



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Έγχυση/Εξαγωγή σημάτων PLC σε/από γραμμές μεταφοράς ΜΤ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Θ. Μητσάκος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

Έγχυση/Εξαγωγή σημάτων PLC σε/από γραμμές μεταφοράς ΜΤ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Απόστολος Θ. Μητσάκος

Επιβλέπων: Παναγιώτης Γ. Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή

.....
Παναγιώτης Κωττής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Χρήστος Καψάλης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Φικιώρης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2013

.....
Απόστολος Θ. Μητσάκος

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

Copyright © Απόστολος Μητσάκος, 2013

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περιεχόμενα

Περίληψη	vii
Abstract	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κεφάλαιο 1: Ευφυή Δίκτυα	1-1
1.1 Γενικά – Ρόλος και λειτουργία των ΕΔ	1-1
1.2 Τα ΕΔ ως δίκτυα του μέλλοντος	1-3
1.3 Ο ρόλος των τηλεπικοινωνιών στα ΕΔ	1-6
1.4 Τεχνολογίες επικοινωνιών για τα ΕΔ	1-7
Κεφάλαιο 2: Η τεχνολογία Power Line Communications	2-1
2.1 Γενικά	2-1
2.2 Επικοινωνίες PLC στενής και ευρείας ζώνης (Narrowband και Broadband PLC)	2-3
2.2.1 Broadband PLC – BPL	2-4
2.2.2 Narrowband PLC – ζώνη CENELEC	2-5
2.3 Τεχνολογικές προκλήσεις για την εφαρμογή του PLC	2-8
2.4 Έγχυση/Εξαγωγή του PLC σήματος σε/από γραμμή ισχύος	2-9
2.5 Εφαρμογές PLC και Υπηρεσίες	2-10
Κεφάλαιο 3: Έγχυση/Εξαγωγή PLC σημάτων σε/από γραμμές ΜΤ	3-1
3.1 Κυκλωματικό πρότυπο έγχυσης PLC σήματος μέσω συζεύκτη	3-1
3.2 Κυκλωματικό πρότυπο εξαγωγής PLC σήματος μέσω συζεύκτη	3-2
3.3 Περιβάλλον διάδοσης PLC σημάτων – Υπόγεια και Εναέρια Δίκτυα	3-3
3.4 Σύνδεση του συζεύκτη στις γραμμές ισχύος	3-6
Κεφάλαιο 4: Συζεύκτες – Couplers	4-1
4.1 Χωρητικοί Συζεύκτες	4-1
4.2 Επαγωγικοί συζεύκτες	4-6
4.3 Σύγκριση χωρητικού και επαγωγικού συζεύκτη ανάλογα με το είδος ΗΔ	4-8
4.3.1 Υπόγεια ΗΔ ΜΤ	4-8
4.3.2 Εναέρια/Υπέργεια ΗΔ ΜΤ	4-10
4.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά χωρητικού συζεύκτη με ARRESTER	4-10
4.4.1 Το εξωτερικό μέρος – κάλυμμα – του COUPLER	4-11
4.4.2 Το εσωτερικό μέρος του COUPLER	4-13

4.5 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά επαγωγικού συζεύκτη	4-18
4.5.1 Το εξωτερικό μέρος του επαγωγικού συζεύκτη	4-18
4.5.2 Το εσωτερικό μέρος του επαγωγικού συζεύκτη	4-20
Κεφάλαιο 5: Ισοδύναμο κύκλωμα ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη	5-1
5.1 Εισαγωγή	5-1
5.2 PCB	5-1
5.3 Μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα	5-3
5.3.1 Ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος	5-3
5.3.2 Υπολογισμός τιμών εκκίνησης (default values)	5-8
5.4 Πυκνωτής – Πυκνωτική διάταξη	5-14
5.5 Συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη	5-16
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης	6-1
6.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης OrCAD	6-1
6.2 Δεδομένα του ισοδύναμου κυκλώματος	6-5
6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ισοδύναμου κυκλώματος	6-6
6.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις τιμές εκκίνησης (default values)	6-6
6.3.2 Παραμετρική ανάλυση – Optimization and Parametric sweeps	6-13
6.4 Μετάδοση PLC σήματος από κόμβο σε κόμβο – Αποτελέσματα προσομοίωσης	6-25
6.5 Συμπεράσματα προσομοιώσεων	6-28

Βιβλιογραφία

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της έγχυσης/εξαγωγής σημάτων πληροφορίας που μεταδίδονται μέσω των γραμμών ισχύος (PLC, PowerLine Communications signals) σε/από γραμμές του δικτύου μέσης τάσης (MT), διαδικασία απαραίτητη για την επικοινωνία στα Ευφυή Δίκτυα (Smart Grids). Η MT έχει το πλεονέκτημα ότι καλύπτει ευρύτερες περιοχές σε σχέση με τη ΧΤ και φθάνει σε απομακρυσμένους χρήστες του ηλεκτρικού δικτύου. Τα συστήματα μετάδοσης σημάτων PLC αποσκοπούν στην εξυπηρέτηση τέτοιων κόμβων, είτε για παραγωγούς ενέργειας είτε για καταναλωτές. Στην εργασία αυτή μελετώνται οι συζεύκτες (couplers), οι οποίοι αποτελούν διατάξεις υπεύθυνες για την ασφαλή σύνδεση του PLC modem με τη γραμμή MT. Η σύζευξη είναι πολύπλοκη διαδικασία και εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το είδος της γραμμής MT (εναέρια ή υπόγεια) ή το σημείο σύνδεσης του συζεύκτη στη γραμμή MT. Περιγράφονται τα δύο είδη των συζευκτών που χρησιμοποιούνται στην πράξη (χωρητικοί και επαγωγικοί συζεύκτες) και αναλύονται ο ρόλος τους, η λειτουργία τους καθώς και τα κατασκευαστικά τους χαρακτηριστικά. Συγκεκριμένα, γίνεται λεπτομερής περιγραφή του ισοδύναμου κυκλώματος ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη εγκατεστημένου σε εναέρια γραμμή MT, το οποίο προσομοιώνεται για να εξεταστεί η συμπεριφορά τέτοιων συζευκτών και να μελετηθούν τα εξαγόμενα αποτελέσματα.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο ρόλο και τις λειτουργίες των ευφυών δικτύων (ΕΔ) και στις διαθέσιμες τεχνολογίες επικοινωνιών μέσω αυτού. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία PLC (Narrowband και Broadband PLC) και οι εφαρμογές της. Επιπλέον, ορίζεται η σύζευξη σημάτων PLC στις γραμμές μεταφοράς MT. Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται μοντέλα έγχυσης/εξαγωγής σημάτων PLC σε/από εναέρια και υπόγεια γραμμές MT. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύονται τα δύο είδη συζευκτών (χωρητικοί και επαγωγικοί συζεύκτες) καθώς και τα επιμέρους τμήματά τους. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη. Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης της έγχυσης PLC σήματος σε εναέρια γραμμή MT μέσω του ισοδύναμου κυκλώματος του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη που σχεδιάστηκε στο πέμπτο κεφάλαιο με τη χρήση του προγράμματος OrCAD.

Λέξεις κλειδιά

Ευφυές δίκτυο, Power Line Communications, έγχυση/εξαγωγή σημάτων PLC, σύζευξη, ευρυζωνικός χωρητικός συζεύκτης, γραμμή ισχύος MT

Abstract

This diploma thesis deals with the injection and extraction of PowerLine Communications (PLC) signals transmitted into or from the power line of the medium voltage (MV) grid, which is considered fundamental for Smart Grid communications. The MV grid has the advantage of covering wider areas compared to the LV grid as well as serving remote users of the electricity network. PLC systems over MV aim at serving these nodes either producing or consuming electrical energy. This thesis studies the couplers, i.e. assemblies implementing safe connection of the PLC modem to the MV line. Coupling is a complex procedure and depends on many factors such as the configuration of the MV grid (overhead or underground) or the connection point of the coupler along an MV line. The two types of the couplers employed in practice are described, namely capacitive and inductive couplers, and their role, function and construction features are analytically discussed. Specifically, a detailed description of the equivalent circuit of a broadband capacitive coupler installed on MV overhead lines is given. Simulations have been performed to examine the behavior of such couplers and study the results obtained.

The first chapter provides an overview of the role and functions of Smart Grids and the related communication technologies over it. In the second chapter, the PLC technology (Narrowband and Broadband PLC) is presented along with its applications. The coupling of PLC signals onto MV power lines is also defined and discussed. In the third chapter, the models related to injection/extraction of PLC signals over underground and overhead MV lines are studied. In the fourth chapter, the two types of couplers, i.e. capacitive and inductive couplers, are analytically described along with their components. In the fifth chapter, the equivalent circuit of a broadband capacitive coupler is determined. Finally, in the sixth chapter, simulations concerning the injection of PLC signals onto overhead MV power lines based on the equivalent circuit of the broadband capacitive coupler determined in the fifth chapter through the OrCAD are presented and discussed.

Key words

Smart Grid, Power Line Communications, injection/extraction of PLC signals, coupling, broadband capacitive coupler, MV line

Κατάλογος Σχημάτων

1.1 Παράδειγμα Ευφυούς Δικτύου	1-2
1.2 Όραμα της ΕΕ για τη μεταβολή του τοπίου στον τομέα των δικτύων ΗΕ	1-5
1.3 Το δίκτυο του μέλλοντος	1-5
2.1 Φάσμα διαθέσιμων συχνοτήτων από μία ηλεκτρική γραμμή για εφαρμογές PLC	2-2
2.2 Ηλεκτρικό δίκτυο με ενσωματωμένη υβριδική W-BPL τεχνολογία	2-2
2.3 Τυπικό φάσμα θορύβου ενός αντιστροφέα	2-4
3.1 Απλοποιημένο κυκλωματικό πρότυπο έγχυσης σήματος μέσω επαγωγικού συζεύκτη	3-1
3.2 Απλοποιημένο κυκλωματικό πρότυπο εξαγωγής σήματος μέσω επαγωγικού συζεύκτη	3-3
3.3 Ενδεικτική φασματική απεικόνιση σήματος και θορύβου σε υπόγειους PLC διαύλους	3-4
3.4 Ενδεικτική φασματική απεικόνιση σήματος και θορύβου σε εναέριους PLC διαύλους	3-5
3.5 Κυκλωματικό πρότυπο ιδανικά τερματισμένης υπόγειας γραμμής μεταφοράς	3-6
3.6 Εξασθένιση δύο ιδανικά τερματισμένων υπόγειων αγωγών	3-7
3.7 Κυκλωματικό πρότυπο μίας υπόγειας γραμμής μεταφοράς που τερματίζει σε μετασχηματιστή στο ένα άκρο της	3-8
3.8 Σύγκριση εξασθενίσεων ενός υπόγειου αγωγού που τερματίζει ιδανικά και ενός που τερματίζει σε μετασχηματιστή στο ένα άκρο του	3-9
3.9 Έγχυση και εξαγωγή σήματος σε/από συνήθη υπόγεια εγκατάσταση ΗΔ	3-9
3.10 Φυσικά-ανοικτοκυκλωμένος (normally-open) μετασχηματιστής υπόγειου ΗΔ	3-10
3.11 Επίδραση του σημείου εξαγωγής σε διάφορες αποστάσεις από μετασχηματιστή υπόγειου ΗΔ	3-11
3.12 Επίδραση της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από φυσικά ανοικτοκυκλώματα	3-11
3.13 Αποτελέσματα της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από τριφασική πηγή (three phase tap)	3-12
3.14 Αποτελέσματα της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από τριφασικό μετασχηματιστή	3-13
4.1 Κεραμικός πυκνωτής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε PLC εφαρμογές	4-2
4.2 Παράδειγμα ARRESTER – Siemens MOV 3EK7 – 24kV	4-3
4.3 Απλοποιημένο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη	4-4
4.4 Πραγματικό κύκλωμα PCB ενός χωρητικού συζεύκτη	4-5
4.5 Επαγωγική σύζευξη πηνίου με ρευματοφόρο αγωγό	4-6
4.6 (α) Χωρητική σύζευξη σε υπόγειο ΗΔ κοντά σε μετασχηματιστές	4-9
4.6 (β) Επαγωγική σύζευξη σε υπόγειο ΗΔ κοντά σε μετασχηματιστές	4-9
4.7 Arrester Coupler – Χωρητικός συζεύκτης με ARRESTER	4-11
4.8 Το εξωτερικό του COUPLER	4-12
4.9 Το εσωτερικό του COUPLER – Μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα και PCB	4-13

4.10 Το εσωτερικό του COUPLER – Βάση στήριξης	4-14
4.11 (α) Το πλήρες εσωτερικό του COUPLER	4-15
4.11 (β) Το πλήρες εσωτερικό του COUPLER	4-16
4.12 Απλή κυκλωματική απεικόνιση ενός χωρητικού συζεύκτη με ARRESTER	4-17
4.13 Καπάκι (cap) και κάλυμμα (cover) ενός επαγωγικού συζεύκτη	4-18
4.14 Ολοκληρωμένη ανοικτή εξωτερική συνδεσμολογία ενός επαγωγικού συζεύκτη	4-19
4.15 Ολοκληρωμένη κλειστή εξωτερική συνδεσμολογία ενός επαγωγικού συζεύκτη	4-19
4.16 Το εσωτερικό ενός επαγωγικού συζεύκτη	4-20
4.17 Απλή κυκλωματική απεικόνιση ενός επαγωγικού συζεύκτη	4-21
5.1 Πραγματικό κύκλωμα PCB ενός χωρητικού συζεύκτη	5-1
5.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα PCB στο OrCAD	5-2
5.3 Τυπικές καμπύλες απωλειών για φερριτικούς πυρήνες ως προς τη συχνότητα	5-3
5.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή	5-4
5.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα στο OrCAD	5-7
5.6 Υπολογισμός αντίστασης	5-8
5.7 Χωρητικότητα μεταξύ δύο παραλλήλων αγωγών	5-10
5.8 Εγκάρσια/Κάθετη τομή πυρήνα	5-11
5.9 Καμπύλες R_p και χ_r για τέσσερα είδη πυρήνων ως προς τη συχνότητα	5-13
5.10 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή	5-14
5.11 Ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή στο OrCAD	5-15
5.12 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη στο OrCAD	5-17
6.1 Εκκίνηση προγράμματος προσομοίωσης OrCAD	6-2
6.2 Βιβλιοθήκες προγράμματος προσομοίωσης OrCAD	6-2
6.3 Ρυθμίσεις προσομοίωσης προγράμματος OrCAD	6-3
6.4 Επιλογή παραμέτρων απεικόνισης μέσω του προγράμματος OrCAD	6-4
6.5 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη στο OrCAD	6-4
6.6 Εξάρτηση της τάσης εξόδου στη γραμμή MT V(Rline) από τη συχνότητα (10Hz-1GHz) σε γραμμική κλίμακα	6-6
6.7 Μέγιστη τάση εξόδου	6-7
6.8 Χαμηλή και υψηλή συχνότητα 3dB	6-8
6.9 Εξάρτηση της τάσης εξόδου στη γραμμή MT V(Rline) από τη συχνότητα (10Hz-1GHz) σε λογαριθμική κλίμακα	6-10
6.10 Ισχύς εισόδου P_{in} και ισχύς εξόδου $P(Rline)$ σε λογαριθμική κλίμακα	6-10
6.11 Ισχύς εισόδου P_{in} και ισχύς εξόδου $P(Rline)$ σε γραμμική κλίμακα	6-11
6.12 Φάση ισχύος εισόδου σε μοίρες	6-12
6.13 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από την παράμετρο L_p (από 50nH ως 5μH με βήμα 50nH) για τη συχνότητα των 3MHz	6-14

6.14 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από την παράμετρο L_p (από 50nH ως 5μH με βήμα 50nH) για τη συχνότητα των 30MHz	6-15
6.15 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου L_p (250nH ως 2.5μH με βήμα 250nH)	6-16
6.16 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από την παράμετρο R_p (από 10Ω ως 500Ω με βήμα 5Ω) για τη συχνότητα των 3MHz	6-17
6.17 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από την παράμετρο R_p (από 10Ω ως 500Ω με βήμα 5Ω) για τη συχνότητα των 30MHz	6-18
6.18 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_p (10Ω ως 190Ω με βήμα 20Ω)	6-19
6.19 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου C_{value} (50pF ως 500pF με βήμα 50pF)	6-20
6.20 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (Rline) από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου C_{value} (500pF ως 5nF με βήμα 500pF)	6-21
6.21 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (Rline) από τη συχνότητα (100kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_{line} (10Ω ως 100Ω με βήμα 10Ω)	6-22
6.22 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (Rline) από τη συχνότητα (100kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_{line} (100Ω ως 1kΩ με βήμα 100Ω)	6-23
6.23 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (Rline) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των 3MHz	6-24
6.24 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (Rline) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των 30MHz	6-24
6.25 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (Rline) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των 50MHz	6-25
6.26 Ισοδύναμο κύκλωμα δύο γειτονικών ευρυζωνικών χωρητικών συζευκτών εγκατεστημένων σε εναέρια γραμμή MT	6-26
6.27 Ισχύς στο modem του δέκτη $P(R_{modem1})$ σε γραμμική κλίμακα	6-26
6.28 Ισχύς εισόδου P_{in} και ισχύς εξόδου $P(R_{modem1})$ σε λογαριθμική κλίμακα	6-27

Κεφάλαιο 1

ΕΥΦΥΗ ΔΙΚΤΥΑ

1.1 Γενικά – Ρόλος και λειτουργία των ΕΔ

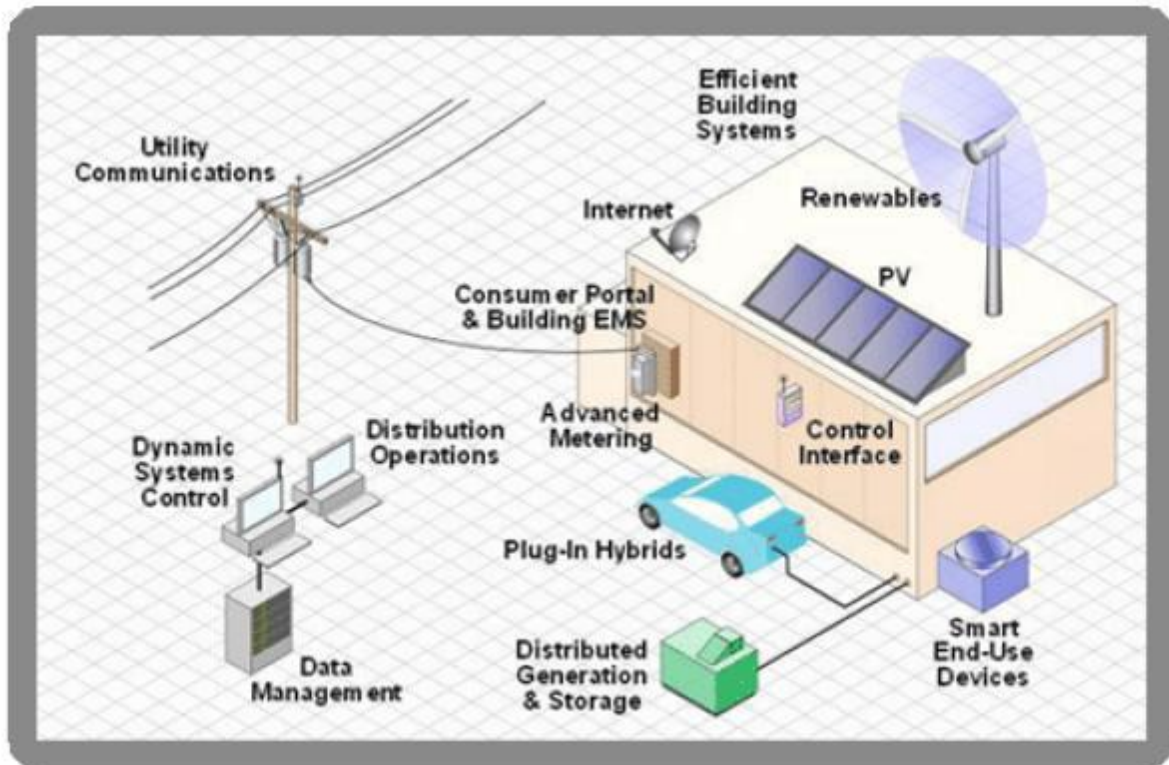
Τα Ευφυή Ηλεκτρικά Δίκτυα ή Ευφυή Δίκτυα (ΕΔ), που συναντώνται στη διεθνή βιβλιογραφία με τον όρο Smart Grids, είναι συστήματα στα οποία μικροεπεξεργαστές και αισθητήρες μεταφέρουν πληροφορίες από πραγματικούς ή εικονικούς καταναλωτές σε υπολογιστικές μονάδες, όπου μέσω κατάλληλων αλγορίθμων, ρυθμίζονται οι διασυνδεδεμένες μονάδες παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΗΕ). Το ΕΔ μεταφέρει ΗΕ από τους παρόχους στους καταναλωτές χρησιμοποιώντας ψηφιακή τεχνολογία αμφίδρομης επικοινωνίας για τον έλεγχο των διαφόρων τμημάτων του δικτύου.

Στόχοι του ΕΔ είναι:

- η εξοικονόμηση ΗΕ,
- η μείωση του κόστους λειτουργίας του ηλεκτρικού δικτύου (ΗΔ)
- η αύξηση της αξιοπιστίας του ΗΔ,
- η αύξηση της διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ),
- η βελτίωση της ποιότητας της ΗΕ και η μείωση των τιμολογίων.

Οι μονάδες παραγωγής ΗΕ θα μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους αλλά και με τους καταναλωτές σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τις απώλειες, αυξάνοντας τις αποδόσεις τους και ωφελώντας το περιβάλλον. Τέτοιου είδους εκσυγχρονισμένα ΗΔ προωθούνται σήμερα από πολλές κυβερνήσεις ανά τον κόσμο. Επιπλέον, τα ΕΔ περιλαμβάνουν ευφυή συστήματα παρακολούθησης που καταγράφουν σε όλο το εύρος του ΗΔ τη ροή ηλεκτρικής ισχύος.

Ένα παράδειγμα λειτουργίας ενός ΕΔ (Σχήμα 1.1) είναι το εξής: κατά τη διάρκεια της ημέρας όπου η ΗΕ αποκτά φθηνή κοστολόγηση μπορεί να δίνεται εντολή για την έναρξη οικιακών συσκευών, όπως τα πλυντήρια, ή εργοστασιακών εργασιών που μπορούν να λειτουργήσουν εκτός κανονικών ωραρίων. Αντίστοιχα, σε ώρες αιχμής, μέσω του ΕΔ μπορεί να τερματίζεται η λειτουργία επιλεγμένων ηλεκτρικών συσκευών ώστε να μειώνεται η συνολική ζήτηση. Η τεχνική αυτή ονομάζεται διαμόρφωση καμπύλης φορτίου. Ένα από τα οφέλη είναι ότι ο καταναλωτής έχει τη δυνατότητα να επιλέγει την τιμολογιακή του πολιτική επιλέγοντας μεταξύ παρόχων ΗΕ και προγραμμάτων τιμολόγησης [1].



Σχήμα 1.1 Παράδειγμα Ευφυούς Δικτύου

Κατά κανόνα, οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε ένα ΕΔ δεν αποτελούν καινοτομίες αλλά στην πλειοψηφία τους έχουν χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές παραπλήσιων πεδίων, όπως σε καθιερωμένες παραγωγικές διαδικασίες, στις τηλεπικοινωνίες κτλ. Η φιλοσοφία των ΕΔ είναι στενά συνυφασμένη με την έννοια της Διασπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ). Το ΕΔ διευκολύνει την εξοικονόμηση ενέργειας, τη διαχείριση των ρών ισχύος σε πραγματικό χρόνο και την εγκατάσταση αμφίδρομων μετρητικών διατάξεων που απαιτούνται για την ενσωμάτωση της ΔΠ. Καίτοι τα δίκτυα μεταφοράς είναι ήδη ελέγχιμα σε πραγματικό χρόνο, σε πολλές περιπτώσεις στις ΗΠΑ και στην ΕΕ, υπακούουν στις συμβατικές αρχές λειτουργίας χωρίς να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις που ανακύπτουν από την ενσωμάτωση διακοπτόμενων πηγών ενέργειας και την βροχοειδή μεταφορά ενέργειας.

Ως προς τους ευφυείς μετρητές, που έχουν κεντρικό ρόλο στη δομή και λειτουργία των ΕΔ, αυτοί αποτελούν αναβαθμισμένους ηλεκτρικούς μετρητές που μετρούν κρίσιμα μεγέθη του ΗΔ σε πραγματικό χρόνο και μεταδίδουν τις σχετικές πληροφορίες με στόχο την παρακολούθηση και τον έλεγχο του ΗΔ.

Σημαντικότερο πρόβλημα στη λειτουργία κάθε ΕΔ είναι η αμφίδρομη επικοινωνία με τους απομακρυσμένους κόμβους του. Λαμβάνοντας υπόψη το εύρος των περιοχών, όπου μπορεί να είναι εγκατεστημένες διατάξεις παρακολούθησης και ελέγχου, το πρόβλημα επικοινωνίας είναι εκθετικής συμπεριφοράς. Προοπτικές επίλυσης εμφανίζονται εφαρμόζοντας καθιερωμένες τηλεπικοινωνιακές τεχνολογίες. Αναλυτικότερη αναφορά στις διαθέσιμες τεχνολογίες επικοινωνιών για τα ΕΔ θα γίνει σε επόμενη παράγραφο [1].

1.2 Τα ΕΔ ως δίκτυα του μέλλοντος

Τα δίκτυα ΗΕ αποτελούν εδώ και αρκετές δεκαετίες δίκτυα ζωτικής σημασίας για τους παραγωγούς και τους καταναλωτές ΗΕ. Η βασική αρχή λειτουργίας του παραδοσιακού δικτύου ΗΕ είναι ότι η ισχύς ρέει προς μία κατεύθυνση, από τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής ΗΕ, μέσω των συστημάτων μεταφοράς και διανομής, στον τελικό καταναλωτή-πελάτη. Η μεταφορά και διανομή της ΗΕ και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται κατά συγκεντρωτικό τρόπο από κεντρικούς σταθμούς, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για μεγάλες περιοχές. Επιπλέον, υπάρχει ελάχιστη ή και μηδενική διαδραστικότητα των καταναλωτών και μηδενική επικοινωνία με τα άκρα του δικτύου.

Η ανάγκη για μεγαλύτερη αποδοτικότητα στα δίκτυα ΗΕ έχει αναγνωριστεί προ πολλού αφού 10-15% της ισχύος που παράγεται χάνεται κατά τη μεταφορά της προς τους τελικούς χρήστες, με την πλειονότητα των σχετικών απωλειών να συμβαίνει στα δίκτυα Μέσης Τάσης (ΜΤ). Ο γενικός κανόνας είναι ότι τα δίκτυα ΗΕ Υψηλής Τάσης (ΥΤ, από 33kV έως 400kV) διαθέτουν εξελιγμένα συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου. Το όλο ζήτημα είναι η αντίστοιχη αναβάθμιση και των δικτύων ΗΕ που λειτουργούν υπό τα 33kV (ΜΤ). Επομένως, η ιδέα για εγκατάσταση παρόμοιων εξελιγμένων συστημάτων και στις γραμμές ΜΤ είναι αναμενόμενη.

Προς τούτο, αυξημένα επίπεδα αυτοματισμού έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται σε δίκτυα ΜΤ αναδεικνύοντας νέες προκλήσεις για μετάδοση μετρητικών δεδομένων και σημάτων ελέγχου μεταξύ των κόμβων του ΗΔ και των κέντρων επεξεργασίας πληροφοριών και ελέγχου. Αυτοί οι νέοι αυτοματισμοί αναμένεται να προσδώσουν βελτιωμένη απόδοση, διαθεσιμότητα και αξιοποίηση της υποδομής του ΗΔ. Από πλευράς πολυπλοκότητας, μία από τις μεγαλύτερες νέες προκλήσεις για την αυτοματοποίηση του ΗΔ είναι η συλλογή και η μεταφορά δεδομένων από ευφυείς μετρητές σε κάθε νοικοκυριό και επιχείρηση στην πλειονότητα των εξελιγμένων χωρών.

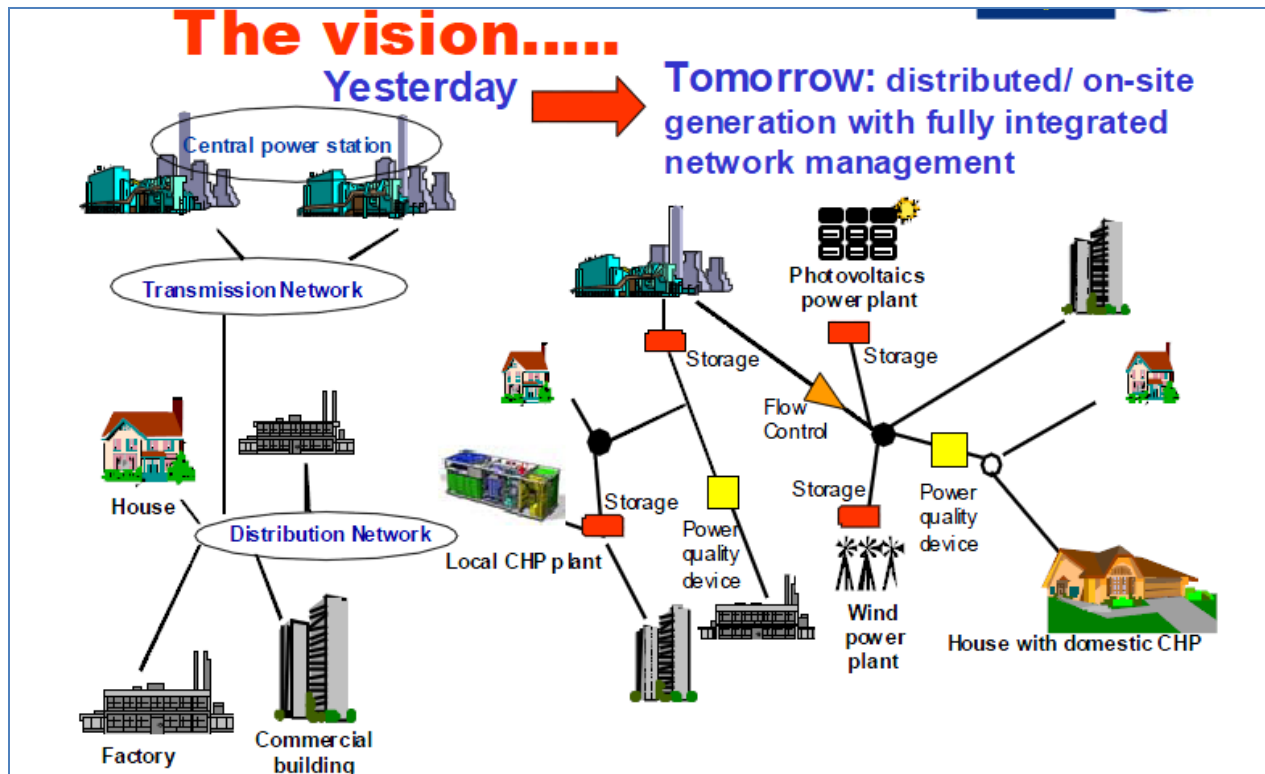
Επιπλέον, η αυξημένη διείσδυση των ΑΠΕ επιφέρει σημαντικές επιπτώσεις στον τρόπο λειτουργίας των δικτύων ΗΕ, αφού οι ροές φορτίων καθίστανται πολύπλοκες και απρόβλεπτες λόγω του πολλαπλασιασμού των σημείων παραγωγής ΗΕ και σύνδεσης με το ΗΔ. Η αναμενόμενη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων θα δημιουργήσει νέες απαιτήσεις στα δίκτυα ΗΕ, κυρίως σε μεγάλες αστικές περιοχές, όπως περισσότερο εξελιγμένα συστήματα μετρήσεων και ελέγχου από τα δίκτυα ΜΤ.

Συνεπώς, τα ΕΔ, που πρόκειται να αποτελέσουν τα ΗΔ του μέλλοντος (Σχήματα 1.2 και 1.3), πρέπει να διασφαλίζουν την αποδοτική και ασφαλή παροχή ΗΕ, να αξιοποιούν τις νέες τεχνολογίες, να προσαρμόζονται στις αλλαγές της πολιτικής δράσης και της επιχειρηματικής δραστηριότητας και να ενσωματώνουν τεχνολογίες παραγωγής που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον. Επίσης, πρέπει να προσφέρουν δυνατότητα διαδραστικής λειτουργίας στους καταναλωτές. Τα πελατοκεντρικά ΗΔ αποτελούν καθοριστικό μελλοντικό στόχο. Οι αναγκαίες αλλαγές αναμένεται να έχουν σημαντικό αντίκτυπο στη σχεδίαση, υλοποίηση και τον έλεγχο των δικτύων. Τα ΗΔ του μέλλοντος, δηλαδή τα ΕΔ, πρέπει να είναι:

- Αξιόπιστα (reliable): να επιτυγχάνουν υψηλή ασφάλεια και ποιότητα της παροχής ΗΕ, ελαχιστοποιώντας την αβεβαιότητα και τους κινδύνους λειτουργίας.
- Οικονομικά (economic): να επιτυγχάνουν αποτελεσματικότερη διαχείριση και αξιοποίηση της ΗΕ και επιτηρήσιμο ελεύθερο ανταγωνισμό και ρύθμιση
- Προσαρμόσιμα (flexible): να είναι σε θέση να ανταποκριθούν στις ανάγκες και τις προκλήσεις του μέλλοντος.
- Προσβάσιμα (accessible): να επιτρέπουν τη δυνατότητα σύνδεσης σε κάθε είδους παραγωγούς και χρήστες.
- Αμφίδρομα και φιλικά προς το περιβάλλον ευνοώντας τη διείσδυση των ΑΠΕ

Προς υλοποίηση των ανωτέρω, τα ΕΔ πρέπει να υλοποιούν τις εξής υπηρεσίες:

- Διαχείριση διακοπών λειτουργίας - Outage management
- Αποτελεσματικότητα παράδοσης ΗΕ - Efficiency of delivery
- Διαχείριση και έλεγχο του ΗΔ - Network management & control
- Έλεγχο και διαχείριση φορτίου αιχμής - Peak load control and management
- Παροχή υπηρεσιών μέτρησης (Δικτύου και Πελατών) - Metering services (Network and Customers)
- Διαχείριση της ζήτησης - Demand Side Management
- Ηλεκτρονικές/διαδραστικές υπηρεσίες προς πελάτες - Customer portal services



Σχήμα 1.2 Όραμα της ΕΕ για τη μεταβολή του τοπίου στον τομέα των δικτύων ΗΕ



Σχήμα 1.3 Το δίκτυο του μέλλοντος

Το κοινό χαρακτηριστικό των ανωτέρω υπηρεσιών είναι η ανάγκη για αμφίδρομη επικοινωνία με κάθε κόμβο και διάταξη του ΗΔ κατά προγραμματισμένο τρόπο ή όταν απαιτείται. Η τεχνολογία PowerLine Communications (PLC) προσφέρει αυτή τη δυνατότητα. Οι ασύρματες υπηρεσίες/επικοινωνίες μπορούν να την ανταγωνιστούν σε ορισμένες περιπτώσεις, αλλά το κόστος είναι πολύ μεγάλο μακροπρόθεσμα. Θα δειχθεί, λοιπόν, ότι η τεχνολογία PLC είναι η καταλληλότερη για τα ΕΔ αφού, εκτός των άλλων:

- Ικανοποιεί πλήρως τις ανάγκες τους
- Έχει άμεση και καθολική παρουσία, λόγω υπάρχουσας υποδομής για τη μετάδοση της πληροφορίας
- Αποφεύγει την εμπλοκή τρίτων μερών για τη διακίνηση πληροφορίας στο ΗΔ.

1.3 Ο ρόλος των τηλεπικοινωνιών στα ΕΔ

Τα προγράμματα σχεδίασης και ανάπτυξης ΕΔ αποτελούν τις σημαντικότερες επενδυτικές κινήσεις που αναμένονται τα επόμενα χρόνια στον τομέα της ενέργειας. Αυτό ανακλάται όχι μόνο σε οικονομικούς όρους αλλά και μέσω των περιβαλλοντικών και κοινωνικών επιπτώσεων που αναμένεται να έχουν. Τα οφέλη από μια τέτοια τεχνολογική επένδυση αναμένεται να είναι πολλά.

Όπως αναφέρθηκε, ένας από τους στόχους των ΕΔ είναι να συνεισφέρουν στη βιώσιμη ανάπτυξη, να έχουν τη δυνατότητα αμφίδρομης επικοινωνίας με τους κόμβους του ΗΔ και τους τελικούς χρήστες. Συνεπώς, το δίκτυο ΗΕ καθίσταται διαδραστικό τόσο για τις μονάδες παραγωγής όσο και για τα φορτία.

Ειδικού ενδιαφέροντος είναι τα οφέλη που αναμένονται από την εγκατάσταση ευφυών μετρητών και αισθητήρων, σε μερικές περιπτώσεις φθάνοντας στα κτίρια των καταναλωτών. Οι ευφυείς μετρητές, τα αυτοματοποιημένα συστήματα και οι τηλεπικοινωνίες θα διευκολύνουν τη διαχείριση του δικτύου σε πραγματικό χρόνο τόσο σε επίπεδο καταναλωτών όσο και σε επίπεδο παραγωγών. Επίσης, τα συστήματα ελέγχου και προστασίας σε ευρείες περιοχές (Wide Area Monitoring and Protection, WAM & WAP) θα καταστούν ικανά να διαχειρισθούν προβλήματα στα συστήματα μεταφοράς, με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η ασφάλεια και η αξιοπιστία της λειτουργίας του δικτύου.

Για την ανάπτυξη του ΕΔ, η επικοινωνία σε κάθε επίπεδο είναι καθοριστική. Η ανάγκη για μετάδοση πληροφορίας μεταξύ των χρηστών του δικτύου επιβεβαιώνει ότι η πληροφορία επηρεάζει τη σχεδίαση και τη λειτουργία των δικτύων. Οι πλέον πρόσφατες τεχνολογίες ενσωματώνονται στο δίκτυο του μέλλοντος, ενώ η προσέγγιση για τη σχεδίασή του πρέπει να είναι εύκολα προσαρμόσιμη σε περαιτέρω εξελίξεις. Όταν τα ΕΔ τεθούν σε εφαρμογή θα υπάρξει αμφίδρομη ροή τόσο πληροφορίας όσο και ενέργειας, ενώ ο έλεγχος και η λήψη αποφάσεων θα διασπείρονται σε όλους τους κόμβους του δικτύου.

Με βάση τα ανωτέρω, η Τεχνολογία Επικοινωνιών θα έχει πρωτεύοντα ρόλο στην ανάπτυξη, υλοποίηση, προσαρμογή και διαχείριση των ΕΔ αφού προσφέρει πληροφοριακή διασυνδεσιμότητα, ενισχύοντας εφαρμογές πραγματικού χρόνου όπως απόκριση στη ζήτηση, δυναμική κοστολόγηση, ενεργειακή αποδοτικότητα και αυτοματισμούς, τα οποία δεν μπορούν να υποστηριχθούν επαρκώς από τις τρέχουσες δυνατότητες του διαδικτύου. Καίτοι το πρωτόκολλο του Διαδικτύου είναι καθολικό, απαιτείται ένας αποδοτικότερος τηλεπικοινωνιακός εξοπλισμός για διασπαρμένο έλεγχο πραγματικού χρόνου των ΗΔ. Η αυξανόμενη ανάγκη για έλεγχο οδηγεί σε μια δραματική αύξηση της διακινούμενης πληροφορίας, που αφορά το σύνολο των δεδομένων και εντολών. Η διακίνηση πληροφοριών, σε συνδυασμό με τις ροές ισχύος, συμβάλλουν στη δημιουργία του ΕΔ. Τελικά, στόχος του ΕΔ είναι να καταστήσει το ΗΔ IP-based επιβάλλοντας επί της ενεργειακής υποδομής μια IP τηλεπικοινωνιακή πλατφόρμα.

