



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ

ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**ΥΨΙΣΥΧΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΙΝΑΚΑ
ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΑΡΑΓΡΗΓΟΡΙΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2007

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

ΥΨΙΣΥΧΝΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΙΝΑΚΑ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΚΑΡΑΓΡΗΓΟΡΙΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗΣ

Επιβλέπων : Νικόλαος Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Ιουνίου 2007.

(Υπογραφή)

.....
Ν. Θεοδώρου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Π. Μπούρκας
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Καραγιαννόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2007

(Υπογραφή)

.....

ΚΑΡΑΓΡΗΓΟΡΙΟΥ ΦΩΤΕΙΝΗ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2007 – All rights reserved

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους εκείνους οι οποίοι με βοήθησαν να διεκπεραιώσω τη διπλωματική αυτή εργασία.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω θερμές ευχαριστίες στον επιβλέποντα Καθηγητή μου κύριο Ν. Θεοδώρου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε στην ανάθεση της παρούσας εργασίας και για την σημαντική βοήθειά του.

Επιπλέον, ευχαριστίες οφείλω και στα άλλα δύο μέλη τις τριμελούς επιτροπής Καθηγητές κ. Π. Μπούρκα και κ. Καραγιαννόπουλο για την συμπαράστασή τους και για τις συμβουλές τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ, επίσης, χρωστάω στην Δρ. κ. Πολυκράτη Κατερίνα, Ε.Ε.ΔΙ.Π του εργαστηρίου, διότι με την πολύτιμη καθοδήγηση και υπομονή της, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, κατάφερα να ολοκληρώσω το έργο μου.

Ακόμη, οφείλω να ευχαριστήσω τον Δρ. Κ. Ιωάννη Παπαλεωνιδόπουλο για τις επιστημονικές συμβουλές του κατά τη διάρκεια της διπλωματικής μου εργασίας.

Είμαι ιδιαίτερα ευγνώμων στους παραπάνω ανθρώπους διότι μαζί τους μου δόθηκε η ευκαιρία να διευρύνω τους ορίζοντες της γνώσης μου.

Τέλος, αφιερώνω την εργασία μου στους γονείς μου Στέλιο και Μαρία, για τους κόπους τους, τις θυσίες τους και την ατελείωτη υποστήριξή τους.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, εκπονήθηκε στον Τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Αποφάσεων και εμπίπτει στην ερευνητική περιοχή των Επικοινωνιών Γραμμών Ισχύος (Power Line Communications, PLC). Αντικείμενο της ερευνητικής αυτής περιοχής είναι η ανάπτυξη επικοινωνιακών εφαρμογών μέσα από δίκτυα, στη δομή των οποίων περιλαμβάνεται τμήμα ή τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος.

Στα πλαίσια αυτά, έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μοντέλα υψίσυχνης υποδειγματοποίησης φυσικού μέσου που εξετάζουν τη μετάδοση σήματος πληροφορίας μέσω γραμμών μεταφοράς δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Σε αυτά τα μοντέλα, οι επαφές του δικτύου έχουν θεωρηθεί ως σημεία διακλάδωσης, δηλαδή χωρίς υπολογίσιμη σύνθετη αντίσταση και επομένως χωρίς επίδραση στο διαδιδόμενο σήμα.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εξέταση της ανωτέρω παραδοχής, μέσω σειρών μετρήσεων σε επαφές του πίνακα Χαμηλής Τάσης. Η εργασία, λοιπόν, χωρίζεται σε δύο θεματικές ενότητες. Το θεωρητικό κομμάτι, ασχολείται με την ανάλυση εισαγωγικών εννοιών, καθώς και με την παρουσίαση της θεωρητικής μελέτης της συμπεριφοράς ηλεκτρικών στοιχείων σε υψηλές συχνότητες, έχοντας ως κύριο στόχο να κατατοπίσει τον αναγνώστη στο αντικείμενο. Η δεύτερη θεματική ενότητα, ασχολείται με το πειραματικό μέρος. Σε αυτήν παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας, το κύκλωμα και η διαδικασία των μετρήσεων, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων που μετρήθηκαν, η ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων, και τέλος τα σχόλια και τα συμπεράσματα που προέκυψαν.

ABSTRACT

This thesis lies in the field of Power Line Communications (PLC), aiming at the development of communication applications over the power electric network, meaning that the channel structure contains segments of the power line network.

Theoretical high frequency models have been developed in order to study the transmission of signals containing information through electrical power lines. According to these models, the electrical stationary contacts are thought as crosspoints, meaning that they show no measured complex resistance and therefore they have no affect on the transmitted signal.

The purpose of this thesis is the examination of that hypothesis, through a series of measurements at electrical contacts which can be found at a Low Voltage board. This paper is divided in two thematical units. The theoretical part, contains an analysis of basic knowledge as well as a presentation of the behaviour of electrical contacts used in high frequencies. The second part of the paper contains the experimental procedure. The scope of this thesis is presented as well as the circuit and the procedure followed in order to acquire the measurements. It also contains the results and the conclusions that have been extracted through that analysis.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΘΕΩΡΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ.....	25
1.1 ΓΕΝ <input type="checkbox"/> CheckBox1 IKA	25
1.2 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ.....	25
1.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ	26
1.3.1 Διαμόρφωση πλάτους	26
1.3.2 Μετατόπιση συχνότητας	28
1.3.3. Διαμόρφωση γωνίας	29
1.3.3.1. Διαμόρφωση φάσης	30
1.3.3.2. Διαμόρφωση συχνότητας	30
1.4 ΘΟΡΥΒΟΣ	32
1.4.1. Παράμετροι περιγραφής θορύβου	32
1.4.2. Ο θόρυβος στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα	32
1.5 ΔΙΑΥΛΟΙ	33
1.5.1 Μαθηματικά μοντέλα διαύλων.....	33
1.5.2 Χωρητικότητα διαύλου	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΓΡΑΜΜΩΝ	
ΙΣΧΥΟΣ	37
2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΙΣΧΥΟΣ	37
2.1.1 Κατάτμηση	37
2.1.2 Δομή	38
2.1.3 Τύποι δικτύου	39
2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ	41
2.2.1 Ορολογία – Αναδρομή	41
2.2.2 Τρέχουσα τάση	41
2.3 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΦΑΣΜΑΤΟΣ	43
2.4 ΔΙΑΥΛΟΙ ΓΡΑΜΜΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	42
2.5 ΠΡΟΚΡΙΝΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΥΨΙΣΥΧΝΗ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ	
ΦΥΣΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ	47
3.1 ΦΥΣΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	47
3.1.1 Διάρθρωση Μέσου	47
3.1.2 Ηλεκτρικός Προσδιορισμός	48
3.1.3 Συμβολισμός	49
3.1.4 Υπόθεση Εγκάρσιου Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου	51
3.2 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ	54
3.2.1 Παράσταση – Ερμηνεία	54
3.2.2 Κατανεμημένες Παράμετροι	55

3.2.2.1 Αντίστασης.....	55
3.2.2.2 Επαγωγής	56
3.2.2.3 Χωρητικότητα	58
3.2.2.4 Αγωγιμότητας	59
3.2.2.5 Συμβατικές παραδοχές – Συσχέτιση	60
3.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ	61
3.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ	67
3.4.1 Επίλυση στο πεδίο του χρόνου	68
3.4.2 Επίλυση στο πεδίο της συχνότητας (ημιτονική μόνιμη κατάσταση)	72
3.4.2.1 Τάση και ρεύμα ως συναρτήσεις της θέσης.....	73
3.4.2.2 Ροή ισχύος.....	77
3.4.2.3 Περίπτωση γραμμής μεταφοράς με απώλειες	78
3.5 ΟΔΕΥΟΝΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΟΔΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ	79
3.6 Υποδειγματοποίηση ηλεκτρικών επαφών	81
3.6.1 Κυκλωματική Υποδειγματοποίηση	81
3.7 Κυκλωματική υποδειγματοποίηση αγωγών	84
3.7.1 Ηλεκτρικό Πεδίο και Ρεύμα εντός Αγωγών	84
Σκοπός	89
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	93
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	93
4.2 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ.....	93
4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ	94
4.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	103
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	105
5.1 Συγκριτικοί πίνακες αποτελεσμάτων – Γραφικές παραστάσεις	105
5.2 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	151
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α'	155
ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ	157

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στα πλαίσια της ανάπτυξης επικοινωνιακών εφαρμογών μέσα από δίκτυα, στη δομή των οποίων περιλαμβάνεται τμήμα ή τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος, έχουν αναπτυχθεί θεωρητικά μοντέλα υψίσυχνης υποδειγματοποίησης φυσικού μέσου που εξετάζουν τη μετάδοση σήματος πληροφορίας μέσω γραμμών μεταφοράς δικτύου ηλεκτρικής ισχύος. Σε αυτά τα μοντέλα, οι επαφές του δικτύου έχουν θεωρηθεί ως σημεία διακλάδωσης, δηλαδή χωρίς υπολογίσιμη σύνθετη αντίσταση και επομένως χωρίς επίδραση στο διαδιδόμενο σήμα.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η εξέταση της ανωτέρω παραδοχής, μέσω σειρών μετρήσεων σε επαφές του πίνακα Χαμηλής Τάσης. Η εργασία, λοιπόν, χωρίζεται σε δύο θεματικές ενότητες. Το θεωρητικό κομμάτι, ασχολείται με την ανάλυση εισαγωγικών εννοιών, καθώς και με την παρουσίαση της θεωρητικής μελέτης της συμπεριφοράς ηλεκτρικών στοιχείων σε υψηλές συχνότητες, έχοντας ως κύριο στόχο να κατατοπίσει τον αναγνώστη στο αντικείμενο. Η δεύτερη θεματική ενότητα, ασχολείται με το πειραματικό μέρος. Σε αυτή παρουσιάζεται ο σκοπός της εργασίας, το κύκλωμα και η διαδικασία των μετρήσεων, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των στοιχείων που μετρήθηκαν, η ανάλυση και επεξεργασία των μετρήσεων, και τέλος τα σχόλια και τα συμπεράσματα που προέκυψαν. Πιο αναλυτικά:

Στο 1^ο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται εισαγωγή στη θεωρία των επικοινωνιών με παρουσίαση της δομής ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος και των χαρακτηριστικών μετάδοσης. Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται οι τρόποι διαμόρφωσης σήματος, εξετάζονται οι διάφοροι τύποι διαύλων επικοινωνίας και αναφέρονται οι παράγοντες παρεμβολών και θορύβου κατά τη μετάδοση.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται εισαγωγή στις επικοινωνίες Γραμμών Ισχύος, αναλύοντας τη κατάτμηση, τη δομή και τους τύπους δικτύων κατά την Ευρώπη, αλλά και κατά τον κόσμο. Στη συνέχεια, γίνεται επισκόπηση του αντικειμένου, εξετάζοντας τις σύγχρονες τάσεις και ανάγκες, αναφέροντας τα παγκόσμια πρότυπα και πλαίσια φάσματος και μελετώντας τη θεωρία μετάδοσης και διαμόρφωσης σημάτων Ισχύος.

Το 3^ο κεφάλαιο αναφέρεται στην υψίσυχη υποδειγματοποίηση φυσικού μέσου. Στο κεφάλαιο αυτό ορίζονται σημαντικές έννοιες και συμβολισμοί που θα χρησιμοποιηθούν στη πορεία της εργασίας. Επιπλέον, αναλύονται τα κυκλωματικά μοντέλα επαφών και γραμμών μεταφοράς και τίθεται η βάση, πάνω στην οποία θα γίνει η περαιτέρω μελέτη και διαδικασία επεξεργασίας των πειραματικών δεδομένων.

Στο πρώτο μέρος της πειραματικής ενότητας γίνεται εκτενής αναφορά του σκοπού της διπλωματικής εργασίας, αναφέροντας επίσης, και τις εφαρμογές των εξεταζόμενων θεωρητικών μοντέλων.

Στο 4^ο κεφάλαιο, απεικονίζεται η κυκλωματική διάταξη και περιγράφεται η πειραματική διαδικασία, ή οποία συνοδεύεται από τον πίνακα των μετρούμενων επαφών.

Τέλος, στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η επεξεργασία και η ανάλυση των μετρήσεων και συνοψίζοντας, ακολουθούν τα σχόλια και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΘΕΩΡΙΑ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

1.3 ΓΕΝΙΚΑ

Με τον όρο επικοινωνία (communication) εννοούμε τη μεταφορά πληροφορίας (information) από ένα σημείο σε ένα άλλο.

Η διαδικασία μεταφοράς της πληροφορίας ξεκινάει από τη στιγμή της δημιουργίας του μηνύματος (message signal), το οποίο μπορεί να είναι ήχος, εικόνα ή ψηφιακά δεδομένα. Η περιγραφή του μηνύματος, στη συνέχεια, γίνεται με συγκεκριμένη ακρίβεια, με τη χρήση συνόλου ηλεκτρικών, ακουστικών ή/ και οπτικών συμβόλων (symbol). Ύστερα, ακολουθεί η κωδικοποίηση (encoding) των συμβόλων σε μορφή κατάλληλη προς μετάδοση (transmission) στο διαθέσιμο φυσικό μέσο. Το επόμενο βήμα είναι η μετάδοση των κωδικοποιημένων συμβόλων στον επιθυμητό προορισμό. Ακολουθούν η αποκωδικοποίηση (decoding) και η αναπαραγωγή (reproduction) των αρχικών συμβόλων όταν το μεταδιδόμενο σήμα φτάσει στο προορισμό του, ενώ η αναδημιουργία (re-creation) του αρχικού μηνύματος με κάποια υποβάθμιση (degradation), η οποία οφείλεται στις ατέλειες της διαδικασίας επικοινωνίας, είναι το τελικό στάδιο.

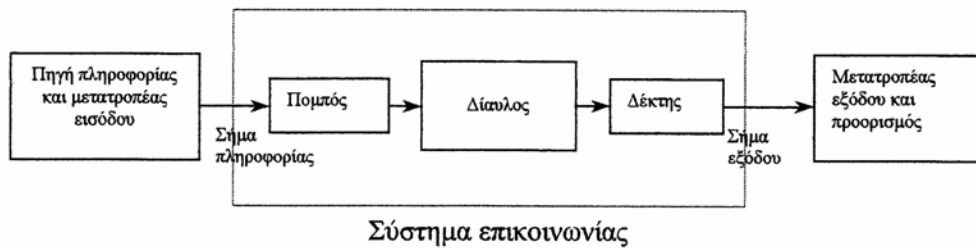
Οι όροι τηλεπικοινωνίες (telecommunications) και επικοινωνίες είναι σχεδόν συνώνυμοι και συχνά αναφέρονται ο ένας αντί του άλλου. Παρόλα αυτά, λόγω της παρατηρούμενης αλματώδους ανάπτυξης των δικτυακών (networking) εφαρμογών κατά τις τελευταίες δυο δεκαετίες, αλλά και της κυριολεκτικής διαφοροποίησης των δύο όρων, ο πρώτος τείνει να δηλώνει κυρίως τη τεχνολογία, δηλαδή τη μέθοδο με την οποία επιτυγχάνεται η μεταφορά της πληροφορίας, ενώ ο δεύτερος την εφαρμογή, δηλαδή τη λαμβανόμενη από το χρήστη (user) επικοινωνιακή υπηρεσία.

1.4 ΣΚΟΠΟΣ ΚΑΙ ΔΟΜΗ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Ο σκοπός ενός τηλεπικοινωνιακού συστήματος είναι η μετάδοση σημάτων πληροφορίας (information-bearing signals) ή σημάτων βασικής ζώνης (baseband signals), μέσω ενός διαύλου επικοινωνίας που χωρίζει τον πομπό από τον δέκτη. Ο όρος **βασική ζώνη** (baseband) χρησιμοποιείται για να ορίσουμε τη ζώνη των συχνοτήτων που παριστάνει το αρχικό σήμα, όπως αυτό στέλνεται από τη πηγή της πληροφορίας. Η αποτελεσματική χρήση του διαύλου επικοινωνίας απαιτεί μετατόπιση της περιοχής συχνοτήτων της βασικής ζώνης σε άλλες περιοχές συχνοτήτων, κατάλληλες για μετάδοση, και μια αντίστοιχη μετατόπιση πίσω προς την αρχική περιοχή συχνοτήτων, μετά τη λήψη. Για παράδειγμα, ένα ραδιοφωνικό σύστημα πρέπει να λειτουργεί σε συχνοότητες άνω των 30 kHz, ενώ το σήμα βασικής ζώνης, συνήθως, περιέχει συχνοότητες στη περιοχή των ακουστικών συχνοτήτων, ώστε το σύστημα να λειτουργεί ικανοποιητικά.

Μετατόπιση της περιοχής των συχνοτήτων ενός σήματος επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας **διαμόρφωση** (modulation), που ορίζεται ως η διαδικασία με την οποία κάποιο χαρακτηριστικό ενός φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα διαμόρφωσης. Το σήμα βασικής ζώνης αναφέρεται σαν **σήμα διαμόρφωσης** (modulating wave) και το

αποτέλεσμα της διαδικασίας διαμόρφωσης αναφέρεται ως *διαμορφωμένο σήμα* (modulated wave). Στο άκρο λήψης του τηλεπικοινωνιακού συστήματος, συνήθως, απαιτούμε την ανάκτηση του αρχικού σήματος βασικής ζώνης ή του σήματος διαμόρφωσης. Αυτό επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας μια διαδικασία γνωστή ως *αποδιαμόρφωση* (demodulation), η οποία είναι η αντίστροφη διαδικασία της διαμόρφωσης.



Σχήμα 1.1 Δομή τηλεπικοινωνιακού συστήματος.

1.3 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΣΥΝΕΧΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΜΟΡΦΗΣ:

Μελετώνται δύο οικογένειες συστημάτων διαμόρφωσης *συνεχούς κυματομορφής* (continuous-wave, CW), τα συστήματα *διαμόρφωσης πλάτους* (amplitude modulation) και τα συστήματα *διαμόρφωσης γωνίας* (angle modulation). Στη διαμόρφωση πλάτους, το πλάτος ενός ημιτονικού φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα βασικής ζώνης. Στη διαμόρφωση γωνίας, η γωνία του ημιτονικού φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα βασικής ζώνης.

1.3.1 Διαμόρφωση πλάτους

Θεωρούμε το ημιτονικό φέρον $c(t)$ που ορίζεται από

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (1.1)$$

όπου A_c είναι το πλάτος του φέροντος και f_c είναι η συχνότητα του φέροντος. Για απλούστευση έχουμε θεωρήσει ότι η φάση του φέροντος είναι μηδενική.

Έστω ότι το $m(t)$ συμβολίζει το σήμα βασικής ζώνης που μεταφέρει τη πληροφορία. Το φέρον $c(t)$ είναι ανεξάρτητο από το $m(t)$.

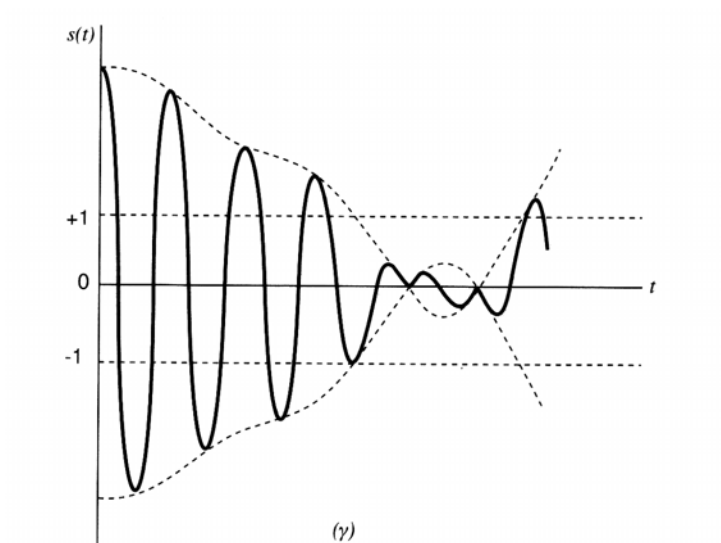
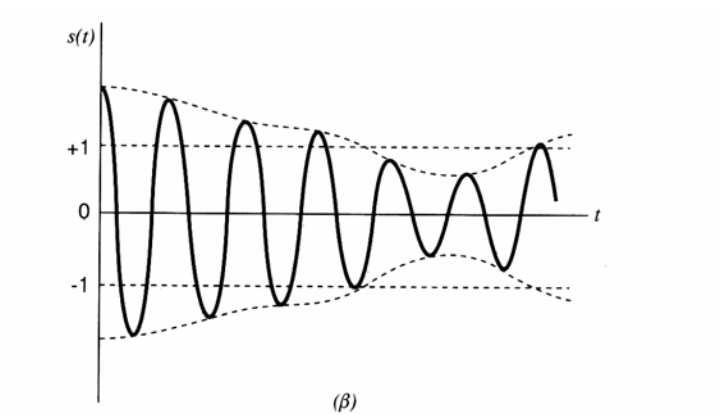
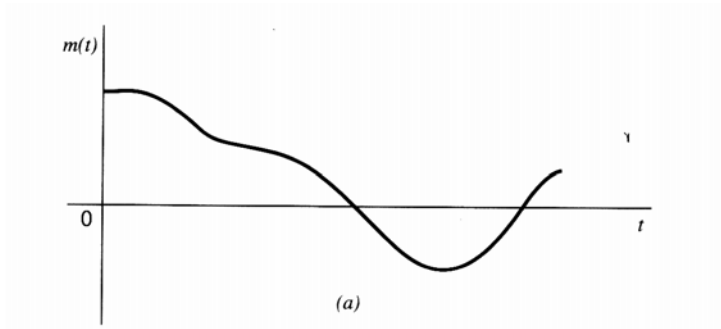
Η *διαμόρφωση πλάτους* (Amplitude Modulation, AM) ορίζεται ως η διαδικασία στην οποία το πλάτος του φέροντος $c(t)$ μεταβάλλεται γύρω από μια μέση τιμή γραμμικά σε σχέση με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$.

Μια κατά πλάτος διαμορφωμένη κυματομορφή (AM) μπορεί να περιγραφεί σε συνάρτηση χρόνου με τη μορφή

$$s(t) = A_c [1 + k_a m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (1.2)$$

όπου k_a είναι μια σταθερά που καλείται ευαισθησία πλάτους (amplitude sensitivity) του διαμορφωτή.

Το σχήμα 1.2(α) δείχνει ένα σήμα βασικής ζώνης $m(t)$ και τα τμήματα (β) και (γ) του ίδιου σχήματος δείχνουν την αντίστοιχη AM κυματομορφή $s(t)$ για δύο τιμές ευαισθησίας πλάτους k_a και πλάτους φέροντος $A_c=1$ volt.



Σχήμα 1.2 Απεικόνιση της διαδικασίας διαμόρφωσης πλάτους. (α) Σήμα βασικής ζώνης $m(t)$. (β) AM κυματομορφή για $|k_a m(t)| < 1$ για κάθε t . (γ) AM κυματομορφή για $|k_a m(t)| > 1$ για μερικά t .

1.3.2 Μετατόπιση συχνότητας

Στην επεξεργασία σημάτων σε τηλεπικοινωνιακά συστήματα, είναι συχνά βολικό ή απαραίτητο, να μεταφέρουμε τη διαμορφωμένη κυματομορφή προς τα πάνω ή προς τα κάτω σε συχνότητα, έτσι ώστε να καταλαμβάνει μια νέα περιοχή συχνοτήτων. Αυτή η μετατόπιση συχνότητας επιτυγχάνεται με πολλαπλασιασμό του σήματος με μια τοπικά παραγόμενη ημιτονική κυματομορφή και φιλτράροντας στη συνέχεια. Για παράδειγμα, θεωρούμε τη κυματομορφή

$$s(t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) \quad (1.3)$$

στην οποία το φάσμα του σήματος διαμόρφωσης $m(t)$ είναι περιορισμένο στο διάστημα $-W \leq f \leq W$. Το φάσμα της $s(t)$, επομένως, καταλαμβάνει τις ζώνες συχνοτήτων $f_c - W \leq f \leq f_c + W$ και $-f_c - W \leq f \leq -f_c + W$, όπως στο σχήμα 1.3(α). Έστω ότι απαιτείται να μετατοπίσουμε αυτή τη διαμορφωμένη κυματομορφή προς τα κάτω σε συχνότητα, ώστε η συχνότητα του φέροντος να αλλάξει από f_c σε μια νέα τιμή f_o , όπου $f_o < f_c$. Για να ικανοποιήσουμε αυτή την απαίτηση, πολλαπλασιάζουμε πρώτα την εισερχόμενη κυματομορφή $s(t)$ με ημιτονική κυματομορφή συχνότητας f_k που προέρχεται από τοπικό ταλαντωτή, για να λάβουμε

$$v_1(t) = s(t) \cos(2\pi f_k t) = m(t) \cos(2\pi f_c t) \cos(2\pi f_k t) \\ = \frac{1}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c - f_k)t] + \frac{1}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c + f_k)t] \quad (1.4)$$

Η έξοδος v_1 του πολλαπλασιαστή αποτελείται από δύο κυματομορφές, μια με συχνότητα φέροντος $f_c - f_k$ και μια άλλη με συχνότητα φέροντος $f_c + f_k$. Το φάσμα της $v_1(t)$ είναι συνεπώς, αυτό που φαίνεται στο σχήμα 1.3(β).

Έστω ότι η συχνότητα f_k του τοπικού ταλαντωτή επιλέγεται έτσι ώστε,

$$f_c - f_k = f_o$$

τότε από το σχήμα 1.3(β) παρατηρούμε πως η διαμορφωμένη κυματομορφή με την επιθυμητή συχνότητα φέροντος f_o μπορεί να εξαχθεί με διέλευση της εξόδου $v_1(t)$ του

πολλαπλασιαστή μέσω ενός βαθυπερατού φίλτρου κεντρικής συχνότητας f_0 και εύρους ζώνης $2W$, εξασφαλίζοντας ότι

$$f_c + f_k - W > f_c - f_k + W$$

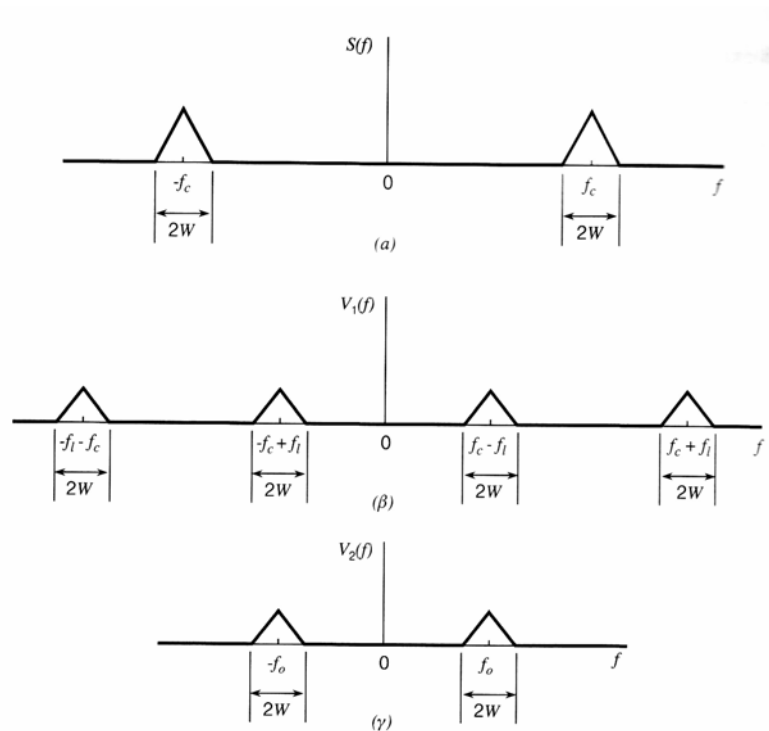
ή

$$f_k > W$$

Η έξοδος του φίλτρου είναι, συνεπώς,

$$v_2(t) = \frac{1}{2} m(t) \cos[2\pi(f_c - f_k)t] = \frac{1}{2} m(t) \cos(2\pi f_0 t) \quad (1.5)$$

Αυτή η έξοδος είναι η επιθυμητή κυματομορφή μετατοπισμένη προς τα κάτω σε συχνότητα, όπως φαίνεται στο σχήμα 1.3(γ).



Σχήμα 1.3 Απεικόνιση της διαδικασίας μετατόπισης συχνότητας. (α) Φάσμα της κυματομορφής DSBSC. (β) Φάσμα του σήματος που λαμβάνεται πολλαπλασιάζοντας τη κυματομορφή DSBSC με τοπικό φέρον. (γ) Φάσμα της επιθυμητή κυματομορφής DSBSC μετατοπισμένο προς τα κάτω σε συχνότητα.

1.3.3. Διαμόρφωση γωνίας:

Ένας άλλος τρόπος διαμόρφωσης ημιτονικής κυματομορφής είναι αυτός της *διαμόρφωσης γωνίας* (angle modulation), στην οποία η γωνία του φέροντος μεταβάλλεται σύμφωνα με το σήμα βασικής ζώνης. Σε αυτή τη μέθοδο διαμόρφωσης το πλάτος του φέροντος διατηρείται σταθερό. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης γωνίας είναι ότι μπορεί να εξασφαλίσει καλύτερη συμπεριφορά ως προς το θόρυβο και τη παρεμβολή, σε σύγκριση με τη διαμόρφωση πλάτους. Ωστόσο, αυτή η βελτίωση στην επίδοση επιτυγχάνεται με κόστος την αύξηση του εύρους ζώνης μετάδοσης. Υπάρχουν δύο μορφές διαμόρφωσης γωνίας, η *διαμόρφωση φάσης* (phase modulation) και η *διαμόρφωση συχνότητας* (frequency modulation).

Έστω ότι το $\theta_i(t)$ συμβολίζει τη γωνία ενός διαμορφωμένου ημιτονικού φέροντος που είναι συνάρτηση της πληροφορίας. Εκφράζουμε τη προκύπτουσα διαμορφωμένη κατά γωνία κυματομορφή σαν

$$s(t) = A_c \cos[\theta_i(t)] \quad (1.6)$$

όπου A_c είναι το πλάτος του φέροντος. Μια πλήρης ταλάντωση εμφανίζεται όποτε το $\theta_i(t)$ αλλάζει κατά 2π rad. Εάν το $\theta_i(t)$ αυξάνει μονότονα με το χρόνο, η μέση συχνότητα σε hertz, στο διάστημα από t έως $t+\Delta t$, δίνεται από

$$f_{\Delta t} = \frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi \Delta t} \quad (1.7)$$

Μπορούμε, λοιπόν, να ορίσουμε τη *στιγμιαία συχνότητα* (instantaneous frequency) της διαμορφωμένης κατά γωνία κυματομορφής $s(t)$ σαν

$$f_i(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} f_{\Delta t}(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left[\frac{\theta_i(t + \Delta t) - \theta_i(t)}{2\pi \Delta t} \right] = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_i(t)}{dt} \quad (1.8)$$

Έτσι, σύμφωνα με την εξ. (1.6) μπορούμε να εκλάβουμε τη διαμορφωμένη κατά γωνία κυματομορφή $s(t)$ σαν ένα περιστρεφόμενο *φασιθέτη* (phasor) μέτρου A_c και γωνίας $\theta_i(t)$. Η γωνιακή ταχύτητα ενός τέτοιου φασιθέτη είναι $d\theta_i(t)/dt$ σύμφωνα με την εξ. (1.8). Στην απλή περίπτωση ενός αδιαμόρφωτου φέροντος, η γωνία $\theta_i(t)$ είναι

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + \phi_c \quad (1.9)$$

και ο αντίστοιχος φασιθέτης περιστρέφεται με γωνιακή ταχύτητα ίση με $2\pi f_c$. Η σταθερά ϕ_c είναι η τιμή της $\theta_i(t)$ για $t=0$.

1.3.3.1. Διαμόρφωση φάσης

Διαμόρφωση φάσης (Phase Modulation-PM) είναι η μορφή διαμόρφωσης γωνίας στην οποία η γωνία $\theta_i(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$, όπως φαίνεται από τη σχέση

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + k_p m(t) \quad (1.10)$$

Ο όρος $2\pi f_c t$ παριστάνει τη γωνία του *αδιαμόρφωτου* (unmodulated) φέροντος και η σταθερά k_p παριστάνει την *ευαισθησία φάσης* (phase sensitivity) του διαμορφωτή, εκφρασμένη σε rad ανά volt. Εξυπακούεται ότι η $m(t)$ είναι κυματομορφή τάσης. Για απλούστευση έχουμε θεωρήσει στην εξίσωση (1.10) ότι η γωνία του αδιαμόρφωτου φέροντος είναι μηδέν για $t=0$. η διαμορφωμένη κατά φάση κυματομορφή $s(t)$ περιγράφεται, λοιπόν, στο πεδίο του χρόνου από:

$$s(t) = A_c \cos[2\pi f_c t + k_p m(t)] \quad (1.11)$$

1.3.3.2. Διαμόρφωση συχνότητας

Διαμόρφωση συχνότητας (Frequency Modulation-FM) είναι η μορφή της διαμόρφωσης γωνίας στην οποία η στιγμιαία συχνότητα $f_i(t)$ μεταβάλλεται γραμμικά με το σήμα βασικής ζώνης $m(t)$, όπως φαίνεται από

$$f_i(t) = f_c + k_f m(t) \quad (1.12)$$

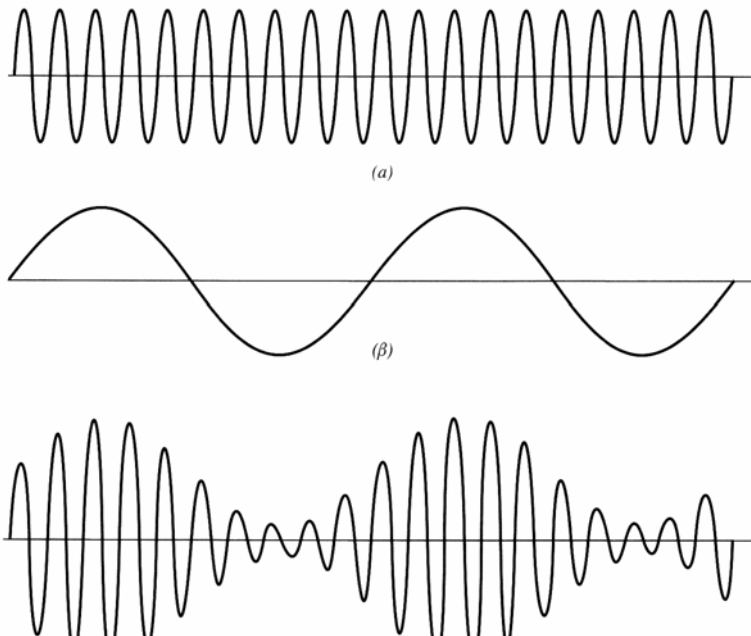
Ο όρος f_c παριστάνει τη συχνότητα του αδιαμόρφωτου φέροντος και η σταθερά k_f παριστάνει την *ευαισθησία συχνότητας* (frequency sensitivity) του διαμορφωτή, εκφρασμένη σε hertz ανά volt. Ολοκληρώνοντας την εξ. (1.12) ως προς το χρόνο και πολλαπλασιάζοντας με 2π , λαμβάνουμε

$$\theta_i(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \quad (1.13)$$

όπου, για απλούστευση, έχουμε θεωρήσει ότι η γωνία του αδιαμόρφωτου φέροντος είναι μηδέν για $t=0$. η διαμορφωμένη κατά συχνότητα κυματομορφή περιγράφεται, λοιπόν, στο πεδίο του χρόνου από

$$s(t) = A_c \cos \left[2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_0^t m(\tau) d\tau \right] \quad (1.14)$$

Οι διαφορές μεταξύ των διαμορφωμένων κατά πλάτος και των διαμορφωμένων κατά γωνία κυματομορφών απεικονίζονται στο σχήμα (1.4) για τη περίπτωση ημιτονικής διαμόρφωσης. Τα τμήματα (α) και (β) αυτού του σχήματος αναφέρονται στο ημιτονικό φέρον και το σήμα διαμόρφωσης αντίστοιχα. Τα τμήματα (γ), (δ) και (ε) δείχνουν τις αντίστοιχες κυματομορφές AM, PM και FM.



Σχήμα 1.4 Απεικόνιση των κυματομορφών AM, PM και FM που παράγονται από απλό τόνο. (α) Φέρον. (β) Ημιτονικό σήμα διαμόρφωσης. (γ) Κυματομορφή διαμορφωμένη κατά πλάτος. (δ) Κυματομορφή διαμορφωμένη κατά φάση. (ε) Κυματομορφή διαμορφωμένη κατά συχνότητα.

1.4 ΘΟΡΥΒΟΣ

Θόρυβος είναι ένα ανεπιθύμητο σήμα που δυσχεραίνει τη λειτουργία ενός συστήματος και αποτελεί το βασικό περιοριστικό παράγοντα της αξιοπιστίας του. Ο θόρυβος αποτελείται από ασυσχέτιστα σήματα διαφορετικής προελεύσεως που συντίθενται κατά τυχαίο τρόπο και περιγράφεται μαθηματικά ως τυχαία διαδικασία.

1.4.1. Παράμετροι περιγραφής θορύβου

Οι βασικές παράμετροι περιγραφής του θορύβου $n(t)$ είναι:

- i. Η μέση τιμή που ορίζεται μέσω της σχέσης

$$\overline{n(t)} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n(t) dt \quad (1.15)$$

- ii. Η μέση τετραγωνική τιμή που εκφράζει και την ισχύ του θορύβου σε μοναδιαία αντίσταση και ορίζεται μέσω της σχέσης

$$\overline{n^2(t)} = \lim_{T \rightarrow +\infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} n^2(t) dt$$

$$T \rightarrow +\infty \quad (1.16)$$

iii. Η τιμή AC του θορύβου που ορίζεται μέσω της σχέσης

$$\sigma = n(t) - \overline{n(t)} \quad (1.17)$$

iv. Ο **σηματοθορυβικός λόγος** (Signal to Noise Ratio), SNR, που ορίζεται ως λόγος της ισχύος του επιθυμητού σήματος, S, προς την ισχύ του θορύβου που το συνοδεύει, N. Συνήθως ο SNR εκφράζεται σε db, δηλαδή

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{N} \right) \quad (1.18)$$

Ο SNR είναι διαφορετικός στα διάφορα σημεία ενός συστήματος, με χαρακτηριστικό το ότι μειώνεται καθώς η επεξεργασία ενός σήματος προχωρεί από την είσοδο του συστήματος προς την έξοδό του.

v. Η **φασματική πυκνότητα ισχύος** του θορύβου, $S_n(t)$, που περιγράφει πως κατανέμεται η ισχύς του θορύβου στις διάφορες συχνότητες. Εφόσον αναφέρεται σε θετικές συχνότητες μόνο, ονομάζεται *μονόπλευρη*, ενώ όταν αναφέρεται και στις αρνητικές συχνότητες ονομάζεται *δίπλευρη*.

1.4.2. Ο θόρυβος στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα

Σε ένα τηλεπικοινωνιακό σύστημα, κάθε ενεργό δίκτυο και κάθε παθητικό δίκτυο παράγει θόρυβο που προστίθεται στο θόρυβο που εισέρχεται στο σύστημα. Στις περισσότερες εφαρμογές, ο εσωτερικός θόρυβος που παράγει ένα σύστημα είναι πολλαπλάσιος του θορύβου που εισέρχεται στο σύστημα.

Παρεμβολές τηλεπικοινωνιακών συστημάτων

Με τον όρο αυτό χαρακτηρίζεται η μερική ή ολική συνύπαρξη, στο ίδιο εύρος συχνοτήτων με το επιθυμητό σήμα, άλλων ανεπιθύμητων σημάτων. Οι παρεμβολές που δημιουργούνται σε μια τηλεπικοινωνιακή ζεύξη δρουν παράλληλα με το θόρυβο και οδηγούν σε περαιτέρω χειροτέρευση της ποιότητας του σήματος που λαμβάνει ο δέκτης.

Οι κυριότεροι λόγοι δημιουργία τηλεπικοινωνιακών παρεμβολών είναι:

- I. Η αναχρησιμοποίηση συχνότητας, δηλαδή η χρησιμοποίηση των ίδιων διαύλων συχνοτήτων από δύο ή περισσότερους χρήστες. Η τεχνική αυτή χρησιμοποιείται ευρέως στις τηλεπικοινωνίες.
- II. Η μη ιδανική συμπεριφορά των φίλτρων ραδιοσυχνοτήτων που χρησιμοποιούν οι διάφοροι πομποί και δέκτες, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία και αδυναμία καταπίεσης ανεπιθύμητων φασματικών ουρών.
- III. Η μη γραμμική ενίσχυση πολλαπλών σημάτων λόγω της οποίας προκύπτουν ανεπιθύμητα παράγωγα σήματα που λειτουργούν ως παρεμβολές.
- IV. Η αποπώλωση που προκαλεί το μέσο διάδοσης των σημάτων, φαινόμενο που οφείλεται κυρίως στη βροχή.

1.5 ΔΙΑΥΛΟΙ

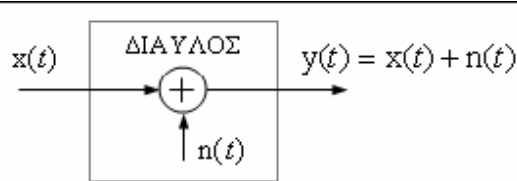
1.5.1 Μαθηματικά μοντέλα διαύλων

Δίαυλος προσθετικού θορύβου

Σε ένα δίαυλο προσθετικού θορύβου (additive noise channel) το σήμα εξόδου $y(t)$ ισούται με το σήμα εισόδου $x(t)$ συν κάποιο προσθετικό θόρυβο $n(t)$. Είναι δηλαδή,

$$y(t) = Ax(t) + n(t) \quad , \quad A \in \mathfrak{R} \quad (1.19)$$

Ο δίαυλος προσθετικού θορύβου είναι το πιο απλό μαθηματικό μοντέλο τηλεπικοινωνιακού διαύλου. Σχηματικά παριστάνεται όπως το σχήμα (1.5). Εάν ο προσθετικός θόρυβος είναι λευκός τύπου Gauss, τότε ο δίαυλος αναφέρεται ως δίαυλος προσθετικού λευκού θορύβου τύπου Gauss (Additive White Gaussian Noise Channel. AWGN Channel).



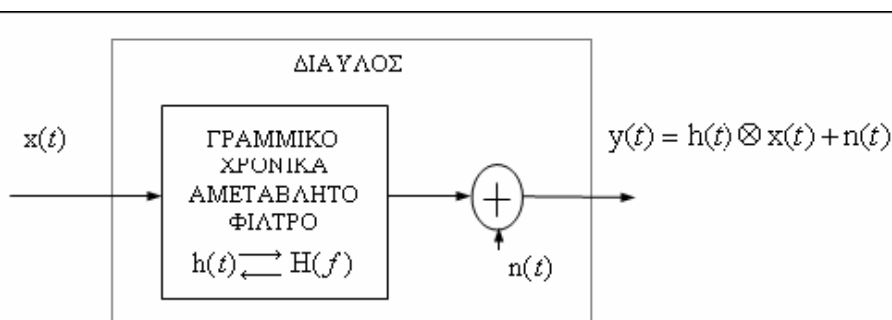
Σχήμα 1.5 Δίαυλος προσθετικού θορύβου

Δίαυλος γραμμικού χρονικά αμετάβλητου φίλτρου

Σε ένα δίαυλο γραμμικού χρονικά αμετάβλητου φίλτρου (linetime-invariant filter channel) το τμήμα εισόδου $x(t)$ περνά αρχικά από ένα γραμμικό χρονικά αμετάβλητο φίλτρο κρουστικής απόκρισης $h(t) \Leftrightarrow H(f)$. Στην έξοδο του φίλτρου υπερτίθεται προσθετικός θόρυβος και το αποτέλεσμα που προκύπτει αποτελεί το σήμα εξόδου $y(t)$:

$$y(t) = h(t) \otimes x(t) + n(t) \quad (1.20)$$

Η παραπάνω διαδικασία παριστάνεται διαγραμματικά στο σχήμα (1.6)



Σχήμα 1.6 Διάυλος γραμμικού χρονικά αμετάβλητου φίλτρου

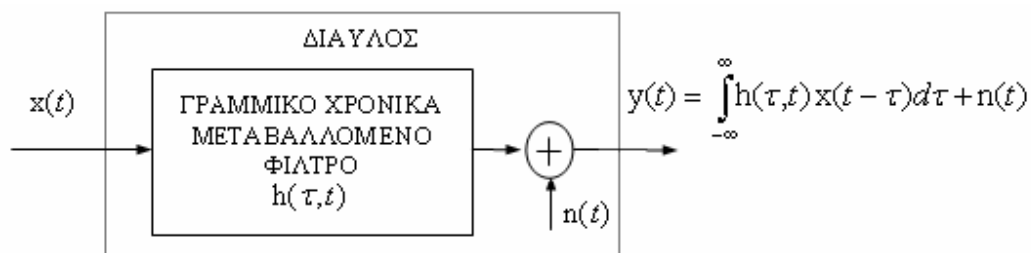
Η κρουστική απόκριση $h(t)$, η συνάρτηση μεταφοράς $H(f)$ και το εύρος ζώνης του φίλτρου, αναφέρονται αντίστοιχα και ως κρουστική απόκριση, συνάρτηση μεταφοράς και εύρος ζώνης του διαύλου.

Διάυλος χρονικά μεταβαλλόμενου γραμμικού φίλτρου

Σε ένα δίαυλο γραμμικού χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου (linear time-variant filter channel) το σήμα εισόδου $x(t)$ περνά αρχικά από ένα γραμμικό χρονικά μεταβαλλόμενο φίλτρο κρουστικής απόκρισης $h(\tau, t)$. Στην έξοδο του φίλτρου υπερτίθεται προσθετικός θόρυβος και το αποτέλεσμα που προκύπτει αποτελεί το σήμα εξόδου $y(t)$:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(\tau, t - \tau) d\tau + n(t) \quad (1.21)$$

Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται διαγραμματικά στο σχήμα (1.7)



Σχήμα 1.7 Δίαυλος γραμμικού χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου

Η κρουστική απόκριση $h(\tau, t)$, η συνάρτηση μεταφοράς $H(f, t)$ και το εύρος ζώνης του φίλτρου αναφέρονται αντίστοιχα και ως κρουστική απόκριση, συνάρτηση μεταφοράς και εύρος ζώνης του διαύλου.

1.5.2 Χωρητικότητα διαύλου

Η χωρητικότητα ενός διαύλου ορίζεται ως ο μέγιστος δυνατός ρυθμός με τον οποίο μπορούν να μεταδοθούν δυαδικά ψηφία μέσω του διαύλου χωρίς να γίνουν σφάλματα κατά την ανάκτηση στον δέκτη της μεταδιδόμενης ακολουθίας συμβόλων.

Όπως γίνεται κατανοητό από τον ορισμό, η έννοια της χωρητικότητας χρησιμοποιείται όταν έχουμε ψηφιακή μετάδοση. Με δεδομένο ότι ένα ανώτατος πεπερασμένος αριθμός σφαλμάτων στο δέκτη είναι κατά κανόνα αποδεκτός, προκύπτει το συμπέρασμα πως η χωρητικότητα ενός διαύλου αποτελεί αντιπροσωπευτικό μέτρο του μέγιστου ρυθμού μεταβίβασης δυαδικών ψηφίων που μπορεί να επιτευχθεί στη πράξη.

Έστω, τώρα, ότι έχουμε ένα δίαυλο που μοντελοποιείται ως ένας ιδανικός ζωνοπερατός δίαυλος εύρους ζώνης B , στην έξοδο του οποίου υπερτίθεται προσθετικός

λευκός θόρυβος τύπου Gauss φασματικής πυκνότητας ισχύος S_n . Αν σε ένα τέτοιο δίαυλο μεταδώσουμε ένα σήμα μέσης ισχύος P_s τότε σύμφωνα με το θεώρημα Hartley-Shannon η χωρητικότητα του διαύλου ισούται με:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_s}{B \cdot S_n} \right) \quad (1.22)$$

Αν έχουμε ένα δίαυλο άλλου διαφορετικού τύπου, τότε το αποτέλεσμα που μας δίνει η σχέση (1.22), όταν θέσουμε το S_n ίσο με τη μέση φασματική πυκνότητα ισχύος θορύβου του διαύλου, λαμβάνεται ως το κάτω φράγμα της χωρητικότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΕΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΙΣΧΥΟΣ

2.1.1 Κατάτμηση

Επίπεδα τάσης

Διακρίνονται τρία επίπεδα τάσης (voltage) κατά μήκους του Ηλεκτρικού Δικτύου Ισχύος (ΗΔΙ):

α) Υψηλή Τάση (High Voltage, HV), ΥΤ, που είναι μεγαλύτερη από 35kV. Όταν παίρνει τιμές που ξεπερνούν τα 275kV τότε αναφέρεται ως Υπερ-Υψηλή Τάση (Extra-High Voltage, EHV), ΥΥΤ.

β) Μέση Τάση (Medium Voltage, MV), ΜΤ, η οποία κυμαίνεται από 1kV έως 35kV.

γ) Χαμηλή Τάση (Low Voltage, LV), ΧΤ, που κυμαίνεται από 100V έως 1kV.

Οι παραπάνω τιμές αναφέρονται στην ενεργό τιμή (rms value) της πολικής τάσης (line voltage) τριφασικού συστήματος.

Τμήματα δικτύου

Το ΗΔΙ αποτελείται από τέσσερα τμήματα:

α) Το εσωτερικό δίκτυο (in-house network) των καταναλωτών (consumer) ή Δίκτυο Κατανάλωσης (consumer network), ΔΚ. Ως καταναλωτής θεωρείται οποιοσδήποτε κτιριακός χώρος /συγκρότημα με ανεξάρτητη παροχή ηλεκτρικής ισχύος (electric power supply). Για κάθε ανεξάρτητη παροχή ηλεκτρικής ισχύος υπάρχει ένας μετρητής (meter) της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Το ΔΚ οποιοδήποτε καταναλωτή ξεκινά από την έξοδο του μετρητή και φτάνει μέχρι το τέλος των εσωτερικών γραμμών διανομής (in-house distribution line). Το ΔΚ οικιακών (residential) και εμπορικών (commercial) καταναλωτών λειτουργούν αποκλειστικά σε ΧΤ. Δε συμβαίνει το ίδιο για βιομηχανικούς (industrial) καταναλωτές.

