμηθεί όμως η συνεισφορά ενός μεμονωμένου ηλεκτρονικού στοιχείου ή μιας συγκεκριμένης βαθμίδας ενός δέκτη στο συνολικό ισοζύγιο θορύβου απαιτείται ο ορισμός του παράγοντα θορύβου NF . Ο **παράγοντας θορύβου (noise figure)** ορίζεται από τη σχέση:

$$(1.7) \quad NF[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S_i / N_i}{S_o / N_o} \right) = 10 \cdot \log_{10} (NR),$$

όπου S_i/N_i και S_o/N_o είναι ο λόγος σήματος προς θόρυβο στην είσοδο και έξοδο του ηλεκτρονικού στοιχείου ή της βαθμίδας, αντίστοιχα, και το πηλίκο $NR = (S_i/N_i)/(S_o/N_o)$ ονομάζεται **λόγος θορύβου (noise ratio)**. Ένα ιδανικό ηλεκτρονικό στοιχείο ή βαθμίδα δέκτη δεν εισάγει επιπλέον θόρυβο, δηλαδή για την περίπτωση αυτή $S_i/N_i = S_o/N_o$, $NR=1$ και $NF=0dB$. Στο Σχήμα 1-5 παρουσιάζεται ο παράγοντας θορύβου ενός τρανζίστορ ως συνάρτηση της συχνότητας.



Σχήμα 1-5. Γραφική παράσταση του παράγοντα θορύβου ως συνάρτηση της συχνότητας για το τρανζίστορ 2N4957 της Motorola.

Οι εταιρείες που κατασκευάζουν ηλεκτρονικά εξαρτήματα χαμηλού θορύβου δίδουν συνήθως μια ευρεία γκάμα γραφικών παραστάσεων προκειμένου να περιγράψουν τη συμπεριφορά των προϊόντων τους κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας.

Σχήμα 1-6. Παραμετρική παράσταση του παράγοντα θορύβου ως συνάρτηση της

αντίστασης εκπομπού και του ρεύματος πόλωσης συλλέκτη για το τρανζίστορ 2N4957 της Motorola.

Μια τέτοια γραφική παράσταση για το 2N4957 τρανζίστορ δίδεται στο Σχήμα 1-6, όπου παρουσιάζεται παραμετρικά ο παράγοντας θορύβου ως συνάρτηση της αντίστασης εκπομπού και του συνεχούς ρεύματος συλλέκτη (ρεύμα πόλωσης) στη συχνότητα των 105MHz.

1.3.3 Συνδυασμοί ωμικών αντιστάσεων

Το φαινόμενο του θορύβου σε περισσότερες από μία ωμικές αντιστάσεις μπορεί να καθοριστεί κάνοντας χρήση της αρχής της ισοδύναμης αντίστασης. Έτσι οι Εξισώσεις (1.2) και (1.4) μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με την προϋπόθεση ότι στην Εξίσωση (1.4) η τιμή της αντιστάσεως αναφέρεται στην ισοδύναμη αντίσταση της συνδεσμολογίας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι ανεξάρτητα από τον αριθμό και την συνδεσμολογία των αντιστάσεων, η ισχύς του θορύβου εξαρτάται μόνο από το θεωρούμενο εύρος ζώνης και την απόλυτη θερμοκρασία.

1.3.4 Θόρυβος σε κυκλώματα με πηνία και πυκνωτές

Ο θόρυβος που εισάγεται από πηνία και πυκνωτές σε διάφορα ηλεκτρονικά κυκλώματα προέρχεται κατά κύριο λόγο από την μικρή αλλά όχι και αμελητέα ωμική συνιστώσα των στοιχείων αυτών. Ο θόρυβος αυτός όμως έχει αμελητέα συνεισφορά στο συνολικό ισοζύγιο θορύβου σε σχέση με τις συνεισφορές που

οφείλονται σε ημιαγωγούς και καθαρές ωμικές αντιστάσεις. Το σημαντικό με κυκλώματα που περιέχουν LC στοιχεία είναι ότι καθορίζουν το εύρος ζώνης εντός του οποίου πρέπει να γίνει ο υπολογισμός της ισχύος του θορύβου. Το ισοδύναμο εύρος ζώνης Δf_{eq} που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί σε υπολογισμούς θορύβου δίδεται από την σχέση:

$$(1.8) \quad \Delta f_{eq} = \frac{\pi}{2} BW,$$

όπου για την περίπτωση ενός ζωνοδιαβατού φίλτρου BW είναι το εύρος ζώνης που ορίζεται από τη διαφορά των συχνοτήτων f_{hc} και f_{lc} που αντιστοιχούν στα σημεία που η τάση εξόδου φθάνει στο 70.7% της μέγιστης τιμής της. Παρατηρώντας τη σχέση (1.8) διαπιστώνουμε ότι το ισοδύναμο εύρος ζώνης 'θορύβου' είναι μεγαλύτερο από το εύρος ζώνης ημίσεως τάσεως.

1.3.5 Θόρυβος σε δέκτη με πολλές βαθμίδες

Έχουμε ήδη τονίσει ότι η πρώτη βαθμίδα σε μια διάταξη λήψης παίζει αποφασιστικό ρόλο όσον αφορά την επίδοση του συστήματος στο θόρυβο. Για ένα δέκτη που αποτελείται από n βαθμίδες ο συνολικός λόγος θορύβου NR δίδεται από τον τύπο:

$$(1.9) \quad NR = NR_1 + \frac{NR_2 - 1}{G_1} + \frac{NR_3 - 1}{G_1 \times G_2} + \dots + \frac{NR_{n-1}}{G_1 \times G_2 \times \dots \times G_{n-1}},$$

όπου NR_j και G_j είναι ο λόγος θορύβου και το κέρδος ισχύος της j -οστής βαθμίδας, αντίστοιχα.

1.3.6 Ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου

Ένας εναλλακτικός τρόπος για την ανάλυση του θορύβου σε ασύρματους δέκτες και για συχνότητες μεγαλύτερες του 1GHz είναι με την εισαγωγή του ορισμού της **ισοδύναμης θερμοκρασίας θορύβου (equivalent noise temperature)**. Η τεχνική αυτή επιτρέπει τον εύκολο υπολογισμό της ισχύος του θορύβου στο δέκτη μέσω της εξίσωσης (1.2), καθόσον η ολική ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους θερμοκρασιών θορύβου τόσο της μικροματικής κεραίας

όσο και των διατάξεων που ακολουθούν. Η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου T_{eq} σχετίζεται με το λόγο θορύβου NR σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$(1.10) \quad T_{eq} = T_0 \cdot (NR - 1),$$

όπου $T_0=290K$ είναι μια κατά σύμβαση θερμοκρασία αναφοράς. Θα πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου δεν αποτελεί μια φυσική ποσότητα που μπορεί να μετρηθεί, αλλά χρησιμοποιείται γιατί διευκολύνει σημαντικά στην ανάλυση δεικτών που λειτουργούν σε μικροκυματικές συχνότητες.