1.4 Τεχνολογίες επικοινωνιών για τα ΕΔ

Οι τεχνολογίες των τηλεπικοινωνιών αποτελούν την αναγκαία υποδομή για τη διαμόρφωση και ολοκλήρωση του ΕΔ, οι λειτουργίες και οι εφαρμογές του οποίου απαιτούν την αμφίδρομη επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο της κεντρικής μονάδας ελέγχου και των ενδεχομένως εκατομμυρίων ευφύων συσκευών που είναι εγκατεστημένες επί του ΗΔ. Ορισμένες βασικές αρχές σχεδίασης και απαιτήσεις ποιότητας υπηρεσίας (QoS) είναι οι ακόλουθες:

- Καθολική παρουσία
- Επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο
- Καθορισμένη ταχύτητα μετάδοσης (εύρος ζώνης)
- Υψηλή διαθεσιμότητα, αξιοπιστία και ασφάλεια επικοινωνίας
- Επεκτασιμότητα

Τρεις μεγάλες κατηγορίες τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών καλούνται να αξιολογηθούν για την υλοποίηση του συστήματος επικοινωνιών του ΕΔ:

- PowerLine Communications (PLC) – επικοινωνία μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος. Μπορεί να είναι είτε στενής ζώνης (Narrowband-PLC), είτε ευρείας ζώνης (Broadband-PLC)
- Wireless technologies – κατάλληλοι συνδυασμοί ασύρματων τεχνολογιών κατά περίπτωση εφαρμογής ή υπηρεσίας
- Off Grid telecommunications technologies – ενσύρματα μέσα μετάδοσης (π.χ. οπτικές ίνες) με υποδομή παράλληλη προς αυτή του ΗΔ

Κάθε τεχνολογία αξιολογείται με βάση τα ακόλουθα κριτήρια αξιολόγησης:

- Ποιότητα επικοινωνιών (Communications quality) – λειτουργία duplex, διάθεση ικανού εύρους ζώνης, μικρή καθυστέρηση και ποσοστό απωλειών πακέτων
- Κατανεμημένη λειτουργικότητα (Distributed functionality) – επεξεργασία δεδομένων σε όλο το δίκτυο, συνοχή στη ροή δεδομένων
- Αποδοτική ενσωμάτωση των στοιχείων της υλικής υποδομής (Physical asset integration)
- Ζητήματα ασφάλειας (Security considerations) – περιγραφή κινδύνων για τα είδη τηλεπικοινωνιακών διαύλων και σχεδίαση αλγορίθμων για εξασφάλιση της ασφάλειας της πληροφορίας
- Επεκτασιμότητα από τεχνική σκοπιά (Extensibility from a technology perspective) – ευκολία προσαρμογής σε ενδεχόμενες ανάγκες για επέκταση ή τροποποίηση του ΕΔ
- Επεκτασιμότητα από τη σκοπιά του πελάτη (Extensibility from a customer perspective) – ικανότητα του ΕΔ να ανταπεξέλθει στις μελλοντικές ανάγκες και λειτουργίες της αγοράς ΗΕ

Η συγκριτική αξιολόγηση των τριών κατηγοριών τηλεπικοινωνιακών τεχνολογιών παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.1.

*Πίνακας 1.1
Αξιολόγηση των τεχνολογιών για επικοινωνία στα Ευφυή Δίκτυα*

Κριτήρια	Narrowband/Broadband PLC (συνδυασμοί)	Wireless technologies (συνδυασμοί)	Off grid telecommunications technologies (π.χ. οπτικές ίνες)
Ποιότητα επικοινωνιών	Υψηλή	Υψηλή	Υψηλή
Κατανομημένη λειτουργικότητα	Υψηλή	Υψηλή / Μέτρια	Μέτρια
Αποδοτική ενσωμάτωση των στοιχείων της υλικής υποδομής	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Ασφάλεια επικοινωνίας	Υψηλή / Μέτρια	Υψηλή / Μέτρια	Μέτρια
Επεκτασιμότητα από τεχνική σκοπιά	Υψηλή	Μέτρια	Χαμηλή
Επεκτασιμότητα από τη σκοπιά του πελάτη	Υψηλή	Μέτρια / Χαμηλή	Υψηλή

Για την πληρέστερη ανάλυση και σύγκριση των διαθέσιμων τεχνολογιών επικοινωνιών για τα ΕΔ, στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ορισμένων από αυτές.

Πίνακας 1.2

Σύγκριση πλεονεκτημάτων και μειονεκτημάτων εναλλακτικών τεχνολογιών για τις επικοινωνίες στο ΕΔ

Τεχνολογίες	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
GSM/GPRS	<ul style="list-style-type: none"> - Ευκολία στη χρήση - Μικρό κόστος modem - Ώριμη τεχνολογία 	<ul style="list-style-type: none"> - Εξάρτηση από τρίτες εταιρίες - Περιορισμοί στην τοποθέτηση των πομποδεκτών - Περιορισμένο εύρος ζώνης - Αδυναμία επέμβασης σε περίπτωση προβλήματος - Μεγάλος κίνδυνος τηλεπικοινωνιακής υπερφόρτωσης από ιδιώτες
Narrowband/Broadband PLC	<ul style="list-style-type: none"> - Υπάρχει η υποδομή - Καθολική παρουσία του μέσου μετάδοσης της πληροφορίας - Ανεξαρτησία από τρίτους - Αξιοπιστία επικοινωνιών ίδια με την αξιοπιστία της ηλεκτρικής ισχύος - Προσφάτως εκδοθέν πρότυπο - Υψηλή διέλευση (throughput) 	<ul style="list-style-type: none"> - Επίδοση εξαρτώμενη από τη στιγμιαία κατάσταση του διαύλου - Παρεμβολές σε/από αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες
DSL	<ul style="list-style-type: none"> - Υψηλός ρυθμός μετάδοσης - Μέσο χρησιμοποιούμενο αποκλειστικά για τη μετάδοση πληροφορίας 	<ul style="list-style-type: none"> - Ελλιπής κάλυψη αγροτικών και υποανάπτυκτων περιοχών - Εξάρτηση από τρίτους - Υψηλό κόστος
Satellite Communication	<ul style="list-style-type: none"> - Γρήγορη υλοποίηση - 100% κάλυψη, ακόμα και σε δυσπρόσιτες περιοχές 	<ul style="list-style-type: none"> - Υψηλή καθυστέρηση μετάδοσης - Εξάρτηση από τρίτους - Υψηλό κόστος

Από τους Πίνακες 1.1 και 1.2 προκύπτει ότι η PLC τεχνολογία αποτελεί τη λύση που προτιμούν οι εταιρείες ηλεκτρισμού για την υλοποίηση ενός ΕΔ. Η υποδομή για τη τεχνολογία αυτή ανήκει στις ίδιες τις εταιρείες με αποτέλεσμα να έχουν πλήρη πρόσβαση και έλεγχο επί του τηλεπικοινωνιακού μέσου. Η τεχνολογία PLC παρέχει ένα φθινό και αξιόπιστο τρόπο παροχής νέων, ευφυών εφαρμογών από και προς το τελευταίο τμήμα του δικτύου διανομής. Μπορεί να εφαρμοσθεί τόσο στη ΧΤ, επιτρέποντας την πρόσβαση σε οικιακούς ή μικρούς καταναλωτές, όσο και στη ΜΤ, παρέχοντας την υποδομή για ευρυζωνική πρόσβαση τελευταίου μιλίου (last mile access).

Κεφάλαιο 2

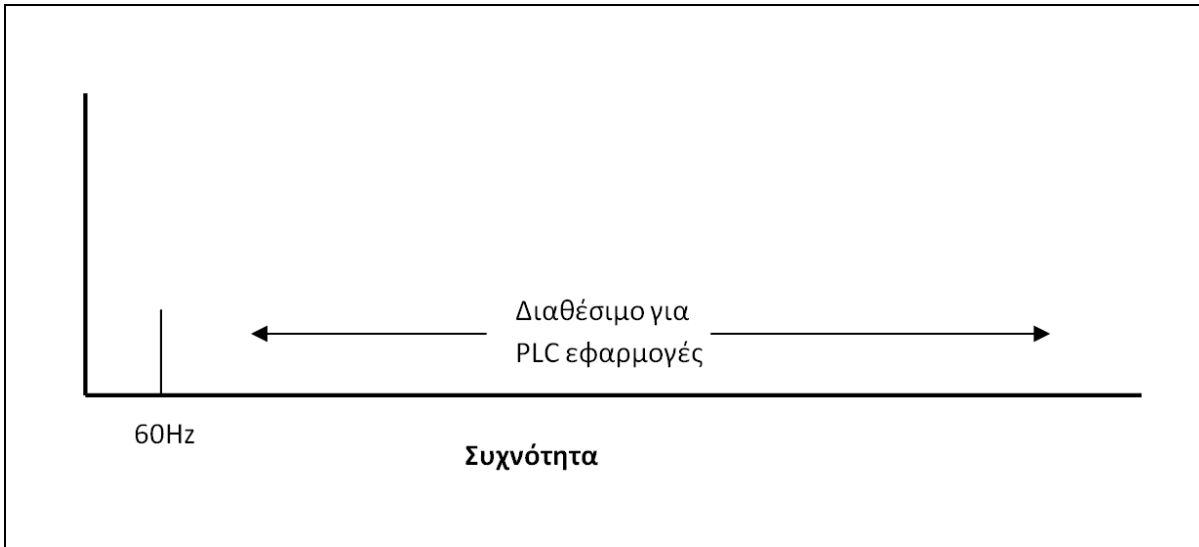
Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ POWER LINE COMMUNICATIONS

2.1 Γενικά

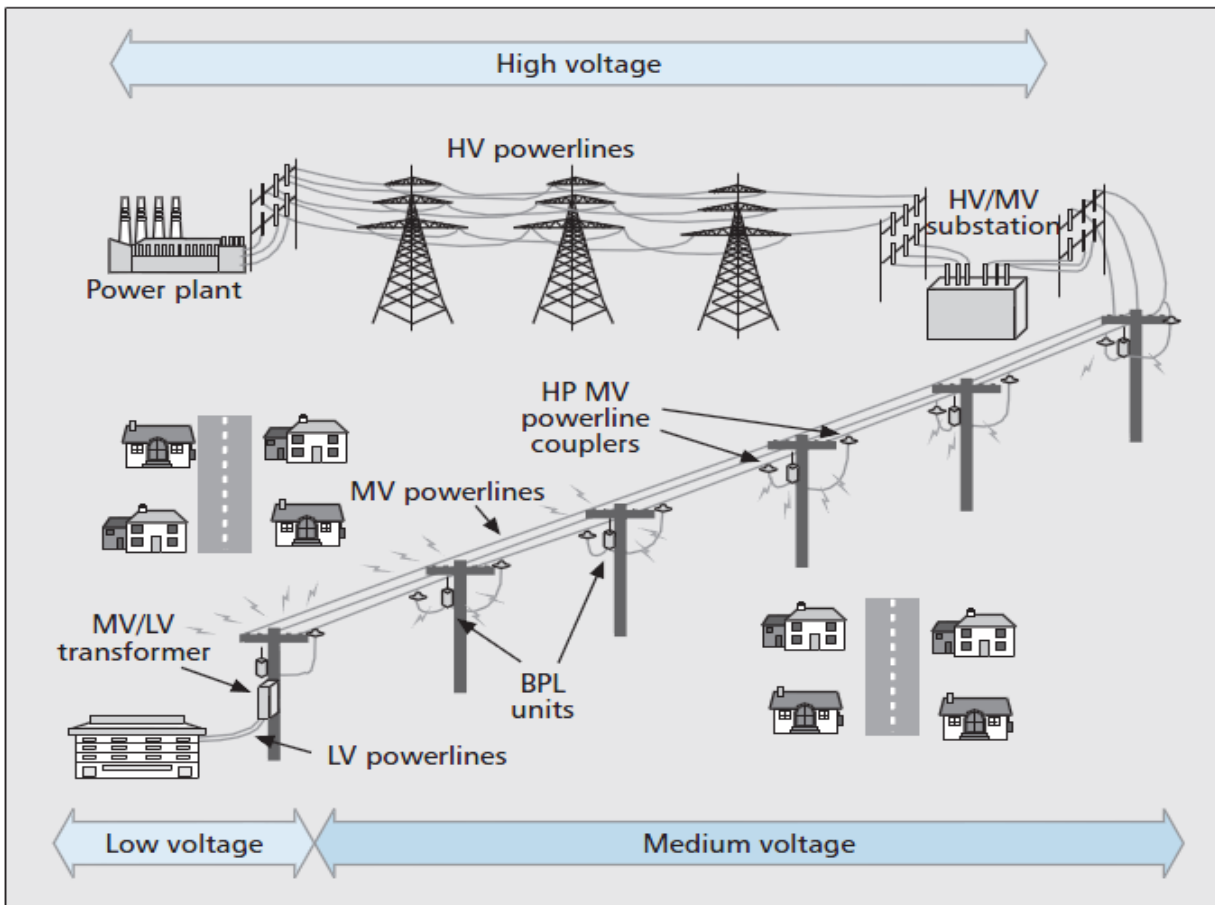
Η τεχνολογία PowerLine Communications (PLC) είναι μια αναδυόμενη τεχνολογία η οποία καθιστά εφικτή την επικοινωνία και μετάδοση πληροφορίας μέσω των γραμμών ηλεκτρικής ισχύος. Οι γραμμές ηλεκτρικής ισχύος, εκτός από τη μεταφορά και τη διανομή ΗΕ, μπορούν ταυτόχρονα να μεταδώσουν πληροφορία με ρυθμό μετάδοσης που, προς το παρόν, υπερβαίνει τα 200 Mbps στο φυσικό επίπεδο. Το μεγαλύτερο ενδιαφέρον περί την τεχνολογία αυτή εστιάζεται στο ότι πρακτικά κάθε σπίτι ή γραφείο είναι συνδεδεμένο με το ΗΔ και έχει εγκατεστημένες ηλεκτρικές καλωδιώσεις. Επομένως, η τεχνολογία PLC είναι μηχανισμός που προσφέρει τη δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων σε υψηλούς ρυθμούς μέσω του ΗΔ και τη δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο από οποιοδήποτε σημείο [1].

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας PLC, τόσο η Broadband-PLC όσο και η Narrowband-PLC (εκτενέστερη αναφορά θα γίνει σε επόμενη παράγραφο), εξυπηρετεί και άλλους σκοπούς [2]. Ενώ η ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο μπορεί να αποτελέσει μια βασική εφαρμογή των συστημάτων PLC, το πλήθος των πιθανών εφαρμογών που μπορούν να εξυπηρετηθούν είναι μεγάλο και αποτελεί μια επιχειρησιακή και επιχειρηματική δραστηριότητα που τώρα αρχίζει να διερευνάται. Τα οφέλη από την αναμενόμενη εγκατάσταση των συστημάτων PLC επί του δικτύου ΜΤ είναι άμεσα και έμμεσα. Το ίδιο το δίκτυο ΗΕ αποκτά τη δυνατότητα αυτοδιαχείρισης, εξελισσόμενο σε ΕΔ ενώ, παράλληλα, οι εταιρείες παροχής ΗΕ μπορούν να λειτουργήσουν και ως πάροχοι ευρυζωνικής πρόσβασης στο Διαδίκτυο σε κάθε είδους χρήστη.

Η δυνατότητα μετάδοσης δεδομένων μέσω του ΗΔ είναι κατά πολλούς τρόπους βασισμένη στην τηλεφωνία. Αυτό σημαίνει ότι, παρόμοια με τον τοπικό βρόχο μιας τηλεφωνικής εταιρείας, οι ηλεκτρικές γραμμές έχουν εύρος συχνοτήτων διαθέσιμο για άλλους σκοπούς, όπως η μετάδοση δεδομένων. Για παράδειγμα, σε μια γραμμή στην Αμερική (όπου η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι τα 60 Hz), οι συχνότητες πάνω από τα 60 Hz είναι αχρησιμοποίητες, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.1. Έτσι, η εξέλιξη της μετάδοσης δεδομένων στο αχρησιμοποίητο φάσμα συχνοτήτων των ηλεκτρικών γραμμών μεταφοράς βασίζεται στις ίδιες αρχές που επέτρεψαν στην DSL τεχνολογία να παρέχει πρόσβαση υψηλής ταχύτητας στο Διαδίκτυο.



Σχήμα 2.1 Φάσμα διαθέσιμων συχνοτήτων από μία ηλεκτρική γραμμή για εφαρμογές PLC



Σχήμα 2.2 Ηλεκτρικό δίκτυο με ενσωματωμένη υβριδική W-BPL τεχνολογία.

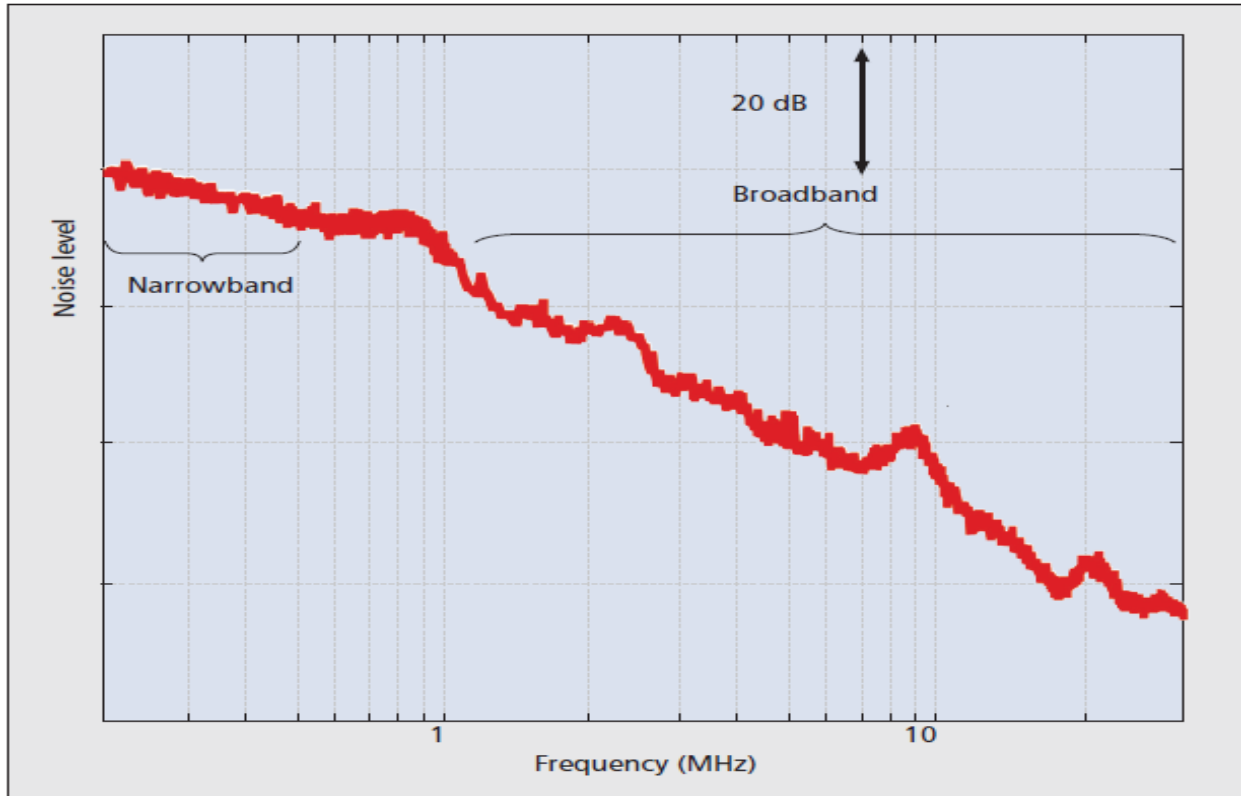
Η τεχνολογία PLC χρησιμοποιεί το ίδιο το ΗΔ για τηλεπικοινωνίες. Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που μεταφέρουν το σήμα επικοινωνίας διαδίδονται μέσω των γραμμών ΜΤ μαζί με το ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εύρος υψηλότερων συχνοτήτων. Όταν μεταφέρονται PLC σήματα, τα εναέρια καλώδια ΜΤ ακτινοβολούν, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.2. Ως εκ τούτου, το εύρος συχνοτήτων του PLC υπόκειται σε περιορισμούς που επιβάλλονται από την ανάγκη για ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα της μετάδοσης PLC με άλλες υπηρεσίες [3].

2.2 Επικοινωνίες PLC στενής και ευρείας ζώνης (Narrowband και Broadband PLC)

Οι επικοινωνίες μέσω γραμμών μεταφοράς ΗΕ (PLC) χρησιμοποιούν το δίκτυο ΗΕ για μετάδοση δεδομένων και μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δύο κατηγορίες με κριτήριο την περιοχή και το εύρος ζώνης συχνοτήτων λειτουργίας [2].

- Χαμηλής ταχύτητας επικοινωνίες (Narrowband PLC – NB-PLC), με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων της τάξης των λίγων kbps. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διασύνδεση οικιακού εξοπλισμού σε μια οικία, για σηματοδότηση, για αντιμετώπιση προβλημάτων, για εφαρμογές ΕΔ, κτλ. Είναι μια πλήρως ανεπτυγμένη και προτυποποιημένη τεχνολογία. Στην Ευρώπη προτυποποιήθηκε από τη CENELEC (Comité Européen de Normalisation ELEctronique) EN 50065. Στην εφαρμογή αυτή παραχωρήθηκε η ζώνη συχνοτήτων από 3kHz έως 148.5kHz.
- Υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες (Broadband PLC – BPL) με ρυθμό μετάδοσης δεδομένων υψηλότερους του 1Mbps. Οι επικοινωνίες αυτές παρέχουν τη δυνατότητα πρόσβασης στο Διαδίκτυο είτε σύνδεσης σε LAN (Local Area Network) δίκτυα υπολογιστών και πολυμεσικού εξοπλισμού μεταξύ των οποίων συμπεριλαμβάνονται το DSL (Digital Subscriber Line ή ψηφιακή συνδρομητική γραμμή), διαποδιαμορφωτές καλωδίων (cable modems), δρομολογητές (routers), συσκευές ήχου, κάμερες ασφαλείας, τηλέφωνα IP (Internet Protocol), ηλεκτρονικοί προβολείς εικόνων (electronic picture frames) και κονσόλες παιχνιδιών (gaming consoles).

Οι κύριες διαφορές μεταξύ των επικοινωνιών χαμηλής και υψηλής ταχύτητας είναι η ζώνη και το εύρος συχνοτήτων που χρησιμοποιούν. Στο διάγραμμα του Σχήματος 2.3 φαίνεται το τυπικό φάσμα θορύβου ενός αντιστροφέα (inverter noise spectrum) που μπορεί να εγκατασταθεί επί των ηλεκτρικών γραμμών. Οι χαμηλής ταχύτητας επικοινωνίες συνήθως χρησιμοποιούν φέρουσες συχνότητες κάτω από τη ζώνη συχνοτήτων AM της Αμερικής (<500kHz). Σε αυτές τις συχνότητες, το υψηλό επίπεδο θορύβου ελαττώνει το διαθέσιμο εύρος ζώνης συχνοτήτων. Οι υψηλής ταχύτητας επικοινωνίες απαιτούν πολύ καλύτερες τιμές σηματοθορυβικού λόγου (Signal-to-Noise ratio - SNR) και συνήθως χρησιμοποιούν τη ζώνη συχνοτήτων μεταξύ 3 και 50MHz, όπου ο θόρυβος τείνει να είναι λιγότερος [4].



Σχήμα 2.3 Τυπικό φάσμα θορύβου ενός αντιστροφέα

2.2.1 Broadband PLC - BPL

Οι εφαρμογές της ευρυζωνικής τεχνολογίας PLC απαιτούν αξιόπιστη ανταλλαγή δεδομένων. Η BPL μετάδοση δεδομένων που πραγματοποιείται με υψηλούς ρυθμούς πρέπει να είναι απλή, φθηνή και να μην παρουσιάζει αστάθειες. Οι ευρυζωνικές επικοινωνίες PLC είναι ικανές να διαλέξουν μεταξύ τεχνικών διαμόρφωσης που προσαρμόζονται στο σηματοθορυβικό λόγο του καναλιού και έναν επιλεκτικό αυτόματο μηχανισμό ερώτησης-απάντησης (Automatic Repeat-Quest - ARQ) με σκοπό να επιτευχθεί μια σταθερή ζεύξη. Επιπλέον, όταν υπάρχει μεγάλο πλήθος κόμβων, οι ευρυζωνικές επικοινωνίες μπορεί να χρειάζεται να αποδώσουν ζώνες μικρότερου εύρους σε κάθε κόμβο.

Για εφαρμογές πρόσβασης, όπως VoIP και περιήγηση στο Διαδίκτυο, υποστηρίζονται διάφορα επίπεδα ποιότητας υπηρεσίας (Quality of Service - QoS), όταν αυτές οι εφαρμογές ανταγωνίζονται για εύρος στο ίδιο μέσο. Για παράδειγμα, κάποιες ροές πακέτων είναι συγχρονισμένες ροές βίντεο ή ήχου και άλλες μπορεί να είναι ασύγχρονες ροές δεδομένων πραγματικού χρόνου (real time data). Αυτά τα δεδομένα μπορεί να έχουν πολύ υψηλότερες απαιτήσεις σε εύρος σε σχέση με εφαρμογές του ΕΔ για να μοιραστούν το ίδιο μέσο.

Γενικά αναμένεται ότι στο μέλλον περισσότερο απαιτητικές εφαρμογές και εμπορικές ευκαιρίες θα αναδειχθούν. Τελικά, είναι εύλογη η επιλογή μιας ευρυζωνικής PLC λύσης με περισσότερες τηλεπικοινωνιακές δυνατότητες σε σχέση με την επικοινωνία χαμηλής ταχύτητας.

2.2.2 Narrowband PLC – ζώνη CENELEC

Η τεχνολογία Narrowband PLC, που αφορά τη ζώνη CENELEC, δεν παρέχει τον υψηλό ρυθμό μετάδοσης, που παρέχει η τεχνολογία BPL. Εντούτοις, πολλές υπηρεσίες και εφαρμογές διαχείρισης των ΕΔ δεν απαιτούν υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης, αφού τα προς μετάδοση δεδομένα είναι σχετικά λίγα και δεν απαιτείται διαδραστικότητα.

Τελευταία, έχουν προκύψει διάφορες υλοποιήσεις/προγράμματα PLC, ειδικά σχεδιασμένες/α για ΕΔ [5].

→ PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution)

Το πρόγραμμα αυτό αναπτύσσει τα τεχνικά χαρακτηριστικά ενός προτύπου για PLC modems στη ΧΤ. Πρόκειται για μια ανοικτή, δημόσια αρχιτεκτονική επικοινωνιών με στόχο να καταστήσει εφικτή την ανάπτυξη ενός ΕΔ. Ο μέσος ρυθμός μετάδοσης είναι 70kbps και ο μέγιστος 120kbps χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης 47.363kHz στις υψηλές συχνότητες της CENELEC A-band (42-89kHz περίπου).

→ REMPLI (Real-time Energy Management over Power-Lines and Internet)

Στο πρόγραμμα αυτό αναπτύσσεται ένα σύστημα 3 επιπέδων:

- Το πρώτο επίπεδο αφορά το δίκτυο ΧΤ και καλύπτει ομάδες καταναλωτών ενέργειας. Συνδέει τους κόμβους REMPLI που είναι συνήθως εγκατεστημένοι στο χώρο του καταναλωτή. Οι κόμβοι αυτοί αποτελούν τους συζεύκτες μεταξύ του εξυπηρετούμενου εξοπλισμού (μετρητές και αισθητήρες) και της υποδομής των PLC. Στο σημείο όπου η ΧΤ μετασχηματίζεται σε ΜΤ τοποθετούνται γέφυρες (bridges) REMPLI.
- Το δεύτερο τμήμα αφορά τη ΜΤ και συνδέεται από τη μια πλευρά με γέφυρες REMPLI στη ΧΤ και από την άλλη πλευρά με σημεία πρόσβασης (access points) REMPLI. Αυτά βρίσκονται στους μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ. Τα σημεία πρόσβασης αποτελούν πύλες μεταξύ του ΗΔ και της υποδομής που βασίζεται στο IP.
- Το τρίτο τμήμα είναι το δίκτυο που βασίζεται στο IP και εκκινεί από τους υποσταθμούς με μετασχηματιστές ΥΤ/ΜΤ. Το δίκτυο αυτό συνδέει τους εξυπηρετητές (servers) εφαρμογών στην υποδομή του REMPLI.

→ G3 PLC

Στόχος του G3 PLC είναι η ανάπτυξη ενός προτύπου για PLC modems βάσει των προδιαγραφών που θέτει η ERDF (Electricité Réseau Distribution France). Η σχεδίαση γίνεται για τα δίκτυα MT και XT και αφορά εφαρμογές ΕΔ και αυτόματης διαχείρισης μετρητών (Automatic Meter Management). Οι προδιαγραφές στο φυσικό στρώμα αναφέρονται σε modems που λειτουργούν στο εύρος συχνοτήτων από 35.9 έως 90.6 kHz με δυνατότητα επέκτασης μέχρι τα 480kHz. Ο ρυθμός δεδομένων που έχει επιτευχθεί στο φυσικό στρώμα φθάνει τα 32kbps.

Και οι τρεις λύσεις που περιγράφονται ανωτέρω βασίζονται στη διαμόρφωση OFDM. Αυτό προσδίδει στη τεχνολογία PLC σχετικά υψηλό ρυθμό μετάδοσης, χαμηλό κόστος και ανεξαρτησία από τρίτους, και άρα ένα ανταγωνιστικό πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες πρόσβασης. Επίσης, έχουν ξεκινήσει πρωτοβουλίες για την επίτευξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των τριών συστημάτων που παρουσιάστηκαν, χαρακτηριστικό που αποτελεί προϋπόθεση για την υλοποίηση ενός προγράμματος μεγάλης κλίμακας. Συγκεκριμένα, τα REMPLI και G3 PLC ερευνούν θέματα που αφορούν τη διαλειτουργικότητά τους με το PRIME. Εντούτοις, στην παρούσα φάση, οι τεχνολογίες PLC δεν μπορούν να παρέχουν την αξιοπιστία, την ποιότητα υπηρεσίας, την ασφάλεια και τη διαλειτουργικότητα που απαιτούνται για εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Ο κύριος περιορισμός είναι ότι δεν έχουν σχεδιασθεί εξαρχής για τη μετάδοση IP αποκλειστικά, που όμως αποτελεί το πρωτόκολλο που απαιτείται κατά κύριο λόγο στις επικοινωνίες των εταιρειών ΗΕ. Επίσης, οι απαιτήσεις ασφάλειας έχουν διερευνηθεί σε πολύ χαμηλό επίπεδο. Τέλος, οι υπάρχουσες τεχνολογίες PLC απαιτούν περαιτέρω έρευνα για να καθορισθεί πλήρως η επικεφαλίδα που απαιτείται για τη δρομολόγηση και τον έλεγχο της ορθότητας των πακέτων, να προστεθούν λειτουργίες πραγματικού χρόνου (που απαιτούν πολύ μικρή καθυστέρηση μετάδοσης) και να επιτευχθούν υψηλοί ρυθμοί μετάδοσης.

Για να ενσωματωθεί το IP στις narrowband PLC υψηλής ταχύτητας πρέπει να διερευνηθούν τα ακόλουθα ζητήματα ώστε να επιτευχθεί υψηλή απόδοση και διαφανής λειτουργία για το χρήστη:

- Οι υπάρχουσες τεχνολογίες PLC κατασκευάζονται ειδικά για να ανταποκρίνονται σε συγκεκριμένες τοπολογίες δικτύων, εφαρμογές και πρωτόκολλα ώστε να επιτύχουν υψηλή απόδοση και μείωση του κόστους. Για να γίνουν συμβατές με τις υπάρχουσες και μελλοντικές υπηρεσίες του ΕΔ πρέπει να χρησιμοποιούν τη στοίβα πρωτοκόλλων IP.

- Τα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα που στηρίζονται στην τεχνολογία PLC αντιμετωπίζουν ένα δυσμενές και ασταθές περιβάλλον διάδοσης. Συνεπώς, πρέπει να αναβαθμισθούν οι κόμβοι του ΗΔ ώστε να είναι σε θέση να αντιμετωπίζουν τις δυσκολίες που εισάγει ο δίαυλος και να προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες. Επίσης, πρέπει να προσδοθούν σε αυτούς χαρακτηριστικά που ενισχύουν τη βιωσιμότητα του συστήματος στις περιπτώσεις όπου κάποιοι κόμβοι είναι προσωρινά μη προσπελάσιμοι.
- Πρέπει να υλοποιηθούν κατάλληλοι μηχανισμοί ασφάλειας για την προστασία του δικτύου PLC το οποίο είναι εγκατεστημένο επί του ΗΔ.
- Για να χρησιμοποιηθεί το δίκτυο PLC για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του ΗΔ σε ιδιόζουσες περιπτώσεις ή για βοηθητικές διεργασίες (έλεγχος τάσης, ισχύος, συχνότητας) πρέπει οι εφαρμογές που χρησιμοποιούνται να λαμβάνουν τα αναγκαία δεδομένα εγκαίρως και να μπορούν να αντιδρούν σε αυτά ταχέως. Συνεπώς, το τηλεπικοινωνιακό σύστημα πρέπει να είναι (σχεδόν) πραγματικού χρόνου.
- Η δυνατότητα αλλαγής τηλεπικοινωνιακού καναλιού χωρίς απώλεια της ζεύξης ή η online επιλογή των εναλλακτικών δρομολογήσεων είναι ιδέες οι οποίες μπορούν να αυξήσουν την αξιοπιστία του συστήματος, με κόστος όμως την αποστολή πλεονάζουσας πληροφορίας.
- Πρέπει να αναπτυχθούν εξελιγμένα μοντέλα για το δίαυλο και το δίκτυο που θα αποτελέσουν τη βάση για τη μελέτη της απόδοσης μεγάλων δικτύων. Αυτό θα βοηθήσει επίσης τον καθορισμό των απαιτήσεων από το σύστημα επικοινωνιών και τη βελτίωση της σχεδίασης.

Το πρότυπο CENELEC EN 50065 χωρίζει το εύρος ζώνης 3 – 148.5 kHz σε τέσσερις ζώνες, έκαστη εκ των οποίων διατίθεται σε διαφορετικές υπηρεσίες:

- CENELEC A Band (3 – 95 kHz): Λειτουργίες των παρόχων HE
- CENELEC B Band (95 – 125 kHz): Όλες οι εφαρμογές. Δεν απαιτείται πρωτόκολλο πρόσβασης.
- CENELEC C Band (125 – 140 kHz): Για συστήματα οικιακών δικτύων με υποχρεωτική χρήση του πρωτοκόλλου CSMA/CA.
- CENELEC D Band (140 – 148.5 kHz): Συστήματα συναγερμού και ασφάλειας. Δεν απαιτείται πρωτόκολλο πρόσβασης.

Οι ιδιότητες του διαύλου μετάδοσης που συνιστούν οι γραμμές ΗΕ εξαρτώνται δραστικά από τη συχνότητα. Η σχέση αυτή αποτελεί το βασικό παράγοντα που καθορίζει την πιθανή επίδραση ανακλώμενων σημάτων στο επιθυμητό σήμα. Οι ανακλάσεις προκαλούνται από σήματα που φθάνουν σε ατελώς προσαρμοσμένες γραμμές, οπότε μέρος τους ανακλάται. Το πρότυπο CENELEC περιορίζει τα σήματα που μεταδίδονται στη τεχνολογία NB-PLC στο δίκτυο ΧΤ στις συχνότητες 3-148.5 kHz. Όταν το εύρος συχνοτήτων περιορίζεται στα 150kHz με μήκος κύματος λ της τάξης του 1km, διαφορές στο μήκος διάδοσης $\lambda/2$ (δηλαδή περίπου 500m) ή πολλαπλασίων αυτού προκαλούν βαθιές βυθίσεις στην απόκριση συχνότητας, ενδεχόμενο, πάντως που δεν συμβαίνει συχνά. Λόγω όμως της μικρότερης εξασθένησης στις χαμηλότερες συχνότητες οι πολλαπλές ανακλάσεις παραμένουν ισχυρές προκαλώντας μικρή βύθιση στη συνάρτηση μεταφοράς. Η εξασθένηση που εισάγει ο δίαυλος μετάδοσης στο επιθυμητό σήμα εξαρτάται από τη συχνότητα, το μήκος της διαδρομής των PLC σημάτων και των ανακλάσεων αλλά και το χρόνο δεδομένου ότι οι συνθήκες διάδοσης μεταβάλλονται με το χρόνο [5].

2.3 Τεχνολογικές προκλήσεις για την εφαρμογή του PLC

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μετάδοση των σημάτων PLC είναι:

- Τοπολογία – Topology
- Απώλειες διάδοσης - Losses
- Εμπόδια διάδοσης - Impediments
- Θόρυβος - Noise

Τοπολογία – Οι γραμμές μεταφοράς ΗΕ σχηματίζουν διάφορες τοπολογίες, (branches, tees, rings, etc.), στις οποίες πρέπει να προσαρμόζονται τεχνολογικές επιλογές για τηλεπικοινωνίες ΕΔ. Τα περισσότερα σύγχρονα συστήματα PLC προσπαθούν, κατά κύριο λόγο με χρήση της διαμόρφωσης OFDM, να αντιμετωπίσουν με αποτελεσματικό τρόπο τα προβλήματα πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation).

Απώλειες διάδοσης – Τα σήματα υψηλής συχνότητας, όταν διαδίδονται μέσω των γραμμών του ΗΔ, εμφανίζουν εκθετικής μορφής ελάττωση της ισχύος τους για διάφορους λόγους, όπως διαρροή από τα καλώδια υπό μορφή ακτινοβολίας και θερμικές απώλειες λόγω της συνολικής αντίστασης της γραμμής. Εκτός από μείωση της ισχύος του σήματος προκαλούνται σε τοπική βάση και επιζήμιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές σε αδειοδοτημένες ασύρματες υπηρεσίες. Η μείωση του σηματοθορυβικού λόγου (SNR) λήψης οδηγεί σε σχετικά μειωμένη εμβέλεια μετάδοσης των υψίσυχνων PLC σημάτων. Η μειωμένη εμβέλεια αποτελεί ένα από τα βασικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν κατά τη σχεδίαση PLC συστημάτων.

Εμπόδια διάδοσης – Σημαντικά ζητήματα ανακύπτουν όταν το σήμα PLC πρέπει να διασχίσει μετασχηματιστές, διακόπτες και άλλα εμπόδια διάδοσης μέσα στο ΗΔ. Αυτά τα ζωτικής σημασίας στοιχεία για τα συστήματα ΗΕ αλλοιώνουν, χειροτερεύουν ή εμποδίζουν τα σήματα. Προκειμένου να επιτευχθεί ικανή εμβέλεια μετάδοσης και καλή ποιότητα του σήματος PLC τα εμπόδια διάδοσης πρέπει να αντιμετωπίζονται με τον κατά περίπτωση κατάλληλο τρόπο. Τεχνικές για να επιτευχθεί αυτό περιλαμβάνουν: επιλογή φασματικής περιοχής σήματος (signal frequency selection), προσθέτοντας συζεύκτες (couplers) και επαναλήπτες (repeaters) σε κάθε πλευρά του εμποδίου, ή σε κάποιες περιπτώσεις, χρησιμοποιώντας εναλλακτικές τεχνολογίες μετάδοσης, όπως ασύρματη σύνδεση για τη γεφύρωση των εμποδίων (Wireless-BPL).

Θόρυβος – Εκτός από το θόρυβο υποβάθρου, διάφορες πηγές θορύβου εμφανίζονται κατά μήκος των γραμμών μεταφοράς του ΗΔ και, σε ορισμένες περιπτώσεις, οφείλονται σε συνήθεις χρήστες που κατά τη λειτουργία τους προκαλούν αιχμές τάσης και θορύβου (voltage and noise spikes). Οι αιχμές αυτές προκαλούν προβλήματα αφού είναι ομοειδείς με τα σήματα PLC και υπερτίθενται σε αυτά. Επίσης, παρεμβολές από γειτονικές ραδιοεκπομπές, όπως από ισχυρούς ραδιοφωνικούς σταθμούς AM, αποτελούν πρόσθετες πηγές θορύβου που παρενοχλούν τα σήματα PLC. Ραδιοσήματα οφειλόμενα σε τοπικές ασύρματες υπηρεσίες παρεμβάλλουν στα PLC σήματα με τον ίδιο τρόπο που τα τελευταία παρεμβάλλουν στις προαναφερθείσες υπηρεσίες. Το σχήμα διαμόρφωσης και η φασματική περιοχή σήματος επιλέγονται κατάλληλα προς αντιμετώπιση των ζητημάτων αυτών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, χρησιμοποιούνται φίλτρα φραγής (notch filters) για την καταπίεση ή αποφυγή των παρεμβολών.

Ανεξαρτήτως τοπολογίας, το σύστημα PLC πρέπει να είναι σε θέση να αντιμετωπίσει το δυσμενές φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης, σε εξαιρετικές περιπτώσεις με εφαρμογή δυναμικής δρομολόγησης των σημάτων PLC.

2.4 Έγχυση/Εξαγωγή του PLC σήματος σε/από γραμμή ισχύος

Η αποστολή πληροφοριών από κάποιο σημείο του ΗΔ σε κάποιο άλλο απαιτεί ασφαλή σύνδεση με το ΗΔ, το οποίο μπορεί να είναι ένα χαμηλής, μέσης ή υψηλής τάσης σύστημα, το οποίο διαρρέεται από υψηλής έντασης ρεύμα. Η έγχυση του διαμορφωμένου σήματος PLC πραγματοποιείται, συνήθως, υπό σχετικά χαμηλές τάσεις, για την αποφυγή οποιασδήποτε επίπτωσης στην παροχή ισχύος. Αυτή η μεγάλη διαφορά στα επίπεδα τάσης μεταξύ του ΗΔ και του PLC σήματος είναι η πρώτη σοβαρή πρόκληση για μετάδοση πληροφορίας μέσω των γραμμών μεταφοράς του ΗΔ.

Το βασικό στοιχείο για την έγχυση/εξαγωγή σημάτων PLC στο/από το ΗΔ είναι το PLC modem που είναι ενσωματωμένο στην PLC μονάδα. Το PLC modem εγχέει το σήμα στις γραμμές MT μέσω του συζεύκτη (coupler), επιτρέποντας έτσι την ταυτόχρονη μετάδοση του PLC σήματος και της ηλεκτρικής ισχύος. Ο συζεύκτης είναι η διάταξη που χρησιμοποιείται τόσο για την έγχυση όσο και για την εξαγωγή σημάτων PLC από τις γραμμές του ΗΔ, χωρίς να αλλοιώνεται η πληροφορία που μεταφέρει το PLC σήμα ή να επηρεάζεται από το υψηλής έντασης ρεύμα ισχύος. Αν και αυτό μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους, έχουν επικρατήσει τρεις βασικές μέθοδοι:

Απευθείας/Άμεση σύνδεση (μερικές φορές ονομάζεται και «ωμική»)

Χωρητική σύζευξη (Capacitive coupling)

Επαγωγική σύζευξη (Inductive coupling)

Με την πάροδο του χρόνου, οι συζεύκτες αναμένεται να γίνουν μικρότεροι και φθηνότεροι. Μέχρι τώρα, η επιχειρηματική απόδοση και η ασφάλεια κατά την εγκατάσταση βρίσκονται σε πολύ υψηλά επίπεδα. Καθώς η σχεδίαση των συζευκτών εξελίσσεται, τα χαρακτηριστικά αυτά πρέπει να διατηρηθούν καθώς οι Υπηρεσίες Διανομής ΗΕ θεωρούν ότι η ακεραιότητα του ΗΔ και η ασφάλεια του προσωπικού δεν πρέπει να επηρεασθούν αρνητικά από την υιοθέτηση των τεχνολογιών PowerLine.