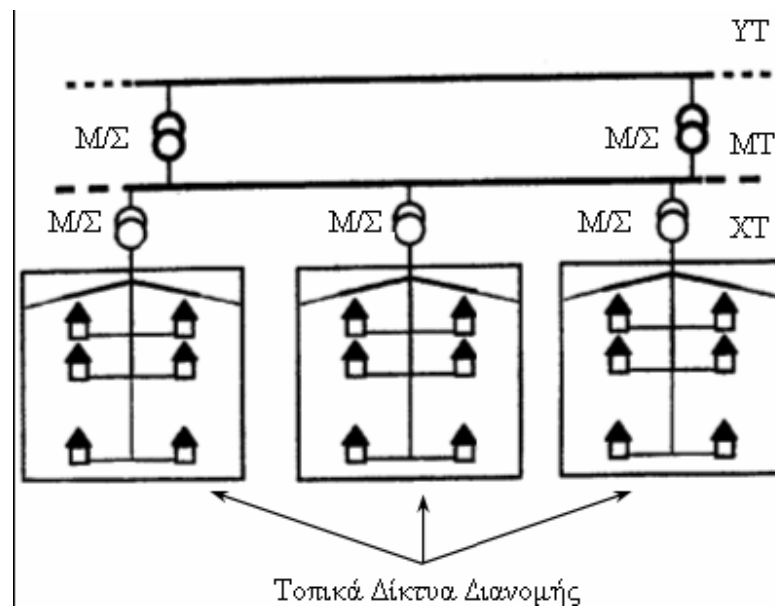
β) Το Δίκτυο Διανομής, ΔΔ, με το οποίο η ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Το ΔΔ εκτείνεται μέσα στην περιοχή κατανάλωσης και φτάνει μέχρι τους μετρητές των καταναλωτών. Είναι πιθανό να περιλαμβάνει υποσταθμούς (substation) υποβιβασμού τάσης, αλλά το τοπικό (local) ΔΔ ή δίκτυο πρόσβασης (access network) που συνδέεται με τους καταναλωτές λειτουργεί σε τάση ίση με αυτή του εκάστοτε ΔΚ.

γ) Το Δίκτυο Μεταφοράς (transmission network), ΔΜ, με το οποίο η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται από τους σταθμούς παραγωγής στους υποσταθμούς των περιοχών κατανάλωσης, από όπου ξεκινούν τα ΔΔ. Το ΔΜ λειτουργεί σε υψηλή τάση η οποία είναι κατά κανόνα εναλλασσόμενη (alternating). Υπάρχουν πάντως και ΔΜ που λειτουργούν με συνεχή ΥΤ.

2.1.2 Δομή

Εγκάρσια

Στο σχήμα 2.1 παριστάνεται η εγκάρσια δομή του ΗΔΙ. Φαίνονται δηλαδή τα διαδοχικά επίπεδα τάσης του δικτύου. Ως υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης χρησιμοποιούνται Μετασχηματιστές (transformer), Μ/Σ.

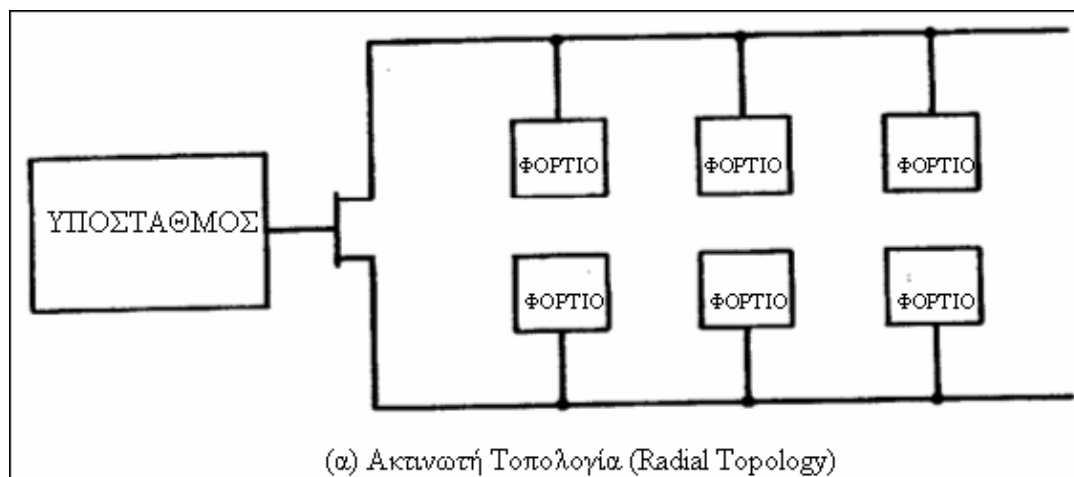


Σχήμα 2.1 Εγκάρσια δομή του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος

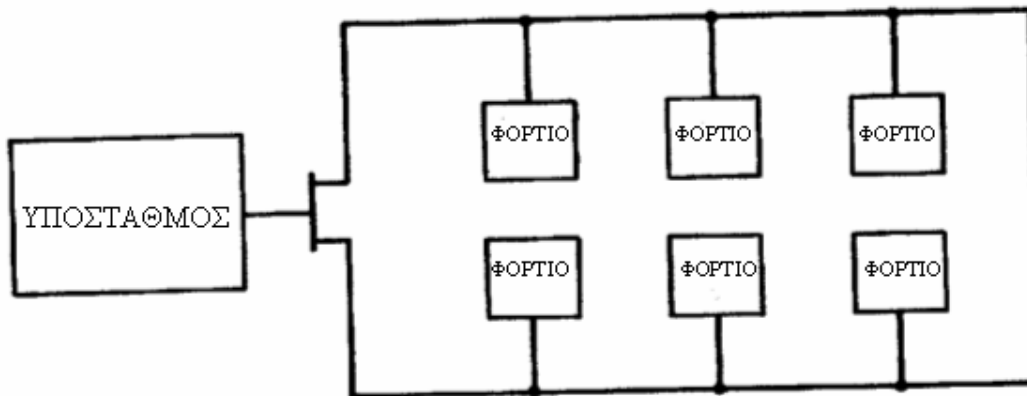
Ως φορτία ή καταναλώσεις (consumer) για ένα τμήμα ΥΤ ή ΜΤ του δικτύου θεωρούνται οι μετασχηματιστές που συνδέονται σε αυτό το τμήμα και σε κάποιο χαμηλότερο επίπεδο τάσης.

Οριζόντια

Το σχήμα 2.2 που βρίσκεται στην επόμενη σελίδα αφορά την οριζόντια δομή του ΗΔΙ και φαίνονται οι δυο πιθανές τοπολογίες του κάθε επιπέδου σταθερής τάσης.



(α) Ακτινωτή Τοπολογία (Radial Topology)



(β) Βροχοειδής Τοπολογία (Loop Topology)

Σχήμα 2.2 Τοπολογίες οριζόντιας δομής του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος

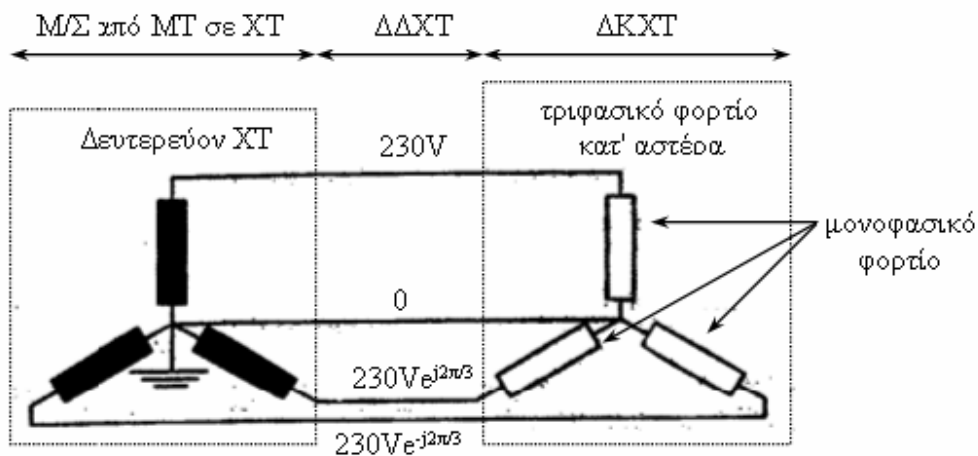
Τμήματα δικτύων ΜΤ ενδέχεται να συνενώνονται σχηματίζοντας βρόχο ο οποίος όμως κατά τη λειτουργία να παραμένει ανοικτός. Αυτή η περίπτωση ισοδυναμεί με ακτινωτή τοπολογία. Τα δίκτυα ΧΤ (ΔΔ, ΔΚ) έχουν αποκλειστικά ακτινωτή τοπολογία.

2.1.3 Τύποι δικτύου

Ευρωπαϊκό

Το δίκτυο ΜΤ λειτουργεί με τριφασική εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 50Hz. Οι Μ/Σ από ΜΤ σε ΧΤ είναι τριφασικά φορτία με κατ' αστέρα σύνδεση (star connection) του ΧΤ δευτερεύοντος (secondary). Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.1-3. Ο ουδέτερος του ΔΔΧΤ υπάρχει το ενδεχόμενο να είναι γειωμένος. Η ονομαστική (nominal) φασική ΧΤ είναι 230V και η αντίστοιχη πολική είναι 400V. Κάθε καταναλωτής ΧΤ λαμβάνει τον ουδέτερο (neutral) και μια, δυο ή τρεις φάσεις του τριφασικού ΔΔ. Η άμεση γείωση (direct grounding), δηλαδή η εγκατάσταση διάταξης ηλεκτροδίων μέσα στο έδαφος, και η ουδετέρωση (neutralization), δηλαδή η σύνδεση του αγωγού γείωσης με το γειωμένο ουδέτερο του ΔΔ, είναι οι δυο μέθοδοι γείωσης που υιοθετούνται στα ΔΚΧΤ. Κατά κανόνα εγκαθίσταται άμεση γείωση. Η συνύπαρξη των δυο τύπων γείωσης στο ίδιο ΔΚ δεν επιτρέπεται. Στους οικιακούς και εμπορικούς καταναλωτές τα συνδεδεμένα φορτία είναι είτε μονοφασικά, οπότε συνδέονται με τη φάση και τον ουδέτερο, είτε τριφασικά, οπότε συνδέονται σε αστέρα. Ως οικιακοί καταναλωτές θεωρούνται και παραγωγικές μονάδες μικρής ισχύος, τα τριφασικά φορτία των οποίων δεν απαιτούν παροχή πολικής τάσης. Ο Ευρωπαϊκός τύπος ΗΔΙ ακολουθείται στην ηπειρωτική Ευρώπη, στο Ηνωμένο

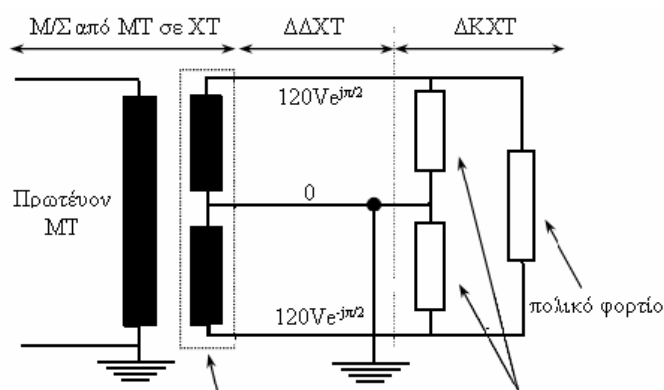
Βασίλειο, με κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τις ονομαστικές τιμές των επιπέδων τάσης, καθώς και σε τρίτες χώρες.



Σχήμα 2.3 Αρχή κυκλωματικής συνδεσμολογίας ΧΤ στο Ευρωπαϊκό ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος.

Αμερικάνικο

Το δίκτυο ΜΤ λειτουργεί με τριφασική εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 60Hz. Οι Μ/Σ από ΜΤ σε ΧΤ είναι μονοφασικά φορτία με σύνδεση διαιρούμενης φάσης (split phase connection) του ΧΤ δευτερεύοντος. Αυτό φαίνεται στο σχήμα 2.1-4 που βρίσκεται στην επόμενη σελίδα. Υπάρχει ενδεχόμενο να είναι γειωμένος ο ουδέτερος του ΔΔΧΤ ο οποίος βρίσκεται υπο διφασική (biphase) ΧΤ ζεύγους φασικών τάσεων που έχουν διαφορά φάσης 180ο. Η ονομαστική φασική ΧΤ είναι 120V και η αντίστοιχη πολική είναι 240V. Κάθε καταναλωτής ΧΤ λαμβάνει τις δυο φάσεις του ΔΔ και τον ουδέτερο. Η άμεση γείωση (direct grounding), δηλαδή η εγκατάσταση διάταξης ηλεκτροδίων μέσα στο έδαφος, και η ουδετέρωση (neutralization), δηλαδή η σύνδεση του αγωγού γείωσης με το γειωμένο ουδέτερο του ΔΔ, είναι οι δυο μέθοδοι γείωσης που υιοθετούνται στα ΔΚΧΤ. Κατα κανόνα εγκαθίσταται άμεση γείωση. Η συνύπαρξη των δυο τύπων γείωσης στο ίδιο ΔΚ δεν επιτρέπεται. Ο Αμερικανικός τύπος ΗΔΙ ακολουθείται στην Αμερική, στην Ιαπωνία, με κάποιες διαφοροποιήσεις ως προς τις ονομαστικές τιμές των επιπέδων τάσης, καθώς και σε τρίτες χώρες.



Σχήμα 2.4 Αρχή κυκλωματικής συνδεσμολογίας ΧΤ στο Αμερικάνικο ηλεκτρικό δίκτυο ισχύος.

2.2 ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟΥ

2.2.1 Ορολογία – Αναδρομή

Ως Επικοινωνίες Γραμμών Ισχύος (Power-Line Communications, PLC), ΕΓΙ, ή Τηλεπικοινωνίες Γραμμών Ισχύος (Power-Line Telecommunications), ΤΓΙ, αναφέρεται στη διεθνή επιστημονική και τεχνική βιβλιογραφία η τεχνολογία επικοινωνίας στην οποία ο δίαυλος μετάδοσης περιλαμβάνει τμήμα ή τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος (power electric network). Συνήθως ο πρώτος όρος (ΕΓΙ) χρησιμοποιείται για ενδοκτηριακές (in-house) επικοινωνιακές εφαρμογές μέσω των εσωτερικών δικτύων ΧΤ των καταναλωτών, ενώ ο δεύτερος (ΤΓΙ) στην παροχή τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών (telecommunication service) μέσω του ΔΔ, με την ενσωμάτωση σε αυτό λειτουργιών τοπικής πρόσβασης (local access). Ως Φερέσυχη Σηματολόγηση Γραμμών Ισχύος (Power-Line Carrier-Frequency Transmission), ΦΣΓΙ, αναφέρεται η επικοινωνία μέσω του δικτύου μεταφοράς με χρήση αναλογικής διαμόρφωσης συνεχούς κυματομορφής και πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας κατά μήκος των Χαμηλών Συχνοτήτων (ΧΣ) και των Πολύ Χαμηλών Συχνοτήτων (ΠΧΣ). Ως Παλμοτονική Σηματολόγηση Γραμμών Ισχύος (Ripple Carrier Power-Line Signalling), ΠΣΓΙ, αναφέρεται η επικοινωνία δεδομένων (data communication) μέσω του ΔΔ με χρήση ψηφιακής διαμόρφωσης συνεχούς κυματομορφής με μετατόπιση πλάτους ή συχνότητας και / ή πολύπλεξης διαίρεσης χρόνου κατά μήκος των ΠΧΣ.

Η ιδέα της αξιοποίησης του ΔΔ ηλεκτρικής ισχύος για μετάδοση τηλεπικοινωνιακών σημάτων είναι εξίσου παλιά με τον τηλεγράφο. Παρ' όλα αυτά μέχρι το πρόσφατο παρελθόν η ΦΣΓΙ και η ΠΣΓΙ ήταν οι μόνες σχετικές εφαρμογές, οι οποίες επαρκούσαν μόνο για την εξυπηρέτηση αναγκών λειτουργικής διαχείρισης (operation management), επιτήρησης (monitoring), τηλε- μέτρησης (remote metering) και επίλυσης αστοχιών (troubleshooting) του ΗΔΙ. Οι πρώτες τεχνικές ΦΣΓΙ εμφανίστηκαν το 1922, ενώ η ΠΣΓΙ άρχισε να εφαρμόζεται περίπου το 1930. Η διερεύνηση της προοπτικής ανάπτυξης σύγχρονων καθαρά επικοινωνιακών εφαρμογών μέσω του ΗΔΙ ξεκίνησε κατά τη δεκαετία 1980-1990. Από τότε και μέχρι σήμερα έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες, και η πρόοδος που έχει σημειωθεί είναι πραγματικά αξιόλογη, τόσο σε

επίπεδο ακαδημαϊκής έρευνας όσο και στο πεδίο των εφαρμογών, με το σχετικό ενδιαφέρον να αυξάνεται συνεχώς.

2.2.2 Τρέχουσα τάση

Απαιτήσεις εύρους ζώνης – Αναγκαιότητα

Η από κοινού εξέλιξη της πληροφορικής (informatics) και των επικοινωνιών καθιστά ολοένα και εντονότερη την ανάγκη αύξησης του διαθέσιμου εύρους ζώνης εξαιτίας της ανάπτυξης υβριδικών εφαρμογών τηλεπληροφορικής (telematics), η σημαντικότερη και πλέον διαδεδομένη των οποίων είναι το Διαδίκτυο (Internet). Αναπτύσσονται συνεχώς νέες υπηρεσίες τηλεπικοινωνιών και δικτύων (networking) οι οποίες απευθύνονται σε εμπορικούς αλλά και οικιακούς χρήστες. Το κύριο εμπόδιο στη διάδοση των νέων αυτών εφαρμογών είναι οι απαιτούμενες επενδύσεις που πρέπει να γίνουν για την κατασκευή της απαραίτητης υποδομής διασύνδεσης η οποία θα παρέχει τις νέες αυτές υπηρεσίες στο μέγιστο δυνατό αριθμό χρηστών. Υπάρχουν σημαντικά προβλήματα όσον αφορά το παρεχόμενο εύρος ζώνης και τη δυνατότητα εύκολης πρόσβασης (access) από πολλούς χρήστες. Οι ήδη διαθέσιμες τεχνολογίες (ενσύρματες (wired), οπτικές (optical) ή ασύρματες (wireless)/ δορυφορικές (satellite)), δεν έχουν δώσει ακόμη λύση. Οι συμβατικές και χρονικά ώριμες παρουσιάζουν συχνά λειτουργικές δυσχέρειες, π.χ. εγκατάσταση και χωροθέτηση μεγάλου αριθμού καλωδίων, περιορισμένα σημεία πρόσβασης κ.λ.π., ενώ οι τεχνολογίες αιχμής συνήθως έχουν απαγορευτικό κόστος και αμφίβολη αξιοπιστία.

Επικοινωνίες γραμμών ισχύος

Όσον αφορά τις ΕΓΙ σε ενδοκτιριακό επίπεδο, εκτός από τις σχετικά απλές εφαρμογές οικιακού αυτοματισμού (home automation) και τηλεφωνίας γραμμών ισχύος (power-line telephony), ως κύριος στόχος προβάλλει η υλοποίηση Τοπικών Δικτύων (Local Area Network, LAN), ΤΔ, στα πλαίσια των ΔΚΧΤ. Η μετάδοση του τηλεπικοινωνιακού σήματος σε ΕΓΙ γίνεται αποκλειστικά μεταξύ της φάσης και του ουδέτερου. Οι προσπάθειες που γίνονται αποβλέπουν σε ρυθμούς δεδομένων περίπου 10Mbps οι οποίοι είναι εφάμιλλοι των ρυθμών μετάδοσης σε δίκτυα Ethernet. Προς τα δίκτυα Ethernet επιχειρείται να εξασφαλιστεί συμβατότητα (compatibility) και διαλειτουργικότητα (interoperability). Για την επίτευξη ρυθμών μετάδοσης της τάξης των Mbps απαιτείται χρήση της ζώνης των Υψηλών Συχνοτήτων (ΥΣ). Αυτό το συμπέρασμα προκύπτει με βάση το θεώρημα Hartley-Shannon. Η προοπτική ανάπτυξης εφαρμογών ΕΓΙ έχει δημιουργήσει παγκοσμίως έντονο ενδιαφέρον και ιδιαίτερα στην Ευρώπη, στις ΗΠΑ και στην Άπω Ανατολή (Ιαπωνία, Κορέα). Τα πρώτα προϊόντα ΤΔ έχουν ήδη εμφανιστεί. Δεδομένου του πόσο νέα είναι η τεχνολογία ΕΓΙ, η μέση απόδοση αυτών των προϊόντων κρίνεται γενικά αποδεκτή. Το κυριότερο πρόβλημα που εμφανίζει είναι η αδυναμία προδιαγραφής κατώτατου επιτεύξιμου ρυθμού δεδομένων.

Τηλεπικοινωνίες γραμμών ισχύος

Οι ΤΠΙ αποτελούν μια υποψήφια λύση για την υποστήριξη τηλεπικοινωνιακής κίνησης (telecommunication/ communication traffic) σε τοπικό (local) επίπεδο. Το ενδιαφέρον επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στην αξιοποίηση του ΔΔΧΤ, καθώς σε περίπτωση χρήσης του δικτύου ΜΤ μια ενδεχόμενη κατανομή του διαθέσιμου εύρους

ζώνης σε πολυάριθμους καταναλωτές θα προκαλούσε απαγορευτικά μεγάλο υποβιβασμό του επιτεύξιμου από κάθε χρήστη ρυθμού μετάδοσης δεδομένων. Ακόμη θα απαιτούνταν ειδικές διατάξεις παράκαμψης των Μ/Σ, το βαθυπερατό εύρος ζώνης των οποίων βρίσκεται σε περιοχή του φάσματος πολύ χαμηλότερη από την περιοχή στην οποία πρέπει να βρίσκεται το εύρος ζώνης των σημάτων ΤΓΙ. Η προοπτική δημιουργίας εφαρμογών ΤΓΙ στο ΔΔΜΤ δεν διερευνάται σημαντικά καθώς η τηλεπικοινωνιακή κάλυψη του συγκεκριμένου δικτύου κρίνεται πως είναι προτιμότερο να γίνει με οπτικά καλώδια (optical cable). Η εγκατάσταση οπτικών καλωδίων κατά μήκος των γραμμών ΥΤ αποτελεί πολύ οικονομικότερη λύση σε σχέση με τη μετάδοση σημάτων ΤΓΙ μέσω του δικτύου ΥΤ, ενώ ταυτόχρονα παρέχει και ασύγκριτα μεγαλύτερο εύρος ζώνης. Η μετάδοση τηλεπικοινωνιακού σήματος μέσω του ΔΔΧΤ είναι δυνατό να γίνει μεταξύ της φάσης και του u959 ουδέτερου ή μεταξύ των δυο φάσεων. Το ενδιαφέρον για παροχή στους καταναλωτές τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών μέσω του ΔΔ εντοπίζεται κυρίως στον Ευρωπαϊκό χώρο, αν και σχετική έρευνα γίνεται και στις ΗΠΑ. Δεδομένου του πλήθους των καταναλωτών που εξυπηρετούνται από τα ΧΤ τμήματα του ΔΔ, για να γίνει εφικτή η παροχή στοιχειωδώς ανταγωνιστικών σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών υπηρεσιών, δηλαδή να επιτευχθούν ρυθμοί τουλάχιστον 64 Kbps ανά χρήστη, απαιτείται η χρήση της ζώνης των Υψηλών Συχνοτήτων, ΥΣ. Το τελευταίο συμπέρασμα προκύπτει από το θεώρημα Hartley-Shannon. Δεν υπάρχουν ακόμη εμπορικά συστήματα ΤΓΙ σε λειτουργία παρά μόνο πρότυπες εφαρμογές που βρίσκονται στο στάδιο της δοκιμής.

2.3 ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΦΑΣΜΑΤΟΣ

Διεθνούς ισχύος

Το πρότυπο (standard) IEC 61000-3-8 της Διεθνούς Ηλεκτροτεχνικής Αρμοστείας (International Electrotechnical Commission, IEC) ορίζει τις προδιαγραφές σηματολόγησης ΤΓΙ και ΕΓΙ στο δίκτυο ΧΤ για την περιοχή συχνοτήτων 3-525kHz. Για συχνότητες μεγαλύτερες των 525kHz δεν υπάρχει κανένας κανονισμός, σύσταση ή πρόταση που να εφαρμόζεται διεθνώς και να αφορά τη σηματολόγηση στο ΗΔΙ.

Ευρώπη

Όσον αφορά τις περιοχές ΠΧΣ και ΧΣ του φάσματος, το πρότυπο EN 50065 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής Ηλεκτροτεχνικής Προτυποποίησης (Comité Européen de Normalisation Electrotechnique, CENELEC) επιτρέπει σηματολόγηση στο ΔΔΧΤ στη ζώνη 3-95kHz, ενώ οι συχνότητες 95-148.5kHz δεσμεύονται για το ΔΚΧΤ. Ως προς τις Μέσες Συχνότητες (ΜΣ) και τις ΥΣ, το πρότυπο TS 101 867 V1.1.1 του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Προτυποποίησης Τηλεπικοινωνιών (European Telecommunications Standards Institute, ETSI) που καλύπτει την τεχνολογία επικοινωνίας των δικτύων διανομής και κατανάλωσης, εκχωρεί τη ζώνη 11-30MHz για σηματολόγηση ΕΓΙ και τη ζώνη 1.6-9.4MHz για σηματολόγηση ΤΓΙ.

Η.Π.Α.

Όσον αφορά τις περιοχές ΠΧΣ, ΧΣ και ΜΣ του φάσματος, στην §15.113 του κανονισμού FCC 47 CFR Ch.I της Ομοσπονδιακής Αρμοστείας Τηλεπικοινωνιών

(Federal Communications Commission, FCC) η σηματολόγηση ΤΓΙ στο ΔΔ περιορίζεται στη ζώνη 9-490kHz.

Για το ΔΚΧΤ υπάρχει το πρότυπο HomePlug 1.0 της σύμπραξης κατασκευαστών HomePlug Powerline Alliance, η τήρηση του οποίου δεν είναι υποχρεωτική. Το HomePlug 1.0 προδιαγράφει υψίσυχνη σηματολόγηση ΕΓΙ σε συχνότητες μικρότερες των 25MHz.

Ιαπωνία

Ο Νόμος Ραδιοεπικοινωνιών (Radio Law) του Υπουργείου Δημόσιας Διαχείρισης, Εσωτερικών Υποθέσεων, Ταχυδρομείων και Τηλεπικοινωνιών (Ministry of Public Management, Home Affairs, Posts and Telecommunications) περιορίζει την τηλεπικοινωνιακή σηματολόγηση στο δίκτυο ΧΤ, διανομής και u954 κατανάλωσης, εντός της ζώνης 10-450kHz.

2.4 ΔΙΑΥΛΟΙ ΓΡΑΜΜΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

Μαθηματικό μοντέλο

Σε όλο το εύρος του αξιοποιήσιμου για ανάπτυξη επικοινωνιακών εφαρμογών μέσω του ΗΔΙ φάσματος, ΠΧΣ, ΧΣ, ΜΣ και ΥΣ, οι δίαυλοι ΕΓΙ και ΤΓΙ, που ονομάζονται Δίαυλοι Γραμμών Ισχύος (Power-Line/PL Channel), ΔΓΙ, εκδηλώνουν χρονομεταβλητότητα. Το μαθηματικό μοντέλο με το οποίο περιγράφονται είναι αυτό του γραμμικού χρονικά μεταβαλλόμενου φίλτρου κρουστικής απόκρισης $h(\tau, t)$ και συνάρτησης μεταφοράς $H(f, t)$ στην έξοδο του οποίου υπερτίθεται θόρυβος $n(t)$.

Σχέση μετάδοσης

Η χρονομεταβλητότητα των ΔΓΙ οφείλεται στις αλλαγές της τοπολογίας του δικτύου λόγω σύνδεσης (coupling) ή αποσύνδεσης (uncoupling) καταναλώσεων και/ή σε παρόμοιες λειτουργικές μεταπτώσεις (operational transition). Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα σε διαδοχικές τοπολογικές αλλαγές είναι γενικά επαρκώς μικρό τόσο σε σχέση με την ενεργό διάρκεια της μιγαδικής κρουστικής απόκρισης του διαύλου όσο και σε σχέση με τη διάρκεια συμβόλου των μεταδιδόμενων ακολουθιών διαμόρφωσης (σε περίπτωση που έχουμε ψηφιακή μετάδοση), ώστε ένας ΔΓΙ να παριστάνεται τελικά, με αμελητέα απόκλιση, ως μια διαδοχή διαύλων γραμμικού χρονικά αμετάβλητου (ΓΧΑ) φίλτρου. Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ΔΓΙ δηλαδή δίνεται από τη σχέση:

$$H(f, t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \left\{ H_k(f) [u(t - \tau_k^-) - u(t - \tau_k^+)] \right\}, \quad \tau_k^+ = \tau_{k+1}^- \quad (2.1)$$

όπου $H_k(f)$ η συνάρτηση μεταφοράς διαύλου ΓΧΑ φίλτρου ο οποίος αποτελεί το μοντέλο του θεωρούμενου ΔΓΙ για το χρονικό διάστημα (τ_k^-, τ_k^+) . Οι ΔΓΙ εμφανίζουν φασματική επιλεκτικότητα και συμπεριφέρονται στη ζώνη των ΥΣ ως πολύοδοι διαλείποντες

δίαυλοι των οποίων οι δομικές ατέλειες έχουν σταθερή χωρική διάταξη κατά τη διάρκεια κάθε διαστήματος (τ_k^- , τ_k^+) στο οποίο παραμένει σταθερή η συνάρτηση μεταφοράς $H(f,t)$.

Θόρυβος

Στο ΗΔΙ απαντώνται τα παρακάτω είδη θορύβου, καθένα από τα οποία περιγράφεται με ένα διαφορετικό μαθηματικό μοντέλο.

α) Βαθυπερατός θόρυβος κλιμακωτά μειούμενης φασματικής πυκνότητας ισχύος, το φάσμα του οποίου εκτείνεται στη ζώνη 50/60Hz, ανάλογα αν πρόκειται για ΗΔΙ Ευρωπαϊκού ή Αμερικάνικου τύπου, έως 20kHz.

β) Λευκός θόρυβος η φασματική πυκνότητα ισχύος του οποίου ανέρχεται στην ασυμπτωτικά ελάχιστη τιμή του βαθυπερατού θορύβου κλιμακωτά μειούμενης φασματικής πυκνότητας ισχύος.

γ) Θόρυβος στενής ζώνης που εκδηλώνεται σε όλο το μήκος του εξεταζόμενου φάσματος (ΠΧΣ, ΧΣ, ΜΣ και ΥΣ).

δ) Κυκλοστατικός θόρυβος κρουστικής προέλευσης.

Σε σπάνιες περιπτώσεις εκδηλώνεται κρουστικός θόρυβος πολύ μεγάλης οξύτητας (έως 2kV). Αυτός ο θόρυβος οφείλεται σε ξαφνικές λειτουργικές μεταπτώσεις ή / και σε αστοχία του ΔΔ και δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί

2.5 ΠΡΟΚΡΙΝΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΑ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ

Ψηφιακή μετάδοση

Λόγω των εξαιρετικά δυσμενών ιδιοτήτων μετάδοσης των ΔΓΙ (φασματική επιλεκτικότητα, πολύοδος διάδοση) η ψηφιακή μετάδοση αποτελεί αναγκαία επιλογή για την υλοποίηση εφαρμογών ΕΓΙ ή ΤΓΙ.

Φασματική διεύρυνση ευθείας ακολουθίας

Κατά τη φασματική διεύρυνση ευθείας ακολουθίας γίνεται μετάδοση ευρείας ζώνης του διαμορφωμένου σήματος, κάτι που μας προσφέρει τα εξής πλεονεκτήματα:

α) Λόγω φασματικής διεύρυνσης ελαττώνεται η ανά μονάδα συχνότητας μεταδιδόμενη πληροφορία και μειώνεται με αυτό τον τρόπο σε μεγάλο βαθμό η δυσμενής επίδραση της φασματικής επιλεκτικότητας.

β) Λόγω της ελάττωσης της ανά μονάδα συχνότητας μεταδιδόμενης πληροφορίας, που συνεπάγεται μείωση της δυσμενούς επίδρασης της φασματικής επιλεκτικότητας, δεν απαιτείται η γνώση της σχέσης μετάδοσης του διαύλου.

γ) Η κατασκευή του απαιτούμενου υλικού εξοπλισμού (hardware) για την υλοποίηση της φασματικής διεύρυνσης ευθείας ακολουθίας είναι εύκολη και οικονομική.

Ορθογωνική πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας

Κατά την ορθογωνική πολύπλεξη διαίρεσης συχνότητας γίνεται μετάδοση στενής ζώνης των επί μέρους διαμορφωμένων σημάτων. Τα πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας είναι τα εξής:

- α) Χάρη στη μετάδοση στενής ζώνης είναι δυνατή η μεταβίβαση της μιγαδικής περιβάλλουσας του καθενός επιμέρους σήματος χωρίς παραμόρφωση.
- β) Επειδή η μετάδοση του κάθε επιμέρους σήματος γίνεται με χαμηλούς ρυθμούς αποφεύγεται η διασυμβολική παρεμβολή.
- γ) Λόγω της ορθογωνικής διαμόρφωσης επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης του εύρους ζώνης.
- δ) Εάν είναι γνωστή η σχέση μετάδοσης του διαύλου είναι δυνατό να αποτραπεί η μετάδοση σε ζώνες βύθισης της απόκρισης πλάτους.

Φασματική καταλληλότητα

Η φασματική διεύρυνση ευθείας ακολουθίας είναι καταλληλότερη για τις ΠΧΣ, ΧΣ και ΜΣ καθώς σε αυτές τις περιοχές συχνοτήτων η παραμόρφωση των μεταδιδόμενων σημάτων και οι διαλείψεις οφείλονται κατά κύριο λόγο στη φασματική επιλεκτικότητα. Για τις ΥΣ στις οποίες τα φαινόμενα πολυόδου διάδοσης, μια συνέπεια των οποίων είναι η διασυμβολική παρεμβολή, δεσπόζουν στη διαδικασία μετάδοσης, είναι προτιμότερη η χρήση της ορθογωνικής πολύπλεξης διαίρεσης συχνότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΥΨΙΣΥΧΝΗ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΦΥΣΙΚΟΥ ΜΕΣΟΥ

3.1 ΦΥΣΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.1.1 Διάρθρωση Μέσου

Γραμμή Μεταφοράς

Γραμμή Μεταφοράς (transmission line), ΓΜ, ορίζεται ως η διάρθρωση δύο ή περισσότερων, μη επαπτόμενων επιμηκών αγωγών, διαχωριζόμενων από διηλεκτρικό, διατεταγμένων στον ίδιο επιμήκη άξονα. Κάθε ΓΜ ορίζεται από ένα ζεύγος σημείων επί του διαμήκους άξονα των αγωγών, τα οποία ονομάζονται άκρα (ends). Μια ΓΜ που αποτελείται από ένα ζεύγος αγωγών καλείται γραμμή μεταφοράς δύο αγωγών (two-conductor transmission line) ή Μονή Γραμμή Μεταφοράς (single transmission line), ΜΓΜ. Γραμμή μεταφοράς αποτελούμενη από περισσότερους από δύο αγωγούς καλείται γραμμή μεταφοράς πολλών αγωγών (multiconductor transmission line) ή Πολλαπλή Γραμμή Μεταφοράς (multiple transmission line), ΠΓΜ.

Ομογενής Γραμμή Μεταφοράς

Ομογενής Γραμμή Μεταφοράς (uniform transmission line), ΟΓΜ, ορίζεται ως η ΓΜ παράλληλων αγωγών, ίδιου μήκους, στους οποίους η εγκάρσια διατομή, η γεωμετρική διάταξη και οι διαστάσεις, τα υλικά και ιδιότητες διατηρούνται σταθερά κατά τον διαμήκη άξονα.

Η θεωρία των γραμμών μεταφοράς (transmission-line theory) που παρατίθεται αφορά σε ΟΓΜ, από τις οποίες γίνεται η προσέγγιση και για μη ομογενείς ΓΜ. Τα γεωμετρικά κέντρα των εγκάρσιων διατομών των αγωγών οποιασδήποτε ΟΓΜ ορίζουν παράλληλες γραμμές κατά τον διαμήκη άξονα της γραμμής.

Χωρική Διάταξη Ομογενών Γραμμών Μεταφοράς

Οι συμπαγείς (solid) αγωγοί διατάσσονται παράλληλα (in parallel) μεταξύ τους, και όχι απαραίτητα στο ίδιο επίπεδο. Στη περίπτωση που η ΟΓΜ αποτελείται από παράλληλη διάταξη συμπαγών αγωγών, εντός αγωγίμου περιβλήματος – κυλινδρικού (cylindrical), πολυγωνικού (polygonal) κ.λ.π. –, τότε αυτή χαρακτηρίζεται τεθωρακισμένη (shielded) και το αντίστοιχο αγωγίμο περίβλημα καλείται θωράκιση (shield). Αν πρόκειται για αγωγούς διαμπερείς ως προς τον διαμήκη άξονα υπό μορφή θωρακίσεων με διαφορετική διάμετρο, τότε οι αγωγοί αυτοί τοποθετούνται σε ομοκεντρική (concentric) μεταξύ τους διάταξη. Ο εσωτερικός (internal) αγωγός με την μικρότερη διάμετρο μπορεί να είναι συμπαγούς τύπου και οι ομοκεντρικές γραμμές είναι εξ' ορισμού τεθωρακισμένες.

3.1.2 Ηλεκτρικός Προσδιορισμός

Αναφορά Τάσης – Διάκριση Αγωγών

Γραμμή μεταφοράς $(v+1)$ αγωγών αποτελείται από (v) αγωγούς διέγερσης (excitation conductors) και από έναν (1) αγωγό αναφοράς (reference conductor) ή αγωγό επιστροφής (return conductor), ως προς τον οποίο ορίζονται σε κάθε διαμήκη θέση οι τάσεις των αγωγών διέγερσης που λέγονται τάσεις γραμμής (line voltage). Κάθε γραμμή μεταφοράς με $(v+1) > 2$ αγωγούς περιλαμβάνει (v) συζευγμένες γραμμές μεταφοράς (coupled transmission lines), η κάθε μια από τις οποίες αποτελείται από ένα αγωγό αναφοράς και τον αντίστοιχο αγωγό διέγερσης. Όσον αφορά στην διάκριση μεταξύ τους και την απαρίθμησή τους, στον αγωγό αναφοράς δίνεται μηδενικός αριθμητικός δείκτης και κάθε ένας από τους αγωγούς διέγερσης προσδιορίζεται από ένα μοναδικό ακέραιο δείκτη $\{1, \dots, v\}$.

Κυκλώματα Μεταβίβασης

Ως *κύκλωμα μεταβίβασης* (transmission circuit) ή απλώς *κύκλωμα* (circuit) του k -οστού αγωγού διεγέρσεως ή της k -οστής ΓΜ, $k=1, \dots, v$, ορίζεται στα πλαίσια των ΓΜ $(v+1) > 2$ αγωγών, το κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει τους αγωγούς της k -οστής ΓΜ και τμήμα επιφάνειας οριζόμενο από ευθύγραμμα τμήματα που φέρονται κατά τον διαμήκη άξονα μεταξύ των γεωμετρικών κέντρων των εγκάρσιων διατομών των αγωγών της k -οστής ΓΜ.

Ως *κύκλωμα μεταβίβασης* ή απλώς *κύκλωμα των αγωγών k και k'* , όπου $k, k' \in \{1, \dots, v\}$, $k \neq k'$, ορίζεται, για ΓΜ $(v+1) > 2$ αγωγών, το κύκλωμα το οποίο περιλαμβάνει τον k -οστό αγωγό διέγερσης, τον k' -οστό αγωγό διέγερσης και τμήμα επιφάνειας οριζόμενο από τα ευθύγραμμα τμήματα που φέρονται κατά τον διαμήκη άξονα μεταξύ των γεωμετρικών κέντρων των εγκάρσιων διατομών των αγωγών k και k' .

Τρόποι ρευματικής κυκλοφορίας

Ως *διαφορικός τρόπος ρεύματος* (differential current mode) ή *μεταβιβάζων τρόπος ρεύματος* (transmission-line current mode) ορίζεται η κυκλοφορία του ρεύματος, όπου η διαμήκης ένταση του ρεύματος του αγωγού αναφοράς είναι, σε κάθε θέση του διαμήκους άξονα, αντίθετη της συνισταμένης των διαμηκών εντάσεων ρεύματος του συνόλου των αγωγών διέγερσης. Κάθε ζεύγος αντίθετων διαμηκών συνιστωσών εντάσεως ρεύματος ενός αγωγού διέγερσης και του αγωγού αναφοράς ορίζεται ως διαφορικό ρεύμα (differential current), ή ρεύμα διαφορικού τρόπου (differential-mode current), ή ρεύμα μεταβιβάζοντος τρόπου (transmission-line mode current) ή ρεύμα γραμμής (line current).

Ως *κοινός τρόπος ρεύματος* (common current mode) ή *ακτινοβολών τρόπος ρεύματος* (antenna current mode) ορίζεται η κυκλοφορία ρεύματος όταν, μαζί με τον αγωγό αναφοράς, το σύνολο των αγωγών διέγερσης διαρρέονται από την ίδια διαμήκη ένταση ρεύματος, που λέγεται ρεύμα κοινού τρόπου (common-mode current) ή ρεύμα ακτινοβολούντος τρόπου (antenna-mode current)

Διέγερση – Τερματισμός – Διασύνδεση

Ως διέγερση (excitation) γραμμής μεταφοράς αναφέρεται η διέγερση τάσεων ή ρευμάτων γραμμής ή ρεύματος κοινού ρυθμού. Όσον αφορά δε για τηλεπικοινωνιακή μετάδοση, όπου το κύκλωμα μεταβίβασης ΓΜ αποτελεί τον δίαυλο ή τμήμα του διαύλου, η διέγερση του μεταβιβαστέου σήματος πραγματοποιείται στο άκρο του κυκλώματος μεταβίβασης, που λέγεται **αρχή** (origin), μέσω σύνδεσης της ίδιας της πηγής τάσης – πομπός – μεταξύ του αντίστοιχου αγωγού διεγέρσεως και του αγωγού αναφοράς. Το άλλο άκρο του κυκλώματος μεταβίβασης καλείται **πέρας** (end) και μπορεί να καταλήγει σε σειρά –σειριακή σύνδεση ομολόγων αγωγών - συνδεδεμένο με το επόμενο τμήμα του διαύλου, ή με ένα συγκεντρωμένο κλάδο (lumped) παθητικού κυκλώματος που αποτελεί φορτίο – κύκλωμα εισόδου του δέκτη – μεταξύ των αγωγών διέγερσης και αναφοράς. Διάρθρωση ΓΜ όπου ένα τουλάχιστον άκρο του κυκλώματος μεταβίβασης τερματίζεται σε δύο ή περισσότερα κυκλώματα μεταβίβασης αποτελεί δίκτυο γραμμών μεταφοράς (transmission line network).

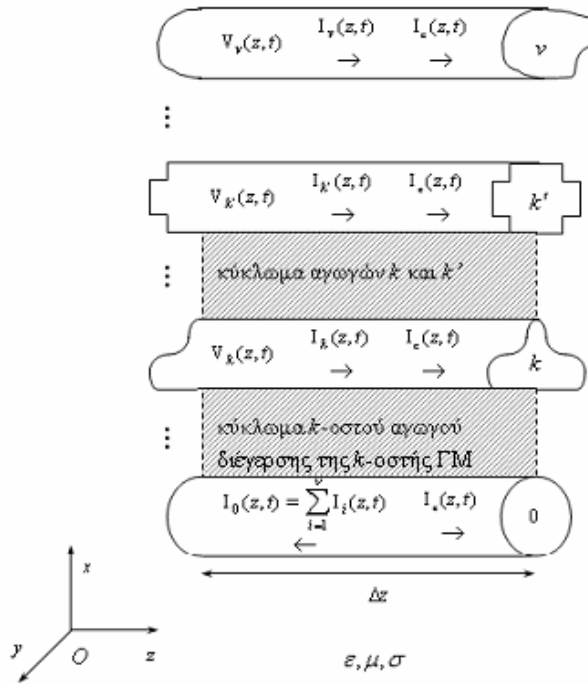
3.1.3 Συμβολισμός

Παράσταση ηλεκτρικών μεγεθών

Κατά την διαμήκη κατεύθυνση επιλέγεται ο z-άξονας. Η τιμή του k-οστού διαφορικού ρεύματος γραμμής στον z-άξονα κατά την χρονική στιγμή t παρίσταται ως $I_k(z,t)$ και η αντίστοιχη τάση γραμμής είναι $V_k(z,t)$. Το ρεύμα κοινού τρόπου της ΓΜ συμβολίζεται ως $I_c(z,t)$.

Διαμήκης Διάρθρωση

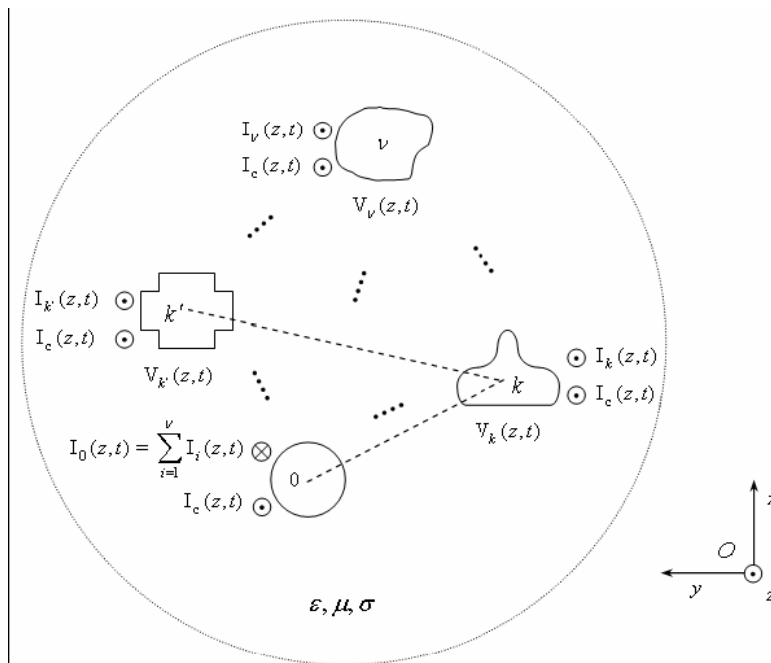
Σχηματική παράσταση της διαμήκουσ διάρθρωσης τυχαίας ΟΓΜ (v+1) παράλληλων συμπαγών αγωγών φαίνεται στο σχήμα (3.1), όπου φαίνεται ο ηλεκτρικός προσδιορισμός της γραμμής. Το κύκλωμα μεταβίβασης της k-οστής ΓΜ, καθώς και το κύκλωμα μεταβίβασης τυχαίων αγωγών στην γραμμή k και k', φαίνονται στο σχήμα με τις γραμμοσκιασμένες επιφάνειες μεταξύ των αντίστοιχων αγωγών και τον κάθετων σε αυτούς διακεκομμένων γραμμών.



Σχήμα 3.1. Διαμήκης διάρθρωση ΟΓΜ (v+1) αγωγών κατά μήκος τμήματος Δz του διαμήκους άξονα.

Εγκάρσια Διάρθρωση

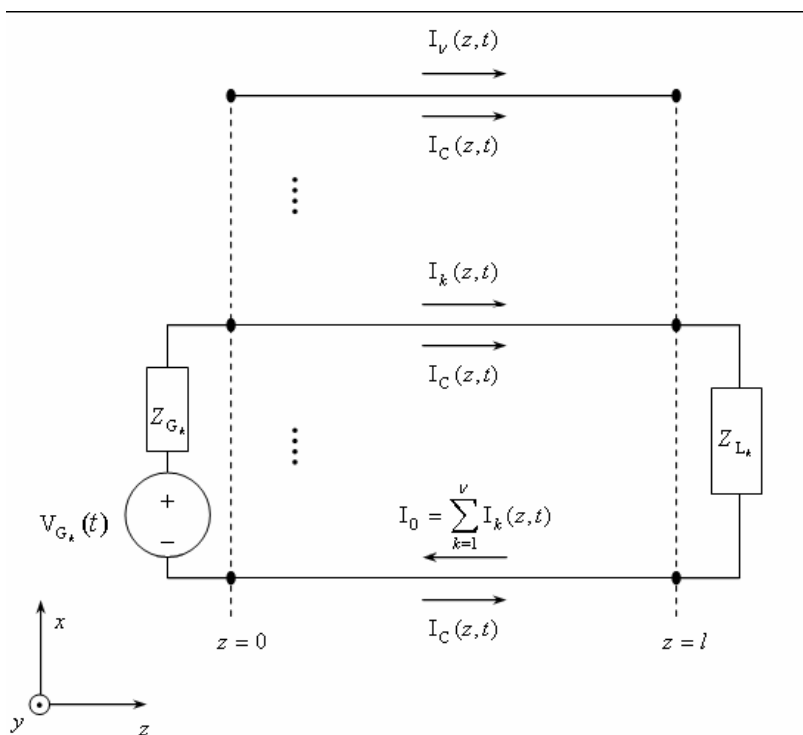
Σχηματική παράσταση πιθανής εγκάρσιας διατομής της ΟΓΜ φαίνεται στο σχήμα (3.2). Οι μεταξύ των αγωγών (k)-(0) και (k)-(k') διακεκομμένες γραμμές αποτελούν εγκάρσιες τομές των αντίστοιχων γραμμοσκιασμένων επιφανειών του σχήματος (3.1). Με την περιμετρική διακεκομμένη γραμμή παριστάνεται πιθανή κυλινδρική θωράκιση της ΓΜ.



Σχήμα 3.2 Εγκάρσια διάρθρωση ΟΓΜ ($\nu+1$) αγωγών στον z -άξονα

Κυκλωματική απεικόνιση

Διαμήκης κυκλωματική απεικόνιση κυκλώματος διεγερμένου και τερματιζόμενου σε φορτίο κυκλώματος μεταβίβασης του k -οστού αγωγού διέγερσης σε ΟΓΜ ($\nu+1$) αγωγών μήκους l φαίνεται στο σχήμα (3.3). Το μεταδιδόμενο διεγερμένο σήμα παριστάνεται ως $V_{Gk}(z,t)$, ενώ Z_{Gk} και Z_{Lk} είναι η εμπέδηση εξόδου της πηγής διέγερσης και η εμπέδηση του φορτίου τερματισμού αντιστοίχως.



Σχήμα 3.3 Διαμήκης κυκλωματική απεικόνιση διέγερσης και τερματισμού κυκλώματος μεταβίβασης k -οστού αγωγού διέγερσεως ΟΓΜ ($\nu+1$) αγωγών.

3.1.4 Υπόθεση Εγκάρσιου Ηλεκτρομαγνητικού Πεδίου

Ορισμός

Προκειμένου για ΟΓΜ, ως υπόθεση Εγκάρσιου Ηλεκτρο-Μαγνητικού Πεδίου (Transverse Electro- Magnetic, TEM), ΕΗΜ, πεδίου αναφέρεται η παραδοχή στον, από την ΓΜ, οριζόμενο χώρο εγκάρσιων του διαμήκους άξονος και μόνο συνιστωσών έντασης ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου.

