

2. ΘΟΡΥΒΟΣ

Ο θόρυβος είναι πιθανώς το μοναδικό κεφάλαιο στα ηλεκτρονικά και στις τηλεπικοινωνίες για το οποίο πρέπει κανείς να είναι ενημερωμένος ανεξάρτητα με τον τομέα εξειδίκευσης του. Είναι πάντοτε παρών και περιορίζει την αποδοτικότητα σχεδόν κάθε συστήματος. Αν τώρα θέλουμε να μετρήσουμε τον θόρυβο και τις συνέπειες που έχει πάνω σε ένα σύστημα τότε μάλλον θα έρθουμε σε αδιέξοδο διότι σχεδόν κάθε ένας έχει και από μια δική του μέθοδο υπολογισμού του θορύβου.

Παρόλα αυτά, έχοντας διαβάσει το κεφάλαιο αυτό θα έχετε μάθει τους τύπους και τις πηγές θορύβου. Επίσης θα μελετηθούν οι μέθοδοι υπολογισμού του θορύβου, που παράγεται από διαφορετικές πηγές, και ο τρόπος προσθήκης τέτοιου θορύβου. Στο κεφάλαιο αυτό θα μιλήσουμε λεπτομερώς για τις σημαντικές ποσότητες του θορύβου, όπως είναι η αναλογία σήματος – θορύβου, ο θόρυβος στην εικόνα, και ο θόρυβος στην θερμοκρασία, καθώς επίσης και για τον τρόπο υπολογισμού του θορύβου.

Ο θόρυβος μπορεί να οριστεί με την ηλεκτρονική έννοια ως κάποιο ανεπιθύμητο είδος ενέργειας που τείνει να αναμειχθεί με το επιθυμητό σήμα κατά την διάρκεια λήψης και αναπαραγωγής του σήματος. Πολλές διαταραχές που προκαλούνται στη φύση μπορούν να εμφανίσουν θόρυβο στους δέκτες, τροποποιώντας ανεπιθύμητα το σήμα. Στους ραδιοφωνικούς δέκτες για παράδειγμα ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει το χαρακτηριστικό hiss στα ηχεία του ραδιοφώνου, ενώ στους δέκτες της τηλεόρασης απεικονίζεται χιόνι ή κομφετί (χρωματιστό χιόνι). Στα παλμικά επικοινωνιακά συστήματα, ο θόρυβος μπορεί να προκαλέσει ανεπιθύμητους παλμούς ή ακόμα και να εξαφανίσει τους σωστούς προκαλώντας σοβαρά προβλήματα με αυτόν τον τρόπο. Επομένως αντιμετωπίζουμε τον θόρυβο σαν το μέσο ώστε να μειωθεί η λειτουργία των συστημάτων για μια δεδομένη μεταφερόμενη ισχύς. Μπορεί επίσης να επηρεάσει την ευαισθησία των δεκτών, βάζοντας ένα όριο ενίσχυσης στα ασθενέστερα σήματα. Μερικές φορές μπορεί ακόμα και να βιάσει μια μείωση στο εύρος ζώνης του συστήματος, όπου θα φανεί στο ραντάρ.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι ταξινόμησης του θορύβου. Μπορεί να υποδιαιρεθεί ανάλογα με κάποιες προϋποθέσεις σύμφωνα με τον τύπο, την πηγή, την επίδραση ή την σχέση με τον δέκτη. Είναι ωστόσο πιο εύκολο να χωρίσουμε τον θόρυβο σε δύο μεγάλες κατηγορίες : στο θόρυβο του οποίου οι πηγές βρίσκονται έξω από τον δέκτη (εξωτερικός) και στον θόρυβο που δημιουργείται μέσα στον δέκτη (εσωτερικός). Από την μία πλευρά ο εξωτερικός θόρυβος είναι δύσκολο να επεξεργαστεί ποσοτικά και επιπλέον συχνά δεν μπορεί να γίνει κάτι γι αυτό, εκτός από το να μετακινηθεί το σύστημα σε άλλη τοποθεσία. Παρατηρείστε πως τα ραδιοτηλεσκόπια τοποθετούνται μακριά από την βιομηχανία, της οποίας η ανάπτυξη συνέβαλλε στην δημιουργία ηλεκτρικού θορύβου. Παγκόσμιοι δορυφορικοί σταθμοί της γης είναι εγκατεστημένοι σε κοιλάδες όσο το δυνατόν απομακρυσμένες από θορύβους. Από την άλλη πλευρά ο εσωτερικός θόρυβος είναι περισσότερο ποσοτικοποιημένος και μπορεί να μειωθεί χρησιμοποιώντας ένα δέκτη κατάλληλου σχήματος.

Επειδή ο θόρυβος μπορεί να δράσει περιοριστικά και συχνά είναι πιθανόν να μειώνει την επίδραση που έχει πάνω στα σήματα με την χρήση ενός λογικού

κυκλώματος, είναι σημαντικό για όλους εκείνους που σχετίζονται με τις επικοινωνίες να είναι πλήρως ενημερωμένοι για τον θόρυβο.

2-1 ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Τα διάφορα είδη θορύβου, που δημιουργούνται έξω από τον δέκτη, υπάγονται στην κατηγορία των εξωτερικών θορύβων και συμπεριλαμβάνονται: ο ατμοσφαιρικός, ο βιομηχανικός και ο εξωγήινος θόρυβος.

2-1.1 Ατμοσφαιρικός Θόρυβος

Ίσως ο καλύτερος τρόπος να εξοικειωθεί κανείς με τον θόρυβο είναι να ακούσει τα μικροκύματα (shortwaves) στον δέκτη, ο οποίος δεν είναι καλά εξοπλισμένος ώστε να τα δέχεται. Αυτό που θα ακούσουμε είναι μια εκπληκτική ποικιλία από περιεργούς θορύβους που τείνουν να εισχωρήσουν μέσα στο πρόγραμμα. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι το αποτέλεσμα λανθασμένων ραδιοφωνικών κυμάτων που προκαλούν τάσεις στην κεραία. Η πλειονότητα αυτών των κυμάτων προέρχεται από διαταραχές φυσικών πηγών, και αποτελούν τον ατμοσφαιρικό θόρυβο που γενικά καλείται και στατικός.

Στατικός θόρυβος προκαλείται από τις ξαφνικές εκκενώσεις των καταιγίδων και από άλλες φυσικές ηλεκτρικές διαταραχές που εμφανίζονται στην ατμόσφαιρα. Εξαιτίας του ότι η προέλευση του στατικού θορύβου έχει αυθόρμητη μορφή (impulses) και επειδή τέτοιες διαδικασίες παρουσιάζονται σπάνια στη φύση, ο στατικός θόρυβος είναι διασκορπισμένος σε όλο το ραδιοφωνικό φάσμα που χρησιμοποιείται για μετάδοση. Επομένως ο ατμοσφαιρικός θόρυβος αποτελείται από ψευδή ραδιοσήματα με συνιστώσες κατανεμημένες σε μια ευρεία κλίμακα συχνοτήτων. Ο θόρυβος αυτός είναι διαδεδομένος πάνω στη γη με τον ίδιο τρόπο που είναι διαδεδομένα και τα ραδιοκύματα των ίδιων συχνοτήτων, έτσι ώστε σε κάθε σημείο της γης ο στατικός θόρυβος μπορεί να ληφθεί από όλες τις καταιγίδες, κοντινές ή μακρινές. Ο στατικός θόρυβος που λαμβάνεται από τις καταιγίδες είναι πιθανώς πιο έντονος αλλά λιγότερο συχνός. Η δύναμη πεδίου είναι περίπου αντιστρόφως ανάλογη της συχνότητας, έτσι ώστε ο θόρυβος αυτός να εμπλέκεται περισσότερο στην λήψη του ραδιοφώνου από ότι στη λήψη της τηλεόρασης. Ένας τέτοιος θόρυβος έχει αυθόρμητη μορφή (impulses) και αυτά τα μη ημιτονικά κύματα έχουν αρμονικές των οποίων το πλάτος ελαττώνεται με αύξηση της αρμονικής. Ο στατικός θόρυβος από απομακρυσμένες πηγές θα ποικίλει σε ένταση σύμφωνα με τις μεταβολές στις εκπεμπόμενες συνθήκες. Έτσι έχουμε αύξηση του στατικού θορύβου την νύχτα τόσο στις εκπεμπόμενες όσο και στις μικροκυματικές συχνοτήτες.

Ο ατμοσφαιρικός θόρυβος γίνεται λιγότερο έντονος σε συχνότητες πάνω από 30MHz εξαιτίας δύο ξεχωριστών παραγόντων. Πρώτον, οι υψηλές συχνότητες είναι περιορισμένες σε ευθεία οπτική εκπομπή δηλαδή λιγότερο από 80 χιλιόμετρα. Δεύτερον, ο μηχανισμός που παράγει τον θόρυβο είναι τέτοιος ώστε μια πολύ μικρή αναλογία θορύβου να δημιουργείται στο εύρος των πολύ υψηλών συχνοτήτων και παραπάνω.

2-1.2 Εξωγήινος Θόρυβος

Είναι υπερβολή να πούμε ότι υπάρχουν τόσοι τύποι διαστημικού θορύβου όσες και πηγές θορύβου. Για πιο ευκολία, η διαίρεση σε δύο υποκατηγορίες είναι αρκετή.

Ηλιακός θόρυβος Ο ήλιος στέλνει διάφορα αντικείμενα στη γη και ανάμεσα σε αυτά είναι και ο θόρυβος. Πάλι υπάρχουν δύο τύποι. Κάτω από κανονικές "ήπιες" συνθήκες, υπάρχει ένας σταθερός ακτινοβολούμενος θόρυβος από τον ήλιο, αυτό οφείλεται στο ότι ο ήλιος είναι ένα μεγάλο σώμα με μεγάλη θερμοκρασία (πάνω από 6000 °C στην επιφάνεια του). Επομένως ακτινοβολεί σε ευρύ φάσμα συχνοτήτων όπου εκεί συμπεριλαμβάνονται οι συχνότητες που χρησιμοποιούνται στις επικοινωνίες. Ωστόσο ο ήλιος είναι ένα μεταβαλλόμενο αστέρι που υποβάλλεται σε κύκλους, στην κορυφή των οποίων ξεσπούν ηλεκτρικές διαταραχές, όπως φλεγόμενα στεφάνια και ηλιακές κηλίδες. Αν και ο προσθετικός θόρυβος που παράγεται προέρχεται από μια μικρή αναλογία του ηλιακού δίσκου, έχει τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από εκείνη την ποσότητα θορύβου που παράγεται κατά την διάρκεια που ο ήλιος παραμένει ήσυχος.