Εκτενής αναφορά στους συζεύκτες θα γίνει σε επόμενα κεφάλαια της εργασίας, αφού το αντικείμενό της είναι η έγχυση και εξαγωγή σημάτων PLC σε/από γραμμές ισχύος MT μέσω συζευκτών.

2.5 Εφαρμογές PLC και Υπηρεσίες

Παραδείγματα υπηρεσιών που μπορούν να προσφερθούν μέσω της τεχνολογίας PLC είναι οι υπηρεσίες προστιθέμενης αξίας που περιλαμβάνουν από ψυχαγωγία και τηλεφωνία VoIP (Voice over Internet Protocol) –εφαρμογές που ήδη έχουν υλοποιηθεί σε διάφορα συστήματα BPL- μέχρι λειτουργίες οικιακής διαχείρισης (home management functions), όπως η διαχείριση ασφάλειας (security management) και η διαχείριση ενέργειας (energy management). Τα συστήματα BPL μπορούν να χρησιμεύουν ως ο ενδιάμεσος μεταξύ των πελατών και των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και ως υπόβαθρο για την εκτέλεση διαφόρων λειτουργιών για λογαριασμό των πελατών [2].

Με χρήση της τεχνολογίας PLC μπορούν να μεταδοθούν χρήσιμες πληροφορίες στον τελικό καταναλωτή/χρήστη, όπως τιμολόγηση ενέργειας σε πραγματικό χρόνο (energy prices), λογαριασμοί κατανάλωσης ΗΕ και στοιχεία ενεργειακής χρήσης (billing and energy use data), ενώ ταυτόχρονα μπορούν να ληφθούν αυτόματες ή προγραμματισμένες αποφάσεις που αφορούν ή προέρχονται από τους πελάτες, όπως σκόπιμη διακοπή φορτίων (load shedding), ρυθμίσεις θερμοστατών (thermostat settings) κλπ. Οι πελάτες αποκτούν τη δυνατότητα να τροποποιήσουν και να αλληλεπιδράσουν με το ΗΔ στο βαθμό που τους επιτρέπεται και επιθυμούν.

Η χρήση συστημάτων PLC μπορεί να βελτιστοποιήσει τις υπάρχουσες λειτουργίες του ΗΔ (utility-based functions), γεγονός το οποίο με τη σειρά του μπορεί να βελτιώσει την επιχειρησιακή εφαρμογή των συστημάτων BPL για τους καταναλωτές ενθαρρύνοντας έτσι την επέκταση για ευρυζωνική χρήση. Τα εμπορικά συστήματα PLC περιλαμβάνουν ήδη εφαρμογές ηλεκτρικού δικτύου (utility applications).

Στους Πίνακες 2.1 και 2.2 παρουσιάζονται ορισμένες εφαρμογές και υπηρεσίες που αφορούν την τεχνολογία PLC [2].

Πίνακας 2.1 Εφαρμογές PLC και υπηρεσίες – Διαχείριση Δικτύου

Διαχείριση Δικτύου
Αυτόματη ανάγνωση μετρητών (Automated meter reading)
Αυτόματη σύνδεση/αποσύνδεση φορτίων (Automated load connection/disconnection)
Απεικόνιση ποιότητας ενέργειας (Power quality monitoring)
Απεικόνιση δεδομένων του δικτύου διανομής (Distribution system data monitoring)
Έλεγχος φορτίου/ζήτησης (Load control/demand-side management)
Έλεγχος φωτισμού (Lighting detection and notification)
Εντοπισμός σφαλμάτων (Fault location)
Έλεγχος τάσης (Voltage control)
Δυναμικός καθορισμός (Dynamic pricing)
Κατανεμημένος έλεγχος διανομής (Distributed resource control and dispatch)
Διαχείριση προσωπικού αποκατάστασης βλαβών και συντήρησης (Crew management)
Παρακολούθηση για ασφάλεια του δικτύου (Security monitoring)

Πίνακας 2.2 Εφαρμογές PLC και υπηρεσίες – Υπηρεσίες πελατών με χρέωση

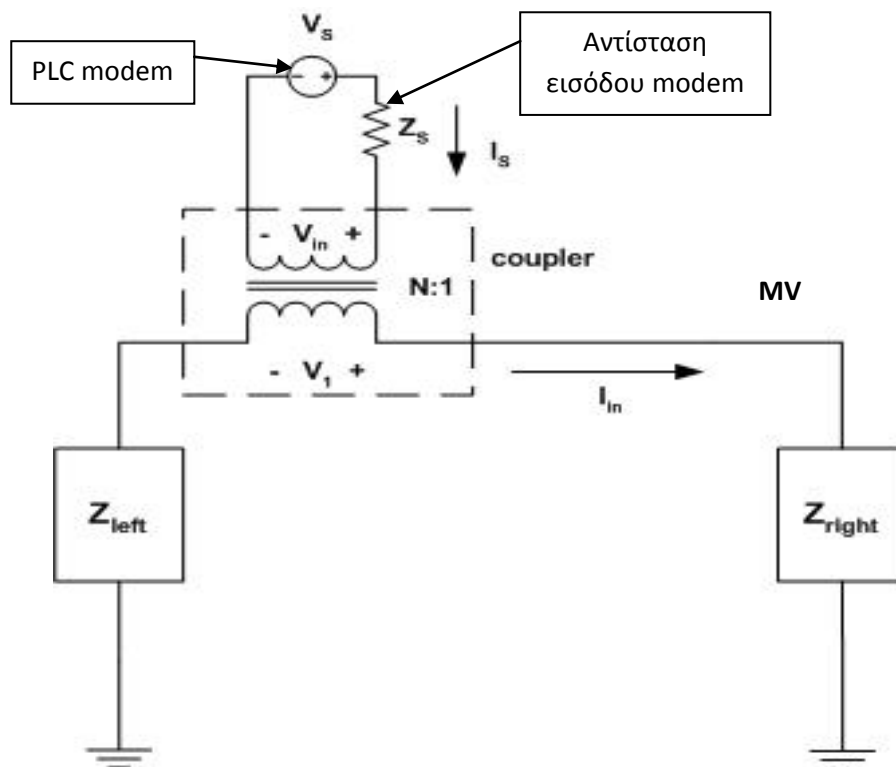
Υπηρεσίες πελατών με χρέωση
Τηλεφωνία μέσω Διαδικτύου (Voice over Internet Protocol - VoIP)
Αυτόματη απεικόνιση (automated monitoring) και έλεγχος εξοπλισμού (control of end-use equipment), συμπεριλαμβανομένης και της αποστολής εντολών
Λογαριασμοί και δεδομένα κατανάλωσης (Billing and energy consumption data)
Παρακολούθηση ασφάλειας σε υποδομές και κτίρια και αναφορά κινήσεων (Real-time security monitoring/reporting)
Αυτόματη ανίχνευση αποθεματικών διαφόρων αγαθών, όπως αποθέματα καυσίμων (Automated tracking of various goods such as fuel stocks)
Δυναμική πληροφόρηση για τιμολόγια (Dynamic price information)
Βίντεο κατόπιν ζήτησης (Video on demand)
Παιχνίδια σε πραγματικό χρόνο (Real-time internet-based games)
Παροχή πενταπλής δυνατότητας με μια σύνδεση, δηλαδή, σταθερή και κινητή τηλεφωνία, ευρυζωνική πρόσβαση στο Διαδίκτυο, τηλεόραση και Ευφυές Δίκτυο (Quintuple game through the power grid)
Φόρτιση ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Κεφάλαιο 3

ΕΓΧΥΣΗ/ΕΞΑΓΩΓΗ PLC ΣΗΜΑΤΩΝ ΣΕ/ΑΠΟ ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΤ

3.1 Κυκλωματικό πρότυπο έγχυσης PLC σήματος μέσω συζεύκτη

Οι συζεύκτες, είτε επαγωγικοί είτε χωρητικοί, πραγματοποιούν την έγχυση και την εξαγωγή του PLC σήματος υπό τη μορφή ρεύματος. Ο επαγωγικός συζεύκτης περιγράφεται στο Σχήμα 3.1 ως ιδανικός μετασχηματιστής N περιστροφών, όπου N το πλήθος των περιελίξεων (windings) περί το φερριτικό πυρήνα (ferrite core). Στο παρόν κεφάλαιο, οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από άλλες ερευνητικές εργασίες έχουν εξαχθεί με χρήση επαγωγικής σύζευξης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα αποτελέσματα θα ήταν διαφορετικά αν είχε χρησιμοποιηθεί χωρητική σύζευξη [13].



Σχήμα 3.1 Απλοποιημένο κυκλωματικό πρότυπο έγχυσης σήματος μέσω επαγωγικού συζεύκτη

Το Σχήμα 3.1 απεικονίζει το απλοποιημένο κυκλωματικό πρότυπο που περιγράφει την έγχυση σήματος PLC μέσω επαγωγικής σύζευξης. Z_{left} και Z_{right} είναι οι σύνθετες αντιστάσεις γραμμής που βλέπει ο συζεύκτης προς τα αριστερά και προς τα δεξιά του σημείου έγχυσης, αντίστοιχα. Επειδή θεωρείται ότι η γραμμή MT είναι προσαρμοσμένη στα άκρα της, ισχύει ότι $Z_{left} = Z_{right} = Z_0$, όπου Z_0 η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής. Χρησιμοποιώντας την ιδανική σχέση που συνδέει την τάση και το ρεύμα ενός μετασχηματιστή, το ρεύμα I_{in} που εγχέεται στη γραμμή προκύπτει

$$I_{in} = \frac{V_S}{N \cdot (Z_{left} + Z_{right}) + \frac{Z_S}{N}} \quad (3.1)$$

Είναι φανερό ότι η ένταση του ρεύματος που εγχέεται στη γραμμή ισχύος του δικτύου εξαρτάται από τις σύνθετες αντιστάσεις της γραμμής μεταφοράς που βλέπει το σημείο έγχυσης. Η κύρια επίπτωση της επαγωγικής σύζευξης είναι ότι η στάθμη του εγχεόμενου PLC σήματος ποικίλλει αντίστοιχα προς τις διαφορετικές συνδεσμολογίες/υλοποιήσεις γραμμών MT (Εναέριο Δίκτυο, Overhead Network ή Υπόγειο Δίκτυο, Underground Network). Για παράδειγμα, στις ΗΠΑ, η χαρακτηριστική αντίσταση Z_0 του υπόγειου καλωδίου είναι περίπου 20Ω, ενώ η χαρακτηριστική αντίσταση του εναέριου καλωδίου είναι περίπου 200Ω. Χρησιμοποιώντας την (3.1), η ισχύς του εγχεόμενου σήματος είναι περίπου 16.5dB υψηλότερη για ένα υπόγειο καλώδιο που είναι προσαρμοσμένο στα άκρα του σε σχέση με ένα αντίστοιχο εναέριο καλώδιο, όταν χρησιμοποιείται ίδιου τύπου συζεύκτης.

3.2 Κυκλωματικό πρότυπο εξαγωγής PLC σήματος μέσω συζεύκτη

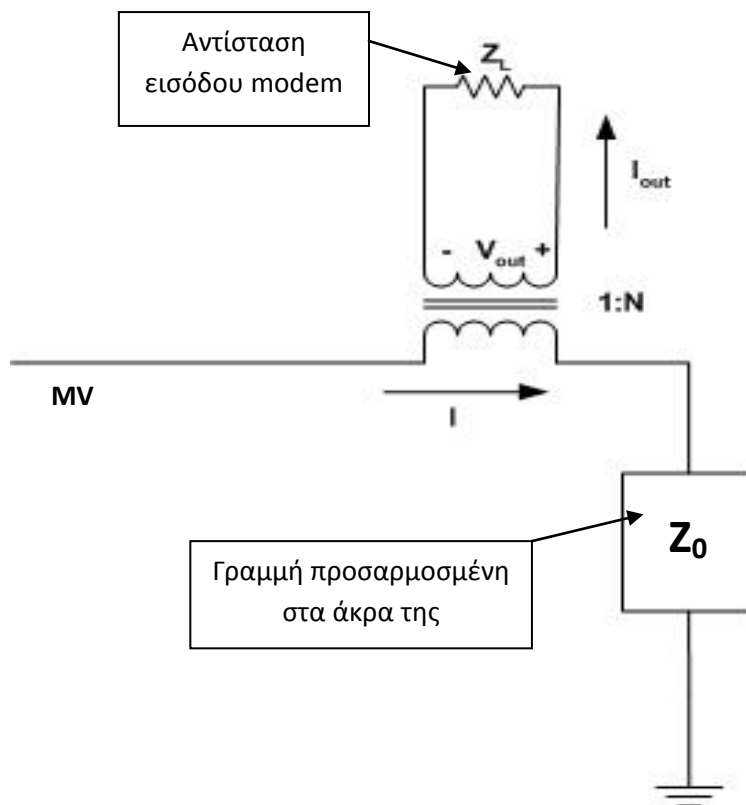
Η διαδικασία εξαγωγής του σήματος μπορεί να περιγραφεί με αντίστοιχο τρόπο όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.2. Ο συζεύκτης που λαμβάνει το σήμα αντιπροσωπεύεται κυκλωματικά ως αισθητήρας ρεύματος (current sensor) [13].

Με βάση το Σχήμα 3.2, η τάση εξόδου V_{out} προκύπτει:

$$V_{out} = \frac{I}{N} \cdot Z_L \quad (3.2)$$

Με βάση τις σχέσεις (3.1) και (3.2), η συνάρτηση μεταφοράς για μια γραμμή ισχύος του δικτύου (power line channel), η οποία ορίζεται ως ο λόγος της τάσης εξαγωγής του PLC σήματος V_{out} προς την τάση έγχυσης του V_S ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους PLC, προκύπτει:

$$\frac{V_{out}}{V_S} = \frac{Z_L}{N^2 \cdot (Z_{left} + Z_{right}) + Z_S} \cdot \frac{I}{I_{in}} \quad (3.3)$$



Σχήμα 3.2 Απλοποιημένο κυκλωματικό πρότυπο εξαγωγής σήματος μέσω επαγωγικού συζεύκτη

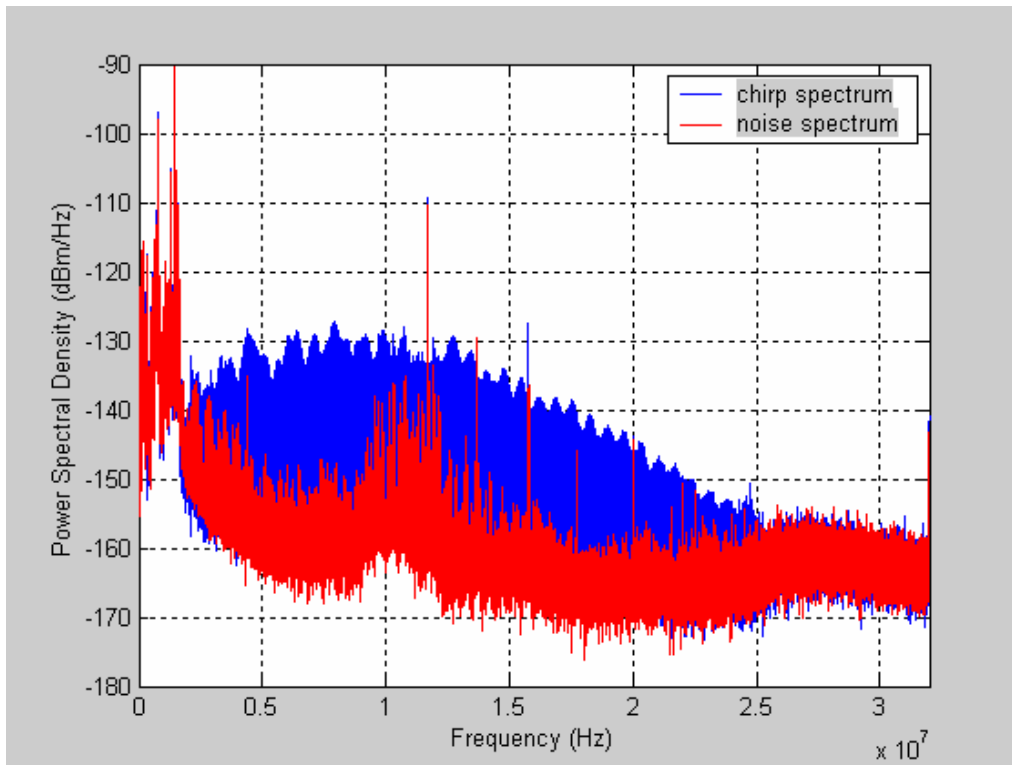
3.3 Περιβάλλον διάδοσης PLC σημάτων – Υπόγεια και Εναέρια Δίκτυα

Οι γραμμές ισχύος ΥΤ μεταφέρουν ΗΕ από τις εγκαταστάσεις παραγωγής στους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ και συνήθως χρησιμοποιούν τάσεις από 60kV έως 1ΜV. Οι γραμμές ισχύος ΜΤ μεταφέρουν ΗΕ από τους υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ στις περιοχές των τελικών χρηστών και χρησιμοποιούν τάσεις από 4kV έως 35kV. Το δίκτυο ισχύος ΜΤ ομοιάζει προς ένα πλέγμα (meshed grid) που καλύπτει μεγάλες περιοχές, π.χ. μια ολόκληρη πόλη. Η ΜΤ μετασχηματίζεται σε ΧΤ, 90V έως 440V, μέσω μετασχηματιστές που βρίσκονται κοντά στους τελικούς χρήστες. Η ΧΤ είναι αυτή που φθάνει στις εγκαταστάσεις των τελικών χρηστών.

Το δίκτυο διανομής ΜΤ αποτελείται κυρίως από εναέριες (Overhead-OH) και υπόγειες (Underground-UG) εγκαταστάσεις. Στις εναέριες εγκαταστάσεις, οι γραμμές ισχύος ΜΤ κρέμονται στον αέρα στηριζόμενες σε ισαπέχοντες στύλους και οι μετασχηματιστές ΜΤ είναι συνήθως εγκατεστημένοι επί των στύλων. Περισσότερο από το 70% των γραμμών ΜΤ στις Η.Π.Α. είναι εγκατεστημένες εναέρια. Κατά την υπόγεια εγκατάσταση ΜΤ, που εμφανίζεται

κυρίως σε αστικές και πρόσφατα οικοδομημένες περιοχές, οι γραμμές ισχύος τοποθετούνται στο υπέδαφος σε βάθος που ποικίλλει από 75cm έως 90cm.

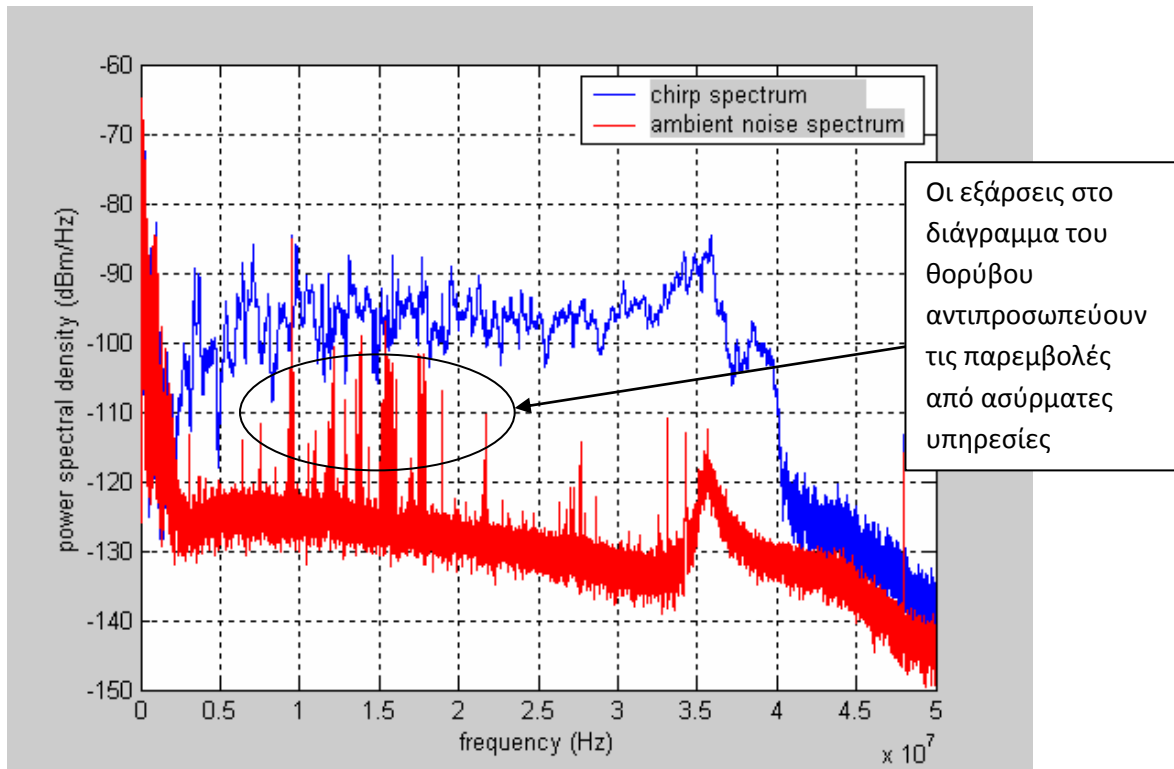
Τα υπόγεια καλώδια των Η.Π.Α. χαρακτηρίζονται από σημαντική εξασθένηση η οποία αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα. Στις υπόγειες εγκαταστάσεις, οι μετασχηματιστές αποτελούν τη σοβαρότερη και σημαντικότερη κατηγορία εμποδίων για το PLC σήμα. Συνήθως, μεταξύ μετασχηματιστών, δεν εμφανίζονται πρόσθετα εμπόδια για την PLC διάδοση. Επίσης, οι υπόγειοι δίαυλοι PLC είναι σχεδόν ανεπηρέαστοι από παρεμβολές από ασύρματες υπηρεσίες. Στο Σχήμα 3.3 απεικονίζονται ενδεικτικά φάσματα σήματος PLC και θορύβου υποβάθρου που μετρήθηκαν σε τμήμα εγκατεστημένου υπόγειου ΗΔ. Είναι φανερό ότι το σήμα εξασθενεί ολοένα και περισσότερο καθώς αυξάνεται η συχνότητα [13].



Σχήμα 3.3 Ενδεικτική φασματική απεικόνιση σήματος και θορύβου σε υπόγειους PLC διαύλους

Το εναέριο καλώδιο χαρακτηρίζεται από μικρότερη εξασθένηση σε σχέση με το υπόγειο καλώδιο. Επίσης, η εξασθένηση του εναέριου καλωδίου έχει μικρή εξάρτηση από τη συχνότητα. Εντούτοις, οι εναέριες PLC εγκαταστάσεις χαρακτηρίζονται από πολύ περισσότερα εμπόδια διάδοσης, όπως είναι οι ανορθωτές (risers) και οι πηγές τροφοδότησης (feeder taps).

Επίσης, οι παρεμβολές από ασύρματες υπηρεσίες επηρεάζουν πολύ δυσμενώς την επίδοση της PLC μετάδοσης σε εναέριους διαύλους. Στο Σχήμα 3.4 απεικονίζονται ενδεικτικά φάσματα σήματος και θορύβου υποβάθρου που μετρήθηκαν σε τμήμα εγκατεστημένου εναέριου ΗΔ. Είναι φανερό ότι οι συχνότητες από 9MHz έως 18 MHz επηρεάζονται σοβαρά από πολλαπλές παρεμβολές στενής ζώνης (narrowband interferences). Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό στοιχείο του εναέριου δικτύου MT είναι ότι οι φάσεις του αντιμετωπίζουν συνήθως διαφορετικό πλήθος και είδος εμποδίων. Επομένως, είναι σημαντικό κατά τη σχεδίαση εναέριων PLC δικτύων να χρησιμοποιείται η φάση που εμφανίζει τα λιγότερο δυσμενή εμπόδια.



Σχήμα 3.4 Ενδεικτική φασματική απεικόνιση σήματος και θορύβου σε εναέριους PLC διαύλους

Επί των γραμμών ισχύος συναντώνται πολλά εμπόδια που δυσχεραίνουν τη μετάδοση των σημάτων PLC. Μερικά από αυτά είναι: μετασχηματιστές (transformers), διαχωριστές ισχύος (split feeders), ανορθωτές τάσης (risers), συστοιχίες πυκνωτών (capacitor banks), φυσικά ανοικτοκυκλώματα (normally-open points) [13].

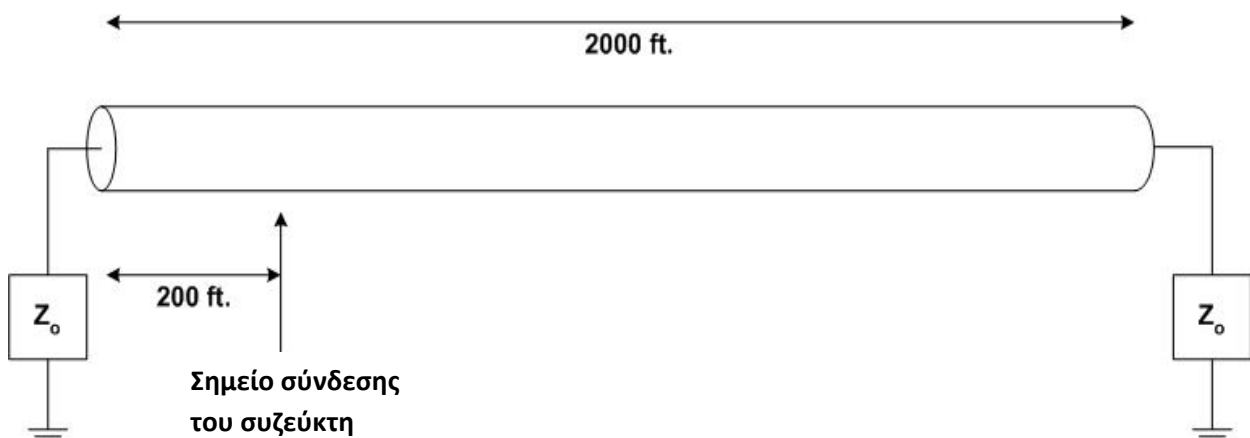
Τα εμπόδια αυτά επηρεάζουν τη διάδοση των σημάτων PLC κατά δύο τρόπους:

1. Το σήμα εξασθενεί καθώς μεταδίδεται μέσω των εμποδίων αυτών. Επειδή το PLC σήμα εγχέεται υπό τη μορφή ρεύματος, οποιοδήποτε εμπόδιο βρίσκεται στη διαδρομή του συμπεριφέρεται ως διαιρέτης ρεύματος μειώνοντας την έντασή του.

2. Τα εμπόδια αυτά προκαλούν ανακλάσεις των σημάτων PLC λόγω έλλειψης προσαρμογής (impedance mismatches). Ανάλογα με τη συχνότητα και την απόσταση των ανακλάσεων, οι ανακλάσεις αυτές προκαλούν το φαινόμενο της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) και μπορεί να είναι επικοδομητικές ή καταστροφικές για τα σήματα PLC.

Η συνάρτηση μεταφοράς που προκύπτει, η οποία ορίζεται ως ο λόγος της τάσης εξαγωγής του PLC σήματος προς την τάση έγχυσής του ανάμεσα σε δύο γειτονικούς κόμβους PLC, εμφανίζει κυμάτωση ως προς το μέτρο της. Αυτό σημαίνει ότι ακόμα και εμπόδια που δεν βρίσκονται στη διαδρομή του PLC σήματος μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοσή του λόγω ανακλάσεων. Ως εκ τούτου, η συνολική εξασθένηση που εμφανίζει μία από-άκρο-σε-άκρο μετάδοση PLC σήματος προκύπτει ως υπέρθεση της εξασθένησης λόγω απόστασης ή παρεμβολής εμποδίων και των διαφόρων ανακλάσεων.

3.4 Σύνδεση του συζεύκτη στις γραμμές ισχύος



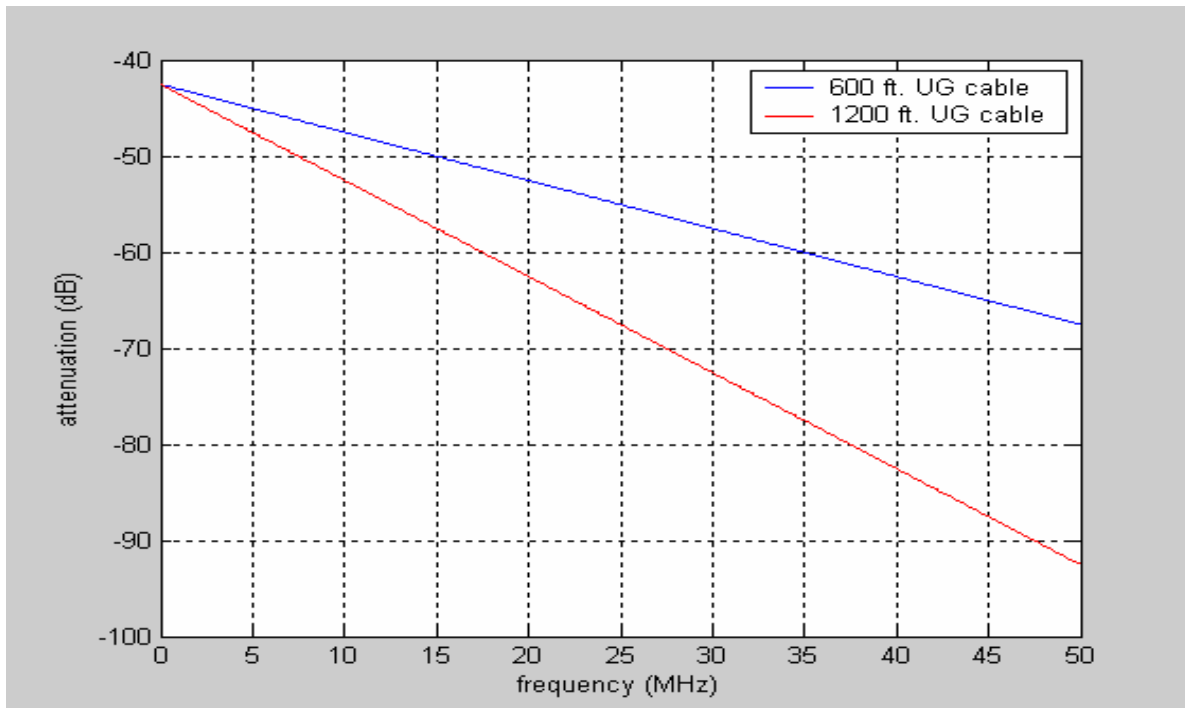
Σχήμα 3.5 Κυκλωματικό πρότυπο ιδανικά τερματισμένης υπόγειας γραμμής μεταφοράς

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζεται το κυκλωματικό πρότυπο ιδανικά τερματισμένης υπόγειας γραμμής μεταφοράς. Ένα τμήμα υπόγειου καλωδίου μήκους 2000ft τερματίζεται στην χαρακτηριστική αντίστασή του Z_0 και στα δύο άκρα του. Το PLC σήμα εγχέεται σε απόσταση 200ft από το αριστερό σημείο τερματισμού.

Στο Σχήμα 3.6 απεικονίζεται η εξασθένηση δύο τμημάτων υπόγειων καλωδίων προσαρμοσμένων στα άκρα τους, 600ft και 1200ft έκαστο, χρησιμοποιώντας ίδιου τύπου συζεύκτη. Οι αντιστάσεις της πηγής έγχυσης του σήματος και του φορτίου για την εξαγωγή του σήματος που χρησιμοποιήθηκαν στη συγκεκριμένη μέτρηση θεωρούνται και οι δύο 100Ω. Επιπλέον, στο διάγραμμα συμπεριλαμβάνονται και οι απώλειες που επιφέρει ο συζεύκτης (coupler loss).

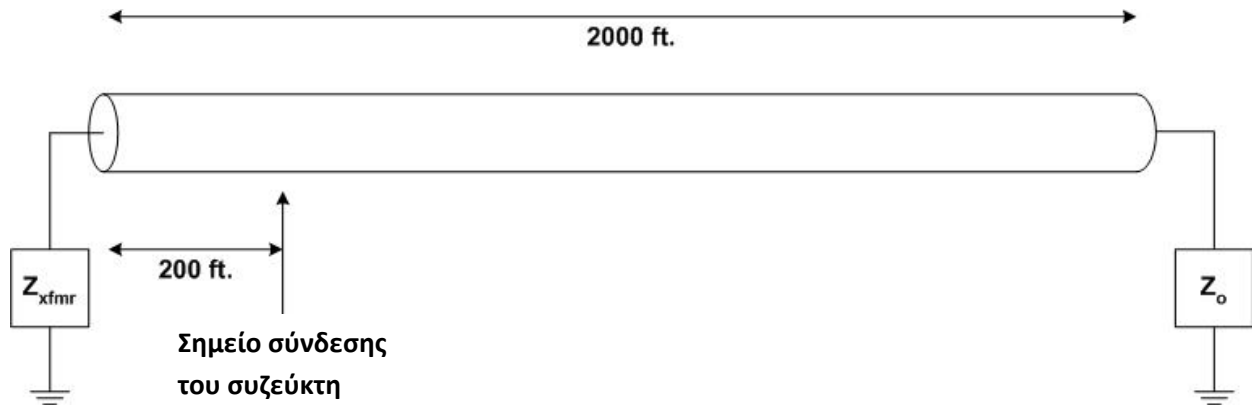
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η εξασθένηση του σήματος στα υπόγεια καλώδια αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα. Από το Σχήμα 3.6, εξάγεται η απλή και εμπειρική σχέση (3.4) (rule of thumb) που αφορά την ιδανική εξασθένηση PLC σήματος σε υπόγεια καλώδια (UG cable attenuation) [13].

$$UG \text{ cable attenuation}(dB) = \frac{frequency}{20MHz} \cdot \frac{distance}{600ft} \cdot 10 \quad (3.4)$$



Σχήμα 3.6 Εξασθένηση δύο ιδανικά τερματισμένων υπόγειων αγωγών

Στη συνέχεια, ο ιδανικός τερματισμός στο αριστερό άκρο αντικαθίσταται από ένα μετασχηματιστή (transformer), όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.7. Ο μετασχηματιστής περιγράφεται κυκλωματικά ως σύνθετη αντίσταση Z_{xfmr} που αντιπροσωπεύει αυτή που έχει ένας πραγματικός μετασχηματιστής για υπόγεια ΗΔ (UG transformer).



Σχήμα 3.7 Κυκλωματικό πρότυπο μίας υπόγεια γραμμής μεταφοράς που τερματίζει σε μετασχηματιστή στο ένα άκρο της

Στο Σχήμα 3.8 απεικονίζεται η σύγκριση μεταξύ των εξασθενίσεων δύο υπόγειων καλωδίων μήκους 600ft, όπου το ένα καλώδιο (μπλε καμπύλη) είναι ιδανικά τερματισμένο, ενώ το άλλο (κόκκινη καμπύλη) είναι τερματισμένο στο ένα άκρο του σε μετασχηματιστή. Από το Σχήμα 3.8, φαίνεται ότι η εξασθένιση του καλωδίου που είναι τερματισμένο σε μετασχηματιστή εμφανίζει περιοδικούς κυματισμούς οι οποίοι προκαλούνται από την έλλειψη προσαρμογής (impedance mismatch) στο ένα σημείο τερματισμού. Αυτή προκαλεί ανακλάσεις στις οποίες οφείλονται οι κυματισμοί που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.8, αυξάνοντας ή μειώνοντας την ισχύ του PLC σήματος, κατά τρόπο που εξαρτάται από τη συχνότητα.

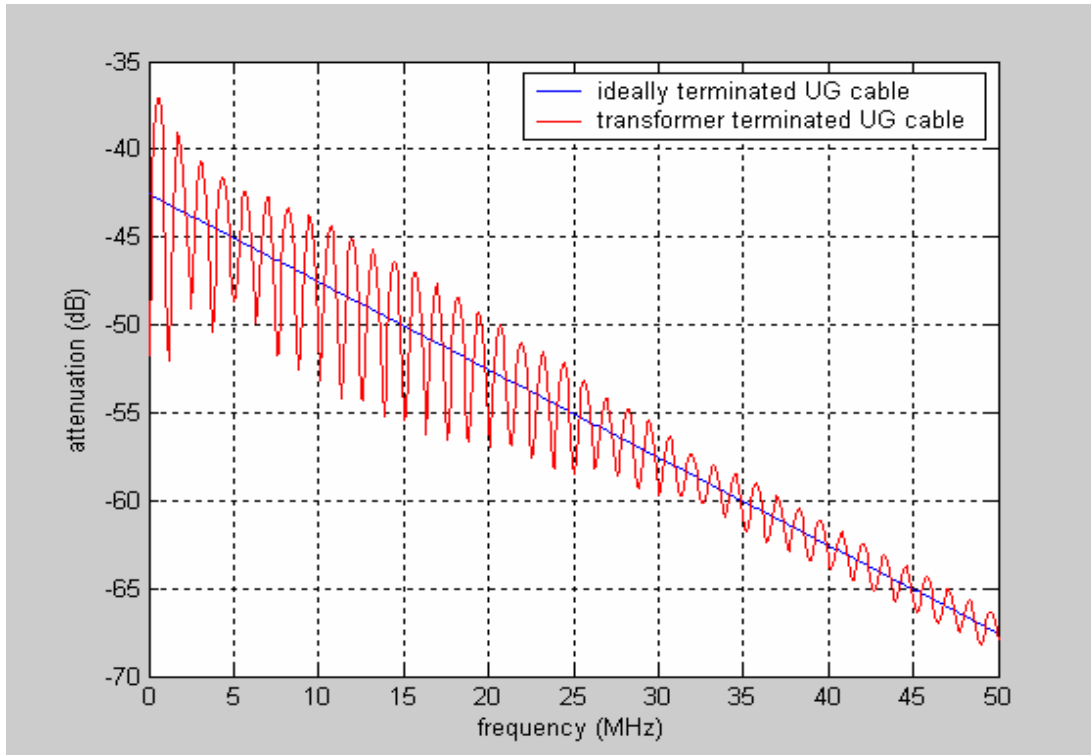
Οι κυματισμοί που προκαλούνται από ισχυρή ανάκλαση μπορούν εύκολα να μειωθούν αν προσδιοριστεί ποια είναι και πού βρίσκεται η πηγή της αναντιστοιχίας (mismatch source). Για παράδειγμα, στο Σχήμα 3.7, η έλλειψη προσαρμογής προκαλείται σε απόσταση 200ft αριστερά από το σημείο σύνδεσης του συζεύκτη. Άρα, το ανακλώμενο σήμα που προκαλείται έχει διαφορά διαδρομής 400ft (περίπου 121.9m) από το κύριο σήμα. Το μήκος κύματος (wavelength) στα υπόγεια καλώδια προκύπτει:

$$\lambda = \frac{v}{f} \rightarrow \lambda = \frac{c/n}{f} \rightarrow \lambda = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cdot f} \rightarrow \lambda = \frac{0.51 \cdot c}{f} \quad (3.5)$$

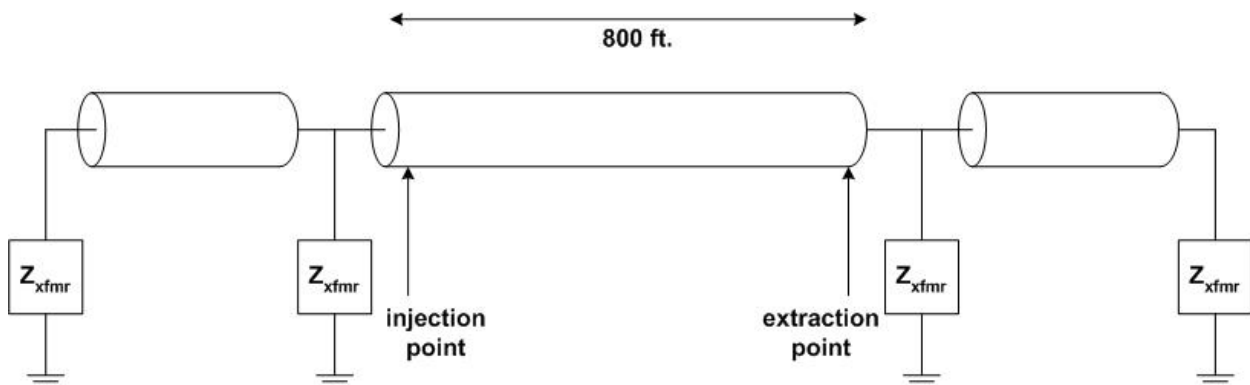
όπου $v = \frac{c}{n}$ η ταχύτητα του σήματος στο υπόγειο καλώδιο, $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ για το συγκεκριμένο μέσο διάδοσης (υπόγειο καλώδιο ΗΔ), ϵ_r η διηλεκτρική σταθερά και μ_r η μαγνητική διαπερατότητα του υπόγειου καλωδίου

Αν στην (3.5) θέσουμε όπου λ τη διαφορά διαδρομής του ανακλώμενου από το κύριο σήμα, τότε η f που θα προκύψει θα υποδεικνύει τη διαφορά συχνότητας δύο διαδοχικών/γειτονικών κυματισμών του Σχήματος 3.8.