Ιδιότητες

Ως συνέπεια της ΕΗΜ υπόθεσης προκύπτουν τα ακόλουθα :

- I. Σαν αγωγός αναφοράς μπορεί να επιλεγεί οποιοσδήποτε από τους αγωγούς της ΓΜ, άλλωστε και η επιλογής της μηδενικής τιμής της τάσης αναφοράς είναι αυθαίρετη.
- II. Η τάση και το ρεύμα κάθε αγωγού διέγερσης ορίζονται με μοναδικό τρόπο.
- III. Επί της ΓΜ συναντώνται ρεύματα διαφορικού τύπου και μόνο, που λέγονται ρεύματα γραμμής (line current).
- IV. Το ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο που ορίζεται από το χώρο της ΓΜ δομούνται κάθε χρονική στιγμή από την στατική (static) διέγερση.

Ισχύς

Η ΕΗΜ υπόθεση είναι, υπό αυστηρά θεωρητικό πρίσμα, έγκυρη αποκλειστικά για διαρθρώσεις ΟΓΜ υπό τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- Η ΟΓΜ αποτελείται από τέλειους αγωγούς (perfect conductor), δηλαδή άπειρης αγωγιμότητας (conductivity).
- Οι αγωγοί της ΟΓΜ βρίσκονται μέσα σε ομογενές διηλεκτρικό (homogeneous dielectric), δηλαδή χωρικά αμετάβλητων των παραμέτρων διηλεκτρικής επιτρεπτότητας (dielectric permittivity) ϵ , μαγνητικής διαπερατότητας (magnetic permeability) μ και ενδεχομένως πεπερασμένης - μη μηδενικής - αγωγιμότητας (conductivity) σ .
- Τα ισοδύναμα κυκλώματα εισόδου/εξόδου δυνητικών συγκεντρωμένων κυκλωματικών στοιχείων διέγερσης (πηγές) ή τερματισμού (φορτία) των κυκλωμάτων μεταβίβασης της ΟΓΜ είναι συμμετρικά ως προς την μεσοκάθετο των ευθύγραμμων τμημάτων μεταξύ των γεωμετρικών κέντρων των εγκάρσιων επιφανειών των αγωγών στο άκρο σύνδεσης του εν λόγω κυκλώματος μεταβίβασης. Η προκείμενη διάκριση μεταξύ συμμετρικών ή μη κυκλωμάτων φαίνεται για παράδειγμα στο σχήμα (3.4), όπου με D συμβολίζεται η απόσταση μεταξύ των γεωμετρικών κέντρων των εγκάρσιων επιφανειών των αγωγών.
- Κανένα άλλο αγώγιμο σώμα δεν βρίσκεται κοντά στην ΟΓΜ.

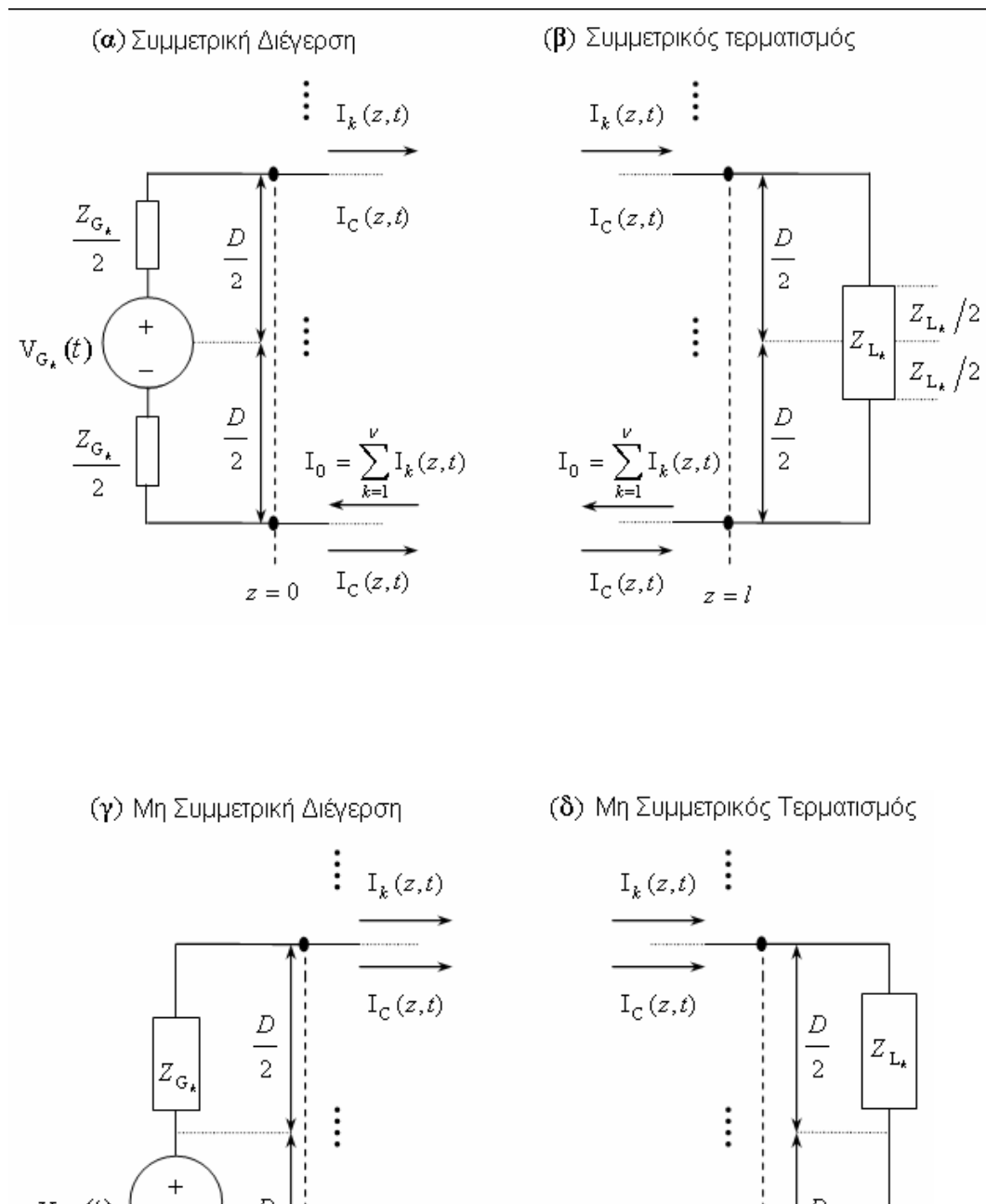
Ως συνέχεια της παραπάνω ταυτοτικής διάρθρωσης, ΟΓΜ συνιστάμενες σε συνήθεις καλούς αγωγούς (good conductor), π.χ. αργίλιο (Al), χαλκός (Cu), που βρίσκονται μέσα σε καλό διηλεκτρικό (good dielectric) εγκάρσια ομογενούς ή μη, επιδέχονται μια προσέγγιση της υπόθεσης ΕΗΜ υπό τις παρακάτω προϋποθέσεις :

- i. Το εύρος ζώνης διέγερσης είναι κάτω από 1 MHz.
- ii. Οι εγκάρσιες διαστάσεις της ΓΜ – αποστάσεις μεταξύ αγωγών και οι αντίστοιχες διατομές – παραμένουν υπό του ορίου ($\lambda/40$), όπου λ το ελάχιστο μήκος κύματος (wavelength) στο διηλεκτρικό, που αντιστοιχεί στη μέγιστη συχνότητα του εύρους ζώνης της διέγερσης.

Η παραπάνω πεπερασμένη προσέγγιση υιοθέτησης της υπόθεσης EHM καλείται Ήμι-Εγκάρσια Ηλεκτρο-Μαγνητική (Quasi-Transverse Electro-Magnetic, Quasi-TEM), HEHM, προσέγγιση, όπου υπάρχουν οι διαμήκεις συνιστώσες ηλεκτρικού η/ και μαγνητικού πεδίου, καθώς και τα εξ EHM υποθέσεως υπολογιζόμενα διαφορικά ρεύματα και οι αντίστοιχες τάσεις γραμμής προκύπτουν με αμελητέα απόκλιση από τις αντίστοιχες πραγματικές τιμές.

Φυσική σημασία – Εφαρμοσιμότητα

Η σχετική θεωρία ΓΜ βάσει της υπόθεσης EHM αφορά αποκλειστικά στην απόκριση ρεύματος και τάσης γραμμής της ΟΓΜ έναντι αντίστοιχης στην αρχή, διέγερσης κυκλώματος μεταβίβασης. Ενδεχόμενα ρεύματα κοινού τρόπου που δημιουργούνται λόγω πρόσπτωσης ηλεκτρομαγνητικού πεδίου – Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (Electro – Magnetic Interference, EMI) –, λόγω ασυμμετριών σε κλάδους τερματικών φορτίων ή πηγών διέγερσης ή από την παρουσία γεινιάζοντος αγωγίμου σώματος, είναι ανεξάρτητα των διαφορικών ρευμάτων, και πρέπει να ληφθούν υπόψη μόνο για τον υπολογισμό του πεδίου στη ΓΜ.

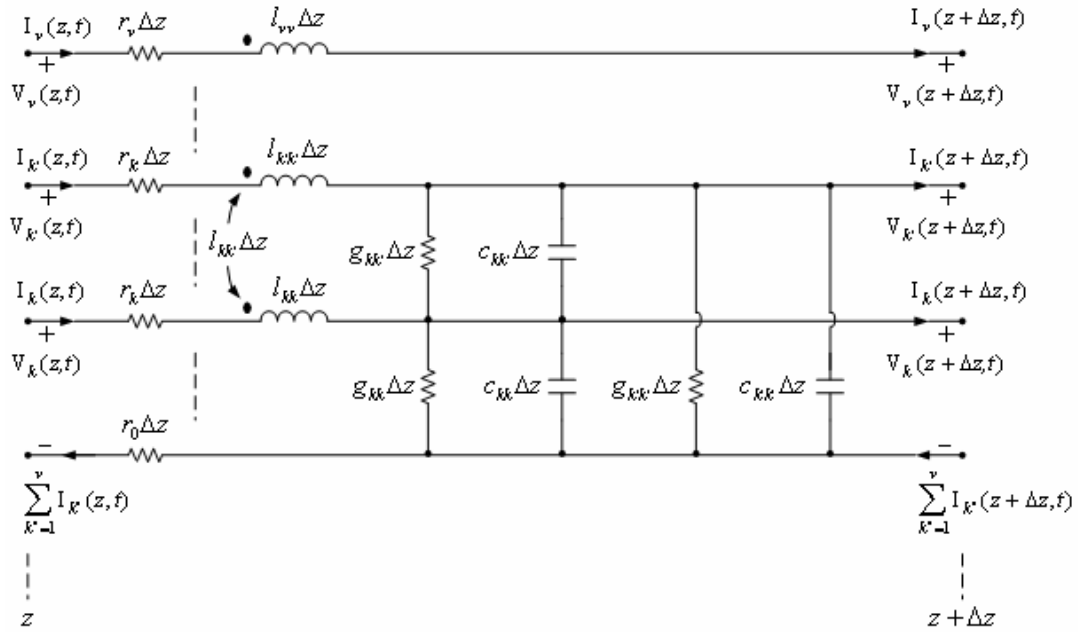


Σχήμα 3.4. Συμμετρικά και μη συμμετρικά κυκλώματα εισόδου / εξόδου σε διέγερση και τερματισμό κυκλώματος μεταβίβασης k-οστού αγωγού διεγέρσεως ΟΓΜ.

3.2 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ

3.2.1 Παράσταση – Ερμηνεία

Το ισοδύναμο κατανεμημένο κύκλωμα πολλαπλής ΟΓΜ ορίζεται σχηματικά από το σχήμα 3.5, και η φυσική τους σημασία εκφράζεται ως προς τις τάσεις και τα ρεύματα τις γραμμής σύμφωνα με τις σχέσεις (3.2-1), όπου Δz το απειροστό διάστημα κατά τον διαμήκη άξονα της γραμμής.



Σχήμα 3.5. Ισοδύναμο καταμεμημένο κύκλωμα πολλαπλής ΟΓΜ.

$$V_k(z + \Delta z, t) - V_k(z, t) = -r_k \Delta z I_k(z, t) - \sum_{k'=1}^v l_{kk'} \Delta z \frac{\partial I_{k'}(z, t)}{\partial t} - r_0 \Delta z \sum_{k'=1}^v I_{k'}(z, t) \quad (3.2-1\alpha)$$

$$I_k(z + \Delta z, t) - I_k(z, t) = -g_{kk} V_k(z + \Delta z) - \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^v g_{kk'} \Delta z [V_k(z + \Delta z) - V_{k'}(z + \Delta z)] \\ - c_{kk} V_k(z + \Delta z) - \sum_{\substack{k'=1 \\ k' \neq k}}^v c_{kk'} \Delta z [V_k(z + \Delta z) - V_{k'}(z + \Delta z)] \quad (3.2-1\beta)$$

Η σχέση (3.2-1.α) προκύπτει με εφαρμογή του ΝΤΚ για το κυκλώμα του k-οστού αγωγού διεγέρσεως, μεταξύ των διαμηκών θέσεων z και $z + \Delta z$. Η σχέση (3.2-1β) προκύπτει με εφαρμογή του ΝΡΚ για τον k-οστό αγωγό διεγέρσεως, με παρατήρηση του εισερχόμενου και του εξερχόμενου ρεύματος στις θέσεις z και $z + \Delta z$ αντίστοιχα. Οι ανά

μονάδα μήκους παράμετροι (per-unit-length parameters) του εν λόγω κυκλωματικού υποδείγματος ορίζονται στον Πίνακα 3.2-1

Σύμβολο	Παράμετρος
r_k	Ανά μονάδα μήκους αντίσταση σε σειρά (per-unit-length series resistance) k-οστού αγωγού
ℓ_{kk}	Ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή σε σειρά (per-unit-length series self inductance) κυκλώματος k-οστού αγωγού
$\ell_{kk'} (k \neq k')$	Ανά μονάδα μήκους αλληλεπαγωγή σε σειρά (per-unit-length series mutual inductance) των κυκλωμάτων k-οστού και k'-οστού αγωγού διέγερσης
c_{kk}	Ανά μονάδα μήκους εγκάρσια ίδια χωρητικότητα (per-unit-length shunt self capacitance) των κυκλωμάτων k-οστού αγωγού διέγερσης
$c_{kk'} (k \neq k')$	Ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αμοιβαία χωρητικότητα (per-unit-length shunt mutual capacitance) των κυκλωμάτων k-οστού και k'-οστού αγωγού διέγερσης
g_{kk}	Ανά μονάδα μήκους εγκάρσια ίδια αγωγιμότητα (per-unit-length shunt self conductance) των κυκλωμάτων k-οστού αγωγού διέγερσης
$g_{kk'} (k \neq k')$	Ανά μονάδα μήκους εγκάρσια αμοιβαία αγωγιμότητα (per-unit-length shunt mutual conductance) των κυκλωμάτων k-οστού και k'-οστού αγωγού διέγερσης

Πίνακας 3.2-1. Κατανεμημένες κυκλωματικές παράμετροι πολλαπλής ΟΓΜ.

3.2.2 Κατανεμημένες Παράμετροι

3.2.2.1 Αντίστασης

Η ανά μονάδα μήκους αντίσταση του k-οστού αγωγού της ΓΜ ορίζεται ως το πραγματικό μέρος της ανά μονάδα μήκους εσωτερικής εμπέδησης Z_k του αγωγού :

$$R_k = \text{Re}\{ Z_k \} \quad (3.2-2)$$

Ως μήτρα παραμέτρων αντίστασης ανά μονάδα μήκους (per-unit length resistance matrix) ορίζεται η συμμετρική μήτρα :

$$R \triangleq \begin{bmatrix} (r_1 + r_0) & r_0 & \cdots & r_0 \\ r_0 & (r_2 + r_1) & \cdots & r_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_0 & r_0 & & (r_N + r_0) \end{bmatrix} \quad (3.2-3)$$

3.2.2.2 Επαγωγής

Παράμετροι Αυτεπαγωγής

Η ανά μονάδα μήκους αυτεπαγωγή του κυκλώματος του k-οστού αγωγού διεγέρσεως προκύπτει :

$$l_{kk} \triangleq l_{kk}^{in} + l_{kk}^{ex} \quad (3.2-4\alpha)$$

όπου l_{kk}^{in} η ανά μονάδα μήκους εσωτερική αυτεπαγωγή (per-unit-length internal self-inductance) του κυκλώματος, οριζόμενη ως :

$$l_{kk}^{in} \triangleq \frac{\Psi_{kk}^{in}}{I_k} \Big|_{I_1=\dots=I_{k-1}=I_{k+1}=I_N=0} \quad (3.2-4\beta)$$

Είναι δηλαδή, ο λόγος της ανά μονάδα μήκους εσωτερικής, κάθετης στο κύκλωμα, μαγνητικής ροής των αγωγών Ψ_{kk}^{in} προς το στατικό ρεύμα γραμμής I_k που προκαλεί αυτή τη μαγνητική ροή και l_{kk}^{ex} είναι η ανά μονάδα μήκους εξωτερική αυτεπαγωγή (per-unit-length external self-inductance) του κυκλώματος οριζόμενη ως:

$$l_{kk}^{ex} \triangleq \frac{\Psi_{kk}^{ex}}{I_k} \Big|_{I_1=\dots=I_{k-1}=I_{k+1}=I_N=0} \quad (3.2-4\gamma)$$

Είναι δηλαδή, ο λόγος της ανά μονάδα μήκους εξωτερικής, κάθετης στο κύκλωμα, μαγνητικής ροής των αγωγών Ψ_{kk}^{ex} προς το στατικό ρεύμα γραμμής I_k που προκαλεί αυτή τη μαγνητική ροή, μηδενίζοντας όλα τα υπόλοιπα ρεύματα της γραμμής.

Από τον ορισμό, λοιπόν, και από τη σχέση (3.2-4β) συνεπάγεται για τον k-οστό αγωγό διεγέρσεως και τον αγωγό αναφοράς πως για ρεύμα I_k ισχύει :

$$l_{kk}^{in} = l_k^{in} + l_0^{in} \quad (3.2-5)$$

όπου l_k^{in} και l_0^{in} , η ανά μονάδα μήκους εσωτερική αυτεπαγωγή (internal inductance) του k-οστού διεγέρσεως και του αγωγού αναφοράς αντίστοιχα, που ορίζεται, για αυθαίρετη συχνότητα διεγέρσεως f και την αντίστοιχη ανά μονάδα μήκους εσωτερική εμπέδηση Z , ως :

$$l^{in} \triangleq \frac{\text{Im}\{Z\}}{2\pi f} \quad (3.2-6)$$

Παράμετροι Αλληλεπαγωγής

Η ανά μονάδα μήκους αλληλεπαγωγή των κυκλωμάτων του k-οστού και του k'-οστού αγωγού διέγερσης προκύπτει ως εξής :

$$l_{kk} \triangleq l_{kk}^{in} + l_{kk}^{ex} \quad (3.2-7\alpha)$$

όπου l_{kk}^{in} η ανά μονάδα μήκους εσωτερική αλληλεπαγωγή (per-unit-length internal mutual inductance) των κυκλωμάτων που ορίζεται ως:

$$l_{kk'}^{in} \triangleq \frac{\Psi_{kk'}^{in}}{I_{k'}} \bigg|_{I_1=\dots=I_{k'-1}=I_{k'+1}=I_N=0} \quad (3.2-7\beta)$$

ο λόγος της ανά μονάδα μήκους εσωτερικής, κάθετης στο κύκλωμα του k-οστού αγωγού διέγερσης, μαγνητικής ροής $\Psi_{kk'}^{in}$ προς το στατικό ρεύμα γραμμής $I_{k'}$, το οποίο προκαλεί αυτή τη μαγνητική ροή και $l_{kk'}^{ex}$ η ανά μονάδα μήκους εξωτερική αλληλεπαγωγή (per-unit-length external mutual inductance) των κυκλωμάτων, που ορίζεται ως :

$$l_{kk'}^{ex} \triangleq \frac{\Psi_{kk'}^{ex}}{I_{k'}} \bigg|_{I_1=\dots=I_{k'-1}=I_{k'+1}=I_N=0} \quad (3.2-7\gamma)$$

ο λόγος της ανά μονάδα μήκους εξωτερικής, κάθετης στο κύκλωμα του k-οστού αγωγού διέγερσης, μαγνητικής ροής $\Psi_{kk'}^{ex}$ προς το στατικό ρεύμα γραμμής $I_{k'}$, που προκαλεί αυτή τη μαγνητική ροή, μηδενίζοντας όλα τα υπόλοιπα ρεύματα της γραμμής.

Από τη σχέση (3.2-7β) και για μηδενικό ρεύμα από τον k-οστό αγωγό διέγερσης συνεπάγεται ότι :

$$l_{kk'}^{in} = l_0^{in} \quad (3.2-8)$$

όπου l_0^{in} η ανά μονάδα μήκους εσωτερική αυτεπαγωγή του αγωγού αναφοράς.

Μήτρα Παραμέτρων Επαγωγής

Ως μήτρα παραμέτρων επαγωγής ανά μονάδα μήκους (per-unit-length inductance matrix) ορίζεται η συμμετρική μήτρα :

$$\mathbf{L} \triangleq \begin{bmatrix} l_{11} & l_{12} & \dots & l_{1v} \\ l_{21} & l_{22} & \dots & l_{2v} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{v1} & l_{v2} & \dots & l_{vv} \end{bmatrix} \triangleq \mathbf{L}^T \quad (3.2-9)$$

όπου ο δείκτης «T» σημαίνει την ανάστροφη μήτρα, οπότε είναι :

$$\Psi = \mathbf{L}\mathbf{I} \quad (3.2-9\beta)$$

$$\text{όπου } \Psi \triangleq [\Psi_1, \Psi_2, \dots, \Psi_v]^T, \Psi_k = \sum_{k'=1}^v (\bar{\varphi}_{kk'}^{ex} + \psi_{kk'}^{in}), \quad k = 1, 2, \dots, v \quad (3.2-9\gamma)$$

το διάνυσμα των εγκάρσιων μαγνητικών ροών ανά μονάδα μήκους των αγωγών διέγερσης και

$$\mathbf{I} \triangleq [I_1, \dots, I_v]^T \quad (3.2-9\delta)$$

το διάνυσμα των ρευμάτων γραμμής. Αν ισχύει η υπόθεση EHM και η στατική πεδιακή θεώρηση, η σχέση (3.2-9β) ισχύει και στην γενική περίπτωση των χρονικά μεταβλητών ρευμάτων της γραμμής.

3.2.2.3 Χωρητικότητα

Παράμετροι αμοιβαίας χωρητικότητας

Η ανά μονάδα μήκους αμοιβαία χωρητικότητα $C_{kk'}$ των κυκλωμάτων του k-οστού και του k'-οστού αγωγού διέγερσης ορίζεται ως :

$$C_{kk'} \triangleq \left. \frac{q_{kk'}}{V_{k'}} \right|_{V_1=\dots=V_{k'-1}=V_{k'+1}=V_v=0} \quad (3.2-10)$$

και είναι το αντίθετο του λόγου της εξερχόμενης ηλεκτρικής ροής $q_{kk'}$ ανά μονάδα μήκους του k-οστού αγωγού διέγερσης προς την στατική τάση $V_{k'}$ της γραμμής που προκαλεί αυτή την ηλεκτρική ροή, με μηδενικές όλες τις υπόλοιπες τάσεις της γραμμής.

Παράμετροι ίδιας χωρητικότητας

Η ανά μονάδα μήκους ίδια χωρητικότητα $C_{kk'}$ του κυκλώματος του k-οστού αγωγού διέγερσης ορίζεται ως :

$$c_{kk} \triangleq \frac{q_{kk}}{V_k} \Big|_{V_1=\dots=V_{k'-1}=V_{k'+1}=V_v} - c_{k1} - \dots - c_{kk-1} - c_{kk+1} - \dots - c_{kv} \quad (3.2-11)$$

η διαφορά του αθροίσματος των ανά μονάδα μήκους αμοιβαίων χωρητικοτήτων του κυκλώματος του k-οστού αγωγού διέγερσης, από τον λόγο της εξερχόμενης ηλεκτρικής ροής q_{kk} ανά μονάδα μήκους του k-οστού αγωγού διέγερσης προς την στατική τάση V_k' της γραμμής που προκαλεί αυτή την ηλεκτρική ροή, με ίσες όλες τις υπόλοιπες τάσεις της γραμμής.

Μήτρα παραμέτρων χωρητικότητας

Ως μήτρα παραμέτρων χωρητικότητας ανά μονάδα μήκος (per-unit-length inductance matrix) ορίζεται η συμμετρική μήτρα :

$$C \triangleq \begin{bmatrix} \sum_{k'=1}^v c_{1k'} & -c_{12} & \dots & -c_{1v} \\ -c_{21} & \sum_{k'=1}^v c_{2k'} & \dots & -c_{2v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -c_{v1} & -c_{v2} & \dots & \sum_{k'=1}^v c_{vk'} \end{bmatrix} = C^T \quad (3.2-12\alpha)$$

και είναι $\mathbf{Q} = \mathbf{C}\mathbf{V}$ (3.2-12β)

όπου $\mathbf{Q} \triangleq [q_1 \dots q_v]^T$ (3.2-12γ)

το διάνυσμα των εξερχόμενων ηλεκτρικών ροών των αγωγών διέγερσης ανά μονάδα μήκους και

$$\mathbf{V} \triangleq [V_1 \dots V_v]^T \quad (3.2-12\delta)$$

το διάνυσμα των τάσεων γραμμής. Αν ισχύει η υπόθεση EHM και η στατική πεδιακή θεώρηση, η ισχύς της σχέσης (3.2-12β) επεκτείνεται και στην περίπτωση χρονομεταβλητών τάσεων γραμμής.

3.2.2.4 Αγωγιμότητας

Παράμετροι αμοιβαίας αγωγιμότητας

Η ανά μονάδα μήκους αμοιβαία αγωγιμότητα $g_{kk'}$ των κυκλωμάτων του k-οστού και του k'-οστού αγωγού διέγερσης ορίζεται ως :

$$g_{kk'} \triangleq -\frac{I_{kk'}^t}{V_{k'}} \Big|_{V_1=\dots=V_{k'-1}=V_{k'+1}=V_v=0}$$

(3.2-13)

ο αντίθετος του λόγου του εγκάρσιου – δια μέσου του διηλεκτρικού – αναχωρούντος ρεύματος αγωγιμότητας I_{kk}^t του k-οστού αγωγού διέγερσης, ανά μονάδα μήκους λόγω της στατικής τάσης V_k προς την τάση αυτή, για μηδενικές τιμές της τάσης όλων των υπολοίπων τάσεων της γραμμής.

Παράμετροι ίδιας αγωγιμότητας

Η ανά μονάδα μήκους ίδια αγωγιμότητα g_{kk} του κυκλώματος του k-οστού αγωγού διέγερσης ορίζεται ως :

$$g_{kk} \equiv \frac{I_{kk}^t}{V_k} \Big|_{V_1=\dots=V_{k'-1}=V_{k'+1}=\dots=V_\nu} -g_{k1} - \dots - g_{kk-1} - g_{kk+1} - \dots - g_{k\nu} \quad (3.2-14)$$

η διαφορά του αθροίσματος των ανά μονάδα μήκους αμοιβαίων αγωγιμοτήτων του κυκλώματος του k-οστού αγωγού διέγερσης από τον λόγο του εγκάρσιου - δια μέσου του διηλεκτρικού – αναχωρούντος ρεύματος αγωγιμότητας I_{kk}^t του k-οστού αγωγού διέγερσης, ανά μονάδα μήκους λόγω της στατικής τάσης V_k προς την τάση αυτή, για ίσες τιμές των υπολοίπων τάσεων της γραμμής με την V_k .

Μήτρα παραμέτρων αγωγιμότητας

Ως μήτρα παραμέτρων αγωγιμότητας ανά μονάδα μήκους (per-unit-length inductance matrix) ορίζεται η συμμετρική μήτρα :

$$G \equiv \begin{bmatrix} \sum_{k'=1}^{\nu} g_{1k'} & -g_{12} & \dots & -g_{1\nu} \\ -g_{21} & \sum_{k'=1}^{\nu} g_{2k'} & \dots & -g_{2\nu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -g_{\nu 1} & -g_{\nu 2} & \dots & \sum_{k'=1}^{\nu} g_{\nu k'} \end{bmatrix} = G^T \quad (3.2-15\alpha)$$

είναι $I_t = \mathbf{GV}$ (3.2-15β)

όπου $\mathbf{I} \triangleq [I_1^t \dots I_\nu^t]^T$ (3.2-15γ)

είναι το διάνυσμα των αναχωρούντων – διαμέσου του διηλεκτρικού – ρευμάτων αγωγιμότητας από τους αγωγούς διέγερσης, ανά μονάδα μήκους και

$$\mathbf{V} \triangleq [V_1, \dots, V_n]^T \quad (3.2-15\delta)$$

το διάνυσμα των τάσεων γραμμής. Αν ισχύει η υπόθεση EHM και από τη στατική πεδιακή θεωρία τότε η σχέση (3.2-15β) ισχύει και στην γενική περίπτωση χρονομεταβλητών τάσεων γραμμής.

3.2.2.5 Συμβατικές παραδοχές – Συσχέτιση

Οι παραπάνω ορισμοί κατανεμημένων παραμέτρων εξωτερικής επαγωγής, χωρητικότητας και αγωγιμότητας λαμβάνονται και εφαρμόζονται χωρίς βλάβη της γενικότητας για ΟΓΜ τέλειους αγωγούς, με τεκμηριωμένη την υπόθεση EHM και την φυσική σημασία των εν λόγω παραμέτρων, συμφών και των εξωτερικών ποσοτήτων μαγνητικής ροής, ηλεκτρικής ροής και ρεύματος αγωγιμότητας αντίστοιχα.

Στην περίπτωση που ομογενές διηλεκτρικό μέσο περιβάλλει τους αγωγούς ισχύουν επιπλέον οι σχέσεις:

$$\mathbf{C} \mathbf{L}_{ex} = \mathbf{L}_{ex} \mathbf{C} = \mu \varepsilon \mathbf{1}_v \quad (3.2-16)$$

$$\mathbf{G} \mathbf{L}_{ex} = \mathbf{L}_{ex} \mathbf{G} = \mu \sigma \mathbf{1}_v \quad (3.2-17)$$

$$\mathbf{G} = \frac{\sigma}{\varepsilon} \mathbf{C} \quad (3.2-18)$$

$$\text{με} \quad \mathbf{L}_{ex} \triangleq \begin{bmatrix} l_{11}^{ex} & l_{12}^{ex} & \dots & l_{1v}^{ex} \\ l_{21}^{ex} & l_{22}^{ex} & \dots & l_{2v}^{ex} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ l_{v1}^{ex} & l_{v2}^{ex} & \dots & l_{vv}^{ex} \end{bmatrix} \quad (3.2-19)$$

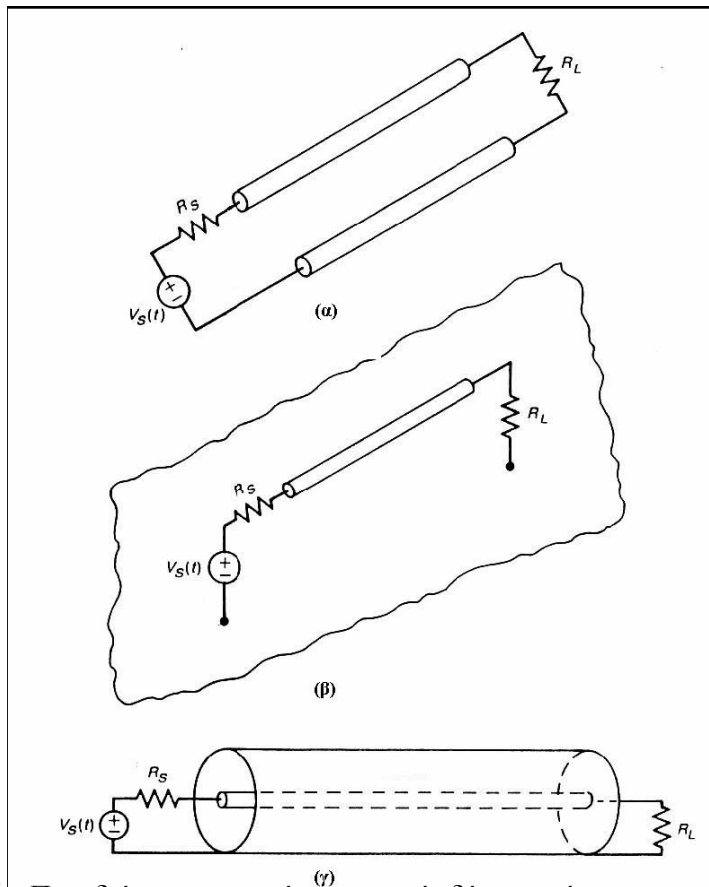
όπου σ η αγωγιμότητα του περιβάλλοντος διηλεκτρικού, μ η μαγνητική του διαπερατότητα, ε η διηλεκτρική του επιτρεπτότητα, και $\mathbf{1}_v$ η $v \times v$ μοναδιαία μήτρα. Για εξαγωγή των κατανεμημένων παραμέτρων αντίστασης και εσωτερικής επαγωγής των αγωγών, θεωρείται η αντίστοιχη υψίσυχη ανά μονάδα μήκους εμπέδηση δεδομένου του επιδρεμικού φαινομένου που διέπει για την υπό εξέταση ζώνη ΥΣ την κατανομή του ηλεκτρικού πεδίου και ρεύματος στο εσωτερικό των αγωγών.

3.3 ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ

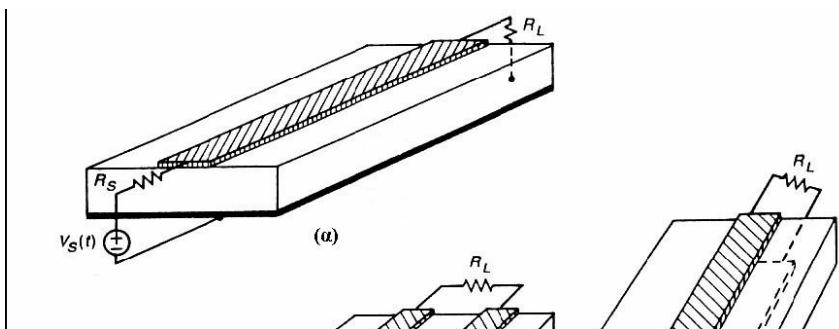
Οι διαφορικές εξισώσεις που καθορίζουν την τάση και το ρεύμα μιας γραμμής μεταφοράς ονομάζονται εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς και αποτελούν το μοντέλο της. Η βασική δομή των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων που περιβάλλουν τους αγωγούς μιας γραμμής μεταφοράς είναι η εγκάρσια ηλεκτρομαγνητική (TEM – Transverse Electromagnetic). Σε αυτή τη δομή τα διανύσματα έντασης του ηλεκτρικού και του

μαγνητικού πεδίου σε κάθε σημείο του χώρου δεν έχουν καμία συνιστώσα παράλληλη στους αγωγούς της γραμμής, είναι δηλαδή κάθετα στον άξονα της.

Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα δείξουμε πως τα κύματα διαδίδονται κατά μήκος της γραμμής έτσι ώστε να έχουμε TEM ρυθμό διάδοσης. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε πως θα περιορίσουμε τη συζήτησή μας σε ομοιόμορφες γραμμές μεταφοράς, δηλαδή σε γραμμές που οι εγκάρσιες διαστάσεις τους (π.χ. εμβαδό διατομής αγωγού ή διηλεκτρικού) είναι ίδιες σε όλα τα σημεία τους.



Σχήμα 3.6 Παραδείγματα γραμμών μεταφοράς δύο αγωγών σε ομογενές μέσο: α) γραμμή δυο συρμάτων, β) ένα σύρμα πάνω από αγώγιμο επίπεδο, γ) ομοαξονικό καλώδιο.



Σχήμα 3.7 Παραδείγματα επίπεδων γραμμών μεταφοράς σε μη ομογενές μέσο (τυπωμένα κυκλώματα): α) μικροταινία, β) αγωγοί χαραγμένοι στην ίδια πλευρά του υποστρώματος, γ) αγωγοί χαραγμένοι σε απέναντι πλευρές του υποστρώματος.

Για να μπορέσουμε να εξάγουμε τις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς θεωρούμε πως οι δύο αγωγοί μας είναι παράλληλοι στον άξονα z ενός κυλινδρικού συστήματος συντεταγμένων. Θα αναλύσουμε την περίπτωση της γραμμής δυο συρμάτων του σχήματος 3.6(α), αλλά τα αποτελέσματα που θα πάρουμε εφαρμόζονται σε όλες τις περιπτώσεις των σχημάτων 3.6 και 3.7. Ας υποθέσουμε πως εφαρμόζουμε dc τάση και ρεύμα στη γραμμή των δυο παράλληλων συρμάτων. Η εφαρμοζόμενη τάση θα προκαλέσει την εμφάνιση φορτίου στις επιφάνειες των δυο συρμάτων και έτσι θα δημιουργηθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο $E_T(z,t)$ που θα κατευθύνεται από τον ένα αγωγό στον άλλο. Το ρεύμα που θα ρέει στη διάταξη θα δημιουργήσει ένα μαγνητικό πεδίο $H_T(z,t)$ το οποίο θα περικυκλώνει το κάθε σύρμα. Αν η γραμμή έχει άπειρο μήκος, οπότε δεν μπορούν να υπάρξουν φαινόμενα άκρων, τότε τα πεδία θα βρίσκονται στο επίπεδο xy και θα είναι κάθετα στον άξονα z της γραμμής. Με βάση αυτή την παρατήρηση γίνεται εύκολα κατανοητό γιατί τα πεδία σημειώνονται με το γράμμα T (Transverse). Αν τώρα αρχίσουμε να αυξάνουμε τη συχνότητα της τάσης και του ρεύματος, τα πεδία θα διατηρήσουν την εγκάρσια δομή τους μέχρι να φτάσουμε σε μια συχνότητα πέρα από την οποία θα αρχίσουν να κυματοδηγούνται ρυθμοί ανώτερης τάξης. Για συνηθισμένες διαστάσεις γραμμών οι ρυθμοί ανώτερης τάξης θα γίνουν σημαντικοί μετά από μια πολύ υψηλή συχνότητα, η οποία θα βρίσκεται στην περιοχή των GHz. Επομένως για την περίπτωση που μας ενδιαφέρει μπορούμε να αγνοήσουμε τους ρυθμούς ανώτερης τάξης και να υποθέσουμε ότι ο TEM ρυθμός διάδοσης είναι ο μόνος σημαντικός στη γραμμή. Η υπόθεση που κάνουμε για τον TEM ρυθμό μας επιτρέπει να ορίσουμε τάση και ρεύμα για τη γραμμή με μοναδικό τρόπο. Γενικά, τα μεγέθη της τάσης και του ρεύματος μπορούν να οριστούν με μοναδικό τρόπο μόνο για dc διέγερση. Προσεγγιστικά όμως θεωρούμε πως το ίδιο μπορεί να γίνει και για διατάξεις που είναι ηλεκτρικά μικρές. Αυτή

είναι η παραδοχή που κάνουμε κατά την ac ανάλυση μοντέλων με διακριτά στοιχεία. Στις γραμμές μεταφοράς η τάση και το ρεύμα μπορούν να οριστούν μοναδικά για οποιοδήποτε μήκος γραμμής (ηλεκτρικά μικρό ή μεγάλο), αρκεί οι εγκάρσιες διαστάσεις (η απόσταση ανάμεσα στους αγωγούς) να είναι ηλεκτρικά μικρές.

Για να μπορέσουμε να ορίσουμε την τάση και το ρεύμα της γραμμής θεωρούμε κατ' αρχήν τους

νόμους του Faraday και του Ampere σε ολοκληρωτική μορφή:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\mu \frac{d}{dt} \int_S \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (3.3-1\alpha)$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{s} + \varepsilon \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (3.3-1\beta)$$

Φυσικά για να πάρουμε τις παραπάνω σχέσεις έχουμε δεχθεί την ύπαρξη απλού μέσου που χαρακτηρίζεται από τις σχέσεις $\vec{B} = \mu \vec{H}$ και $\vec{D} = \varepsilon \vec{E}$ με ε, μ σταθερά.

Αν επιλέξουμε η καμπύλη C και η επιφάνεια S να βρίσκονται εξ' ολοκλήρου στο xy επίπεδο, το οποίο είναι κάθετο στον άξονα της γραμμής, τότε παίρνουμε:

$$\oint_{C_{xy}} (E_x dx + E_y dy) = -\mu \frac{d}{dt} \int_{S_{xy}} H_z dx dy \quad (3.3-2\alpha)$$

$$\oint_{C_{xy}} (H_x dx + H_y dy) = \int_{S_{xy}} J_z dx dy + \varepsilon \frac{d}{dt} \int_{S_{xy}} E_z dx dy \quad (3.3-2\beta)$$

Όμως για τον TEM ρυθμό διάδοσης είναι $E_z = H_z = 0$. Οπότε από τις δυο προηγούμενες σχέσεις προκύπτει:

$$\oint_{C_{xy}} (E_x dx + E_y dy) = 0 \quad (3.3-3\alpha)$$

$$\oint_{C_{xy}} (H_x dx + H_y dy) = \int_{S_{xy}} J_z dx dy \quad (3.3-3\beta)$$

Παρατηρούμε πως οι παραπάνω εξισώσεις είναι ίδιες με αυτές που παίρνουμε στην περίπτωση στατικού πεδίου (dc). Η (3.3.3α) μας επιτρέπει να ορίσουμε τάση με μοναδικό τρόπο ως :

$$V(z, t) = -\int_{C_v} \vec{E}_T \cdot d\vec{l} \quad (3.3.4)$$

όπου η καμπύλη CV είναι οποιαδήποτε διαδρομή που ξεκινά από το ένα καλώδιο, καταλήγει στο άλλο και βρίσκεται εξ' ολοκλήρου πάνω στο xy επίπεδο. Όταν ισχύουν αυτές οι προϋποθέσεις για τη CV, το ολοκλήρωμα στην (3.3-4) είναι ανεξάρτητο της

διαδρομής, που σημαίνει πως η τάση είναι μοναδική. Με παρόμοιο τρόπο, η εξίσωση (3.3-3β) μας επιτρέπει να ορίσουμε μονοσήμαντα το ρεύμα ενός αγωγού ως το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα του $\vec{H}_T \rightarrow$ πάνω σε οποιαδήποτε κλειστή περιφέρεια CI η οποία περικλείει τον αγωγό και βρίσκεται πάνω στο κάθετο στη γραμμή μεταφοράς επίπεδο xy . Δηλαδή έχουμε:

$$I(z, t) = - \int_{C_I} \vec{H}_T \cdot d\vec{l} \quad (3.3.5)$$

Τα ρεύματα που διαρρέουν τα δυο καλώδια έχουν σε κάθε σημείο της γραμμής ίσο πλάτος αλλά αντίθετη φορά. Έχουμε δηλαδή την περίπτωση ρεύματος διαφορικού ρυθμού (differential-mode current). Στη διάταξη είναι δυνατό να υπάρχει και μια άλλη συνιστώσα ρεύματος, το ρεύμα κοινού ρυθμού (common-mode current), αλλά οι εξισώσεις τις γραμμής μεταφοράς προβλέπουν μόνο τη συνιστώσα διαφορικού ρυθμού. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειώσουμε πως το ρεύμα και η τάση όπως παρουσιάζονται είναι συναρτήσεις της θέσης z κατά μήκος της γραμμής καθώς και του χρόνου t .

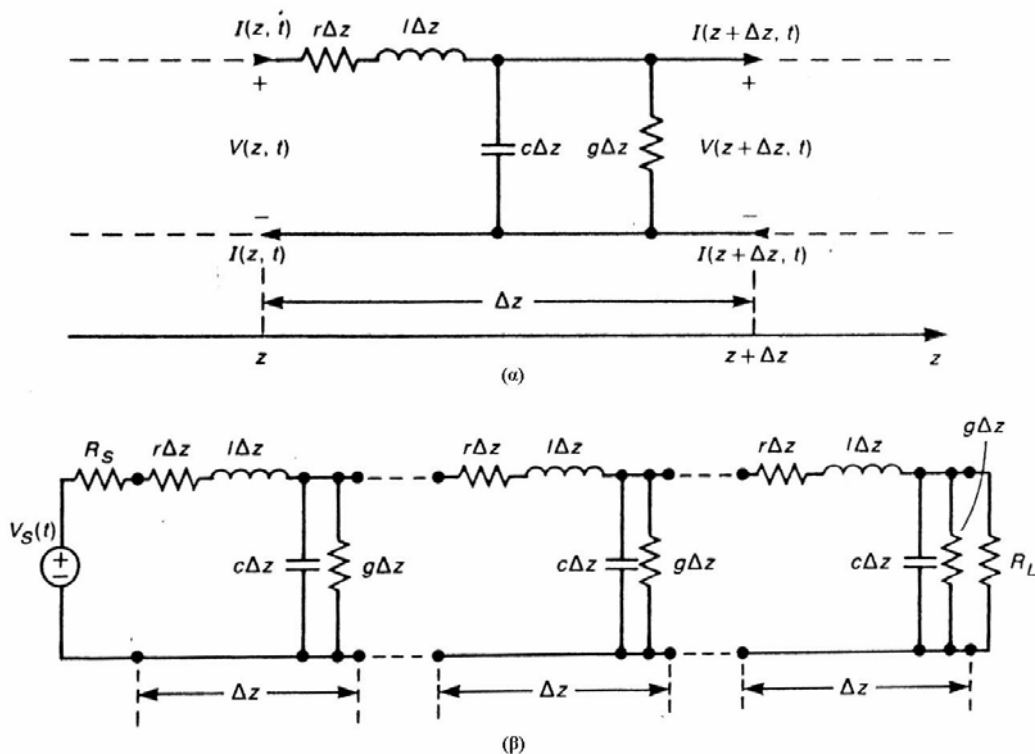
Δεδομένου ότι οι εξισώσεις (3.3-3) είναι πανομοιότυπες με αυτές που προκύπτουν στην περίπτωση στατικών (dc) πεδίων, μπορούμε να εξάγουμε το σημαντικό συμπέρασμα ότι η δομή του εγκάρσιου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου για τον TEM ρυθμό είναι ίδια με τη δομή του πεδίου που δημιουργείται από dc διέγερση. Επομένως, μπορούμε να υπολογίσουμε τις απαιτούμενες παραμέτρους ανά μονάδα μήκους χρησιμοποιώντας μόνο μεθόδους στατικών πεδίων, κάτι που απλοποιεί σημαντικά την όλη διαδικασία. Φυσικά, η τελευταία παρατήρηση ισχύει μόνο όταν ο ρυθμός TEM είναι ο μοναδικός ρυθμός διάδοσης στη γραμμή.

Τώρα που έχουμε ορίσει ρεύμα και τάση με μοναδικό τρόπο μπορούμε να μοντελοποιήσουμε ένα ηλεκτρικά μικρό κομμάτι της γραμμής, μήκους Δz , με ένα κυκλωματικό μοντέλο διακριτών στοιχείων. Το μοντέλο αυτό φαίνεται στο σχήμα 3.8. Το ηλεκτρικό πεδίο που περιβάλλει τους αγωγούς της γραμμής προκαλεί την εμφάνιση μιας χωρητικότητας ανάμεσα τους. Επειδή έχουμε θεωρήσει πως η γραμμή είναι ομοιόμορφη, η χωρητικότητα ανά μονάδα μήκους c είναι η ίδια σε οποιοδήποτε σημείο. Αν η γραμμή ήταν μη ομοιόμορφη, είχε δηλαδή μεταβλητή διατομή, τότε η χωρητικότητα c θα ήταν συνάρτηση της θέσης ($c=c(z)$). Η συνολική χωρητικότητα ενός τμήματος της γραμμής μήκους Δz ισούται με το γινόμενο της χωρητικότητας ανά μονάδα μήκους επί το μήκος του τμήματος ($c\Delta z$). Αν τώρα το διηλεκτρικό που περιβάλλει τα σύρματα έχει μη μηδενική αγωγιμότητα (διηλεκτρικό με απώλειες), τότε υπάρχει μια ακόμη παράμετρος ανά μονάδα μήκους, η g , από την οποία προκύπτει μια συνολική αγωγιμότητα $g\Delta z$ ανάμεσα στους αγωγούς.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε πως η παράμετρος c αναπαριστά ρεύμα μετατόπισης που ρέει μεταξύ των αγωγών και τα οποία υπάρχει είτε το μέσο έχει απώλειες είτε όχι. Από την άλλη μεριά η παράμετρος g αναπαριστά ρεύμα αγωγιμότητας που ρέει ανάμεσα στα σύρματα, το οποίο φυσικά δεν υπάρχει αν το περιβάλλον μέσο δεν έχει απώλειες. Ας εξετάσουμε τώρα την παράμετρο l του σχήματος 3.8. Το ρεύμα που διαπερνά τους αγωγούς δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο διεισδύει στο χώρο ανάμεσα στα δυο σύρματα. Αν θεωρήσουμε το βρόχο που

σχηματίζεται από τους δυο αγωγούς ως μια επαγωγή, τότε προκύπτει η επαγωγή ανά μονάδα μήκους l , η οποία τοποθετείται σε σειρά με τους αγωγούς της γραμμής. Η συνολική επαγωγή ενός τμήματος της γραμμής μήκους Δz ισούται με $l\Delta z$.

Παρατηρήστε πως δεν έχει σημασία αν η επαγωγή θα βρίσκεται ολόκληρη στο ένα σύρμα ή αν θα είναι μοιρασμένη και στα δυο, καθώς αναπαριστά την επαγωγή του βρόχου που δημιουργείται από τα δυο σύρματα. Αν τώρα οι αγωγοί μας δεν είναι τέλειοι, έχουν δηλαδή πεπερασμένη (μη μηδενική) και όχι άπειρη αγωγιμότητα, τότε συμπεριλαμβανουμε στο μοντέλο μας μια αντίσταση ανά μονάδα μήκους r , η οποία εκφράζει τις απώλειες που σχετίζονται με τους αγωγούς. Η συνολική αντίσταση που εισάγεται από ένα κομμάτι γραμμής μήκους Δz ισούται με $r\Delta z$.



Σχήμα 3.8 Το ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς δυο αγωγών για τον TEM ρυθμό διάδοσης: α) το ισοδύναμο κύκλωμα για ένα τμήμα μήκους Δz , β) μοντελοποίηση ολόκληρης της γραμμής ως μια σειρά τμημάτων μήκους Δz . Οι εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς προκύπτουν όταν πάρουμε το όριο στο οποίο $\Delta z \rightarrow 0$.