Ο ηλιακός κύκλος επαναλαμβάνει περιόδους μεγάλων ηλεκτρικών διαταραχών περίπου κάθε 11 χρόνια. Επιπλέον αν προσπαθήσουμε να ζωγραφίσουμε μια γραμμή που να διέρχεται από τις 11 κορυφές των κύκλων αυτών θα δούμε ότι σχηματίζεται ένας μεγαλύτερος κύκλος, με τις κορυφές να φτάνουν υψηλότερο μέγιστο περίπου κάθε 100 χρόνια. Τελικά αυτές οι κορυφές των 100 χρόνων τείνουν να αυξάνονται σε ένταση. Εφόσον υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των κορυφών της ηλιακής διαταραχής και των δακτυλίων ετησίων δέντρων (growth rings in trees) ήταν δυνατόν να ανιχνεύσουμε αυτές τις κορυφές στις αρχές του 18^{ου} αιώνα. Στοιχεία έχουν δείξει ότι το 1957 όχι μόνο υπήρξε μια κορυφή αλλά η μεγαλύτερη κορυφή που έχει καταγραφεί.

Κοσμικός θόρυβος Εφόσον τα αστέρια λάμπουν και έχουν υψηλές θερμοκρασίες, επομένως και αυτά εκπέμπουν θόρυβο κατά τον ίδιο τρόπο που εκπέμπει και ο ήλιος. Αν και βρίσκονται μακριά το ένα με το άλλο, ωστόσο είναι τόσα πολλά σε αριθμό που η μεταξύ τους απόσταση δεν επηρεάζει την εκπομπή του θορύβου. Έτσι ο θόρυβος που λαμβάνουμε καλείται θερμικός θόρυβος και είναι κατανεμημένος ομοιόμορφα στον ουρανό. Λαμβάνουμε επίσης θόρυβο από το κέντρο του δικού μας γαλαξία (Milky Way), από άλλους γαλαξίες καθώς επίσης και από φανταστικές πηγές όπως είναι οι "quasars" και "pulsars". Αυτός ο γαλαξιακός θόρυβος είναι πολύ έντονος, όμως προέρχεται από πηγές που είναι απλά σημεία στον ουρανό. Δύο από τις πιο ισχυρές πηγές οι οποίες είναι και αυτές που ανακαλύφθηκαν πιο πρόσφατα είναι οι Cassiopeia A και Cygnus A. Ωστόσο είναι απερίσκεπια να μιλάμε για θορύβους με ραδιοαστρονόμους καθώς αυτοί θεωρούν σημαντική πληροφορία οτιδήποτε εμείς θεωρούμε θόρυβο.

Περίληψη Ο θόρυβος του διαστήματος είναι παρατηρήσιμος σε συχνότητες από 8MHz μέχρι λίγο παραπάνω από 1.43GHz, την συχνότητα δηλαδή που αντιστοιχεί στην γραμμή του υδρογόνου. Εκτός από τον θόρυβο που προκαλείται από τον άνθρωπο, ο διαστημικός θόρυβος είναι εντονότερος στις συχνότητες από 20MHz ως 120MHz. Όχι πολύ κάτω από 20MHz ο θόρυβος αυτός διεισδύει μέσα στην ιονόσφαιρα ενώ η εξαφάνιση του στις συχνότητες 1.5GHz πιθανώς ελέγχεται από τους μηχανισμούς που τον παράγουν και από την απορρόφηση που υφίσταται από τον υδρογόνο σε διαστημικό διάστημα.

2-1.3 Βιομηχανικός Θόρυβος

Μεταξύ των συχνοτήτων 1 έως 600MHz, στις αστικές, προαστιακές και άλλες βιομηχανικές περιοχές, η ένταση του θορύβου που προκαλεί ο άνθρωπος, εύκολα ξεπερνά κάθε άλλο θόρυβο εσωτερικό ή εξωτερικό από τον δέκτη. Ο βιομηχανικός θόρυβος περιλαμβάνει πηγές θορύβου όπως το αυτοκίνητο, η ανάφλεξη του αεροσκάφους, ηλεκτρικές μηχανές και μηχανές ταχυτήτων, διαρροές από γραμμές υψηλών τάσεων και ένα μεγάλο αριθμό από βαριές ηλεκτρικές μηχανές. Οι λάμπες φθορισμού αποτελούν ισχυρή πηγή βιομηχανικού θορύβου και για το λόγο αυτό δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε σημεία λήψης ή δοκιμών σήματος. Ο θόρυβος παράγεται από εκκενώσεις (arc discharge) που είναι παρόν σε όλες τις λειτουργίες, και κάτω από αυτές τις συνθήκες είναι αναμενόμενο ότι αυτός ο θόρυβος θα είναι περισσότερο έντονος σε βιομηχανικές και πυκνοκατοικημένες περιοχές. (ως ενθάρρυνση αξίζει να πούμε ότι ο βιομηχανικός θόρυβος που οφείλεται σε εκκενώσεις με σπινθήρες (spark discharge) μπορεί ακόμα και να μεγαλώσει σε έκταση τους ωκεανούς, όπως περιγράφηκε από τον Marconi το 1901).

Η φύση του βιομηχανικού θορύβου είναι τόσο μεταβλητή που είναι δύσκολο να την αναλύσουμε σε οποιαδήποτε βάση εκτός της στατιστικής. Υπακούει ωστόσο στη γενική αρχή του θορύβου που λέει ότι ο λαμβανόμενος θόρυβος αυξάνεται καθώς το εύρος ζώνης αυξάνει.

2-2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΣ ΘΟΡΥΒΟΣ

Με τον τίτλο εσωτερικός θόρυβος θα συζητήσουμε το θόρυβο που παράγεται από κάθε ενεργή ή παθητική συσκευή που βρίσκεται μέσα στον δέκτη. Ένας τέτοιος θόρυβος είναι γενικά τυχαίος και αυτό τον κάνει να μην μπορεί να μελετηθεί σε κάποια ανεξάρτητη στάθμη τάσης παρά μόνο στατιστικά. Επειδή ο εσωτερικός θόρυβος είναι τυχαία κατανομημένος σε ολόκληρο το ραδιοφωνικό φάσμα τότε κατά μέσο όρο υπάρχει τόσος θόρυβος σε μία συχνότητα όσο και σε μια άλλη. Έτσι η ισχύς του τυχαίου θορύβου είναι ανάλογη του εύρους ζώνης που μετράμε.

2-2.1 Θερμικός Θόρυβος

Ο θόρυβος που αναπτύσσεται πάνω σε μια αντίσταση ή σε ένα ωμικό στοιχείο μιας σύνθετης αντίστασης, είναι τυχαίος και αναφέρεται με διάφορους χαρακτηρισμούς όπως θερμικός, θερμική διαταραχή, λευκός ή Johnson θόρυβος. Οφείλεται στην γρήγορη και τυχαία κίνηση των μορίων, ατόμων και ηλεκτρονίων από τα οποία αποτελείται κάθε αντίσταση.

Στην θερμοδυναμική, η κινητική θεωρία δείχνει ότι η θερμοκρασία ενός σωματιδίου είναι ένας τρόπος να εκφράσει την εσωτερική του κινητική ενέργεια. Έτσι η θερμοκρασία ενός σώματος φανερώνει την στατιστική τετραγωνική μέση τιμή (rms) της ταχύτητας των σωματιδίων στο σώμα. Όπως δηλώνει η θεωρία, η κινητική ενέργεια αυτών των σωματιδίων γίνεται περίπου μηδέν (η κίνηση τους σταματάει) στην θερμοκρασία του απόλυτου μηδέν, το οποίο είναι το 0 K (kelvins, άλλοτε καλούνται βαθμοί Kelvin) που ισοδυναμεί με -273°C . Επομένως είναι φανερό ότι η ισχύς θορύβου που παράγεται από μία αντίσταση είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας, και ανάλογη του εύρους ζώνης στο οποίο μετράμε το θόρυβο. Έτσι:

$$P_n \propto T\mathcal{F} = kT\mathcal{F} \quad (2-1)$$

όπου $k =$ σταθερά του Boltzmann = 1.38×10^{-23} Joules/K

$T =$ απόλυτη θερμοκρασία, $K=273 + ^\circ C$

$\delta f =$ εύρος ζώνης

$P_n =$ η μέγιστη ισχύς θορύβου στην έξοδο της αντίστασης

Αν μια συνηθισμένη αντίσταση με μια συγκεκριμένη θερμοκρασία στους $17^\circ C$ ($290 K$) δεν συνδέεται σε πηγή τάσης, μπορεί κανείς στην αρχή να πιστέψει ότι δεν υπάρχει τάση να μετρήσουμε στα άκρα της. Η δήλωση αυτή είναι σωστή αν το όργανο μέτρησης που χρησιμοποιούμε μετράει συνεχής τάση, όμως η δήλωση είναι λάθος αν το όργανο μέτρησης είναι ένα πολύ ευαίσθητο βολτόμετρο. Η αντίσταση είναι μια γεννήτρια θορύβου και ενδεχομένως να έχει μεγάλη τάση στα άκρα της. Αν αυτή η τάση είναι τυχαία και έχει συγκεκριμένη rms τιμή αλλά όχι συνεχής συνιστώσα, μόνο ένα όργανο που μετράει εναλλασσόμενες τάσεις μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να καταγράψει την τιμή της. Ο θόρυβος τάσης δημιουργείται από την τυχαία κίνηση των ηλεκτρονίων μέσα στην αντίσταση. Η κίνηση αυτή των ηλεκτρονίων είναι το ρεύμα που διαρρέει την αντίσταση. Είναι γεγονός ότι ο ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων φτάνει και στα δύο άκρα της αντίστασης σε κάθε περίοδο του χρόνου. Αν και σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι πιθανό να φτάνει διαφορετικός αριθμός ηλεκτρονίων στο ένα άκρο της αντίστασης από ότι στο άλλο ακριβώς διότι η κίνηση των ηλεκτρονίων είναι τυχαία. Τόσο ο ρυθμός άφιξης των ηλεκτρονίων όσο και η διαφορά δυναμικού στα άκρα της αντίστασης ποικίλει. Επομένως τυχαία τάση στην αντίσταση υφίσταται και μπορεί να μετρηθεί και να υπολογιστεί.