Λύνοντας την (3.5) για $\lambda = 121.9m$ και $c = 3 \cdot 10^8 m/s$, προκύπτει ότι $f \approx 1.25MHz$. Ένας γενικός κανόνας που μπορεί να εξαχθεί, όπως φαίνεται και από την (3.5), είναι ότι η διαφορά συχνότητας μεταξύ διαδοχικών κυματισμών αυξάνεται όσο μειώνεται η διαφορά διαδρομής του ανακλώμενου σήματος από το κύριο.



Σχήμα 3.8 Σύγκριση εξασθενίσεων ενός υπόγειου αγωγού που τερματίζει ιδανικά και ενός που τερματίζει σε μετασχηματιστή στο ένα άκρο του

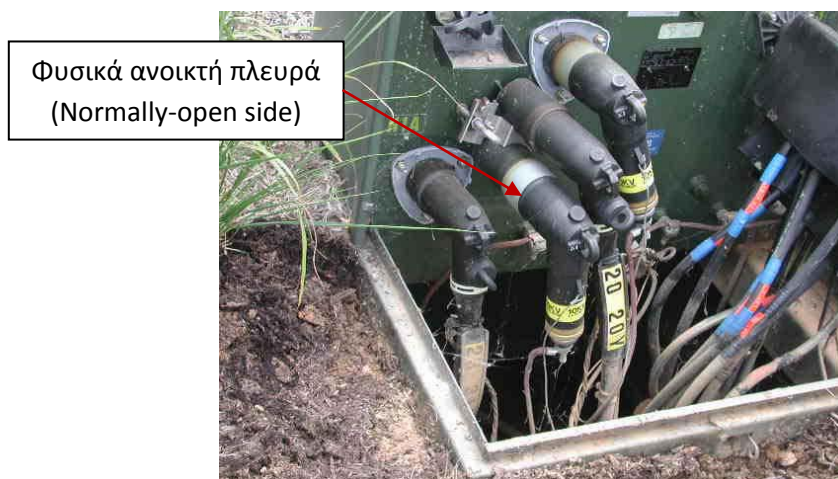


Σχήμα 3.9 Έγχυση και εξαγωγή σήματος σε/από συνήθη υπόγεια εγκατάσταση ΗΔ

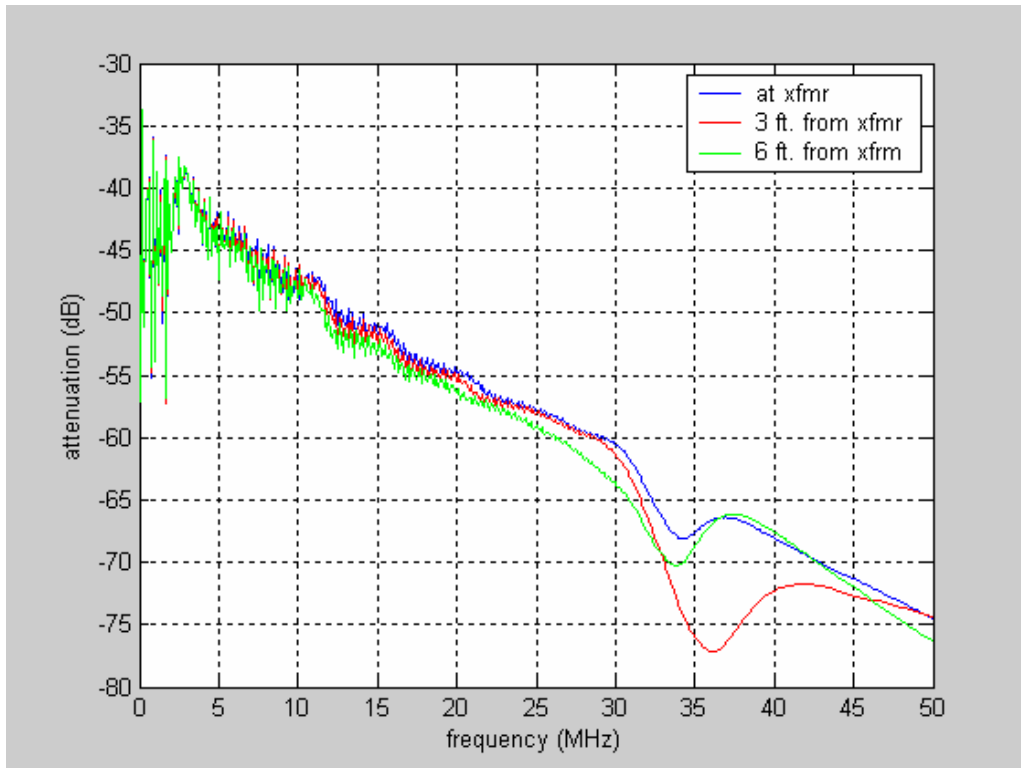
Στο Σχήμα 3.9 απεικονίζεται ένα τμήμα από μια συνήθη υπόγεια εγκατάσταση ΗΔ. Οι συζεύκτες τοποθετούνται, συνήθως, πολύ κοντά στους μετασχηματιστές. Αυτό σημαίνει ότι θα κυριαρχήσουν οι κοντινές ανακλάσεις (short reflections) ενώ οι μακρινές ανακλάσεις (long reflections) θα είναι αμελητέες λόγω της φυσικής εξασθένησης του καλωδίου. Στο Σχήμα 3.11 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της εγκατάστασης του Σχήματος 3.9. Το σημείο έγχυσης απέχει 3ft από το μετασχηματιστή ενώ το σημείο εξαγωγής είναι μεταβλητό. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η εξασθένηση του σήματος δεν επηρεάζεται σημαντικά από την απόσταση του σημείου εξαγωγής από το μετασχηματιστή όταν τα άκρα του είναι τερματισμένα.

Στα υπόγεια ΗΔ, όταν ένα άκρο του μετασχηματιστή δεν τερματιστεί και παραμείνει φυσικά-ανοικτό τότε δημιουργείται ένα φυσικό ανοικτοκύκλωμα (normally-open point) στη φυσικά-ανοικτή πλευρά (του ατερμάτιστου δακτυλίου) του μετασχηματιστή. Στο Σχήμα 3.10 απεικονίζεται ένας φυσικά-ανοικτοκυκλωμένος μετασχηματιστής υπόγειου ΗΔ. Η φυσικά-ανοικτή πλευρά του καλωδίου δεν είναι συνδεδεμένη με το μετασχηματιστή, δημιουργώντας ένα ανοικτοκύκλωμα (open circuit). Τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στο Σχήμα 3.12 έχουν εξαχθεί αφαιρώντας το καλώδιο τερματισμού (cable termination) της δεξιάς πλευράς του Σχήματος 3.9, ώστε να δημιουργηθεί ένας ανοικτοκυκλωμένος μετασχηματιστής [13].

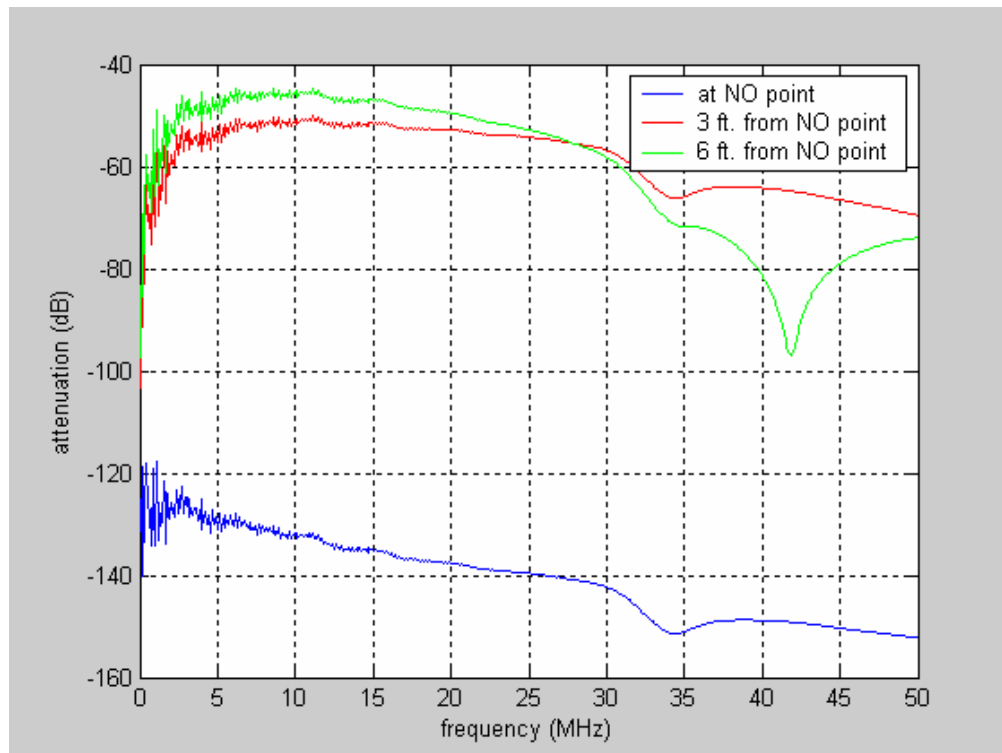
Αξίζει να παρατηρήσει κανείς ότι η εξασθένηση είναι πολύ ευαίσθητη ως προς το σημείο όπου τοποθετείται ο συζεύκτης. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η τοποθέτηση συζευκτών μακριά από τα φυσικά σημεία ανοικτοκύκλωσης (normally-open points) βελτιώνει τη μετάδοση του σήματος. Ωστόσο, η εγκατάσταση συζευκτών σε υπόγειο ΗΔ περιορίζεται από τον επιτρεπόμενο χώρο σε κάθε μετασχηματιστή, κάτι το οποίο δεν επιτρέπει την τοποθέτηση του πρώτου στην επιθυμητή απόσταση από το δεύτερο. Άλλωστε, η δομή του υπόγειου ΗΔ δεν επιτρέπει τη σύνδεση συζευκτών σε οποιοδήποτε σημείο μίας υπόγειας γραμμής, παρά μόνο στα σημεία όπου η γραμμή έρχεται στην επιφάνεια.



Σχήμα 3.10 Φυσικά-ανοικτοκυκλωμένος (normally-open) μετασχηματιστής υπόγειου ΗΔ



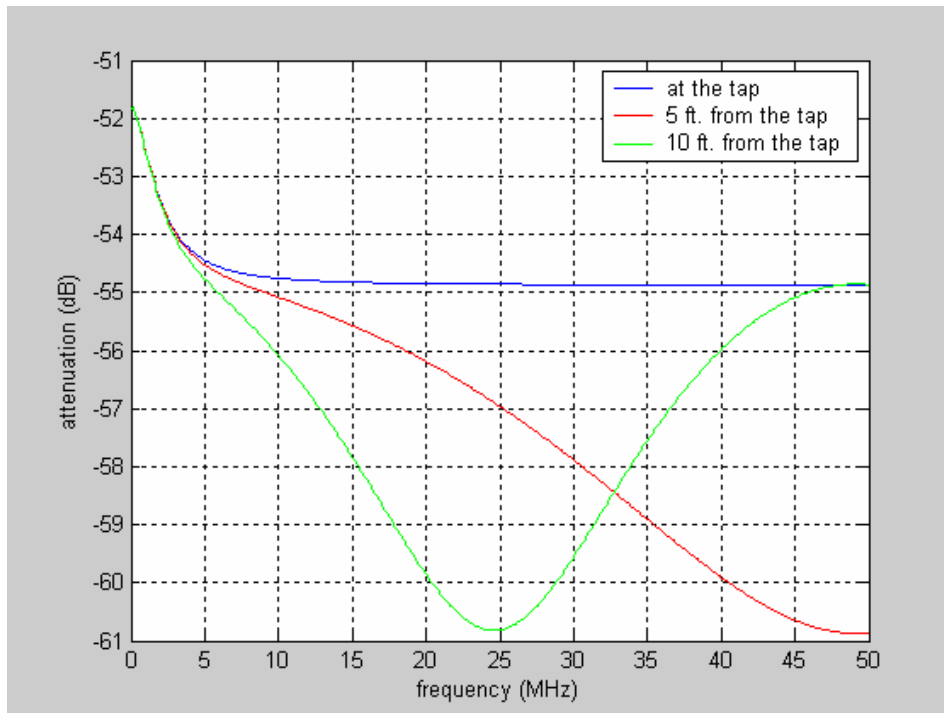
Σχήμα 3.11 Επίδραση του σημείου εξαγωγής σε διάφορες αποστάσεις από μετασχηματιστή υπόγειου ΗΔ



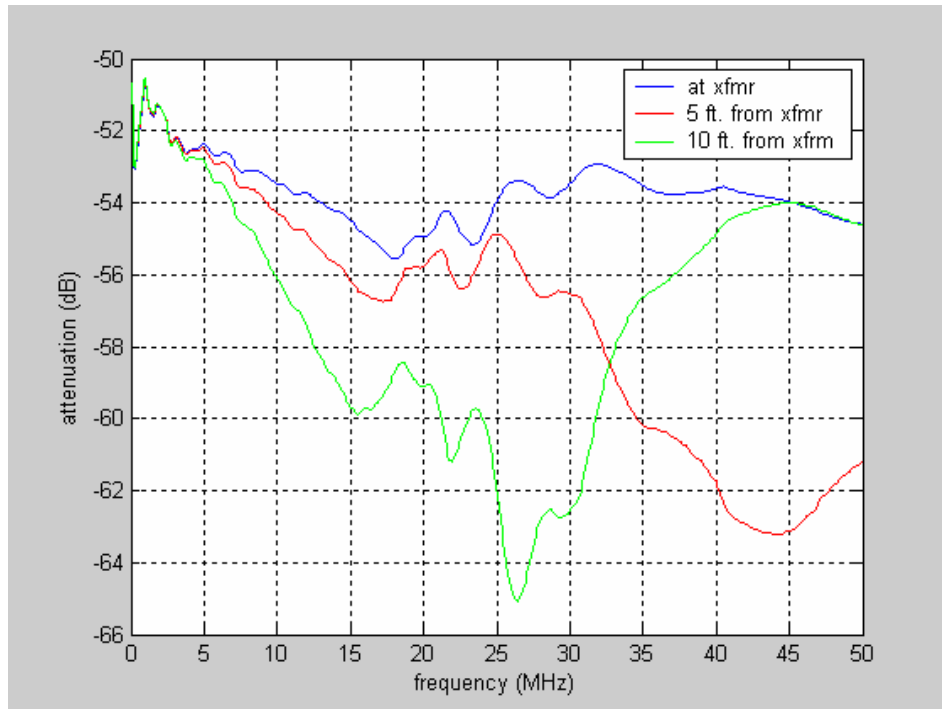
Σχήμα 3.12 Επίδραση της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από φυσικά ανοικτοκυκλώματα

Αντίθετα με τα υπόγεια ΗΔ, τα εναέρια δίκτυα προσφέρουν μεγαλύτερη ελευθερία και ευελιξία στην τοποθέτηση και εγκατάσταση συζευκτών. Στις περισσότερες περιπτώσεις, οι συζεύκτες τοποθετούνται έτσι ώστε να παρακάμπτονται διάφορα εμπόδια, κυρίως όταν οι συζεύκτες λειτουργούν ως επαναλήπτες (repeaters). Στα Σχήματα 3.13 και 3.14 απεικονίζονται τα αποτελέσματα εγκατάστασης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από συνδέσεις πηγών τροφοδότησης (feeder taps) και μετασχηματιστές, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα, απεικονίζεται η εξασθένηση του σήματος ως συνάρτηση της συχνότητας, όταν ο συζεύκτης τοποθετηθεί σε απόσταση 0ft, 5ft και 10ft από τα προαναφερθέντα εμπόδια. Τα αποτελέσματα αυτά εξάγονται από την έγχυση του PLC σήματος σε διάφορα σημεία της εναέριας γραμμής ισχύος και παρόμοια αποτελέσματα αναμένεται να εξαχθούν αλλάζοντας το σημείο εξαγωγής του σήματος, αντί για το σημείο έγχυσης [13].

Είναι φανερό ότι η τοποθέτηση του συζεύκτη επηρεάζει σημαντικά/σε μεγάλο βαθμό τη μετάδοση του σήματος και στις εναέριας γραμμές ισχύος. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι το PLC σήμα πρέπει να εγχέεται και να εξάγεται πολύ κοντά στο εμπόδιο προς παράκαμψη έτσι ώστε να έχουμε τη βέλτιστη δυνατή μετάδοση του σήματος.



Σχήμα 3.13 Αποτελέσματα της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από τριφασική πηγή (three phase tap)



Σχήμα 3.14 Αποτελέσματα της σύνδεσης συζευκτών σε διάφορες αποστάσεις από τριφασικό μετασχηματιστή

Κεφάλαιο 4

ΣΥΖΕΥΚΤΕΣ – COUPLERS

Μία γραμμή ισχύος MT που δρα και ως δίαυλος σημάτων PLC διαρρέεται από δύο είδη ρευμάτων:

- Το χαμηλής συχνότητας (50 ή 60Hz) και υψηλής έντασης ρεύμα ισχύος
- Το υψίσυχο ρεύμα χαμηλής έντασης, που μεταφέρει το PLC σήμα και είναι είτε της τάξης των kHz (NB-PLC) είτε της τάξης των MHz (BPL ή BB-PLC).

Οι συζεύκτες πραγματοποιούν την έγχυση του PLC σήματος στις γραμμές ισχύος καθώς και την εξαγωγή του από αυτές [6]. Οι βασικές απαιτήσεις για τη σχεδίαση ενός συζεύκτη είναι οι εξής:

- Δεν πρέπει να επηρεάζουν την λειτουργία του ΗΔ και τη μεταφορά ισχύος
- Πρέπει να προστατεύουν τις ηλεκτρονικές διατάξεις και το modem – που λειτουργούν υπό χαμηλή τάση – από την υψηλή τάση και το υψηλό ρεύμα του ΗΔ.
- Πρέπει να μπορούν να ανταπεξέλθουν στις σκληρές ηλεκτρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες του ΗΔ, π.χ. τους κεραυνούς όσον αφορά τα εναέρια ΗΔ.
- Πρέπει να έχουν χαμηλό κόστος κατασκευής, να είναι μηχανικά συμπαγείς και ανθεκτικοί και να έχουν εύκολη διαχείριση.

Οι συζεύκτες διακρίνονται σε χωρητικούς και επαγωγικούς.

4.1 Χωρητικοί Συζεύκτες

Στους χωρητικούς συζεύκτες η σύζευξη του σήματος γίνεται κατά χωρητικό τρόπο, με τη βοήθεια δηλαδή μιας πυκνωτικής διάταξης. Συγκεκριμένα, παρεμβάλλοντας κατάλληλο πυκνωτή ανάμεσα στη γραμμή ισχύος και το modem, το χαμηλής συχνότητας ρεύμα ισχύος εξασθενεί σημαντικά ενώ το υψίσυχο PLC σήμα παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστο. Η επιλογή πυκνωτή για ένα χωρητικό συζεύκτη εγκατεστημένο επί γραμμής MT δεν είναι απλή διαδικασία. Συνήθως, χρησιμοποιούνται κεραμικοί πυκνωτές (ceramic capacitors), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, λόγω της αντοχής τους σε πολύ υψηλές τάσεις, της τάξης των kV.

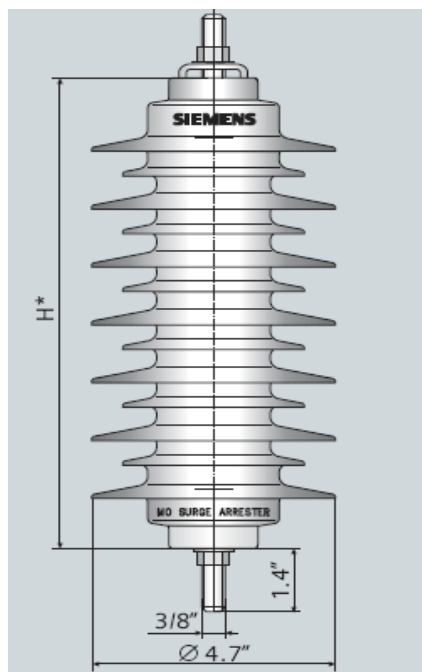


Σχήμα 4.1 Κεραμικός πυκνωτής που μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε PLC εφαρμογές

Μία άλλη διάταξη που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως πυκνωτής είναι ο lightning arrester ή MOV ARRESTER (Metal-Oxide Varistor). Ένα παράδειγμα MOV ARRESTER φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Οι ARRESTERS λειτουργούν ως δίοδοι οι οποίες βραχυκυκλώνουν όταν στα άκρα τους εφαρμοσθεί τάση μεγαλύτερη από συγκεκριμένη τιμή αποκοπής, οι τιμές της οποίας είναι συνήθως πολύ μεγάλες, της τάξης των kV. Οι ARRESTERS εγκαθίστανται συνήθως παράλληλα προς το υπόλοιπο κύκλωμα με το ένα άκρο τους συνδεδεμένο με τη γη. Έτσι, όταν υπάρξει κεραυνοπληξία, ο ARRESTER βραχυκυκλώνει και το ρεύμα οδεύει προς τη γη, χωρίς να διέλθει μέσα από το κύκλωμα και το επηρεάσει. Στην περίπτωση του χωρητικού συζεύκτη, ο ARRESTER τοποθετείται σε σειρά με το υπόλοιπο κύκλωμα, απομονώνοντας έτσι τη συνδεσμολογία του συζεύκτη από τη γραμμή ΜΤ, λειτουργώντας παράλληλα ως πυκνωτής αφού επηρεάζει σε σχετικά μικρό βαθμό τα RF σήματα.

Δύο είναι τα κύρια πλεονεκτήματα των ARRESTER έναντι άλλων διατάξεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως πυκνωτές σε ένα χωρητικό συζεύκτη:

- Πρώτον, ο ARRESTER χρησιμοποιείται κατά κόρον και η ασφάλεια και η λειτουργικότητά του έχουν αποδειχθεί με την πάροδο του χρόνου.
- Δεύτερον, οι ARRESTERS είναι σημαντικά φθηνότεροι από άλλες αντίστοιχες συσκευές.

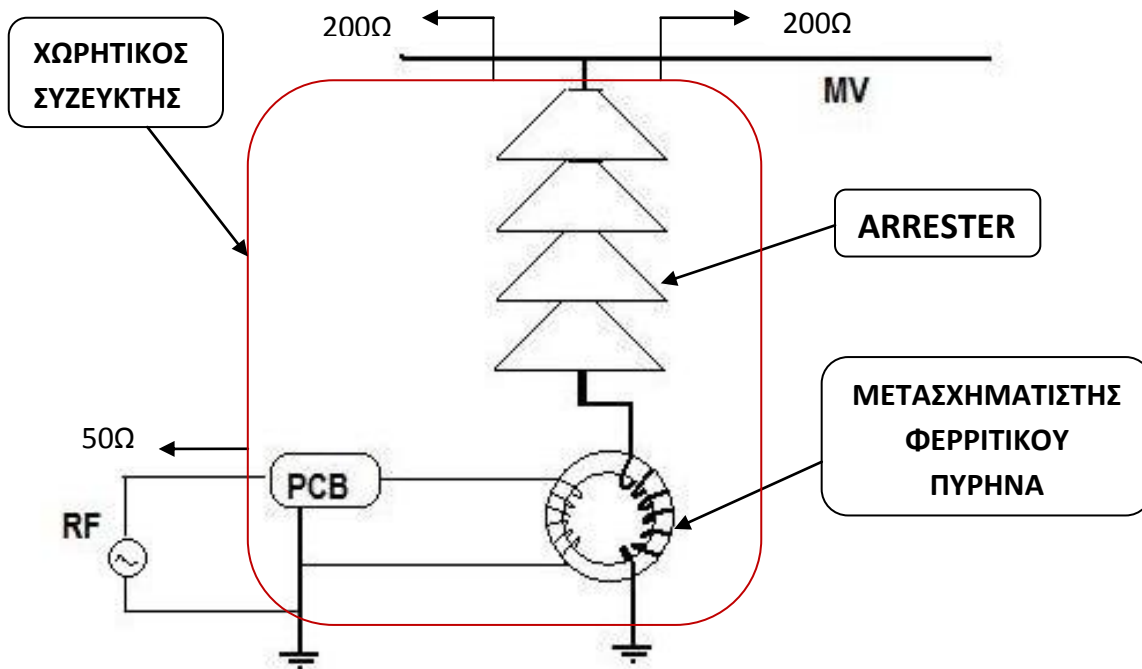


Σχήμα 4.2 Παράδειγμα ARRESTER – Siemens MOV 3EK7 – 24kV

Εντούτοις, ο χωρητικός συζεύκτης δεν είναι ένας απλός πυκνωτής, αφού υπάρχουν και άλλα στοιχεία που πρέπει να ληφθούν υπόψη [6]. Εκτός από την πυκνωτική διάταξη, ο χωρητικός συζεύκτης περιλαμβάνει και μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Είναι φανερό ότι το ένα άκρο του πυκνωτή (MOV ARRESTER) συνδέεται στη ΜΤ, ενώ το άλλο άκρο είναι ενωμένο με ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή. Καθοριστικής σημασίας είναι η επιλογή φερριτικού πυρήνα του μετασχηματιστή, δηλαδή το μείγμα υλικών από τα οποία είναι κατασκευασμένος ο πυρήνας, το σχήμα του και οι διαστάσεις του. Ο φερριτικός πυρήνας είναι ίσως το σημαντικότερο στοιχείο ενός συζεύκτη λόγω της τριπλής λειτουργίας του. Συγκεκριμένα, ο φερριτικός πυρήνας λειτουργεί:

- Ως μετασχηματιστής: Η εναέρια γραμμή ισχύος έχει χαρακτηριστική αντίσταση περίπου 200Ω. Αν ο χωρητικός συζεύκτης τοποθετηθεί περίπου στο μέσο ενός τμήματος μίας εναέριας γραμμής (Σχήμα 4.3), η οποία είναι προσαρμοσμένη στα άκρα της, ο συζεύκτης «βλέπει» τον παράλληλο συνδυασμό δύο αντιστάσεων 200Ω περίπου από το ένα άκρο του, δηλαδή 100Ω. Στο άλλο άκρο του συζεύκτη βρίσκεται το ομοαξονικό καλώδιο που οδηγεί στο modem, το οποίο ισοδυναμεί με αντίσταση περίπου ίση προς 50Ω. Αν και τα μεγέθη που αναφέρονται είναι ενδεικτικά, εντούτοις αναδεικνύουν την ανάγκη προσαρμογής για μέγιστη μεταφορά ισχύος μεταξύ modem και γραμμής ΜΤ. Για την προσαρμογή, σημαντικός είναι ο ρόλος της διάταξης PCB (Printed Circuit Board), για την οποία θα γίνει εκτενής αναφορά στη συνέχεια.

- Ως ζωνοπερατό φίλτρο: Η πυκνωτική διάταξη εξασθενεί δραστικά το χαμηλής συχνότητας ρεύμα ισχύος. Ο φερριτικός πυρήνας εξασθενεί περαιτέρω το χαμηλόσυχο ρεύμα ισχύος, ενώ επιτρέπει τη διέλευση μονό των επιθυμητών ζωνών συχνοτήτων. Η λειτουργία αυτή εξαρτάται από την επιλογή του υλικού, των διαστάσεων και του σχήματος του πυρήνα.



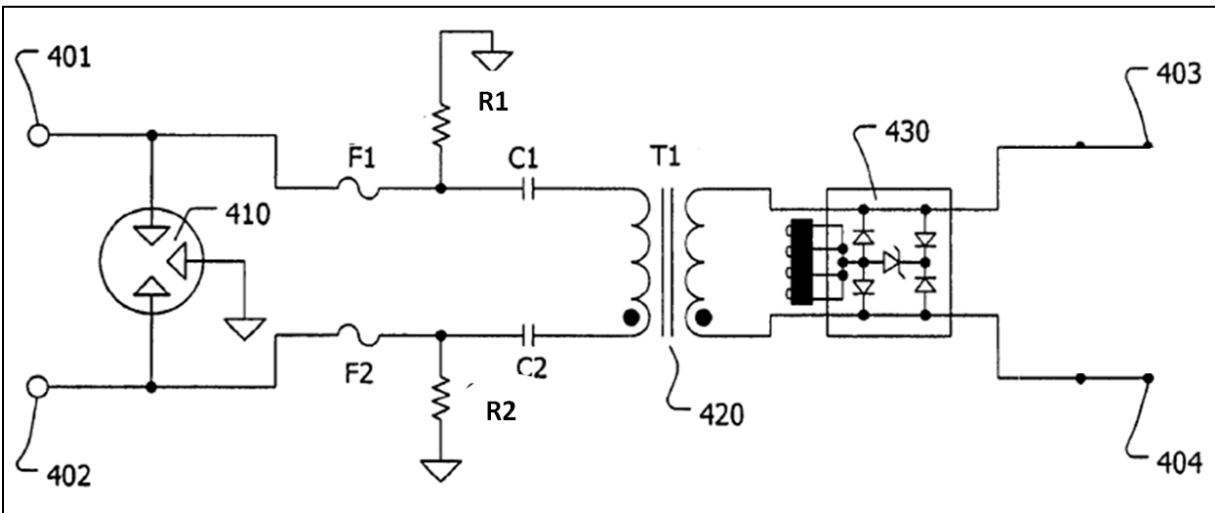
Σχήμα 4.3 Απλοποιημένο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη

- Ως ασφάλεια για όλη τη διάταξη: Η ασφάλεια είναι ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο χρησιμοποιείται ο φερριτικός πυρήνας σε ένα χωρητικό συζεύκτη. Αν για κάποιο λόγο βραχυκυκλωθεί η πυκνωτική διάταξη – λόγω κεραυνοπληξίας ή κάποιου άλλου σφάλματος –, το modem και όλος ο συζεύκτης συνδέονται προς τη γραμμή ΜΤ, που είναι της τάξης των kV. Με τη διάταξη του Σχήματος 4.3 και την κατάλληλη επιλογή φερριτικού πυρήνα, το modem απομονώνεται πλήρως από τη ΜΤ. Συγκεκριμένα, όταν ο πυκνωτής βραχυκυκλωθεί, το καλώδιο, που είναι συνδεδεμένο από τη μία πλευρά με τον πυκνωτή και από την άλλη με τη γη, θα διαρρέεται από το ρεύμα ισχύος. Το καλώδιο αυτό πρέπει να είναι μεγάλου πάχους ώστε να μην καταστραφεί. Άρα, ο πυρήνας πρέπει να είναι αρκετά μεγάλος ώστε να μην υπάρξει επαφή των περιελίξεων του καλωδίου με οποιοδήποτε στοιχείο της συνδεσμολογίας του συζεύκτη. Το άλλο καλώδιο δεν είναι απαραίτητο να είναι τόσο παχύ, αφού δεν διαρρέεται από ρεύμα υψηλής έντασης. Ο πυρήνας, όταν το μεγάλου πάχους καλώδιο διαρρέεται από ρεύμα

ισχύος, έρχεται σε κορεσμό και δεν επιτρέπει τη διέλευση ισχύος στην άλλη πλευρά της διάταξης. Εντούτοις, επειδή στην πράξη ο κορεσμός του πυρήνα δεν επέρχεται ακαριαία, στο PCB υπάρχουν συλλέκτες σπινθηριστών (spark arresters), πυκνωτές και μετασχηματιστές που εμποδίζουν ο,τιδήποτε μπορεί να αποβεί καταστροφικό για το υπόλοιπο κύκλωμα.

Το τελευταίο βασικό στοιχείο από το οποίο αποτελείται ένας χωρητικός συζεύκτης είναι το PCB, το οποίο περιέχει ένα μετασχηματιστή balun (BALanced UNbalanced), πυκνωτές, αντιστάσεις, ασφάλειες και κάποιες άλλες ηλεκτρονικές διατάξεις για την ηλεκτρική προστασία του κυκλώματος. Συγκεκριμένα: ο μετασχηματιστής balun αποσκοπεί στη βέλτιστη δυνατή προσαρμογή των αντιστάσεων – από τη μία πλευρά είναι η αντίσταση του modem και από την άλλη πλευρά είναι η συνολική αντίσταση της διάταξης του χωρητικού συζεύκτη και η αντίσταση της γραμμής MT – και στη δημιουργία ενός ισορροπημένου διαφορικού RF σήματος για το modem, οι πυκνωτές στην περαιτέρω εξασθένηση του χαμηλής συχνότητας ρεύματος ισχύος και οι ασφάλειες στην προστασία της συνδεσμολογίας από ενδεχόμενα υψηλά ρεύματα ή σπινθηρισμούς.

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται το πραγματικό κύκλωμα ενός PCB χωρητικού συζεύκτη [6].

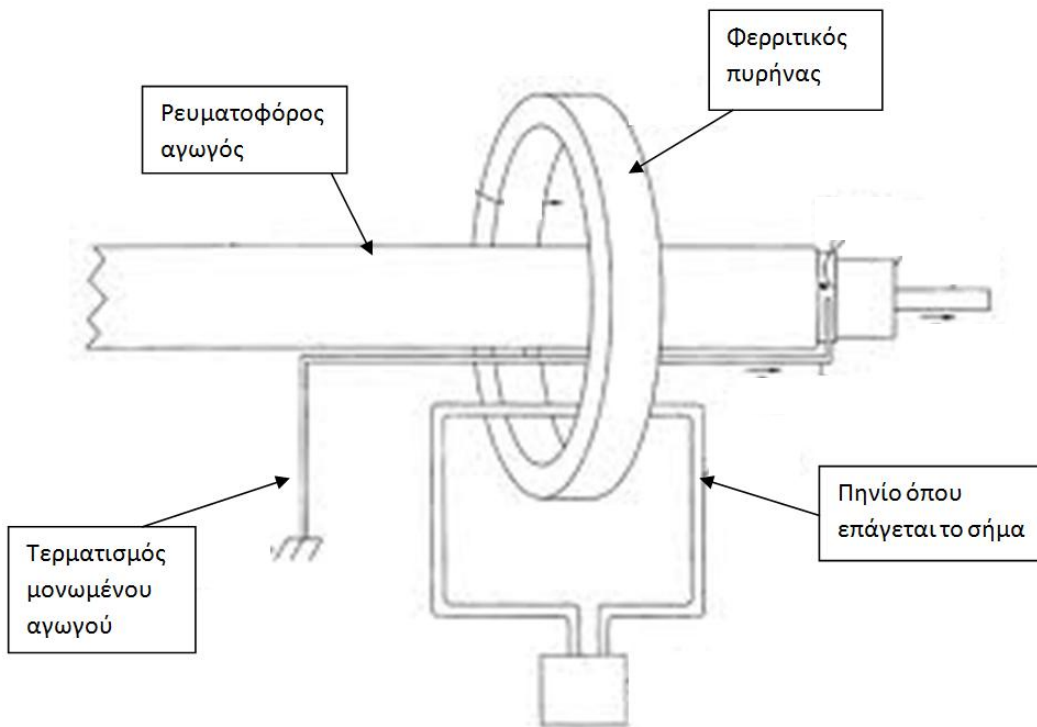


Σχήμα 4.4 Πραγματικό κύκλωμα PCB ενός χωρητικού συζεύκτη

Αναλυτικότερη περιγραφή για το ρόλο και τη λειτουργία κάθε στοιχείου του PCB θα δοθεί στο Κεφάλαιο 5.

4.2 Επαγωγικοί συζεύκτες

Στους επαγωγικούς συζεύκτες η σύζευξη του σήματος PLC γίνεται επαγωγικά. Θεωρητικά, ένα καλώδιο που διαρρέεται από ρεύμα επάγει μέρος του ρεύματος σε πηνίο που βρίσκεται κοντά του. Στην αρχή αυτή στηρίζεται ο επαγωγικός συζεύκτης με τη διαφορά ότι το πηνίο φέρει τις περιελίξεις του γύρω από ένα φερριτικό πυρήνα, ο οποίος τοποθετείται γύρω από το ρευματοφόρο καλώδιο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5.



Σχήμα 4.5 Επαγωγική σύζευξη πηνίου με ρευματοφόρο αγωγό

Η επιλογή του φερριτικού πυρήνα είναι καθοριστική για τους ακόλουθους λόγους:

- Ο πυρήνας πρέπει να εξασθενήσει όσο το δυνατό περισσότερο το χαμηλής συχνότητας ρεύμα ισχύος, χωρίς να επηρεάσει δραστικά το PLC σήμα.
- Ο πυρήνας τοποθετείται γύρω από ένα μονωμένο καλώδιο - αναλυτικότερη περιγραφή του οποίου δίνεται στη συνέχεια - το οποίο διαρρέεται από ρεύμα υψηλής έντασης που προκαλεί μαγνητική ροή στον πυρήνα. Εκ κατασκευής, ο φερριτικός πυρήνας δεν επιτρέπει την επαγωγή ρεύματος τόσο χαμηλής συχνότητας στο πηνίο όπου επάγεται το PLC σήμα το οποίο μεταδίδεται επί του ρευματοφόρου αγωγού.

Συνεπώς, το υπόλοιπο κύκλωμα είναι προστατευμένο από το υψηλής έντασης και χαμηλής συχνότητας ρεύμα. Εντούτοις, λόγω της πολύ υψηλής έντασης του ρεύματος της γραμμής ισχύος, ο πυρήνας έρχεται σε κορεσμό, με αποτέλεσμα να μην επάγεται ούτε το PLC σήμα από το ρευματοφόρο αγωγό στο πηνίο. Είναι πολύ δύσκολο να σχεδιασθεί πυρήνας ο οποίος θα επάγει μόνο υψηλές συχνότητες και δεν θα έρχεται σε κορεσμό όταν τοποθετείται γύρω από καλώδιο που διαρρέεται από ρεύμα της τάξης των kA. Μέχρι στιγμής, δεν είναι δυνατό να κατασκευασθούν πυρήνες για επαγωγικό συζεύκτη χωρίς κενό αέρος, το οποίο αποτρέπει τον κορεσμό του πυρήνα αλλά συγχρόνως μειώνει σημαντικά και την αποτελεσματικότητα της επαγωγικής σύζευξης. Για την επιλογή του πυρήνα, λοιπόν, πρέπει να προσδιορισθεί η χρυσή τομή μεταξύ των εκάστοτε απαιτήσεων.

Οι επαγωγικοί συζεύκτες δεν είναι τόσο λειτουργικοί όσο οι χωρητικοί, οι οποίοι εμφανίζουν περισσότερο προβλέψιμη συμπεριφορά ως προς την έγχυση και την εξαγωγή σημάτων PLC. Καταρχήν, οι επαγωγικοί συζεύκτες είναι πολύ δύσκολο να εγκατασταθούν σε εναέριο ΗΔ διότι τα καλώδια των γραμμών δεν είναι μονωμένα. Η τοποθέτηση του πυρήνα γύρω από ένα γυμνό καλώδιο επιφέρει τεράστια μέγεθος Η/Μ πίεση στον πυρήνα, σε σημείο που μπορεί να γίνει έκρηξη. Για να αποφευχθεί κάτι τέτοιο πρέπει ο πυρήνας να είναι ειδικά επιλεγμένος ώστε να αντέχει τέτοιου μεγέθους πιέσεις. Εντούτοις, αυτό είναι συνήθως ασύμφορο αφού και μειώνεται δραματικά η αποτελεσματικότητα της σύζευξης και το κόστος σχεδίασης και κατασκευής είναι μεγάλο.

Όσον αφορά τα καλώδια με μόνωση, ο τερματισμός τους και η εγκατάσταση του επαγωγικού συζεύκτη θέλει ιδιαίτερη προσοχή και πρέπει να γίνεται με συγκεκριμένο τρόπο. Αρχικά, το μονωμένο καλώδιο MT έχει την ίδια μορφή με ένα ομοαξονικό καλώδιο. Συγκεκριμένα, από μέσα προς τα έξω, υπάρχει ο αγωγός, ένα στρώμα μόνωσης, μερικά στρώματα ημιαγωγών, η γείωση και το εξωτερικό κάλυμμα. Στην πράξη, ο μονωτής δεν συμπεριφέρεται ιδανικά, συμπεριφέρεται ως κακός αγωγός ηλεκτρισμού και αυτό είναι καθοριστικό αφού το καλώδιο διαρρέεται από υψηλής έντασης ρεύμα. Άρα, δεν γίνεται να αφαιρεθεί το εξωτερικό κάλυμμα, να στραφεί προς τα πίσω η γείωση (bend back the earth strands) και να θεωρηθεί ότι δεν θα υπάρξει σπινθήρας ανάμεσα στο μονωτή και το εσωτερικό του πυρήνα.

Επομένως, πρέπει να περάσει και η γείωση μέσω του πυρήνα για να μην υπάρχει καμία πιθανότητα να βγει το σύστημα εκτός λειτουργίας. Εντούτοις, αν περάσει και η γείωση μέσω του πυρήνα, το σήμα αυτοεξουδετερώνεται, οπότε δεν επάγεται σήμα στο πηνίο του επαγωγικού συζεύκτη. Άρα, ο ιδανικός τρόπος είναι να περάσει όλο το καλώδιο μέσω του πυρήνα (μαζί με τη γείωση) και μετά να γυρίσει η γείωση προς τα πίσω και να τερματιστεί πριν τον πυρήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.5. Με αυτόν τον τρόπο αυτοεξουδετερώνεται το σήμα της γείωσης και επάγεται στο πηνίο το σήμα του αγωγού.