Επιθυμούμε τώρα να εξάγουμε τις εξισώσεις που σχετίζουν τις τάσεις και τα ρεύματα στα δυο άκρα ενός τμήματος γραμμής μήκους Δz . Κάνοντας χρήση των κανόνων του Kirchhoff και με τη βοήθεια του σχήματος 3.8(α) προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα :

$$V(z + \Delta z, t) - V(z, t) = -r\Delta z I(z, t) - l\Delta z \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \quad (3.3-6\alpha)$$

$$I(z + \Delta z, t) - I(z, t) = -g\Delta z V(z + \Delta z, t) - c\Delta z \frac{\partial}{\partial t} V(z + \Delta z, t) \quad (3.3-6\beta)$$

Για να είναι σωστό το μοντέλο διακριτών στοιχείων που περιγράψαμε πρέπει το μήκος του Δz να είναι ηλεκτρικά μικρό στη μέγιστη χρησιμοποιούμενη συχνότητα. Για να κάνουμε το μοντέλο μας να ισχύει για όλες τις συχνότητες θεωρούμε τη γραμμή ως μια σειρά από τμήματα μήκους Δz , σχήμα 3.8(β), και απαιτούμε $\Delta z \rightarrow 0$. Διαιρώντας και τα δυο μέλη των εξισώσεων (3.3-6) με Δz προκύπτει:

$$\frac{V(z + \Delta z, t) - V(z, t)}{\Delta z} = -rI(z, t) - l \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \quad (3.3-7\alpha)$$

$$\frac{I(z + \Delta z, t) - I(z, t)}{\Delta z} = -gV(z + \Delta z, t) - c \frac{\partial}{\partial t} V(z, t) \quad (3.3-7\beta)$$

Παίρνοντας το όριο $\Delta z \rightarrow 0$ λαμβάνουμε τις εξισώσεις της γραμμής μεταφοράς:

$$\frac{\partial V(z, t)}{\partial z} = -rI(z, t) - l \frac{\partial}{\partial t} I(z, t) \quad (3.3-8\alpha)$$

$$\frac{\partial I(z, t)}{\partial z} = -gV(z, t) - c \frac{\partial}{\partial t} V(z, t) \quad (3.3-8\beta)$$

Οι εξισώσεις (3.3-8) είναι ένα ζεύγος συζευγμένων μερικών διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης.

Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν στη γενική περίπτωση. Εμείς στη συνέχεια θα εξετάσουμε αρχικά γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες ($r=g=0$), οι οποίες έχουν τις εξής ιδιότητες:

α) οι αγωγοί τους έχουν άπειρη αγωγιμότητα (τέλειοι αγωγοί) και

β) το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς τους έχει μηδενική αγωγιμότητα και συνεπώς δεν υπάρχουν απώλειες που να σχετίζονται μαζί του.

Ο λόγος για τον οποίο θα αναλύσουμε αρχικά τέτοιες γραμμές είναι ότι απλοποιούνται πολύ οι μαθηματικοί υπολογισμοί, ενώ ταυτόχρονα τα αποτελέσματα που θα προκύψουν είναι καλές προσεγγίσεις της πραγματικότητας.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να κάνουμε ορισμένες παρατηρήσεις για τις παραμέτρους ανά μονάδα μήκους r, l, g, c . Η μορφή των εξισώσεων γραμμών μεταφοράς όπως προέκυψε προηγουμένως είναι η ίδια για όλες τις γραμμές δυο αγωγών. Το μόνο πράγμα που διαφοροποιεί την κάθε διάταξη από τις υπόλοιπες είναι οι τιμές που παίρνουν οι παραπάνω παράμετροι. Δηλαδή τα r, l, g, c κρύβουν μέσα τους την πληροφορία για τη μορφή της διάταξής μας (π.χ. αν έχουμε δυο καλώδια ή ομοαξονική γραμμή κ.τ.λ.). Συνεπώς είναι εξίσου σημαντικό να μπορούμε να υπολογίσουμε τις παραμέτρους ανά μονάδα μήκους με το να μπορούμε να λύσουμε τις εξισώσεις των γραμμών μεταφοράς.

Ο υπολογισμός των r, l, g, c μπορεί να γίνει με αρκετές τεχνικές και για διάφορους τύπους γραμμών. Στην ανάλυση που θα ακολουθήσει θα θεωρούμε τις παραμέτρους ανά μονάδα μήκους γνωστές.

3.4 ΕΠΙΛΥΣΗ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ

Οι εξισώσεις γραμμών μεταφοράς μπορούν να επιλυθούν είτε στο πεδίο του χρόνου είτε στο πεδίο της συχνότητας. Κατά την επίλυση τους στο πεδίο του χρόνου, η διέγερση της γραμμής μπορεί να έχει οποιαδήποτε μορφή και λαμβάνουμε τελικά την πλήρη λύση για τη διάταξη που μελετάμε. Από την άλλη, όταν δουλεύουμε στο πεδίο της συχνότητας θεωρούμε πως η διέγερση γίνεται με μια ημιτονική πηγή η οποία έχει συνδεθεί στη διάταξη για μεγάλο χρονικό διάστημα και έχει εγκατασταθεί συνεπώς μια μόνιμη κατάσταση. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε και με τις δυο παραπάνω περιπτώσεις.

3.4.1 Επίλυση στο πεδίο του χρόνου

Η ανάλυση που θα ακολουθήσει αφορά γραμμές χωρίς απώλειες. Ο λόγος που δεν ασχολούμαστε με γραμμές που έχουν απώλειες είναι ότι οι εξισώσεις γραμμών μεταφοράς σε αυτή την περίπτωση είναι δύσκολο να λυθούν στο πεδίο του χρόνου. Επιπλέον, η λύση που προκύπτει από τη μελέτη μιας γραμμής χωρίς απώλειες είναι μια καλή προσέγγιση της λύσης που θα παίρναμε αν εξετάζαμε μια γραμμή με απώλειες. Σημειώνουμε επίσης πως στην παρούσα παράγραφο θα θεωρήσουμε κατά τους υπολογισμούς πως οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους δε μεταβάλλονται με τη συχνότητα. Αυτό γενικά δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Παρ' όλα αυτά μια τέτοια παραδοχή είναι ρεαλιστική στην περίπτωση που έχουμε ημιτονοειδή διέγερση, οπότε δουλεύουμε σε μια συχνότητα, και στην περίπτωση που το εύρος ζώνης (B) του σήματος εισόδου είναι πολύ μικρό σε σχέση με την κεντρική συχνότητα λειτουργίας (f_c), οπότε οι παράμετροι ανά μονάδα μήκους είναι πρακτικά σταθερές σε όλο το B . Θέτοντας $r=g=0$ στις (3.3-8) παίρνουμε:

$$\frac{\partial V(z,t)}{\partial z} = -l \frac{\partial I(z,t)}{\partial t} \quad (3.4-1\alpha)$$

$$\frac{\partial I(z,t)}{\partial z} = -c \frac{\partial V(z,t)}{\partial t} \quad (3.4-1\beta)$$

με $r=g=0$ (γραμμή χωρίς απώλειες)

Διαφορίζοντας τη μια σχέση ως προς z και την άλλη ως προς t και κάνοντας αντικατάσταση παίρνουμε τελικά δυο μη συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις δεύτερης τάξης:

$$\frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial z^2} = -lc \frac{\partial^2 V(z,t)}{\partial t^2} \quad (3.4-2\alpha)$$

$$\frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial z^2} = -cl \frac{\partial^2 I(z,t)}{\partial t^2} \quad (3.4-2\beta)$$

με $r=g=0$ (γραμμή χωρίς απώλειες)

Η λύση των (3.4-2) είναι:

$$V(z,t) = V^+(t - \frac{z}{v}) + V^-(t + \frac{z}{v}) \quad (3.4-3\alpha)$$

$$I(z,t) = \frac{1}{Z_C} V^+(t - \frac{z}{v}) + \frac{1}{Z_C} V^-(t + \frac{z}{v}) \quad (3.4-3\beta)$$

όπου Z_C είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής

$$Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}} = vl = \frac{1}{vc} \quad (3.4-4)$$

και v η ταχύτητα διάδοσης στη γραμμή με

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.4-5)$$

Στην τελευταία σχέση έχουμε υποθέσει πως το μέσο που περιβάλλει τους αγωγούς χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους μ και ϵ . Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν και για γραμμές που βρίσκονται σε μη ομογενές μέσο. Σε αυτή την περίπτωση βέβαια θα χρησιμοποιούσαμε για το ϵ τη σχέση $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r'$, όπου ϵ_r' είναι η ενεργός διηλεκτρική σταθερά. Στις σχέσεις (3.4-3) βλέπουμε τη γενική μορφή των λύσεων των (3.4-1). Η ακριβής μορφή τους καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο η διέγερση $V_S(t)$ μεταβάλλεται συναρτήσει του χρόνου. Πάντως από τις (3.4-3) μπορούμε να δούμε πως οι λύσεις μας, όποιες κι αν είναι τελικά, περιέχουν πάντα δυο συναρτήσεις, τις $V^+(t-z/v)$ και $V^-(t+z/v)$, οι οποίες εκφράζουν δυο διαδιδόμενα κύματα. Η V^+ αντιπροσωπεύει ένα κύμα που κινείται από την πηγή προς το φορτίο. Αυτό γίνεται εύκολα κατανοητό αν σκεφτούμε πως, αν ο χρόνος t αυξηθεί, τότε για να παραμείνει σταθερή η τιμή της παράστασης $t - z/v$ θα πρέπει να αυξηθεί και η τιμή του z . Έχουμε δηλαδή κίνηση προς τα θετικά του άξονα z . Με το ίδιο σκεπτικό μπορούμε να δούμε πως η συνάρτηση V^- παριστάνει ένα κύμα που κινείται από το φορτίο προς την πηγή. Συνεπώς η πλήρης λύση αποτελείται από το άθροισμα δυο κυμάτων. Η τάση και το ρεύμα του καθενός από αυτά συνδέονται με τις σχέσεις:

$$I^+(t - \frac{z}{v}) = \frac{1}{Z_C} V^+(t - \frac{z}{v}) \quad (3.4-6\alpha)$$

$$I^-(t + \frac{z}{v}) = -\frac{1}{Z_c} V^-(t + \frac{z}{v}) \quad (3.4-6\beta)$$

Έστω τώρα L το μήκος της γραμμής μεταφοράς που εξετάζουμε. Τα δυο διαδιδόμενα κύματα σχετίζονται στο φορτίο ($z=L$) με το συντελεστή ανάκλασης Γ_L :

$$\Gamma_L = \frac{V^-(t + \frac{L}{v})}{V^+(t - \frac{L}{v})} = \frac{R_L - Z_c}{R_L + Z_c} \quad (3.4-7)$$

Επομένως η κυματομορφή που προκύπτει λόγω ανάκλασης στο φορτίο μπορεί να βρεθεί με τη βοήθεια του προσπίπτοντος κύματος και του Γ_L . Είναι δηλαδή:

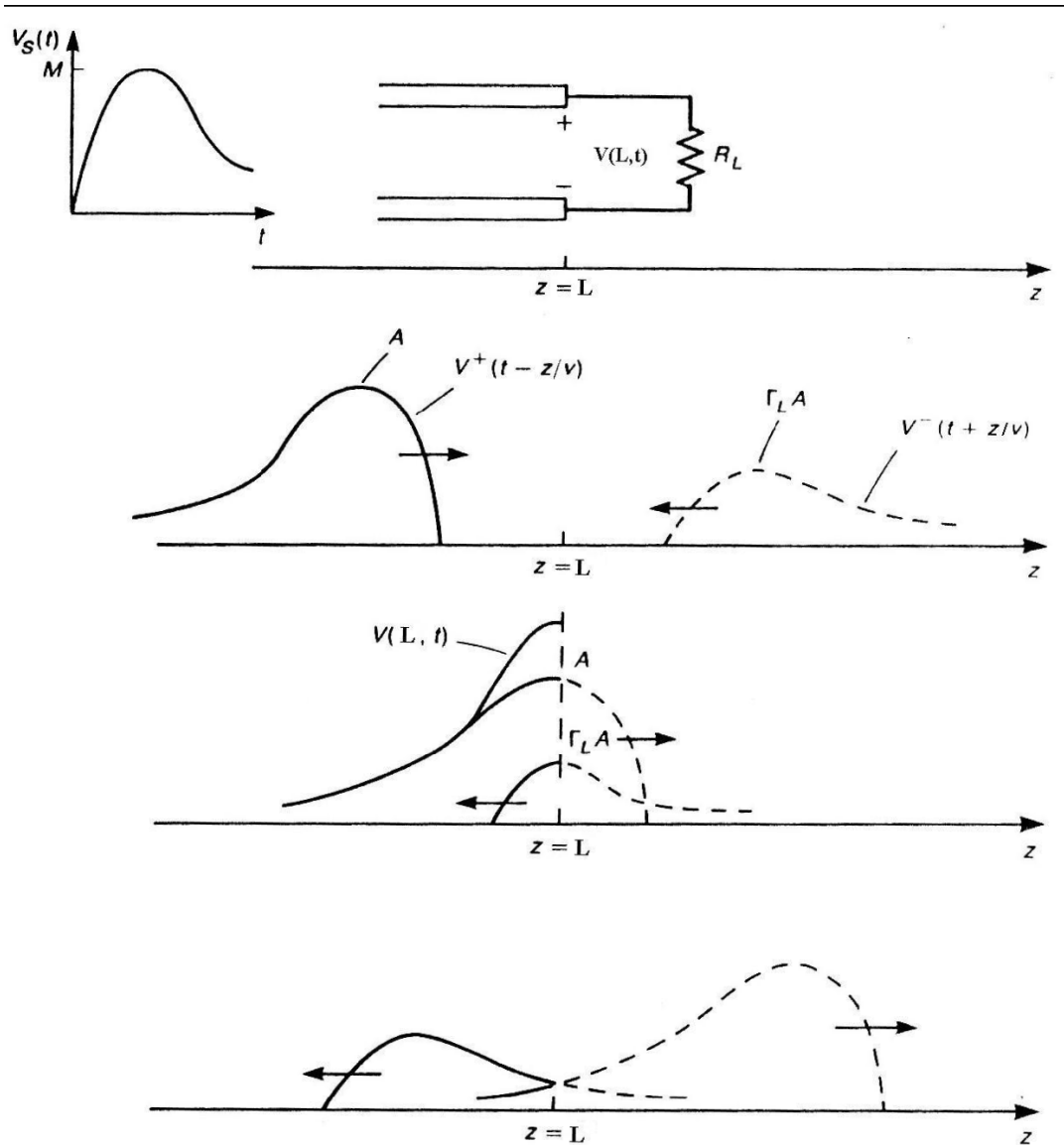
$$V^-(t + \frac{L}{v}) = \Gamma_L V^+(t - \frac{L}{v}) \quad (3.4-8)$$

Ο συντελεστής Γ_L που δίνεται στην (3.4-7) ισχύει μόνο για το μέγεθος της τάσης.

Μπορούμε να εξάγουμε ένα συντελεστή ανάκλασης για το ρεύμα αντικαθιστώντας την (3.4-7) στις (3.4-6). Τότε έχουμε:

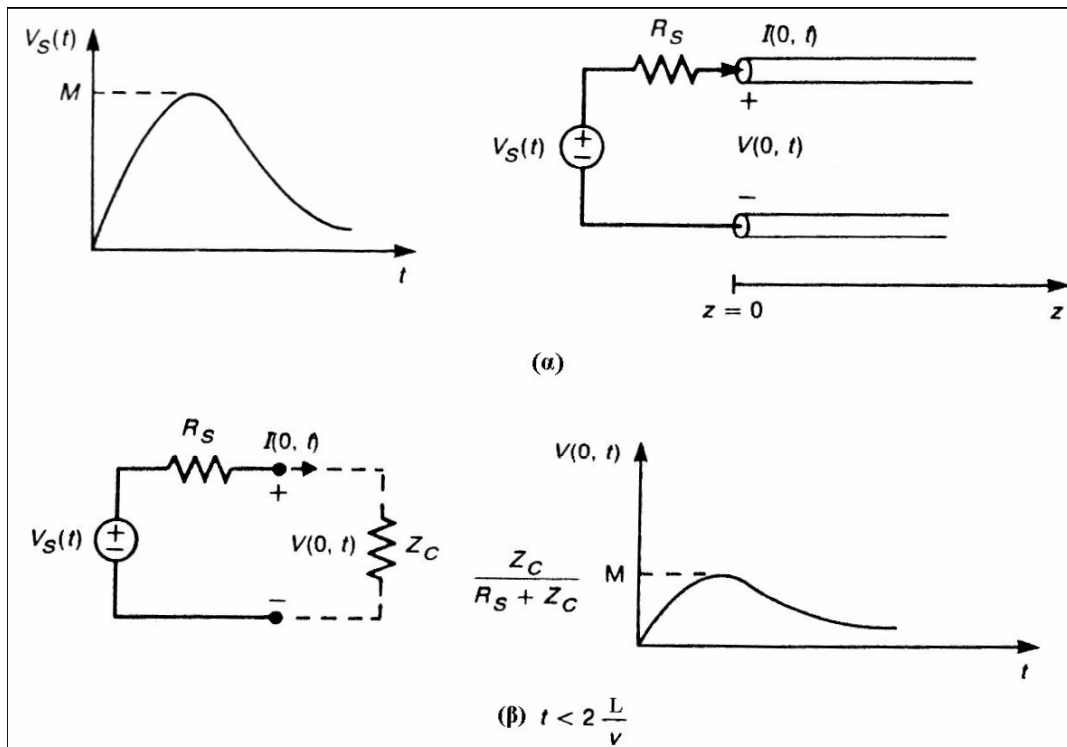
$$I^-(t + \frac{L}{v}) = \Gamma_L I^+(t - \frac{L}{v}) \quad (3.4-9)$$

Η ανάκλαση των κυμάτων στο φορτίο φαίνεται στο σχήμα 3.9. Το κύμα V^- που παράγεται είναι ουσιαστικά ένα αντίγραφο του V^+ το οποίο έχει περιστραφεί κατά 180° γύρω από τον κάθετο άξονα και έχει πολλαπλασιαστεί με Γ_L . Παρατηρήστε πως η συνολική τάση σε κάθε στιγμή στο φορτίο δίνεται από το άθροισμα των V^+ και V^- , όπως μας φανερώνουν οι σχέσεις (3.4-3).



Σχήμα 3.9 Ανάκλαση κυμάτων στο φορτίο

Ας θεωρήσουμε τώρα (σχήμα 3.10) τη μια άκρη μιας γραμμής μεταφοράς (συγκεκριμένα την άκρη που συνδέεται στην πηγή).



Σχήμα 3.10 Το ισοδύναμο κύκλωμα που φαίνεται στην είσοδο μιας γραμμής πριν φτάσει εκεί το ανακλώμενο στο φορτίο κύμα.

Είναι λογικό να υποθέσουμε πως όταν η πηγή συνδέεται για πρώτη φορά στη γραμμή θα παρατηρήσουμε αρχικά μόνο ένα κύμα, το οποίο θα κινείται με κατεύθυνση προς το φορτίο. Μέχρι αυτό να φτάσει στο φορτίο (μετά από χρόνο $T=L/v$) και να γίνει ανάκλαση, δεν αναμένουμε να εμφανιστεί στη γραμμή κάποιο άλλο κύμα που να κινείται προς την αντίθετη κατεύθυνση. Το κομμάτι του κύματος που ανακλάται στο φορτίο θα χρειαστεί έναν επιπλέον χρόνο T μέχρι να φτάσει στην πηγή. Επομένως στο χρονικό διάστημα $0 \leq t \leq 2L/v$ στο $z=0$ δεν εμφανίζονται κύματα κινούμενα με κατεύθυνση προς την πηγή και συνεπώς η ολική τάση και ρεύμα σε αυτό το σημείο θα καθορίζεται μόνο από τα V^+ και I^+ . Θα είναι δηλαδή

$$V(0,t) = V^+ \left(t - \frac{0}{v} \right) \quad (3.4-10\alpha)$$

$$I(0,t) = I^+ \left(t - \frac{0}{v} \right) = \frac{V^+ \left(t - \frac{0}{v} \right)}{Z_C} \quad (3.4-10\beta)$$

$$\text{για } 0 \leq t \leq 2L/v$$

Στο $z=0$ και για $0 \leq t \leq 2L/v$, όπως φαίνεται από τις (3.4-10), ο λόγος της ολικής τάσης προς το ολικό ρεύμα ισούται με Z_C . Αυτό ακριβώς το φαινόμενο απεικονίζεται στο σχήμα 3.10(β). Από τα παραπάνω εύκολα προκύπτει πως τα αρχικά κύματα ρεύματος και τάσης που κινούνται από την πηγή προς το φορτίο σχετίζονται με τη $V_S(t)$ ως εξής:

$$V(0,t) = \frac{Z_C}{R_S + Z_C} V_S(t) \quad (3.4-11\alpha)$$

$$I(0,t) = \frac{V_S(t)}{R_S + Z_C} \quad (3.4-11\beta)$$

Τα κύματα V^+ , I^+ έχουν την ίδια μορφή με την τάση της πηγής (στην περίπτωση μας έχουν τη μορφή ενός παλμού όπως φαίνεται στο σχήμα 3.10).

Για να φτάσει η αρχή των V^+ , I^+ στο φορτίο απαιτείται χρόνος ίσος με $T = L/v$. Από εκείνο το σημείο και πέρα δημιουργείται ένας ανακλώμενος παλμός, όπως μπορούμε να δούμε στο σχήμα 3.10. Για να φτάσει η αρχή του νέου παλμού στο $z=0$ απαιτείται και πάλι χρόνος ίσος με $T = L/v$. Στην πηγή συντελείται νέα ανάκλαση (ανακλάται το κύμα που επιστρέφει από το φορτίο) και μπορούμε να βρούμε ένα νέο συντελεστή ανάκλασης τάσης:

$$\Gamma_S = \frac{R_S - Z_C}{R_S + Z_C} \quad (3.4-12)$$

Το κύμα που προκύπτει έχει την ίδια μορφή με τον αρχικό παλμό αλλά το πλάτος του είναι μειωμένο λόγω των ανακλάσεων που έχουν συντελεστεί (τα Γ_L , Γ_S έχουν γενικά μέτρο μικρότερο της μονάδας). Η διαδικασία που περιγράψαμε συνεχίζεται και με το πέρασμα του χρόνου γίνονται νέες ανακλάσεις στην πηγή και στο φορτίο. Σε οποιαδήποτε στιγμή η ολική τάση (ρεύμα) σε κάποιο σημείο της γραμμής ισούται με το άθροισμα όλων των μεμονωμένων κυμάτων τάσης (ρεύματος) που υπάρχουν στη γραμμή τη δεδομένη χρονική στιγμή.

3.4.2 Επίλυση στο πεδίο της συχνότητας (ημιτονική μόνιμη κατάσταση)

Θεωρούμε την περίπτωση όπου στην είσοδο της γραμμής μεταφοράς εφαρμόζεται ημιτονοειδής διέγερση. Τότε είναι:

$$V_S(t) = V_S \cos(\omega t) = \text{Re}(V_S e^{j\omega t}) \quad (3.4-13)$$

Για την ανάλυση που θα ακολουθήσει θα κάνουμε την υπόθεση ότι η πηγή έχει μείνει συνδεδεμένη στη γραμμή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα, κάτι που σημαίνει πως τα μεταβατικά φαινόμενα έχουν εξασθενήσει και συνεπώς έχουμε ημιτονοειδή τάση και ρεύμα σε κάθε σημείο της γραμμής. Λαμβάνοντας υπόψη μας τις παραπάνω παρατηρήσεις θα χρησιμοποιήσουμε τα μιγαδικά μεγέθη της τάσης και του ρεύματος (φασιθέτες) τα οποία συνδέονται με τα πραγματικά μεγέθη με τις σχέσεις:

$$V(z,t) = \text{Re}[\widehat{V}(z)e^{j\omega t}] \quad (3.4-14\alpha)$$

$$I(z,t) = \text{Re}[\widehat{I}(z)e^{j\omega t}] \quad (3.4-14\beta)$$

3.4.2.1 Τάση και ρεύμα ως συναρτήσεις της θέσης

Κάνοντας χρήση των φασιθετών μπορούμε να γράψουμε τις εξισώσεις (3.4-14) στη μορφή:

$$\frac{d\widehat{V}(z)}{dz} = -r\widehat{I}(z) - j\omega l\widehat{I}(z) \quad (3.4-15\alpha)$$

$$\frac{d\widehat{I}(z)}{dz} = -g\widehat{V}(z) - j\omega c\widehat{V}(z) \quad (3.4-15\beta)$$

Αρχικά θα ασχοληθούμε με γραμμές μεταφοράς χωρίς απώλειες ($r=g=0$). Σε αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις (3.4-15) γίνονται:

$$\frac{d\widehat{V}(z)}{dz} = -j\omega l\widehat{I}(z) \quad (3.4-16\alpha)$$

$$\frac{d\widehat{I}(z)}{dz} = -j\omega c\widehat{V}(z) \quad (3.4-16\beta)$$

Αν διαφορίσουμε τις (3.4-16) ως προς z και κάνουμε αντικατάσταση παίρνουμε δυο μη συζευγμένες εξισώσεις δεύτερης τάξης

$$\frac{d^2\widehat{V}(z)}{dz^2} + \omega^2 lc\widehat{V}(z) = 0 \quad (3.4-17\alpha)$$

$$\frac{d^2\widehat{I}(z)}{dz^2} + \omega^2 lc\widehat{I}(z) = 0 \quad (3.4-17\beta)$$

Οι λύσεις των (3.4-17) είναι εύκολο να βρεθεί πως είναι οι :

$$\widehat{V}(z) = \widehat{V}^+ e^{-j\beta z} + \widehat{V}^- e^{j\beta z} \quad (3.4-18\alpha)$$

$$\widehat{I}(z) = \frac{\widehat{V}^+}{Z_c} e^{-j\beta z} - \frac{\widehat{V}^-}{Z_c} e^{j\beta z} \quad (3.4-18\beta)$$

Όπου V^+ και V^- είναι μιγαδικές σταθερές προς το παρόν μη προσδιορισμένες. Τα Z_C και β είναι η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής και η σταθερά διάδοσης αντίστοιχα. Αυτά τα δυο μεγέθη δίνονται από τις σχέσεις:

$$Z_C = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (3.4-19)$$

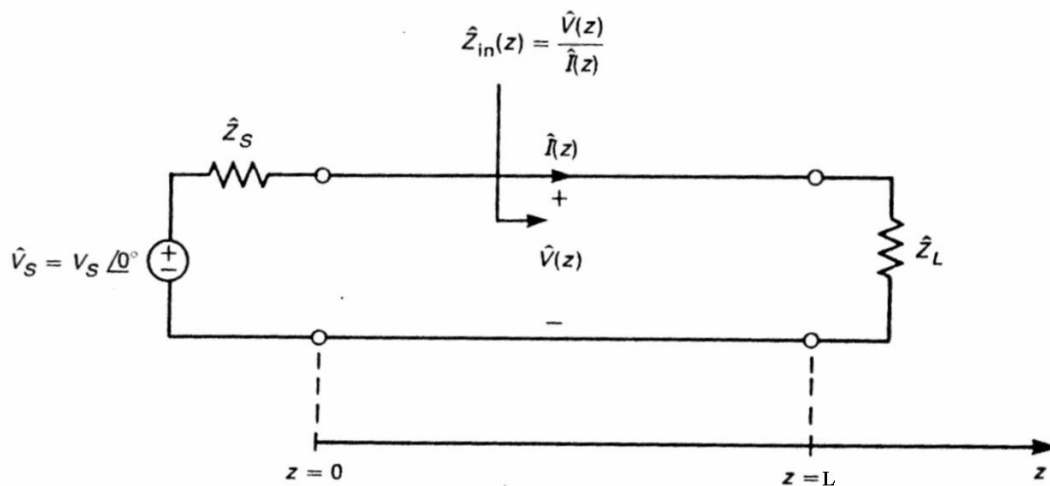
$$\beta = \frac{\omega}{v} \quad (3.4-20)$$

όπου v είναι η ταχύτητα διάδοσης στη γραμμή και ισούται με:

$$v = \frac{1}{\sqrt{lc}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (3.4-21)$$

Το μέσο που περιβάλλει τη γραμμή θεωρείται ομογενές και χαρακτηρίζεται από τις σταθερές ϵ και μ . Τα παραπάνω αποτελέσματα ισχύουν και για γραμμές σε μη ομογενές μέσο όπως είναι αυτές του σχήματος 3.7. Αυτές οι περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από μια ενεργό επιτρεπτότητα $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$.

Ας εξετάσουμε τώρα τη διάταξη του σχήματος 3.11 που βρίσκεται στην επόμενη σελίδα. Όπως βλέπουμε η γραμμή μεταφοράς τερματίζεται στο $z=L$ με μια σύνθετη αντίσταση \hat{Z}_L , ενώ η πηγή είναι ημιτονική (ο φασιθέτης της ισούται με $\hat{V}_S = V_S \angle 0^\circ$) και έχει εσωτερική σύνθετη αντίσταση ίση με \hat{Z}_S . Ορίζουμε το μιγαδικό συντελεστή ανάκλασης τάσης ($\hat{\Gamma}(z)$) σε ένα συγκεκριμένο σημείο z της γραμμής ως το λόγο των φασιθετών τάσης των δυο κυμάτων που διαδίδονται στη γραμμή (το ένα κύμα κινείται από την πηγή προς το φορτίο ενώ το άλλο από το φορτίο προς την πηγή). Είναι δηλαδή:



Σχήμα 3.11 Ορισμός μεγεθών για την ανάλυση γραμμών μεταφοράς στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση.

$$\hat{\Gamma}(z) = \frac{\hat{V}^- e^{j\beta z}}{\hat{V}^+ e^{-j\beta z}} = \frac{\hat{V}^-}{\hat{V}^+} e^{j2\beta z} \quad (3.4-22)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (3.4-18) και (3.4-22) παίρνουμε για την τάση και το ρεύμα τις παρακάτω εκφράσεις:

$$V(z) = \hat{V}^+ e^{-j2\beta z} [1 + \hat{\Gamma}(z)] \quad (3.4-23\alpha)$$

$$\hat{I}(z) = \frac{\hat{V}^+}{Z_C} e^{-j\beta z} [1 - \hat{\Gamma}(z)] \quad (3.4-23\beta)$$

Μπορούμε ακόμη να ορίσουμε μια αντίσταση εισόδου ($\hat{Z}_{in}(z)$) σε κάθε σημείο της γραμμής ως το λόγο της συνολικής τάσης προς το συνολικό ρεύμα σε εκείνο το σημείο. Έχουμε δηλαδή:

$$\hat{Z}_{in}(z) = \frac{\hat{V}(z)}{\hat{I}(z)} = Z_C \frac{1 + \hat{\Gamma}(z)}{1 - \hat{\Gamma}(z)} \quad (3.4-24)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο (δηλ. για $z=L$) ισούται με:

$$\hat{\Gamma}(z) = \frac{\hat{Z}_L - Z_C}{\hat{Z}_L + Z_C} \quad (3.4-25)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης σε κάποιο άλλο σημείο της γραμμής συνδέεται με το $\hat{\Gamma}_L$ σύμφωνα με την παρακάτω σχέση :

$$\hat{\Gamma}(z) = \hat{\Gamma}_L e^{-j2\beta(z-L)} \quad (3.4-26)$$

Επομένως το $\hat{\Gamma}(z)$ σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής σχετίζεται με το $\hat{\Gamma}_L$, το οποίο μπορεί να υπολογιστεί απ' ευθείας από την (3.4-25). Με βάση τα παραπάνω μπορούμε να φτιάξουμε μια γενική διαδικασία για να υπολογίζουμε την τάση και το ρεύμα της γραμμής. Η διαδικασία αυτή είναι η εξής:

1. Υπολογίζουμε το συντελεστή ανάκλασης στο φορτίο χρησιμοποιώντας τη σχέση (3.4-25)

2. Υπολογίζουμε το συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο της γραμμής βάσει της (3.4-26). Ισχύει δηλαδή:

$$\widehat{\Gamma}(0) = \widehat{\Gamma}_{in} = \widehat{\Gamma} e^{-j2\beta z} \quad (3.4-27)$$

3. Από την (3.4.24) υπολογίζουμε την αντίσταση εισόδου της γραμμής:

$$\widehat{Z}_{in}(0) = Z_C \frac{1 + \widehat{\Gamma}(0)}{1 - \widehat{\Gamma}(0)} \quad (3.4-28)$$

4. Υπολογίζουμε το φασιθέτη της τάσης στο σημείο $z=0$ ως:

$$\widehat{V}(0) = \frac{\widehat{Z}_{in}(0)}{\widehat{Z}_{in}(0) + \widehat{Z}_S} \widehat{V}_S \quad (3.4-29)$$

5. Υπολογίζουμε τη μη προσδιορισμένη σταθερά V^{+} από την (3.4-23):

$$\widehat{V}^{+} = \frac{\widehat{V}(0)}{1 + \widehat{\Gamma}(0)} \quad (3.4-30)$$

6. Τέλος, κάνοντας χρήση της (3.4-23) βρίσκουμε τους φασιθέτες της τάσης και του ρεύματος της γραμμής σε οποιοδήποτε σημείο της.

Οι φασιθέτες αυτοί σε συνδυασμό με τις (3.4-14) μπορούν να μας δώσουν τις εκφράσεις των τάσεων και των ρευμάτων στο πεδίο του χρόνου.

Με βάση όλα τα παραπάνω αποτελέσματα μπορούμε να εξάγουμε σχέσεις που να συνδέουν τα $V(z)$, $I(z)$ σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής με το φασιθέτη της πηγής. Έτσι προκύπτει ότι:

$$\widehat{V}(z) = \frac{1 + \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L} e^{j2\beta z}}{1 - \widehat{\Gamma}_S \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L}} \frac{Z_C}{Z_C + \widehat{Z}_S} \widehat{V}_S e^{-j\beta z} \quad (3.4-31\alpha)$$

$$\widehat{I}(z) = \frac{1 - \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L} e^{j2\beta z}}{1 - \widehat{\Gamma}_S \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L}} \frac{1}{Z_C + \widehat{Z}_S} \widehat{V}_S e^{-j\beta z} \quad (3.4-31\beta)$$

Η αντίσταση εισόδου μπορεί επίσης να γραφεί ως:

$$\widehat{V}(z) = \frac{1 + \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L}}{1 - \widehat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L}} = Z_C \frac{\widehat{Z}_L + j\widehat{Z}_C \tan \beta L}{Z_C + j\widehat{Z}_L \tan \beta L} \quad (3.4-32)$$

Ας εξετάσουμε τώρα λίγο πιο προσεκτικά κάποιες από τις προαναφερόμενες σχέσεις. Από την (3.4-25) βλέπουμε πως αν η γραμμή είναι προσαρμοσμένη ($\hat{Z}_L = Z_C$) τότε ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο ισούται με 0. Ακόμη οι εξισώσεις (3.4-31) μας δείχνουν πως σε αυτή την περίπτωση τα πλάτη της τάσης και του ρεύματος είναι ανεξάρτητα της θέσης κατά μήκος της γραμμής:

$$\hat{V}(z) = \frac{1 + \hat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L} e^{j2\beta z}}{1 - \hat{\Gamma}_S \hat{\Gamma}_L e^{-j2\beta L}} \frac{Z_C}{Z_C + \hat{Z}_S} \hat{V}_S e^{-j\beta z} \quad (3.4-33\alpha)$$

$$\hat{I}(z) = \frac{1}{Z_C + \hat{Z}_S} \hat{V}_S e^{-j\beta z} \quad (3.4-33\beta)$$

$$\text{με } \hat{Z}_L = Z_C$$

Γενικά, επιθυμούμε, όπου είναι δυνατό, να προσαρμόζουμε τις γραμμές μεταφοράς ($\hat{Z}_L = Z_C$), ώστε να εξαλείφουμε τις ανακλάσεις. Όταν συμβαίνει αυτό τα πλάτη της τάσης και του ρεύματος είναι σταθερά. Το μόνο που μεταβάλλεται είναι η φάση, όπως φαίνεται από τον όρο $e^{-j\beta z}$ της (3.4-33). Φυσικά δεν είναι δυνατόν να προσαρμόσουμε τέλεια μια γραμμή. Επομένως, είναι απαραίτητο να έχουμε ένα ποσοτικό κριτήριο που να μας δείχνει πόσο καλή προσαρμογή έχει επιτευχθεί. Έχοντας αυτό κατά νου, ορίζουμε ένα καινούριο μέγεθος, το λόγο στάσιμων κυμάτων (VSWR). Ο VSWR ορίζεται ως ο λόγος του μέγιστου πλάτους τάσης της γραμμής προς το ελάχιστο πλάτος τάσης της γραμμής. Δηλαδή:

$$VSWR = \frac{|\hat{V}(z)|_{\max}}{|\hat{V}(z)|_{\min}} = \frac{1 + |\hat{\Gamma}_L|}{1 - |\hat{\Gamma}_L|} \quad (3.4-34)$$

Ο συντελεστής ανάκλασης στο φορτίο σε περίπτωση βραχυκυκλώματος και ανοικτοκυκλώματος ισούται με -1 και 1 αντίστοιχα. Και στις δυο περιπτώσεις το μέτρο του $\hat{\Gamma}_L$ ισούται με τη μονάδα, που σημαίνει πως ο λόγος στάσιμων κυμάτων γίνεται άπειρος. Αυτό είναι λογικό να συμβαίνει αφού, όταν $\hat{\Gamma}_L = \pm 1$, η ελάχιστη τάση της γραμμής είναι μηδενική. Ένας μεγάλος VSWR μας δείχνει πως υπάρχει μεγάλη διακύμανση του πλάτους της τάσης και του ρεύματος κατά μήκος της γραμμής, κάτι που είναι μη επιθυμητό. Αντιθέτως, όταν η γραμμή είναι προσαρμοσμένη ο συντελεστής ανάκλασης είναι μηδενικός και ο λόγος στάσιμων κυμάτων ισούται με τη μονάδα. Επομένως ο VSWR παίρνει τιμές ανάμεσα στη μονάδα και το άπειρο:

$$1 \leq VSWR \leq \infty$$

Όσο πιο κοντά στη μονάδα βρίσκεται ο VSWR τόσο πιο καλή προσαρμογή έχουμε. Η εξίσωση (3.4-32) μας δείχνει πως η αντίσταση εισόδου μιας γραμμής μεταφοράς χωρίς απώλειες επαναλαμβάνεται για μήκη γραμμών που είναι πολλαπλάσια ημίσεων μηκών κύματος. Αυτό σημαίνει πως μια γραμμή συνεχίζει να εμφανίζει την ίδια αντίσταση εισόδου αν προσθέσουμε ή αφαιρέσουμε από αυτή κομμάτια μήκους πολλαπλάσιου ημίσεων μηκών κύματος. Αυτό φαίνεται αν παρατηρήσουμε πως $\beta = 2\pi/\lambda$. Η εξίσωση (3.4-32) μας δείχνει ακόμη πως μια γραμμή μήκους ίσου με $1/4$ μήκους κύματος η οποία τερματίζεται σε βραχυκύκλωμα (ανοιχτοκύκλωμα) εμφανίζεται στην αρχή της ($z=0$) ως ανοιχτοκύκλωμα (βραχυκύκλωμα).

3.4.2.2 Ροή ισχύος

Λόγω της εγκάρσιας φύσης του TEM ρυθμού διάδοσης η ροή ισχύος γίνεται στην κατεύθυνση του άξονα z (το διάνυσμα Poynting βρίσκεται σε αυτή την κατεύθυνση). Σε σχέση με την τάση και το ρεύμα της γραμμής η μέση ροή ισχύος από την πηγή προς το φορτίο δίνεται από:

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \text{Re}[\widehat{V}(z)\widehat{I}^*(z)] \quad (3.4-35)$$

Κάνοντας αντικατάσταση από τις (3.4-33) στη (3.4-35) παίρνουμε:

$$P_{av}(z) = \frac{1}{2} \frac{|\widehat{V}^+|^2}{Z_c} (1 - |\widehat{\Gamma}_L|^2) \quad (3.4-36)$$

Αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να έχει προκύψει αν είχαμε αθροίσει τις μέσες ισχύς των δυο κυμάτων που κινούνται το ένα από την πηγή προς το φορτίο και το άλλο από το φορτίο προς την πηγή. Αν ονομάσουμε το πρώτο από αυτά προσπίπτον κύμα και το δεύτερο ανακλώμενο, τότε ο λόγος των μέσων ισχύων αυτών των δυο κυμάτων είναι:

$$\frac{P_{av, \text{ανακλώμενου}}}{P_{av, \text{προσπίπτοντος}}} = |\widehat{\Gamma}_L|^2 \quad (3.4-37)$$

Όταν το φορτίο είναι βραχυκύκλωμα ή ανοιχτοκύκλωμα, το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης $\widehat{\Gamma}_L$ είναι ίσο με τη μονάδα και η (3.4-37) μας δείχνει πως όλη η προσπίπτουσα ισχύς ανακλάται. Παρόμοια αν η γραμμή είναι προσαρμοσμένη τότε ο $\widehat{\Gamma}_L$ είναι μηδενικός και η (3.4-37) δείχνει πως όλη η προσπίπτουσα ισχύς απορροφάται από το φορτίο.

3.4.2.3 Περίπτωση γραμμής μεταφοράς με απώλειες

Οι εξισώσεις γραμμών μεταφοράς δυο αγωγών υπολογίστηκαν στην παράγραφο 3.3 και δίνονται από τις σχέσεις (3.3-8). Με χρήση των φασιθετών παίρνουμε:

$$\frac{d\widehat{V}(z)}{dz} = -\widehat{z}\widehat{I}(z) \quad (3.4-38\alpha)$$

$$\frac{d\widehat{I}(z)}{dz} = -\widehat{y}\widehat{V}(z) \quad (3.4-38\beta)$$

όπου η ανά μονάδα μήκους σύνθετη αντίσταση \widehat{z} και σύνθετη αγωγιμότητα \widehat{y} δίνονται από:

$$\widehat{z} = r(f) + j\omega l \quad (3.4-39\alpha)$$

$$\widehat{y} = g + j\omega c \quad (3.4-39\beta)$$

Στις παραπάνω σχέσεις φαίνεται η εξάρτηση της παραμέτρου r από τη συχνότητα f . Επειδή δουλεύουμε στην ημιτονική μόνιμη κατάσταση στους υπολογισμούς που θα ακολουθήσουν η r θα θεωρείται σταθερή. Οι εξισώσεις (3.4-38) είναι δυο συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις. Με διαφόριση της κάθε μιας και αντικατάσταση από την άλλη μπορούμε να πετύχουμε την αποσύζευξή τους. Το αποτέλεσμα που παίρνουμε από αυτή τη διαδικασία είναι το εξής:

$$\frac{d^2\widehat{V}(z)}{dz^2} - \widehat{z}\widehat{y}\widehat{V}(z) = 0 \quad (3.4-40\alpha)$$

$$\frac{d^2\widehat{I}(z)}{dz^2} - \widehat{y}\widehat{z}\widehat{I}(z) = 0 \quad (3.4-40\beta)$$

Η γενική λύση των παραπάνω εξισώσεων είναι παρόμοια με αυτή της γραμμής χωρίς απώλειες:

$$\widehat{V}(z) = \widehat{V}^+ e^{-az} e^{-j\beta z} + \widehat{V}^- e^{az} e^{j\beta z} \quad (3.4-41\alpha)$$

$$\widehat{I}(z) = \frac{\widehat{V}^+}{\widehat{Z}_c} e^{-az} e^{-j\beta z} - \frac{\widehat{V}^-}{\widehat{Z}_c} e^{az} e^{j\beta z} \quad (3.4-41\beta)$$

όπου για τη χαρακτηριστική αντίσταση έχουμε:

$$\widehat{Z}_c = \sqrt{\frac{\widehat{z}}{\widehat{y}}} = \sqrt{\frac{r(f) + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (3.4-42)$$

και η σταθερά διάδοσης είναι:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\hat{z}\hat{y}} = \alpha + j\beta \quad (3.4-43)$$

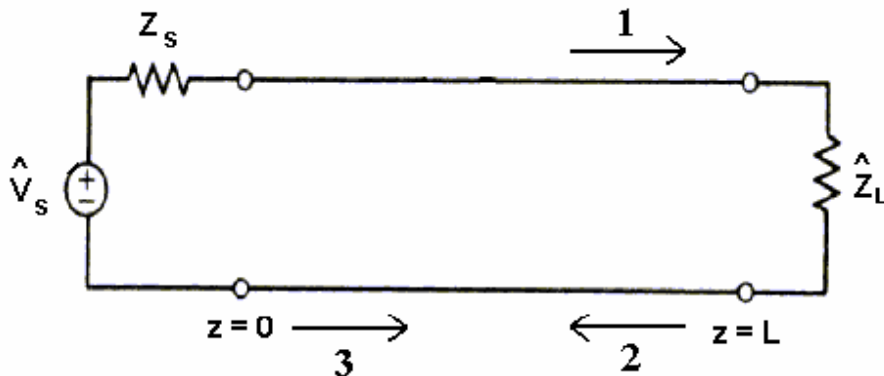
Η διαδικασία επίλυσης των εξισώσεων γραμμών μεταφοράς δυο αγωγών όταν δεν υπάρχουν απώλειες είναι η ίδια και όταν υπάρχουν απώλειες. Έχουμε όμως κάποιες σημαντικές διαφορές στα αποτελέσματα που παίρνουμε στην κάθε περίπτωση. Παρατηρήστε στις εξισώσεις (3.4-41) πως το προσπίπτον και το ανακλώμενο κύμα τάσης και ρεύματος αποσβένουν καθώς ταξιδεύουν κατά μήκος της γραμμής. Αυτό φαίνεται από την ύπαρξη των όρων $e^{-\alpha z}$ και $e^{\alpha z}$. Επιπλέον η μέση ισχύς μειώνεται καθώς τα κύματα ταξιδεύουν κατά μήκος της γραμμής, κάτι βέβαια που δε συμβαίνει στις γραμμές χωρίς απώλειες.

3.5 ΟΔΕΥΟΝΤΑ ΚΥΜΑΤΑ ΜΟΝΙΜΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ ΚΑΙ ΠΟΛΥΟΔΕΣ ΣΥΝΙΣΤΩΣΕΣ ΣΕ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΔΥΟ ΑΓΩΓΩΝ

Στις προηγούμενες παραγράφους είδαμε πώς επιλύονται οι εξισώσεις γραμμών μεταφοράς δυο αγωγών στο πεδίο του χρόνου και στο πεδίο τις συχνότητας. Θα εξετάσουμε τώρα τον τρόπο με τον οποίο συνδέονται οι δυο παραπάνω λύσεις. Ο λόγος που το κάνουμε αυτό είναι για να μπορέσουμε να κατανοήσουμε τι ακριβώς σημαίνουν και που διαφέρουν μεταξύ τους κάποιες έννοιες που είναι πολύ χρήσιμες για την ανάλυση που θα κάνουμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Ας θεωρήσουμε τη γραμμή μεταφοράς του σχήματος 3.11 που φαίνεται στην επόμενη σελίδα και έστω ότι η διέγερση είναι ημιτονοειδής. Όταν στη διάταξη ξεκινήσει η εφαρμογή της V_g θα δημιουργηθεί αρχικά ένα κύμα (το οποίο στο σχήμα 3.11 σημειώνεται με το βέλος No 1) που θα διαδίδεται από την πηγή προς το φορτίο. Με βάση όσα αναφέραμε στην παράγραφο 3.4.1 εύκολα καταλαβαίνει κανείς πως αυτό το κύμα θα είναι ημιτονοειδές. Όταν φτάσει στο $z=L$, αν η γραμμή δεν είναι προσαρμοσμένη, ένα μέρος του θα ανακλαστεί δημιουργώντας ένα δεύτερο κύμα (βέλος No 2) το οποίο θα κινείται από το φορτίο προς την πηγή. Το κύμα No 2 κάποια στιγμή θα φτάσει στο $z=0$ και τότε ένα μέρος του θα ανακλαστεί δημιουργώντας στη διάταξη ένα τρίτο κύμα (βέλος No 3) ή πολύοδο συνιστώσα. Καθώς συνεχίζεται η παραπάνω διαδικασία παράγονται όλο και περισσότερα καινούρια κύματα. Φυσικά το κάθε νέο κύμα έχει μικρότερο πλάτος από όλα τα κύματα που υπήρχαν πριν από αυτό στη γραμμή (αυτή η παρατήρηση γίνεται εύκολα κατανοητή αν σκεφτούμε ότι έχουμε εξασθένηση κατά τη διάδοση και ότι οι συντελεστές ανάκλασης γενικά δεν έχουν μοναδιαίο μέτρο). Νέες πολύοδες συνιστώσες σταματούν να δημιουργούνται ύστερα από θεωρητικά άπειρο χρόνο. Βεβαίως στην πράξη μετά από κάποιο πεπερασμένο χρονικό διάστημα οι καινούργιες συνιστώσες που προκύπτουν έχουν πολύ μικρό πλάτος (γίνονται αμελητέες). Έτσι, μπορούμε να θεωρήσουμε πως μετά από αυτό το χρονικό διάστημα έχουμε φτάσει στη μόνιμη κατάσταση (είναι η ημιτονική μόνιμη κατάσταση που εξετάσαμε στην παράγραφο 3.4.2). Όταν είμαστε στη μόνιμη κατάσταση αυτό που βλέπουμε στην

πραγματικότητα είναι ένα πολύ μεγάλο αριθμό (θεωρητικά άπειρο) πολυόδων συνιστωσών οι οποίες φαίνονται συνολικά σαν δυο μόνο κύματα που διαδίδονται το ένα από την πηγή προς το φορτίο και το άλλο από το φορτίο προς την πηγή (είναι τα δυο κύματα που φαίνονται στις εξισώσεις (3.4-18)). Η συνολική τάση και ρεύμα σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής προκύπτει φυσικά από την υπέρθεση όλων των πολυόδων συνιστωσών (ή αλλιώς από το άθροισμα των δυο κυμάτων που μόλις αναφέραμε).



Σχήμα 3.12 Γραμμή μεταφοράς με ημιτονική διέγερση. Τα βέλη παριστάνουν κύματα που δημιουργούνται ύστερα από ανακλάσεις στα δυο άκρα της γραμμής.

Επειδή τώρα η κάθε μια από αυτές ακολουθεί και ένα διαφορετικό μονοπάτι, στο σημείο $z=L$ που βρίσκεται το φορτίο θα φτάνουν πολύοδες συνιστώσες που θα παράγουν τάσεις και ρεύματα με διαφορετικά πλάτη και φάσεις. Είναι συνεπώς πιθανό λόγω της πολυοδικής διάδοσης να παρατηρήσουμε ισχυρή απόσβεση του σήματος στην έξοδο της διάταξης.

Όλη η παραπάνω ανάλυση έγινε θεωρώντας ως δεδομένο ότι η γραμμή μεταφοράς δεν είναι προσαρμοσμένη. Στην περίπτωση που είχαμε προσαρμογή δε θα γίνονταν ανακλάσεις στο φορτίο και στη μόνιμη κατάσταση θα υπήρχε μόνο ένα κύμα που θα κινούταν από την πηγή προς το φορτίο. Συνεπώς η συνάρτηση μεταφοράς της γραμμής ($H_{TL}(f)$), αν θεωρήσουμε πως η έξοδος λαμβάνεται στο φορτίο, θα ήταν ίση με:

$$H_{TL}(f) = e^{-\gamma d} \quad (3.5-1)$$

όπου d το μήκος της γραμμής. Η (3.5-1) προέκυψε με χρήση της (3.4-41). Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονίσουμε το εξής: αν δεν έχουμε προσαρμογή η $H_{TL}(f)$ προφανώς δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τη μόνιμη κατάσταση. Παρόλα αυτά εξακολουθεί να αποτελεί τη συνάρτηση μεταφοράς της κάθε μιας ξεχωριστής πολυόδου συνιστώσας που κινείται στη γραμμή.