Πρέπει να καταλάβουμε ότι όλοι οι τύποι που αναφέρονται στο θόρυβο είναι εφαρμόσιμοι μόνο στην rms τιμή ενός τέτοιου θορύβου και όχι στην στιγμιαία τιμή του η οποία μπορεί να είναι απρόβλεπτη. Τώρα όσον αφορά τις κορυφές του θορύβου τάσης, αυτό που μπορούμε να πούμε είναι ότι δεν μπορούν να υπερβαίνουν σε τιμή 10 φορές την rms τιμή.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2-1) μπορούμε να σχεδιάσουμε το ισοδύναμο κύκλωμα μιας αντίστασης που παράγει θόρυβο. Το κύκλωμα αυτό φαίνεται στο Σχήμα 2-1 και από αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την αντίστοιχη τάση θορύβου της αντίστασης. Υποθέτουμε ότι η αντίσταση R_L δεν παράγει θόρυβο και δέχεται τη μέγιστη ισχύ θορύβου που παράγει η R . Κάτω απ αυτές τις συνθήκες της μέγιστης μεταφερόμενης ισχύος η αντίσταση R_L πρέπει να ισούται με την R . Τότε:

$$P_n = \frac{V^2}{R_L} = \frac{V^2}{R} = \frac{\left(\frac{V_n}{2}\right)^2}{R} = \frac{V_n^2}{4R}$$

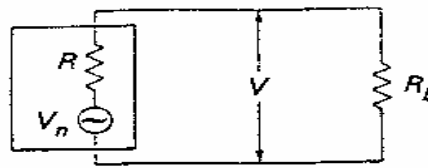
$$V_n^2 = 4RP_n = 4RkT\delta f$$

και

$$V_n = \sqrt{4kT\delta fR} \quad (2-2)$$

Από την εξίσωση (2-2) παρατηρούμε ότι το τετράγωνο της rms τάσης θορύβου που σχετίζεται με την αντίσταση είναι ανάλογη της απόλυτης θερμοκρασίας της αντίστασης, της αντίστασης και του εύρους ζώνης στο οποίο μετράμε το θόρυβο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο παραγόμενος θόρυβος τάσης είναι ανεξάρτητος της

συχνότητας, το γεγονός αυτό έρχεται σε αντίθεση με το ότι ο θόρυβος είναι τυχαίος και ομοιόμορφα κατανεμημένος στο φάσμα συχνοτήτων.



Σχήμα 2-1 Αντίσταση ως γεννήτρια θορύβου

Παράδειγμα 2-1 Ένας ενισχυτής που λειτουργεί στις συχνότητες από 18 ως 20MHz έχει αντίσταση εισόδου 10KΩ. Ποια είναι η rms τιμή του θορύβου τάσης στην είσοδο του ενισχυτή αν η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι 27 ° C;

$$\begin{aligned}
 V_n &= \sqrt{4kT\delta fR} \\
 &= \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times (27 + 273) \times (20 - 18) \times 10^6 \times 10^4} \\
 &= \sqrt{4 \times 1.38 \times 3 \times 2 \times 10^{-11}} = 1.82 \times 10^{-5} \\
 &= 18.2 \mu\text{V}
 \end{aligned}$$

Με το παράδειγμα αυτό μπορούμε να δούμε ότι θα ήταν μάταιο να περιμέναμε ο ενισχυτής να χειρίζεται σήματα εκτός και αν αυτά ήταν αισθητά μεγαλύτερα από 18.2μV. Μια χαμηλής τάσης τροφοδοσία στον ενισχυτή θα είχε καλυφθεί από τον θόρυβο και τις απώλειες.

2-2.2 Shot Noise

Η θερμική διέγερση είναι αναμφισβήτητα η μοναδική πηγή θορύβου στους δέκτες. Το σημαντικότερο όλων των άλλων πηγών είναι το shot αποτέλεσμα, το οποίο οδηγεί στον shot θόρυβο σε όλα τα ενισχυτικά στοιχεία και ουσιαστικά σε όλες τα ενεργά στοιχεία. Ο θόρυβος αυτός δημιουργείται από τις τυχαίες μεταβολές στις αφίξεις των ηλεκτρονίων (ή οπών) στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο του ενισχυτικού στοιχείου και με τον τρόπο αυτό εμφανίζεται στην έξοδο ένας τυχαίος μεταβαλλόμενος θόρυβος ρεύματος ο οποίος λαμβάνεται ενισχυμένος. Όταν ο θόρυβος ενισχύεται, υποτίθεται ότι αυτό που ακούγεται είναι μια βροχή από σφαίρες να πέφτουν πάνω σε μια μεταλλική επιφάνεια, γι αυτό το λόγο ονομάζεται shot θόρυβος.

Αν και η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου ενός στοιχείου ελέγχεται από την διάφορες τάσεις πόλωσης, σε κάθε χρονική στιγμή ενδέχεται να φτάνουν λιγότερα ή περισσότερα ηλεκτρόνια στο εξωτερικό ηλεκτρόδιο. Στα διπολικά τρανζίστορ, για παράδειγμα, το φαινόμενο αυτό είναι κυρίως αποτέλεσμα της τυχαίας κατεύθυνσης του ρεύματος δια μέσου των διασταυρώσεων. Οι διαδρομές που ακολουθούνται είναι τυχαίες επομένως και άνισες, έτσι ώστε, αν και ο μέσος όρος του ρεύματος στο συλλέκτης είναι σταθερός, ωστόσο προκαλούνται μικρές μεταβολές. Ο Shot θόρυβος συμπεριφέρεται με τον ίδιο τρόπο όπως και ο θερμικός θόρυβος με την μοναδική διαφορά ότι παράγεται από διαφορετική πηγή.

Πολλές μεταβλητές περιλαμβάνονται στην δημιουργία αυτού του θορύβου στις διάφορες ενισχυτικές συσκευές, και συνήθως χρησιμοποιούμε προσεγγιστικές εξισώσεις για τις μεταβλητές αυτές. Επιπλέον είναι δύσκολο με υπολογισμούς να προσθέσουμε ρεύμα shot θορύβου σε θερμικό θόρυβο τάσης, οπότε για όλες τις συσκευές εκτός της διόδου, οι τύποι shot θορύβου που χρησιμοποιούνται είναι γενικά απλοποιημένοι. Για την διόδο ο τύπος είναι

$$i_n = \sqrt{2ei_p \delta f} \quad (2-3)$$

όπου i_n = rms τιμή του ρεύματος του shot noise
 e = φορτίο του ηλεκτρονίου = $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$
 i_p = συνεχές ρεύμα διόδου
 δf = εύρος ζώνης του συστήματος

Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις όχι μόνο ο τύπος είναι απλουστευμένος αλλά δεν υπάρχει τύπος για shot θόρυβο ρεύματος. Ο μοναδικός τρόπος για να χειριστούμε τον shot θόρυβο είναι να βρούμε την τιμή ή τον τύπο μιας ισοδύναμης αντίστασης εσωτερικού θορύβου. Η αντίσταση αυτή προηγείται της συσκευής, η οποία υποθέτουμε ότι είναι απαλλαγμένη από κάθε θόρυβο και έχει τέτοια τιμή ώστε το ίδιο ποσό θορύβου βρίσκεται τόσο στην έξοδο του ισοδύναμου συστήματος όσο και στον πρακτικό ενισχυτή, έτσι ο θόρυβος ρεύματος έχει αντικατασταθεί από μια αντίσταση, επομένως τώρα είναι εύκολο να προσθέσουμε shot θόρυβο στον θερμικό θόρυβο. Επιπλέον η αντίσταση αυτή έχει τοποθετηθεί στην είσοδο του ενισχυτή που όπως θα δούμε είναι μια κατάλληλη θέση.

Η τιμή της ισοδύναμης αντίστασης shot θορύβου R_{eq} μιας συσκευής δίνεται σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Προσεγγιστικοί τύποι για ισοδύναμες αντιστάσεις shot θορύβου είναι επίσης διαθέσιμες και δείχνουν ότι ένας τέτοιος θόρυβος είναι αντιστρόφως ανάλογος της υπεραγωγιμότητας και ανάλογος του ρεύματος εξόδου. Όσον αφορά την χρήση της R_{eq} το σημαντικό που θα πρέπει να καταλάβουμε είναι ότι αυτή η αντίσταση είναι μια φανταστική αντίσταση που ουσιαστικά χρησιμοποιείται για την απλούστευση των υπολογισμών για τον shot θόρυβο. Σύμφωνα με αυτό, για το θόρυβο μόνο, η αντίσταση αυτή συμπεριφέρεται σαν να ήταν μια κανονική αντίσταση παραγωγής αντίστασης, με την ίδια θερμοκρασία όπως και οι άλλες αντιστάσεις, και τοποθετημένη σε σειρά με το εσωτερικό ηλεκτρόδιο της συσκευής.

2-2.3 Θόρυβος Μεταβλητού Χρόνου (Transit-time)

Εάν ο χρόνος που χρειάζεται ένα ηλεκτρόνιο να μεταφερθεί από τον εκπομπό στον συλλέκτη ενός τρανζίστορ γίνει συγκρίσιμος με την περίοδο του σήματος το οποίο ενισχύεται, π.χ., σε συχνότητες μεγαλύτερες και πέραν της κλίμακας των VHF (Very High Frequency), η επίδραση του αποκαλούμενου μεταβλητού χρόνου λαμβάνει χώρα, και ο θόρυβος εισόδου του τρανζίστορ αυξάνει. Το παραπάνω αναλύεται διεξοδικά στο κεφάλαιο 12-1.1. Τη στιγμή που τα ρεύματα στην είσοδο της συσκευής επηρεάζονται από τυχαίες διακυμάνσεις, τα ρεύματα στην έξοδο αποτελούν σημαντικό παράγοντα για αυτές τις συχνότητες και δημιουργούν τυχαίο θόρυβο.

Από τη μια μεριά αυτός ο θόρυβος υψηλής συχνότητας κάνει την παρουσία του αισθητή, τείνει να αυξάνει με συχνότητα σε έναν ρυθμό ο οποίος σύντομα προσεγγίζει τα 6 desibels (6 dB) ανά οκτάβα, και αυτός ο τυχαίος θόρυβος γρήγορα στη συνέχεια επικρατεί ως προς τα άλλα είδη. Το αποτέλεσμα από όλα αυτά είναι το

γεγονός ότι είναι προτιμότερο να μετράμε το θόρυβο σε τέτοιες υψηλές συχνότητες, από το να προσπαθούμε να υπολογίσουμε έναν εισαγόμενο ισοδύναμο θόρυβο αντίστασης για αυτό. Παρ' όλα αυτά, τα τρανζίστορ ραδιοφωνικής συχνότητας (RF) προσδίδουν αξιόλογα χαμηλό θόρυβο. Μια εικόνα θορύβου (βλέπε κεφάλαιο 2-4) τόσο χαμηλός όσο 1 dB είναι πιθανό με τη χρήση ενισχυτικών τρανζίστορ να μεταπηδήσει στην κλίμακα των UHF(Ultra High Frequency).