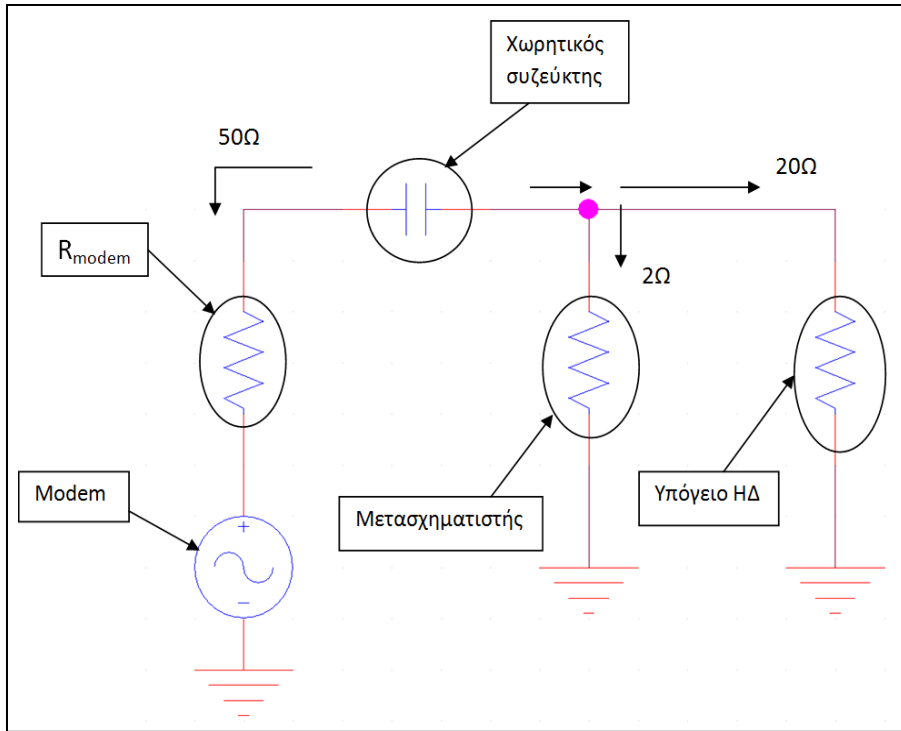
4.3 Σύγκριση χωρητικού και επαγωγικού συζεύκτη ανάλογα με το είδος ΗΔ

4.3.1 Υπόγεια ΗΔ ΜΤ

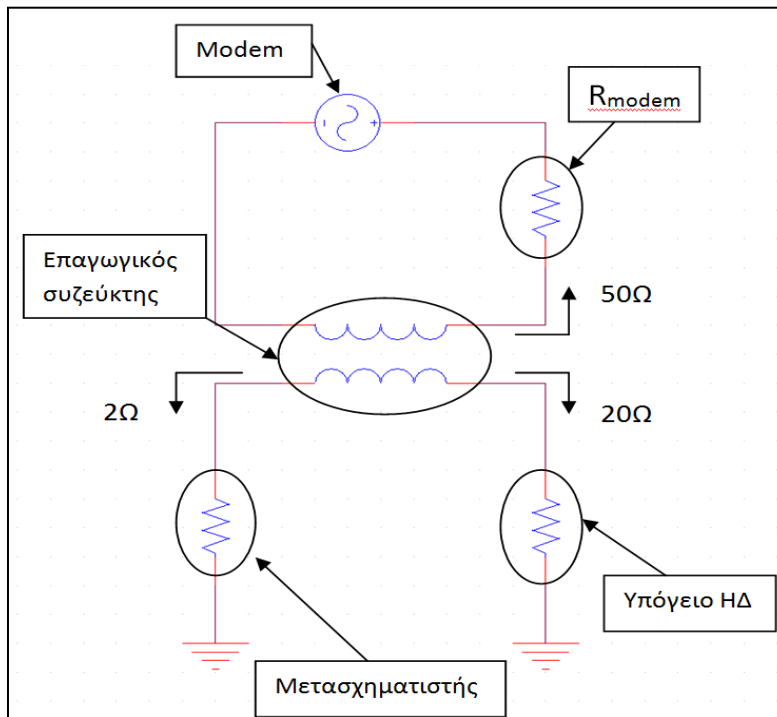
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στα υπόγεια ΗΔ οι συζεύκτες δεν τοποθετούνται σε οποιοδήποτε μέρος της υπόγειας γραμμής ισχύος αλλά μόνο στα σημεία όπου εκείνη έρχεται στην επιφάνεια, συνήθως εκεί όπου υπάρχουν και οι μετασχηματιστές. Ο συζεύκτης, λοιπόν, από τη μία πλευρά βλέπει την αντίσταση του ομοαξονικού καλωδίου που οδηγεί στο modem και είναι 50Ω και από την πλευρά της γραμμής ισχύος βλέπει δύο αντιστάσεις σε παράλληλη σύνδεση, την αντίσταση του καλωδίου της γραμμής ισχύος που είναι γύρω στα 20Ω και τον τερματισμό της γραμμής σε μετασχηματιστή που είναι γύρω στα 2Ω . Αξίζει να σημειωθεί ότι επειδή οι αντιστάσεις των στοιχείων/διατάξεων μεταβάλλονται ως προς τη συχνότητα, οι αντιστάσεις που έχουν χρησιμοποιηθεί αφορούν το εύρος συχνοτήτων του PLC σήματος (\sim MHz).

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.6 (α), απαιτείται μεγάλη ισχύς για να τροφοδοτηθεί η γραμμή του ΗΔ αφού το μεγαλύτερο μέρος του PLC σήματος εγχέεται οδεύει προς τον κλάδο του μετασχηματιστή, ο οποίος έχει μέχρι και 10 φορές μικρότερη αντίσταση από αυτή της υπόγειας γραμμής. Επίσης, επειδή εγκαθίσταται παράλληλα με τη γραμμή, ένας χωρητικός συζεύκτης βλέπει τον παράλληλο συνδυασμό δύο αντιστάσεων – 2Ω και 20Ω αντίστοιχα – από τη μία πλευρά του, δηλαδή περίπου 2Ω . Ως εκ τούτου, πρέπει να γίνει πολύ καλή προσαρμογή αντιστάσεων αφού ο συζεύκτης βλέπει 50Ω προς τη μία πλευρά και περίπου 2Ω προς την άλλη. Τέλος, ο ARRESTER δεν είναι η κατάλληλη πυκνωτική διάταξη όσον αφορά την εγκατάσταση χωρητικού συζεύκτη σε υπόγεια ΗΔ, διότι η μεγάλη τιμή της αντίστασής του (high impedance) έρχεται σε αναντιστοιχία με τη μικρή αντίσταση της υπόγειας γραμμής. Ενδεχομένως, κάποιος ειδικά διαμορφωμένος κεραμικός πυκνωτής, με μικρότερη αντίσταση, να ήταν καταλληλότερος για τη συγκεκριμένη εγκατάσταση.

Από την άλλη πλευρά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6 (β), ο επαγωγικός συζεύκτης είναι περισσότερο κατάλληλος για τα υπόγεια ΗΔ, αφού λειτουργεί ως διαιρέτης τάσης επάγοντας το PLC σήμα στη γραμμή με τη μεγαλύτερη αντίσταση. Ως εκ τούτου, το μεγαλύτερο μέρος του PLC σήματος οδηγείται προς την πλευρά της γραμμής του ΗΔ (20Ω) και όχι προς την πλευρά που τερματίζει στο μετασχηματιστή με πολύ λιγότερες απώλειες σε σχέση με ένα χωρητικό συζεύκτη. Το μειονέκτημα του επαγωγικού συζεύκτη είναι ότι, όπως έχει προαναφερθεί, απαιτείται συγκεκριμένος τρόπος τοποθέτησής του γύρω από μονωμένο καλώδιο γραμμών ισχύος και πολύ προσεκτική επιλογή φερριτικού πυρήνα.



Σχήμα 4.6 (α) Χωρητική σύζευξη σε υπόγειο ΗΔ κοντά σε μετασχηματιστές



Σχήμα 4.6 (β) Επαγωγική σύζευξη σε υπόγειο ΗΔ κοντά σε μετασχηματιστές

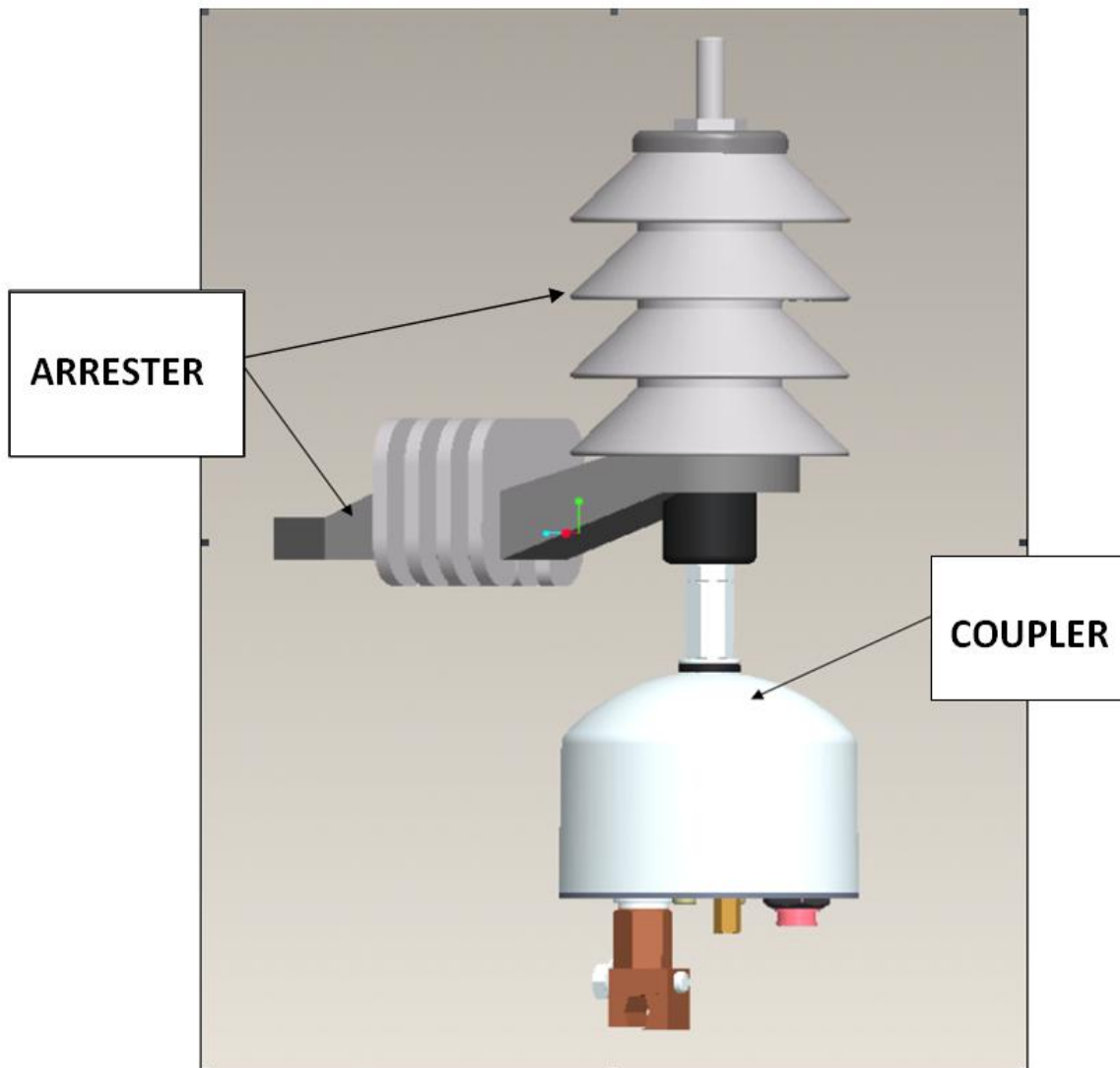
4.3.2 Εναέρια/Υπέργεια ΗΔ ΜΤ

Οι επαγωγικοί συζεύκτες είναι πολύ δύσκολο να τοποθετηθούν γύρω από τα γυμνά καλώδια των εναέριων γραμμών ισχύος. Από την άλλη πλευρά, οι χωρητικοί συζεύκτες είναι περισσότερο ασφαλείς και λειτουργικοί, αφού η σύζευξη των PLC σημάτων, δηλαδή η εγκατάσταση των συζευκτών, μπορεί αν γίνει σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής. Επειδή η εναέρια γραμμή ισχύος έχει χαρακτηριστική αντίσταση ίση περίπου με 200Ω , ο χωρητικός συζεύκτης βλέπει 100Ω από τη μεριά της γραμμής – θεωρώντας πάντα ότι η γραμμή είναι προσαρμοσμένη στα άκρα της – και 50Ω από τη μεριά του modem. Άρα, ούτε η προσαρμογή ούτε η ισχύς του PLC σήματος αποτελούν πρόβλημα όσο στην αντίστοιχη περίπτωση των υπόγειων ΗΔ.

4.4 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά χωρητικού συζεύκτη με ARRESTER

Αφού έγινε αναφορά στη λειτουργία και στο ρόλο των επιμέρους τμημάτων ενός χωρητικού συζεύκτη, αξίζει να μελετηθεί ο τρόπος και η διαδικασία κατασκευής του καθώς και τα μηχανικά μέρη (βίδες, παξιμάδια, κλπ) που τον αποτελούν. Οι κατασκευαστικές πληροφορίες και οι διαστάσεις που δίδονται στη συνέχεια του κεφαλαίου είναι πραγματικές και χρησιμοποιούνται μέχρι το τέλος της μελέτης. Εντούτοις, η σχεδίαση δεν πρέπει να βασιστεί πλήρως σε αυτές αφού είναι κυρίως ενδεικτικές και όχι απόλυτες/μοναδικές.

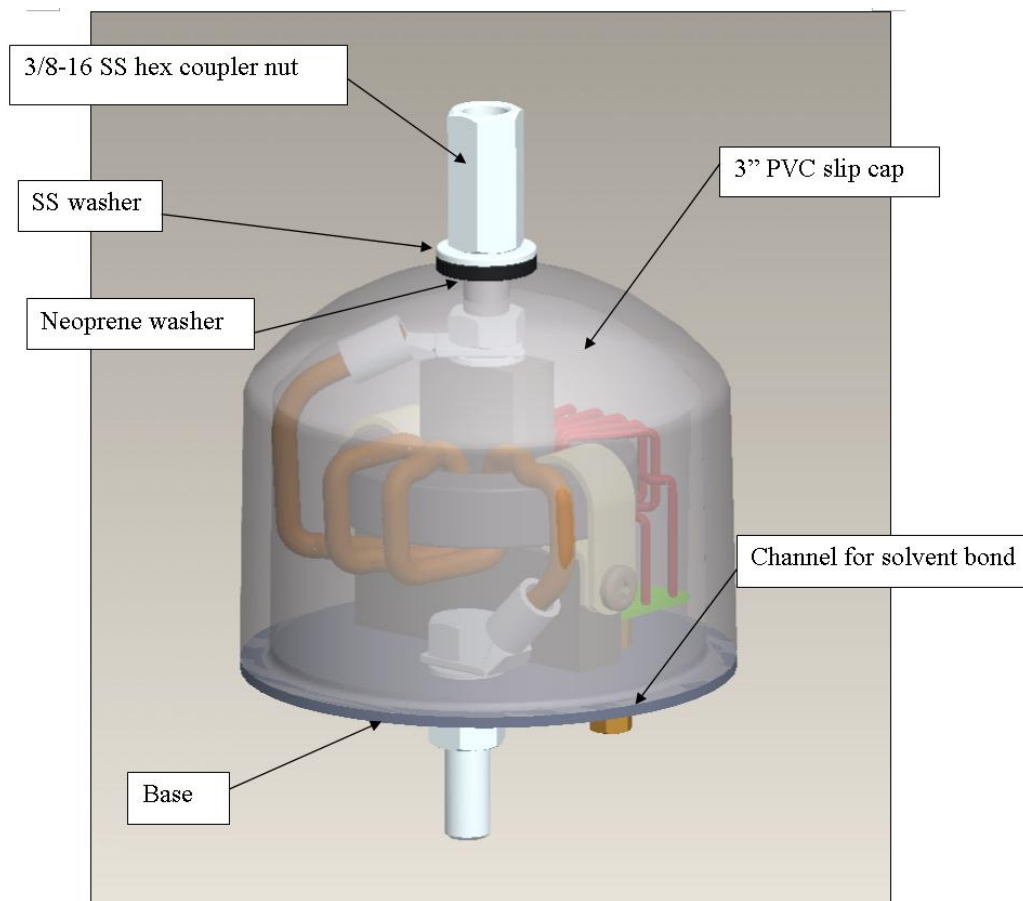
Στο Σχήμα 4.7 απεικονίζεται ολόκληρη η συνδεσμολογία ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη με ARRESTER. Ο ARRESTER αναλαμβάνει το ρόλο του πυκνωτή, ενώ μέσα στο COUPLER υπάρχει ο μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα και το PCB [13].



Σχήμα 4.7 Arrester Coupler – Χωρητικός συζεύκτης με ARRESTER

4.4.1 Το εξωτερικό μέρος – κάλυμμα – του COUPLER

Ο COUPLER στην τελική του μορφή είναι 10.2cm σε διάμετρο, 8.3cm σε ύψος ή 11.6cm αν ληφθεί υπόψη και η εξαγωνική 3/8-16 βίδα που προεξέχει στην κορυφή της συνδεσμολογίας, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.8. Η όλη συνδεσμολογία του COUPLER είναι κατασκευασμένη από καθιερωμένα υλικά και Hardware και ζυγίζει περίπου 0.7kg [13].



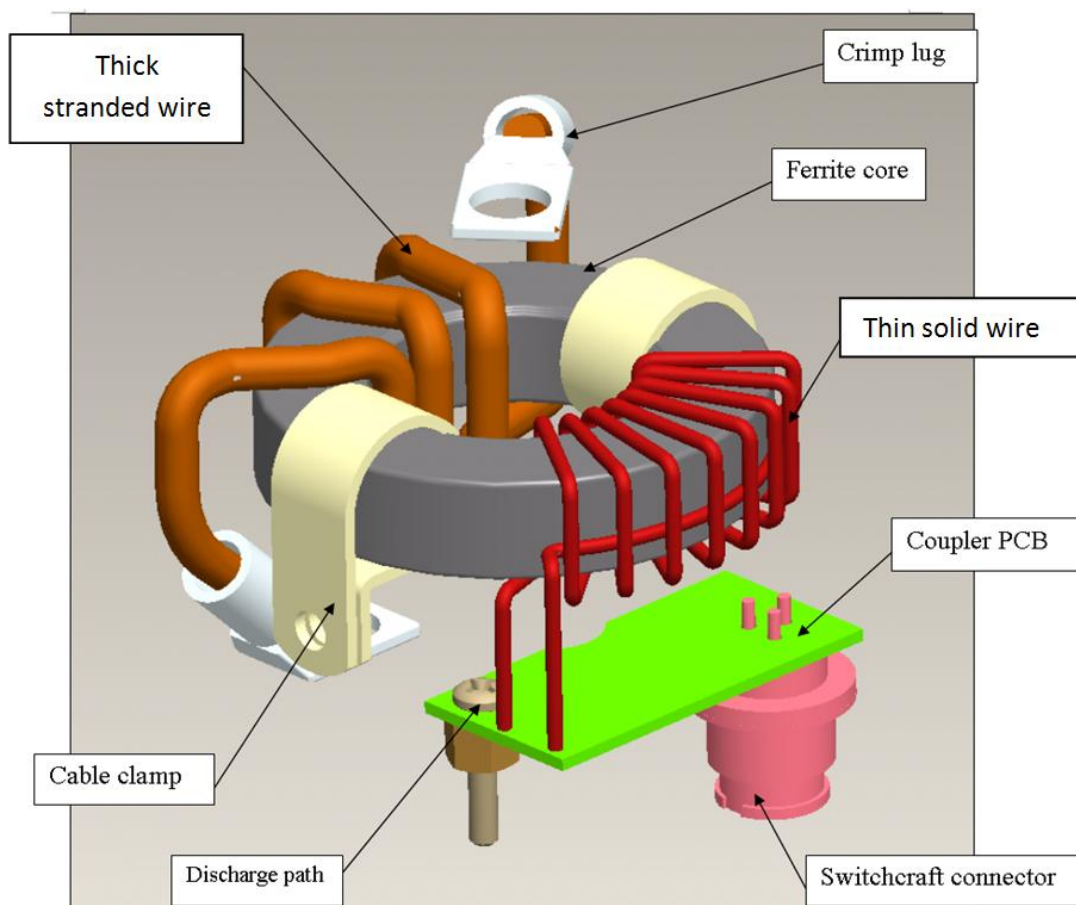
Σχήμα 4.8 Το εξωτερικό του COUPLER

- Το κάλυμμα είναι κατασκευασμένο από πλαστικό λείο καπάκι 3'' (3'' PVC slip cap). Μια 3/8-16 διάτρητη οπή με σπείρωμα έχει δημιουργηθεί κατά τον άξονα συμμετρίας του άνω μέρους του καλύμματος για να προσφέρει ασφαλή και σταθερή στήριξη.
- Κατά την περίμετρο της βάσης έχει δημιουργηθεί αύλακα όπου μπορεί να απλωθεί ικανή ποσότητα υγρού κολλητικού διαλύματος. Με αυτόν τον τρόπο, η βάση και το κάλυμμα συγκολλούνται μόνιμα.
- Μία ροδέλα από νεοπρένιο (neoprene washer), μία ροδέλα από ανοξείδωτο ατσάλι και ένα 3/8-16 παξιμάδι (coupler nut) ολοκληρώνουν τη συνδεσμολογία.
- Το 3/8-16 σπείρωμα βίδας είναι καθιερωμένο για τα περισσότερα μοντέλα ARRESTERS.

4.4.2 Το εσωτερικό μέρος του COUPLER

- Το πηνίο που απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα στο Σχήμα 4.9 είναι ένα πολύκλωνο καλώδιο χαλκού (stranded copper wire), πάχους 6 SWG (Standard Wire Gauge) το οποίο φέρει 3 περιελίξεις περί το φερριτικό πυρήνα και τερματίζει σε κρίκο (crimp lug) και στις δύο πλευρές. Στο καλώδιο αυτό ρέει το ρεύμα που ενώνεται με αυτό της γραμμής ισχύος, αφού πρώτα συζευχθεί επαγωγικά, δηλαδή περάσει από ένα κατάλληλο πυκνωτή, στη συγκεκριμένη περίπτωση ARRESTER. Η άλλη μεριά του καλωδίου αυτού τερματίζει στη γη.

- Το πηνίο που απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα στο Σχήμα 4.9, είναι ένα μονόκλωνο καλώδιο χαλκού πάχους 20 SWG, το οποίο φέρει 8 περιελίξεις περί το φερριτικό πυρήνα και του οποίου τα άκρα είναι κολλημένα στην πλακέτα PCB του συζεύκτη, η οποία με τη σειρά της ενώνεται με το modem μέσω του Switchcraft connector.

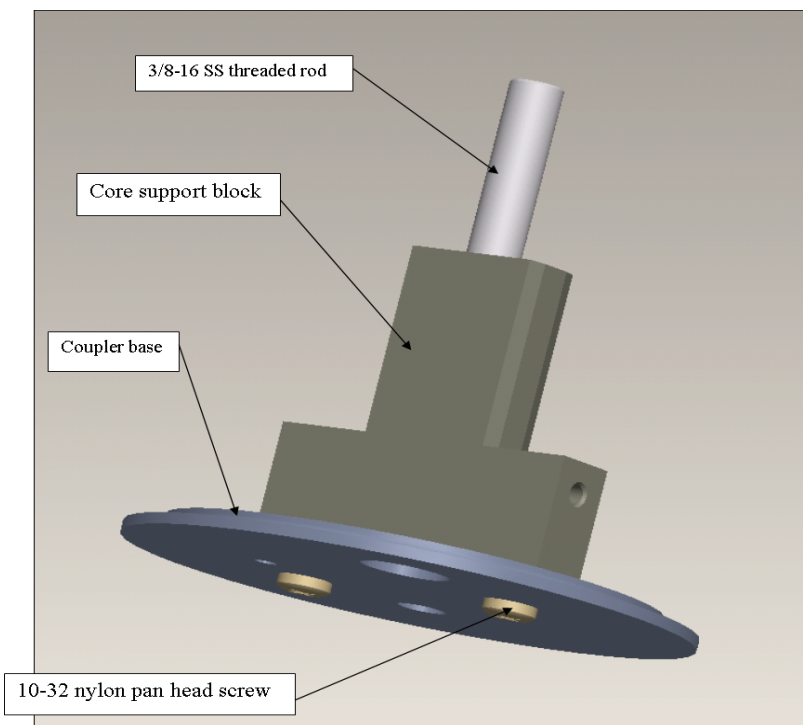


Σχήμα 4.9 Το εσωτερικό του COUPLER – Μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα και PCB

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην πραγματικότητα δεν υπάρχει πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο αφού το PLC σήμα είναι αμφίδρομο. Κατά την έγχυση του PLC σήματος στη γραμμή ισχύος, πρωτεύον θεωρείται το κόκκινο καλώδιο και δευτερεύον το πορτοκαλί, αφού το σήμα ξεκινάει από το modem και μέσω του συζεύκτη εγχέεται στη γραμμή ισχύος. Αντίθετα, κατά την εξαγωγή του σήματος, πρωτεύον πηνίο θεωρείται το πορτοκαλί και δευτερεύον το κόκκινο, σύμφωνα πάντα με το Σχήμα 4.9. Επίσης, ο αριθμός των περιελίξεων των δύο καλωδίων γύρω από το φερριτικό πυρήνα είναι ενδεικτικός, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες και αλλάζει ανάλογα με τις απαιτήσεις του εκάστοτε συστήματος / της εκάστοτε εγκατάστασης.

- Ο φερριτικός πυρήνας έχει τις εξής διαστάσεις: 6.1cm εξωτερική διάμετρο, 3.6cm εσωτερική διάμετρο, 1.3cm πάχος.
- Δύο πλαστικοί σφιγκτήρες καλωδίου (nylon cable clamps) χρησιμοποιούνται για να στερεωθεί η συνδεσμολογία του πυρήνα στην πλαστική υποστήριξη (PVC support).
- Μία 6/32 βίδα (6-32 screw) και ένας διαχωριστής (standoff) χρησιμοποιούνται για να σχηματισθεί διαδρομή εκκένωσης (discharge path) προς τη γη.

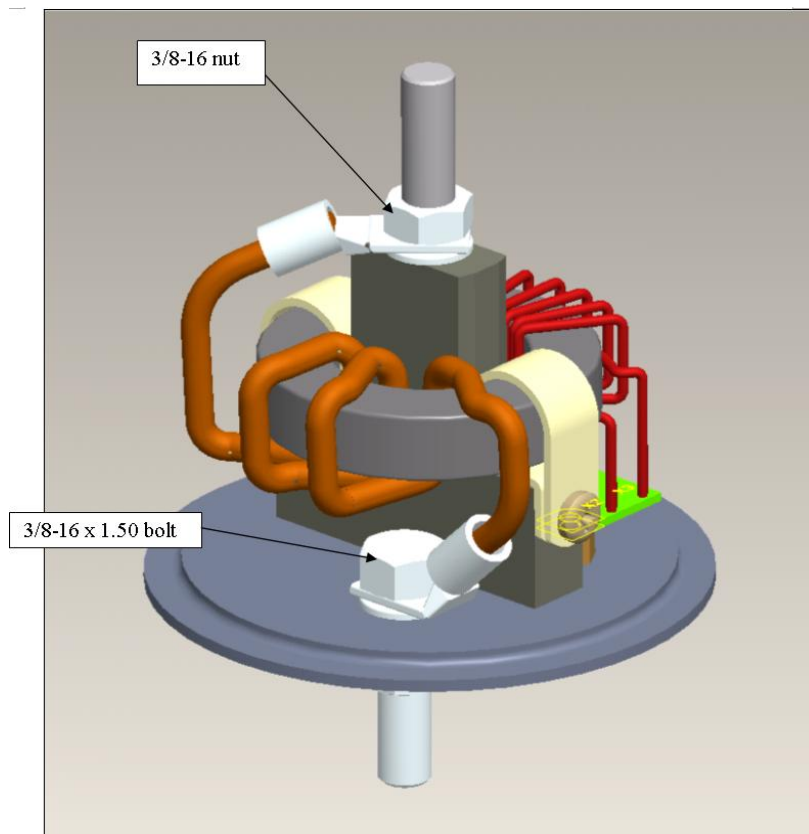
Στο Σχήμα 4.10 απεικονίζεται η βάση όπου στηρίζονται τα μέρη από τα οποία αποτελείται το εσωτερικό του COUPLER.



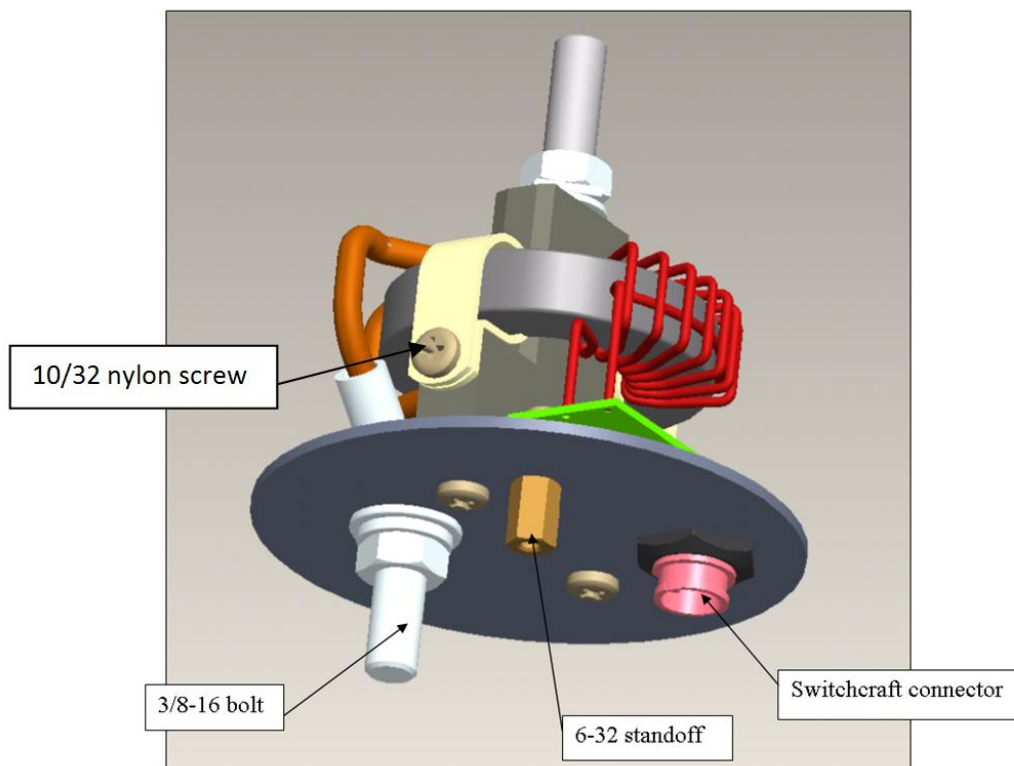
Σχήμα 4.10 Το εσωτερικό του COUPLER – Βάση στήριξης

- Η βάση του συζεύκτη είναι κατασκευασμένη από πλαστικό PVC πάχους 0.5cm
- Η υποστήριξη του πυρήνα του συζεύκτη είναι κατασκευασμένη από πλαστικό PVC πάχους 1.3cm.
- Δύο 10/32 πλαστικές βίδες με επίπεδη κεφαλή (10-32 nylon pan head screws) ασφαλίζουν την υποστήριξη του πυρήνα πάνω στη βάση του συζεύκτη, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.10.
- Μία 3/8-16 ράβδος με σπείρωμα (3/8-16 threaded rod) από ανοξείδωτο ατσάλι χρησιμοποιείται για να ενωθεί και να προσφέρει στήριξη στον ARRESTER.

Στα Σχήματα 4.11 (α) και 4.11 (β) απεικονίζεται η πλήρης μορφή του εσωτερικού του COUPLER καθώς και η σύνδεση του φερριτικού πυρήνα, του PCB και των καλωδίων επί της βάσης του COUPLER.



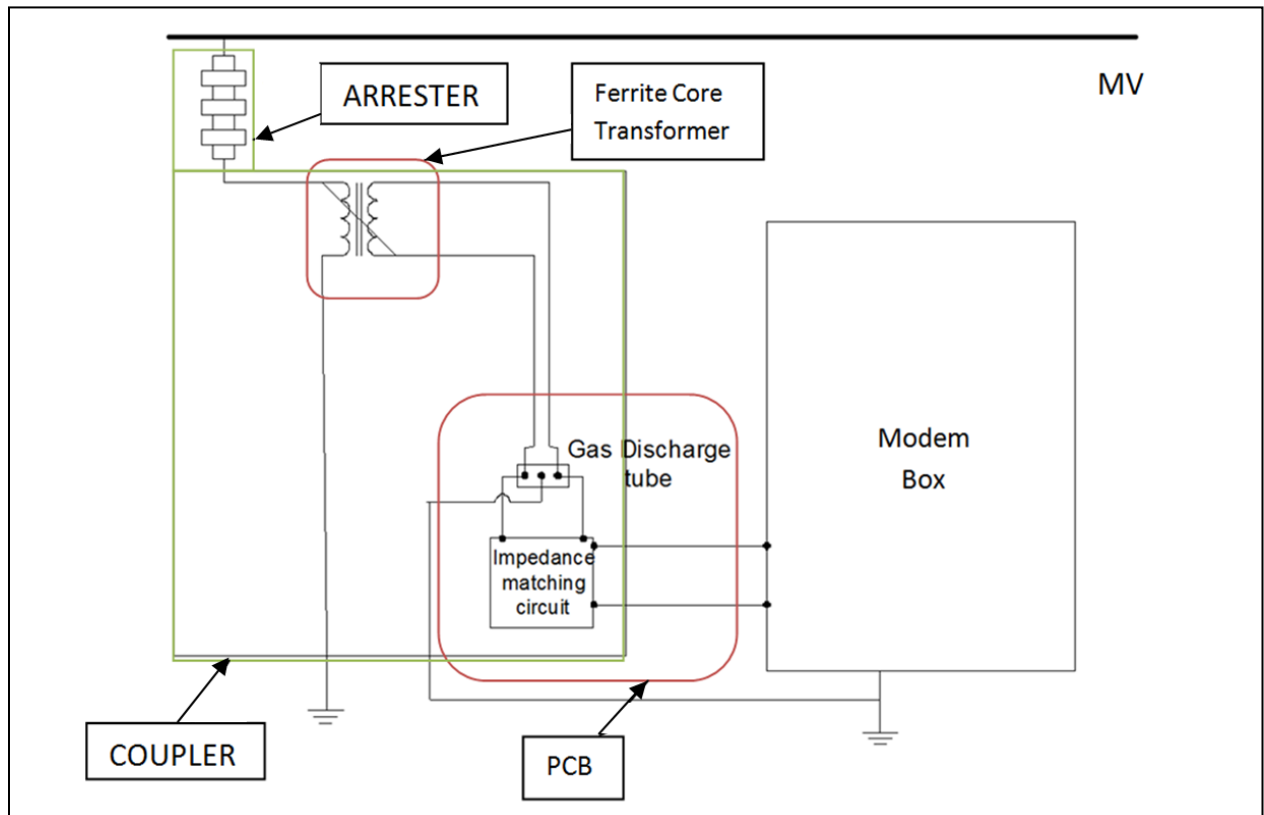
Σχήμα 4.11 (α) Το πλήρες εσωτερικό του COUPLER



Σχήμα 4.11 (β) Το πλήρες εσωτερικό του COUPLER

- Η συνδεσμολογία του φερριτικού πυρήνα είναι στερεωμένη στην πλαστική υποστήριξη με δύο 10/32 πλαστικές βίδες, όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.11 (α).
- Το πηνίο με το χονδρό καλώδιο (με χρώμα πορτοκαλί) είναι στερεωμένο με ένα 3/8-16 παξιμάδι βίδας (nut) στην πλευρά που ενώνεται με τον ARRESTER και με μια 3/8-16 x 1.50 βίδα (bolt) από ανοξείδωτο ατσάλι στην πλευρά της γείωσης, όπως φαίνεται και από το Σχήμα 4.11 (β). Το ίδιο πηνίο συντελεί επίσης στη εξασφάλιση της σταθερότητας του φερριτικού πυρήνα πάνω στην πλαστική υποστήριξη.
- Η 3/8-16 βίδα επιτρέπει τη σύνδεση με καθιερωμένο εξοπλισμό του δικτύου διανομής για να παράσχει γείωση.
- Η μετάδοση του PLC σήματος γίνεται μέσω της υποδοχής Switchcraft (Switchcraft connector), η οποία υποδοχή ενώνει το PCB με το ομοαξονικό καλώδιο που οδηγεί στο modem.
- Ένας 6-32 διαχωριστής (standoff) παρέχει διαδρομή εκκένωσης που συνδέεται με τη γείωση.

Στο Σχήμα 4.12 απεικονίζεται κυκλωματικά ένας χωρητικός συζεύκτης με ARRESTER συνδεδεμένος από τη μία πλευρά με τη γραμμή ΜΤ και από την άλλη πλευρά με το modem [13].



Σχήμα 4.12 Απλή κυκλωματική απεικόνιση ενός χωρητικού συζεύκτη με ARRESTER

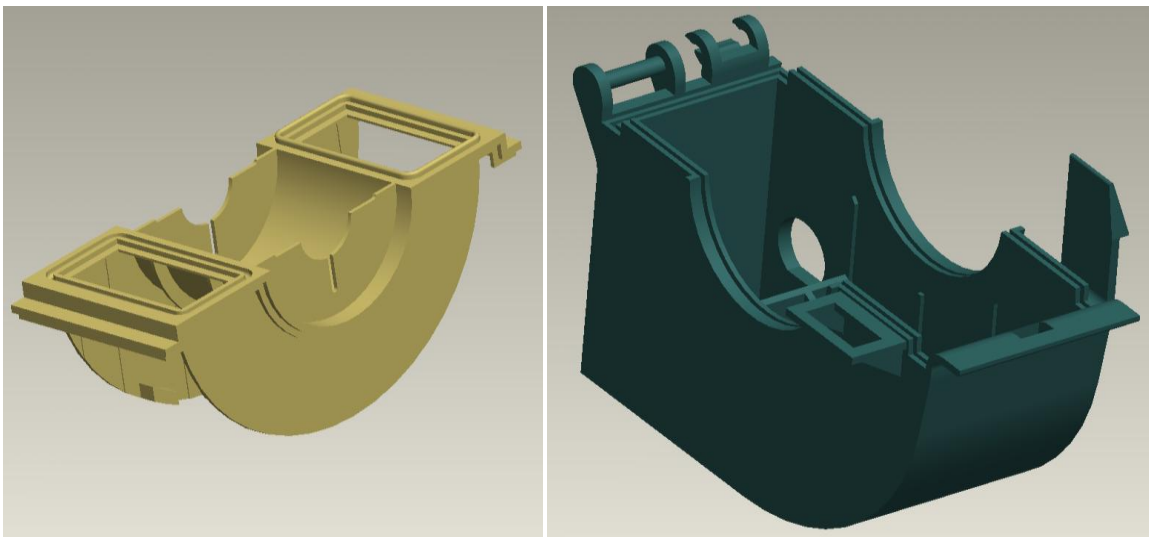
4.5 Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά επαγωγικού συζεύκτη

Όπως και με το χωρητικό συζεύκτη, αξίζει να γίνει αναφορά στη διαδικασία κατασκευής και στα μηχανικά μέρη του επαγωγικού συζεύκτη.

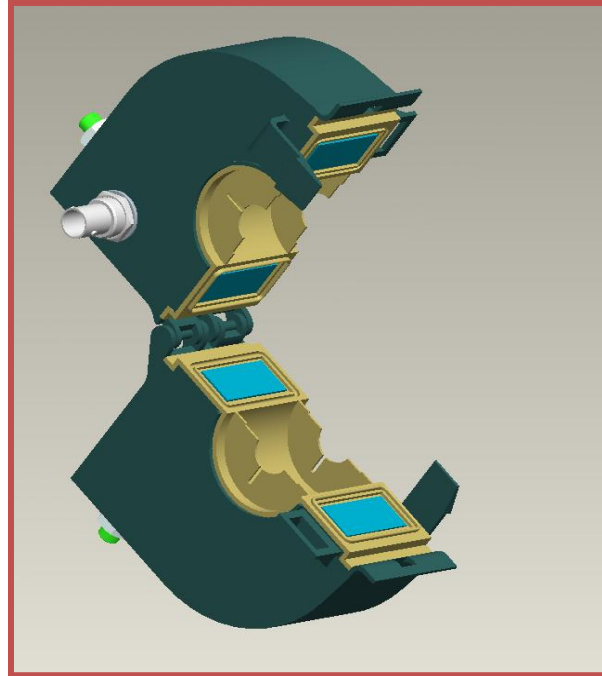
4.5.1 Το εξωτερικό μέρος του επαγωγικού συζεύκτη

Η εξωτερική συνδεσμολογία του επαγωγικού συζεύκτη αποτελείται από δύο μέρη, έκαστο των οποίων αποτελείται από δύο πανομοιότυπα τμήματα. Το ένα μέρος είναι το καπάκι (cap - με χρώμα μπεζ στο Σχήμα 4.13), το οποίο βρίσκεται εσωτερικά και αποτελείται από το άνω και το κάτω τμήμα. Το δεύτερο μέρος είναι το κάλυμμα (cover – με χρώμα πράσινο-μπλε στο Σχήμα 4.13), το οποίο βρίσκεται εξωτερικά και αποτελείται και αυτό από το άνω και το κάτω τμήμα. Όταν η συνδεσμολογία είναι ολοκληρωμένη, το κάλυμμα και το καπάκι είναι μόνιμα κολλημένα/ενωμένα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στα Σχήματα 4.14 και 4.15 [13].