Ως τώρα είδαμε τι συμβαίνει όταν έχουμε μόνο μία γραμμή μεταφοράς που τερματίζεται με ένα φορτίο. Αν η διάταξή μας ήταν πιο περίπλοκη (είχαμε δηλαδή πολλές γραμμές μεταφοράς διασυνδεδεμένες μεταξύ τους) θα παρατηρούσαμε πάλι όλα τα προηγούμενα φαινόμενα. Βεβαίως τώρα θα γίνονταν ανακλάσεις σε διάφορα σημεία,

και όχι μόνο σε δυο, θα παράγονταν πολλές πολύοδες συνιστώσες και τελικά η όλη διαδικασία θα ήταν πολύ πιο σύνθετη. Όσον αφορά τη συνολική τάση ή ρεύμα σε κάποιο σημείο, θα προέκυπτε και σε αυτή την περίπτωση από την υπέρθεση όλων των πολυόδων συνιστωσών που περνούν από το σημείο που μας ενδιαφέρει.

Έστω τώρα ότι θέλουμε να υπολογίσουμε θεωρητικά ένα μέγεθος (τάση ή ρεύμα) σε κάποιο σημείο μιας διάταξης. Ο υπολογισμός μπορεί να γίνει με δυο τρόπους. Ο πρώτος είναι να κάνουμε ανάλυση μόνιμης κατάστασης και να βρούμε το μέγεθος που ψάχνουμε με τη βοήθεια των δυο κυμάτων που θα προκύψουν. Ο δεύτερος είναι να υπολογίσουμε όλες τις ξεχωριστές πολύοδες συνιστώσες που διέρχονται από το σημείο που μας ενδιαφέρει και να τις χρησιμοποιήσουμε για να βρούμε τα αποτελέσματα που θέλουμε. Όπως εύκολα καταλαβαίνει κανείς ο δεύτερος τρόπος είναι πολύ πιο δύσκολος και επίπονος από τον πρώτο. Παρόλα αυτά στην ανάλυση που υπάρχει στο κεφάλαιο 4 εμείς χρησιμοποιούμε τη δεύτερη προσέγγιση επειδή μόνο με αυτή μπορούμε να πάρουμε πληροφορίες για δυο σημαντικά μεγέθη που αναφέραμε στο κεφάλαιο 1: την ενεργό διασπορά καθυστέρησης (τ_{rms}) και τη μέση καθυστέρηση (τ).

Όπως βλέπουμε από τα παραπάνω οι όροι πολύοδος συνιστώσα και κύμα μόνιμης κατάστασης περιγράφουν δυο διαφορετικά πράγματα. Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητό τι ακριβώς σημαίνει ο κάθε όρος ώστε να μη δημιουργηθεί σύγχυση στη συνέχεια.

3.6 Υποδειματοποίηση ηλεκτρικών επαφών

3.6.1 Κυκλωματική Υποδειματοποίηση

Κύκλωμα

Ηλεκτρικό κύκλωμα (electric circuit) ή απλώς κύκλωμα (circuit) ορίζεται η συνδεσμολογία στοιχείων από τα οποία διέρχεται ηλεκτρικό ρεύμα, περιλαμβάνοντας τα στοιχεία και το εκτός αυτών τμήμα επιφάνειας, κάθετο σε κάθε σημείο στην διεύθυνση του ρεύματος στα γεωμετρικών τους κέντρα. Ως κόμβος (node) αναφέρεται στα πλαίσια κυκλώματος κάθε συνένωση περισσότερων των δύο συνιστάμενων στοιχείων. Ως κλάδος (branch) αναφέρεται στα πλαίσια κυκλώματος κάθε συνεχόμενο συνιστάμενο στοιχείο, μη διακοπτόμενο από κόμβο. Ως βρόχος (loop) αναφέρεται στα πλαίσια κυκλώματος κάθε κλειστή συνδεσμολογία στοιχείων.

Εμπέδηση – Αγωγιμότητα

Θεωρούμε ζεύγος σημείων Σ_1 , Σ_2 που βρίσκεται υπό σταθερά μεταβαλλόμενη τάση $V_{\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1}(O)$ προκαλώντας κατά μήκος της διαδρομής O ρεύμα αγωγιμότητας I_e θετικής εξ' ορισμού φοράς αναφοράς ομόρροπης της κατεύθυνσης ελάττωσης της διεγερούμενης τάσης, η μεταξύ των Σ_1 και Σ_2 σύνθετη αντίσταση (immitance) ή εμπέδηση (impedance) $Z(O)$ ορίζεται ως ο λόγος τάσης προς ρεύμα:

$$Z(O) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{V_{\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1}(O)}{I_e} \quad (3.6-1a)$$

Η αντίσταση (resistance) μεταξύ των Σ_1 και Σ_2 ορίζεται ως το πραγματικό μέρος της εμπέδησης:

$$R(O) \triangleq \operatorname{Re}\{Z(O)\} \quad (3.6-1\beta)$$

Η άεργος αντίσταση (reactance) μεταξύ των Σ_1 και Σ_2 ορίζεται ως το φανταστικό μέρος της εμπέδησης:

$$R(O) \triangleq \operatorname{Im}\{Z(O)\} \quad (3.6-1\gamma)$$

Η μεταξύ Σ_1 και Σ_2 σύνθετη αγωγιμότητα ή αποδεκτότητα (admittance) $Y(O)$ ορίζεται ως η αντίστροφος της ομολόγου εμπέδησης:

$$Y(O) \triangleq \frac{I_e}{V_{\Sigma_1 \rightarrow \Sigma_2}(O)} \quad (3.6-2\alpha)$$

Η μεταξύ των Σ_1 και Σ_2 αγωγιμότητα (conductance) $G(O)$ ορίζεται ως το πραγματικό μέρος της αποδεκτότητας:

$$G(O) \triangleq \operatorname{Re}\{Y(O)\} \quad (3.6-2\beta)$$

Προκειμένου περί στατικής πεδιακής δομής, η εμπέδηση και η αποδεκτότητα ορίζονται από τις σχέσεις (3.6-1) και (3.6-2) μοναδικά, ανεξάρτητα της διαδρομής ορισμού τάσης O .

Αυτεπαγωγή – Αλληλεπαγωγή

Η αυτεπαγωγή (self-inductance, inductance) L κυκλώματος που διαρρέεται από ρεύμα αγωγιμότητας I_e που προκαλεί στο κύκλωμα μαγνητική ροή Ψ_m , θεωρούμενη σε επιφάνεια ομόρροπη του μαγνητικού πεδίου ορίζεται ως ο λόγος μαγνητικής ροής προς ρεύμα:

$$L \triangleq \frac{\Psi_m}{I_e} \quad (3.6-3\alpha)$$

Ρεύμα αγωγιμότητας I_e κατά μήκος διαδρομής O από το σημείο Σ_2 προς το σημείο Σ_1 προκαλεί τάση :

$$V_{\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1}(O) = \frac{d\Psi_m}{dt} = L \frac{dI_e}{dt} \quad (3.6-3\beta)$$

όπου L η αυτεπαγωγή του κυκλώματος της αγωγίμης διαδρομής, του οποίου η εμπέδηση είναι εξ' ορισμού :

$$Z(O) = j2\pi fL \quad (3.6-3\gamma)$$

όπου f η συχνότητα διέγερσης.

Η αλληλεπαγωγή ή αμοιβαία επαγωγή (mutual inductance) M_{12} ζεύγους κυκλωμάτων, όπου ρεύμα αγωγιμότητας I_{e2} διαρρέει το δεύτερο και προκαλεί στο πρώτο μαγνητική ροή, ορίζεται ως ο λόγος μαγνητικής ροής προς ρεύμα:

$$M_{12} \triangleq \frac{\Psi_{m12}}{I_{e2}} \quad (3.6-4\alpha)$$

Ομοίως ορίζεται και η αλληλεπαγωγή M_{21} . Εξ ορισμού ισχύει

$$M_{12} = M_{21} \triangleq M \quad (3.6-4\beta)$$

Δεδομένου ρεύματος αγωγιμότητας I_{e2} κατά μήκος διαδρομής O_2 , το οποίο προκαλείται από κύκλωμα που ορίζεται από άλλη αγωγή διαδρομή O_1 που αρχίζει από το σημείο Σ_2 και τελειώνει στο σημείο Σ_1 , μαγνητική ροή Ψ_{m12} , δημιουργείται τάση:

$$V_{\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1}(O) = \frac{d\Psi_{m12}}{dt} = L \frac{dI_{e2}}{dt} \quad (3.6-4\gamma)$$

Όπου M η μεταξύ των οριζόμενων από τα O_1 και O_2 κυκλώματα αλληλεπαγωγή, η δε διαδρομή O_1 θεωρείται ομόρροπη της διεγείρουσας μαγνητικής ροής Ψ_{m12} . Προκειμένου περί στατική πεδιακή δομή, η αυτεπαγωγή και η αλληλεπαγωγή ορίζονται σύμφωνα με τις σχέσεις (3.6-3) και (3.6-4) μοναδικά, ανεξάρτητα της διαδρομής ορισμού της τάσης O .

Χωρητικότητα

Δεδομένου ζεύγους αγωγών διαχωριζομένων από διηλεκτρικό και υπό θεωρούμενη τάση $V_{\Sigma_2 \rightarrow \Sigma_1}(O)$ κατά μήκος διαδρομής O , η οποία ξεκινά από τον ένα αγωγό και τελειώνοντας στον άλλο, η μεταξύ των αγωγών χωρητικότητα (capacitance) $C(O)$ ορίζεται ως ο λόγος της μεταξύ τους ηλεκτρικής ροής Ψ_e προς τη θεωρούμενη τάση

$$C(O) \triangleq \frac{\Psi_e}{V_{\Sigma_1 \rightarrow \Sigma_2}(O)} \quad (3.6-5\alpha)$$

όπου η μεν ηλεκτρική ροή Ψ_e ορίζεται ως το ολοκλήρωμα της πυκνότητας της ηλεκτρικής σε κλειστή επιφάνεια ολοκλήρωσης S που περικλείει αγωγίμο σώμα εκτός του αγωγού εκκίνησης της διαδρομής O , με κατεύθυνση προς τα έξω. Προκειμένου για τέλειους αγωγούς και στατικής ή ημιστατικής θεώρησης, η χωρητικότητα ορίζεται σύμφωνα με την σχέση (3.22-1α) μοναδικά, ανεξάρτητα της διαδρομής ορισμού της τάσης O , η μεταξύ των αγωγών εμπέδηση αντιστοιχεί σε

$$Z_c = \frac{1}{j2\pi f C} \quad (3.6-5\beta)$$

όπου f η συχνότητα διέγερσης.

Διάκριση βάσει Ηλεκτρικού Μήκους

Κυκλωματικό στοιχείο του οποίου η μέγιστη διάσταση είναι μικρή – προσεγγιστικά κάτω του δέκατου – σε σύγκριση με το ελάχιστο μήκος κύματος (wavelength) της διέγερσης, επιδέχεται την ημιστατική πεδιακή θεώρηση, υποδειγματοποιούμενον ως συγκεντρωμένο στοιχείο (lumped element) μεταξύ ζεύγους σημειακών ακροδεκτών. Διαφορετικά το στοιχείο χρήζει κατανεμημένη (distributed) υποδειγματοποίηση ανά μονάδα μήκους (per-unit-length) παραμέτρων.

Κυκλωματικοί Νόμοι Τάσεων και Ρευμάτων

A) Νόμος Τάσεων Kirchhoff (Kirchhoff's Voltage Law) NTK :

Το αλγεβρικό άθροισμα των τάσεων των κλάδων βρόχου ενός ηλεκτρικού κυκλώματος είναι μηδενικό. Προκύπτει από το νόμο του Faraday και ισχύει για κυκλώματα συγκεντρωμένων στοιχείων.

B) Νόμος Ρευμάτων Kirchhoff (Kirchhoff's Current Law) NPK :

Το αλγεβρικό άθροισμα των εισερχόμενων ηλεκτρικών εντάσεων στο κόμβο ενός ηλεκτρικού κυκλώματος ισούται με το αλγεβρικό άθροισμα των αναχωρούντων εντάσεων από το κόμβο αυτό. Προκύπτει από το νόμο Διατήρησης Φορτίου.

3.7 Κυκλωματική υποδειγματοποίηση αγωγών

3.7.1 Ηλεκτρικό Πεδίο και Ρεύμα εντός Αγωγών

Διέπον Φαινόμενο – Εσωτερική Εμπέδηση

Εντός τέλειων αγωγών, το ηλεκτρικό ρεύμα κατανέμεται ομοιόμορφα κατά την εγκάρσια διατομή του αγωγού, το δε ηλεκτρικό πεδίο διατηρείται μηδενικό. Προκειμένου περί καλών αγωγών, με τμηματικά ή καθόλου λεία εξωτερική επιφάνεια, η επί συνεχή διέγερση, εγκάρσια κατανομή ηλεκτρικού πεδίου και ρεύματος προκύπτει ομοιόμορφη, η δε, επί αρμονική διέγερση, κατανομή μεταβάλλεται, σε κάθε θέση του διαμήκους άξονα, μειούμενη από την εξωτερική επιφάνεια προς το εσωτερικό του αγωγού και η οξύτητα αυτής της ελάττωσης εντείνεται συναρτήσει της συχνότητας. Η εν λόγω συγκέντρωση ηλεκτρικού πεδίου και ρεύματος κοντά στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού καλείται επιδερμικό φαινόμενο (skin effect).

Με χαμηλή συχνότητα διέγερσης, το ρεύμα δεν είναι αμελητέο στην εγκάρσια διατομή του αγωγού και η κατανομή του ρεύματος λαμβάνεται ως ομοιόμορφη, η δε απορρέουσα εσωτερική εμπέδηση (internal impedance) του αγωγού αναφέρεται ως βαθύσυχη εμπέδηση (low-frequency impedance). Με υψηλή συχνότητα διέγερσης, έτσι ώστε το ρεύμα να είναι μη υπολογίσιμο, εντός περιμετρικού τομέα, μικρού από εξωτερική επιφάνεια εγκάρσιου βάθους σε σύγκριση με τις αντίστοιχες διαστάσεις της εγκάρσιας διατομής του αγωγού, η κατανομή του ρεύματος εκλαμβάνεται ως

ομοιόμορφη, περιμετρικά επιφανειακή, η δε εσωτερική εμπέδηση του αγωγού αναφέρεται ως υψίσυχη εμπέδηση (high-frequency), η επιφανειακή εμπέδηση είναι βαθμωτή και ορίζεται ανά μονάδα μήκους του αγωγού :

$$Z_s \triangleq \frac{E_s}{I} \quad (3.7-1)$$

ως ο λόγος του διαμήκους επιφανειακού ηλεκτρικού πεδίου E_s , περιμετρικά σταθερού ως προς την ομόρροπη ένταση ρεύματος I .

Για περισσότερους από έναν γειτνιαζόντων αγωγών που διαρρέονται από ρεύμα, η ομοιομορφία της κατανομής του ρεύματος και του πεδίου ως προς τον διαμήκη άξονα του αγωγού ομοιομορφία παραβιάζεται λόγω επιδράσεων εγγύτητας (proximity effect), από την αλληλεπίδραση των Νόμων Faraday και Ampere – Maxwell μεταξύ της παραγόμενης από το ρεύμα κάθε αγωγού μαγνητικής ροής και των ρευμάτων και πεδίων όλων των λοιπών αγωγών. Στις συνδεσμολογίες που συναντάμε συνήθως οι εγκάρσιες διαστάσεις των αγωγών και αποστάσεις διαχωρισμού εξασφαλίζουν την εν λόγω παραδοχή ομοιόμορφης κατανομής ρεύματος και πεδίου ακρίβεια πολύ ικανοποιητική.

Υψίσυχη Εμπέδηση Ημιάπειρου Αγωγίμου Ημιχώρου

Δεδομένου κανονικού ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων, ο ημιάπειρος ημιχώρος (semiinfinite half-space) ορίζεται ως άπειρος εκτεινόμενος προς τον θετικό και τον αρνητικό ημιάξονα ως προς δύο διαστάσεις, και άπειρος εκτεινόμενος στον άξονα της τρίτης διάστασης.

Θεωρούμε ημιάπειρο αγωγίμο ημιχώρο, εκτεινόμενο στο άπειρο κατά τους άξονες μήκους (z) και πλάτους (y) υφιστάμενο κατά τον θετικό ημιάξονα βάθους (x) και παριστάμενων των E_s και J_s , αρμονικά χρονοεξαρτώμενων, αμετάβλητων κατά τη διεύθυνση πλάτους y , τιμών διαμήκους ηλεκτρικού πεδίου και χωρητικής πυκνότητας ρεύματος αντιστοίχως, με την εξωτερική επιφάνεια του αγωγού ($x=0$), οι διαμήκεις συνιστώσες ηλεκτρικού πεδίου E_z και ρευματικής πυκνότητας J_z υπόκεινται προς το εσωτερικό του αγωγού της εκθετικής μεταβολής:

$$\frac{E_z}{E_s} = \frac{J_z}{J_s} = e^{-x/\delta} e^{-jx/\delta} \quad (3.7-2\alpha)$$

$$J_s = \sigma_w E_s \quad (3.7-2\beta)$$

όπου
$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_w \sigma_w}} \quad (3.7-3)$$

το επιδερμικό βάθος (skin depth) ή βάθος διεισδύσεως (penetration depth), f η διεγείρουσα συχνότητα, μ_w η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού και σ_w η

αγωγιμότητά του. Η διερχόμενη από το τμήμα πλάτους Δy διαμήκης ένταση ρεύματος του αγωγίου ημιχώρου είναι

$$I_z(\Delta y) = \frac{J_s \delta}{1+j} \Delta y \quad (3.7-4)$$

Η ανά μονάδα μήκους υψίσυχη εμπέδηση του εν λόγω τμήματος είναι

$$Z_z(\Delta y) = \frac{1+j}{\sigma_w \delta \Delta y} \quad (3.7-5)$$

Η προσέγγιση μέσω ημιάπειρου αγωγίου ημιχώρου παρέχει με ικανοποιητική ακρίβεια την υψίσυχη εμπέδηση αγωγών λείας εξωτερικής επιφάνειας, η ελάχιστη ακτίνα καμπυλότητας και η ελάχιστη εγκάρσια διάμετρος διάσταση είναι μικρή σε σύγκριση με το επιδερμικό βάθος, εάν αντικαταστήσουμε στις (3.7-4) και (3.7-5) το πλάτος Δy με τη περίμετρο του αγωγού. Η εσωτερική εμπέδηση κάθε αγωγού η ελάχιστη εγκάρσια διάσταση υπερβαίνει το διπλάσιο του επιδερμικού βάθους, χρήζει μεταχείρισης στη βάση του επιδερμικού φαινομένου για προσδιορισμό της ομόλογης υψίσυχης εμπέδησης.

Υψίσυχη Εμπέδηση Κυλινδρικού Αγωγού

Θεωρούμε κυλινδρικό αγωγό ακτίνας r_0 , του οποίου ως άξονα συμμετρία λαμβάνουμε τον διαμήκη άξονα z . Ως r παριστάνεται η εγκάρσια από τον διαμήκη άξονα ακτινική απόσταση, ως E_s και J_s οι αρμονικά χρονοεξαρτώμενες, περιμετρικά αμετάβλητες τιμές του διαμήκους ηλεκτρικού πεδίου και χωρητικής πυκνότητας ρεύματος αντίστοιχα, στην εξωτερική επιφάνεια του αγωγού ($r=r_0$). Οι διαμήκεις συνιστώσες του ηλεκτρικού πεδίου E_z και της ρευματικής πυκνότητας J_z υπόκεινται στο εσωτερικό του αγωγού της ίδιας μεταβολής

$$\frac{E_z}{E_s} = \frac{J_z}{J_s} = \left(\frac{Ber(\sqrt{2}r/\delta) + jBer(\sqrt{2}r/\delta)}{Ber(\sqrt{2}r_0/\delta) + jBer(\sqrt{2}r_0/\delta)} \right) \quad (3.7-6\alpha)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Ber(v) \equiv \text{Re} \left\{ J_0(j^{-1/2}v) \right\} \\ Bei(v) \equiv \text{Im} \left\{ J_0(j^{-1/2}v) \right\} \end{array} \right\} \quad (3.7-6\beta)$$

$$J_s = \sigma_w E_s \quad (3.7-6\gamma)$$

όπου J_0 η μηδενικής τάξης συνάρτηση Bessel 1ου είδους, δ το επιδερμικό βάθος του αγωγού και σ_w η αγωγιμότητά του. Η διερχόμενη από την εγκάρσια διατομή του αγωγού, διαμήκης ρευματική ένταση είναι :

$$I_z = -j^{-1/2} \sqrt{2\pi_0} J_s \delta \frac{J'_0\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{j^{1/2}\delta}\right)}{J_0\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{j^{1/2}\delta}\right)} \quad (3.7-7)$$

η ανά μονάδα μήκους, υψίσυχνη εμπέδηση του αγωγού είναι:

$$Z = -(j^{1/2} \sqrt{2\pi_0} \sigma \delta)^{-1} \frac{J_0\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{j^{1/2}\delta}\right)}{J'_0\left(\frac{\sqrt{2}r_0}{j^{1/2}\delta}\right)} \quad (3.7-8\alpha)$$

όπου J'_0 η παράγωγος της J_0 . Η οριζόμενη από τη σχέση (3.7-8α) παράμετρος εμπέδησης προκύπτει αυθαίρετα με διέγερση της συχνότητας

$$Z = \left(\frac{Ber(\sqrt{2}r_0/\delta)Bei'(\sqrt{2}r_0/\delta) - Bei(\sqrt{2}r_0/\delta)Ber(\sqrt{2}r_0/\delta)}{[Ber'(\sqrt{2}r_0/\delta)]^2 + [Bei'(\sqrt{2}r_0/\delta)]^2} \right) + \left(\frac{Ber(\sqrt{2}r_0/\delta)Ber'(\sqrt{2}r_0/\delta) - Bei(\sqrt{2}r_0/\delta)Bei'(\sqrt{2}r_0/\delta)}{[Ber'(\sqrt{2}r_0/\delta)]^2 + [Bei'(\sqrt{2}r_0/\delta)]^2} \right) \quad (3.7-8\beta)$$

απλοποιούμε θεωρώντας ότι

$$\frac{\sqrt{2}r_0}{\delta} \gg 1 \quad (3.7-9\alpha)$$

και η υψίσυχνη ανά μονάδα μήκους εμπέδηση είναι :

$$Z_{hf} = \frac{(1+j)}{2\pi_0 \sigma \delta} \quad (3.7-9\beta)$$

όμοια με την (3.6-5), που προκύπτει με αντικατάσταση της $\Delta y = 2\pi_0$

Θεωρώντας την υποδειγματοποίηση των αγωγών με βάση την έννοια της ανά μονάδα μήκους εμπέδησης όπως ορίζεται ανωτέρω, θα εξετάσουμε κατά πόσο η ισοδύναμη εμπέδηση των επαφών που θα εξεταστούν αντιστοιχούν σε υπολογίσιμο μήκος αγωγού σε σχέση με τα μήκη των αγωγών που συνήθως απαντώνται στα ηλεκτρικά δίκτυα.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΣΚΟΠΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εμπίπτει στην ερευνητική περιοχή των Επικοινωνιών Γραμμών Ισχύος, αντικείμενο της οποίας είναι η ανάπτυξη επικοινωνιακών εφαρμογών μέσα από δίκτυα, στη δομή των οποίων περιλαμβάνεται τμήμα ή τμήματα του ηλεκτρικού δικτύου ισχύος.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των επαφών Ηλεκτρικού Δικτύου Χαμηλής Τάσης στη περιοχή των υψηλών συχνοτήτων.

Σε προγενέστερες ερευνητικές εργασίες, που πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο, αναπτύχθηκαν θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης μετάδοσης σήματος πληροφορίας μέσω ηλεκτρικών γραμμών Δικτύου Ηλεκτρικής Ισχύος. Συγκεκριμένα, το μοντέλο αφορά Γραμμές Μεταφοράς δύο αγωγών. Επίσης, έγιναν πειραματικές μετρήσεις για την επαλήθευση του θεωρητικού αυτού μοντέλου.

Τα ηλεκτρικά δίκτυα κτιριακών εγκαταστάσεων Χαμηλής Τάσης ακολουθούν μία τυποποιημένη δομή. Σύμφωνα με αυτήν την τυποποίηση, για τις εσωτερικές εγκαταστάσεις, υπάρχει ένας κεντρικός πίνακας, ο οποίος συνδέεται με το δίκτυο διανομής Χ.Τ. της Δημόσιας Διαχείρισης Ενέργειας. Από τον κεντρικό πίνακα μπορεί να ξεκινούν γραμμές που να φθάνουν σε υποπίνακες καθώς και άλλες που καταλήγουν σε σημεία κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι πίνακες αυτοί, ανάλογα με τις ανάγκες που καλύπτουν, περιέχουν διάφορα είδη επαφών, όπως αποζεύκτες, ασφάλειες κ.α.. Οι επαφές αυτές, στα θεωρητικά μοντέλα προσομοίωσης μετάδοσης υψίσυχνου σήματος και γενικά στις ερευνητικές μελέτες, έχουν θεωρηθεί σημεία διακλάδωσης και η επίδρασή τους στο μεταδιδόμενο σήμα θεωρείται αμελητέα.

Στην εργασία αυτή, εξετάζεται η ανωτέρω παραδοχή. Για το σκοπό αυτό μετρήθηκαν διάφορες επαφές πινάκων, ίδιου αλλά και διαφορετικού ονομαστικού ρεύματος και τύπου, ώστε να διαστασιολογηθούν και να μοντελοποιηθούν ως γραμμικές αντιστάσεις και να εξεταστεί η επίδρασή τους στο μεταδιδόμενο σήμα.

Στα πλαίσια, λοιπόν, αυτά και θεωρώντας την υποδειγματοποίηση των αγωγών με βάση την έννοια της ανά μονάδας μήκους εμπέδησης όπως ορίζεται ανωτέρω στην εργασία, θα εξετάσουμε κατά πόσον η ισοδύναμη εμπέδηση των επαφών που θα εξεταστούν αντιστοιχεί σε υπολογίσιμο μήκος αγωγού, σε σχέση με τα τυπικά μήκη διαύλων που αναμένεται να απαντηθούν στα ηλεκτρικά δίκτυα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

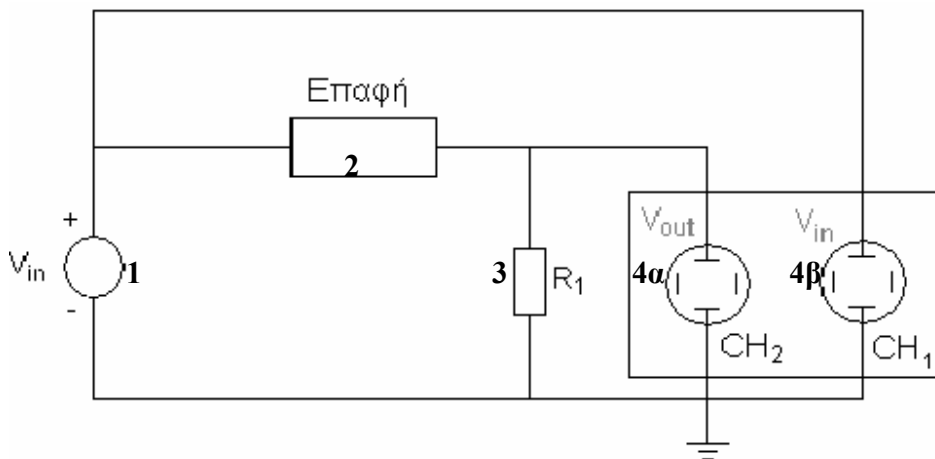
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για τη διαστασιολόγηση και μοντελοποίηση των επαφών του πίνακα χαμηλής τάσης, ως γραμμικές αντιστάσεις, απαιτείται η μέτρησή τους για διάφορες τιμές υψηλών συχνοτήτων, προκειμένου να διαπιστωθεί η ορθότητα της παραδοχής, ότι η επίδρασή των επαφών αυτών στο διαδιδόμενο σήμα πληροφορίας είναι αμελητέα.

4.2 ΚΥΚΛΩΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ

Στο σχήμα (4.1) έχει παρασταθεί διαγραμματικά η συνδεσμολογία του βασικού κυκλώματος μετρήσεων.



Σχήμα 4.1. Κύκλωμα μετρήσεων

1. Γεννήτρια
2. Δοκίμιο
3. R_1 , ωμική αντίσταση μέτρησης
4. Παλμογράφος

Τα όργανα που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

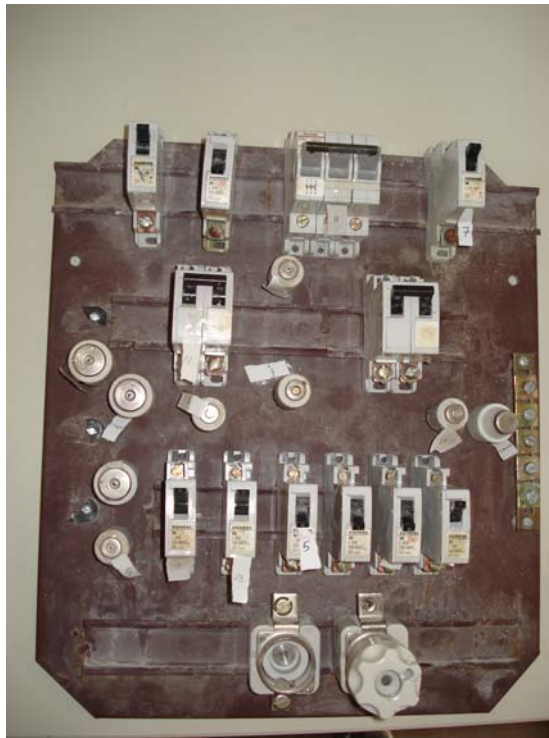
- Γεννήτρια** : Agilent 33250 A
80MHz Function / Arbitrary Wave form Generator
- Παλμογράφος** : Tektronix TDS 210
Two Channel Digital Real Time Oscilloscope
60MHz, 1GS/s
CH₁ και CH₂ κανάλια του παλμογράφου μέτρησης τάσης

εισόδου και εξόδου στην επαφή, αντίστοιχα.

Ως «Επαφή» ορίζεται η επαφή του πίνακα δικτύου χαμηλής τάσης για την οποία διαπιστώνεται η υψίσυχνη απόκριση, κάθε φορά. Η αντίσταση μέτρησης R_1 είναι μία ωμική αντίσταση τιμής 51Ω και ακρίβεια αντιστάσεως 2%.

4.3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Κατά τη διαδικασία των μετρήσεων η γεννήτρια ρυθμίστηκε σε τάση $V_{IN} \equiv V_1$ ίση με 10 Volts pp και καταγράφηκαν οι μεταβολές της τάσης εισόδου $V_{IN} \equiv V_1$ και της τάσης εξόδου $V_{εξ} \equiv V_{R1} \equiv V_2$, για κάθε επαφή, για συχνότητα σήματος από 1,6 έως 30,0 MHz, με βήμα 50kHz, με σκοπό την εύρεση του ισοδύναμου μήκους της. Επειδή η τάση εισόδου με την τάση εξόδου, οπτικά, παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο ως συμφασικές, αγνοείται το φανταστικό μέρος της εμπέδησης, δηλαδή οι επαφές λαμβάνονται ως ωμικές και δε χρειάζεται να καταγραφούν μετρήσεις για τη διαφορά φάσης. Στην εικόνα 4.1-1 παρουσιάζεται ο πίνακας Χαμηλής Τάσης που περιέχει τις επαφές προς μέτρηση, ενώ η εικόνα 4.1-2 απεικονίζει τους δύο τύπους ασφαλειών που μετρήθηκαν –τύπου μικροαυτόματου και βιδωτές-.



Εικόνα 4.1-1 Πίνακας Χαμηλής Τάσης που περιέχει τις επαφές προς μέτρηση.






(α)




(β)




Εικόνα 4.1-2 Οι δύο τύποι ασφαλειών που μετρήθηκαν:
(α) τύπου μικροαυτόματου και (β) βιδωτές.




Συνολικά μετρήθηκαν 20 επαφές, τρεις ονομαστικού ρεύματος 10A (δύο τύπου μικροαυτόματου και μία βιδωτή), τέσσερις των 16 A (δύο τύπου μικροαυτόματου και δύο βιδωτές), τρεις των 20 A (δύο τύπου μικροαυτόματου και μία βιδωτή) και τρεις των 25 A (δύο τύπου μικροαυτόματου και μία βιδωτή). Επιπλέον, μετρήθηκαν δύο διπλοί διακόπτες και ένας τριπλός. Τέλος, ελήφθησαν μετρήσεις και για τέσσερις βιδωτές ασφάλειες των 35 A. Για πιο ακριβή αποτελέσματα και συμπεράσματα μετρήθηκαν επαφές ίδιου τύπου και ονομαστικού ρεύματος, ώστε να διαπιστωθούν πιθανές αποκλίσεις από μέτρηση σε μέτρηση λόγω χρόνου χρήσης των επαφών, καταπόνησής τους και περιβαλλοντικών συνθηκών, αλλά και διαφορετικού τύπου και ονομαστικού ρεύματος, ώστε να μελετηθεί η πιθανή συνάρτηση του ισοδύναμου μήκους επαφής από τη συχνότητα, αλλά και από το ονομαστικό ρεύμα καθώς και τον τύπο αυτής.


Στον ακόλουθο πίνακα (4.1) δίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι φωτογραφίες των επαφών που μετρήθηκαν.


a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
1	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	WL	
	Ονοματικό ρεύμα	10A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
2	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	W	
	Ονοματικό ρεύμα	10A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
3	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	10A	
	Ονομαστική τάση	500V	


	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
4	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	WL	
	Ονοματικό ρεύμα	16A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
5	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	W	
	Ονοματικό ρεύμα	16A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
6	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	16A	
	Ονομαστική τάση	500V	




7	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	16A	
	Ονομαστική τάση	500V	
Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής			
8	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	WL	
	Ονοματικό ρεύμα	20A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	
Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής			
9	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	W	
	Ονοματικό ρεύμα	20A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	

	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
10	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	20A	
	Ονομαστική τάση	500V	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
11	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	WL	
	Ονοματικό ρεύμα	25A	
	Ονομαστική τάση	380V~	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
12	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	W	
	Ονοματικό ρεύμα	25A	
	Ονομαστική τάση	380V~	

		Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής	
13	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	25A	
	Ονομαστική τάση	500V	

		Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής	
14	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	5TE1 312(διπλός)	
	Ονοματικό ρεύμα	25A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	

		Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής	
15	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	5TE1 312(διπλός)	
	Ονοματικό ρεύμα	25A	
	Ονομαστική τάση	220/380V~	

	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
16	Εταιρία	Siemens	
	Κωδικός	5TE2	
	Ονοματικό ρεύμα	Τριπλός	
	Ονομαστική τάση	63/380V~	
17	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	Βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	35A	
	Ονομαστική τάση	500V	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
18	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	Βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	35A	
	Ονομαστική τάση	500V	

	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
19	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	Βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	35A	
	Ονομαστική τάση	500V	
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		
20	Εταιρία	LINDNER	
	Κωδικός	Βιδωτή	
	Ονοματικό ρεύμα	35A	
	Ονομαστική τάση	500V	

**Πίν
ακα
ς 4.1**

Πίν
ακα
ς με
τα
χαρ
ακτ
ηρισ
τικά
, το
ονο
μασ
τικό
ρεύ
μα,
τον
τύπο
και
τη
φωτ
ογρ

αφία των επαφών που μετρήθηκαν.

Αρχικά, η γεννήτρια ρυθμίζεται, ώστε να δίνει ημίτονο πλάτους 10 V pp, πατώντας την επιλογή AMPLITUDE και εισάγοντας την επιθυμητή τιμή. Η dc συνιστώσα (OFFSET) είναι μηδενική. Η τιμή της αντιστάσεως R_1 , μέσω των επιλογών UTILITY-OUTPUT- SETUP- LOAD, ορίζεται στα 51Ω και επιλέγοντας OUTPUT η έξοδος οδηγείται στον παλμογράφο. Η τιμή της συχνότητας στη φάση αυτή έχει ρυθμιστεί στα 1,6MHz. Στον παλμογράφο, χρησιμοποιείται το AUTASET και για περαιτέρω σταθεροποίηση το ACQUIRE. Στην επιλογή AVERAGE τίθεται η τιμή 128 για ακόμα πιο σταθερή και αξιόπιστη έξοδο. Ως πηγή (SOURCE) ορίζεται το κανάλι 1 του παλμογράφου (CH1) και η κατάσταση (MODE) πρέπει να είναι ρυθμισμένη είτε στο AUTO, είτε στο NORMAL. Πατώντας το MEASURE μπορούν να ληφθούν μετρήσεις. Για αξιόπιστες μετρήσεις πρέπει στην οθόνη του παλμογράφου να φαίνονται τουλάχιστον τρεις περίοδοι. Καταγράφονται, τώρα, οι τιμές των τάσεων εισόδου και εξόδου, μεταβάλλοντας τη συχνότητα από 1,6 έως 30MHz με βήμα 50kHz.

4.4 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Ρυθμίστηκε η γεννήτρια σε τάση $V_{IN} \equiv V_1$ ίση με 10 Volts pp και μεταβάλλοντας την συχνότητα του σήματος από 1,6-30,0 MHz, με βήμα 50kHz, καταγράφηκαν οι μεταβολές της τάσης εισόδου $V_{IN} \equiv V_1$ και της τάσης εξόδου $V_{εξ} \equiv V_{R1} \equiv V_2$, για κάθε επαφή. Στη συνέχεια υπολογίστηκε η τάση κατά μήκος της επαφής $V_{επαφ}$, το ρεύμα I που την διαρρέει και οι μέγιστες τιμές των σφαλμάτων τους, ΔV_{\max} και ΔI_{\max} , από τις παρακάτω σχέσεις:

$$V_{επαφ} = V_{IN} - V_{R1} \quad (4.4-1)$$

Με μέγιστο συστηματικό σφάλμα

$$\Delta V_{\max} = |\Delta V_{IN}| + |\Delta V_{R1}| \quad (4.4-2)$$

όπου ΔV_{R1} & ΔV_{IN} είναι ίσα με το ελάχιστο σημαντικό ψηφίο της ένδειξης, διότι χρησιμοποιήθηκαν ψηφιακά όργανα μέτρησης, δηλαδή : $\Delta V_{R1}=0,01V$ & $\Delta V_{IN}=0,01V$. Επιπλέον για το ρεύμα ισχύει,

$$I = \frac{V_{R1}}{R_1} \quad (4.4-3)$$

Ωστόσο, για ένα φυσικό μέγεθος $y = f(y_1, y_2, \dots)$ που μετράται έμμεσα μέσω των μεταβλητών y_1, y_2, \dots, y_n , το μέγιστο συστηματικό σφάλμα δίνεται από τη σχέση:

$$|\Delta y| = \left| \frac{\partial y}{\partial y_1} \Delta y_1 \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial y_2} \Delta y_2 \right| + \dots + \left| \frac{\partial y}{\partial y_n} \Delta y_n \right| \quad (4.4-4)$$

και έτσι,

$$\Delta I_{\max} = \frac{1}{R_1} |\Delta V_{R1}| + \frac{V_{R1}}{R_1^2} |\Delta R_1| \quad (4.4-5)$$

όπου

$$\Delta R_1 = (\text{ακρίβεια της αντίστασης } R_1) \times (\text{τιμή της αντίστασης } R_1) \Rightarrow \Delta R = (2\%) \times (51\Omega) = 1,02 \Omega.$$

Έπειτα υπολογίστηκε η τιμή της αντίστασης επαφής $R_{επ}$ και το ισοδύναμο μήκος της $L_{επ}$.

$$\left. \begin{array}{l} R_{\varepsilon\pi} = L_{\varepsilon\pi} Z_{hf} \\ R_{\varepsilon\pi} = \frac{V_{\varepsilon\pi}}{I} \end{array} \right\} \Rightarrow L_{\varepsilon\pi} = \frac{V_{\varepsilon\pi}}{Z_{hf} \cdot I} \quad (4.4-6)$$

όπου Z_{hf} η υψίσυχνη ανά μονάδα μήκους εμπέδηση που δίνεται από τη σχέση:

$$Z_{hf} = \frac{1+j}{2\pi r_0 \sigma \delta} \quad (4.4-7)$$

όπου

$2r_0$ η διάμετρος του ισοδύναμου αγωγού. Ο υπολογισμός του ισοδύναμου μήκους της επαφής θα γίνει για αγωγό με τη συνήθη διατομή $\rho = 1,5 \text{ mm}^2$, για τον οποίο ισχύει $2r_0 = 1,38 \text{ mm}$,

σ η ειδική αγωγιμότητα του υλικού του αγωγού, για χαλκό $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ Siemens/m}$,
και

δ το επιδερμικό βάθος, που δίνεται από τη σχέση:

$$\delta \hat{=} \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu_w \sigma}} \quad \begin{array}{l} \mu_w = \mu_o \mu_r \\ \text{με } \mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}} \\ \mu_r = 1 \end{array}$$

μ_w η μαγνητική διαπερατότητα του αγωγού,

μ_o η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και

μ_r μαγνητική σταθερά, ίση με $1 + \chi_m$, όπου χ_m η παράμετρος μαγνητικής επιδεκτικότητας που κατά κανόνα για τα συνήθη διηλεκτρικά και αγωγιμα υλικά είναι πολύ μικρότερη της μονάδος και άρα με ικανοποιητική ακρίβεια λαμβάνεται $\mu_r = 1$.

Επειδή η είσοδος με την έξοδο οπτικά παρατηρήθηκαν στον παλμογράφο ως συμφασικές αγνοείται το φανταστικό μέρος της εμπέδησης, δηλαδή οι επαφές λαμβάνονται ως ωμικές, οπότε :

$$Z_{hf} = \frac{1}{2\pi r_0 \sigma \delta} \quad (4.4-8)$$

Έτσι, αντικαθιστώντας στη σχέση (4.4-6) τη σχέση (4.4-8) προκύπτει η σχέση για το ισοδύναμο μήκος της επαφής:

$$L_{\varepsilon\pi} = \frac{V_{\varepsilon\pi} (2\pi r_0 \sigma \delta)}{I} \quad (4.4-9)$$

Οι πίνακες των μετρήσεων και των υπολογισμών παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' στο τέλος της εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 Συγκριτικοί πίνακες αποτελεσμάτων – Γραφικές παραστάσεις

Παρακάτω ακολουθούν συγκριτικοί πίνακες μαζί με τις γραφικές παραστάσεις τάσεων εισόδου και εξόδου, ρεύματος, αντίστασης επαφής και ισοδύναμου μήκους επαφής συναρτήσει της συχνότητας για κάθε επαφή, ομαδοποιημένοι κατά ονομαστικό ρεύμα και τύπο επαφής.

Σε κάθε συγκριτικό πίνακα, για την κάθε ομάδα επαφών, δίνονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ισοδύναμου μήκους επαφής καθώς και οι συχνότητες όπου εμφανίζονται οι τιμές αυτές.

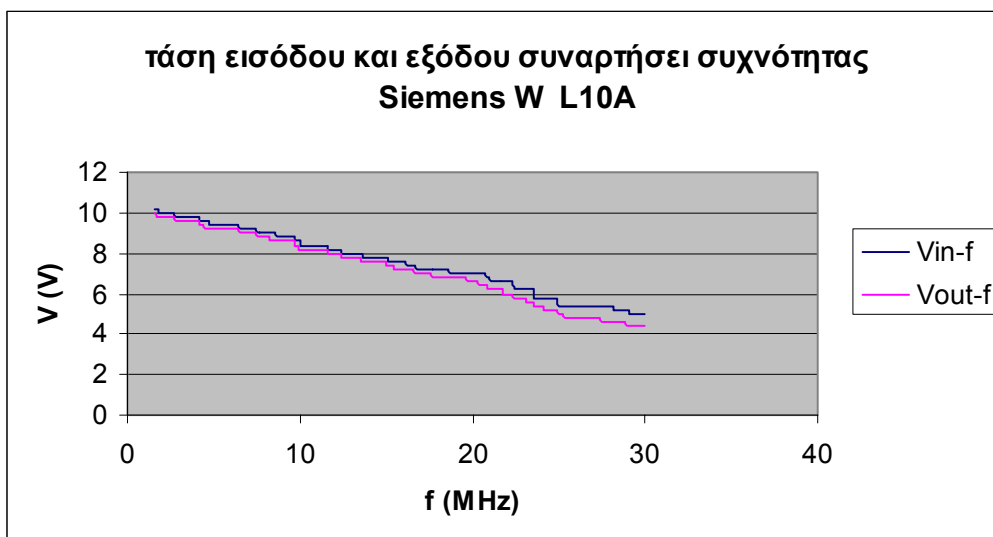
❖ Επαφές των 10 A

Ελήφθησαν μετρήσεις για τρεις επαφές ονομαστικού ρεύματος 10A, μία από τις οποίες είναι βιδωτή, έτσι ώστε να διακριθούν, ποσοτικά αλλά και ποιοτικά – μέσω των γραφικών παραστάσεων-, διαφορές που να οφείλονται στη χρήση, το χρόνο, στους περιβαλλοντικούς παράγοντες, αλλά και στον τύπο της επαφής

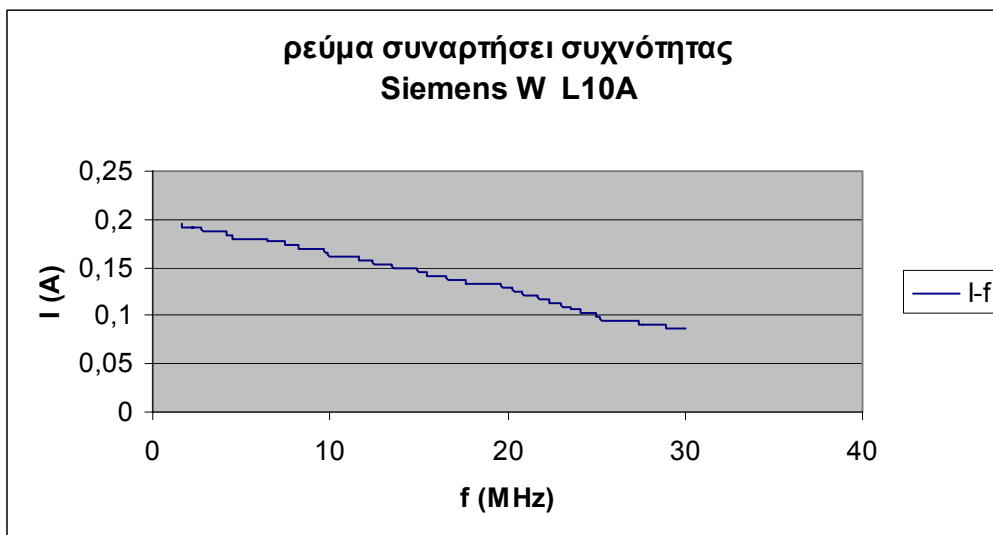
a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
1	Εταιρία	Siemens	19,6	5,623065	28,95	28,63824
	Κωδικός	W				
	Ονομαστικό ρεύμα	L10A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
2	Εταιρία	Siemens	9,9	5,230081	30	18,20345
	Κωδικός	W				
	Ονομαστικό ρεύμα	10A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
3	Εταιρία	LINDNER	19,5	2,429343	1,6	13,39995
	Κωδικός	βιδωτή				
	Ονομαστικό ρεύμα	10A				
	Ονομαστική τάση	500V				

Πίνακας 5.1-1 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου και βιδωτές των 10Α.

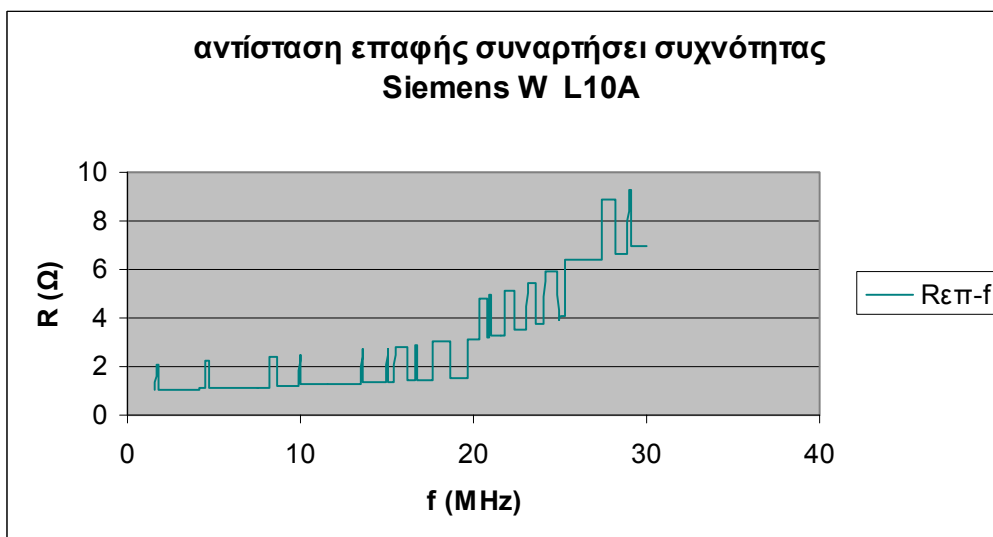
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων για 10Α:



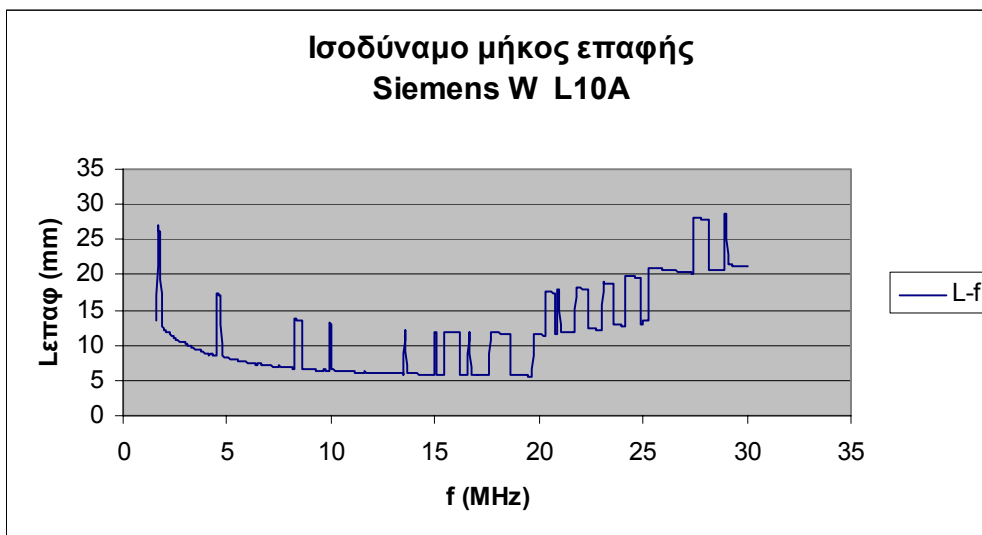
Σχήμα 5.2.1α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «1» με ονομαστικό ρεύμα 10A .