1.3.7 Ισοδύναμη αντίσταση θορύβου

Σε πολλές περιπτώσεις οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν την έννοια της **ισοδύναμης αντίστασης θορύβου** R_{eq} (**equivalent noise resistance**) για να χαρακτηρίσουν το θόρυβο που παράγεται από ηλεκτρονικά στοιχεία, κυκλώματα ή διατάξεις. Η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου ορίζεται ως η αντίσταση που αντιστοιχεί στην ισχύ θορύβου P_n που παράγει το ηλεκτρονικό στοιχείο, κύκλωμα ή διάταξη σύμφωνα με την σχέση (1.4).

1.3.8 Μέτρηση θορύβου

Η μέτρηση θορύβου είναι μια δύσκολη διαδικασία. Τα τελευταία όμως χρόνια με την εξέλιξη των μικροϋπολογιστών κατέστη δυνατή η κατασκευή οργάνων μέτρησης μεγάλης ακρίβειας κι αξιοπιστίας. Μια γενική μεθοδολογία μέτρησης του θορύβου που εισέρχεται σε ένα σύστημα είναι ο εξής. Χωρίς να εφαρμόσουμε καμιά είσοδο τοποθετούμε σε κάποιο βολικό σημείο του συστήματος ένα μετρητή ισχύος και καταγράφουμε την ένδειξη. Στη συνέχεια εφαρμόζουμε ένα σήμα εισόδου και αυξάνουμε την ισχύ του έως ότου η ένδειξη της ισχύος στο μετρητή διπλασιαστεί. Στο σημείο αυτό καταγράφουμε την ισχύ του σήματος εισόδου, η οποία αντιστοιχεί στη στάθμη θορύβου που εισέρχεται στο σύστημά μας.

Μια άλλη μεθοδολογία μέτρησης του θορύβου είναι με την παραγωγή γνωστής στάθμης θορύβου από μια δίοδο, όπως προβλέπεται από την Εξίσωση (1.5). Με τη μέθοδο αυτή η σύνθετη αντίσταση εξόδου του κυκλώματος παραγωγής θορύβου της

διόδου προσαρμόζεται στον ενισχυτή του οποίου τα χαρακτηριστικά θορύβου πρέπει να καθοριστούν. Η διαδικασία μέτρησης περιλαμβάνει μια αρχική μέτρηση στην έξοδο του ενισχυτή όταν το dc ρεύμα πόλωσης της διόδου είναι μηδενικό. Στη συνέχεια το dc ρεύμα πόλωσης αυξάνεται μέχρις ότου η ισχύς εξόδου διπλασιαστεί σε σχέση με την αρχική. Στο σημείο αυτό η τιμή του dc ρεύματος καταγράφεται και ο λόγος θορύβου του ενισχυτή μπορεί να καθοριστεί πολύ απλά από τη σχέση:

$$(1.11) \quad NR = 20 \cdot I_{dc} \cdot R,$$

όπου R είναι η σύνθετη αντίσταση εισόδου. Η παραπάνω τεχνική προϋποθέτει ότι η θερμοκρασία στην οποία λαμβάνονται όλες οι μετρήσεις είναι 290K.

1.4 Εύρος Ζώνης και Πληροφορία

Στην ενότητα 1.1 αναφέρθηκε ότι υπάρχουν δύο σημαντικοί παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση ενός επικοινωνιακού συστήματος. Εάν το επίπεδο θορύβου είναι ανεπίτρεπτα υψηλό, δηλαδή ο λόγος S/N λάβει μη αποδεκτή τιμή, τότε μέρος της πληροφορίας που περιέχεται στο ωφέλιμο σήμα χάνεται. Ο δεύτερος σημαντικός περιοριστικός παράγοντας είναι το εύρος ζώνης που διατίθεται για την μετάδοση της πληροφορίας. Γενικά, όσο περισσότερο εύρος ζώνης είναι διαθέσιμο, τόσο περισσότερη είναι η ποσότητα της πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί από τον πομπό στο δέκτη. Η μελέτη της μετάδοσης πληροφορίας στις επικοινωνίες αποτελεί αντικείμενο της **Θεωρίας Πληροφοριών (Information Theory)**. Το 1928 ο ερευνητής R. Hartley των φημισμένων Bell Laboratories συνέδεσε την μεταδιδόμενη πληροφορία με το εύρος ζώνης. Σύμφωνα με το νόμο του Hartley, η πληροφορία I είναι ανάλογη του γινομένου του διαθέσιμου εύρους ζώνης B στο κανάλι επικοινωνίας και του χρόνου T κατά τη διάρκεια του οποίου λαμβάνει χώρα η μετάδοση, δηλαδή $I \propto B \times T$.

Οι συνδυασμένες επιδράσεις του θορύβου και του πεπερασμένου εύρους ζώνης B στο ρυθμό μετάδοσης της πληροφορίας C (ή χωρητικότητα) διέπονται από μια διάσημη πλέον σχέση που διατυπώθηκε για πρώτη φορά το 1948 και είναι γνωστή ως το **όριο**

χωρητικότητας του Shannon (Shannon's capacity limit). Η μαθηματική διατύπωση της σχέσης αυτής είναι:

$$(1.12) \quad C = B \cdot \left[1 + \log_2 \left(\frac{S}{N} \right) \right],$$

όπου C (bits/second) είναι το όριο χωρητικότητας του Shannon, B (Hz) το διαθέσιμο εύρος ζώνης και S/N ο λόγος του σήματος προς θόρυβο στο θεωρούμενο κανάλι επικοινωνίας. Η σχέση αυτή δηλώνει ότι εάν ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας που απαιτείται είναι μικρότερος από το όριο χωρητικότητας C του Shannon, τότε είναι δυνατή η πραγματοποίηση μετάδοσης απαλλαγμένη από σφάλματα. Εάν ο ρυθμός μεταφοράς πληροφορίας είναι μεγαλύτερος από C , τότε θα υπάρχουν οπωσδήποτε σφάλματα κατά τη διάρκεια της μετάδοσης, όσο καλά κι αν έχουν σχεδιαστεί ο πομπός και ο δέκτης.

1.5 Φάσμα Κυματομορφών και Ανάλυση Fourier

Είναι φανερό ότι το εύρος ζώνης παίζει καθοριστικό ρόλο στη σχεδίαση συστημάτων επικοινωνίας. Επομένως, για να μπορέσουμε να αναλύσουμε και να σχεδιάσουμε διάφορα συστήματα επικοινωνιών είναι απαραίτητο να είμαστε σε θέση να εκτιμήσουμε το συχνοτικό περιεχόμενο διαφόρων ειδών χρονικά μεταβαλλόμενων σημάτων.