2-2.4 Ετερογενής (Ανάμεικτος) Θόρυβος

Τρεμοπαίξιμο (Flicker) Στις χαμηλές ακουστικές συχνότητες, ένας ελάχιστος αντιληπτός τύπος θορύβου ο οποίος ονομάζεται flicker ή αλλιώς θόρυβος διαμόρφωσης (modulation noise) εμφανίζεται στα τρανζίστορ. Είναι ανάλογος προς το ρεύμα του εκπομπού και της [θερμοκρασίας junction], αλλά από τη στιγμή που είναι επίσης αντίστροφα ανάλογος της συχνότητας, μπορεί να αγνοηθεί πλήρως για συχνότητες που υπερβαίνουν τα 500 Hz. Από εκεί και πέρα δεν είναι πολύ σοβαρό.

Αντίσταση Ο θερμικός θόρυβος, μερικές φορές καλείται θόρυβος αντίστασης (resistance noise), και είναι επίσης παρόν στα τρανζίστορ. Αυτό βασίζεται στο γεγονός ότι οι εσωτερικές αντιστάσεις της βάσης, του εκπομπού και του συλλέκτη και στις περισσότερες περιπτώσεις η αντίσταση της βάσης έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά.

Από τα 500 Hz περίπου μέχρι περίπου τα $f_{ab}/5$, ο θόρυβος από το τρανζίστορ παραμένει σχετικά σταθερός, έτσι ώστε μια ισοδύναμη αντίσταση εισόδου για shot και θερμικό θόρυβο να μπορεί να χρησιμοποιείται ελεύθερα.

Θόρυβος στους μείκτες Οι μείκτες περιέχουν περισσότερο θόρυβο από τους ενισχυτές χρησιμοποιώντας πανομοιότυπες συσκευές, με εξαίρεση στις συχνότητες μικροκυμάτων, όπου η κατάσταση είναι μάλλον πολύπλοκη. Αυτή η υψηλή τιμή του θορύβου στους μείκτες προκαλείται από δυο ξεχωριστά πράγματα. Καταρχήν, η μετατροπή της υπεραγωγιμότητας (conversion transconductance) στους μείκτες είναι πολύ χαμηλότερη από την υπεραγωγιμότητα των ενισχυτών. Κατά δεύτερον, αν η απόρριψη της συχνότητας του δείκτη είναι ανεπαρκής, όσο συχνά συμβαίνει στις βραχείες συχνότητες (shortwave frequencies), ο θόρυβος ο οποίος σχετίζεται με τη συχνότητα της εικόνας μπορεί επίσης να είναι αποδεκτή.

2-3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΘΟΡΥΒΟΥ

2-3.1 Προσθήκη Θορύβου λόγω διαφόρων πηγών

Ας θεωρήσουμε δυο πηγές θορύβου θερμικής διαταραχής σε σειρά: όπως είναι το $V_{n1} = \sqrt{4kT\delta f R_1}$ και το $V_{n2} = \sqrt{4kT\delta f R_2}$. Το άθροισμα των ενεργών τιμών αυτών των τάσεων σε σειρά (rms voltages) δίνεται από την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων τους, και έτσι έχουμε:

$$V_{n,tot} = \sqrt{V_{n1}^2 + V_{n2}^2} = \sqrt{4kT\delta f R_1 + 4kT\delta f R_2} = \sqrt{4kT\delta f (R_1 + R_2)} = \sqrt{4kT\delta f R_{tot}} \quad (2-4)$$

$$\text{όπου } R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots \quad (2-5)$$

Είναι φανερό από τις προηγούμενες εξισώσεις ότι προκειμένου να βρούμε την τάση του ολικού θορύβου που προκαλείται από διάφορες πηγές θερμικού θορύβου σε

σειρά, οι αντιστάσεις προστίθενται και η τάση θορύβου υπολογίζεται χρησιμοποιώντας αυτήν την ολική αντίσταση. Η ίδια διαδικασία εφαρμόζεται αν μια από εκείνες τις αντιστάσεις είναι στην πραγματικότητα μια ισοδύναμη αντίσταση θορύβου στην είσοδο.

- **Παράδειγμα 2-2:** Υπολογίστε την τάση θορύβου στην είσοδο ενός RF ενισχυτή μιας τηλεόρασης, χρησιμοποιώντας μια συσκευή η οποία έχει μια ισοδύναμη αντίσταση θορύβου 200Ω και αντίσταση εισόδου 300Ω . Το εύρος συχνοτήτων (bandwidth) του ενισχυτή είναι 6 MHz , και η θερμοκρασία είναι 17°C .

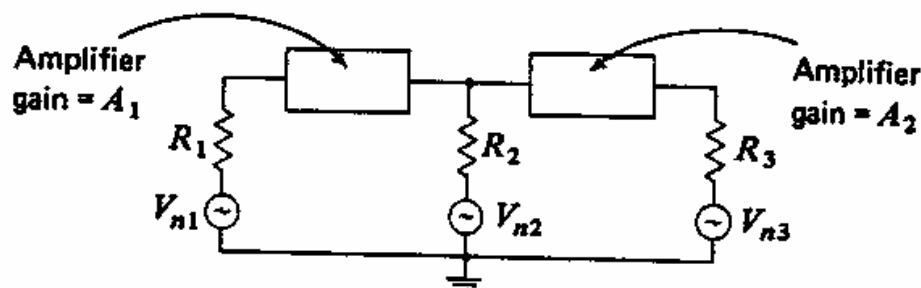
$$\begin{aligned} V_{n,tot} &= \sqrt{4kT\delta f R_{tot}} \\ &= \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} (17 + 273) \times 6 \times 10^6 \times (300 + 200)} \\ &= \sqrt{4 \times 1.38 \times 2.9 \times 6 \times 5 \times 10^{-13}} = \sqrt{48 \times 10^{-12}} \\ &= 6.93 \times 10^{-6} = 6.93 \mu\text{V} . \end{aligned}$$

Για να υπολογίσουμε την τάση θορύβου λόγω των διαφόρων αντιστατών που είναι παράλληλα τοποθετημένοι, βρίσκουμε τη συνολική αντίσταση με δεδομένες μεθόδους, και στη συνέχεια αντικαθιστούμε αυτήν την αντίσταση στην εξίσωση (2-4) όπως προηγουμένως. Αυτό σημαίνει ότι η ολική τάση θορύβου είναι μικρότερη από εκείνη λόγω του κάθε ξεχωριστού αντιστάτη, αλλά όπως φαίνεται από την εξίσωση (2-1), η ισχύς του θορύβου παραμένει σταθερή.

2-3.2 Προσθήκη Θορύβου λόγω Διαφόρων Κασκοδικών Ενισχυτών

Η κατάσταση που υπεισέρχεται στους δέκτες διευκρινίζεται στο σχήμα 2-2. Αναπαριστά έναν αριθμό ενισχυτικών σταδίων σε σειρά (cascade) καθένα από τα οποία έχει μια αντίσταση τόσο στην είσοδο όσο και στην έξοδο. Το πρώτο από αυτά τα στάδια είναι συχνά ένας RF ενισχυτής, ενώ το δεύτερο είναι ένας μείκτης. Το πρόβλημα είναι να βρούμε τη συνολική τους επίδραση στο θόρυβο του δέκτη.

Θα φαινόταν λογικό ότι η διαδικασία θα έπρεπε να ήταν τέτοια ώστε να συνδυάζει όλες τις αντιστάσεις θορύβου στην είσοδο, να υπολογίζει την τάση θορύβου τους, να την πολλαπλασιάζει με το κέρδος του πρώτου σταδίου και να προσθέτει αυτήν την τάση στην καινούρια που προκύπτει στην είσοδο του δεύτερου σταδίου. Έπειτα, η επεξεργασία θα μπορούσε να συνεχιστεί και η τάση θορύβου στην έξοδο, λόγω όλων των παρεμβαλλόμενων πηγών θορύβου, θα έπρεπε γι' αυτό το



Σχήμα 2-2: Θόρυβος από τα διάφορα στάδια ενίσχυσης σε σειρά

λόγο να βρεθεί. Ομολογουμένως, δεν υπάρχει κάτι λάθος με μια τέτοια διαδικασία. Ωστόσο, το αποτέλεσμα δεν είναι χρήσιμο, επειδή υποθέσαμε το επιχείρημα ότι είναι σημαντικό να βρούμε τη συνολική τάση του θορύβου στην έξοδο, παρόλο που το σημαντικό πράγμα είναι να βρούμε την ισοδύναμη τάση στην είσοδο. Στην πραγματικότητα, είναι ακόμα καλύτερα να προχωρήσουμε ένα βήμα πιο μπροστά και να βρούμε μία ισοδύναμη αντίσταση για μια τέτοια τάση εισόδου, παραδείγματος χάριν, την ισοδύναμη τάση θορύβου για ολόκληρο το δέκτη. Αυτή είναι η αντίσταση η οποία θα παράγει τον ίδιο τυχαίο θόρυβο στην έξοδο του δέκτη όπως κάνει ο πραγματικός δέκτης, έτσι ώστε να έχουμε επιτύχει την αντικατάσταση ενός πραγματικού δέκτη από έναν ιδανικό, χωρίς θόρυβο, δέκτη με μία ισοδύναμη αντίσταση θορύβου R_{eq} τοποθετημένη δια μέσου της εισόδου του. Αυτό απλοποιεί με σπουδαίο τρόπο διαδοχικούς υπολογισμούς, δίνει μια καλή εικόνα για σύγκριση με άλλους δέκτες, και επιτρέπει ένα γρήγορο υπολογισμό του χαμηλότερου σήματος εισόδου το οποίο αυτός ο δέκτης μπορεί να ενισχύσει χωρίς να το πνίξει μέσα σε θόρυβο.