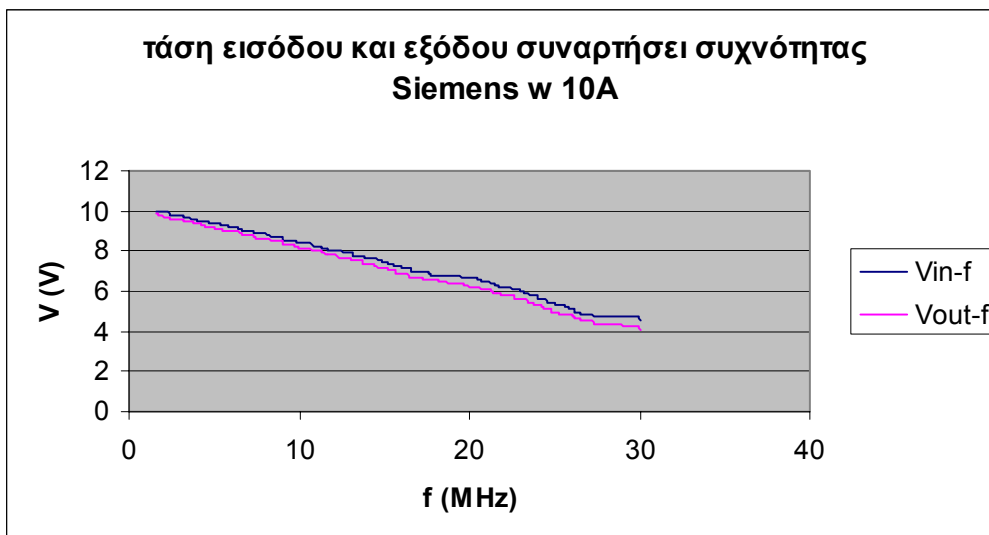
Σχήμα 5.2.1β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «1» με ονομαστικό ρεύμα 10A .



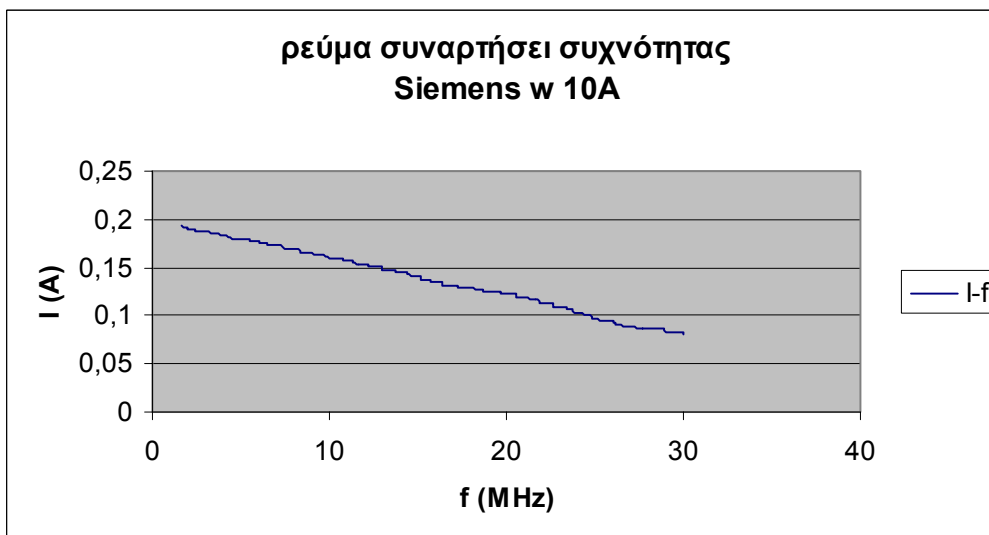
Σχήμα 5.2.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «1» με ονομαστικό ρεύμα 10Α.



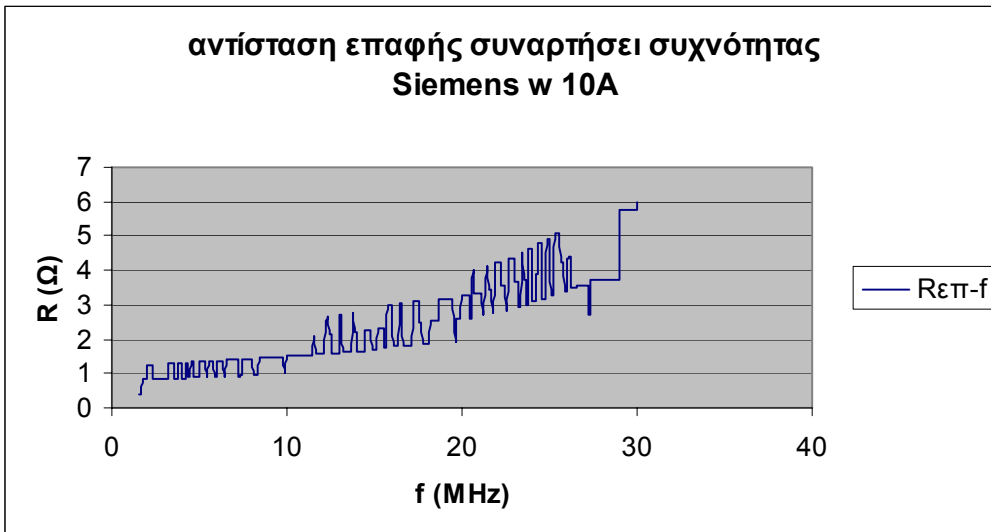
Σχήμα 5.2.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «1» με ονομαστικό ρεύμα 10Α.



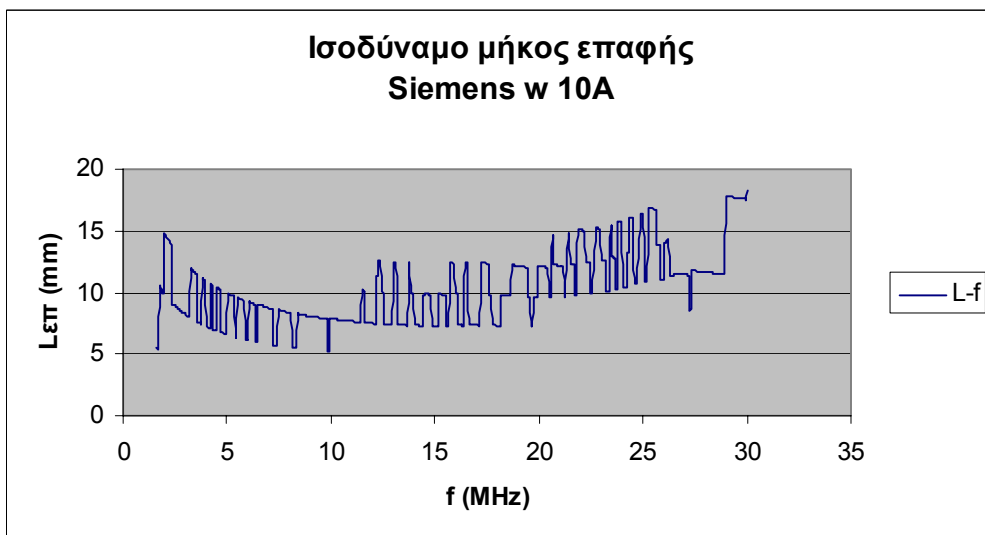
Σχήμα 5.2.2α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «2» με ονομαστικό ρεύμα 10A.



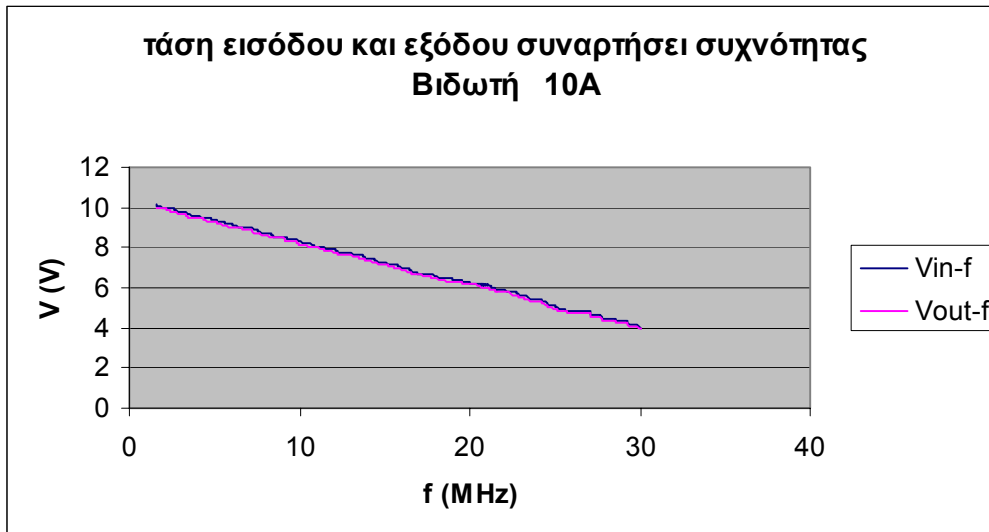
Σχήμα 5.2.2β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «2» με ονομαστικό ρεύμα 10A



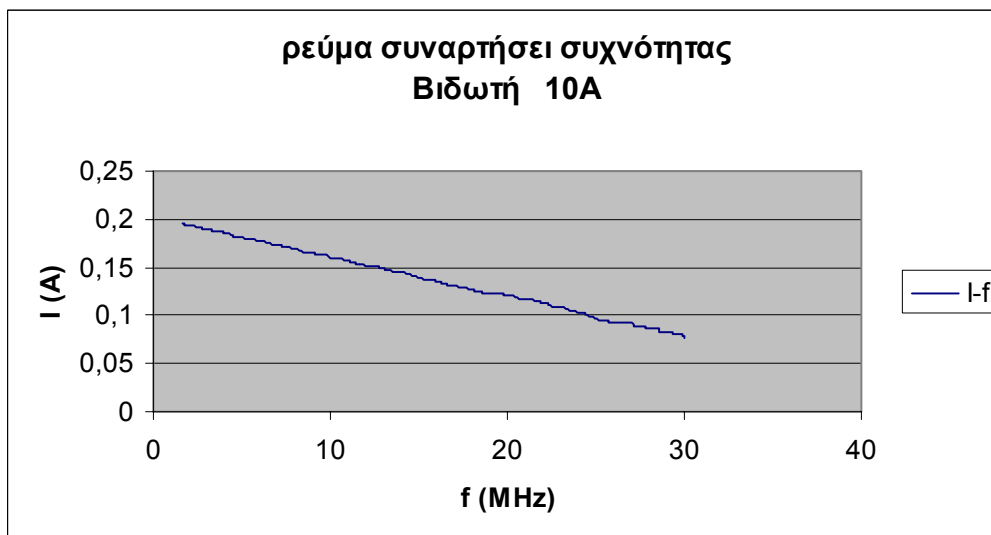
Σχήμα 5.2.2γ Διάγραμμα αντίστασης επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «2» με ονομαστικό ρεύμα 10A



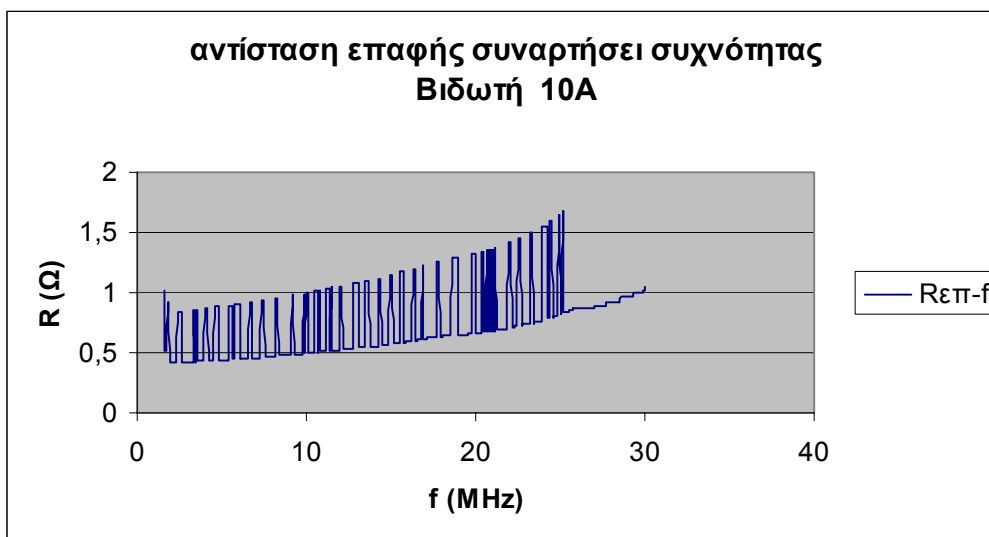
Σχήμα 5.2.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «2» με ονομαστικό ρεύμα 10A



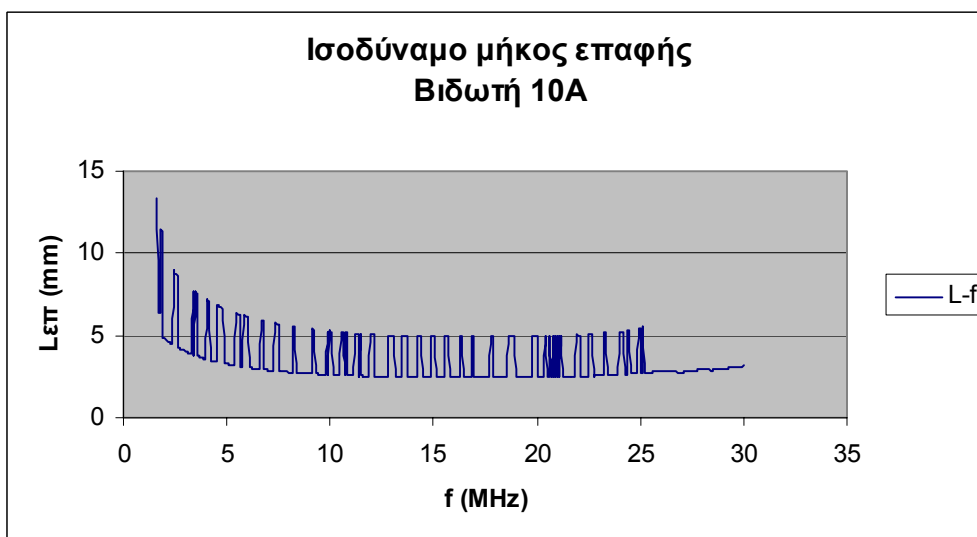
Σχήμα 5.2.3α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «3» με ονομαστικό ρεύμα 10A



Σχήμα 5.2.3β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «3» με ονομαστικό ρεύμα 10A



Σχήμα 5.2.3γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «3» με ονομαστικό ρεύμα 10Α



Σχήμα 5.2.3δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «3» με ονομαστικό ρεύμα 10Α

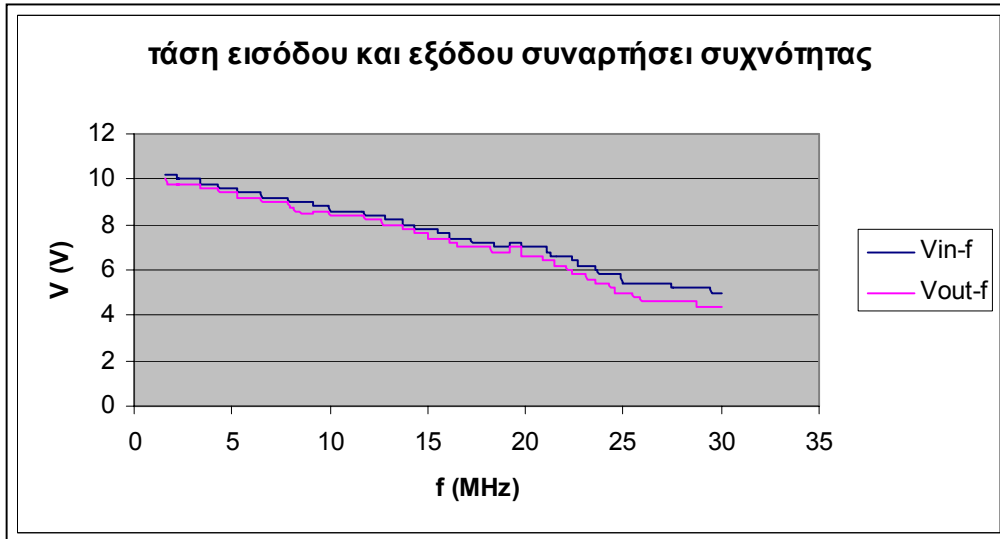
❖ **Επαφές των 16Α**

Για τον ίδιο σκοπό λαμβάνουμε μετρήσεις και για τέσσερις επαφές των 16Α, δύο από τις οποίες είναι βιδωτές αυτή τη φορά.

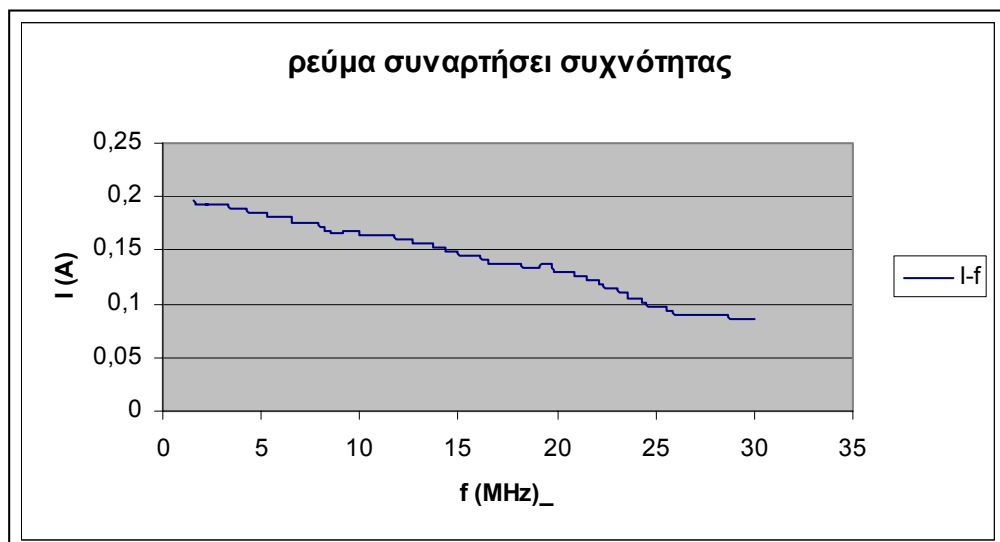
a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
4	Εταιρία	Siemens	19,75	5,448559	25,95	28,93322
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	L16A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
5	Εταιρία	Siemens	19,95	5,270591	1,75	26,14858
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	16A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
6	Εταιρία	LINDNER	26,75	1,437363	2,45	13,64974
	Κωδικός	βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	16A				
	Ονομαστική τάση	500V				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
7	Εταιρία	LINDNER	18,75	2,446485	2,6	13,25015
	Κωδικός	βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	16A				
	Ονομαστική τάση	500V				

Πίνακας 5.2-2 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου και βιδωτές των 16Α.

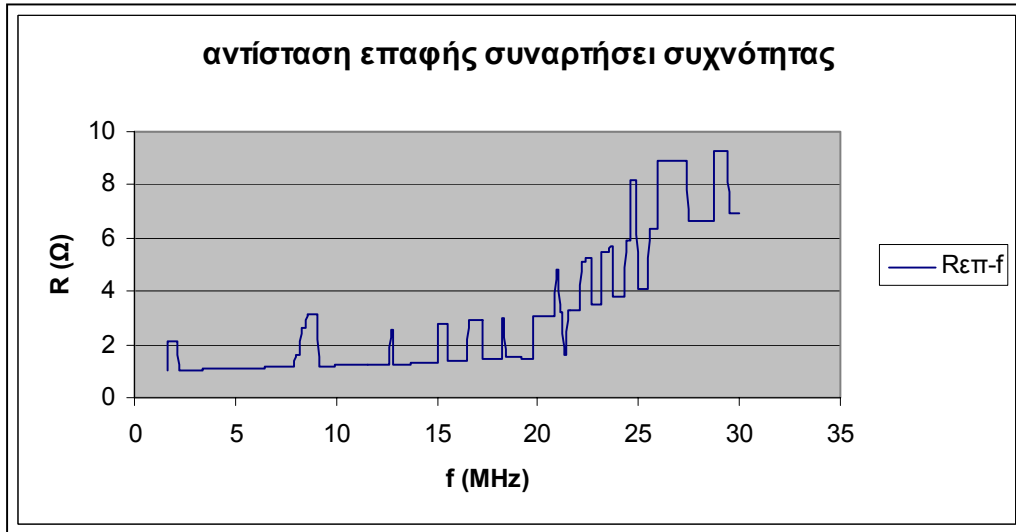
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων για 16Α:



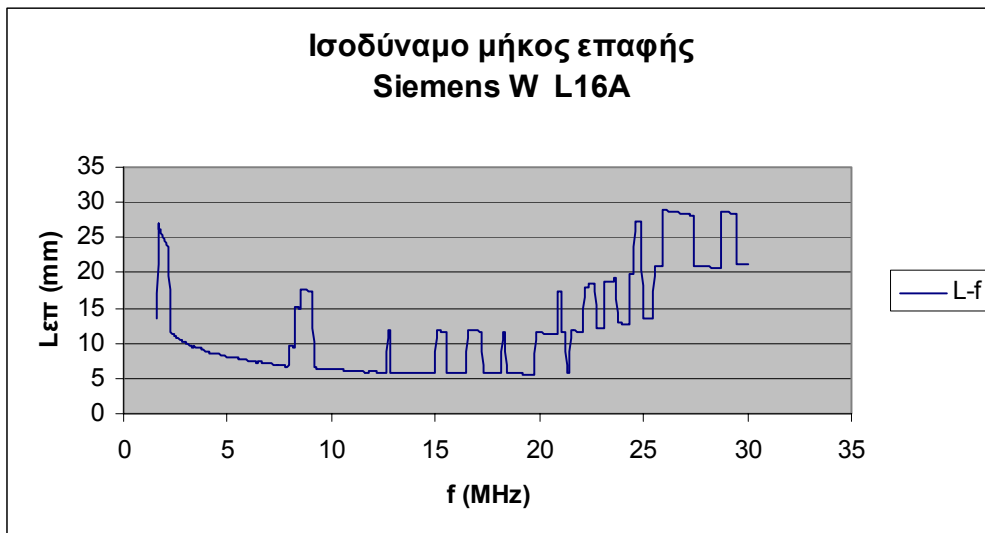
Σχήμα 5.3.1α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «4» με ονομαστικό ρεύμα 16A



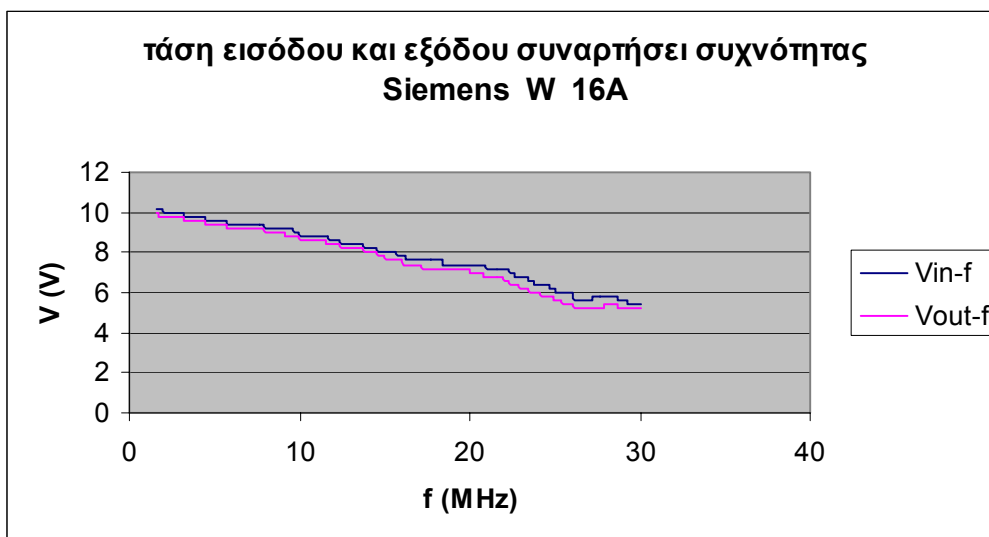
Σχήμα 5.3.1β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «4» με ονομαστικό ρεύμα 16A



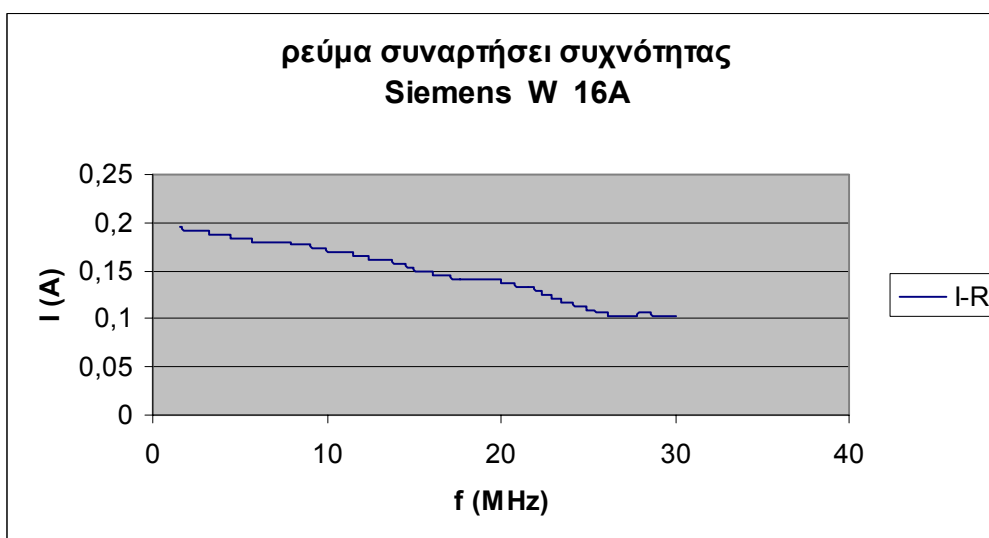
Σχήμα 5.3.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «4» με ονομαστικό ρεύμα 16A



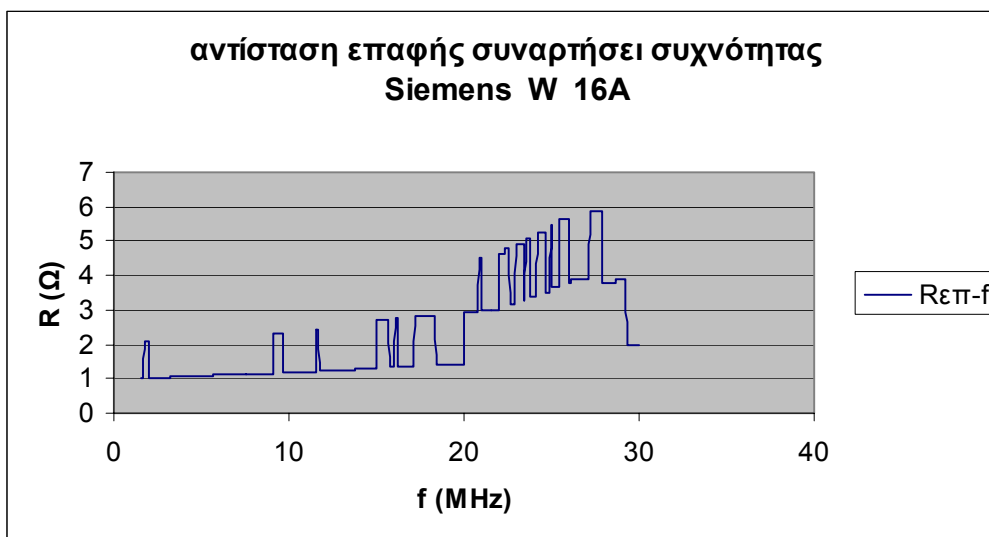
Σχήμα 5.3.1γ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «4» με ονομαστικό ρεύμα 16A



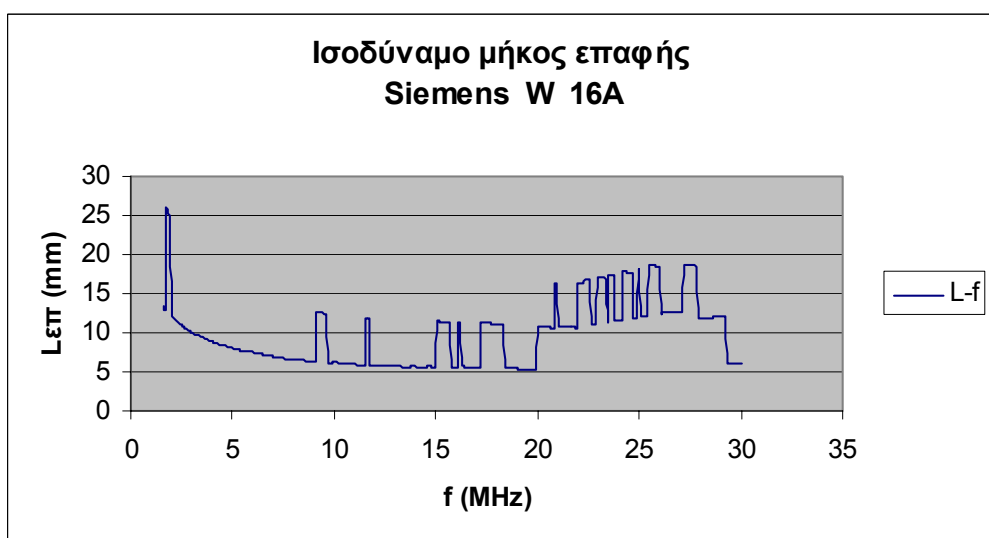
Σχήμα 5.3.2α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «5» με ονομαστικό ρεύμα 16A



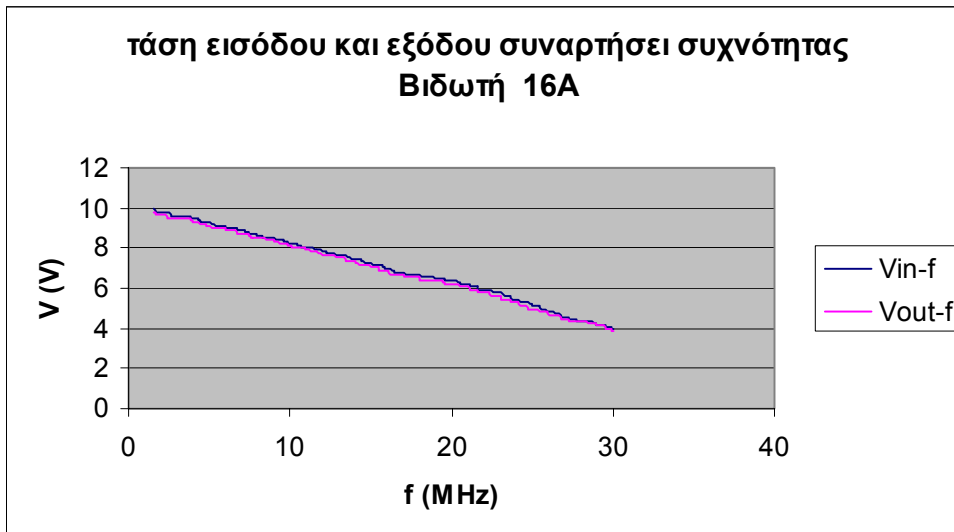
Σχήμα 5.3.2β Διάγραμμα ρεύματος συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «5» με ονομαστικό ρεύμα 16A



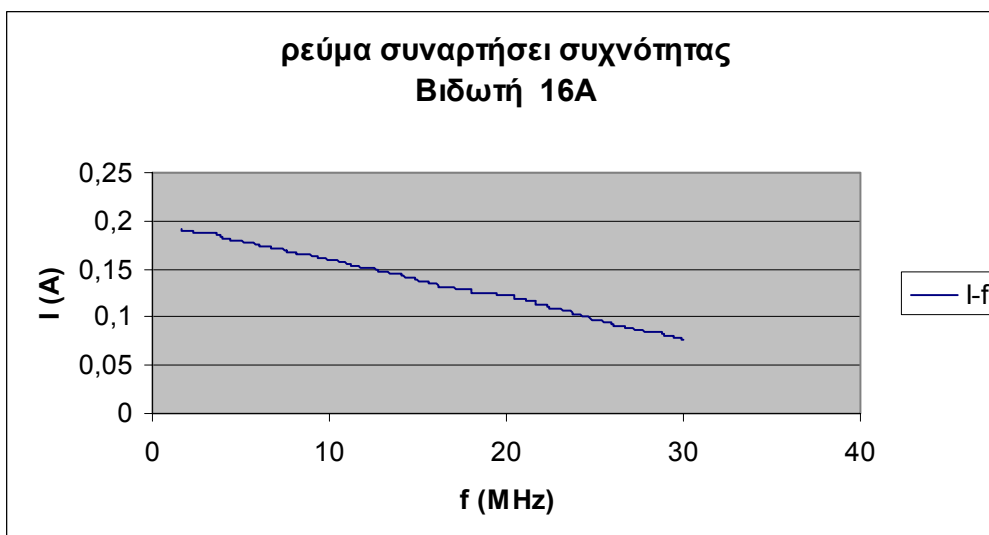
Σχήμα 5.3.2γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «5» με ονομαστικό ρεύμα 16A



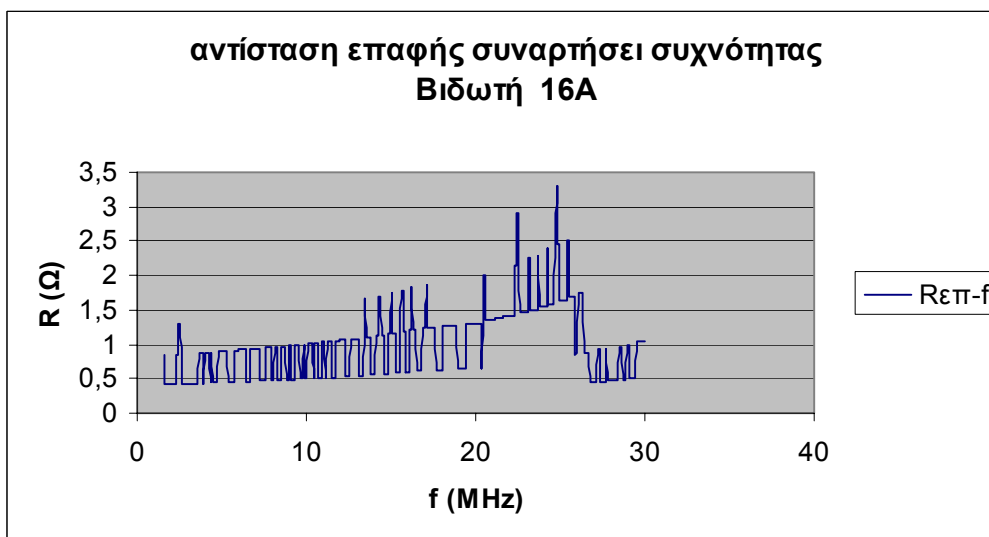
Σχήμα 5.3.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «5» με ονομαστικό ρεύμα 16A



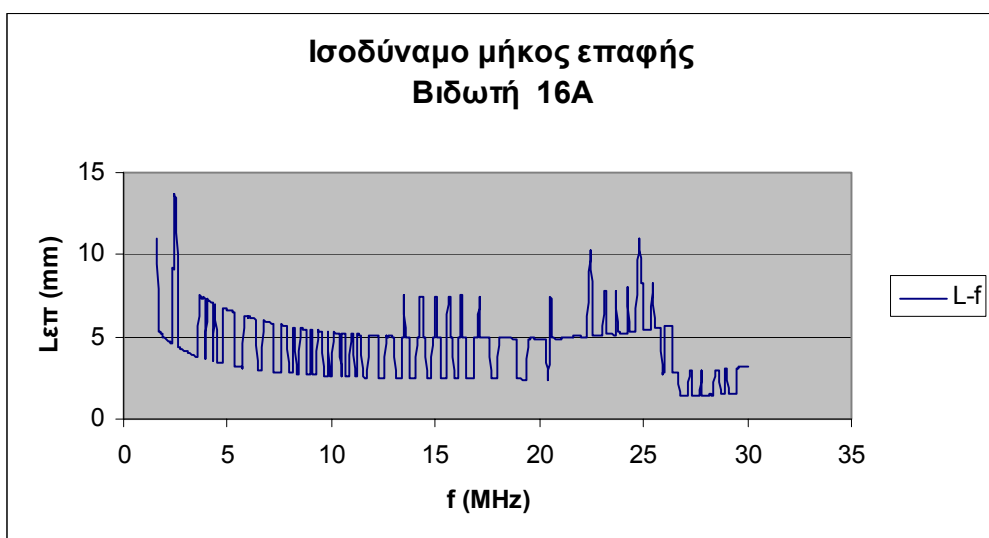
Σχήμα 5.3.3α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «6» με ονομαστικό ρεύμα 16A



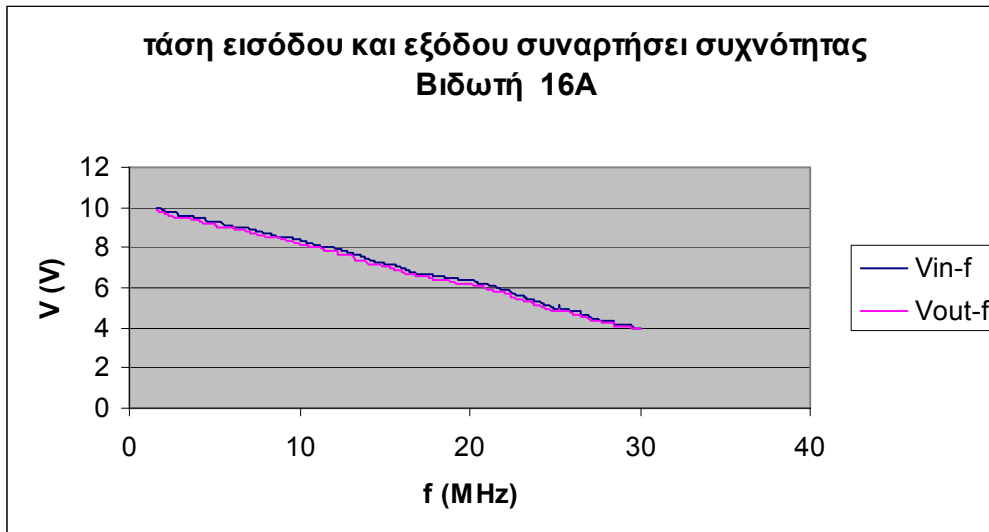
Σχήμα 5.3.3β Διάγραμμα ρεύματος συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «6» με ονομαστικό ρεύμα 16A



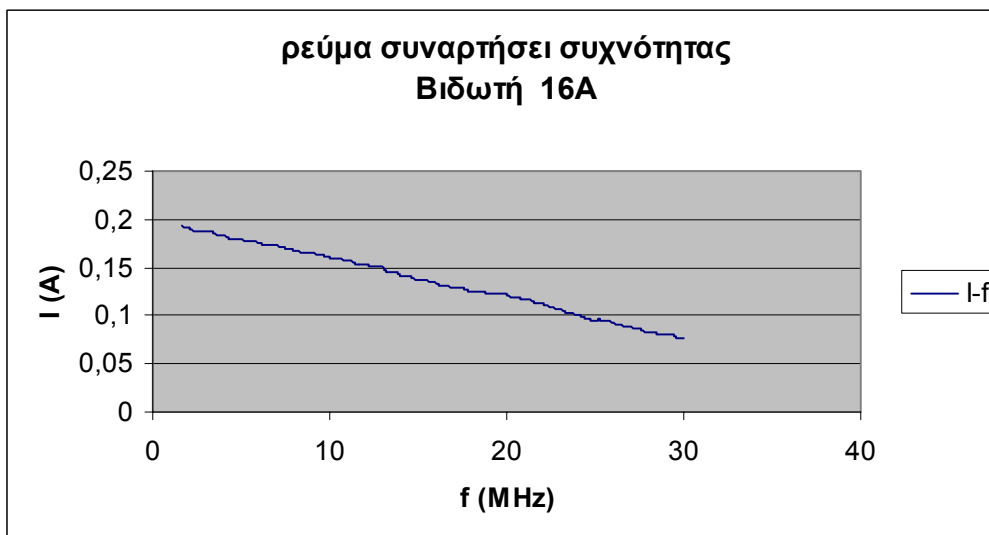
Σχήμα 5.3.3γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «6» με ονομαστικό ρεύμα 16Α



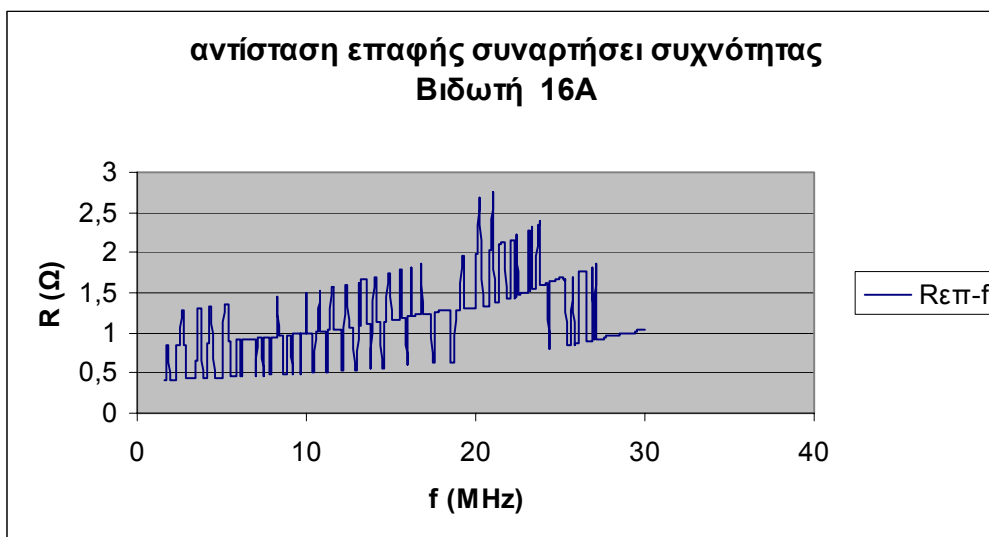
Σχήμα 5.3.3δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «6» με ονομαστικό ρεύμα 16Α



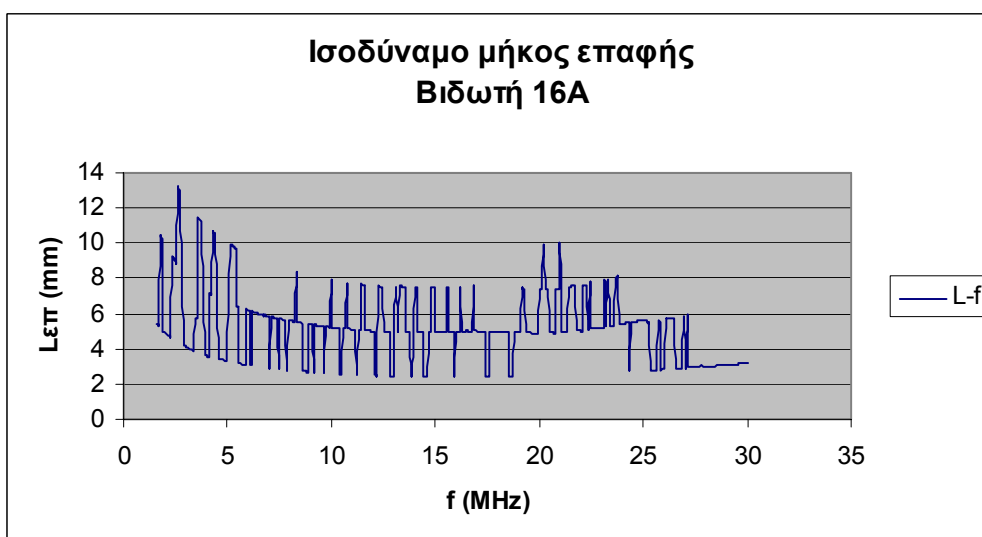
Σχήμα 5.3.4α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «7» με ονομαστικό ρεύμα 16A



Σχήμα 5.3.4β Διάγραμμα ρεύματος συναρτήσει με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «7» με ονομαστικό ρεύμα 16A



Σχήμα 5.3.4γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «7» με ονομαστικό ρεύμα 16Α



Σχήμα 5.3.4δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «7» με ονομαστικό ρεύμα 16Α

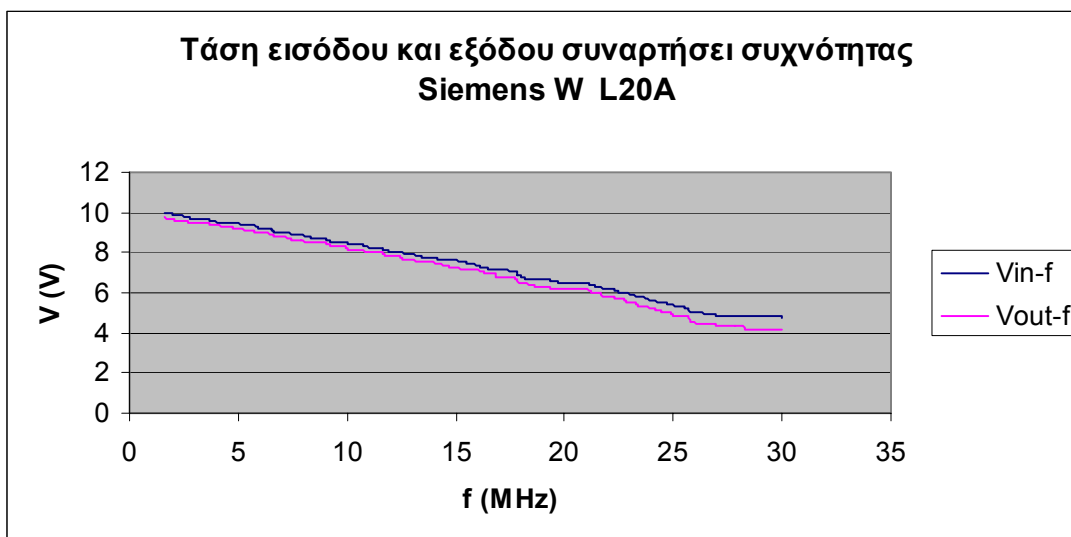
❖ **Επαφές των 20Α**

Όμοια δρούμε και για τις επαφές των 20 και των 25Α. Γίνονται τρεις σειρές μετρήσεων, μια από τις οποίες είναι για βιδωτή επαφή.

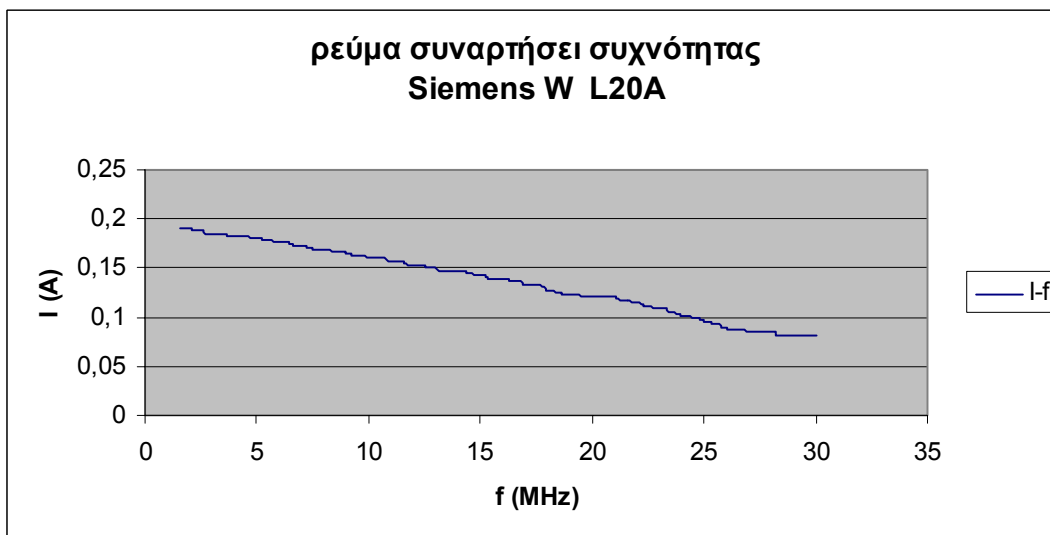
a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
8	Εταιρία	Siemens	10,75	5,0682596	28,25	26,189826
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	L20A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
9	Εταιρία	Siemens	20,05	5,407643	28,85	25,24529
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	20A				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
10	Εταιρία	LINDNER	27,85	5,839665	1,65	34,36292
	Κωδικός	βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	20A				
	Ονομαστική τάση	500V				

Πίνακας 5.3-3 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισodύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου και βιδωτές των 20Α.