1.5.1 Ανάλυση περιοδικών κυματομορφών

Οι σειρές Fourier μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αναπαράσταση κάθε σήματος που είναι περιοδικά μεταβαλλόμενο στο πεδίο του χρόνου ως ένα άθροισμα συχνοτικά σχετιζόμενων ημιτονοειδών ή συνημιτονοειδών κυμάτων. Έτσι, ένα περιοδικό στο πεδίο του χρόνου σήμα $x(t)$ με περίοδο T , μπορεί να γραφεί ισοδύναμα ως τριγωνομετρικό ανάπτυγμα, με την ακόλουθη μορφή:

$$(1.13) \quad x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(2\pi n f_0 t) + b_n \cdot \sin(2\pi n f_0 t)],$$

όπου $f_0 = \frac{1}{T}$ και οι όροι a_0 , a_n και b_n δίδονται από τις σχέσεις:

$$(1.14) \quad a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot dt ,$$

και

$$(1.15) \quad a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(2\pi n f_0 t) \cdot dt ,$$

$$(1.16) \quad b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \sin(2\pi n f_0 t) \cdot dt ,$$

ή ως μιγαδικό εκθετικό ανάπτυγμα με την ακόλουθη μορφή:

$$(1.17) \quad x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n \cdot e^{j2\pi n f_0 t} .$$

Το μιγαδικό πλάτος c_n που δίδεται από τη σχέση:

$$(1.18) \quad c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cdot e^{j2\pi n f_0 t} dt ,$$

σχετίζεται με τους συντελεστές a_n και b_n δια μέσου της σχέσης:

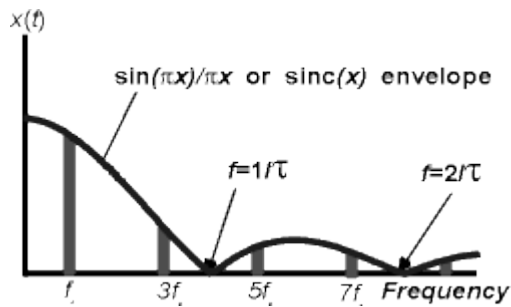
$$(1.19) \quad c_n \equiv a_n - j b_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \cdot e^{j\theta_n} .$$

Η γωνία θ_n σχετίζεται με τους συντελεστές a_n και b_n δια μέσου της σχέσης:

$$(1.20) \quad \theta_n = \tan^{-1} \left(-\frac{b_n}{a_n} \right) .$$

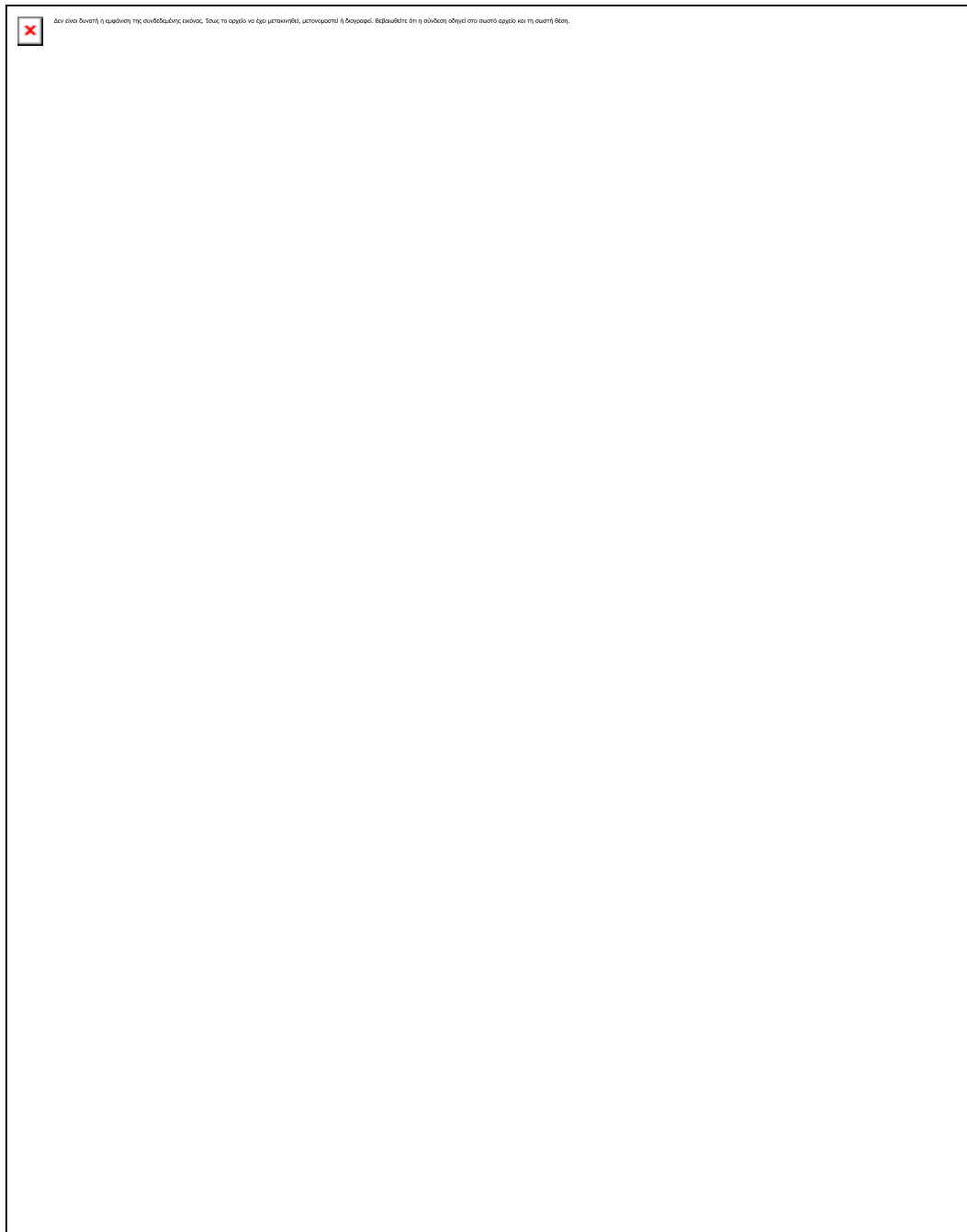
1.5.2 Το πεδίο της συχνότητας

Η αναπαράσταση ενός σήματος στο πεδίο του χρόνου με ένα άθροισμα ημιτονικών ή/και συνημιτονικών όρων αναφέρεται συνήθως ως το **φάσμα (spectrum)** του σήματος. Το φάσμα μιας κυματομορφής αποτελείται από δύο γραφικές παραστάσεις, οι οποίες αφορούν στο πλάτος και στη φάση των συχνοτικών συνιστωσών, αντίστοιχα.



Σχήμα 1-7. Τυπικό διάγραμμα για το φάσμα πλάτους σειράς παλμών. Σχεδιασμένη επίσης είναι και η περιβάλλουσα συνάρτηση $\text{sinc}(\pi t/T)$ των πλατών των συχνοτικών συνιστωσών.