Θεωρήστε τον ενισχυτή τον δύο σταδίων του σχήματος 2-2. Το κέρδος (gain \Leftrightarrow ενίσχυση) από το πρώτο στάδιο είναι A_1 , και εκείνο από το δεύτερο στάδιο είναι A_2 . Το πρώτο στάδιο έχει στην είσοδο μία συνολική αντίσταση θορύβου R_1 , το δεύτερο R_2 και η αντίσταση στην έξοδο είναι R_3 . Η ενεργός τάση θορύβου στην έξοδο λόγω της R_3 είναι

$$V_{n3} = \sqrt{4kT\delta f R_3}.$$

Η ίδια τάση θορύβου θα ήταν παρούσα στην έξοδο αν δεν υπήρχε καθόλου εκεί η αντίσταση R_3 , και αν στη θέση της η R_3 βρισκόταν στην είσοδο του δεύτερου σταδίου, τέτοια ώστε

$$V'_{n3} = \frac{V_{n3}}{A_2} = \frac{\sqrt{4kT\delta f R_3}}{A_2} = \sqrt{4kT\delta f R'_3}$$

όπου R'_3 είναι η αντίσταση η οποία αν τοποθετούνταν στην είσοδο του δεύτερου σταδίου θα παρήγαγε την ίδια τάση θορύβου στην έξοδο όπως κάνει η R_3 . Λόγω αυτού

$$R'_3 = \frac{R_3}{A_2^2} \quad (2-6)$$

Η εξίσωση (2-6) δείχνει ότι όταν μία αντίσταση θορύβου μεταφερθεί από την έξοδο ενός σταδίου στην είσοδο του, πρέπει να διαιρεθεί με το τετράγωνο της τάσης από αυτό το στάδιο. Τώρα η αντίσταση θορύβου είναι, στην πραγματικότητα, στην είσοδο του δεύτερου σταδίου η R_2 , και έτσι η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου στην είσοδο του δεύτερου σταδίου, λόγω του δεύτερου σταδίου και της αντίστασης εξόδου, είναι

$$R'_{eq} = R_2 + R'_3 = R_2 + \frac{R_3}{A_2^2}.$$

Με παρόμοιο τρόπο ένας αντιστάτης R_2' μπορεί να τοποθετηθεί στην είσοδο του πρώτου σταδίου αντικαθιστώντας την R_{eq}' , παράγοντας φυσικά και οι δύο την ίδια τάση θορύβου στην έξοδο. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση (2-6) και το συμπέρασμά της, έχουμε

$$R'_2 = \frac{R'_{eq}}{A_1^2} = \frac{R_2 + R_3/A_2^2}{A_1^2} = \frac{R_2}{A_1^2} + \frac{R_3}{A_1^2 A_2^2}.$$

Η αντίσταση θορύβου που στην πραγματικότητα παρίσταται στην είσοδο του πρώτου σταδίου είναι η R_1 , και έτσι η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου του συνολικού κασκωδικού ενισχυτή, στην είσοδο του πρώτου σταδίου, θα είναι

$$R_{eq} = R_1 + R_2' \\ = R_1 + \frac{R_2}{A_1^2} + \frac{R_3}{A_1^2 A_2^2} \quad (2-7)$$

Είναι πιθανό να επεκτείνουμε την εξίσωση (2-7) με το να επεκταθούμε σε ένα n -στάδιο του κασκωδικού ενισχυτή, αλλά αυτό δεν είναι κανονικά αναγκαίο. Όπως θα δούμε στο παράδειγμα (2-3), η αντίσταση θορύβου που είναι τοποθετημένη στην είσοδο του πρώτου σταδίου αποτελεί μακράν τον καλύτερο συντελεστή στο συνολικό θόρυβο, και μόνο στους ενισχυτές ευρείας ζώνης (broadband amplifiers) είναι αναγκαίο να θεωρήσουμε έναν αντιστάτη μετά την έξοδο του δεύτερου σταδίου.

- **Παράδειγμα 2-3:** Το πρώτο στάδιο από ένα ενισχυτή δύο σταδίων έχει μία ενίσχυση (Voltage gain) 10, μία αντίσταση εισόδου με τιμή 600 Ω , μία ισοδύναμη αντίσταση θορύβου με τιμή 1600 Ω και μία αντίσταση εξόδου με τιμή 27 K Ω . Για το δεύτερο στάδιο, αυτές οι τιμές είναι 25, 81 K Ω , 10 K Ω και 1 M Ω , αντίστοιχα. Υπολογίστε την ισοδύναμη αντίσταση θορύβου στην είσοδο αυτού του ενισχυτή των δύο σταδίων.

$$R_1 = 600 + 1600 = 2200\Omega$$

$$R_2 = \frac{27 \times 81}{27 + 81} + 10 = 20.2 + 10 = 30.2\text{K}\Omega$$

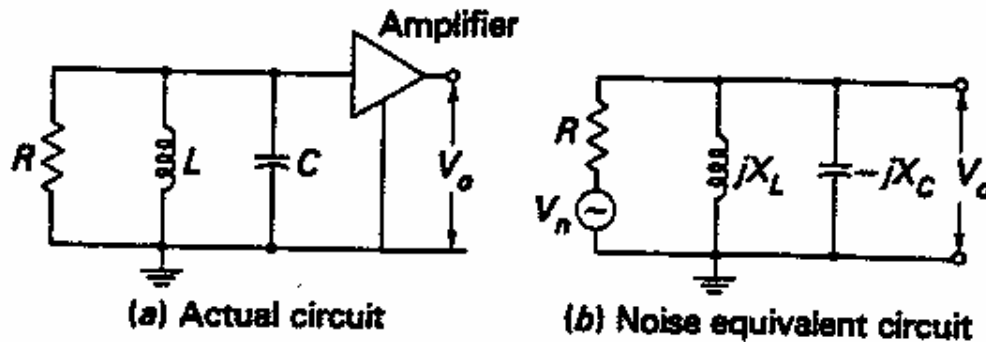
$$R_3 = 1\text{M}\Omega \quad (\text{όπως είναι δοσμένο})$$

$$R_{eq} = 2200 + \frac{30200}{10^2} + \frac{1000000}{10^2 \times 25^2} = 2200 + 302 + 16 = 2518\Omega$$

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι η αντίσταση εξόδου 1 M Ω έχει το ίδιο αποτέλεσμα θορύβου όπως μία αντίσταση 16 Ω στην είσοδο.

2-3.3 Θόρυβος σε Αντιδρώντα Κυκλώματα (Reactive Circuits)

Εάν μία αντίσταση ακολουθείται από ένα ελεγχόμενο κύκλωμα (tuned circuit) το οποίο θεωρητικά δεν έχει θόρυβο, τότε η παρουσία του ελεγχόμενου κυκλώματος δεν επηρεάζει τον θόρυβο που δημιουργήθηκε από την αντίσταση στην συχνότητα συντονισμού (resonant frequency). Και στη μία και στην άλλη πλευρά του συντονισμού, η παρουσία του ελεγχόμενου κυκλώματος επηρεάζει το θόρυβο κατά τον ίδιο τρόπο όπως κάθε άλλη τάση, και έτσι το ελεγχόμενο κύκλωμα περιορίζει το εύρος της πηγής του θορύβου με το να μην περνά ο θόρυβος έξω από την ζώνη διέλευσής του. Η πιο ενδιαφέρουσα περίπτωση, όμως, είναι ένα ελεγχόμενο κύκλωμα που δεν είναι ιδανικό, παραδείγματος χάριν, ένα στο οποίο η επαγωγή έχει ένα ωμικό στοιχείο, το οποίο φυσικά γεννά θόρυβο.



Σχήμα 2-3: Θόρυβος σε ελεγχόμενα κυκλώματα

Στις προηγούμενες παραγράφους που είχαν να κάνουν με υπολογισμούς θορύβου, είχε χρησιμοποιηθεί μία αντίσταση (θορύβου) στην είσοδο. Εδώ θα πρέπει να δοθεί έμφαση στο γεγονός ότι δεν χρειάζεται αναγκαία να είναι μία πραγματική αντίσταση. Αν όλες οι αντιστάσεις οι οποίες φαίνονται στο σχήμα 2-2 υπήρξαν ελεγχόμενα κυκλώματα με ισοδύναμες παράλληλες αντιστάσεις ίσες προς R_1 , R_2 και R_3 , αντίστοιχα, τα αποτελέσματα που θα λαμβάναμε θα ήταν ίδια και απaráλλακτα. Αυτό μπορεί να δείχτει παρακάτω. Θεωρήστε το σχήμα 2-3, το οποίο δείχνει ένα παράλληλο ελεγχόμενο κύκλωμα. Η σε σειρά αντίσταση του πηνίου που εδώ είναι η πηγή του θορύβου, φαίνεται σαν μία αντίσταση σε σειρά με μία γεννήτρια παραγωγής θορύβου και με το πηνίο. Απαιτείται να προσδιορίσουμε την τάση θορύβου μπροστά από τον πυκνωτή, για παράδειγμα, στην είσοδο του ενισχυτή. Αυτό θα μας επιτρέψει να υπολογίσουμε την αντίσταση η οποία μπορεί να είναι υπεύθυνη για τη παραγωγή του θορύβου. Ο τρέχων θόρυβος στο κύκλωμα θα είναι

$$i_n = \frac{v_n}{Z}$$

όπου $Z = R_s + g(X_L - X_C)$. Για αυτό το λόγο $i_n = v_n / R_s$ κατά τον συντονισμό.

Το μέγεθος της τάσης που εμφανίζεται μπροστά από τον πυκνωτή, λόγω του v_n , θα είναι

$$v = i_n X_C = \frac{v_n X_C}{R_s} = \frac{v_n Q R_s}{R_s} = Q v_n \quad (2-8)$$

την στιγμή που $X_C = Q R_s$ στο συντονισμό.

Η εξίσωση (2-8) θα βοηθούσε σαν ένας επιπλέον υπενθυμητής ότι το Q καλείται παράγοντας μεγέθυνσης! Στη συνέχεια έχουμε

$$v^2 = Q^2 v_n^2 = Q^2 4kT \delta f R_s = 4kT \delta f (Q^2 R_s) = 4kT \delta f R_p \quad (2-9)$$

$$v = \sqrt{4kT \delta f R_p}$$

όπου v είναι η τάση θορύβου μπροστά από ένα ελεγχόμενο κύκλωμα λόγω της εσωτερικής του αντίστασης, και R_p είναι η ισοδύναμη παράλληλη εμπέδηση του ελεγχόμενου κυκλώματος κατά τον συντονισμό.

Η εξίσωση (2-9) δείχνει ότι η ισοδύναμη παράλληλη εμπέδηση ενός ελεγχόμενου κυκλώματος είναι η ισοδύναμη αντίστασή του για το θόρυβο (όπως και για άλλες περιπτώσεις).