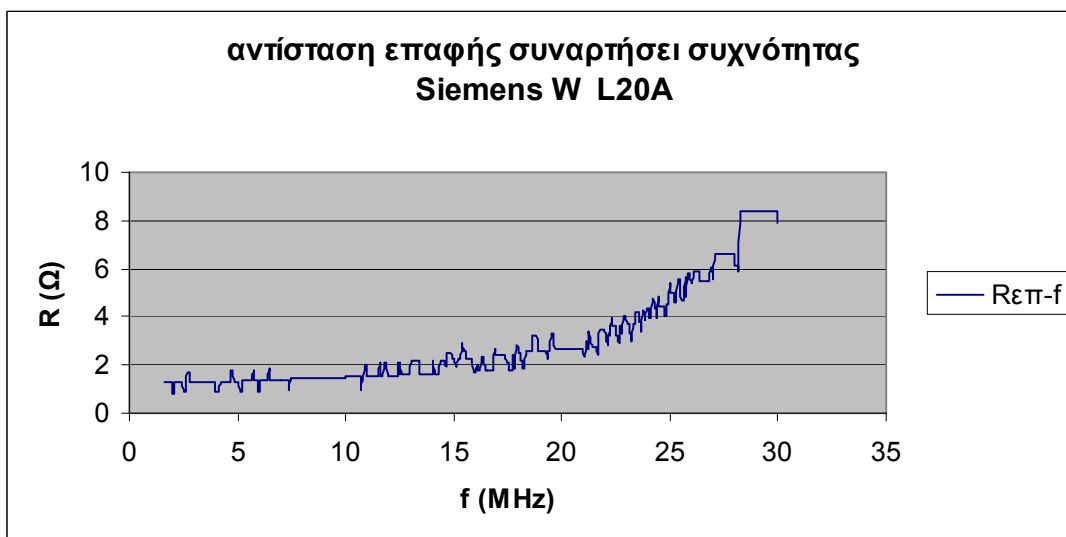
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων για 20Α:



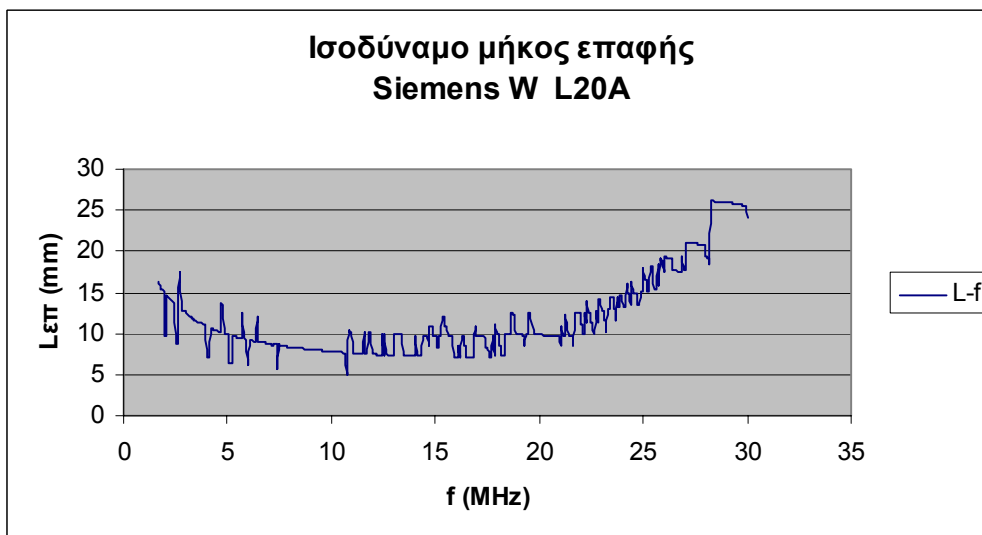
Σχήμα 5.4.1α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «8» με ονομαστικό ρεύμα 20A



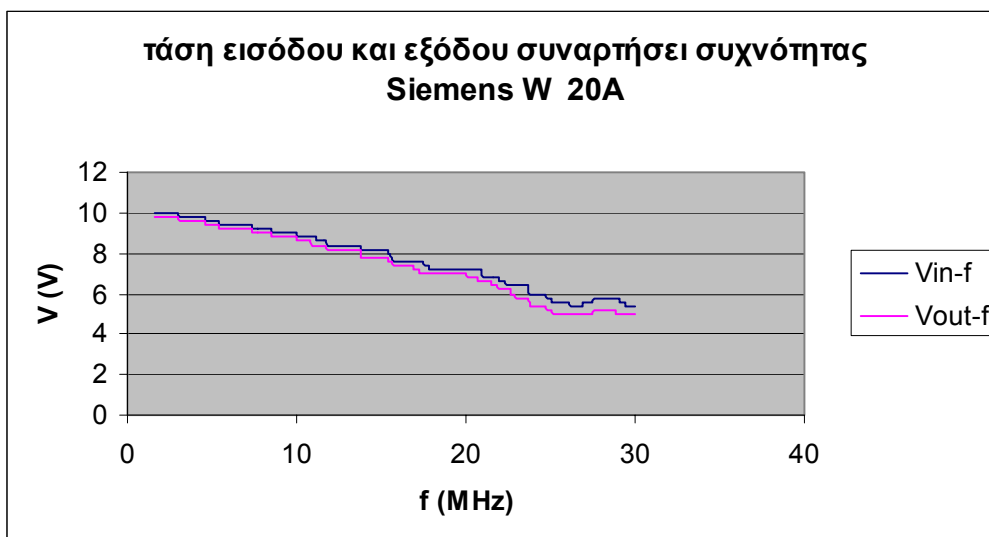
Σχήμα 5.4.1β Διάγραμμα ρεύματος συναρτήσει με τη συχνότητα για την επαφή «8» με ονομαστικό ρεύμα 20A



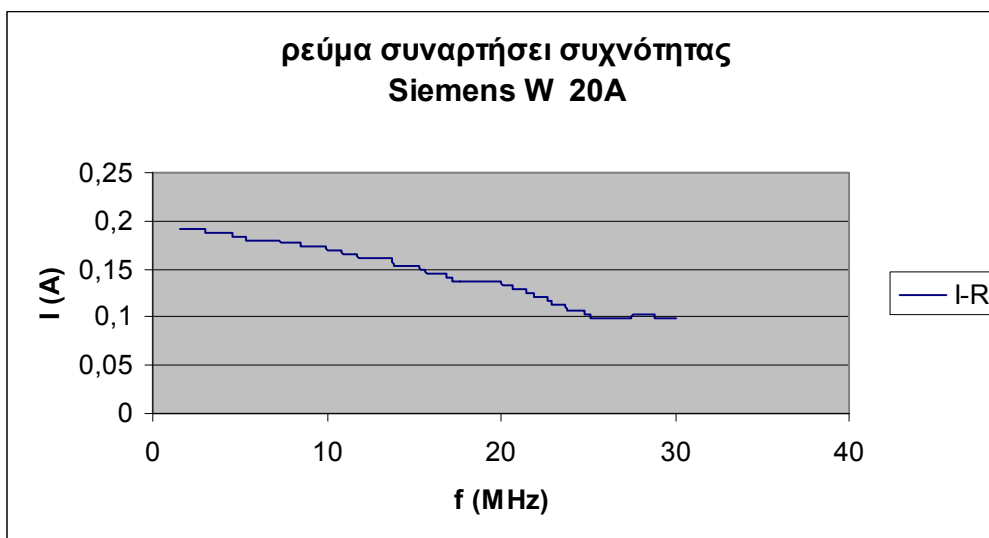
Σχήμα 5.4.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «8» με ονομαστικό ρεύμα 20A.



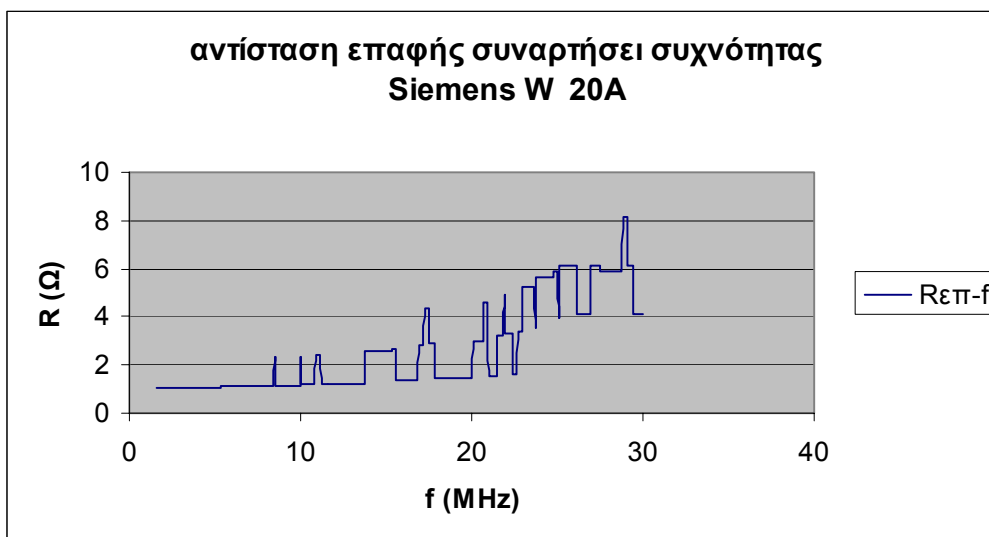
Σχήμα 5.4.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «8» με ονομαστικό ρεύμα 20A



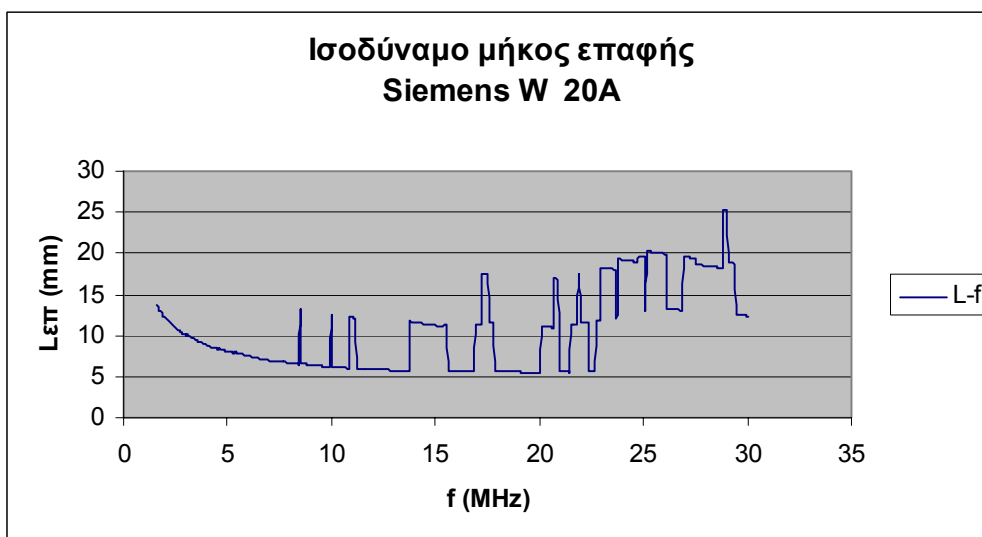
Σχήμα 5.4.2α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «9» με ονομαστικό ρεύμα 20A



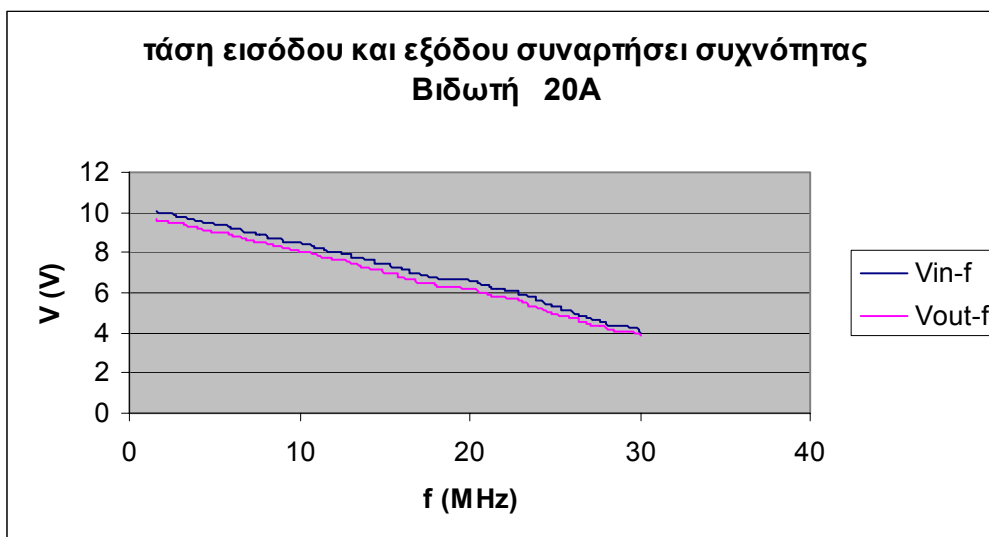
Σχήμα 5.4.2β Διάγραμμα ρεύματος συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «9» με ονομαστικό ρεύμα 20A



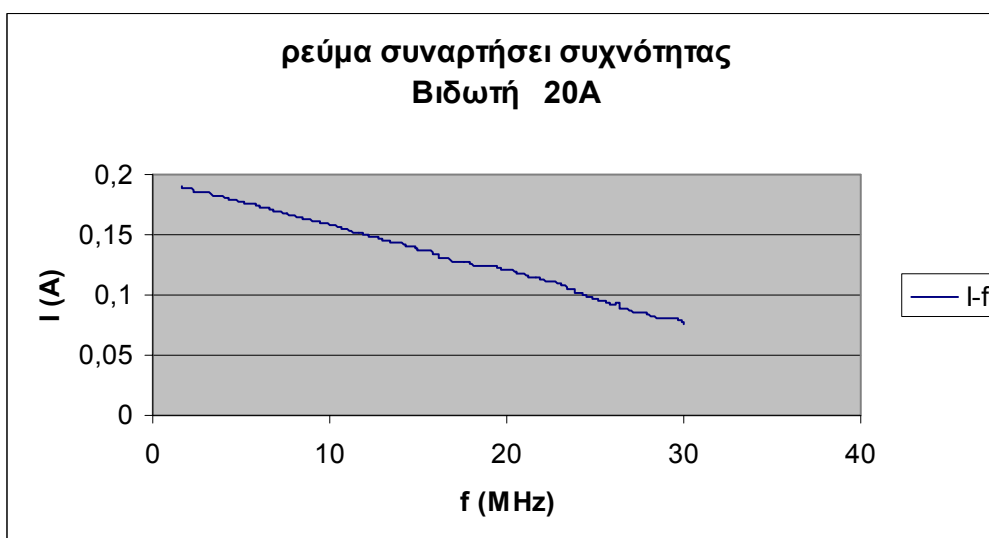
Σχήμα 5.4.2γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «9» με ονομαστικό ρεύμα 20A



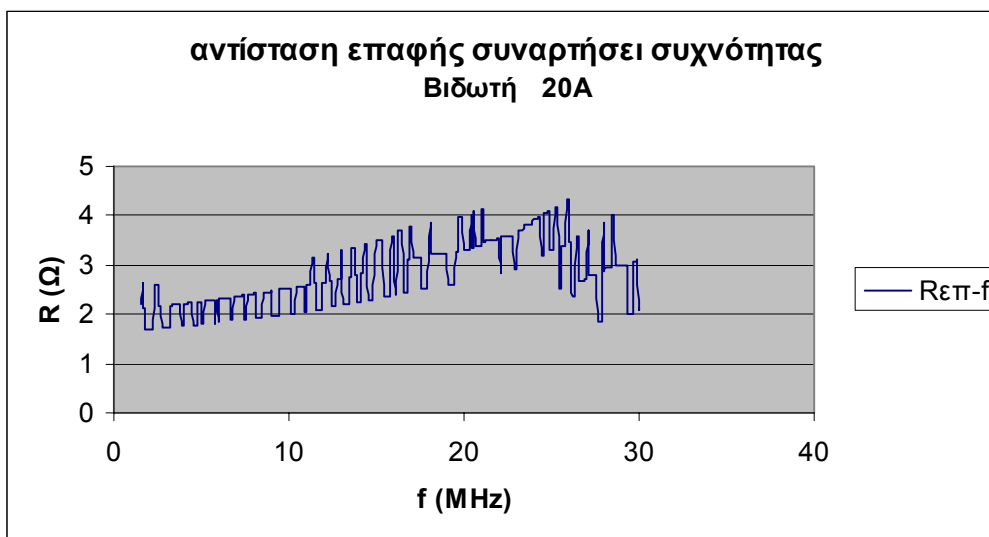
Σχήμα 5.4.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «9» με ονομαστικό ρεύμα 20A



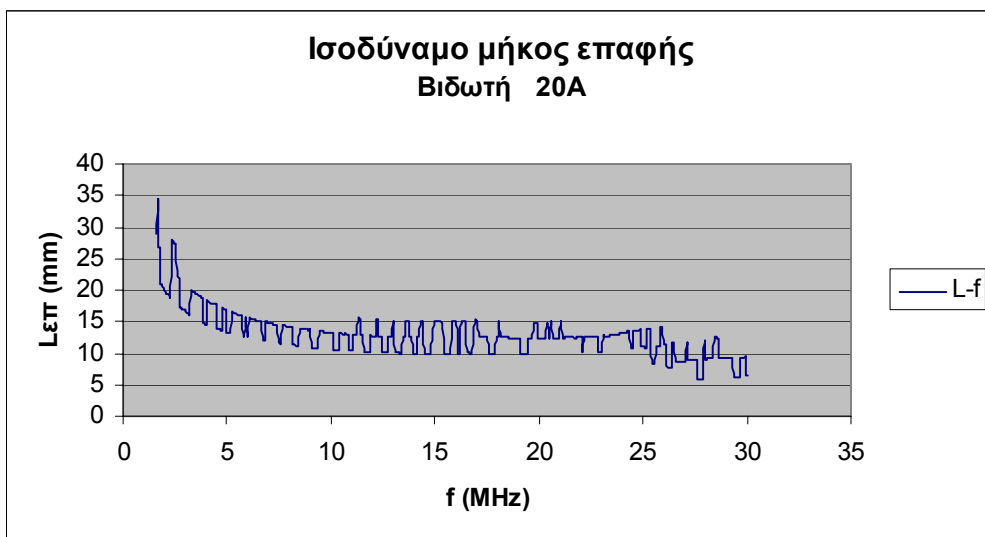
Σχήμα 5.4.3α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «10» με ονομαστικό ρεύμα 20A



Σχήμα 5.4.3β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «10» με ονομαστικό ρεύμα 20A



Σχήμα 5.4.3γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «10» με ονομαστικό ρεύμα 20Α



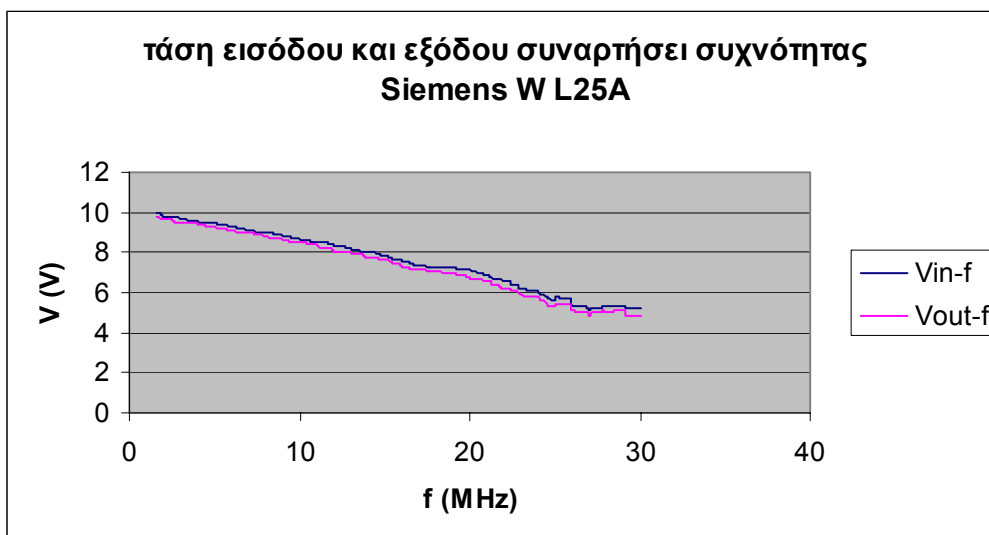
Σχήμα 5.4.3δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «10» με ονομαστικό ρεύμα 20Α

❖ **Επαφές των 25A**

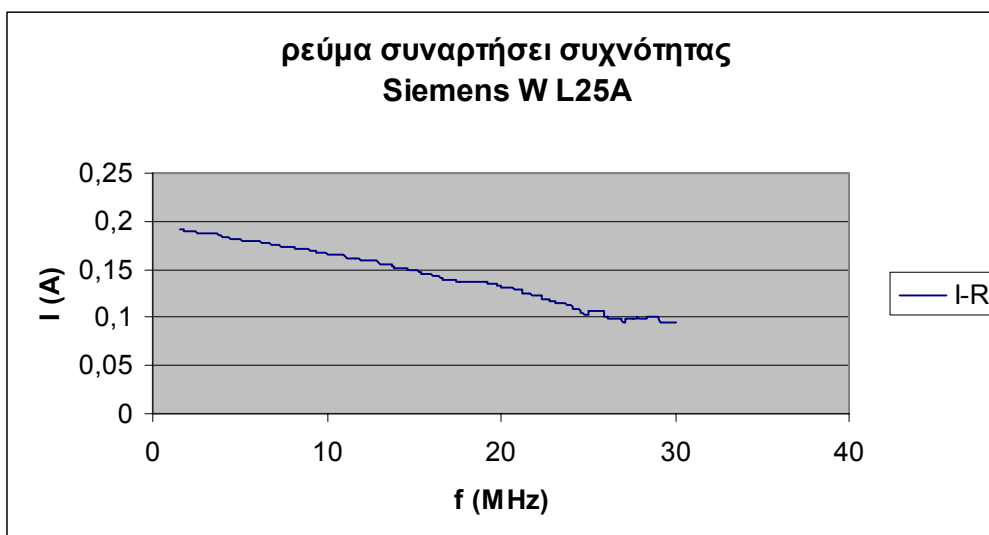
a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
11	Εταιρία	Siemens	4,4	3,453195	1,8	15,66148
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	L25A				
	Ονομαστική τάση	380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
12	Εταιρία	Siemens	7	2,834691	22	13,06156
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	25A				
	Ονομαστική τάση	380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
13	Εταιρία	LINDNER	26,75	1,34311	1,6	13,39995
	Κωδικός	βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	25A				
	Ονομαστική τάση	500V				

Πίνακας 5.4-4 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου και βιδωτές των 25A.

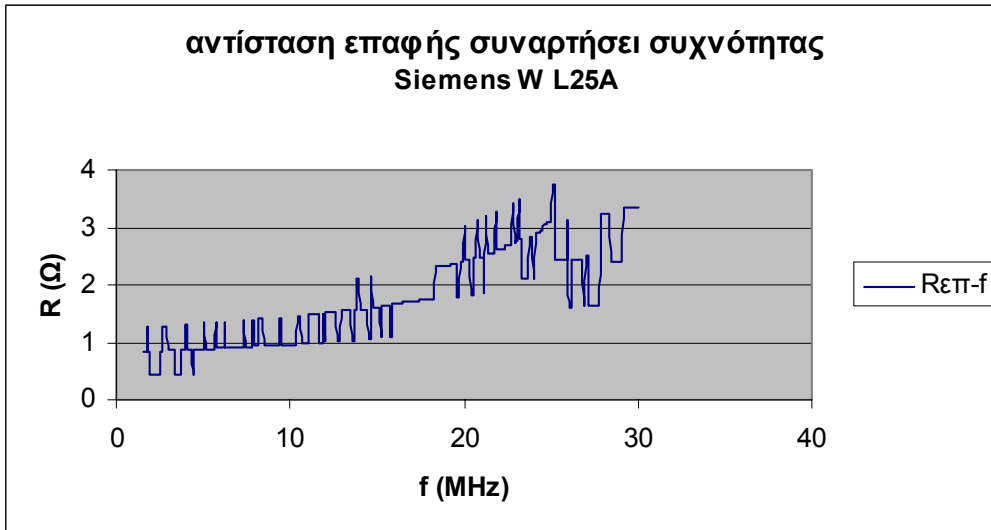
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων για 25A:



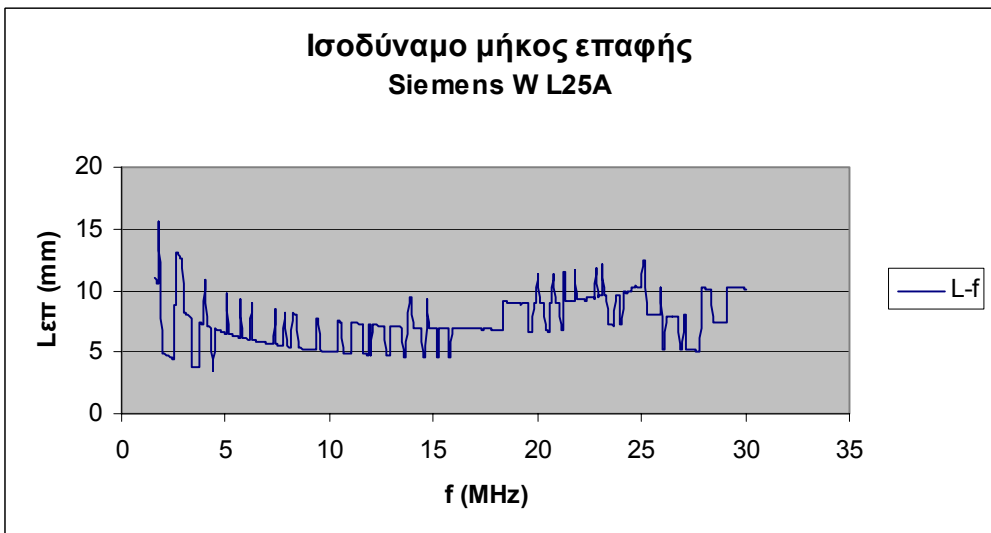
Σχήμα 5.5.1α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «11» με ονομαστικό ρεύμα 25A



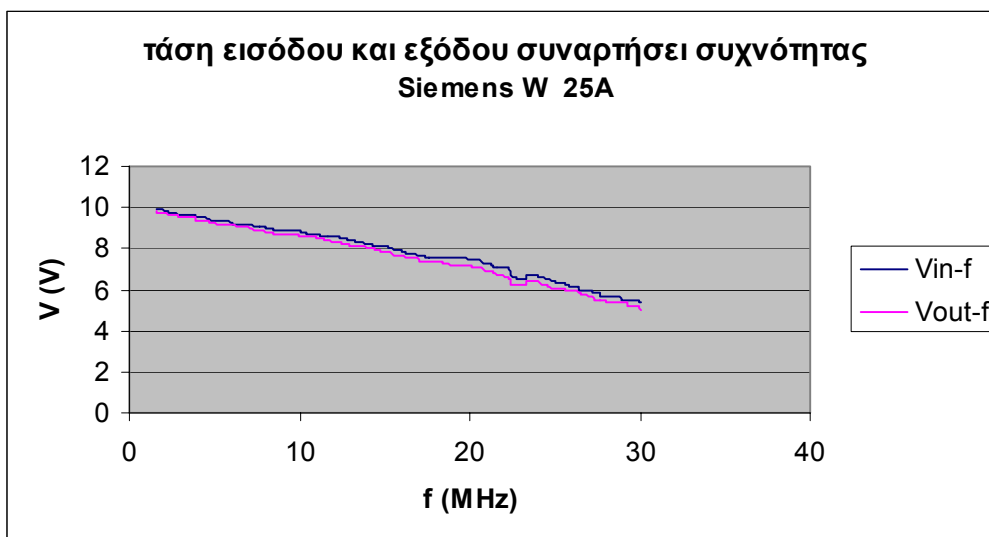
Σχήμα 5.5.1β Διάγραμμα ρεύματος συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «11» με ονομαστικό ρεύμα 25A



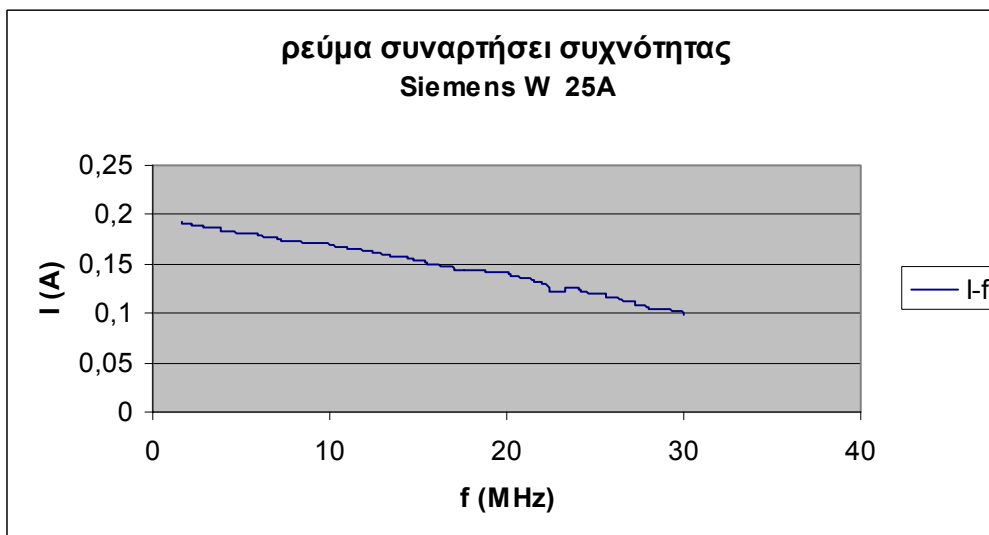
Σχήμα 5.5.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «11» με ονομαστικό ρεύμα 25A



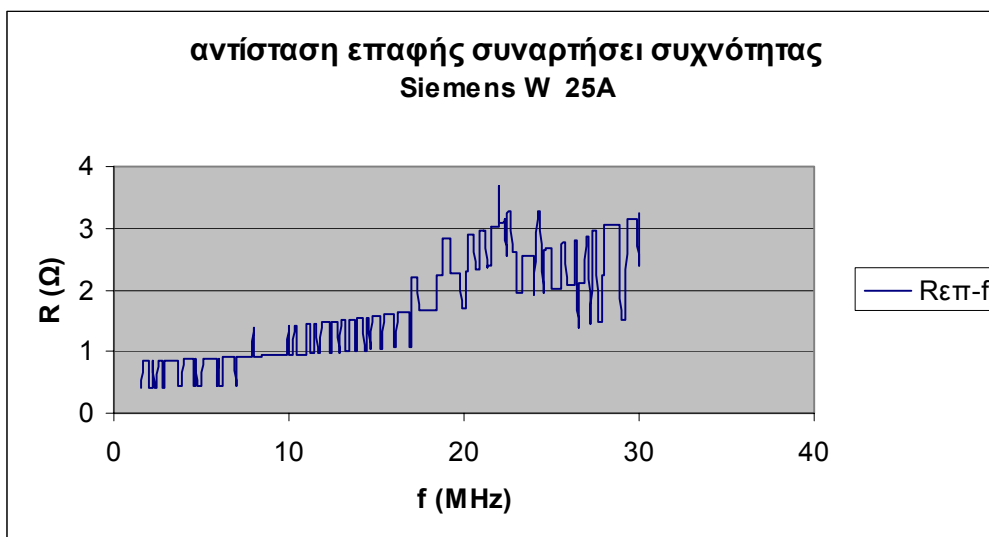
Σχήμα 5.5.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «11» με ονομαστικό ρεύμα 25A



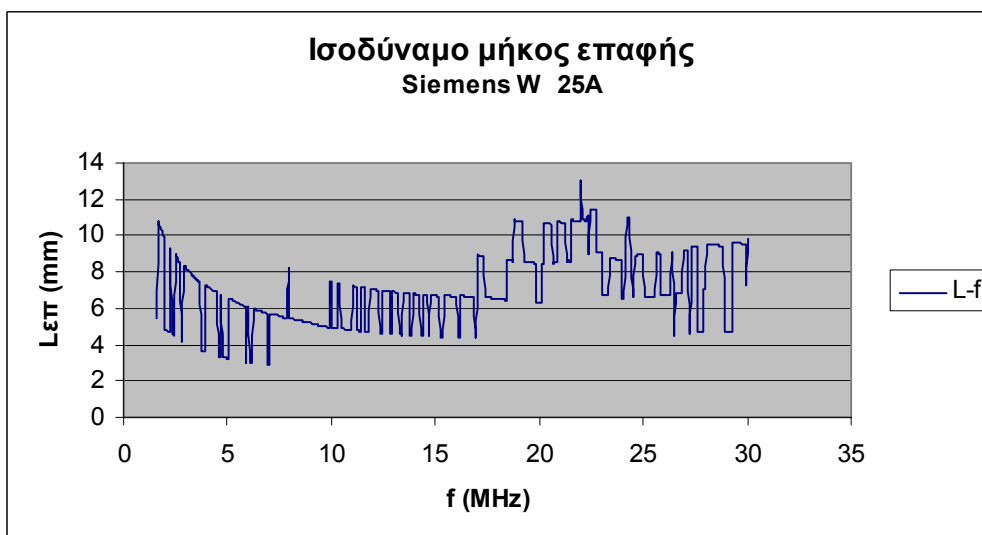
Σχήμα 5.5.2α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «12» με ονομαστικό ρεύμα 25A



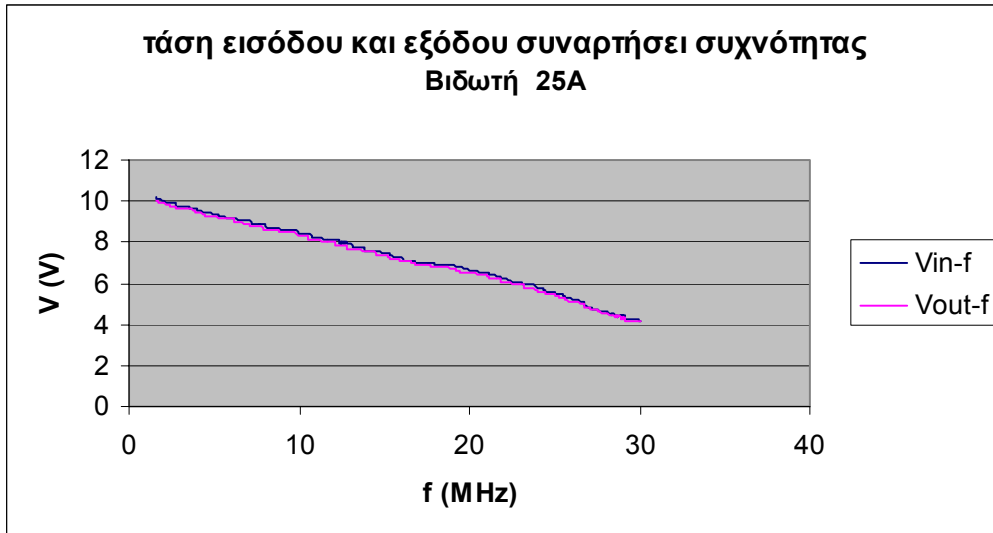
Σχήμα 5.5.2β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «12» με ονομαστικό ρεύμα 25A



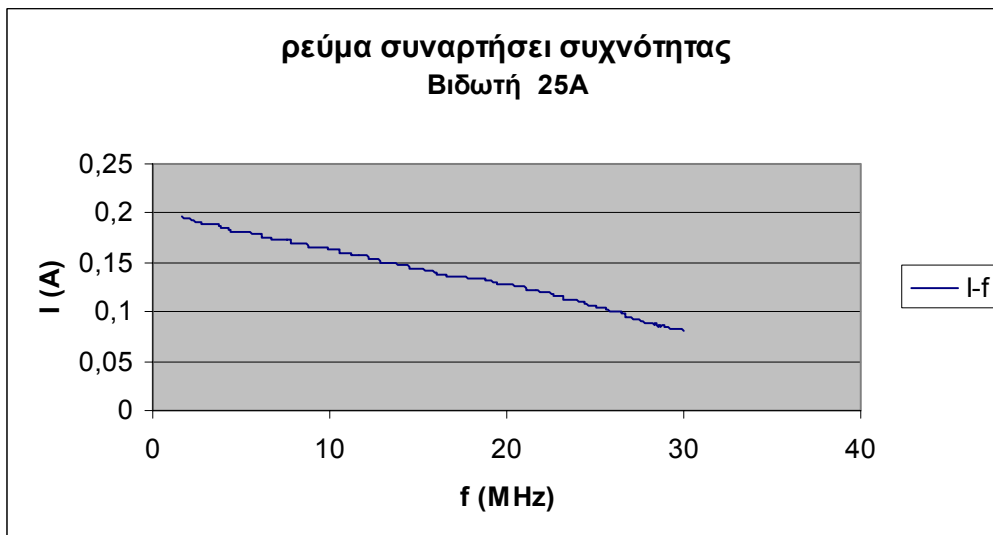
Σχήμα 5.5.2γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «12» με ονομαστικό ρεύμα 25A



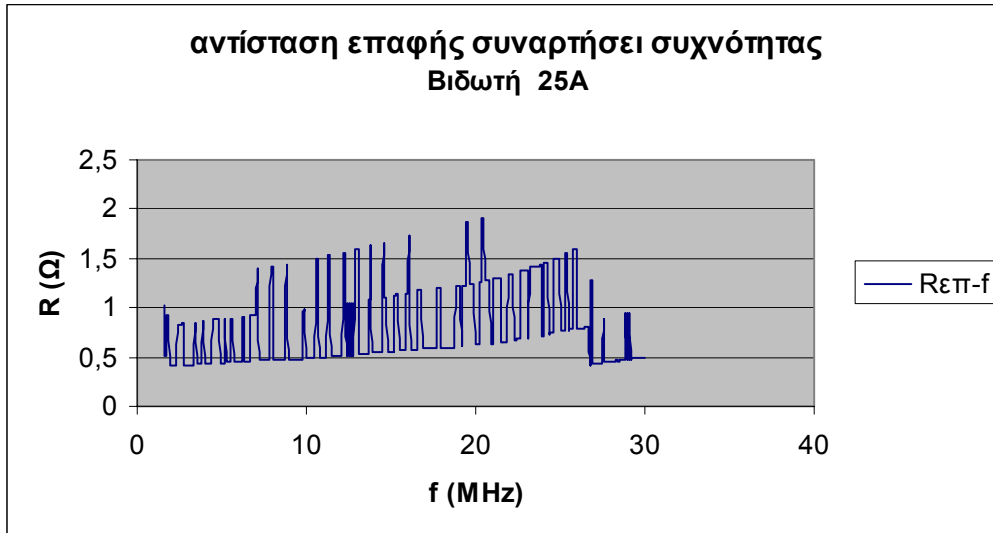
Σχήμα 5.5.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για την επαφή «12» με ονομαστικό ρεύμα 25A



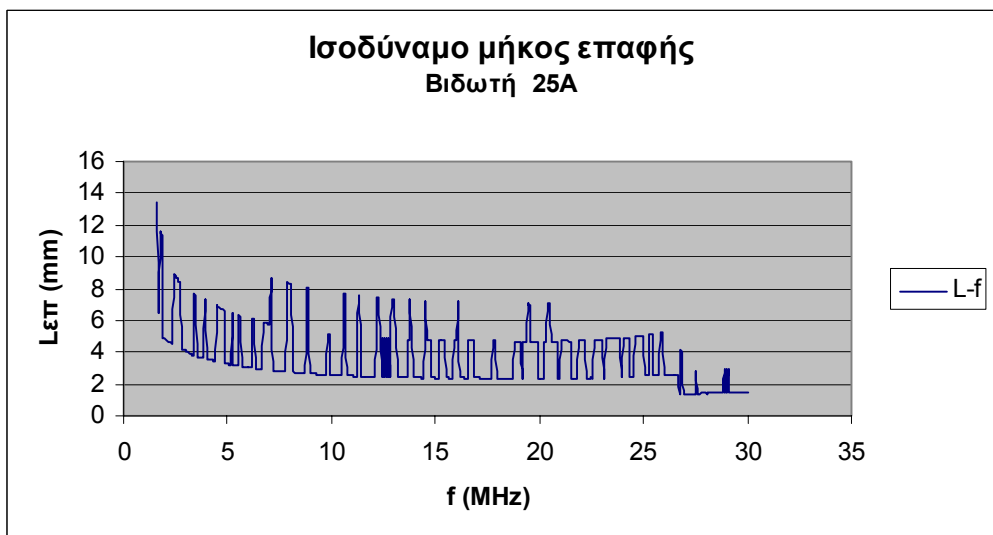
Σχήμα 5.5.3α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «13» με ονομαστικό ρεύμα 25A



Σχήμα 5.5.3β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «13» με ονομαστικό ρεύμα 25A



Σχήμα 5.5.3γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «13» με ονομαστικό ρεύμα 25Α



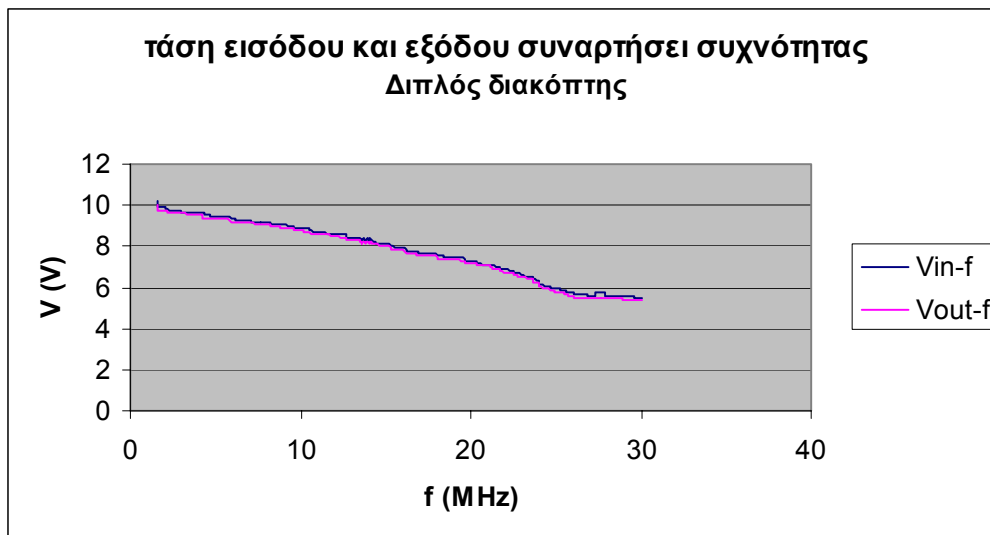
Σχήμα 5.5.3δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «13» με ονομαστικό ρεύμα 25Α

Οι μετρήσεις συνεχίζονται και για δύο διπλούς καθώς και έναν τριπλό διακόπτη.

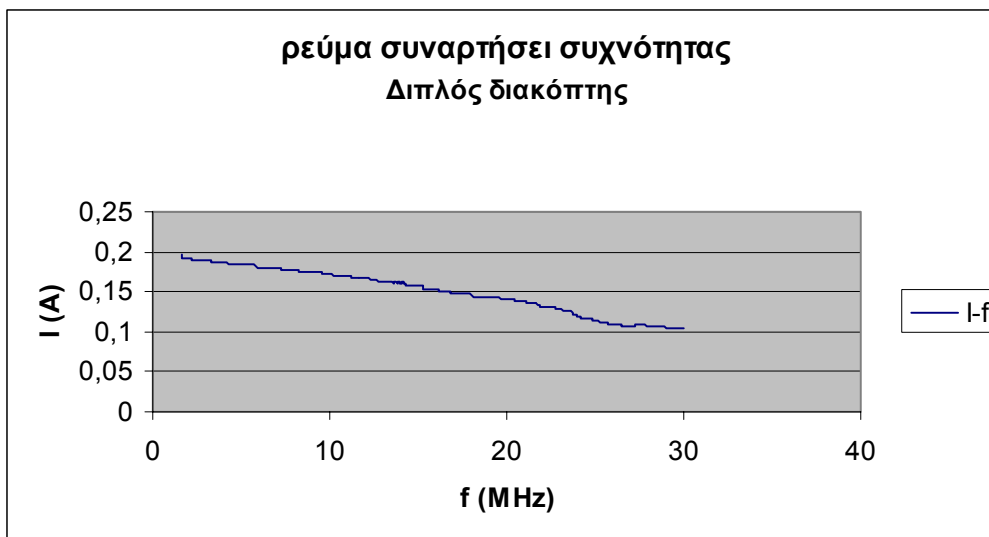
❖ **Διπλός διακόπτης**

a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
14	Εταιρία	Siemens	20,3	1,044991	1,6	13,39995
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	Διπλός				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
15	Εταιρία	Siemens	19,75	2,167041	2,8	12,55712
	Κωδικός	W				
	Ονοματικό ρεύμα	Διπλός				
	Ονομαστική τάση	220/380V~				

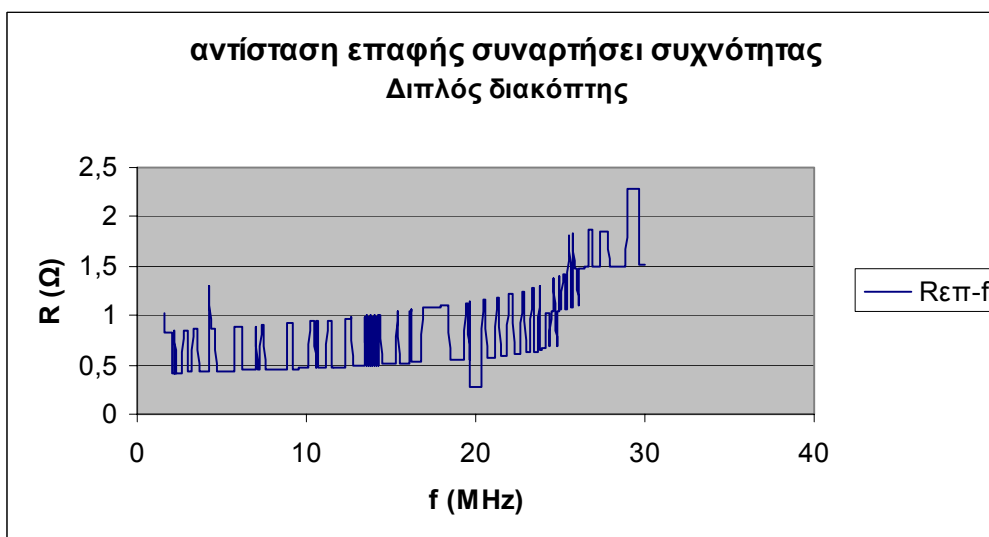
Πίνακας 5.5-5 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για διπλό διακόπτη.



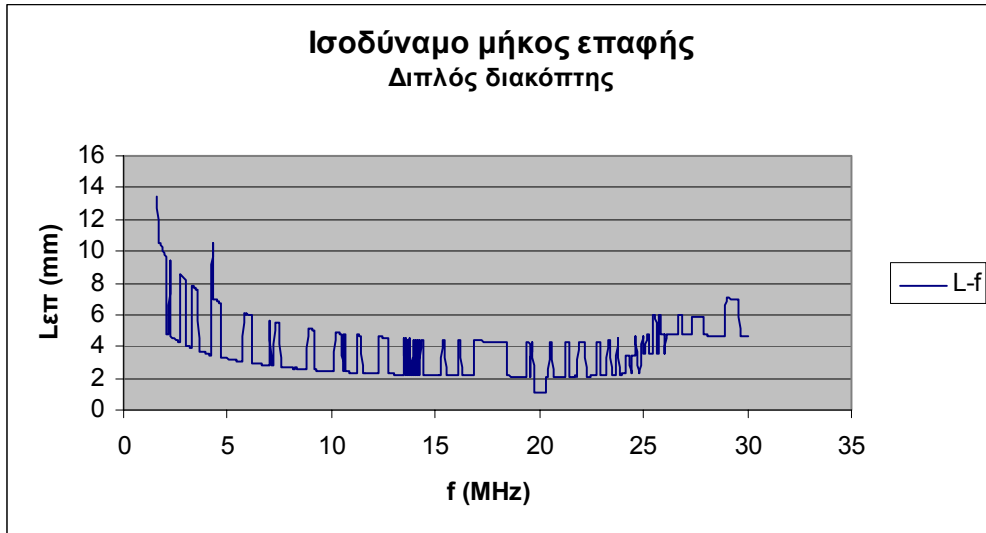
Σχήμα 5.6.1α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «14».



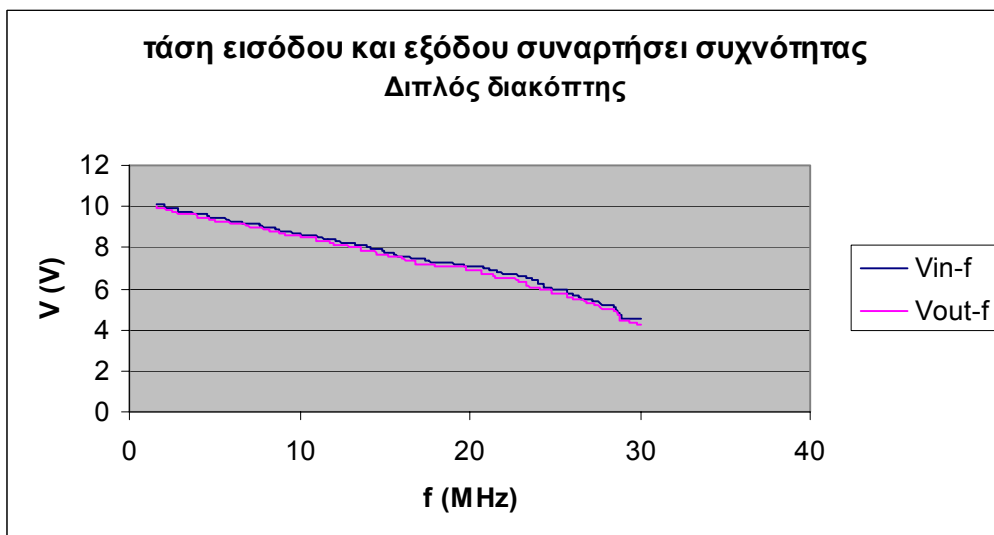
Σχήμα 5.6.1β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «14».



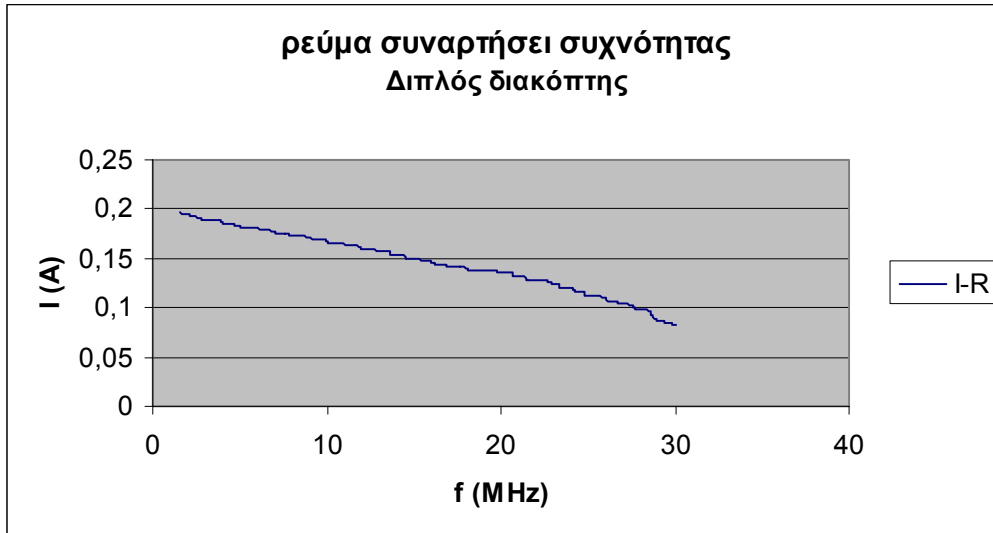
Σχήμα 5.6.1γ Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «14».



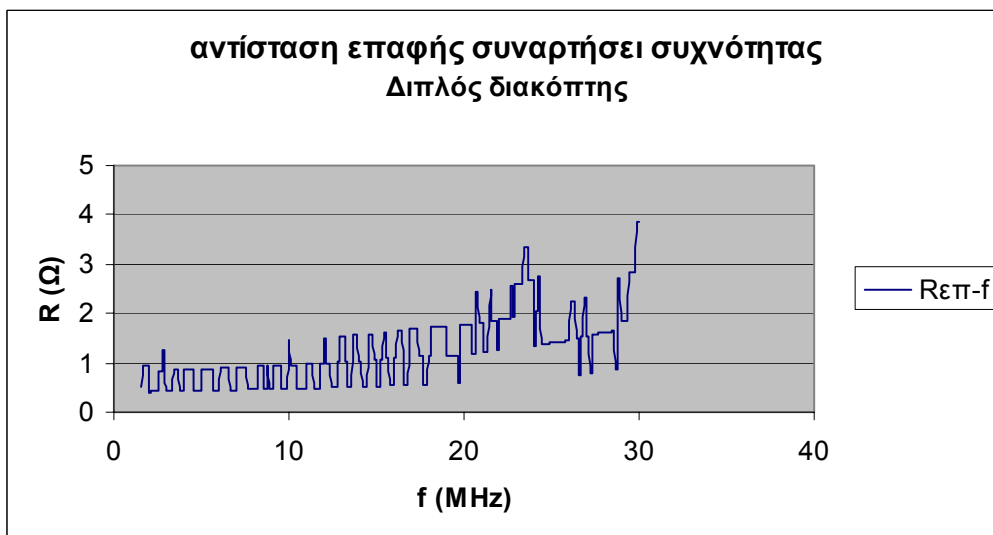
Σχήμα 5.6.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «14».