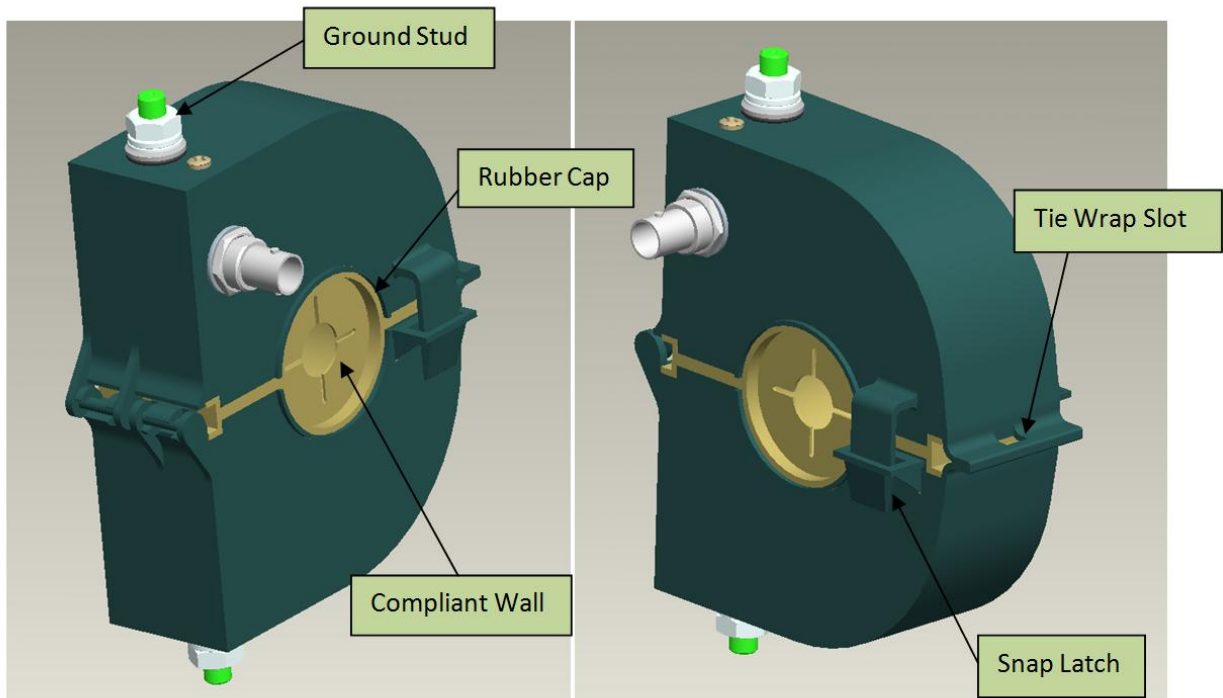
- Το κάλυμμα είναι φτιαγμένο από UV rated πολυανθρακικό υλικό (UV rated polycarbonate) και το καπάκι από θερμοπλαστικό καουτσούκ σιλικόνης (silicone thermo plastic rubber).
- Ο μεντεσές και το μάνδαλο (hinge and latch) έχουν διαμορφωθεί ως μέρος του καλύμματος, όπως και μία περίδεση (tie wrap hold) για την ασφαλή παραμονή του συζεύκτη μέσα στη συνδεσμολογία.
- Το καπάκι έχει ένα ενσωματωμένο εξάρτημα από λάστιχο για προστασία από την υγρασία, το οποίο επιπλέον συντελεί και στην ευθυγράμμιση της όψης του πυρήνα. Επιπλέον, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.15, τα προσαρμοζόμενα τοιχεία (compliant walls) βοηθούν στην ορθή εγκατάσταση του συζεύκτη γύρω από το καλώδιο MT.



Σχήμα 4.13 Καπάκι (cap) και κάλυμμα (cover) ενός επαγωγικού συζεύκτη



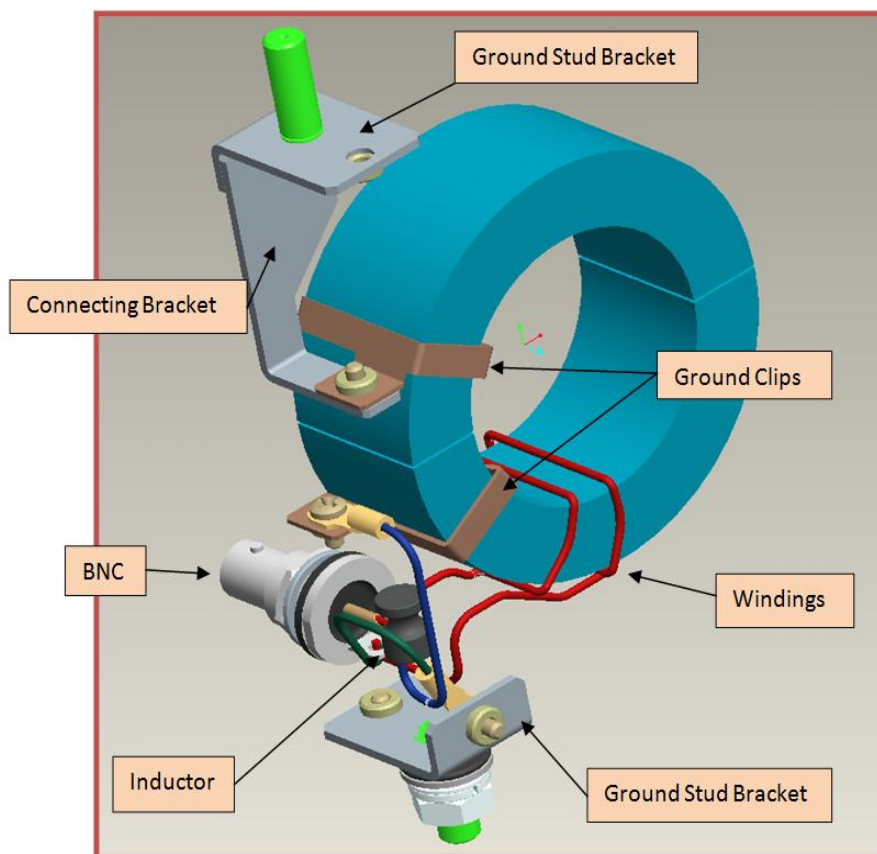
Σχήμα 4.14 Ολοκληρωμένη ανοικτή εξωτερική συνδεσμολογία ενός επαγωγικού συζεύκτη



Σχήμα 4.15 Ολοκληρωμένη κλειστή εξωτερική συνδεσμολογία ενός επαγωγικού συζεύκτη

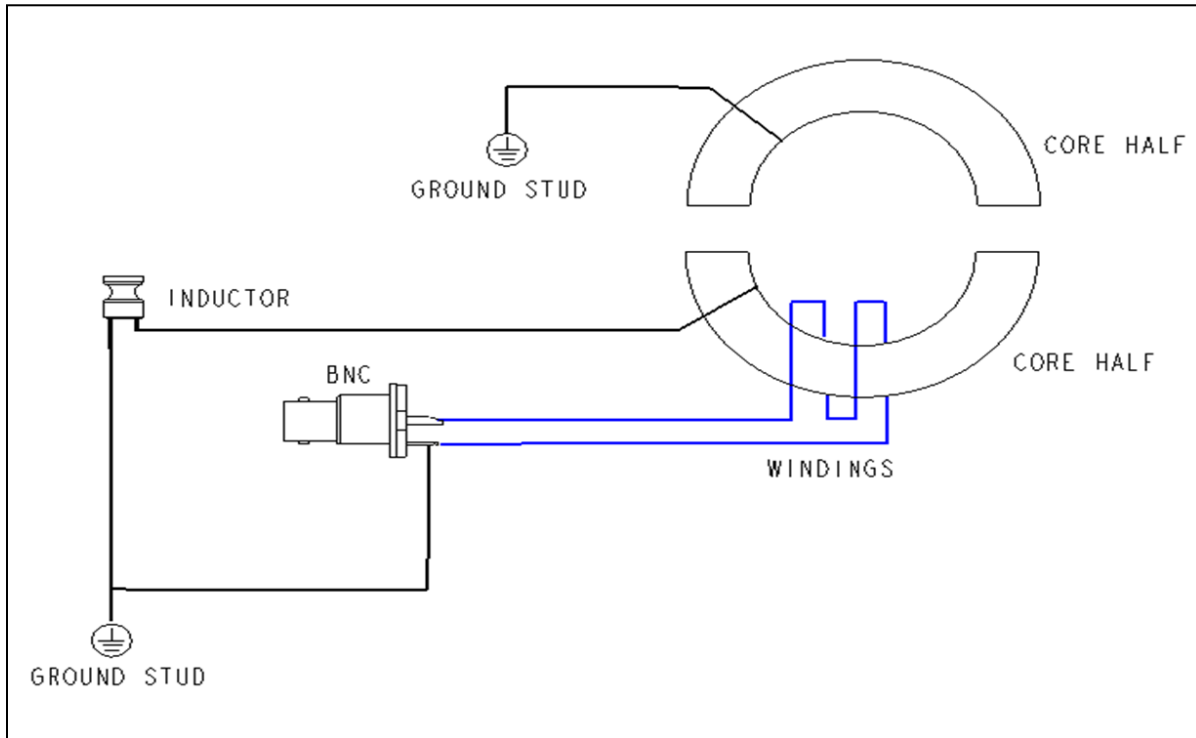
4.5.2 Το εσωτερικό μέρος του επαγωγικού συζεύκτη

- Όπως φαίνεται από το Σχήμα 4.16, το κόκκινο καλώδιο φέρει δύο περιελίξεις περί τον πυρήνα σχηματίζοντας έτσι το πηνίο στο οποίο επάγεται το ρεύμα από τη γραμμή MT που διέρχεται μέσω του πυρήνα.
- Η μετάδοση του σήματος γίνεται μέσω ενός βύσματος BNC (BNC connector), το οποίο συνδέεται με το καλώδιο που οδηγεί στο modem.
- Επινικελωμένο κλιπ χρησιμοποιείται και στα δύο χωριστά τμήματα του πυρήνα. Το κλιπ ενώνεται με ένα επιπλέον κλιπ για να δημιουργηθεί εξωτερική σύνδεση με τη γη – γείωση (ground clips).
- Ένας επαγωγέας (inductor) είναι τοποθετημένος σε σειρά ανάμεσα στον πυρήνα και στην εξωτερική γείωση.



Σχήμα 4.16 Το εσωτερικό ενός επαγωγικού συζεύκτη

Στο Σχήμα 4.17 απεικονίζεται κυκλωματικά ένας επαγωγικός συζεύκτης, στο πηνίο του οποίου επάγεται το PLC σήμα που μεταφέρει ο αγωγός ΜΤ, ο οποίος διέρχεται από το κέντρο του πυρήνα. Η σύνδεση του πηνίου με το modem γίνεται μέσω του βύσματος BNC [13].



Σχήμα 4.17 Απλή κυκλωματική απεικόνιση ενός επαγωγικού συζεύκτη

Κεφάλαιο 5

ΙΣΟΔΥΝΑΜΟ ΚΥΚΛΩΜΑ ΕΥΡΥΖΩΝΙΚΟΥ ΧΩΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΖΕΥΚΤΗ

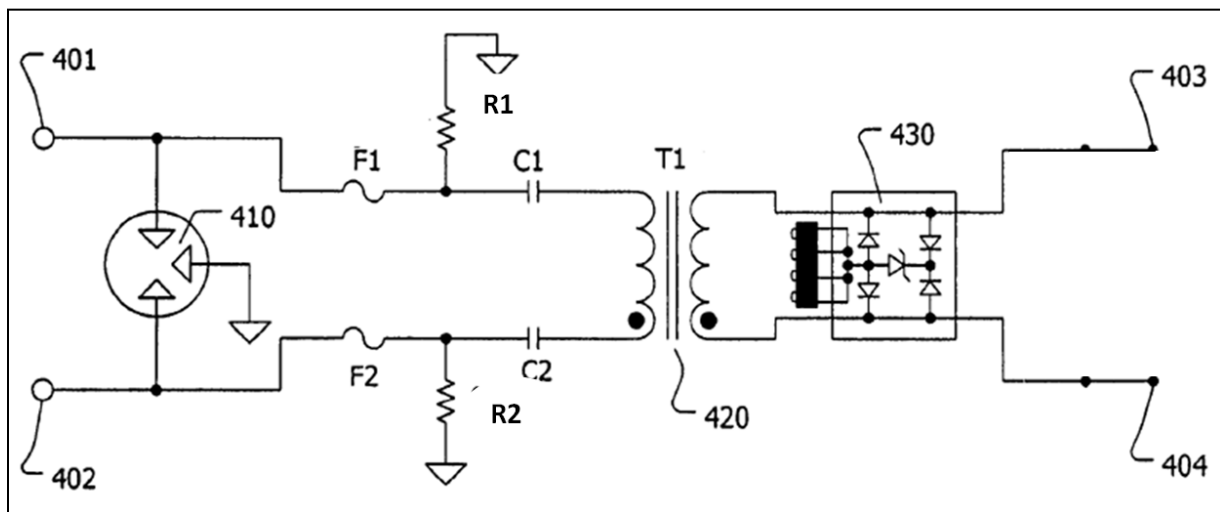
5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί και στα προηγούμενα, ένας χωρητικός συζεύκτης αποτελείται από τρία κυρίως τμήματα, ξεκινώντας από το modem προς τη γραμμή ισχύος: το PCB, το φερριτικό πυρήνα, τον πυκνωτή ή την πυκνωτική διάταξη.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται και αναλύεται το ισοδύναμο κύκλωμα κάθε τμήματος χωριστά καθώς και του συνολικού ισοδύναμου κυκλώματος ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη που λειτουργεί σε συχνότητες από 3 έως 50MHz.

5.2 PCB

Στο Σχήμα 5.1 απεικονίζεται το πραγματικό κύκλωμα ενός Capacitive Coupler PCB [6].

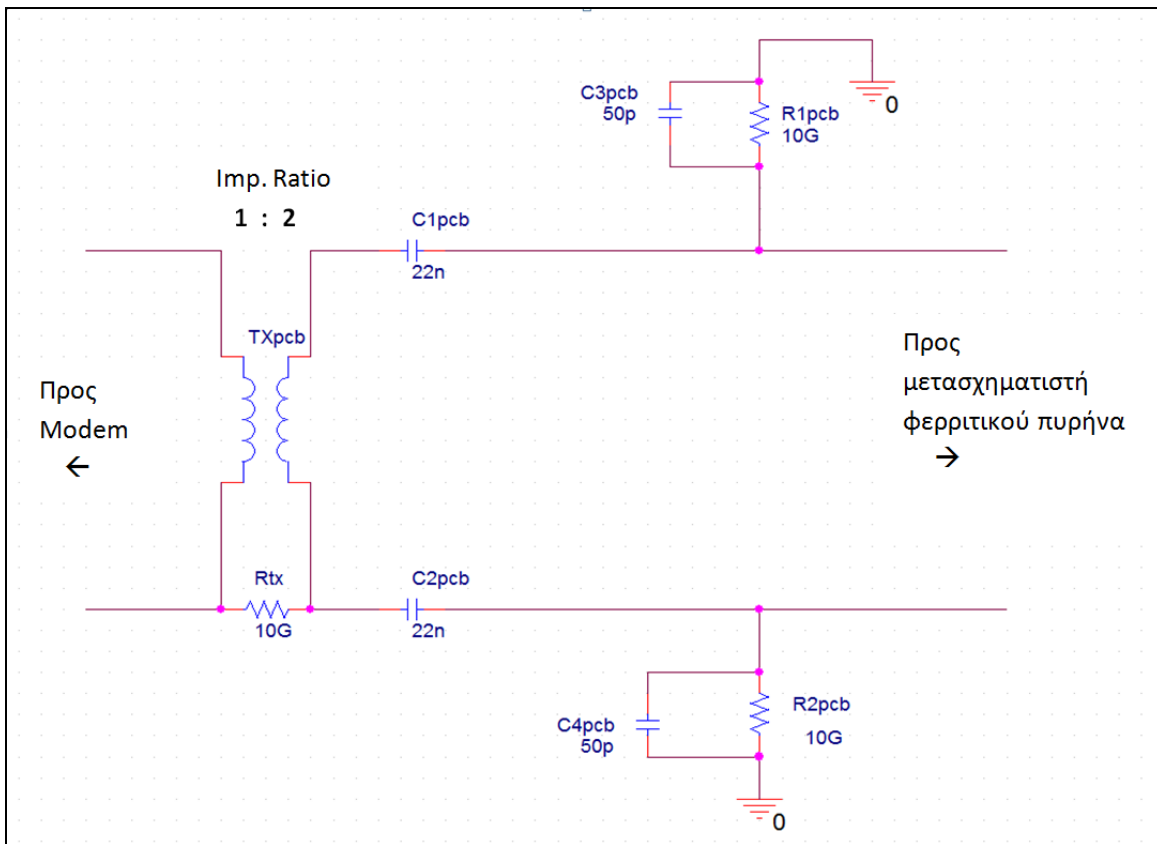


Σχήμα 5.1 Πραγματικό κύκλωμα PCB ενός χωρητικού συζεύκτη

- Οι γραμμές 403 και 404 συνδέονται προς το modem, ενώ οι γραμμές 401 και 402 συνδέονται προς το φερριτικό πυρήνα, σχηματίζοντας το ένα από τα δύο πηνία του μετασχηματιστή.
- Το στοιχείο 410 είναι ένας σωλήνας εκφόρτισης (gas discharge tube) που αποσκοπεί στην προστασία του κυκλώματος από την καταστροφή που μπορεί να προκαλέσουν σπινθηρισμοί υψηλής τάσης. Δεν χρειάζεται να απεικονισθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα, αφού δεν επηρεάζει τη συνάρτηση μεταφοράς του σήματος.

- Τα στοιχεία F1 και F2 είναι ασφάλειες που αποσκοπούν στην προστασία του κυκλώματος από ενδεχόμενα ρεύματα υψηλής έντασης. Κυκλωματικά, όταν η ένταση του ρεύματος δεν είναι υπερβολική, ισοδυναμούν με βραχυκύκλωμα.
- Οι R1 και R2 είναι αντιστάσεις της τάξης των GΩ και εξασφαλίζουν τη γείωση της πλακέτας. Η μεγάλη τους τιμή αποτρέπει τη ροή του PLC σήματος προς τη γη.
- Οι C1 και C2 είναι πυκνωτές των 22nF έκαστος, για περαιτέρω εμπόδιση του χαμηλόσυχνου ρεύματος.
- Το στοιχείο T1 (420) είναι ένας RF μετασχηματιστής balun που αποσκοπεί στην προσαρμογή των αντιστάσεων – από τη μία πλευρά είναι η αντίσταση του modem και από την άλλη πλευρά είναι η συνολική αντίσταση του χωρητικού συζεύκτη και η αντίσταση της γραμμής MT – και στη δημιουργία ενός ισορροπημένου διαφορικού RF σήματος για το modem. Κυκλωματικά, συμπεριφέρεται ως ιδανικός γραμμικός μετασχηματιστής.
- Το στοιχείο 430 είναι διάταξη από διόδους (diode array) που αποσκοπεί στην καταστολή της μεταβατικής τάσης (transient voltage suppression - TVS), αποτρέποντας την είσοδο σε σήματα έντασης 0.7V και άνω. Δεν χρειάζεται να απεικονισθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα, αφού δεν επηρεάζει τη συνάρτηση μεταφοράς του σήματος.

Το ισοδύναμο κύκλωμα του PCB ενός χωρητικού συζεύκτη απεικονίζεται στο Σχήμα 5.2



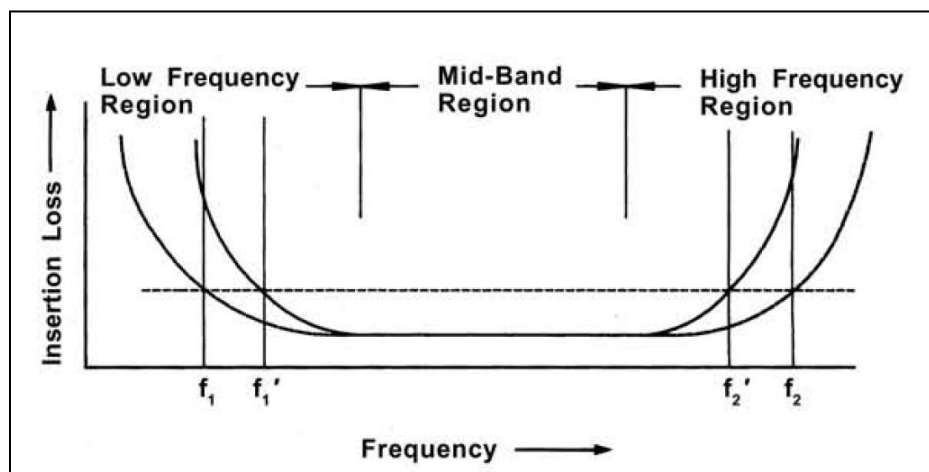
Σχήμα 5.2 Ισοδύναμο Κύκλωμα PCB στο OrCAD

Ο $TXrcb$ είναι ιδανικός γραμμικός μετασχηματιστής (XFRM_LINEAR με coupling coefficient=1) και αντιπροσωπεύει τον RF μετασχηματιστή balun. Στο λόγο σύνθετων αντιστάσεων (impedance ratio) έχει δοθεί αρχική τιμή 1:2, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Η αντίσταση Rtx τοποθετείται εκεί έτσι ώστε να υπάρξει ηλεκτρική ένωση των δύο άκρων του μετασχηματιστή, αφού το πρόγραμμα προσομοίωσης απαιτεί την ηλεκτρονική σύνδεση όλων των στοιχείων του κυκλώματος. Της έχει αποδοθεί πολύ μεγάλη τιμή (10GΩ), αφού στην ουσία περιγράφει ανοικτοκύκλωμα. Οι πυκνωτές $C3rcb$ και $C4rcb$ αντιπροσωπεύουν όλες τις χωρητικότητες που αναπτύσσονται στην πλακέτα και γενικότερα ανάμεσα στα στοιχεία του συστήματος (χωρητικότητες ομοαξονικού καλωδίου και minicircuit devices) και τους έχει αποδοθεί ενδεικτική τιμή που ισοδυναμεί με 50pF.

5.3 Μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα

5.3.1 Ανάλυση ισοδύναμου κυκλώματος

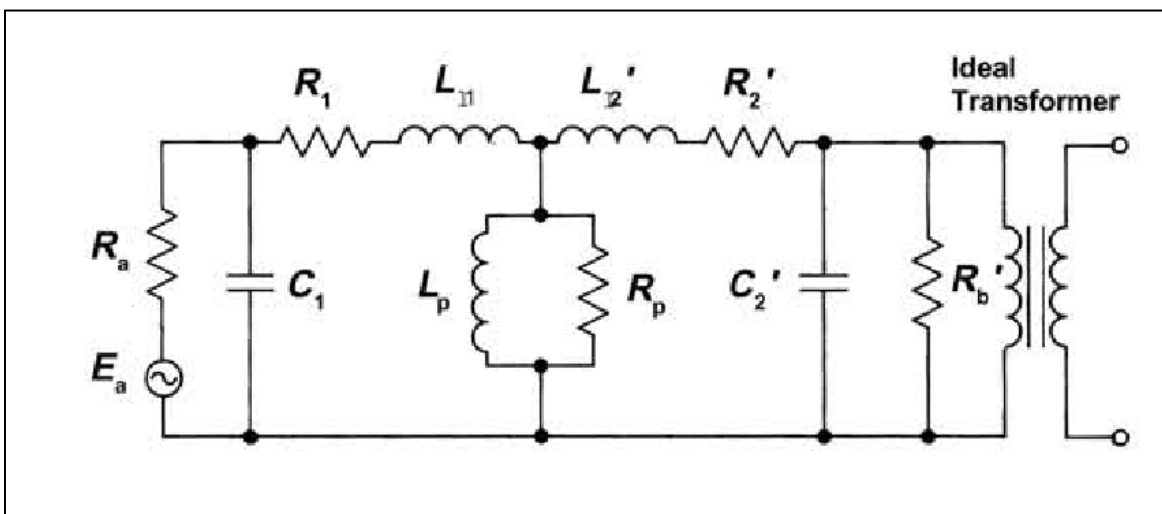
Οι μετασχηματιστές ευρυζωνικής χρήσης είναι σχεδιασμένοι κυρίως για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές για να μεταφέρουν ενέργεια σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων. Στο Σχήμα 5.3 απεικονίζεται μια τυπική καμπύλη απόδοσης της εξασθένησης που προκαλείται λόγω παρεμβολής του ευρυζωνικού μετασχηματιστή κατά τη μετάδοση του σήματος (insertion loss) ως συνάρτηση της συχνότητας. Το εύρος ζώνης λειτουργίας ενός τέτοιου μετασχηματιστή είναι η διαφορά μεταξύ f_2 και f_1 , ή μεταξύ f_2' και f_1' , και εξαρτάται από τη μορφή της εξασθένησης λόγω παρεμβολής, κυρίως από τον τρόπο μετάβασης (roll off) από τη ζώνη διέλευσης στη ζώνη αποκοπής. Είναι φανερό ότι το εύρος ζώνης είναι στενότερο για μετασχηματιστές που εμφανίζουν απότομη μετάβαση ($f_2' - f_1'$) σε σχέση με αυτούς που εμφανίζουν ομαλότερη μετάβαση ($f_2 - f_1$). Επίσης, στο Σχήμα 5.3 απεικονίζονται και οι τρεις βασικές ζώνες λειτουργίας του μετασχηματιστή – ζώνες χαμηλών μέσων και υψηλών συχνοτήτων [7].



Σχήμα 5.3 Τυπικές καμπύλες απωλειών για φερριτικούς πυρήνες ως προς τη συχνότητα

Οι συχνότητες αποκοπής καθορίζονται από τις εκάστοτε απαιτήσεις λειτουργίας του ευρυζωνικού μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα. Συνεπώς, η f_1 μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 10 MHz ή μικρότερη από 300Hz. Επίσης, το εύρος ζώνης μπορεί να ποικίλλει από μερικές εκατοντάδες Hertz έως εκατοντάδες MHz. Μία τυπική προσέγγιση για τη σχεδίαση ενός μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα προσδιορίζει την εξασθένηση που πρέπει να εμφανίζει στη ζώνη (συχνοτήτων) διέλευσης και την απόσβεση στις συχνότητες αποκοπής f_1 και f_2 . Στην ουσία, ο μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα λειτουργεί ως (ρυθμιζόμενο) ζωνοπερατό φίλτρο που επιτρέπει να εγχέεται/εξάγεται η ζώνη συχνοτήτων που εκάστοτε ενδιαφέρει.

Ο μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα μπορεί να περιγραφεί κυκλωματικά με το ισοδύναμο κύκλωμα που χρησιμοποιείται για κάθε μετασχηματιστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.4 [7].



Σχήμα 5.4 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή

Όπου:

E_a = πηγή τροφοδοσίας, στην περίπτωση που εξετάζει η παρούσα εργασία είναι το PLC modem

R_a = αντίσταση πηγής τροφοδοσίας, δηλαδή η αντίσταση εισόδου του PLC modem

C_1 = χωρητικότητα μεταξύ των περιελίξεων/στροφών του πρωτεύοντος πηνίου

R_1 = αντίσταση του πρωτεύοντος πηνίου

L_{11} = αυτεπαγωγή διαρροής (leakage inductance) πρωτεύοντος πηνίου

L_p = επαγωγή ανοιχτοκυκλώματος – απώλειες επαγωγής του πυρήνα

R_p = αντίσταση που αντιπροσωπεύει τις απώλειες του πυρήνα

Οι παράμετροι του δευτερεύοντος πηνίου έχουν μεταφερθεί στη πλευρά του πρωτεύοντος:

C_{2}' = χωρητικότητα μεταξύ των στροφών του δευτερεύοντος πηνίου

R_{2}' = αντίσταση του δευτερεύοντος πηνίου

L_{12}' = αυτεπαγωγή διαρροής (leakage inductance) δευτερεύοντος πηνίου

R_b' = αντίσταση φορτίου

Στην πράξη, οι μετασχηματιστές δεν είναι ιδανικοί και η απόδοσή τους εξαρτάται σημαντικά από τα υλικά που έχουν χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του πυρήνα. Οι απώλειες μετάδοσης (transmission losses) και η χαμηλή συχνότητα αποκοπής (low frequency cutoff) εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από τη μέθοδο της κατασκευής του πυρήνα, την επιλογή του μαγνητικού υλικού και τον αριθμό των περιελίξεων ή το μήκος των αγωγών/καλωδίων. Οι επιλογές αυτές καθορίζουν τελικά τις παρασιτικές αντιδράσεις (parasitic reactances) που επηρεάζουν την απόδοση στις υψηλές συχνότητες, οι οποίες περιλαμβάνουν, ωμικές απώλειες, αυτεπαγωγή διαρροής (leakage inductance), χωρητικότητα μεταξύ των δύο πηνίων (interwinding capacitance) και την αυτοχωρητικότητα των πηνίων (χωρητικότητα μεταξύ των περιελίξεων του ίδιου πηνίου), χωρίς όμως να περιορίζονται μόνο σε αυτά.

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 5.4 οι σε σειρά αντιστάσεις R_1 και R_2' αντιπροσωπεύουν τις απώλειες που προκαλούνται από τις αντιστάσεις των αγωγών του πρωτεύοντος και δευτερεύοντος πηνίου αντίστοιχα. Αυτές οι αντιστάσεις είναι μη-γραμμικές και αυξάνονται με την αύξηση της συχνότητας εξαιτίας του επιδερμικού φαινομένου (skin effect) του ίδιου του αγωγού. Επειδή οι ευρυζωνικοί μετασχηματιστές χρησιμοποιούν σιδηρομαγνητικούς/φερριτικούς πυρήνες, τα μήκη των αγωγών είναι μικρά και η συμβολή των ωμικών απωλειών λόγω της αντίστασης των αγωγών των τυλιγμάτων είναι πολύ μικρή (ειδικά όταν τα καλώδια είναι μεγάλου πάχους).

Η αντίσταση R_p αντιπροσωπεύει τις απώλειες υστέρησης και δινορευμάτων (hysteresis and eddy current losses) που προκαλούνται από το σιδηρομαγνητικό/φερριτικό υλικό σε όλο το εύρος συχνοτήτων. Εντούτοις, η αντίσταση R_p είναι καθοριστικής σημασίας σε μετασχηματιστές που λειτουργούν κοντά στο συντονισμό του φερριτικού υλικού (ferroresonance) του πυρήνα. Αυτός είναι ένας σοβαρός παράγοντας για τη σχεδίαση μετασχηματιστών που χρησιμοποιούνται σε υψηλές και πολύ υψηλές συχνότητες (HF and VHF) και ως εκ τούτου απαιτείται ορθή επιλογή των υλικών του πυρήνα.

Η επίδοση του μετασχηματιστή κοντά στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής καθορίζεται κυρίως από τη μαγνητική διαπερατότητα (permeability) του υλικού του πυρήνα. Η επαγωγή L_p του Σχήματος 5.4 σχετίζεται άμεσα με τη μαγνητική διαπερατότητα και αποτελεί τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει τη συμπεριφορά του μετασχηματιστή στο εύρος συχνοτήτων κοντά στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής [7].

Η απόδοση του μετασχηματιστή κοντά στην υψηλή συχνότητα αποκοπής επηρεάζεται από το γεγονός ότι το σύνολο της ροής που παράγεται στο ένα πηνίο δεν επάγεται πλήρως στο άλλο πηνίο. Το φαινόμενο αυτό είναι γνωστό ως διαρροή. Η διαρροή αυτή περιγράφεται κυκλωματικά μέσω των αυτεπαγωγών διαρροής L_{11} και L_{12} του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου, αντίστοιχα. Δεδομένου ότι η διαρροή της μαγνητικής ροής γίνεται κυρίως προς τον αέρα, οι αυτεπαγωγές διαρροής L_{11} και L_{12}' είναι ουσιαστικά σταθερές.

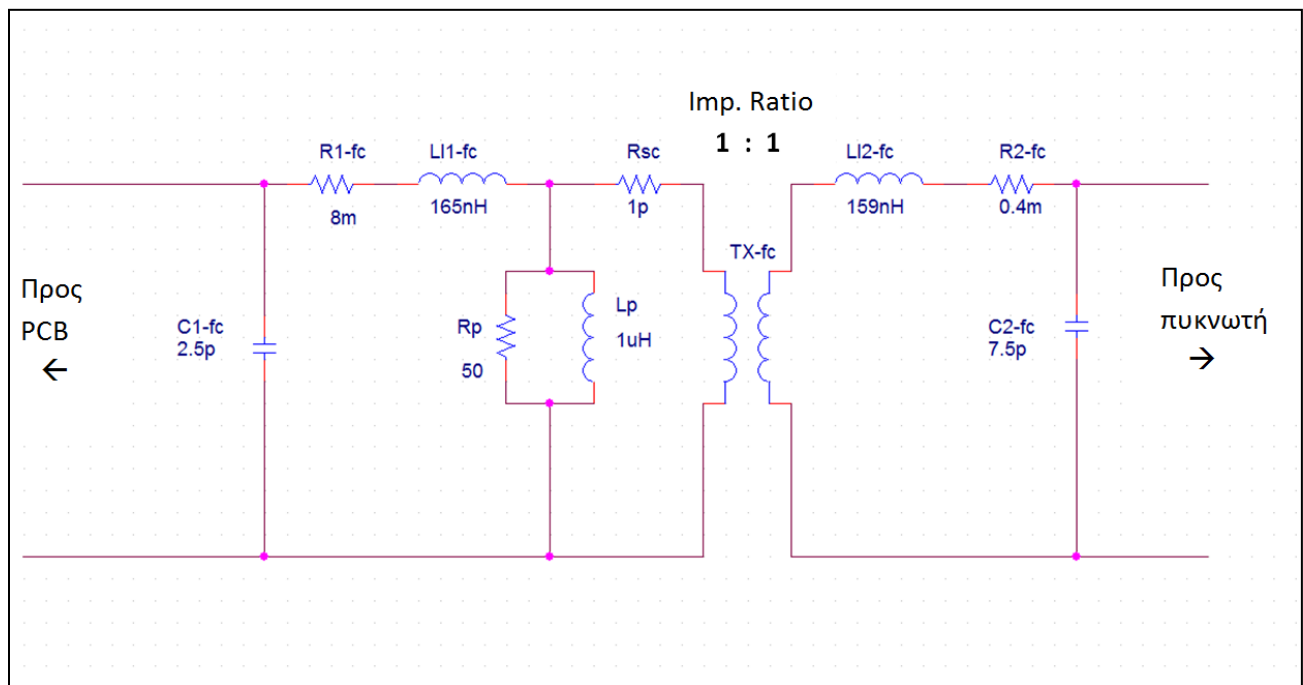
Οι χωρητικότητες που σχετίζονται με ευρυζωνικούς μετασχηματιστές είναι στην πραγματικότητα κατανεμημένες. Ως εκ τούτου είναι δύσκολη η διατύπωση μαθηματικών υποδειγμάτων και μοντέλων. Προς τούτο, θεωρούνται συγκεντρωμένες (lumped) χωρητικότητες. Στο Σχήμα 5.4, οι πυκνωτές C_1 και C_2' περιγράφουν ως συγκεντρωμένα στοιχεία τις χωρητικότητες των περιελίξεων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος πηνίου, αντίστοιχα. Στην πραγματικότητα, κάθε περιέλιξη του πηνίου και κάθε χωρητικότητα ανάμεσα σε δύο περιελίξεις σχηματίζουν ένα συντονισμένο κύκλωμα που μπορεί να συντονισθεί, καθώς μεταβάλλονται οι συχνότητες στις οποίες λειτουργεί ο μετασχηματιστής. Επίσης, στην πραγματικότητα υπάρχει και μια τρίτη χωρητικότητα C_{12} η οποία περιγράφει τη χωρητικότητα ανάμεσα στο πρωτεύον και το δευτερεύον πηνίο (interwinding capacitance) που δεν είναι αμελητέα σε εφαρμογές μετασχηματιστών όπως η παρούσα [8]. Εντούτοις, για αποφυγή της πολυπλοκότητας, η χωρητικότητα C_{12} δε θα συμπεριληφθεί στην παρούσα μελέτη.

Το βέλτιστο φερριτικό υλικό για ευρυζωνικούς μετασχηματιστές είναι εκείνο που έχει την υψηλότερη αρχική μαγνητική διαπερατότητα στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής f_1 . Οι φερριτικοί πυρήνες από μαγγάνιο και ψευδάργυρο (MnZn) είναι κατάλληλοι για μετασχηματιστές που λειτουργούν στις χαμηλές και μεσαίες συχνότητες, δηλαδή κάτω από 500kHz. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παράμετρος που επηρεάζει άμεσα τη χαμηλή συχνότητα αποκοπής f_1 του μετασχηματιστή και κατά συνέπεια το ζωνοπερατό εύρος του είναι η επαγωγική ηλεκτρική αντίσταση $X_p (= \omega L_p)$ η οποία αυξάνεται με τη συχνότητα όσο η διαπερατότητα του υλικού παραμένει σταθερή ή μειώνεται με ρυθμό μικρότερο σε σχέση με τη συχνότητα. Για ευρυζωνικούς μετασχηματιστές που χρησιμοποιούν για φερριτικό υλικό μαγγάνιο και ψευδάργυρο, η γεωμετρία του πυρήνα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να ελαχιστοποιείται ο λόγος R_{DC} / L . Δηλαδή, ο λόγος της dc αντίστασης των αγωγών (καλωδίων) και του πυρήνα προς την αυτεπαγωγή για μια μοναδική περιέλιξη πρέπει να είναι ελάχιστος.

Για συχνότητες υψηλότερες των 500kHz, οι περισσότεροι μετασχηματιστές χρησιμοποιούν νικέλιο και ψευδάργυρο (NiZn) ως προτιμώμενο υλικό φερριτικού πυρήνα. Στις συχνότητες αυτές, πρέπει να ληφθούν υπόψη συγκεκριμένες παράμετροι του φερριτικού πυρήνα που είναι περισσότερο πολύπλοκες από ό,τι είναι στις χαμηλότερες συχνότητες. Επίσης, οι εφαρμογές των μετασχηματιστών αυτών δεν απαιτούν μεγάλου μήκους καλώδια, άρα η ελάττωση του λόγου R_{DC} / L είναι δεδομένη [7].

Άρα, η σχεδίαση των μετασχηματιστών για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων πρέπει να επικεντρωθεί στο σχήμα και στο υλικό του πυρήνα για την εκάστοτε επιθυμητή συμπεριφορά στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής f_1 και στη μείωση της αυτεπαγωγής διαρροής και των χωρητικότητων των περιελίξεων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι τελευταίες παράμετροι είναι αυτές που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του μετασχηματιστή κοντά στην υψηλή συχνότητα αποκοπής f_2 . Η μείωσή τους μπορεί να επιτευχθεί με την τοποθέτηση των περιελίξεων των πηνίων όσο το δυνατόν πλησιέστερα καθώς και με τη μείωση της απόστασης του πρωτεύοντος από το δευτερεύον πηνίο. Εντούτοις, αυτό είναι ανεπιθύμητο στη συγκεκριμένη περίπτωση για λόγους ασφάλειας ολόκληρης της διάταξης, παρά τις επιπλέον απώλειες. Τέλος, όσον αφορά το σχήμα του πυρήνα, αυτό που θεωρείται προτιμητέο για εφαρμογές υψηλών συχνοτήτων είναι το δακτυλιοειδές [7].

Στο Σχήμα 5.5 απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα του μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα, όπως σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης (κάθε παράμετρος θεωρείται ανηγμένη στη μεριά της).



Σχήμα 5.5 Ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα στο OrCAD

5.3.2 Υπολογισμός τιμών εκκίνησης (default values)

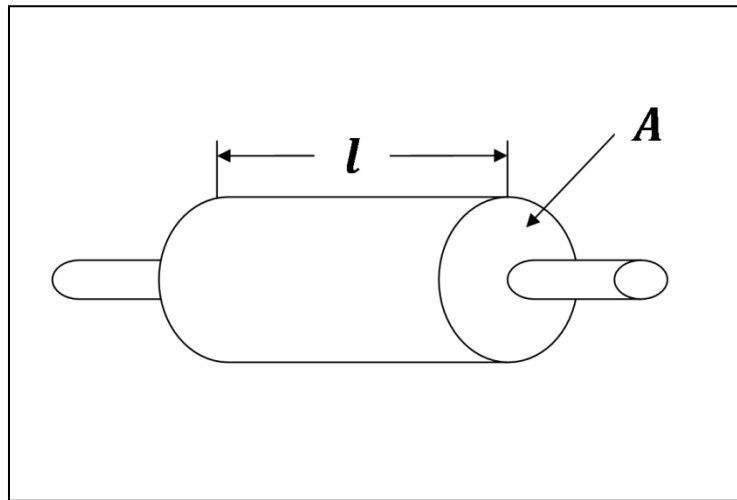
Για το υπόλοιπο της εργασίας, πρωτεύον πηνίο είναι αυτό που βρίσκεται στην πλευρά του PCB και δευτερεύον πηνίο είναι αυτό που βρίσκεται στην πλευρά του πυκνωτή. Οι τιμές εκκίνησης (default values) των παραμέτρων του Σχήματος 5.5 υπολογίσθηκαν με βάση τα ακόλουθα δεδομένα:

Το πρωτεύον πηνίο είναι ένα καλώδιο χαλκού διαμέτρου περίπου 0.9mm (20 SWG) και μήκους περίπου 300mm που φέρει 5 περιελίξεις περί το φερριτικό πυρήνα. Το δευτερεύον πηνίο είναι ένα καλώδιο χαλκού διαμέτρου περίπου 4.9mm (6 SWG) και μήκους περίπου 450mm που φέρει 5 περιελίξεις περί το φερριτικό πυρήνα. Ο φερριτικός πυρήνας έχει τις εξής διαστάσεις: 6.1cm εξωτερική διάμετρο, 3.6cm εσωτερική διάμετρο, 1.3cm πάχος.