Έτσι, τα διαγράμματα του φάσματος πλάτους και φάσης προκύπτουν από την κατασκευή της γραφικής παράστασης των $\sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ και $\tan^{-1}(-b_n/a_n)$ συναρτήσει της συχνότητας $f=n/T$, αντίστοιχα. Στον άξονα των τετμημένων ευρίσκεται πάντοτε η συχνότητα f ενώ στον άξονα των τεταγμένων το πλάτος ή η φάση των όρων της σειράς Fourier κατά περίπτωση. Το Σχήμα 1-7 απεικονίζει το φάσμα πλάτους μιας σειράς παλμών διάρκειας τ και περιόδου T ($f_0=1/T$), ενώ ο Πίνακας 1-2 συνοψίζει τους συντελεστές Fourier επιλεγμένων περιοδικών κυματομορφών, με $f=1/T$, και $\omega=2\pi f$.



Πίνακας 1-2. Ανάλυση κατά Fourier επιλεγμένων περιοδικών κυματομορφών.

1.5.3 Ανάλυση μη περιοδικών (τυχαίων) κυματομορφών

Στην γενικότερη των περιπτώσεων οι κυματομορφές δεν είναι περιοδικές. Ο τρόπος με τον οποίο μπορούμε να εκτιμήσουμε το συχνοτικό περιεχόμενο μιας τέτοιας κυματομορφής $x(t)$ είναι μέσω του μετασχηματισμού Fourier, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$(1.21) \quad F\{x(t)\} = X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cdot e^{-j2\pi ft} dt,$$

ενώ με την βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού Fourier που ορίζεται ως:

$$(1.22) \quad x(t) = F^{-1}\{X(f)\} = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \cdot e^{j2\pi ft} df$$

καθίσταται δυνατή η αναπαράγωγή της αρχικής κυματομορφής στο πεδίο του χρόνου. Ο Πίνακας 1-3 περιέχει μερικά βασικά ζεύγη μετασχηματισμών Fourier που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση συστημάτων επικοινωνίας.

Συνάρτηση	Κυματομορφή στο πεδίο του χρόνου	Φάσμα συχνοτήτων
Σταθερά	1	$\delta(f)$
Κρουστικός παλμός	$\delta(t - t_0)$	$e^{-j2\pi f t_0}$
Τετραγωνικός παλμός	Εύρος T	$T \cdot \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T}$
Τριγωνικός παλμός	Εύρος T	$T \cdot \left(\frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \right)^2$
Συνημίτονο	$\cos(\omega_c t + \phi)$	$\frac{1}{2} \cdot [e^{j\phi} \delta(f - f_c) + e^{-j\phi} \delta(f + f_c)]$
Σειρά κρουστικών παλμών	$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(t - mT)$	$\frac{1}{T} \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta\left(f - \frac{n}{T}\right)$
Χρονική καθυστέρηση	$x(t - T_d)$	$X(f) \cdot e^{-j2\pi f T_d}$
Συζυγής συνάρτηση	$x^*(t)$	$X^*(-f)$
Μετατόπιση συχνότητας	$x(t) \cdot e^{j2\pi f_c t}$	$X(f - f_c)$

Πίνακας 1-3. Ζεύγη μετασχηματισμών Fourier για συνήθεις κυματομορφές.

1.6 Κυκλώματα LC ως Φίλτρα

Το πηνίο είναι ένα στοιχείο που αποθηκεύει ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο που το περιβάλλει ενώ καταναλώνει ενέργεια στην ωμική αντίσταση περιτυλίγματός του. Ο πυκνωτής αποθηκεύει ενέργεια στο σχηματιζόμενο μεταξύ των οπλισμών του ηλεκτρικό πεδίο και καταναλώνει ενέργεια κυρίως λόγω της διαρροής ρεύματος μεταξύ των οπλισμών του. Όταν αξιολογούμε πηνία ή πυκνωτές συχνά

χρησιμοποιούμε τον δείκτη ποιότητας Q (quality factor) του εξαρτήματος. Ο δείκτης ποιότητας Q εκφράζει το πηλίκιο της ενέργειας που αποθηκεύεται προς αυτή που καταναλίσκεται στο στοιχείο. Έτσι, για ένα πηνίο (ή επαγωγή), έχουμε:

$$(1.23) \quad Q_L = \frac{\omega L}{R},$$

όπου R είναι η σε σειρά αντίσταση του συνολικού μήκους των σπειρών του πηνίου. Οι απαιτούμενες τιμές Q_L για πηνία ποικίλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Γενικά τιμές του Q_L μέχρι και 500 είναι διαθέσιμες.

Για ένα πυκνωτή ο δείκτης Q ορίζεται ως:

$$(1.24) \quad Q_C = \frac{\omega C}{G},$$

όπου G είναι η αγωγιμότητα του διηλεκτρικού μεταξύ των οπλισμών του πυκνωτή. Πυκνωτές καλής ποιότητας που χρησιμοποιούνται σε ραδιο-κυκλώματα έχουν τυπικές τιμές Q_C περίπου 1000. Γενικά καθώς η συχνότητα λειτουργίας αυξάνεται ο δείκτης ποιότητας Q ελαττώνεται από παράγοντες όπως οι ακόλουθοι: ακτινοβολία, απορρόφηση, παρασιτική επαγωγή που οφείλεται στις προσμίξεις μολύβδου και παρασιτική χωρητικότητα που οφείλεται στην συσκευασία ή την συγκόλληση του εξαρτήματος στην πλακέτα.

1.6.1 Συντονισμός

Συντονισμός σε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα επιτυγχάνεται όταν η επαγωγική και χωρητική αντίδραση (reactance) είναι ίσες, δηλαδή όταν $X_C \equiv \frac{1}{\omega C} = X_L \equiv \omega L$. Στην περίπτωση ενός σε σειρά κυκλώματος RLC , η σύνθετη αντίσταση Z δίδεται από την σχέση:

$$(1.25) \quad Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

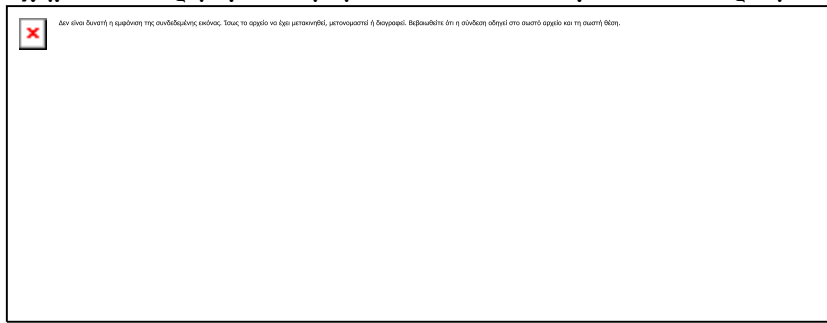
Όταν το συγκεκριμένο κύκλωμα ευρίσκεται σε συντονισμό, η σύνθετη του αντίσταση γίνεται ίση με την τιμή της σε σειρά ωμικής αντίστασης, δηλαδή έχουμε $Z=R$. Η

συχνότητα συντονισμού f_r προκύπτει εξισώνοντας την επαγωγική με την χωρητική αντίδραση:

$$(1.26) \quad X_L = X_C \Rightarrow \omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow 2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \Rightarrow f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Είναι φανερό από την σχέση (1.25), ότι η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος γίνεται ελάχιστη στην συχνότητα συντονισμού. Στις χαμηλές συχνότητες λαμβάνει μεγάλες τιμές καθόσον η χωρητική αντίδραση X_C είναι πολύ μεγάλη. Στις υψηλές συχνότητες κυριαρχεί η επαγωγική αντίδραση και έτσι και πάλι η σύνθετη αντίσταση λαμβάνει μεγάλες τιμές. Η ιδιότητα αυτή του σε σειρά RLC κυκλώματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-8 για την υλοποίηση ενός φίλτρου αποκοπής μιας περιοχής συχνοτήτων (band-reject filter).