2-4 ΕΙΚΟΝΑ ΘΟΡΥΒΟΥ (NOISE FIGURE)

2-4.1 Λόγος Σήματος προς Θόρυβο (SNR)

Ο υπολογισμός της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου ενός ενισχυτή, δέκτη ή συσκευής μπορεί να έχει δύο σκοπούς από τους οποίους μπορεί να συμβαίνει ο ένας ή ο άλλος (μερικές φορές και οι δύο μαζί). Ο πρώτος από αυτούς είναι σε σύγκριση με δύο είδη εξοπλισμού αποτιμώντας την απόδοσή τους. Ο δεύτερος σκοπός είναι σε σύγκριση με το θόρυβο και το σήμα στον ίδιο βαθμό ώστε να εξασφαλίσει ότι ο θόρυβος δεν είναι υπερβολικός. Στην δεύτερη περίπτωση, και επίσης όταν η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου είναι δύσκολο να την λάβουμε, το SNR χρησιμοποιείται πολύ συχνά και καθορίζεται σαν μια αναλογία της ισχύς του σήματος προς την ισχύ του θορύβου στον ίδιο βαθμό. Για αυτό το λόγο

$$\frac{S}{N} = \frac{X_s}{X_n} = \frac{V_s^2 / R}{V_n^2 / R} = \left(\frac{V_s}{V_n}\right)^2 \quad (2-10)$$

Η εξίσωση (2- 10) είναι μια απλοποίηση που βρίσκει εφαρμογή οποτεδήποτε η αντίσταση μπροστά από την οποία αναπτύσσεται ο θόρυβος είναι η ίδια σαν την αντίσταση μπροστά από την οποία αναπτύσσεται το σήμα, και αυτή είναι σχεδόν σταθερή. Μία προσπάθεια φυσικά έγινε να κρατηθεί το SNR τόσο ψηλά όσο είναι δυνατό κάτω από ορισμένες συνθήκες.

2-4.2 Προσδιορισμός του Δεικτη Θορύβου

Για σύγκριση όσον αφορά στους δέκτες ή τους ενισχυτές οι οποίοι δουλεύουν σε διαφορετικά επίπεδα εμπέδησης, η χρήση της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου είναι παραπλανητική. Για παράδειγμα, είναι δύσκολο να καθορίσουμε με μία πρώτη ματιά αν ένας δέκτης με μια εμπέδηση εισόδου της τάξης των 50 Ω και αντίστασης $R_{eq}=90$ Ω είναι καλύτερος, από την άποψη του θορύβου, από έναν άλλο δέκτη του οποίου η εμπέδηση εισόδου είναι 300 Ω και η αντίστασή του $R_{eq}=400$ Ω. Στην πραγματικότητα, ο δεύτερος δέκτης είναι ο καλύτερος, όπως θα φανεί. Αντί της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου, μία ποσότητα γνωστή ως εικόνα θορύβου, μερικές φορές καλείται παράγοντας θορύβου, καθορίζεται και χρησιμοποιείται. Η εικόνα θορύβου F καθορίζεται ως η αναλογία της ισχύς του σήματος ως προς το θόρυβο που τροφοδοτείται στα τερματικά (ακραία τμήματα) της εισόδου ενός δέκτη ή ενισχυτή προς την ισχύ του σήματος ως προς το θόρυβο που τροφοδοτείται στην έξοδο ή φορτίζει τον αντιστάτη. Για αυτό το λόγο

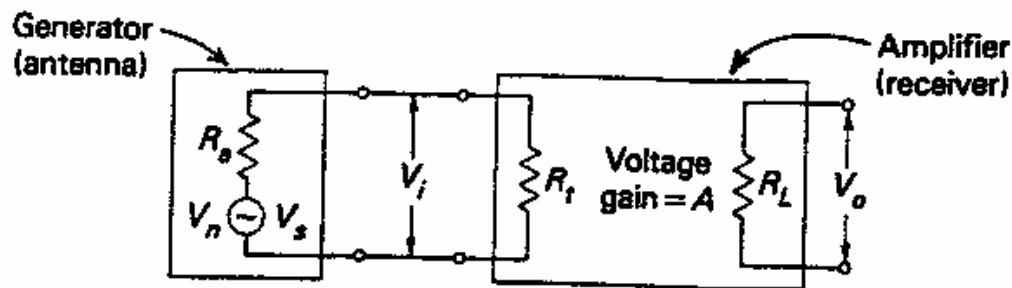
$$F = \frac{\text{input } S / N}{\text{output } S / N} \quad (2-11)$$

Μπορεί αμέσως να φανεί ότι ένας πρακτικός δέκτης θα γεννήσει κάποιο θόρυβο, και το S/N θα χειροτερέψει καθώς ο θόρυβος κινείται προς την έξοδο. Συνεπώς, σε ένα πρακτικό δέκτη, η έξοδος S/N θα είναι χαμηλότερη από την τιμή της εισόδου, και έτσι η εικόνα του θορύβου θα υπερβεί τη μονάδα. Όμως, η εικόνα του θορύβου θα είναι μονάδα για έναν ιδανικό δέκτη, ο οποίος δεν εισάγει καθόλου θόρυβο από μόνος του. Για αυτό το λόγο έχουμε τον εναλλακτικό καθορισμό του δείκτη θορύβου, ο οποίος δηλώνει ότι το F είναι ίσο προς το S/N ενός ιδανικού συστήματος διαχωρισμένου από το S/N στην έξοδο του δέκτη ή του υπό έλεγχο ενισχυτή, που και τα δύο δουλεύουν στην ίδια θερμοκρασία, πάνω στο ίδιο εύρος συχνοτήτων και προέρχονται από την ίδια πηγή. Επιπρόσθετα, και τα δύο πρέπει να

είναι γραμμικά. Η εικόνα του θορύβου θα πρέπει να εκφράζεται σαν μία πραγματική αναλογία ή σε decibels. Η εικόνα του θορύβου όσον αφορά στους πρακτικούς δέκτες μπορεί να περιοριστεί κάτω από 2 decibels σε συχνότητες που βρίσκονται στην χαμηλότερη κλίμακα των giga herz από την ιδανική επιλογή ενός πρώτου τρανζίστορ, συνδυασμένο με κατάλληλο σχεδιασμό κυκλώματος και αντιστάτες χαμηλού θορύβου. Για συχνότητες υψηλότερες από αυτή, οι εικόνες χαμηλού θορύβου μπορούν στην πραγματικότητα να επιτευχθούν από συσκευές οι οποίες από μόνες τους χρησιμοποιούν την επίδραση του μεταβλητού χρόνου ή είναι σχετικά ανεξάρτητες από αυτό. Αυτό θα δειχτεί στο κεφάλαιο 12.

2-4.3 Υπολογισμός του Δείκτη του Θορύβου

Η εικόνα του ήχου για έναν ενισχυτή ή έναν δέκτη πρέπει να υπολογίζεται κατά τον ίδιο τρόπο συμπεριφέροντάς τους σαν ένα whole, που σημαίνει ότι καθ' ένα από αυτά αντιμετωπίζεται σαν ένα δίκτυο τεσσάρων τερματικών έχοντας μία εμπέδηση εισόδου R_i μία εμπέδηση εξόδου R_L , και μία συνολική ενίσχυση A . Αυτό προκύπτει από μία πηγή (κεραία) εσωτερικής εμπέδησης R_a , η οποία πρέπει ή δεν πρέπει να είναι ίση προς την R_i όπως οι συνθήκες το επιβάλλουν. Ένα μπλοκ διάγραμμα ενός τέτοιου δικτύου αποτελούμενου από τέσσερα τερματικά (με την πηγή να το τροφοδοτεί) φαίνεται στο σχήμα 2-4.



Σχήμα 2-4: Μπλοκ διάγραμμα για τον υπολογισμό του δείκτη του θορύβου

Η διαδικασία υπολογισμού πρέπει να διαιρεθεί σε έναν αριθμό από γενικά βήματα. Καθ' ένα από αυτά φαίνεται παρακάτω, ακολουθούμενα από τον αριθμό των αντιπροσωπευτικών εξισώσεων που παρουσιάζονται στη συνέχεια:

1. Καθορίζουμε την ισχύ του σήματος εισόδου P_{si} (2-12, 2-13).
2. Καθορίζουμε την ισχύ του θορύβου εισόδου P_{ni} (2-14, 2-15).
3. Υπολογίζουμε την αναλογία σήματος προς θόρυβο της εισόδου S/N_i από τον λόγο των P_{si} και P_{ni} (2-16).
4. Καθορίζουμε την ισχύ του σήματος εξόδου P_{so} (2-17).
5. Γράφουμε P_{no} για την ισχύ του θορύβου εξόδου το οποίο θα καθοριστεί αργότερα (2-18).
6. Υπολογίζουμε την αναλογία σήματος προς θόρυβο της εξόδου S/N_o από το λόγο των P_{so} και P_{no} (2-19).
7. Υπολογίζουμε τον γενικευμένο τύπο του δείκτη του θορύβου από τα βήματα 3 και 6 (2-20).

8. Υπολογίζουμε το P_{no} από την R_{eq} εφόσον είναι δυνατό (2-21,2-22), και αντικαθιστούμε στην γενική εξίσωση για το F για να πάρουμε την ακριβή σχέση (2-23, 2-24) ή να προσδιορίσουμε το P_{no} από μέτρηση (2-3, 2-25,2-26), και αντικαθιστούμε για να πάρουμε τη σχέση για το F (2-27,2-28,2-29).