Για τον υπολογισμό των αντιστάσεων $R1-fc$ και $R2-fc$ έχει χρησιμοποιηθεί η σχέση

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (5.1)$$

όπου ρ η ειδική ηλεκτρική αντίσταση του υλικού, l το μήκος του καλωδίου και A το εμβαδό της διατομής του καλωδίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.6.



Σχήμα 5.6 Υπολογισμός αντίστασης

Επειδή και τα δυο καλώδια είναι κατασκευασμένα από χαλκό, $\rho = 1.7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$

Για το πρωτεύον καλώδιο, $l_1 = 3 \cdot 10^{-1} m$ και $A_1 = \pi \cdot \left(\frac{0.9 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \approx 0.636 \cdot 10^{-6} m^2$

Για το δευτερεύον καλώδιο, $l_1 = 4.5 \cdot 10^{-1}m$ και $A_1 = \pi \cdot \left(\frac{4.9 \cdot 10^{-3}}{2}\right)^2 \approx 18.85 \cdot 10^{-6}m^2$

Αντικαθιστώντας στην (5.1), οι αντιστάσεις των καλωδίων προκύπτουν ως εξής:

$$R1-fc \approx 8m\Omega \quad \text{και} \quad R2-fc \approx 0.4m\Omega$$

Αξίζει να επισημανθεί ότι το καλώδιο που σχηματίζει το δευτερεύον πηνίο δεν έχει μήκος μόνο 45cm. Μετά τις περιελίξεις περί το φερριτικό πυρήνα, το καλώδιο αυτό διασχίζει το στύλο επί του οποίου είναι εγκατεστημένος ο χωρητικός συζεύκτης έτσι ώστε να γειωθεί. Το ύψος του στύλου είναι ενδεχομένως 4 έως 5m. Εντούτοις, το επιπλέον αυτό μήκος του καλωδίου δεν λαμβάνεται υπόψη στη συγκεκριμένη μελέτη διότι, στην ουσία, δεν επηρεάζει τη σύζευξη όσο το μήκος του καλωδίου που βρίσκεται περί το φερριτικό πυρήνα.

Για τον υπολογισμό των αυτεπαγωγών διαρροής $L11-fc$ και $L12-fc$ έχει χρησιμοποιηθεί η εμπειρική σχέση

$$L_{wire} = 0.003 \cdot \left[2.3 \cdot \text{LOG} \left(\left(4 \cdot \frac{1inch}{d_w} \right) - 0.75 \right) \right] \left(\frac{\mu H}{inch} \right) \quad (5.2)$$

όπου d_w είναι η διάμετρος της διατομής του καλωδίου σε ίντσες [9].

Για το πρωτεύον καλώδιο, $d_{w1} = 0.036 inch$ και $L_{wire,1} \approx 0.014\mu H/inch$, ενώ το μήκος του καλωδίου είναι $l_1 = 30cm \approx 11.8 inch$. Επομένως, η αυτεπαγωγή διαρροής του πρωτεύοντος καλωδίου είναι

$$L11-fc \approx 0,165\mu H = 165nH$$

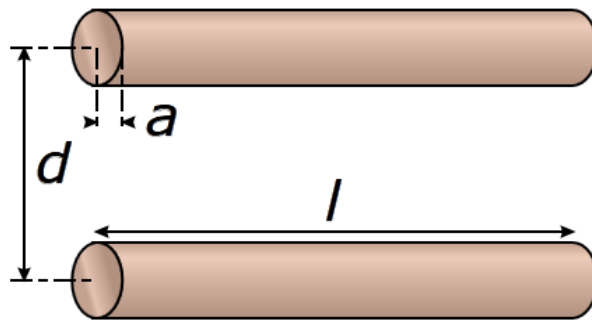
Για το δευτερεύον καλώδιο, $d_{w2} = 0.192 inch$ και $L_{wire,2} \approx 0.009\mu H/inch$, ενώ το μήκος του καλωδίου είναι $l_2 = 45cm \approx 17.7 inch$. Επομένως, η αυτεπαγωγή διαρροής του δευτερεύοντος καλωδίου είναι

$$L12-fc \approx 0,159\mu H = 159nH$$

Για τον υπολογισμό των χωρητικότητων των πηνίων $C1-fc$ και $C2-fc$ έγιναν οι εξής παραδοχές:

- Κάθε περιέλιξη του καλωδίου περί το φερριτικό πυρήνα δημιουργεί χωρητικότητα μόνο με τη γειτονική της περιέλιξη. Λόγω της παράλληλης τοποθέτησής τους στο ισοδύναμο κύκλωμα, η συνολική χωρητικότητα του πηνίου είναι το άθροισμα των χωρητικότητων αυτών, οι οποίες μπορούν πρακτικά να θεωρηθούν μεταξύ τους ίσες. Ως εκ τούτου, αρκεί να υπολογισθεί μόνο η χωρητικότητα ανάμεσα σε δύο περιελίξεις.

• Κάθε περιέλιξη θεωρείται ως ορθογώνιο, έκαστη των τεσσάρων ακμών/πλευρών του οποίου (έσω, έξω, άνω, κάτω) έχει πάχος/πλάτος ίσο με τη διάμετρο του καλωδίου. Τα ορθογώνια δύο διπλανών περιελίξεων είναι τοποθετημένα παράλληλα ως προς τις εσωτερικές και τις εξωτερικές τους ακμές/πλευρές, όχι όμως ως προς τις άνω και κάτω ακμές/πλευρές τους, αφού ο φερριτικός πυρήνας είναι κυκλικού σχήματος. Κάθε πλευρά/ακμή του ορθογωνίου που αντιστοιχεί σε τμήμα του καλωδίου δημιουργεί χωρητικότητα με την αντίστοιχη πλευρά του ορθογωνίου της γειτονικής περιέλιξης. Άρα, η χωρητικότητα ανάμεσα σε δύο περιελίξεις αναλύεται σε τέσσερις χωρητικότητες που προκύπτουν από έκαστη πλευρά/ακμή του ορθογωνίου με την αντίστοιχη πλευρά/ακμή του γειτονικού ορθογωνίου. Για το λόγο αυτό θα χρησιμοποιηθεί η σχέση (5.3) που υπολογίζει τη χωρητικότητα ανάμεσα σε ένα ζεύγος παραλλήλων καλωδίων, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 5.7 [10].



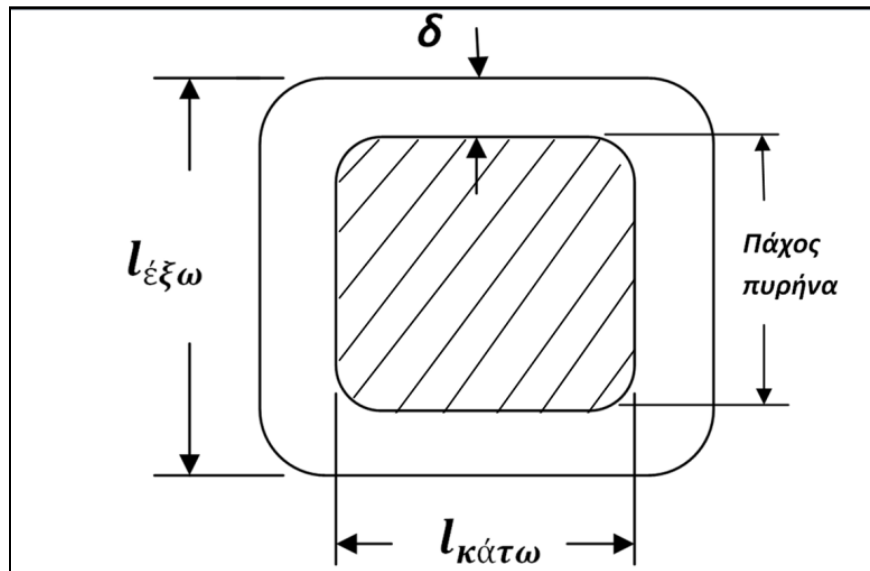
Σχήμα 5.7 Χωρητικότητα μεταξύ δύο παραλλήλων αγωγών

$$C_{wire} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot l}{\operatorname{arcosh}\left(\frac{d}{2a}\right)} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{d}{2a} + \sqrt{\frac{d^2}{4a^2} - 1}\right)} = \frac{\pi \cdot \epsilon \cdot l}{\ln\left(\frac{d}{\delta} + \sqrt{\frac{d^2}{2\delta^2} - 1}\right)} \quad (5.3)$$

όπου

$\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = \epsilon_0 \approx 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$, αφού $\epsilon_r = 1$ για το κενό, $l =$ μήκος καλωδίου,
 $d =$ απόσταση μεταξύ των κέντρων των καλωδίων και $\delta = 2a =$ διάμετρος καλωδίου

- Η (5.3) μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο για το εσωτερικό και εξωτερικό ζεύγος καλωδίων, τα οποία είναι παράλληλα μεταξύ τους. Εντούτοις, τα άνω και κάτω τμήματα του καλωδίου δύο γειτονικών περιελίξεων μπορούν να θεωρηθούν παράλληλα, με τη μεταξύ τους απόσταση ίση με το μισό της πραγματικής τους απόστασης.



Σχήμα 5.8 Εγκάρσια/Κάθετη τομή πυρήνα

Είναι εμφανές από το Σχήμα 5.8 ότι $l_{\xi\omega} = l_{\mu\epsilon\sigma\alpha} = \text{πάχος πυρήνα} + 2\delta = 13\text{mm} + 2 \cdot \delta$

και ότι $l_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega} = l_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega} = \frac{\text{εξ.διαμ.πυρήνα} - \text{εσ.διαμ.πυρήνα}}{2} = \frac{61\text{mm} - 36\text{mm}}{2} = 12.5\text{mm}$

Για το πρωτεύον πηνίο έγιναν οι εξής μετρήσεις:

$$d_{\xi\omega,1} = 8\text{mm}, \quad d_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,1} = d_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,1} = 6\text{mm}, \quad d_{\mu\epsilon\sigma\alpha,1} = 4\text{mm}$$

Με βάση την (5.3), για $\delta_1 = 0.9$ και

$$l_{\xi\omega,1} = 14.8\text{mm}, \text{ προκύπτει ότι } C_{\xi\omega,1} \approx 0.15\text{pF}$$

$$l_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,1} = l_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,1} = 12.5\text{mm}, \text{ προκύπτει ότι } C_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,1} = C_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,1} \approx 0.14\text{pF}$$

$$l_{\mu\epsilon\sigma\alpha,1} = 14.8\text{mm}, \text{ προκύπτει ότι } C_{\mu\epsilon\sigma\alpha,1} \approx 0.19\text{pF}$$

Άρα, η χωρητικότητα C_1 μεταξύ δύο γειτονικών περιελίξεων του πρωτεύοντος καλωδίου προκύπτει

$$C_1 = C_{\xi\omega,1} + C_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,1} + C_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,1} + C_{\mu\epsilon\sigma\alpha,1} \approx 0,62\text{pF}$$

Αφού το πρωτεύον καλώδιο φέρει πέντε περιελίξεις περί τον πυρήνα, οι χωρητικότητες C_1 που δημιουργούνται είναι τέσσερις, οπότε η χωρητικότητα μεταξύ των περιελίξεων του πρωτεύοντος πηνίου προκύπτει

$$C1-fc \approx 2.5pF.$$

Ομοίως, για το δευτερεύον πηνίο, έγιναν οι εξής μετρήσεις:

$$d_{\xi\omega,2} = 15mm, \quad d_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,2} = d_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,2} = 10mm, \quad d_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\alpha,2} = 6mm$$

Με βάση την (5.3), για $\delta_2 = 4.9$ και

$$l_{\xi\omega,2} = 23mm, \text{ προκύπτει ότι } C_{\xi\omega,2} \approx 0.36pF$$

$$l_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,2} = l_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,2} = 12.5mm, \text{ προκύπτει ότι } C_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,2} = C_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,2} \approx 0.26pF$$

$$l_{\mu\acute{\epsilon}\sigma\alpha,2} = 23mm, \text{ προκύπτει ότι } C_{\xi\omega,2} \approx 1pF$$

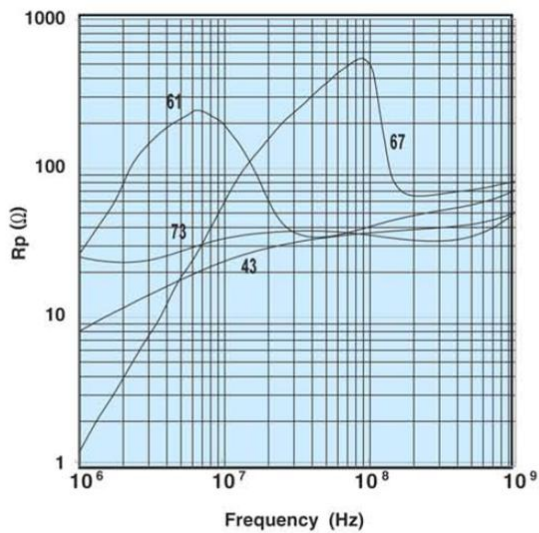
Άρα, η χωρητικότητα C_2 μεταξύ δύο γειτονικών περιελίξεων του δευτερεύοντος καλωδίου προκύπτει

$$C_2 = C_{\xi\omega,2} + C_{\pi\acute{\alpha}\nu\omega,2} + C_{\kappa\acute{\alpha}\tau\omega,2} + C_{\xi\omega,2} \approx 1,88pF$$

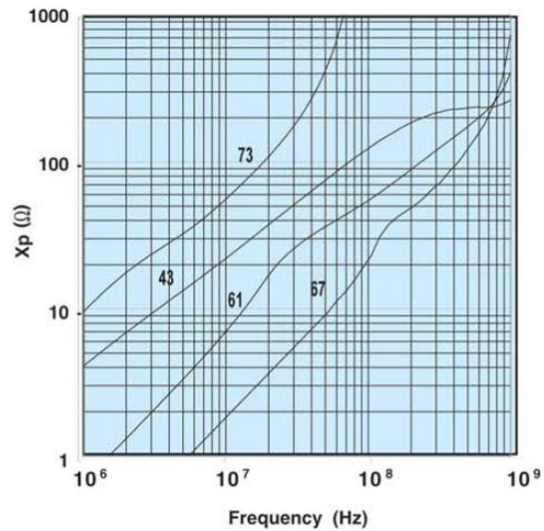
Αφού το πρωτεύον καλώδιο φέρει πέντε περιελίξεις γύρω από τον πυρήνα, οι χωρητικότητες C_1 που δημιουργούνται είναι τέσσερις, οπότε η χωρητικότητα μεταξύ των περιελίξεων του πρωτεύοντος πηνίου προκύπτει:

$$C2-fc \approx 7.5pF.$$

Οι παράμετροι Rp και Lp επηρεάζουν δραστικά τη λειτουργία και τη συμπεριφορά του φερριτικού πυρήνα. Εξαρτώνται από το μείγμα υλικών, το σχήμα, το μέγεθος και γενικότερα τον τρόπο κατασκευής του φερριτικού πυρήνα. Η συμπεριφορά τους ως συνάρτηση της συχνότητας στο εύρος λειτουργίας του φερριτικού πυρήνα περιγράφεται από τους κατασκευαστές υπό τη μορφή των καμπυλών του Σχήματος 5.9 όπου απεικονίζονται καμπύλες για τα Rp και Xp για τέσσερα είδη πυρήνων [7].



Parallel resistance vs. frequency for part number 28—002302 in 73, 43, 61 & 67 material.



Parallel reactance vs. frequency for part number 28—002302 in 73, 43, 61 & 67 material.

Σχήμα 5.9 Καμπύλες R_p και X_p για τέσσερα είδη πυρήνων ως προς τη συχνότητα

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.9, οι παράμετροι R_p και X_p δεν παραμένουν σταθερές καθώς μεταβάλλεται η συχνότητα. Για αυτό το λόγο, επιλέχθηκαν ενδιάμεσες τιμές ως τιμές εκκίνησης του ισοδύναμου κυκλώματος του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη. Η R_p κυμαίνεται από 1Ω μέχρι 500Ω για το εύρος συχνοτήτων 1MHz-1GHz οπότε της δόθηκε τιμή εκκίνησης 50Ω . Για την X_p και την L_p ισχύει ότι

$$L_p = \frac{X_p}{2\pi f} \quad (5.4)$$

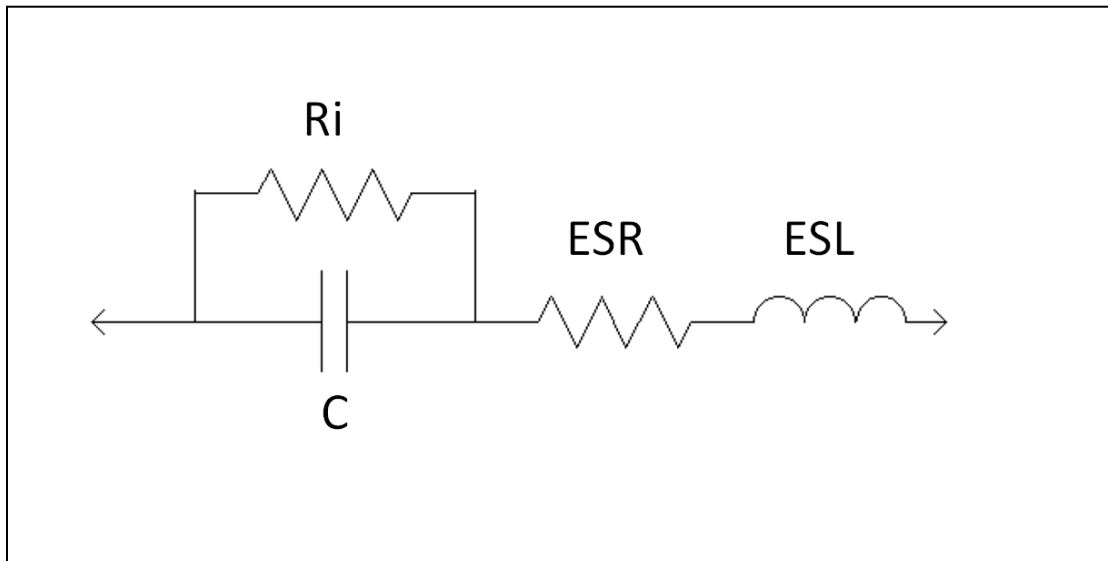
Δεδομένου του Σχήμα 5.9 και της (5.4) προκύπτει ότι η L_p κυμαίνεται από $0.1\mu\text{H}$ μέχρι $3\mu\text{H}$, στο εύρος συχνοτήτων 1MHz-1GHz. Ως εκ τούτου, της δόθηκε τιμή εκκίνησης $1\mu\text{H}$.

Είναι φανερό ότι για τις παραμέτρους R_p και L_p δεν μπορεί να γίνει ακριβής προσδιορισμός της τιμής τους. Εκτός του ότι είναι καθαρά κατασκευαστικές παράμετροι, εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό και από τη συχνότητα. Η επιλογή των τιμών αυτών εκκίνησης δε σημαίνει αποκλεισμό άλλων πιθανών τιμών. Αντιθέτως, χρειάζεται να γίνει διερεύνηση των τιμών για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του κυκλώματος, Η διερεύνηση και η ανάλυση αυτή (sensitivity analysis) παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 6.

Τέλος, η αντίσταση R_{sc} έχει τοποθετηθεί στο συγκεκριμένο σημείο που φαίνεται στο Σχήμα 5.5 διότι έτσι επιβάλλεται από το πρόγραμμα OrCAD PSpice για να εκτελεσθεί η προσομοίωση. Της έχει δοθεί τιμή $1p\Omega$ γιατί στην ουσία είναι βραχυκύκλωμα και δεν έπρεπε καν να υπάρχει.

5.4 Πυκνωτής – Πυκνωτική διάταξη

Στο Σχήμα 5.10 απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα ενός πυκνωτή που υιοθετείται συνήθως στη βιβλιογραφία γιατί περιγράφει ικανοποιητικά τη συμπεριφορά ενός πυκνωτή κάτω από τις περισσότερες συνθήκες. Εντούτοις, οι πραγματικοί πυκνωτές είναι περισσότερο πολύπλοκοι. Για παράδειγμα, το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 5.10 δεν αντανακλά την εξάρτηση του πυκνωτή από τη θερμοκρασία και τη συχνότητα. Επίσης, το μοντέλο αυτό δεν περιλαμβάνει τα παρασιτικά στοιχεία τα οποία ενδέχεται να είναι αρκετά σημαντικά για συχνότητες μεγαλύτερες της συχνότητας συντονισμού [11].



Σχήμα 5.10 Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή

Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 5.10

C είναι η ονομαστική χωρητικότητα πυκνωτή

R_i είναι η αντίσταση μόνωσης (*insulation resistance*)

Η αντίσταση μόνωσης είναι η αντίσταση του πυκνωτή στο DC ρεύμα σε συνθήκες μόνιμης κατάστασης (*steady-state conditions*). Αν και η θεωρητική τιμή της αντίστασης μόνωσης ενός πυκνωτή είναι άπειρη, η πραγματική τιμή της είναι μετρήσιμη, της τάξης των $M\Omega$ ή $G\Omega$. Για πυκνωτές με χωρητικότητα μικρότερη των $47nF$, η τιμή της αντίστασης μόνωσης υπερβαίνει τα $10G\Omega$.

ESR είναι η ισοδύναμη αντίσταση σειράς – *Equivalent Series Resistance*

Η ισοδύναμη αντίσταση σειράς περιλαμβάνει τρία είδη αντιστάσεων, την αντίσταση του καλωδίου και του τερματισμού αυτού, την αντίσταση ηλεκτροδίων και την αντίσταση που προκαλεί τις απώλειες του διηλεκτρικού. Στο συγκεκριμένο απλοποιημένο κύκλωμα η ισοδύναμη αντίσταση σειράς δεν μεταβάλλεται με τη συχνότητα. Στην πραγματικότητα, το επιδερμικό φαινόμενο (*skin effect*) μπορεί να

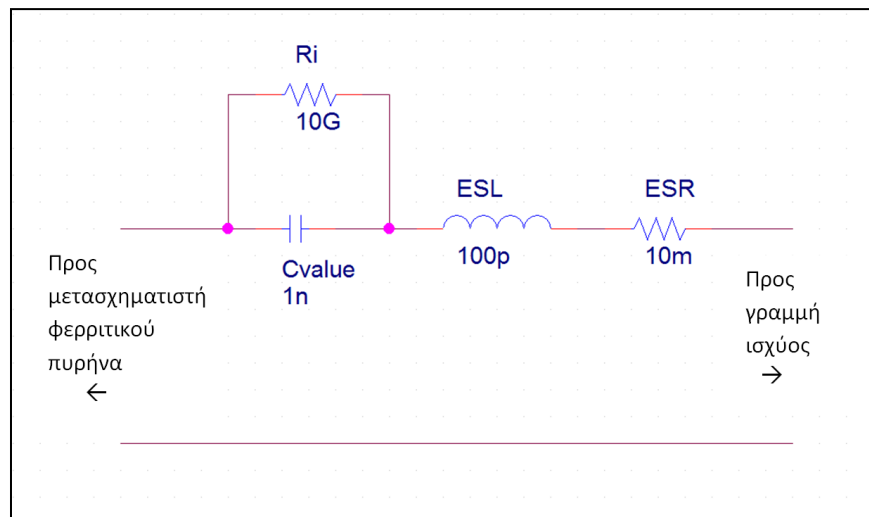
επηρεάζει αισθητά την απόδοση του πυκνωτή σε υψηλές συχνότητες. Επίσης, για τα περισσότερα υλικά, οι απώλειες του διηλεκτρικού εξαρτώνται από τη συχνότητα και τη θερμοκρασία.

ESL είναι η ισοδύναμη επαγωγή σειράς – Equivalent Series Inductance

Αντίστοιχα με την ισοδύναμη αντίσταση σειράς, η ισοδύναμη επαγωγή σειράς είναι η επαγωγή των καλωδίων του πυκνωτή καθώς και των άλλων στοιχείων που τον αποτελούν.

Ο MOV ARRESTER είναι πολύ καλός πυκνωτής και το ισοδύναμο κύκλωμα που τον περιγράφει είναι αρκετά απλό, παρόμοιο με του Σχήματος 5.10, με τα *ESR* και *ESL* να είναι πολύ μικρά και την R_i πολύ μεγάλη. Εντούτοις, η παρούσα εργασία υποθέτει ότι χρησιμοποιείται κεραμικός πυκνωτής ως πυκνωτής του χωρητικού συζεύκτη, επειδή οι κεραμικοί πυκνωτές έχουν συμπεριφορά που πλησιάζει αρκετά στην ιδανική συμπεριφορά ενός πυκνωτή. Η βασική διαφορά ανάμεσα στους ARRESTERS και στους κεραμικούς πυκνωτές είναι το διηλεκτρικό υλικό που χρησιμοποιούν [12]. Άρα, αν και φαινομενικά λειτουργούν όμοια, κάτι τέτοιο δεν ισχύει σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Συγκεκριμένα, στο MOV ARRESTER υπάρχουν αγώγιμες περιοχές των οποίων τα όρια είναι αυτά που παρέχουν μόνωση (insulation) υπό φυσιολογικές συνθήκες και τα οποία διαλύονται με την εφαρμογή πολύ υψηλής τάσης. Ως συνέπεια, η διηλεκτρική σταθερά στο MOV ARRESTER ενδεχομένως ποικίλλει ανάλογα με το σημείο του κύκλου στο οποίο βρίσκεται η εναλλασσόμενη τάση. Άρα, η χωρητικότητα ενός ARRESTER είναι μεγαλύτερη όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι μικρή και μειώνεται όσο η τάση αυξάνεται. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τους κεραμικούς πυκνωτές, διότι οι κεραμικοί πυκνωτές έχουν «πραγματικό» μονωτή, σε αντίθεση με τους ARRESTERS που έχουν αγώγιμες περιοχές με μονωτικά όρια.



Σχήμα 5.11 Ισοδύναμο κύκλωμα πυκνωτή στο OrCAD

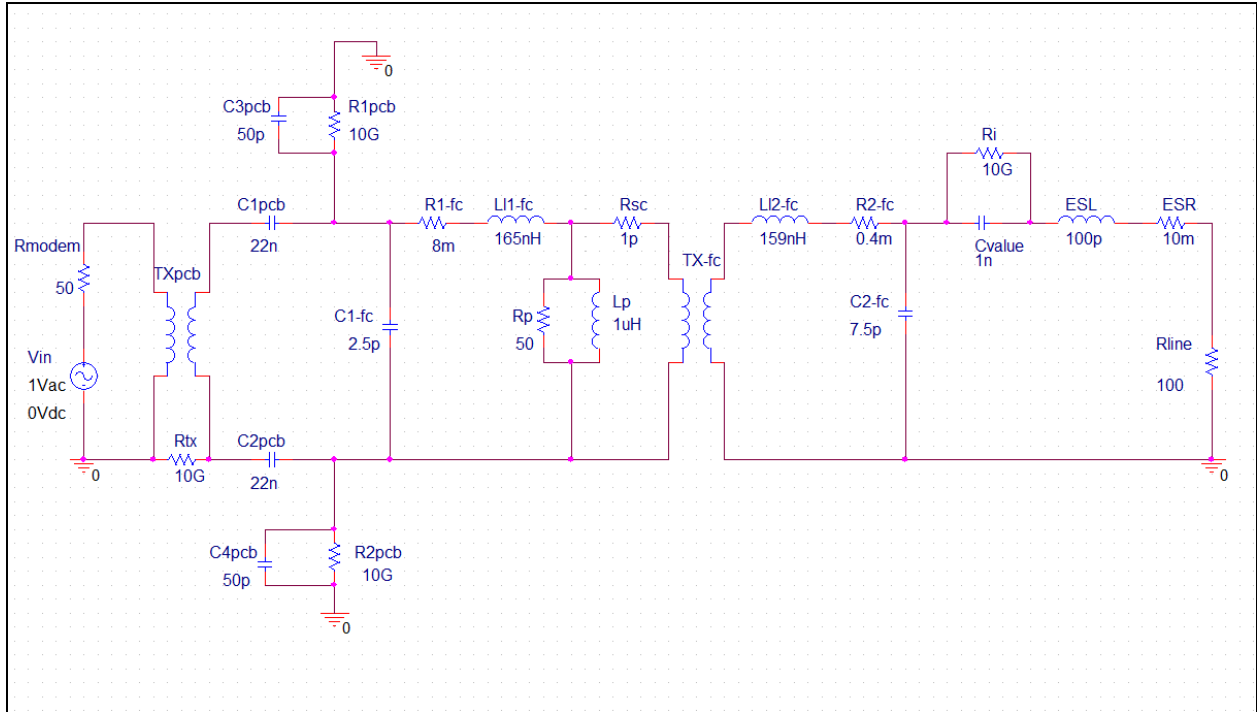
Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται το αντίστοιχο ισοδύναμο κύκλωμα του πυκνωτή που σχεδιάστηκε στο πρόγραμμα προσομοίωσης. Στο ισοδύναμο αυτό κύκλωμα:

- Η $Cvalue$ είναι η ονομαστική χωρητικότητα του πυκνωτή. Της έχει δοθεί αρχική τιμή 1nF διότι οι τιμές των πραγματικών πυκνωτών που χρησιμοποιούνται στους χωρητικούς συζεύκτες κυμαίνονται από μερικές δεκάδες ή εκατοντάδες pF μέχρι μερικά nF. Η τιμή της $Cvalue$ αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω (μέσω των προσομοιώσεων) ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη μεταφορά ισχύος στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων για την εκάστοτε εγκατάσταση ενός χωρητικού συζεύκτη σε γραμμές MT.
- Στην αντίσταση μόνωσης Ri έχει δοθεί πολύ μεγάλη τιμή (10GΩ) διότι στα περισσότερα φύλλα προδιαγραφών (datasheet) κεραμικών πυκνωτών η αντίσταση έχει τιμές μεγαλύτερες των 10GΩ.
- Για τις παραμέτρους ESR και ESL θεωρήθηκε σκόπιμο να μην υπολογισθούν αναλυτικά μιας και διαφοροποιούνται σημαντικά αντίστοιχα με την εγκατάσταση και το είδος του πυκνωτή που χρησιμοποιείται για τον εκάστοτε χωρητικό συζεύκτη. Εντούτοις, η τιμή της αντίστασης ESR δεν μπορεί να υπερβαίνει τις μερικές δεκάδες mΩ διότι τα καλώδια που χρησιμοποιούνται έχουν μεγάλο πάχος για λόγους ασφάλειας. Επίσης, η επαγωγή ESL είναι συνήθως της τάξης των pH ή και λιγότερο, σε σημείο που μερικές φορές μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα. Για τους ανωτέρω λόγους, στην αντίσταση ESR δόθηκε η τιμή 10mΩ και στην επαγωγή ESL η τιμή 100pF.

5.5 Συνολικό ισοδύναμο κύκλωμα του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη

Συνδέοντας τα ισοδύναμα κυκλώματα των τριών επιμέρους στοιχείων ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη προκύπτει το τελικό ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 5.12.

Στην αριστερή πλευρά του κυκλώματος, ενωμένο με το PCB, βρίσκεται το ομοαξονικό καλώδιο που οδηγεί στο modem. Η εναλλασσόμενη πηγή τάσης Vin αντιπροσωπεύει την αφετηρία του προς μετάδοση PLC σήματος που εγχέεται από το modem στη γραμμή MT. Το PLC σήμα περιγράφεται από ένα ημιτονοειδές σήμα για το οποίο ισχύουν: $Vac = 1V$ και $Vdc = 0V$. Η αντίσταση $Rmodem$ είναι η χαρακτηριστική αντίσταση εισόδου του modem και στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι 50Ω.



Σχήμα 5.12 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη στο OrCAD

Στη πραγματικότητα, η ισχύς του σήματος που εγχέεται από το modem στο χωρητικό συζεύκτη είναι -55dBm/Hz . Αυτό σημαίνει ότι στα 10MHz η ισχύς του σήματος είναι $15\text{dBm} = 32\text{mW}$. Το πλάτος της τάσης του σήματος στη συγκεκριμένη συχνότητα δίνεται από τη σχέση (5.4).

$$P = \frac{V^2}{R} \rightarrow V = \sqrt{P \cdot R} \quad (5.4)$$

Άρα, επειδή η αντίσταση της πηγής (R_{modem}) είναι 50Ω , για την πραγματική τάση εισόδου προκύπτει ότι $V \approx 1,265\text{V}$. Άρα, η τιμή $V_{\text{ac}} = 1\text{V}$ είναι αρκετά κοντά στην πραγματικότητα και έχει χρησιμοποιηθεί για λόγους απλότητας και διευκόλυνσης κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Στη δεξιά πλευρά του κυκλώματος, ενωμένη με τον πυκνωτή, βρίσκεται η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής R_{line} , στην οποία έχει δοθεί η τιμή των 100Ω . Συγκεκριμένα, γίνεται η υπόθεση ότι ο χωρητικός συζεύκτης έχει εγκατασταθεί περίπου στο μέσο μιας εναέριας γραμμής MT η οποία εμφανίζει χαρακτηριστική αντίσταση 200Ω και είναι προσαρμοσμένη στα άκρα της. Επομένως, ο συζεύκτης βλέπει τον παράλληλο συνδυασμό δύο αντιστάσεων 200Ω , δηλαδή 100Ω . Στην πραγματικότητα, η γραμμή ισχύος MT δεν έχει μόνο ωμική συμπεριφορά, αλλά και χωρητική και επαγωγική. Εντούτοις, στην παρούσα εργασία, η γραμμή MT θεωρείται προσαρμοσμένη στα άκρα της, οπότε περιγράφεται ως μια ωμική αντίσταση.

Κεφάλαιο 6

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στο Κεφάλαιο 5 δόθηκε η περιγραφή και η ανάλυση ενός απλού ισοδύναμου κυκλώματος βάσει του οποίου μπορεί να μελετηθεί η λειτουργία και η συμπεριφορά ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη που λειτουργεί σε συχνότητες από 3-50MHz. Το ισοδύναμο κύκλωμα της παρούσας μελέτης επιλέχθηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι απλό και κατανοητό και ταυτόχρονα όσο το δυνατό εγγύτερο στην πραγματικότητα.

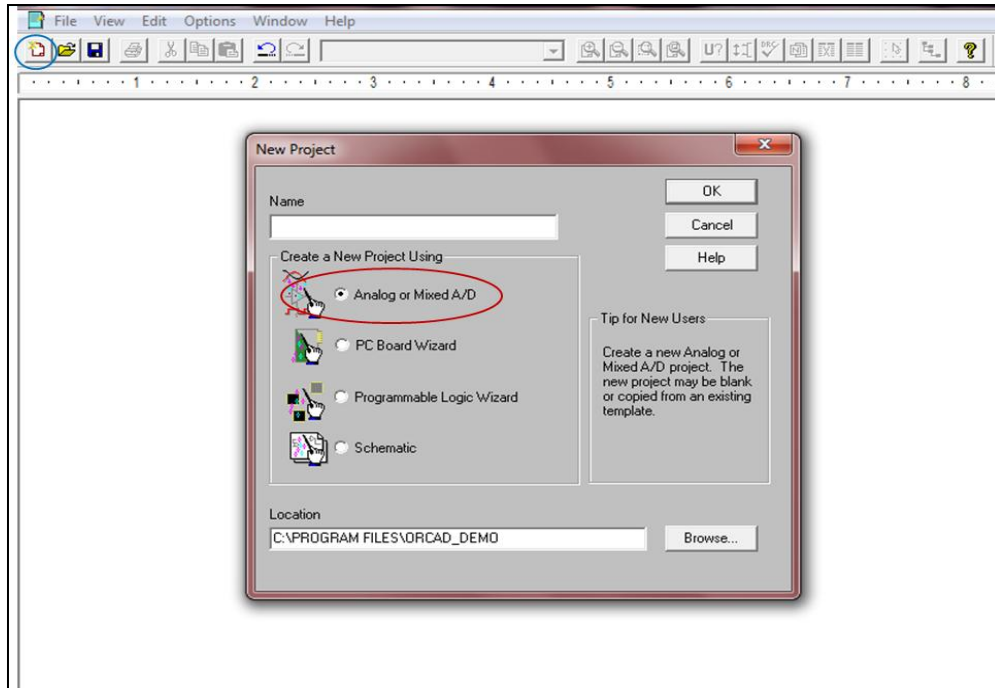
Πριν από την παρουσίαση και τη συζήτηση των αποτελεσμάτων αξίζει να γίνει σύντομη αναφορά στο πρόγραμμα προσομοίωσης που χρησιμοποιήθηκε.

6.1 Το πρόγραμμα προσομοίωσης OrCAD

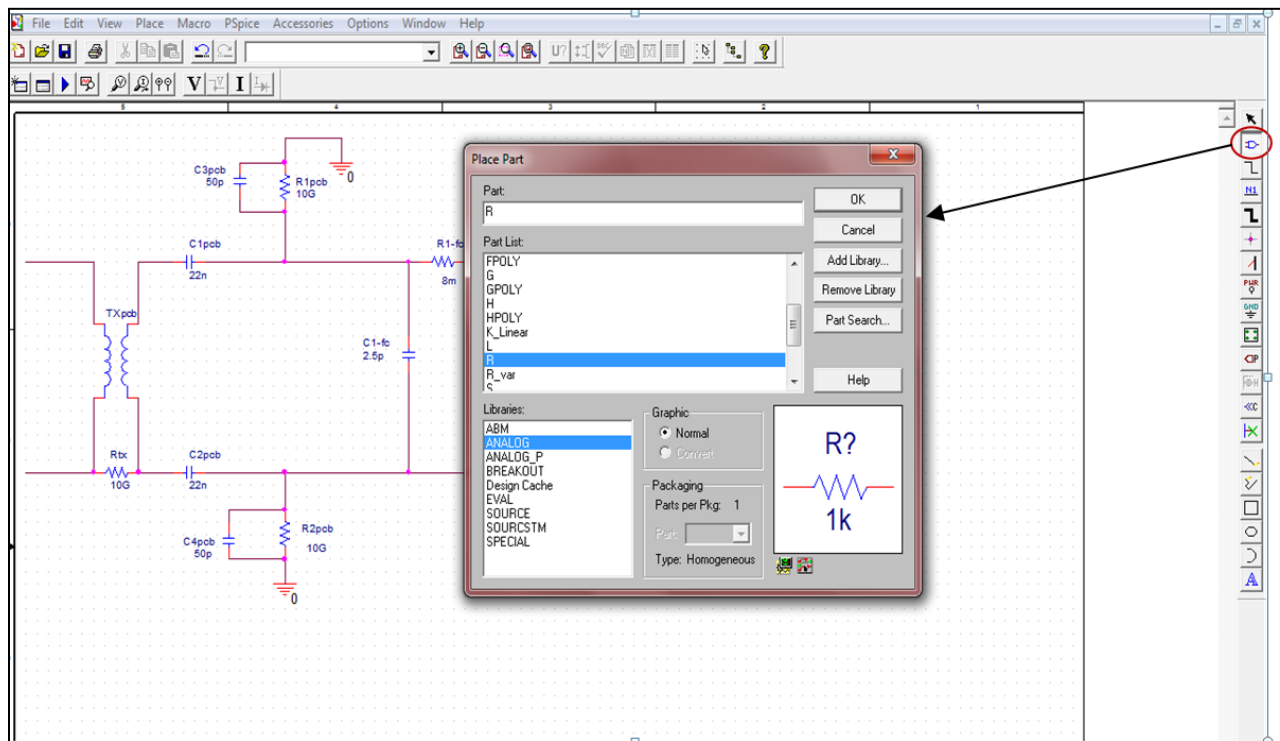
Η πλήρης ονομασία του προγράμματος που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του ισοδύναμου κυκλώματος είναι OrCAD Capture and PSpice. Το Capture είναι ένα πρόγραμμα που χρησιμοποιείται συστηματικά για τη σχεδίαση και τη σχηματική απεικόνιση ηλεκτρονικών κυκλωμάτων και το PSpice είναι το πρόγραμμα που εξομοιώνει το κύκλωμα που έχει σχεδιασθεί με το Capture. Η ακριβής έκδοση που χρησιμοποιήθηκε είναι η Student Version 9.1.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια είναι η εξής:

- Κατά την εκκίνηση του προγράμματος OrCAD Capture, επιλέγεται “Create New Project” έτσι ώστε να εμφανιστεί το παράθυρο “New Project”, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.1. Έπειτα, πρέπει να γίνει η επιλογή του “Analog or Mixed A/D” ειδάλλως δεν θα υπάρχει η δυνατότητα προσομοίωσης του κυκλώματος που θα σχεδιασθεί.
- Στη συνέχεια, οι έτοιμες βιβλιοθήκες του προγράμματος βοηθούν στην επιλογή οποιουδήποτε στοιχείου είναι αναγκαίο για τη σχεδίαση του επιθυμητού κυκλώματος, όπως φαίνεται από το Σχήμα 6.2. Τα ονόματα και οι τιμές των στοιχείων μπορούν να αλλάξουν πολύ εύκολα μέσω της σχετικής δυνατότητας που παρέχει ο καμβάς σχεδίασης του κυκλώματος.