Σχήμα 1-8. Χρησιμοποίηση ενός RLC κυκλώματος σε σειρά για την υλοποίηση φίλτρου



αποκοπής ζώνης συχνοτήτων περί την συχνότητα συντονισμού. Στο Σχήμα φαίνονται οι γραφικές παραστάσεις (α) της εμπέδησης και (β) της συνάρτησης μεταφοράς e_{out}/e_{in} του φίλτρου ως συναρτήσεις της συχνότητας.

Η συνάρτηση μεταφοράς του κυκλώματος στο Σχήμα 1-8 δίδεται από την σχέση:

$$(1.27) \quad e_{out} = e_{in} \times \frac{Z}{R_1 + Z} = e_{in} \times \frac{\sqrt{R_2 + (X_L - X_C)^2}}{R_1 + \sqrt{R_2 + (X_L - X_C)^2}}$$

και στη συχνότητα συντονισμού λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της $e_{out}/e_{in} = R_2/R_1 + R_2$.

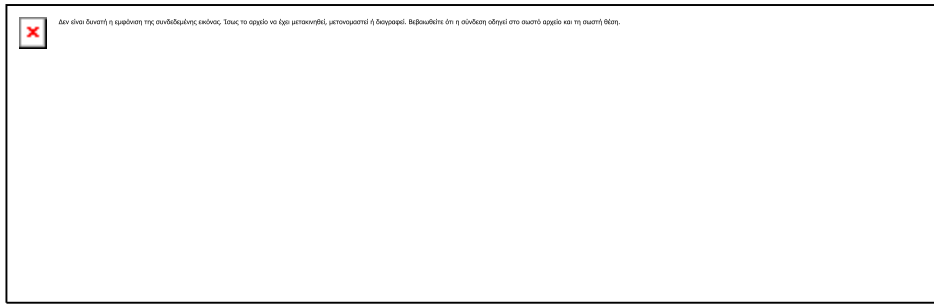
1.6.2 Ζωνοπερατό RLC φίλτρο

Εξακολουθώντας να αναφερόμαστε στο σε σειρά RLC κύκλωμα της προηγούμενης παραγράφου, αλλά λαμβάνοντας την έξοδο στα άκρα της αντιστάσεως R_2 όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1-9(a), η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$(1.28) \quad e_{out} = e_{in} \times \frac{R_2}{R_2 + Z} = e_{in} \times \frac{R_2}{R_2 + \sqrt{R_1 + (X_L - X_C)^2}},$$

Η γραφική παράσταση της συναρτήσεως μεταφοράς φαίνεται στο Σχήμα 1-9(b). Οι συχνότητες f_{lc} , f_{hc} αντιστοιχούν στα σημεία (συχνότητες) που η τάση εξόδου πέφτει στο 70.7% της μέγιστης τιμής της³. Το εύρος ζώνης που ορίζεται από τη διαφορά $\Delta f = f_{hc} - f_{lc}$ ονομάζεται **εύρος ζώνης του φίλτρου BW**. Μπορεί να δειχθεί μαθηματικά ότι για το συγκεκριμένο κύκλωμα:

$$(1.29) \quad \Delta f \approx BW = \frac{R}{2\pi L}.$$



Σχήμα 1-9. Το ζωνοδιαβατό RLC φίλτρο (a) και η απόκριση του (b).

Το πόσο επιλεκτική είναι η ζώνη διέλευσης ενός φίλτρου (δηλαδή πόσο στενό είναι) καθορίζεται από τον δείκτη ποιότητας του φίλτρου, ο οποίος συμβολίζεται και πάλι με το γράμμα Q , και ορίζεται ως το πηλίκο της συχνότητας συντονισμού προς το εύρος ζώνης του φίλτρου:

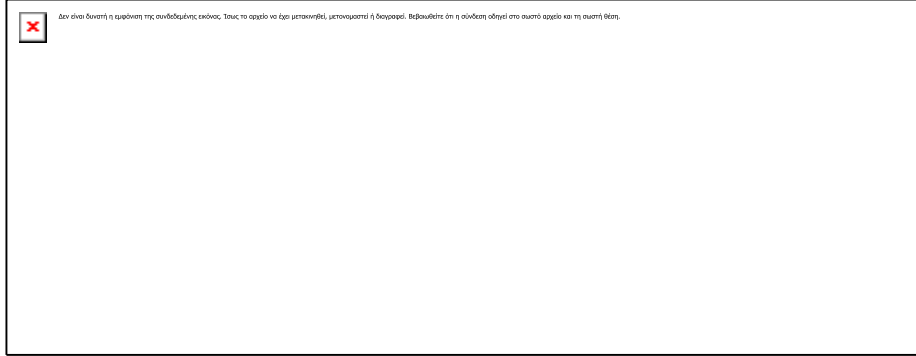
$$(1.30) \quad Q = \frac{f_r}{BW}.$$

Όσο υψηλότερος γίνεται ο δείκτης ποιότητας Q τόσο μικρότερο καθίσταται το εύρος ζώνης του φίλτρου. Ο κύριος περιοριστικός παράγοντας στην επίτευξη υψηλών τιμών Q είναι η εσωτερική ωμική αντίσταση του ίδιου του πηνίου. Με τη χρήση πηνίων εξαιρετικής ποιότητας (δηλαδή πολύ χαμηλής ωμικής αντίστασης) τιμές του Q μέχρι και 1000 μπορούν να επιτευχθούν.

³ Η τάση εξόδου λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της στη συχνότητα συντονισμού.

1.6.3 Παράλληλα LC κυκλώματα

Ένα παράλληλο LC κύκλωμα και η γραφική παράσταση της σύνθετης αντίστασής του ως συνάρτηση της συχνότητας απεικονίζονται στο Σχήμα 1-10.



Σχήμα 1-10. Παράλληλο LC κύκλωμα και η απόκρισή του.

Η σύνθετη αντίσταση Z του παράλληλου LC κυκλώματος λαμβάνει την μέγιστη τιμή της και πάλι στη συχνότητα συντονισμού για την οποία $X_L = X_C$, όπως εύκολα προκύπτει από την παρακάτω ανάλυση.

$$Z = \left| (R + jX_L) \parallel (-jX_C) \right| = \dots = \frac{\sqrt{R^2 + X_L^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{X_L}{X_C}\right)^2 + \left(\frac{R}{X_C}\right)^2}} \Bigg|_{f=f_r} = R \cdot Q \cdot \sqrt{(1 + Q^2)} \Big|_{Q \gg 1} \approx R \times Q^2$$

Η μέγιστη τιμή είναι ίση προς το γινόμενο της αντίστασης R και του τετραγώνου του δείκτη ποιότητας Q .