Από το σχήμα 2-4 φαίνεται ότι η τάση και η ισχύς εισόδου του σήματος θα είναι

$$V_{si} = \frac{V_s R_t}{R_a + R_t} \quad (2-12)$$

$$V_{si} = \frac{V_{si}^2}{R_t} = \left(\frac{V_s R_t}{R_a + R_t} \right)^2 \frac{1}{R_t} = \frac{V_s^2 R_t}{(R_a + R_t)^2} \quad (2-13)$$

Με παρόμοιο τρόπο, η τάση και η ισχύς εισόδου του θορύβου θα είναι

$$V_{ni}^2 = 4kT\delta f \frac{R_a R_t}{R_a + R_t} \quad (2-14)$$

$$P_{ni} = \frac{V_{ni}^2}{T_t} = 4kT\delta f \frac{R_a R_t}{R_a + R_t} \frac{1}{R_t} = \frac{4kT\delta f R_a}{R_a + R_t} \quad (2-15)$$

Η αναλογία του σήματος προς το θόρυβο στην είσοδο θα είναι

$$\frac{S}{N_i} = \frac{P_{si}}{P_{ni}} = \frac{V_s^2 R_t}{(R_a + R_t)^2} \div \frac{4kT\delta f R_a}{R_a + R_t} = \frac{V_s^2 R_t}{4kT\delta f R_a (R_a + R_t)} \quad (2-16)$$

Η ισχύς του σήματος στην έξοδο θα είναι

$$\begin{aligned} P_{so} &= \frac{V_{so}^2}{R_L} = \frac{(AV_{si})^2}{R_L} \\ &= \left(\frac{AV_s R_t}{R_a + R_t} \right)^2 \frac{1}{R_L} = \frac{A^2 V_s^2 R_t^2}{(R_a + R_t)^2 R_L} \end{aligned} \quad (2-17)$$

Η ισχύς εξόδου του θορύβου μπορεί να είναι δύσκολο να υπολογιστεί, και προς στιγμή μπορεί να γραφτεί με απλό τρόπο σαν

$$P_{no} = \text{ισχύς εξόδου του θορύβου} \quad (2-18)$$

Έτσι, η αναλογία του σήματος προς το θόρυβο στην έξοδο θα είναι

$$\frac{S}{N_o} = \frac{P_{so}}{P_{no}} = \frac{A^2 V_s^2 R_t^2}{(R_a + R_t)^2 R_L P_{no}} \quad (2-19)$$

Τελικά, η γενική έκφραση για την εικόνα του θορύβου είναι

$$\begin{aligned} F &= \frac{S/N_i}{S/N_o} = \frac{V_s^2 R_t}{4kT\delta f R_a (R_a + R_t)} \div \frac{A^2 V_s^2 R_t^2}{(R_a + R_t)^2 R_L P_{no}} \\ &= \frac{R_L P_{no} (R_a + R_t)}{4kT\delta f A^2 R_a R_t} \end{aligned} \quad (2-20)$$

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι η εξίσωση (2-20) αποτελεί μόνο ένα ενδιάμεσο αποτέλεσμα. Μπορεί τώρα να εξαχθεί μία ακριβής σχέση για το F με αντικατάσταση για την ισχύ του θορύβου στην έξοδο, ή από την γνώση της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου, ή από μέτρηση.

2-4.4 Εικόνα Θορύβου από Ισοδύναμη Αντίσταση Θορύβου

Όπως προέκυψε από την εξίσωση (2-7), η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου ενός ενισχυτή ή δέκτη είναι το άθροισμα της τερματικής αντίστασης εισόδου και της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου από το πρώτο στάδιο, μαζί με τις αντιστάσεις θορύβου από τα προηγούμενα στάδια που αναφέρθηκαν στην είσοδο. Κοιτώντας το από μία άλλη άποψη, παρατηρούμε ότι όλες αυτές οι αντιστάσεις προστίθεται στην R_t , δίνοντας μία αντίσταση η οποία πρόκειται να συγκεντρώσει όλο το θόρυβο που προέρχεται από τον δέκτη. Το υπόλοιπο από αυτό υποθέτουμε τώρα ότι δεν έχει θόρυβο. Όλο αυτό βρίσκει εφαρμογή εδώ, με την ελάχιστη εξαίρεση ότι αυτές οι αντιστάσεις θορύβου πρέπει τώρα να προστεθούν στον παράλληλο συνδυασμό των R_a και R_t . Προκειμένου να συσχετίσουμε την εικόνα του θορύβου και την ισοδύναμη αντίσταση θορύβου, είναι βολικό να προσδιορίσουμε την R'_{eq} , η οποία είναι μία αντίσταση θορύβου που δεν ενσωματώνει την R_t και η οποία δίνεται από την σχέση

$$R'_{eq} = R_{eq} - R_t \quad (2-7')$$

Η συνολική ισοδύναμη αντίσταση θορύβου για αυτόν τον δέκτη θα είναι τώρα

$$R = R'_{eq} + \frac{R_a R_t}{R_a + R_t} \quad (2-21)$$

Για το λόγο αυτό η ισοδύναμη τάση θορύβου που δημιουργείται στην είσοδο του δέκτη θα είναι

$$V_{ni} = \sqrt{4kT\delta f R}$$

Από την στιγμή που ο ενισχυτής έχει μία συνολική ενίσχυση A και μπορεί τώρα να συμπεριφερθεί σαν να μην υπήρχε θόρυβος, ο θόρυβος στην έξοδο θα είναι

$$P_{no} = \frac{V_{no}^2}{R_L} = \frac{(AV_{ni})^2}{R_L} = \frac{A^2 4kT\delta f R}{R_L} \quad (2-22)$$

Όταν η εξίσωση (2-22) αντικατασταθεί στην γενική εξίσωση (2-20), το αποτέλεσμα είναι μία έκφραση για την εικόνα του θορύβου στα πλαίσια της ισοδύναμης αντίστασης θορύβου, δηλαδή,

$$\begin{aligned} F &= \frac{R_L (R_a + R_t)}{4kT\delta f A^2 R_a R_t} P_{no} = \frac{R_L (R_a + R_t)}{4kT\delta f A^2 R_a R_t} \frac{A^2 4kT\delta f R}{R_L} \\ &= R \frac{R_a + R_t}{R_a R_t} = \left(R'_{eq} + \frac{R_a R_t}{R_a + R_t} \right) \frac{R_a + R_t}{R_a R_t} \\ &= 1 + \frac{R'_{eq} (R_a + R_t)}{R_a R_t} \end{aligned} \quad (2-23)$$

Μπορεί να φανεί από την εξίσωση (2-23) ότι εάν ο θόρυβος έχει μια ελάχιστη τιμή για κάθε δεδομένη τιμή R_a της αντίστασης της κεραίας, ο λόγος $(R_a + R_t)/R_t$ πρέπει επίσης να είναι ο ελάχιστος, έτσι ώστε η R_t να είναι πολύ μεγαλύτερη από την R_a . Αυτό αποτελεί, στην πραγματικότητα, μία κατάσταση που κατορθώνεται πολύ συχνά στην πρακτική, και η οποία τώρα μπορεί να εφαρμοστεί στην εξίσωση (2-23). Κάτω από αυτές τις αταίριαστες (mismatched) συνθήκες, ο λόγος $(R_a + R_t)/R_t$ προσεγγίζει τη μονάδα, και η σχέση για την εικόνα του θορύβου μειώνεται στο

$$F = 1 + \frac{R'_{eq}}{R_a} \quad (2-24)$$

Αυτή είναι μια πολύ σημαντική σχέση, αλλά πρέπει να θυμόμαστε ότι εφαρμόζεται μόνο κάτω από ασύμφωνες (mismatched) συνθήκες. Κάτω από

σύμφωνες (mismatched) συνθήκες ($R_t=R_a$) ή όταν η ασυμφωνία δεν είναι σοβαρή, θα πρέπει να χρησιμοποιείται η εξίσωση (2-23).

- **Παράδειγμα 2-4:** Υπολογίστε την εικόνα θορύβου για τον ενισχυτή του παραδείγματος 2-3 εάν αυτός οδηγείται από έναν γεννήτορα του οποίου η εμπέδηση εξόδου είναι 50Ω . (Σημειώστε ότι αυτό απαρτίζεται από αρκετά μεγάλη ασυμφωνία.)

$$R'_{eq} = R_{eq} - R_t = 2518 - 600 = 1918 \Omega$$

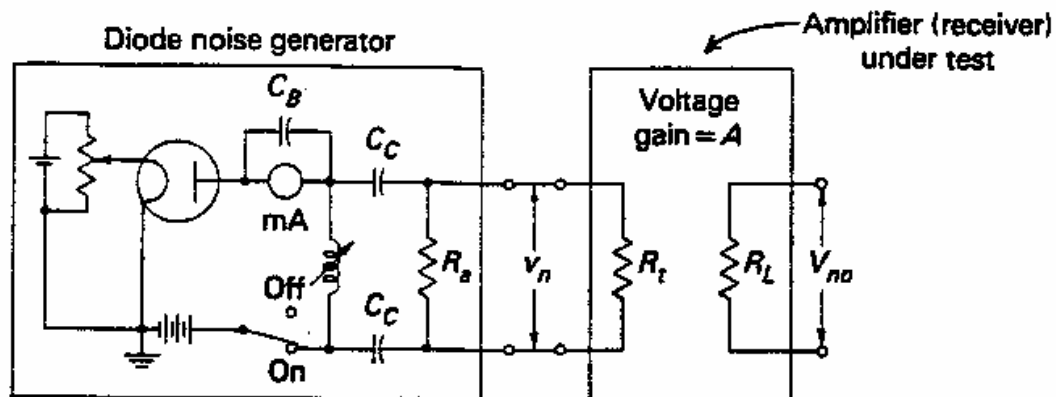
$$F = 1 + \frac{R'_{eq}}{R_a} = 1 + 38.4$$

$$= 39.4 \quad (=15.84 \text{ dB})$$

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι εάν μία ισοδύναμη αντίσταση θορύβου μας δίνεται χωρίς κανένα άλλο σχόλιο σχετικά με υπολογισμούς που αφορούν την εικόνα του θορύβου, αυτή πρέπει υποτίθεται να είναι η R_{eq} .

2-4.5 Εικόνα Θορύβου από Μέτρηση

Η προηγούμενη παράγραφος μας έδειξε πώς μπορεί να βρεθεί η εικόνα του θορύβου εάν η ισοδύναμη αντίσταση του θορύβου είναι εύκολο να υπολογιστεί. Όταν αυτό δεν είναι δυνατό, όπως συμβαίνει όταν βρισκόμαστε κάτω από συνθήκες μεταβλητού χρόνου, είναι πιθανό να πάρουμε μετρήσεις που οδηγούν στο προσδιορισμό του δείκτη του θορύβου. Μία απλή μέθοδος, χρησιμοποιώντας [diode noise generator], είναι συχνά εφαρμόσιμο. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2-5 σε μορφή μπλοκ κυκλώματος.



Σχήμα 2-5: Μέτρηση δείκτης θορύβου

Η εξίσωση 2-3 έδωσε τη σχέση για την ακριβή θωράκιση του τρέχοντος θορύβου από μια κενή δίοδο, και αυτό μπορεί τώρα να χρησιμοποιηθεί. Όπως δείξαμε, το ανοδικό ρεύμα ελέγχεται από τα μέσα ποτενσιόμετρου το οποίο μεταβάλλει το νήμα της τάσης, και αυτό εξηγεί πώς προσαρμόζεται ο τρέχον θόρυβος.