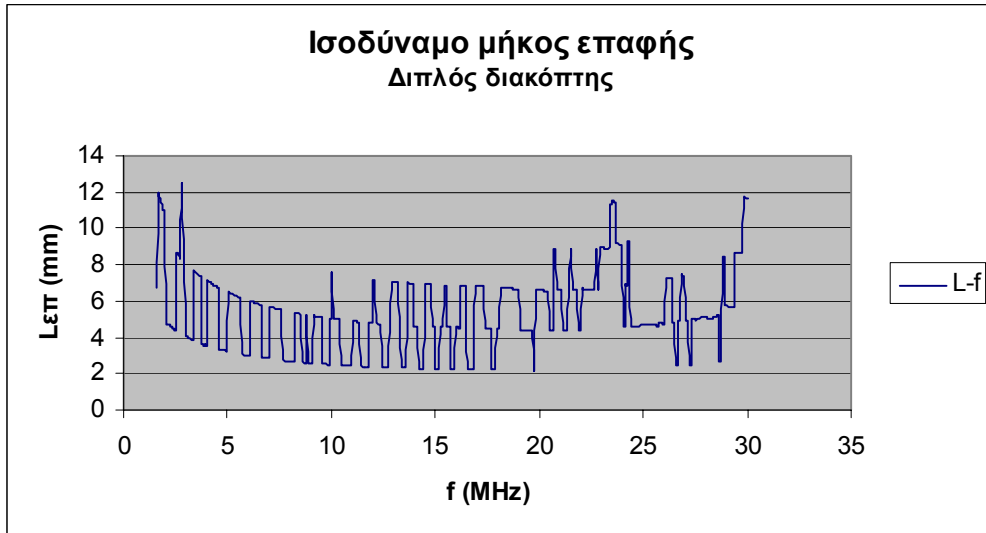
Σχήμα 5.6.2α Διάγραμμα τάσεως εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «15».



Σχήμα 5.6.2β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «15».



Σχήμα 5.6.2γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «15».



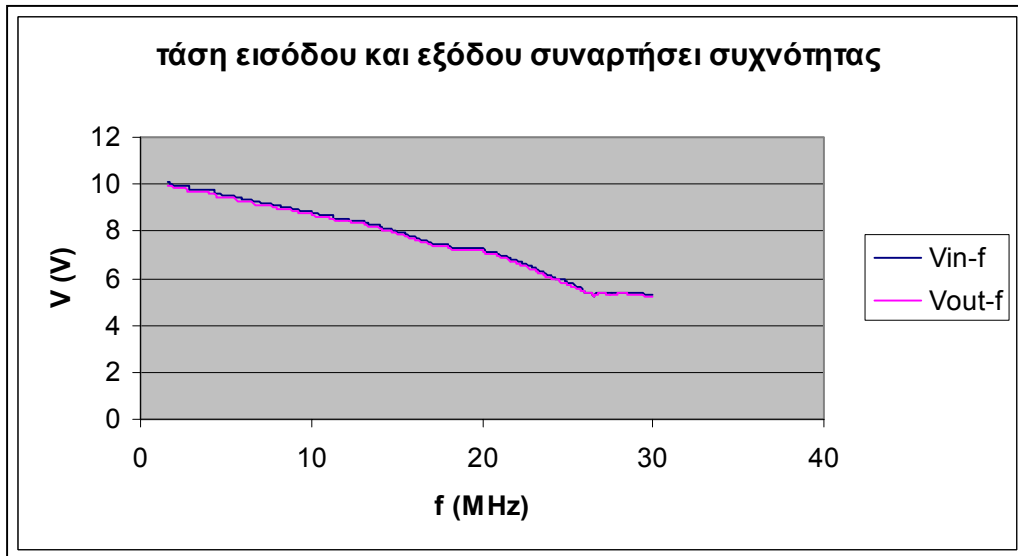
Σχήμα 5.6.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον διπλό διακόπτη «15».

❖ **Τριπλός διακόπτης**

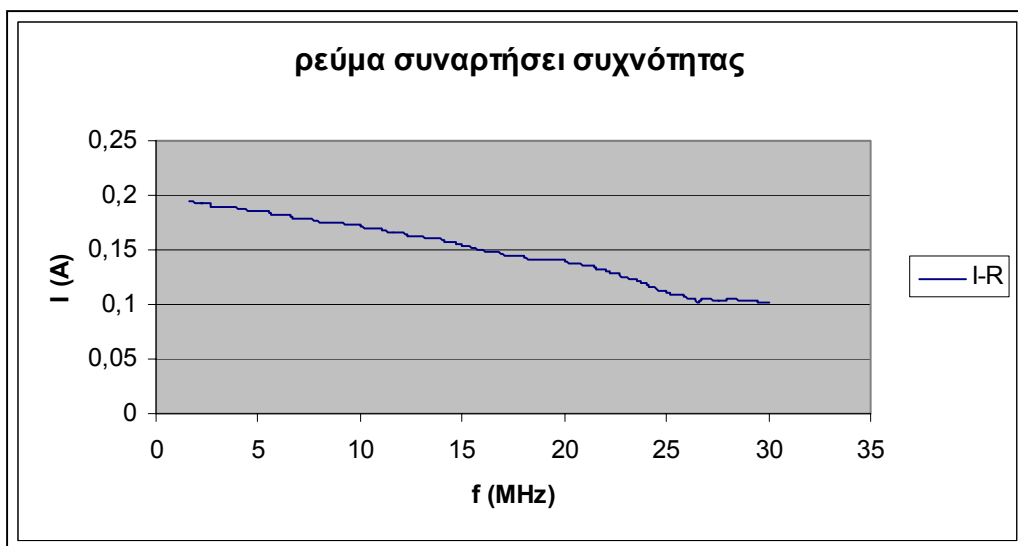
a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
16	Εταιρία	Siemens	28,45	1,185734	2,75	12,67076
	Κωδικός	5TE2				
	Ονοματικό ρεύμα	Τριπλός				
	Ονομαστική τάση	63/380V~				

Πίνακας 5.6-6 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για τριπλό διακόπτη.

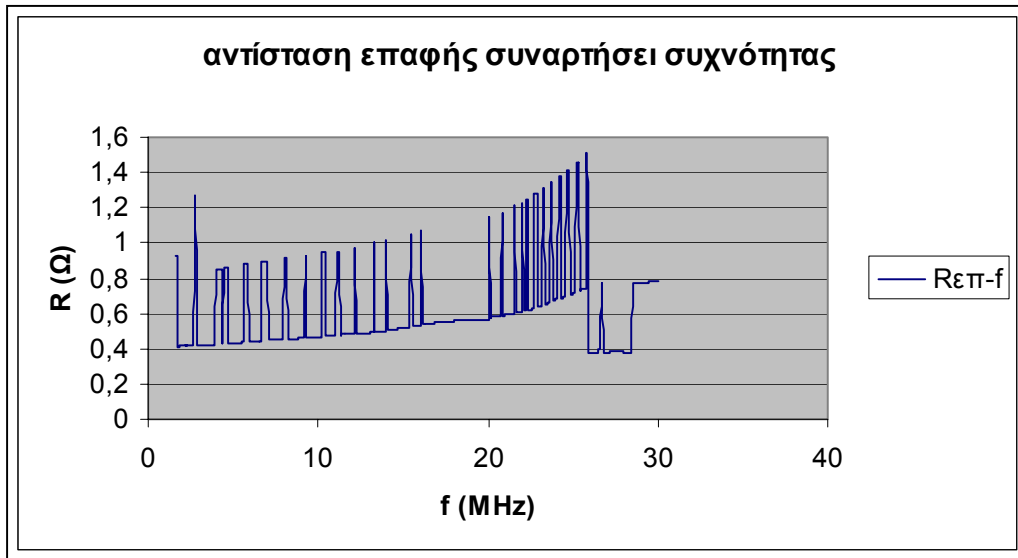
Ακολουθούν οι γραφικές παραστάσεις των μετρήσεων για τριπλό διακόπτη:



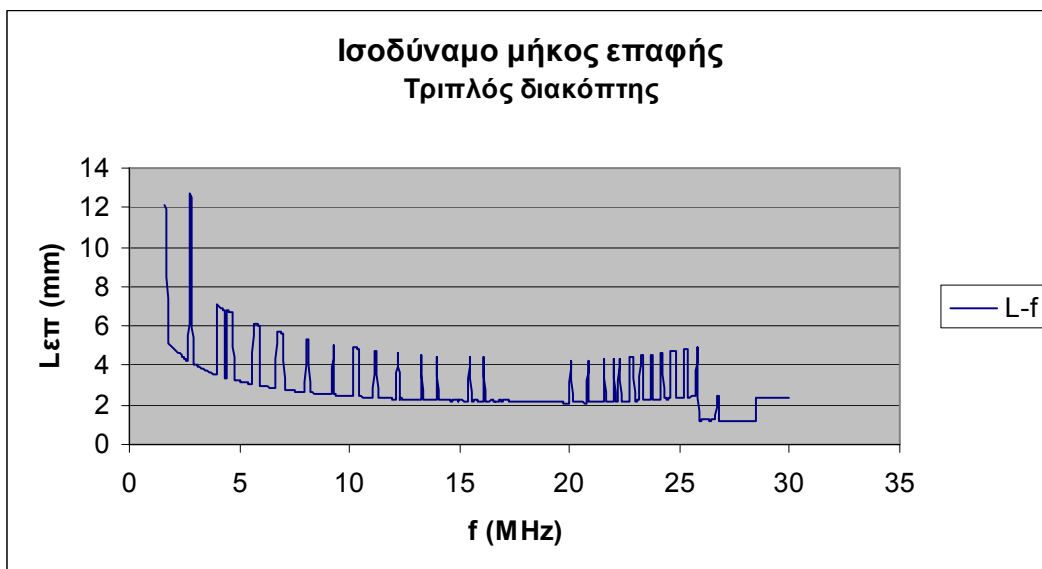
Σχήμα 5.7.1β Διάγραμμα τάσεων εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον τριπλό διακόπτη «16».



Σχήμα 5.7.2β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον τριπλό διακόπτη «16».



Σχήμα 5.7.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον τριπλό διακόπτη «16».



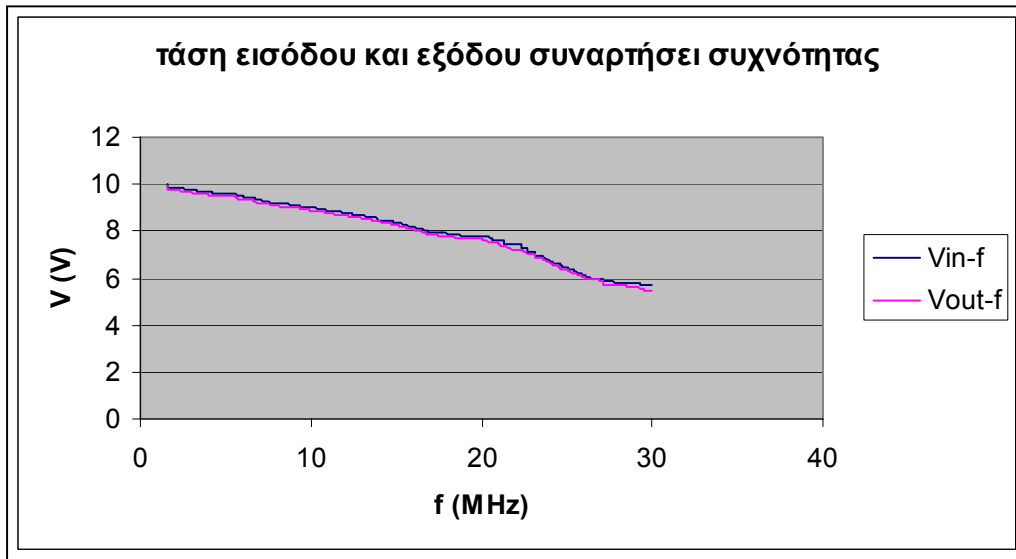
Σχήμα 5.7.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τον τριπλό διακόπτη «16».

❖ **Βιδωτές ασφάλειες των 35A**

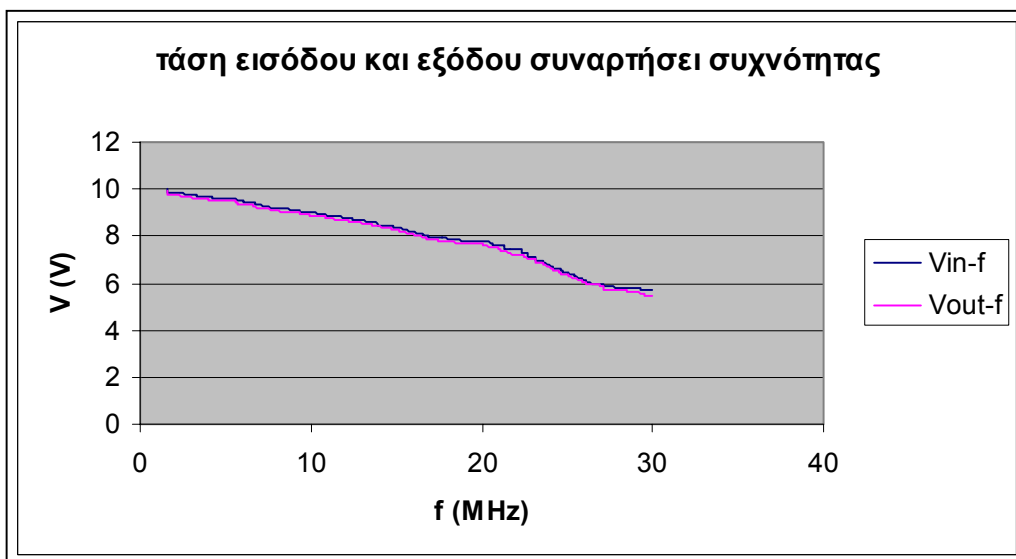
Τέλος συγκρίσεις θα γίνουν και ανάμεσα σε τέσσερις βιδωτές επαφές, ώστε να παρατηρηθούν αποκλίσεις από μέτρηση σε μέτρηση επαφών ίδιου ονομαστικού ρεύματος και ίδιου τύπου, με διαφορετική χρήση, χρόνο ζωής και περιβαλλοντικούς παράγοντες.

a/a	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
17	Εταιρία	LINDNER	20,95	1,96976	2,35	9,137849
	Κωδικός	Βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	35A				
	Ονομαστική τάση	500V				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
18	Εταιρία	LINDNER	29,15	1,319068	6,6	13,28647
	Κωδικός	Βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	35A				
	Ονομαστική τάση	500V				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
19	Εταιρία	LINDNER	26,9	1,317757	16,4	14,10823
	Κωδικός	Βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	35A				
	Ονομαστική τάση	500V				
	Τεχνικά χαρακτηριστικά επαφής		f_{Lmin}	L_{min}	f_{Lmax}	L_{max}
20	Εταιρία	LINDNER	26,45	1,307826	4,15	17,93169
	Κωδικός	Βιδωτή				
	Ονοματικό ρεύμα	35A				
	Ονομαστική τάση	500V				

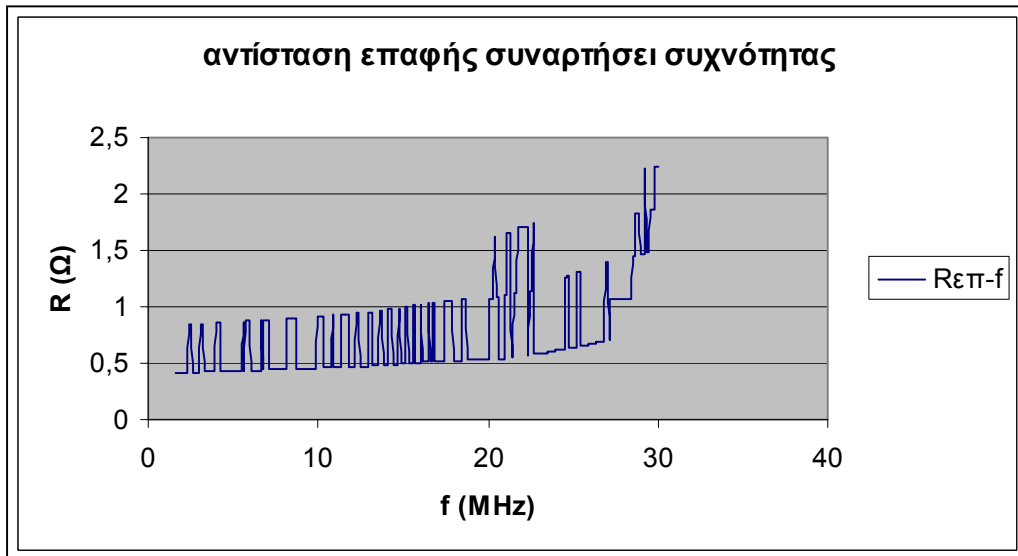
Πίνακας 5.7-7 Μέγιστη και ελάχιστη τιμή ισοδύναμου μήκους επαφής και οι αντίστοιχες συχνότητες για βιδωτές ασφάλειες των 35A.



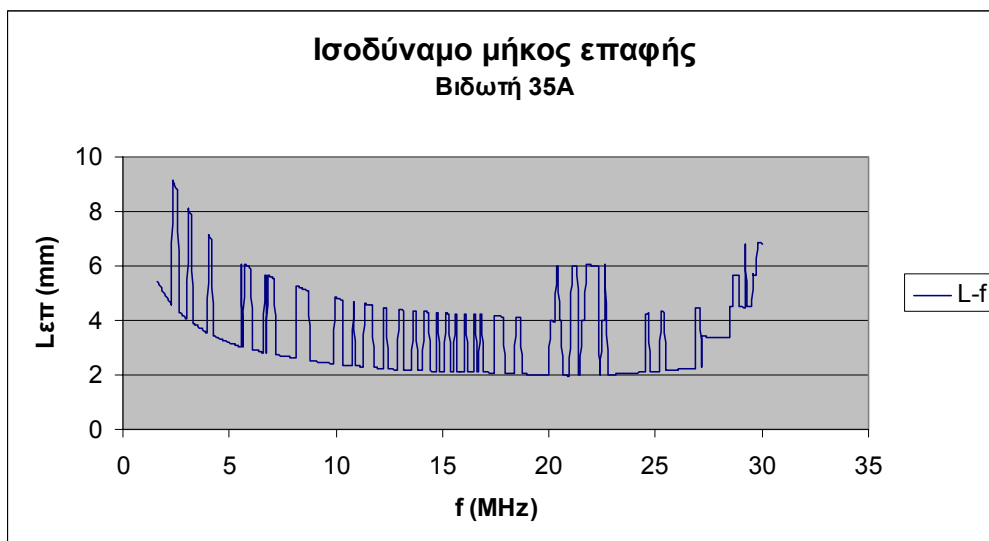
Σχήμα 5.8.1α Διάγραμμα τάσεων εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «17» με ονομαστικό ρεύμα 35A



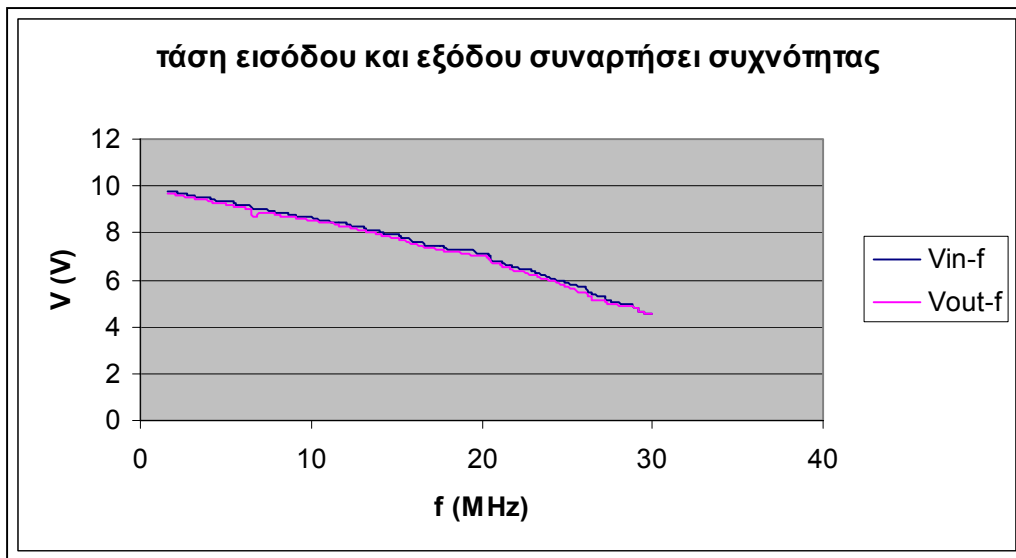
Σχήμα 5.8.1β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «17» με ονομαστικό ρεύμα 35A



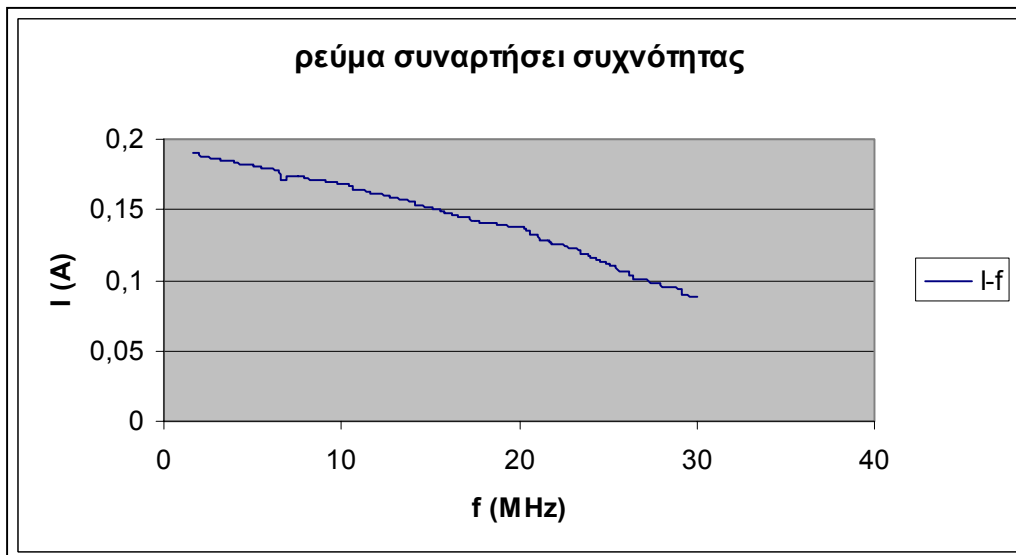
Σχήμα 5.8.1γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «17» με ονομαστικό ρεύμα 35A



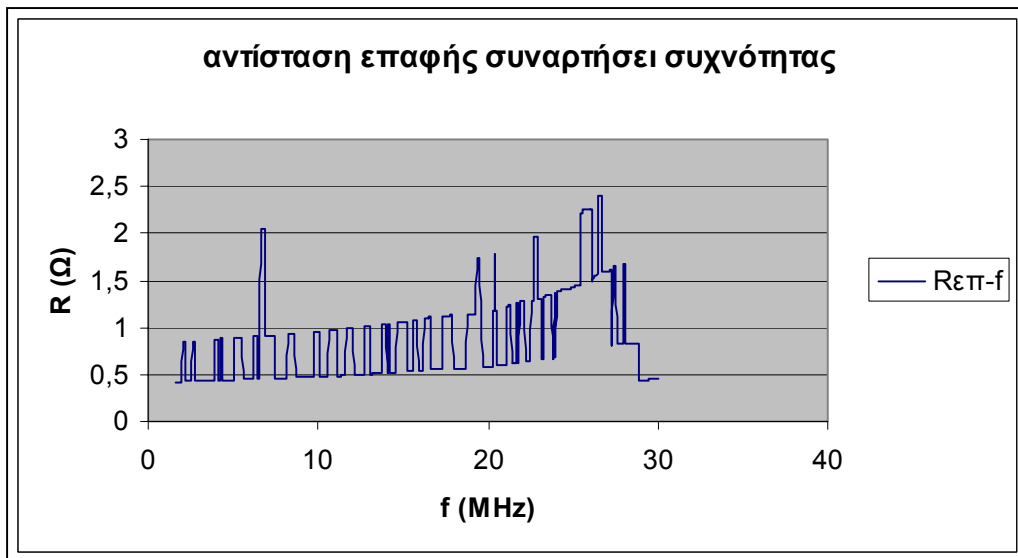
Σχήμα 5.8.1δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «17» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



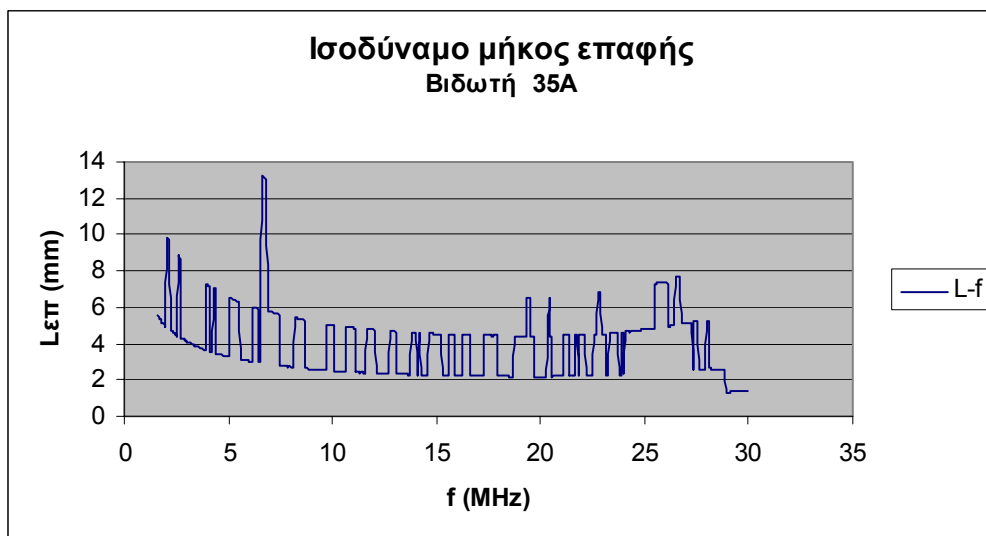
Σχήμα 5.8.2α Διάγραμμα τάσεων εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «18» με ονομαστικό ρεύμα 35A



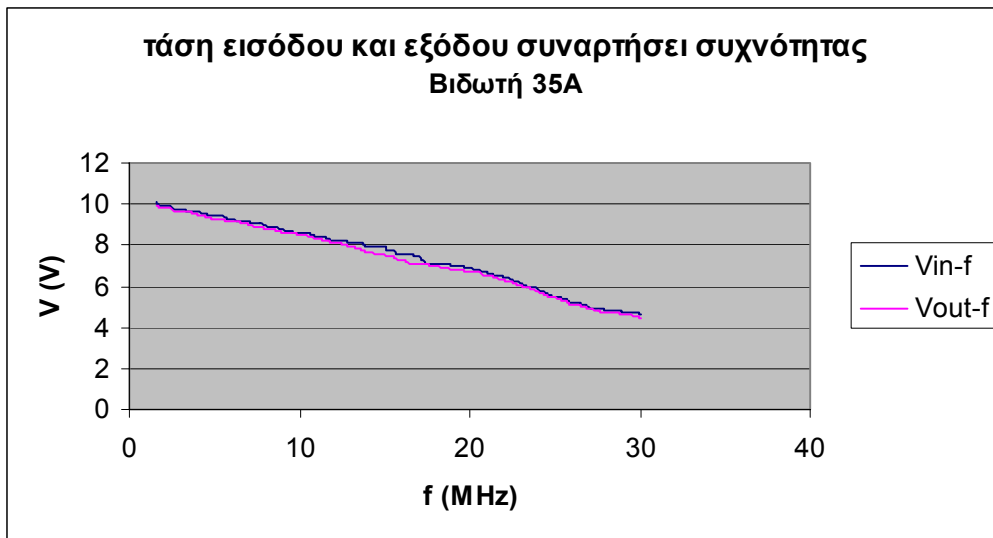
Σχήμα 5.8.2β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «18» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



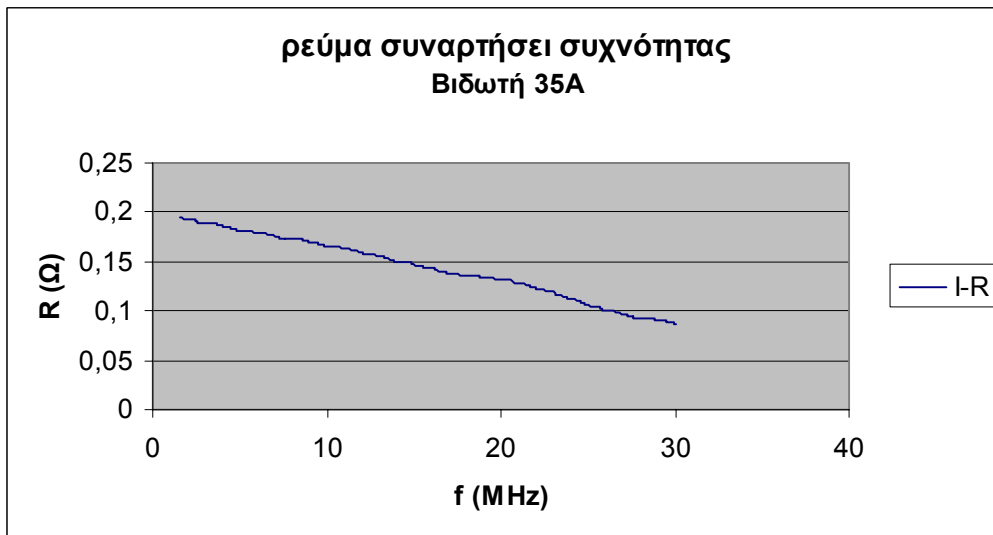
Σχήμα 5.8.2γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «18» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



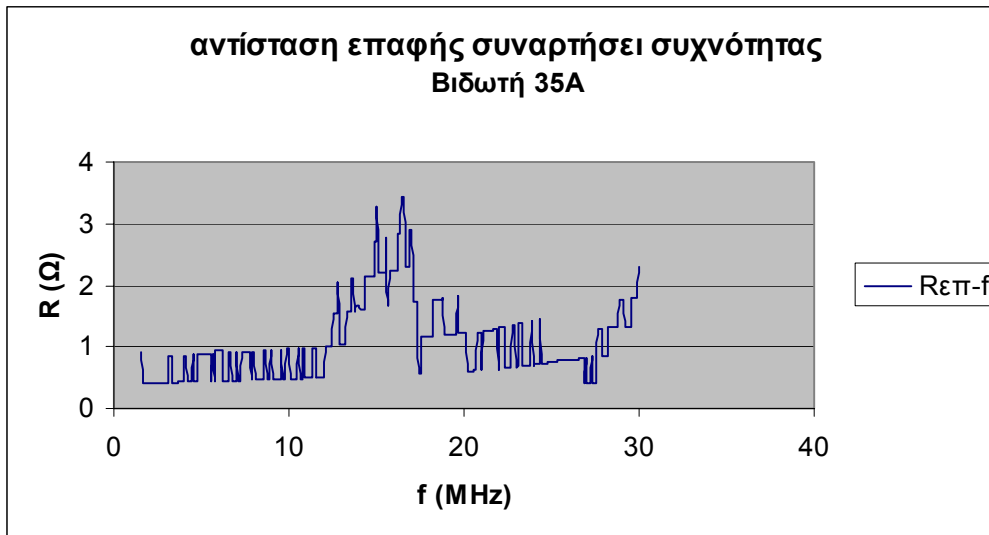
Σχήμα 5.8.2δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «18» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



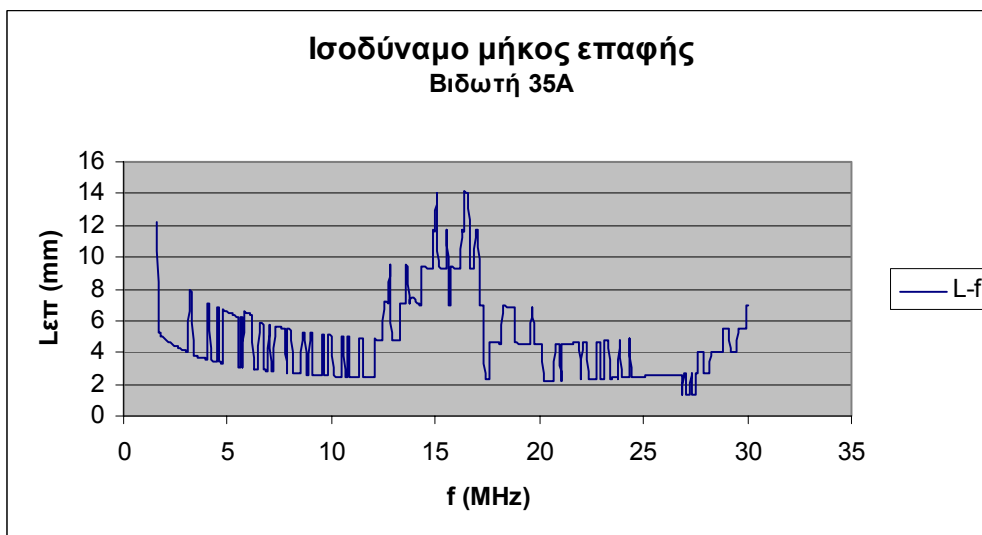
Σχήμα 5.8.3α Διάγραμμα τάσεων εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «19» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



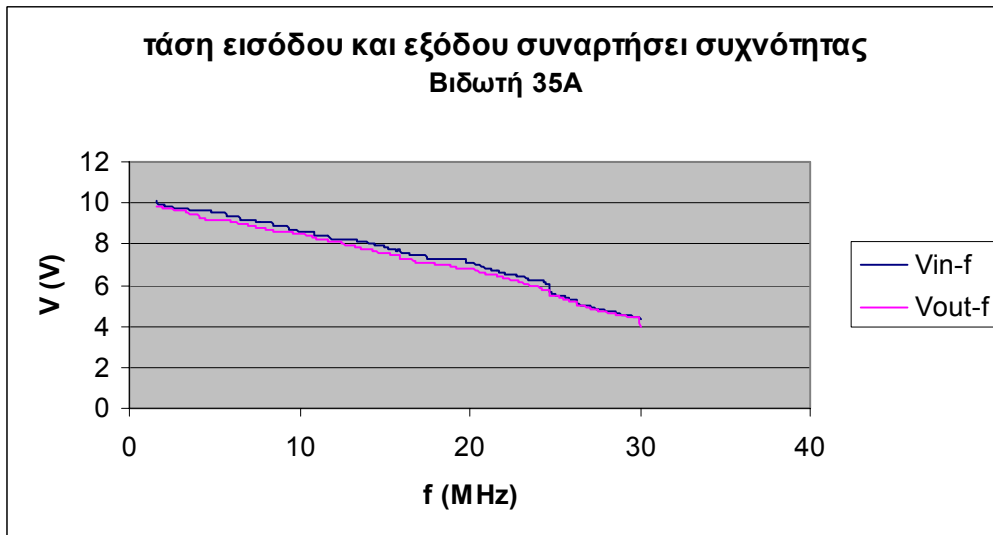
Σχήμα 5.8.3β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «19» με ονομαστικό ρεύμα 35A



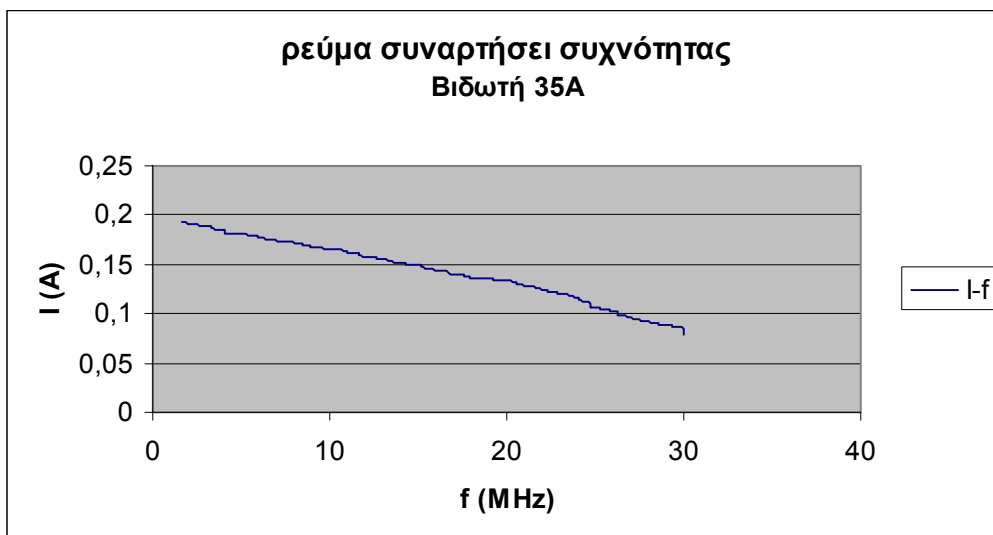
Σχήμα 5.8.3γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «19» με ονομαστικό ρεύμα 35Α.



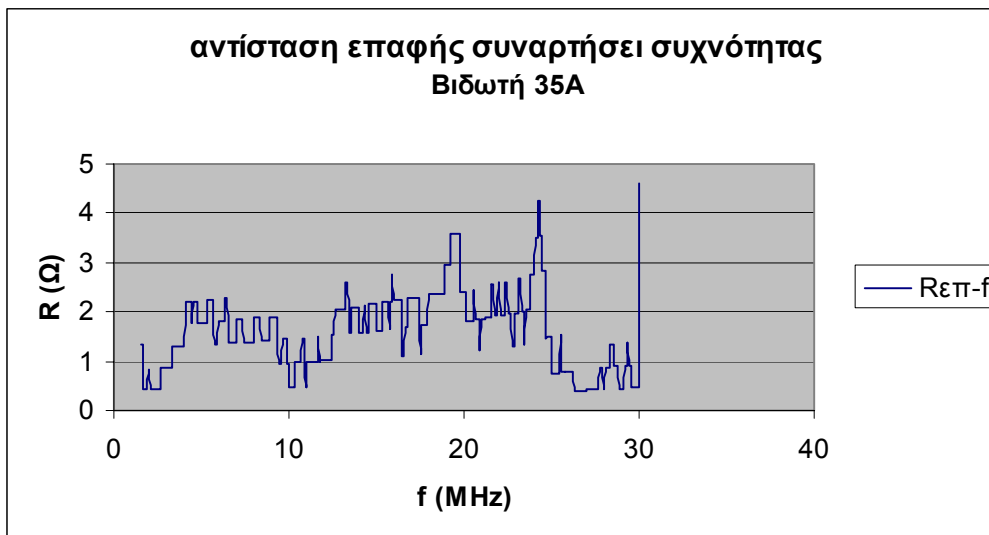
Σχήμα 5.8.3δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «19» με ονομαστικό ρεύμα 35Α.



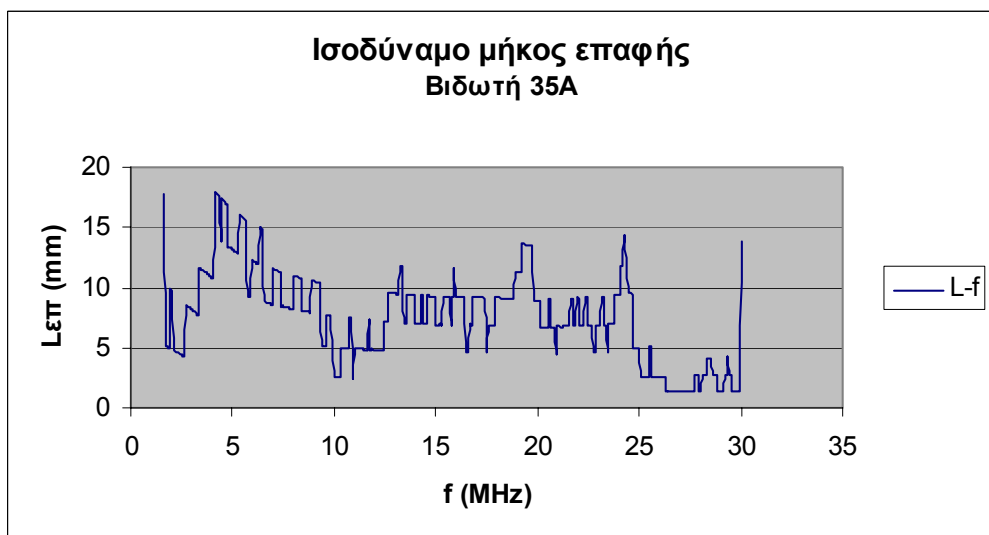
Σχήμα 5.8.4α Διάγραμμα τάσεων εισόδου και εξόδου σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «20» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



Σχήμα 5.8.4β Διάγραμμα ρεύματος σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «20» με ονομαστικό ρεύμα 35A.



Σχήμα 5.8.4γ Διάγραμμα αντιστάσεως επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «20» με ονομαστικό ρεύμα 35 A.



Σχήμα 5.8.4δ Διάγραμμα ισοδύναμου μήκους επαφής σε συνάρτηση με τη συχνότητα για τη βιδωτή επαφή «20» με ονομαστικό ρεύμα 35A .

5.2 ΣΧΟΛΙΑ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ:

Από τους συνοπτικούς πίνακες μετρήσεων και από τις γραφικές παραστάσεις, παρατηρείται πως το ισοδύναμο μήκος επαφής, κατά μέσο όρο, είναι της τάξεως των 12 mm, με μέγιστη τιμή τα 30 mm, τιμή πολύ μικρή σε σχέση με τα τυπικά μήκη διαύλων που αναμένεται να απαντηθούν σε τέτοια δίκτυα, που είναι της τάξεως των μερικών μέτρων, και επομένως μη υπολογίσιμη. Σύμφωνα, λοιπόν, με αυτά τα αποτελέσματα γίνεται αντιληπτό πως η παραδοχή ότι οι σύνδεσμοι θεωρούνται ως σημειακοί κόμβοι και επομένως, η επίδρασή τους στο μεταδιδόμενο σήμα είναι αμελητέα, επιλέχθηκε ορθά. Επιπλέον, σημειώνεται ότι:

- Όσον αφορά στο ονομαστικό, ρεύμα δε φαίνεται να παίζει κάποιο συγκεκριμένο ρόλο στη διαμόρφωση του ισοδύναμου μήκους, με την έννοια ότι δεν παρατηρείται αύξηση ή μείωση του ισοδύναμου μήκους συναρτήσει της αύξησης του ονομαστικού ρεύματος.
- Όσον αφορά στη μεταβολή του ισοδύναμου μήκους με τη συχνότητα, αξίζει να σημειωθεί πως
 - στις ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου παρατηρείται μείωση του μήκους της επαφής αυξανόμενης της συχνότητας μέχρι μία συγκεκριμένη οριακή τιμή συχνότητας. Από εκείνη τη τιμή και ύστερα, η τιμή του ισοδύναμου μήκους επαφής αρχίζει και πάλι να αυξάνεται τείνοντας μάλιστα στη μέγιστη τιμή του.
 - στις βιδωτές ασφάλειες των 10, 16 και 20 A το ισοδύναμο μήκος επαφής μειώνεται πιο ομαλά σε σχέση με τις ασφάλειες τύπου μικροαυτόματου, οι οποίες στις υψηλότερες τιμές συχνοτήτων παρουσιάζουν αύξηση της τιμής του μήκους L , σε βαθμό μάλιστα που αγγίζει, μερικές φορές, το L_{max} . Δηλαδή, ενώ στις επαφές τύπου μικροαυτόματου η μέγιστη τιμή του L παρατηρείται στις σχετικά υψηλές συχνότητες (20-30MHz), στις βιδωτές το L_{max} παρατηρείται στις χαμηλότερες (1,6-10MHz).
 - στο διπλό διακόπτη, η μέση τιμή (μέση καμπύλη) της γραφικής παράστασης του ισοδύναμου μήκους επαφής, L , παραμένει σταθερή και στις δύο μετρήσεις, παρόλο που οι διακυμάνσεις (αιχμές από κορυφή σε κορυφή) διαφέρουν σε αρκετά μεγάλο βαθμό. Βλέπουμε, λοιπόν, πως και στις δύο σειρές μετρήσεων οι μέγιστες και οι ελάχιστες τιμές του L παρουσιάζονται σε κοντινές τιμές συχνοτήτων – 20.3 και 19.75MHz για το L_{min} , και 1.6 και 2.8MHz για το L_{max} .
 - στον τριπλό διακόπτη το ισοδύναμο μήκος επαφής, L , μειώνεται σταδιακά και τείνει να σταθεροποιηθεί στα 1.5 με 4mm για τις υψηλές τιμές συχνοτήτων, γεγονός που σημαίνει ότι παρουσιάζει καλή υψίσυχνη συμπεριφορά και μπορεί να μοντελοποιηθεί και να παρασταθεί αποτελεσματικά σαν κόμβος του δικτύου.

- στις βιδωτές των 35A, σε αντίθεση με αυτές μικρότερου ονομαστικού ρεύματος, παρατηρούνται έντονες μεταβολές στο διάγραμμα L-f χωρίς τάσεις σταθεροποίησης. Ειδικότερα στις τελευταίες δύο σειρές μετρήσεων, οι διαφορές των τιμών αιχμής από κορυφή σε κορυφή, είναι αρκετά μεγάλες. Ενώ, λοιπόν, στη πρώτη μέτρηση το L_{min} δείχνει να παρουσιάζεται σε μεσαίες τιμές συχνοτήτων (15-20MHz), στις υπόλοιπες τρεις παρουσιάζεται στις υψηλές συχνότητες (25-30MHz).
- Όσον αφορά στη σύγκριση που έγινε ανάμεσα στις ασφάλειες ίδιου τύπου και ονομαστικού ρεύματος, παρατηρείται ότι,
 - στις ασφάλειες τύπου μικροαυτομάτου των 10A, παρόλο που οι τιμές του ελάχιστου ισοδύναμου μήκους επαφής είναι ίδιες και για τις δύο επαφές, οι συχνότητες όπου εμφανίζονται αυτές οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη απόκλιση. Αντίθετα, η μέγιστη τιμή ισοδύναμου μήκους παρουσιάζεται σε πολύ κοντινές συχνότητες, αλλά οι τιμές τους είναι διαφορετικές για τις δύο ασφάλειες.
 - στις ασφάλειες τύπου μικροαυτομάτου των 16A, σημειώνεται ότι, παρόλο που οι συχνότητες που παρουσιάζονται το μέγιστο και το ελάχιστο μήκος διαφέρουν κατά πολύ, οι τιμές του ισοδύναμου μήκους είναι πολύ κοντινές και οπτικά παρατηρείται πως οι γραφικές παραστάσεις παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες. Επίσης, στις βιδωτές ασφάλειες των 16A δεν παρουσιάζονται εμφανείς διαφοροποιήσεις και τα διαγράμματα του ισοδύναμου μήκους επαφής συναρτήσει της συχνότητας παρουσιάζουν ίδια μέση καμπύλη.
 - Στις ασφάλειες των 20A, το ελάχιστο μήκος παρουσιάζεται σε διαφορετικές συχνότητες, είναι όμως ίδιας τιμής, ενώ το μέγιστο ισοδύναμο μήκος δεν παρουσιάζει διαφοροποιήσεις ούτε στη συχνότητα, αλλά ούτε και στη τιμή του για τις δύο επαφές.
 - Στις ασφάλειες ονομαστικού ρεύματος 25A, αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που οι συχνότητες στις οποίες παρουσιάζονται η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή του ισοδύναμου μήκους επαφής διαφέρουν κατά πολύ, εντούτοις, η μέση καμπύλη δεν διαφέρει κατά πολύ οπτικά.
 - Στο διπλό διακόπτη δε παρουσιάζονται διαφοροποιήσεις, ενώ στις τέσσερις βιδωτές ασφάλειες των 35A, οι τιμές συχνοτήτων στις οποίες εμφανίζονται το μέγιστο και το ελάχιστο μήκος, αλλά και οι τιμές του μέγιστου μήκους για κάθε επαφή διαφέρουν αισθητά. Επιπλέον, τα διαγράμματα παρουσιάζουν έντονες οπτικές διαφοροποιήσεις, γεγονός που οφείλεται, πιθανώς, στο χρόνο χρήσης των επαφών, αλλά και στην καταπόνηση που έχουν δεχθεί.

Συμπερασματικά, από τις ανωτέρω παρατηρήσεις γίνεται κατανοητό ότι, με εξαίρεση τις επαφές ονομαστικού ρεύματος 35 A, δεν παρατηρούνται έντονες μεταβολές από μέτρηση σε μέτρηση. Τυχόν, καταγεγραμμένες αποκλίσεις, πιθανά οφείλονται στις συνθήκες κάτω από τις οποίες έγιναν οι μετρήσεις.

Θα πρέπει, επίσης, να αναφερθεί ότι οι αυξομειώσεις που παρουσιάζονται στα διαγράμματα της αντίστασης επαφής και του ισοδύναμου μήκους επαφής, δεν αντιπροσωπεύουν πραγματικές αιχμές, αλλά εκφράζουν διακυμάνσεις που προέρχονται από αριθμητικές πράξεις μεταξύ των μετρήσεων. Ενώ, λοιπόν, οι τάσεις εισόδου και εξόδου μεταβάλλονται ομαλά, η διαφορά τους μπορεί να αυξάνεται και να μειώνεται από μέτρηση σε μέτρηση και γι' αυτό το λόγο παρατηρούνται έντονες αυξομειώσεις στο διάγραμμα της αντίστασης επαφής, της οποίας η τιμή προκύπτει από τη διαφορά των δύο τάσεων –εισόδου και εξόδου-. Το ίδιο ισχύει και για τη γραφική παράσταση του ισοδύναμου μήκους, αφού εξαρτάται άμεσα από την αντίσταση επαφής. Σύμφωνα με αυτή την παρατήρηση και με μία πιο προσεκτική εξέταση των διαγραμμάτων, θα γίνει αντιληπτό πως η μέση καμπύλη παρουσιάζει ομαλότητα και μπορεί να δώσει αποτελέσματα και συμπεράσματα για το πείραμα που διεξάχθηκε.

Ως γενικό συμπέρασμα απορρέει ότι, επιβεβαιώνεται η ορθότητα της παραδοχής ότι οι σύνδεσμοι θεωρούνται ως σημειακοί κόμβοι και επομένως, η επίδρασή τους στο μεταδιδόμενο σήμα είναι αμελητέα, εφόσον η μέγιστη τιμή του ισοδύναμου μήκους επαφής είναι της τάξεως των 30 mm, τιμή πολύ μικρότερη από τα συνήθη τυπικά μήκη διαύλων τέτοιων δικτύων, τα οποία είναι της τάξεως των μερικών μέτρων, και επομένως καθίσταται μη υπολογίσιμο.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