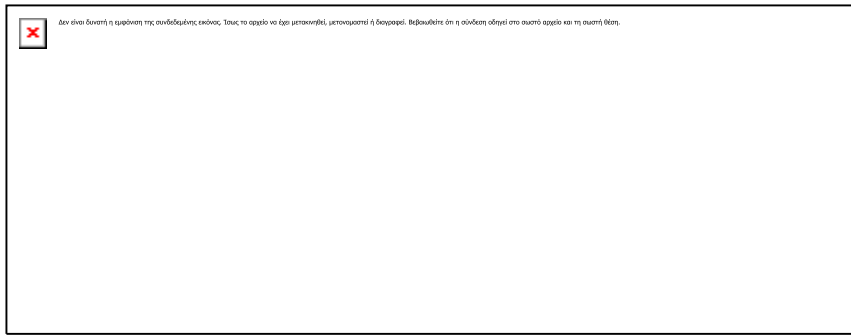
1.7 Ταλαντωτές

Το πιο βασικό δομικό στοιχείο σε ένα σύστημα επικοινωνιών είναι ο **ταλαντωτής (oscillator)**. Ο ταλαντωτής είναι ένα κύκλωμα το οποίο μετατρέπει ενέργεια συνεχούς ρεύματος/τάσης σε ενέργεια εναλλασσόμενου ρεύματος/τάσης. Με άλλα λόγια ο ταλαντωτής είναι μια διάταξη παραγωγής μιας κυματορφής η οποία όμως

επαναλαμβάνεται με συγκεκριμένη συχνότητα. Ο πλέον συνήθης τύπος ταλαντωτή που χρησιμοποιείται σήμερα σε ηλεκτρονικά κυκλώματα είναι ο ημιτονοειδής ταλαντωτής. Διάφοροι τύποι ημιτονοειδών ταλαντωτών είναι διαθέσιμοι και η επιλογή κάποιου συγκεκριμένου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη α) την απαιτούμενη συχνότητα εξόδου, β) τη σταθερότητα της συχνότητας, γ) εάν η συχνότητα είναι μεταβαλλόμενη και αν ναι σε τι εύρος, δ) την επιτρεπτή αλλοίωση της κυματομορφής και ε) την ισχύ εξόδου. Τα παραπάνω κριτήρια σε συνδυασμό με οικονομικούς παράγοντες καθορίζουν το είδος του ταλαντωτή που θα υιοθετηθεί για μια συγκεκριμένη εφαρμογή.

Η ανάλυση του απλού κυκλώματος LC^4 που απεικονίζεται στο Σχήμα 1-11 παρουσιάζει την αρχή λειτουργίας του ταλαντωτή. Ο πυκνωτής φορτίζεται μέχρι κάποια στάθμη δυναμικού και στη συνέχεια μόλις ο διακόπτης κλείσει αρχίζει να εκφορτίζεται δια μέσω του πηνίου προκαλώντας τη ροή κάποιου ρεύματος. Η παρουσία του πηνίου όμως δημιουργεί μια σταδιακή αύξηση της εντάσεως του ρεύματος το οποίο λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του όταν ο πυκνωτής έχει τελείως εκφορτιστεί. Στο σημείο αυτό η ενέργεια στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή είναι μηδενική, ενώ όλη η ηλεκτρική ενέργεια ευρίσκεται τώρα στο μαγνητικό πεδίο της επαγωγής. Παρά το γεγονός της μηδενικής διαφοράς δυναμικού στα άκρα του πυκνωτή, το ρεύμα συνεχίζει να ρέει λόγω της αδράνειας της επαγωγής (θυμηθείτε ότι το φυσικό χαρακτηριστικό της επαγωγής είναι να αντιστέκεται στην αλλαγή της ροής ρεύματος) φορτίζοντας σταδιακά τον πυκνωτή στην αντίθετη όμως πολικότητα από την αρχική.

⁴ Στο κύκλωμα αυτό η αντίσταση R είναι η σε σειρά εσωτερική ωμική αντίσταση του πηνίου.



Σχήμα 1-11. Κύκλωμα LC επιδεικνύοντας την αρχής λειτουργίας του ταλαντωτή.

Η διαδικασία φόρτισης συνεχίζεται μέχρι που το ρεύμα μηδενιστεί και έτσι ολοκληρωθεί η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από το μαγνητικό πεδίο του πηνίου στο ηλεκτρικό πεδίο του πυκνωτή. Η διαδικασία αυτή της ανταλλαγής ενέργειας από το ηλεκτρικό στο μαγνητικό πεδίο και αντίστροφα έχει ως αποτέλεσμα την κυματομορφή του αποσβηνμένου ημιτόνου που εικονίζεται στο Σχήμα 1-11(b), κυρίως λόγω των απωλειών της εσωτερικής αντίστασης του περιτυλίγματος του πηνίου. Η ανταλλαγή ενέργειας λαμβάνει χώρα στη φυσική συχνότητα ταλάντωσης ή συχνότητα συντονισμού που δίδεται από τη σχέση (1.26). Για να διατηρηθεί το πλάτος της ταλάντωσης στο κύκλωμα LC αμείωτο, πρέπει να χρησιμοποιηθεί κατάλληλος ενισχυτής. Στην ορολογία της ραδιοηλεκτρολογίας, η παραγόμενη σταθερού πλάτους κυματομορφή ονομάζεται **συνεχές κύμα (continuous wave – CW)**.

Οι ταλαντωτές LC είναι ουσιαστικά ενισχυτές θετικής ανάδρασης, όπου η ανάδραση χρησιμοποιείται για να διατηρήσει ή να αυξήσει το πλάτος της αυτοπαραγόμενης εξόδου. Θετική ανάδραση επιτυγχάνεται όταν το σήμα ανάδρασης είναι συμφασικό με το σήμα εισόδου. Με την τεχνική της θετικής ανάδρασης η έξοδος αυξάνεται διαρκώς για να περιοριστεί τελικά σε μια μέγιστη πεπερασμένη τιμή⁵ που υπαγορεύεται από τη μη γραμμικότητα των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων και άλλους περιορισμούς που αφορούν στη ισχύ τροφοδοσίας. Προκειμένου να επιτευχθεί και να διατηρηθεί η ταλάντωση σε έναν ταλαντωτή LC , θα πρέπει να ικανοποιούνται τα κριτήρια Barkhausen: 1) Το κέρδος του βρόχου ανάδρασης πρέπει να είναι ίσο με

ένα, 2) Η ολίσθηση φάσης του βρόχου πρέπει να είναι $n \times 360^\circ$, όπου n ακέραιος. Το κύκλωμα LC αποτελεί το βασικό δομικό στοιχείο κάθε διάταξης ταλαντωτή. Το Σχήμα 1-12 απεικονίζει ένα πρακτικό κύκλωμα ταλαντωτή Hartley.