Η χωρητικότητα εξόδου της διόδου και το κύκλωμα στο οποίο είναι συνδεδεμένη είναι συντονισμένο στη συχνότητα χειρισμού του δέκτη με μέσα ποικίλης επαγωγής, έτσι ώστε να μπορεί να αγνοηθεί. Η εμπέδηση εξόδου του γεννήτορα του θορύβου θα είναι τώρα απλά η R_a . Έτσι η τάση θορύβου που εφαρμόζεται στην είσοδο του δέκτη από τη δίοδο θα δίνεται από

$$v_n = i_n Z_n = i_n \frac{R_a R_t}{R_a + R_t} = \frac{R_a R_t \sqrt{2v_i p} \delta f}{R_a + R_t} \quad (2-25)$$

Ο γεννήτορας του θορύβου είναι συνδεδεμένος στο δέκτη (ή στον ενισχυτή) υπό έλεγχο, και η ισχύς εξόδου του θορύβου από το δέκτη μετράται με μηδενικό ρεύμα αγωγής της διόδου, για παράδειγμα, εφαρμόζοντας κλειστή τάση αγωγής της διόδου. Η τάση που εφαρμόζεται τώρα στη δίοδο είναι τώρα ανοιχτή, και το ποτενσιόμετρο νήματος προσαρμόζεται έτσι ώστε το ρεύμα της διόδου να αρχίζει να ρέει. Αυτό επιπλέον προσαρμόζεται μέχρι η ισχύς του θορύβου που αναπτύχθηκε στην R_L είναι διπλά τόσο μεγάλη όσο η ισχύς του θορύβου με απουσία της διόδου. Το [plate current] στο οποίο αυτό συμβαίνει, i_p , μετράται με το [milliammeter] και σημειώνεται. Η επιπρόσθετη ισχύς θορύβου στην έξοδο είναι τώρα ίση με τη κανονική ισχύ θορύβου στην έξοδο, έτσι ώστε η επόμενη να μπορεί να εκφραστεί στα πλαίσια του [diode plate current]. Έτσι, τώρα έχουμε

$$P_{no} = \frac{V_{no}^2}{R_L} = \frac{(A v_n)^2}{R_L} = \frac{A^2 R_a^2 R_t^2 2v_i p \delta f}{R_L (R_a + R_t)^2} \quad (2-26)$$

Όπως ήδη υπογραμμίστηκε, η εξίσωση (2-26) μπορεί να αντικατασταθεί στην εξίσωση (2-20). Αυτό αποφέρει

$$F = \frac{R_L (R_a + R_t) P_{no}}{A^2 4kT \delta f R_a R_t} = \frac{R_L (R_a + R_t)}{A^2 4kT \delta f R_a R_t} \frac{A^2 R_a^2 R_t^2 2v_i p \delta f}{R_L (R_a + R_t)^2} \\ = \frac{v_i p R_a R_t}{2kT (R_a + R_t)} \quad (2-27)$$

Εάν υποθεθεί ακόμα μια φορά ότι το σύστημα είναι ασύμφωνο και $R_t \gg R_a$ η εξίσωση απλοποιείται στην

$$F = \frac{R_a v_i p}{2kT} \quad (2-28)$$

Εάν η παραπάνω διαδικασία επαναληφθεί αμέσως από την αρχή για ένα σύστημα κάτω από σύμφωνες (mismatched) συνθήκες, μπορεί ύστερα να αποδειχθεί ότι η εξίσωση (2-28) εφαρμόζεται ακριβώς σε ένα τέτοιο σύστημα από το να είναι μία καλή προσέγγιση όπως συμβαίνει εδώ, ένα τέτοιο αποτέλεσμα δίνει έμφαση στη μέτρηση της τιμής του θορύβου στη δίοδο.

Σαν μια τελική απλοποίηση, αντικαθιστούμε στην εξίσωση (2-28) τις τιμές των ποικίλων μεταβλητών που περιέχει. Αυτό περιλαμβάνει τη δεδομένη θερμοκρασία κατά την οποία λαμβάνουν χώρα τέτοιες μετρήσεις, οι οποίες είναι 17^0 C ή 290 K. Αυτό δίνει μία σχέση η οποία αναφέρεται συχνά:

$$F = \frac{R_a v_i p}{2kT} = \frac{(R_a i_p)(1.6 \times 10^{-19})}{2 \times 290 \times 1.38 \times 10^{-23}} \\ = (R_a i_p)(2 \times 10) \\ = 20 R_a i_p \quad (2-29)$$

όπου η R_a μετράται σε Ω (ohms) και το i_p σε A (ampères).

2-5 ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΘΟΡΥΒΟΥ

Η ιδέα του δείκτη του θορύβου, αν και χρησιμοποιήθηκε συχνά, δεν είναι πάντα το πιο βολικό μέτρο του θορύβου, ειδικά όταν έχουμε να κάνουμε με UHF και χαμηλού θορύβου κεραιές μικροκυμάτων, δέκτες ή συσκευές. Αντίφαση υπάρχει θεωρώντας ποια είναι η καλύτερη μέτρηση από όλες, εκτός της θερμοκρασίας θορύβου, η οποία προήλθε από πρόσφατη εργασία στη ραδιοαστρονομία και βρίσκει εφαρμογή εκτενώς σε κεραιές και χαμηλού θορύβου ενισχυτές μικροκυμάτων. Ούτε ο τελευταίος λόγος για τη χρήση του αποτελεί ευκολία. Αυτό μπορεί να φανεί επανεξετάζοντας την εξίσωση (2-1), όπως φαίνεται παρακάτω:

$$\begin{aligned}
 P_t &= kT\delta f \\
 &= P_1 + P_2 = kT_1\delta f + kT_2\delta f \\
 kT_t\delta f &= kT_1\delta f + kT_2\delta f \\
 T_t &= T_1 + T_2
 \end{aligned} \tag{2-30}$$

όπου P_1 και $P_2 =$ δύο ξεχωριστές ισχύς θορύβου (π.χ., ελήφθησαν από την κεραιά και παράχθηκαν από αυτήν, αντίστοιχα) και P_t είναι το άθροισμά τους, T_1 και $T_2 =$ οι ξεχωριστές θερμοκρασίες θορύβου και $T_t =$ η συνολική θερμοκρασία θορύβου.

Ένα ακόμα πλεονέκτημα από τη χρήση της θερμοκρασίας θορύβου για επίπεδα χαμηλού θορύβου είναι ότι δείχνει μια μεγαλύτερη ποικιλία για οποιαδήποτε δεδομένη αλλαγή του επιπέδου του θορύβου απ' ότι κάνει η εικόνα του θορύβου και για αυτό το λόγο, οι αλλαγές είναι ευκολότερο να ελεγχθούν στη σωστή τους προοπτική.

Θα υπενθυμίσουμε ότι η ισοδύναμη αντίσταση θορύβου την οποία εισάγαμε στην παράγραφο 2-3 είναι αρκετά ψεύτικη, αλλά συχνά βρίσκει εφαρμογή λόγω της βολικότητάς της. Με παρόμοιο τρόπο, T_{eq} , η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί αν αυτό αποδειχτεί βολικό. Κατά τον προσδιορισμό της ισοδύναμης θερμοκρασίας θορύβου ενός δέκτη ή ενισχυτή, υποθέτουμε ότι η $R_{eq}' = R_a$. Εάν αυτό πρόκειται να οδηγήσει στη σωστή τιμή του θορύβου της ισχύς εξόδου, τότε προφανώς η R_{eq}' πρέπει να είναι σε μια άλλη θερμοκρασία από την δεδομένη στην οποία υποτίθεται θα έπρεπε να είναι όλα τα στοιχεία (συμπεριλαμβανομένης της R_a). Ύστερα, είναι πιθανό να χρησιμοποιήσουμε την εξίσωση (2-24) για να εξισώσουμε την εικόνα θορύβου και την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου, ως ακολούθως:

$$\begin{aligned}
 F &= 1 + \frac{R_{eq}'}{R_a} = 1 + \frac{kT_{eq}\delta f R_{eq}'}{kT_0\delta f R_a} \\
 &= 1 + \frac{T_{eq}}{T_0}
 \end{aligned} \tag{2-31}$$

όπου $R_{eq}' = R_a$, όπως υποθέσαμε στο προσδιορισμό της T_{eq}

$$T_0 = 17^\circ \text{C} = 290 \text{ K}$$

$T_{eq} =$ ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του ενισχυτή ή δέκτη της οποίας η εικόνα θορύβου είναι F .

Εδώ αξίζει να σημειώσουμε ότι το F είναι ένας λόγος και δεν εκφράζεται σε decibels. Επίσης, η T_{eq} μπορεί να επηρεαστεί από (αλλά δεν είναι σίγουρα ίση με) την πραγματική περικλείουσα θερμοκρασία του δέκτη ή του ενισχυτή. Πρέπει να επαναληφθεί ότι η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου είναι μόνο ένα βολικό

δημιούργημα της φαντασίας. Εάν όλος ο θόρυβος του δέκτη δημιουργήθηκε από την R_a , η θερμοκρασία του θα έπρεπε να ήταν η T_{eq} . Τελικά έχουμε, από την εξίσωση (2-31),

$$\begin{aligned} T_o F &= T_o + T_{eq} \\ T_{eq} &= T_o (F - 1) \end{aligned} \quad (2-32)$$

Άλλοτε η εικόνα θορύβου είναι γνωστή, η ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου πρέπει να υπολογιστεί από την εξίσωση (2-32), ή ένα νομόγραμμα πρέπει να κατασκευαστεί εάν η χρήση του είναι αρκετά συχνή ώστε να το δικαιολογήσει. Τα γραφήματα της θερμοκρασίας θορύβου διαφόρων πηγών έναντι της συχνότητας και της θερμοκρασίας του ουρανού έναντι της συχνότητας είναι επίσης διαθέσιμο

- **Παράδειγμα 2-5:** Ένας δέκτης συνδεδεμένος σε μία κεραία του οποίου η αντίσταση είναι 50Ω έχει μια ισοδύναμη αντίσταση θορύβου που έχει τιμή 30Ω . Υπολογίστε την εικόνα θορύβου του δέκτη σε decibels και την ισοδύναμη θερμοκρασία θορύβου του.

$$F = 1 + \frac{R_{eq}}{R_a} = 1 + \frac{30}{50} = 1 + 0.6 = 1.6$$

$$= 10 \log 1.6 = 10 \times 0.204 = 2.04 dB$$

$$\begin{aligned} T_{eq} &= T_o (F - 1) = 290(1.6 - 1) = 290 \times 0.6 \\ &= 174 K . \end{aligned}$$