Σχήμα 1-12. Κύκλωμα πρακτικού ταλαντωτή Hartley.

Η συχνότητα συντονισμού του ταλαντωτή Hartley δίδεται από τη σχέση:

$$(1.31) \quad f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_2)C}}.$$

Μια παραλλαγή του ταλαντωτή Hartley παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-13.



Σχήμα 1-13. Κύκλωμα πρακτικού ταλαντωτή Colpitts.

⁵ Στην περίπτωση ιδανικών στοιχείων το κέρδος ενίσχυσης ενός βρόχου θετικής ανάδρασης είναι άπειρο.

Ο ταλαντωτής αυτός ονομάζεται Colpitts και η συχνότητα ταλάντωσης δίδεται από τη σχέση:

$$(1.32) \quad f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{[C_1 C_2 / (C_1 + C_2)] L_1}}.$$

Οι διαφορές των ταλαντωτών Hartley και Colpitts είναι μικρές και η επιλογή για τη χρήση του ενός ή του άλλου γίνεται είτε με βάση τη διαθεσιμότητα ή με οικονομικά κριτήρια. Και οι δύο είναι σε θέση να αλλάζουν την συχνότητα ταλάντωσης μεταβάλλοντας τα στοιχεία που απαρτίζουν την παράλληλη LC διάταξη. Μια πολύ συνηθισμένη παραλλαγή του ταλαντωτή Colpitts είναι ο ταλαντωτής Clapp, ο οποίος απεικονίζεται στο Σχήμα 1-14.



Σχήμα 1-14. Κύκλωμα πρακτικού ταλαντωτή Clapp.

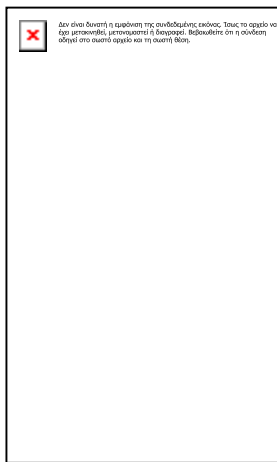
Ο ταλαντωτής Clapp έχει ένα πυκνωτή C_3 σε σειρά με το πηνίο του παράλληλου κυκλώματος LC , ο οποίος και καθορίζει τη συχνότητα ταλάντωσης που δίδεται από τη σχέση:

$$(1.33) \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_3}}.$$

Η σταθερότητα της συχνότητας ταλάντωσης του ταλαντωτή Clapp είναι καλύτερη από τους ταλαντωτές Hartley και Colpitts, αλλά από την άλλη πλευρά το εύρος ρύθμισης της συχνότητας ταλάντωσης του δεν είναι τόσο ευρύ όσο των άλλων δύο.

1.7.1 Κρυσταλλικοί ταλαντωτές

Σε περιπτώσεις που απαιτείται εξαιρετικά μεγάλη σταθερότητα στη συχνότητα εξόδου οι κλασσικοί ταλαντωτές δικτυωμάτων LC δεν εξυπηρετούν και χρησιμοποιούνται κρυσταλλικοί ταλαντωτές (crystal oscillators). Ο ταλαντωτής κρυστάλλου χρησιμοποιεί ένα πιεζοηλεκτρικό κρύσταλλο στη θέση της γνωστής μας παράλληλης LC διάταξης. Ο κρύσταλλος που είναι συνήθως quartz έχει την δική του συχνότητα συντονισμού, αλλά για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής απόδοσης συνδυάζεται με μια εξωτερική χωρητικότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1-15.

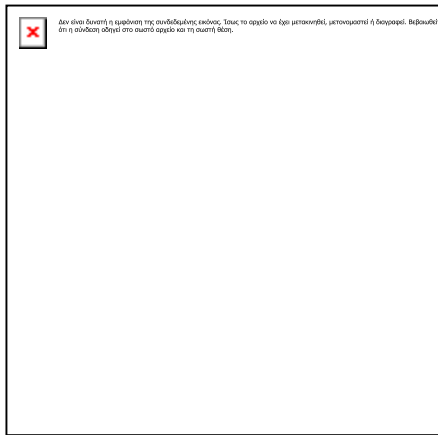


Σχήμα 1-15. Ηλεκτρικό ανάλογο ταλαντωτή με κρύσταλλο quartz.

Ο κρύσταλλος αναπαρίσταται από ένα σε σειρά συντονισμένο κύκλωμα L_S , C_S , έχοντας ωμική αντίσταση απωλειών R_S και είναι συνδεδεμένος παράλληλα με την εξωτερική χωρητικότητα C_P . Οι ιδιοσυχνότητες των δύο συντονισμένων κυκλωμάτων (σε σειρά και παράλληλα) απέχουν μόλις 1% ή και λιγότερο, με αποτέλεσμα η σύνθετη αντίσταση του κρυστάλλου να αλλάζει απότομα εντός ενός πολύ μικρού εύρους ζώνης συχνοτήτων δημιουργώντας έτσι ένα φίλτρο με πολύ υψηλή τιμή Q . Τυπικές τιμές Q για κυκλώματα κρυστάλλων quartz κυμαίνονται μεταξύ 10,000 και 1,000,000! Για το λόγο αυτό, αλλά και για την εξαιρετική σταθερότητα της συχνότητας ταλάντωσης για μεγάλο χρονικό διάστημα και ανεξάρτητα από τις θερμοκρασιακές μεταβολές, οι κρύσταλλοι quartz είναι σε θέση να διατηρούν συχνότητες εξόδου με ακρίβεια $\pm 0.001\%$ ή ± 10 ppm (parts per million).

Οι κρύσταλλοι κατασκευάζονται με την κοπή του ακατέργαστου quartz με ειδικό τρόπο. Ο τρόπος κοπής, -που αποτελεί πραγματικά μια ιδιαίτερη επιστήμη,- καθορίζει τόσο την ιδιοσυχνότητα του κρυστάλλου όσο και την χαρακτηριστική θερμοκρασίας του. Κρύσταλλοι είναι σήμερα διαθέσιμοι για συχνότητες μεγαλύτερες των 15MHz και η σταθερότητα της συχνότητάς τους αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 100MHz όμως το μέγεθός τους γίνεται τόσο μικρό που ο πρακτικός χειρισμός τους καθίσταται δύσκολος.

Κρύσταλλοι μπορούν να τοποθετηθούν στη θέση κάθε συντονιζόμενου κυκλώματος LC. Ένα κύκλωμα ειδικά διαμορφωμένο για κρυστάλλους παρουσιάζεται στο Σχήμα 1-16, στο οποίο απεικονίζεται ο ταλαντωτής Pierce.



Σχήμα 1-16. Κρυσταλλικός ταλαντωτής Pierce.

Η χρήση του τρανζίστορ τεχνολογίας FET κρίνεται απαραίτητη διότι η υψηλή σύνθετη αντίστασή του επιβαρύνει ελάχιστα τον κρύσταλλο διασφαλίζοντας καλή σταθερότητα συχνότητας και διατήρηση της υψηλής τιμής του Q . Παρατηρώντας το κύκλωμα αυτό πιο προσεκτικά, διαπιστώνουμε ότι είναι ουσιαστικά ένας ταλαντωτής Colpitts, όπου η επαγωγή L_1 έχει αντικατασταθεί από τον κρύσταλλο και οι πυκνωτές C_1 και C_2 από τις εσωτερικές χωρητικότητες επαφής του FET.

1.8 Προβλήματα

- 1) Δώστε τον ορισμό της διαμόρφωσης.
- 2) Για ποιους λόγους χρησιμοποιείται η διαμόρφωση στη μετάδοση πληροφορίας στις επικοινωνίες;
- 3) Ποιοι είναι οι δύο βασικοί παράγοντες που περιορίζουν την απόδοση ενός συστήματος επικοινωνίας;
- 4) Ορίστε τον ηλεκτρικό θόρυβο και εξηγήστε γιατί είναι τόσο σημαντικός στην ανάλυση και σχεδίαση συστημάτων επικοινωνιών.
- 5) Ποια η τάση θορύβου που παράγει αντίσταση $1\text{M}\Omega$ σε θερμοκρασία 27°C για εύρος ζώνης μέτρησης 1MHz ;
- 6) Ο θόρυβος που παράγεται από μια αντίσταση πρόκειται να ενισχυθεί από ένα ιδανικό όσον αφορά στο θόρυβο ενισχυτή του οποίου το κέρδος είναι 75 και το εύρος ζώνης 100kHz . Ένα ευαίσθητο βολτόμετρο μετρά στην έξοδό του μια τιμή $240\mu\text{V rms}$. Εάν η θερμοκρασία λειτουργίας του ενισχυτή είναι 37°C , υπολογίστε την τιμή της αντιστάσεως. Ποια θα ήταν η ένδειξη του βολτομέτρου εάν το εύρος ζώνης του ενισχυτή ήταν μόλις 25kHz ;
- 7) Προσδιορίστε το ρεύμα θορύβου και την ισοδύναμη τάση θορύβου μιας διόδου με ρεύμα ορθής πόλωσης 1mA σε εύρος ζώνης 1MHz .
- 8) Δύο αντιστάσεις $1\text{M}\Omega$ και $100\text{k}\Omega$ είναι συνδεδεμένες παράλληλα και ο συνδυασμός τους σε σειρά με μια τρίτη αντίσταση $500\text{k}\Omega$. Οι αντιστάσεις ευρίσκονται σε περιβάλλον θερμοκρασίας 27°C και βολτόμετρο μεγάλης ευαισθησίας και ακριβείας χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της τάσεως θορύβου. Εάν το εύρος ζώνης μέτρησης του οργάνου είναι 10MHz , προσδιορίστε α) το συνολικό ρεύμα θορύβου, β) το ρεύμα θορύβου που ρέει σε κάθε αντίσταση, γ) την τάση θορύβου στα άκρα κάθε αντίστασης και δ) την συνολική ισχύ θορύβου.
- 9) Στην έξοδο ενός δέκτη μετράμε στάθμη σήματος 5V και θορύβου 0.7062V . Υπολογίστε το λόγο S/N για τον παραπάνω δέκτη. Εάν στην είσοδο του δέκτη ο λόγος σήματος προς θόρυβο είναι 20dB , προσδιορίστε τον παράγοντα θορύβου (NF) και το λόγο θορύβου (NR) του δέκτη.
- 10) Ένας ενισχυτής τριών βαθμίδων λειτουργεί σε θερμοκρασία 27°C και έχει 3-dB εύρος ζώνης 150kHz , το οποίο καθορίζεται από ένα κατάλληλα συντονισμένο LC κύκλωμα που ευρίσκεται στην είσοδό του. Η πρώτη βαθμίδα του ενισχυτή έχει

κέρδος ισχύος 8dB και παράγοντα θορύβου 2.4dB. Οι επόμενες δύο βαθμίδες είναι όμοιες και έχουν κέρδος ισχύος 30dB και παράγοντα θορύβου 6.4dB. Το σύστημα αυτό δοκιμάζεται με φορτίο εξόδου 300Ω και θόρυβο εισόδου που αντιστοιχεί σε αντίσταση $100k\Omega$. Για τον ενισχυτή αυτό υπολογίστε: α) Την τάση και την ισχύ θορύβου στην είσοδο και έξοδο υποθέτοντας ιδανικές (χωρίς να εισάγουν θόρυβο) εσωτερικές βαθμίδες, β) Την πραγματική τάση και ισχύ θορύβου στην έξοδο του συστήματος, και γ) Το συνολικό παράγοντα θορύβου του συστήματος.

- 11) Μια μικροκυματική κεραία έχει ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου $T_{eq}=25K$ και προσαρμόζεται σε δέκτη με $T_{eq}=70K$, μέσω δικτύου προσαρμογής το οποίο έχει $T_{eq}=40K$. Υπολογίστε την ισχύ θορύβου στην είσοδο του δέκτη αν το εύρος ζώνης του είναι 2MHz. Καθορίστε επίσης τον παράγοντα θορύβου του δέκτη.
- 12) Υπολογίστε τον παράγοντα θορύβου ενός ενισχυτή με σύνθετη αντίσταση εισόδου 50Ω στον οποίον εφαρμόζεται η τεχνική μέτρησης θορύβου προσαρμοσμένης διόδου, όταν το dc ρεύμα ορθής πολώσεως για το οποίο η ισχύς στην έξοδο του ενισχυτή διπλασιάζεται είναι 0.3mA.
- 13) Σχεδιάστε στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας (πλάτος και φάση) μια περιοδική διπολική παλμοσειρά (στάθμες συμβόλων V και -V) με διάρκεια παλμού τ και περίοδο T.
- 14) Σχεδιάστε στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας (πλάτος και φάση) ένα ψηφιακό παλμό πλάτους V και χρονικής διάρκειας τ . Συγκρίνετε το αποτέλεσμα με αυτό του προβλήματος 13.
- 15) Αναφερόμενοι στο Σχήμα 1-8 με $R_1=20\Omega$, $R_2=1\Omega$, $L=1mH$, $C=0.4\mu F$ και $e_{in}=50mV$, υπολογίστε την τάση εξόδου του κυκλώματος στις συχνότητες 4kHz, 6kHz, 8kHz, 10kHz και 12kHz.
- 16) Αναφερόμενοι στο Σχήμα 1-10 με $R=4\Omega$, $L=27mH$ και $C=0.68\mu F$, υπολογίστε την συχνότητα συντονισμού, το εύρος ζώνης και τις συχνότητες αποκοπής.
- 17) Ο κρυσταλλικός ταλαντωτής ενός ρολογιού quartz έχει ακρίβεια $\pm 10s/\mu\eta\eta\alpha$. Εκφράστε την ακρίβεια αυτή σε ppm.