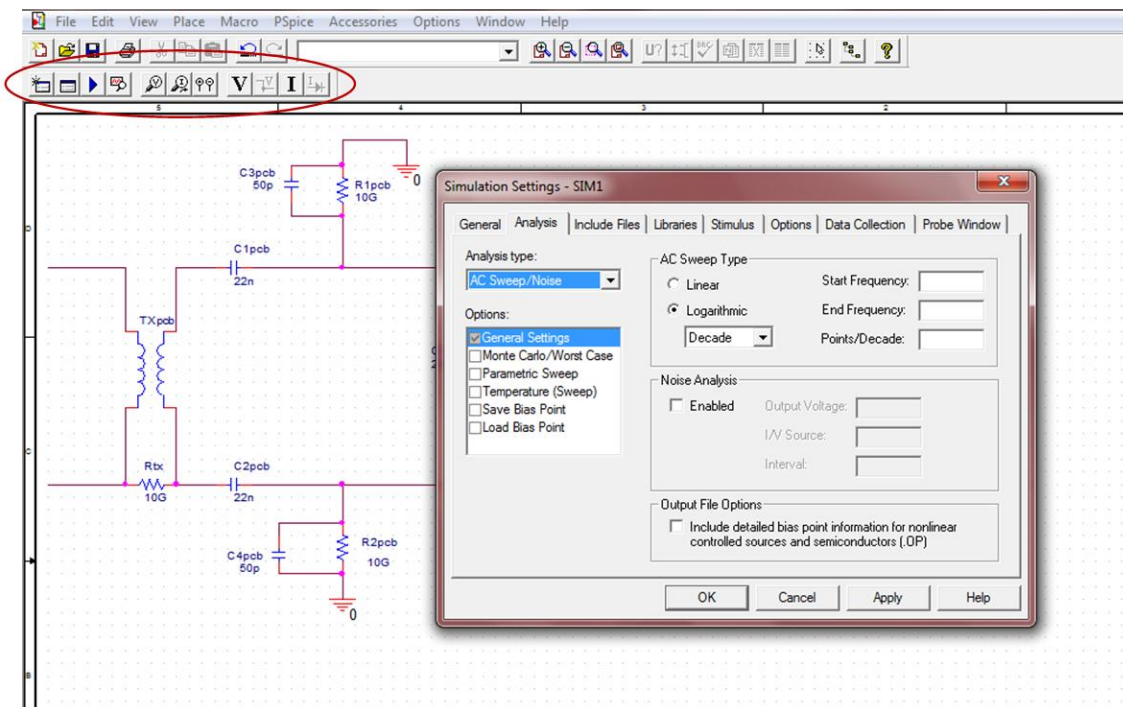


Σχήμα 6.1 Εκκίνηση προγράμματος προσομοίωσης OrCAD

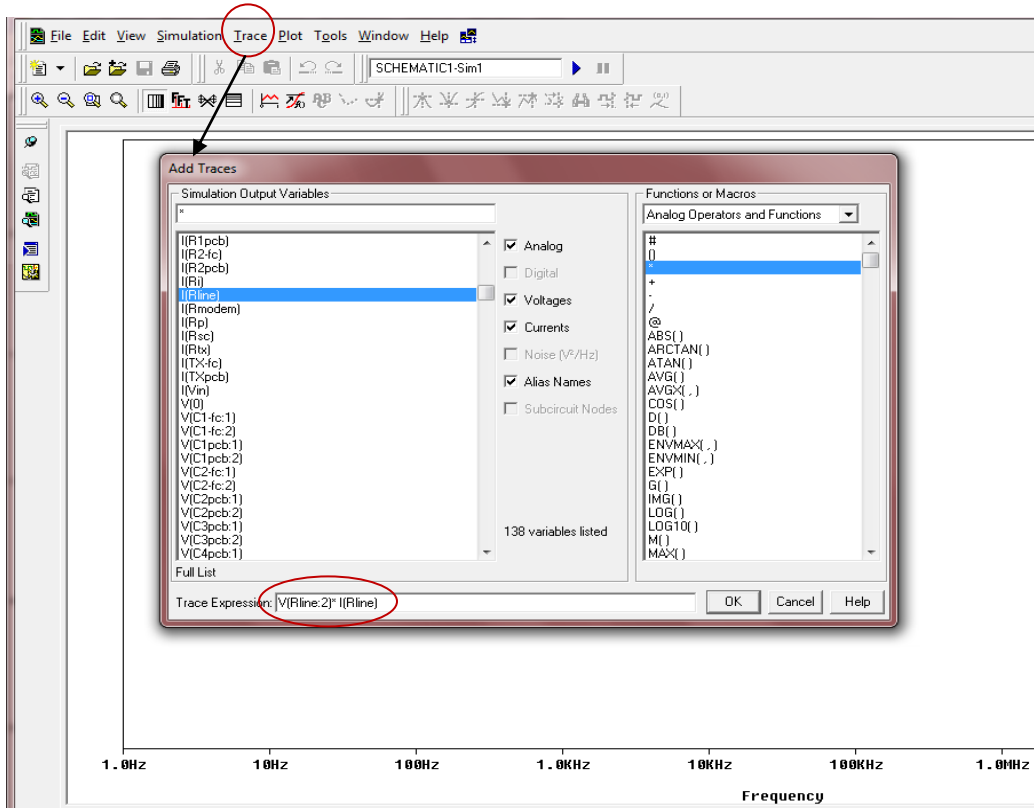


Σχήμα 6.2 Βιβλιοθήκες προγράμματος προσομοίωσης OrCAD

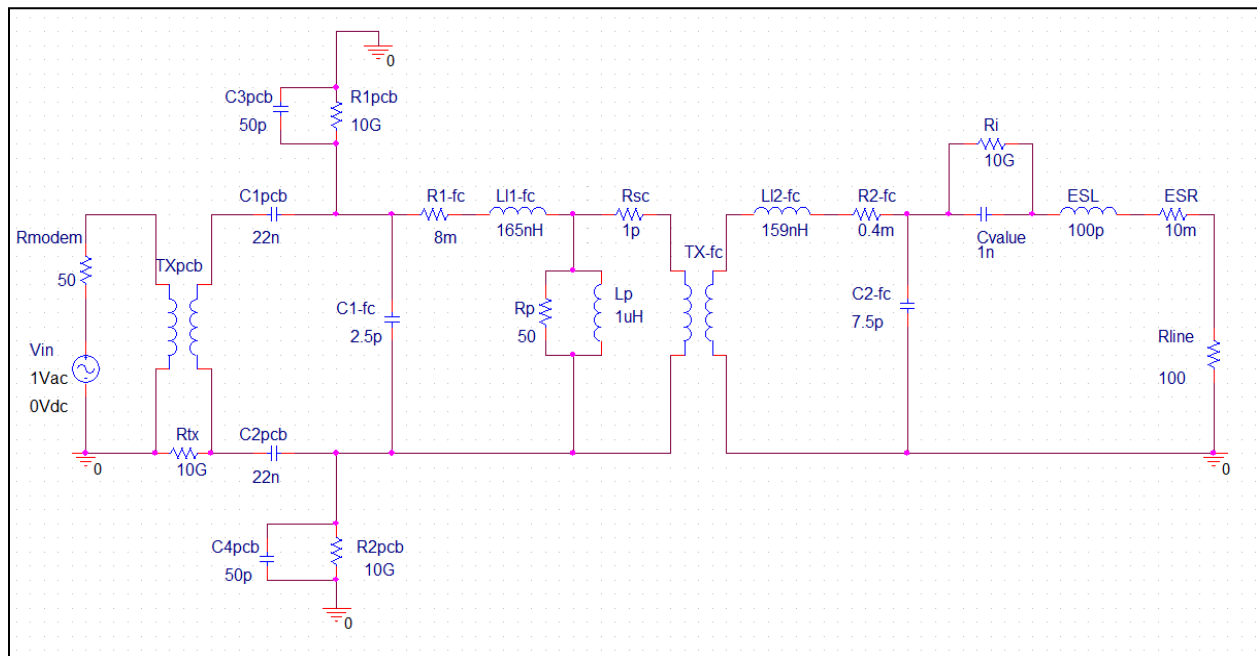
- Αφού ολοκληρωθεί η σχεδίαση του κυκλώματος, το επόμενο βήμα είναι η προσομοίωσή του. Η κυκλωμένη μπάρα που βρίσκεται πάνω και αριστερά στο Σχήμα 6.3 αφορά τις επιλογές της προσομοίωσης. Οι δύο πρώτες επιλογές αφορούν τις ρυθμίσεις “Simulation Settings”, όπως φαίνεται στο ίδιο Σχήμα (Simulation Settings), ενώ η επιλογή “Play” σηματοδοτεί την έναρξη της προσομοίωσης.
- Η προσομοίωση πραγματοποιείται από το πρόγραμμα OrCAD PSpice. Όταν ολοκληρωθεί η προσομοίωση, σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που έχουν επιλεγεί, ανοίγει το παράθυρο του PSpice όπου απεικονίζονται τα επιθυμητά διαγράμματα. Οι παράμετροι που μπορούν να απεικονιστούν είναι οι τάσεις και τα ρεύματα όλων των στοιχείων του κυκλώματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.4 καθώς και οποιαδήποτε άλλη παράμετρος προκύπτει από πράξεις μεταξύ αυτών, π.χ. $P = V \cdot I$.
- Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα να γίνει παραμετρική ανάλυση κάποιου στοιχείου του κυκλώματος, δηλαδή να απεικονισθεί η μεταβολή κάποιας παραμέτρου (τάση, ρεύμα, κ.α.) καθώς μεταβάλλεται η τιμή κάποιου στοιχείου του κυκλώματος (αντίσταση, πυκνωτής, κ.α.).



Σχήμα 6.3 Ρυθμίσεις προσομοίωσης προγράμματος OrCAD



Σχήμα 6.4 Επιλογή παραμέτρων απεικόνισης μέσω του προγράμματος OrCAD



Σχήμα 6.5 Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικού συζεύκτη στο OrCAD

6.2 Δεδομένα του ισοδύναμου κυκλώματος

Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στη συνέχεια αυτού του κεφαλαίου χρησιμοποιήθηκε το κύκλωμα του Σχήματος 6.5. Οι τιμές εκκίνησης (default values) του ισοδύναμου κυκλώματος, όπως παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5, είναι οι εξής:

- Πηγή τροφοδοσίας – Modem:

$$V_{in}: Vac = 1V \text{ και } Vdc = 0V$$

$$R_{modem} = 50\Omega$$

- PCB:

TX_{pcb} : ιδανικός μετασχηματιστής με λόγο αντιστάσεων 1:2

$$C1_{pcb} = C2_{pcb} = 22nF$$

$$C3_{pcb} = C4_{pcb} = 50pF$$

$$R1_{pcb} = R2_{pcb} = 10G\Omega$$

- Μετασχηματιστής φερριτικού πυρήνα:

$TX - fc$: ιδανικός μετασχηματιστής με λόγο αντιστάσεων 1:1

$$R_p = 50\Omega, \quad L_p = 1\mu H$$

$$C1 - fc = 2.5pF, \quad R1 - fc = 8m\Omega, \quad L11 - fc = 165nH$$

$$C2 - fc = 7.5pF, \quad R2 - fc = 0.4m\Omega, \quad L12 - fc = 159nH$$

$$R_{sc} = 1p\Omega$$

- Πυκνωτής:

$$C_{value} = 1nF$$

$$R_i = 10G\Omega$$

$$ESR = 10m\Omega, \quad ESL = 100pH$$

- Γραμμή ισχύος MT:

$$R_{line} = 100\Omega$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι για όλους τους πυκνωτές, τις αντιστάσεις, τα πηνία και τους μετασχηματιστές του ισοδύναμου κυκλώματος έχουν χρησιμοποιηθεί τα στοιχεία C, R, L και $XFRM_LINEAR$ αντίστοιχα της έτοιμης βιβλιοθήκης ANALOG του OrCAD Capture. Για την εναλλασσόμενη τάση V_{in} έχει χρησιμοποιηθεί το στοιχείο VAC της βιβλιοθήκης SOURCE, ενώ για τις γειώσεις έχει χρησιμοποιηθεί το στοιχείο 0 της βιβλιοθήκης SOURCE.

Τέλος, δεν έχει γίνει καμία αλλαγή στις αρχικές ρυθμίσεις του προγράμματος ούτε στα αριθμητικά μοντέλα των στοιχείων του κυκλώματος που χρησιμοποιεί το πρόγραμμα εξομοίωσης για την υλοποίηση των πράξεων και την απεικόνιση των διαγραμμάτων.

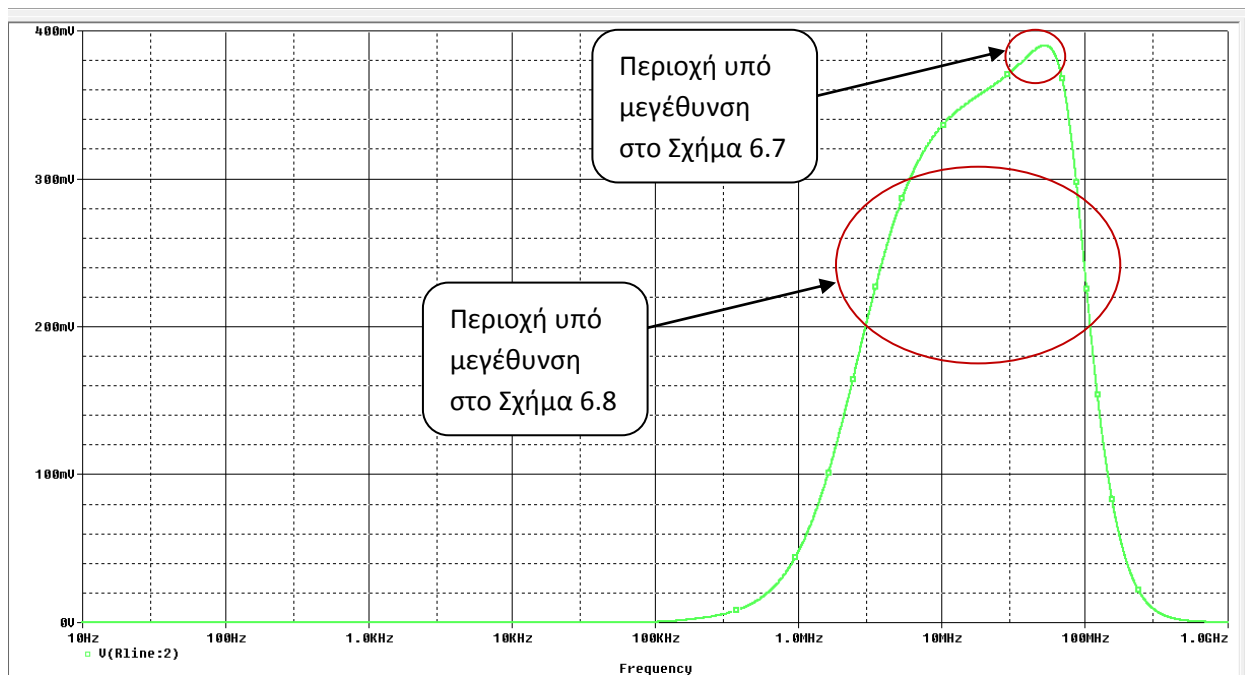
6.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης του ισοδύναμου κυκλώματος

6.3.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης με τις τιμές εκκίνησης (default values)

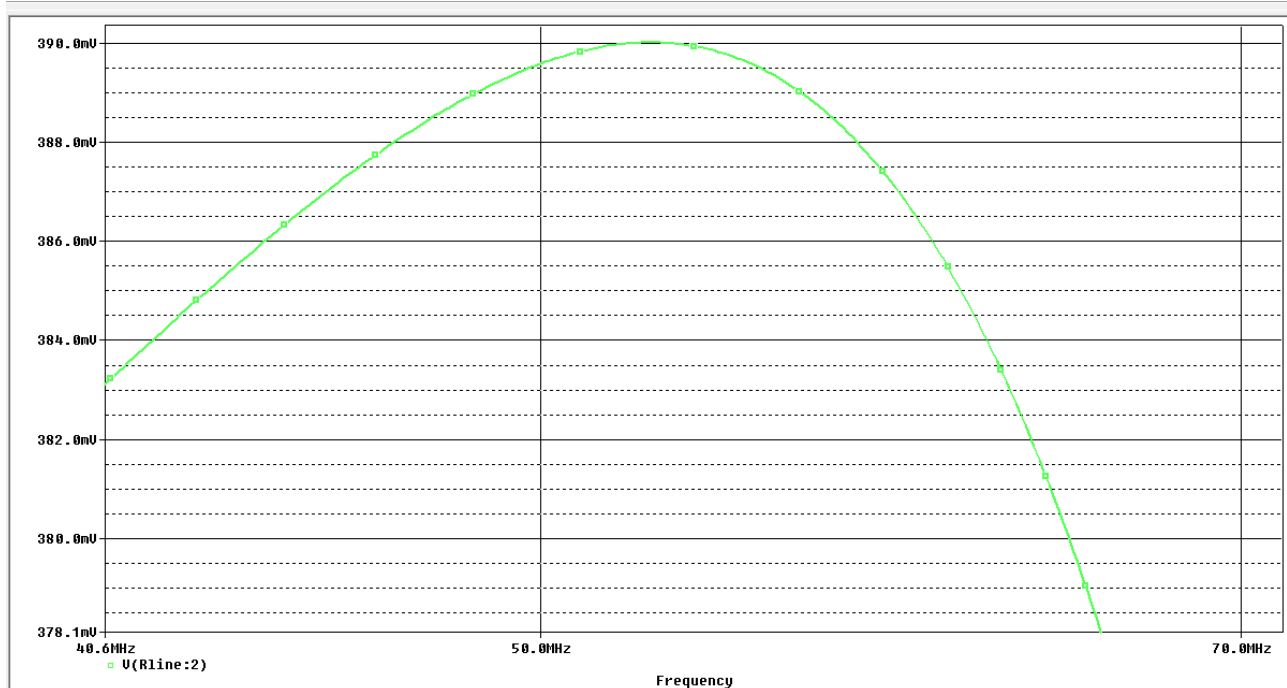
Αρχικά, στο Σχήμα 6.6 απεικονίζεται η καμπύλη/μεταβολή της τάσης ως προς τη συχνότητα στην αντίσταση *Rline*, η οποία αντιπροσωπεύει τη γραμμή MT. Ο άξονας ψ , όπου μετρώνται οι τιμές της τάσης, είναι σε γραμμική κλίμακα ενώ ο άξονας x , όπου μετράται η συχνότητα, είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Η τάση στην *Rline* είναι ουσιαστικά η τάση εξόδου του κυκλώματος και ενδεχομένως είναι το βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση της λειτουργίας του χωρητικού συζεύκτη αφού αντιπροσωπεύει το κλάσμα του PLC σήματος που εγχέεται στη γραμμή MT. Δηλαδή, στο Σχήμα 6.6 απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας της διάταξης ή άλλως η συνάρτηση μεταφοράς του.

Με βάση το διάγραμμα της τάσης εξόδου του κυκλώματος μπορούν να γίνουν οι εξής παρατηρήσεις:

- Η μέγιστη τάση εξόδου είναι περίπου 390mV και επιτυγχάνεται λίγο μετά τα 50MHz, όπως φαίνεται από το υπό μεγέθυνση διάγραμμα του Σχήματος 6.7. Μεταβάλλοντας το λόγο αντιστάσεων (impedance ratio) των μετασχηματιστών και τις τιμές συγκεκριμένων παραμέτρων, όπως αναλύεται στη συνέχεια του Κεφαλαίου, επιτυγχάνεται ακόμα καλύτερη μεταφορά ενέργειας από το PLC modem στη γραμμή MT.

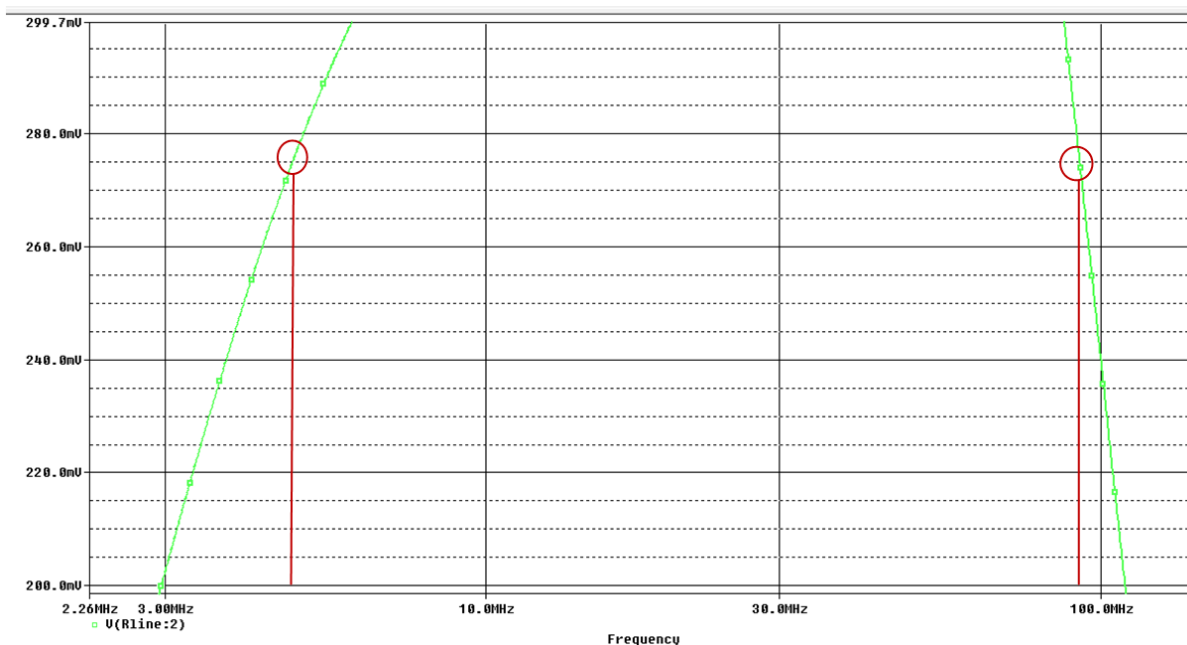


Σχήμα 6.6 Εξάρτηση της τάσης εξόδου στη γραμμή MT $V(Rline)$ από τη συχνότητα (10Hz-1GHz)



Σχήμα 6.7 Μέγιστη τάση εξόδου

- Αφού προσδιορίσθηκε η μέγιστη τάση εξόδου, πρέπει να προσδιορισθούν και οι συχνότητες f_{3dB} , δηλαδή οι συχνότητες για τις οποίες ισχύει $V_{3dB} = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot V_{max}$. Το εύρος μεταξύ αυτών των συχνοτήτων παρέχει μια πρακτική ένδειξη για το εύρος του ζωνοπερατού φίλτρου που είναι στην ουσία ο συζεύκτης. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η V_{3dB} είναι περίπου 275mV και από το Σχήμα 6.8 προκύπτει ότι η χαμηλή συχνότητα f_{3dB} είναι περίπου 4.5MHz ενώ η υψηλή f_{3dB} είναι περίπου 90MHz. Οι ενδείξεις αυτές αναδεικνύουν το ότι ο συγκεκριμένος χωρητικός συζεύκτης μπορεί να εξυπηρετήσει ευρυζωνικές εφαρμογές.



Σχήμα 6.8 Χαμηλή και υψηλή συχνότητα 3dB

Σύμφωνα με μετρήσεις που έχουν γίνει στην πράξη, η απόκριση συχνότητας του συγκεκριμένου χωρητικού συζεύκτη είναι παρόμοια με αυτή του Σχήματος 6.6. Τα χαρακτηριστικά της απόκρισης συχνότητας αυτής είναι:

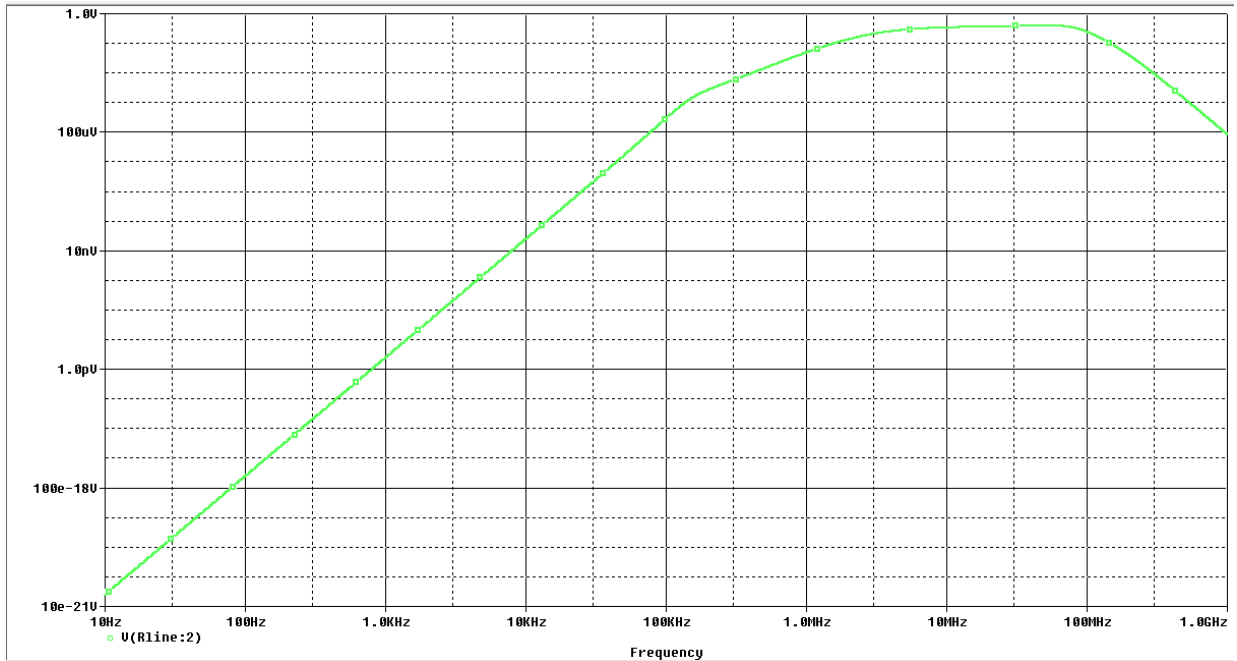
- μεγάλη εξασθένηση στις χαμηλές και πολύ υψηλές συχνότητες και
- απότομη μείωση της εξασθένησης στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων (3-50MHz), με απότομη μετάβαση από τη ζώνη διέλευσης στις ζώνες αποκοπής

Η μεγάλη εξασθένηση των χαμηλών συχνοτήτων οφείλεται στον πυκνωτή του χωρητικού συζεύκτη καθώς επίσης και στο υλικό του φερριτικού πυρήνα. Η εξασθένηση των πολύ υψηλών συχνοτήτων οφείλεται κυρίως στο ότι ο φερριτικός πυρήνας, εκ κατασκευής, δεν μπορεί να επάγει τόσο υψίσυχνα σήματα λόγω υλικών, στις αυτεπαγωγές διαρροής των πηνίων και στις αυτοχωρητικότητες των στοιχείων του όλου συστήματος. Εντούτοις, το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 6.5 δε λαμβάνει υπόψη τον κορεσμό του πυρήνα στις πολύ υψηλές συχνότητες, οπότε η εξασθένηση του υψίσυχνου σήματος στο Σχήμα 6.6 οφείλεται κυρίως στις αυτοχωρητικότητες του PCB $C3pcb$ και $C4pcb$, στις χωρητικότητες των πηνίων $C1 - fc$ και $C2 - fc$, και στις αυτεπαγωγές διαρροής $L11 - fc$ και $L12 - fc$. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος που η υψηλή συχνότητα f_{3dB} είναι στην πραγματικότητα χαμηλότερη από 90MHz.

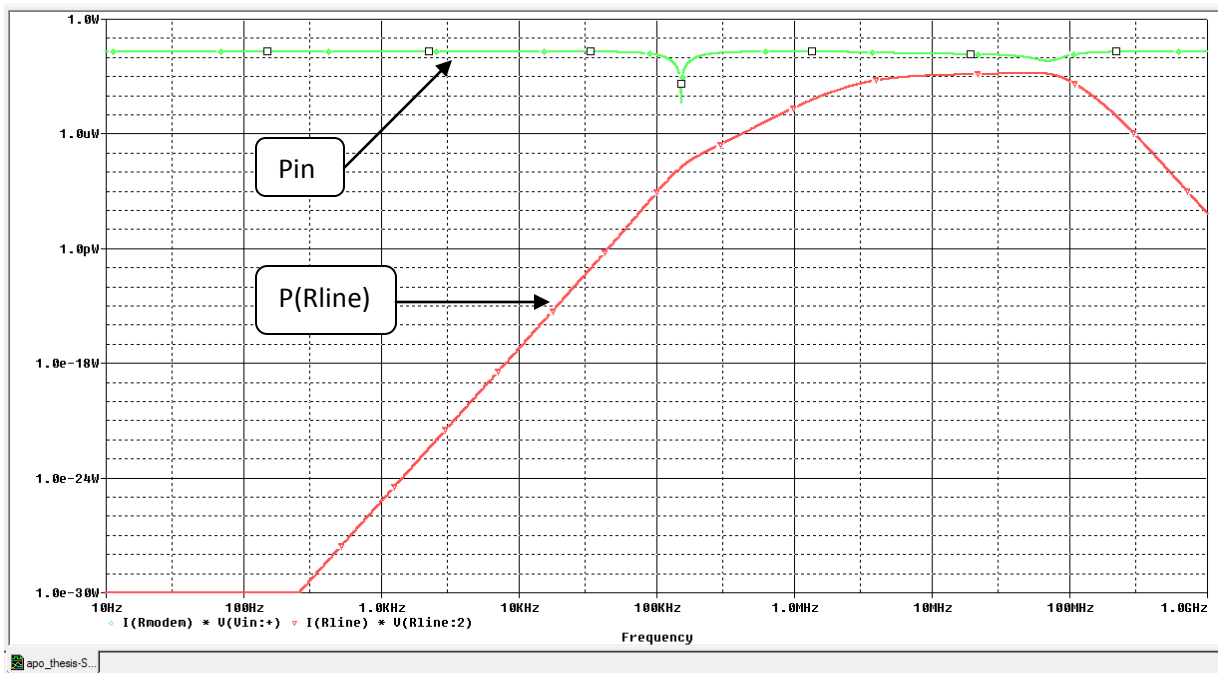
Η σημαντικότερη παρατήρηση που πρέπει να γίνει είναι ότι η ασφάλεια αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα με βάση τον οποίο αξιολογείται μία διάταξη που συνδέεται στη ΜΤ. Για το λόγο αυτό, πρέπει να δειχθεί ότι στα 50-60Hz, η εξασθένηση της τάσης από το χωρητικό συζεύκτη είναι ικανή ώστε να μην τεθεί σε κίνδυνο οποιαδήποτε μέρος της όλης διάταξης. Το κύκλωμα του Σχήματος 6.5 έχει την πηγή τροφοδοσίας στην πλευρά του modem γιατί θεωρείται ότι προσομοιώνεται η έγχυση του PLC σήματος στη γραμμή ΜΤ. Εντούτοις, επειδή ο συγκεκριμένος χωρητικός συζεύκτης είναι αμφίδρομος και πραγματοποιεί, εκτός από έγχυση, και εξαγωγή του PLC σήματος από τη ΜΤ, η συνάρτηση μεταφοράς της εξαγωγής του σήματος είναι ίδια με αυτή της έγχυσης. Επομένως, αρκεί να δειχθεί ότι η τάση του κυκλώματος έγχυσης στα 50Hz εξασθενεί σε επιθυμητό βαθμό.

Στο Σχήμα 6.9 απεικονίζεται η απόκριση συχνότητας του ισοδύναμου κυκλώματος, όπου και οι δύο άξονες του διαγράμματος είναι σε λογαριθμική κλίμακα. Με αυτό τον τρόπο απεικονίζεται καλύτερα η εξασθένηση των συχνοτήτων 50 και 60 Hz η οποία πρέπει πάντα να ελέγχεται για την ασφάλεια της διάταξης. Από το Σχήμα 6.9 φαίνεται ότι για τάση εισόδου 1V, η τάση εξόδου στα 50-60Hz είναι περίπου 10^{-18} V. Εντούτοις, από την πλευρά των γραμμών ΜΤ, μια ενδεικτική τιμή τάσης εισόδου στα 50Hz είναι 35kV. Αν εφαρμοσθεί αυτή η τιμή τάσης ως είσοδος του ισοδύναμου κυκλώματος, η τάση εξόδου προκύπτει $35 \cdot 10^{-15}$ V. Η τιμή αυτή είναι πράγματι πολύ μικρή και σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί κίνδυνο ούτε για το συζεύκτη ούτε για οποιαδήποτε ηλεκτρονική συσκευή βρίσκεται μετά το συζεύκτη.

Όσον αφορά τις υψηλές συχνότητες, άνω των 100MHz, το διάγραμμα του Σχήματος 6.9 δεν ανταποκρίνεται στην απόκριση συχνότητας ενός πραγματικού χωρητικού συζεύκτη. Συγκεκριμένα, η εξασθένηση του σήματος στις υψηλές συχνότητες είναι στην πραγματικότητα αρκετά μεγαλύτερη από αυτή του Σχήματος 6.9 λόγω των υλικών και της κατασκευής του πυρήνα, όπως έχει ήδη αναφερθεί.

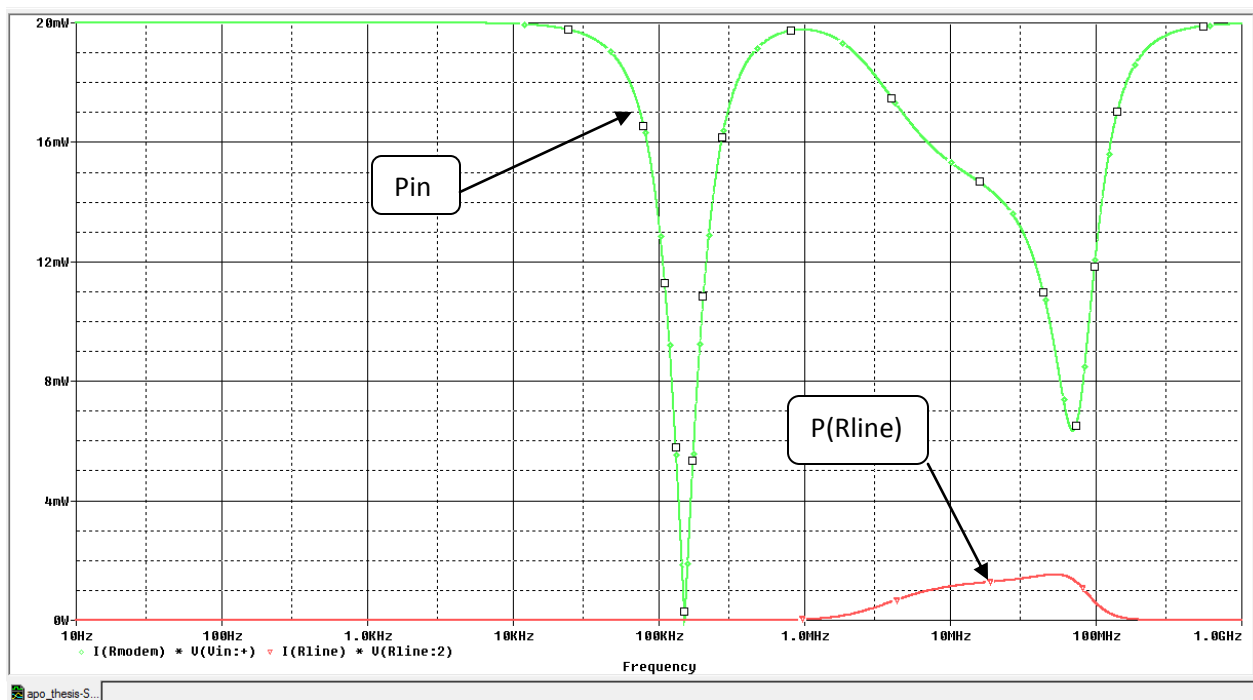


Σχήμα 6.9 Εξάρτηση της τάσης εξόδου στη γραμμή MT $V(Rline)$ από τη συχνότητα (10Hz-1GHz)σε λογαριθμική κλίμακα



Σχήμα 6.10 Ισχύς εισόδου Pin και ισχύς εξόδου $P(Rline)$ σε λογαριθμική κλίμακα

Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζονται τα διαγράμματα της ισχύος εισόδου $P_{in} = I(R_{modem}) \cdot V_{in}$ και της ισχύος εξόδου $P_{out} = P(R_{line}) = I(R_{line}) \cdot V(R_{line})$ ως προς τη συχνότητα σε λογαριθμική κλίμακα. Το διάγραμμα της ισχύος εισόδου είναι με πράσινο χρώμα, ενώ το διάγραμμα της ισχύος εξόδου είναι με κόκκινο χρώμα. Όσον αφορά την ισχύ εξόδου, είναι εμφανής η δραματική εξασθένηση της ισχύος του σήματος στις χαμηλές συχνότητες καθώς επίσης και η επιθυμητή μειωμένη εξασθένηση του σήματος στις συχνότητες όπου μεταδίδεται το PLC σήμα (3-50MHz). Όσον αφορά την ισχύ εισόδου, παρατηρείται μεταβολή στην τιμή της – λόγω μεταβολής του ρεύματος $I(R_{line})$, αφού η τάση εισόδου παραμένει σταθερή – η οποία γίνεται περισσότερο εμφανής στο Σχήμα 6.11 στο οποίο απεικονίζονται τα διαγράμματα ισχύος εισόδου και εξόδου σε γραμμική κλίμακα.



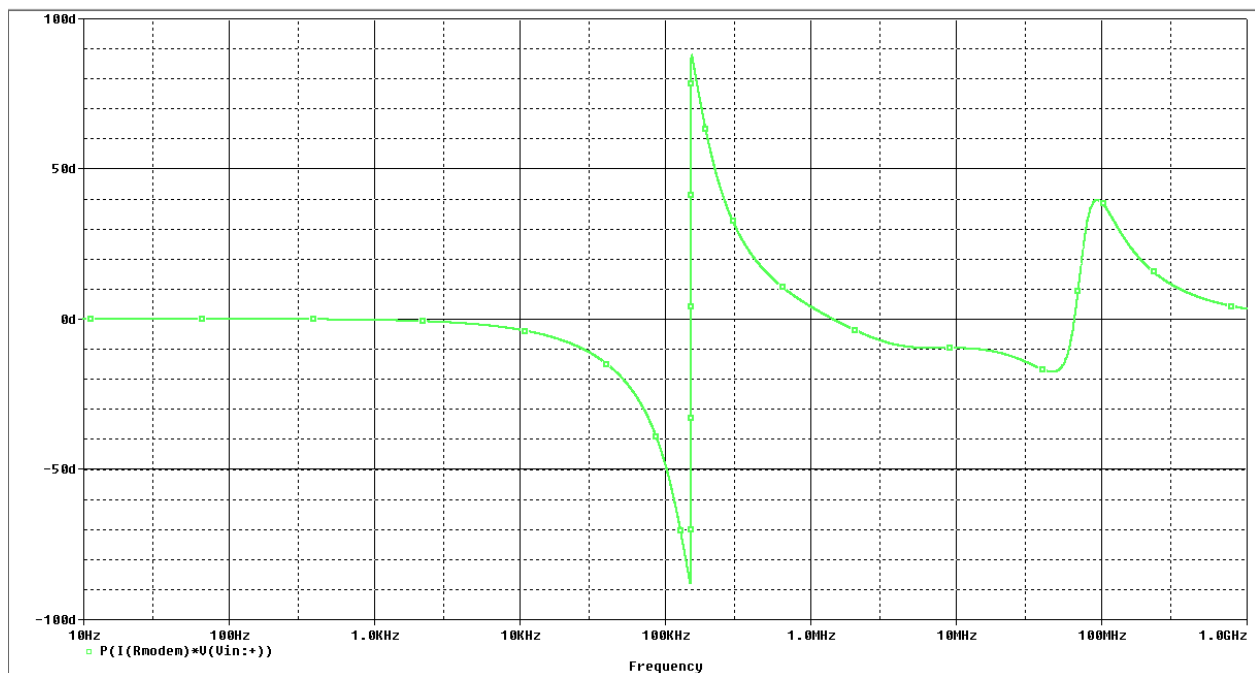
Σχήμα 6.11 Ισχύς εισόδου P_{in} και ισχύς εξόδου $P(R_{line})$ σε γραμμική κλίμακα

Στο Σχήμα 6.11 παρατηρούνται δύο βυθίσεις της ισχύος εισόδου:

- μία βύθιση περί τα 150kHz
- μία μικρότερη βύθιση περί τα 70MHz

Όσον αφορά την πρώτη βύθιση, είναι φανερό ότι δύο ή περισσότεροι κλάδοι του ισοδύναμου κυκλώματος συντονίζονται στη συχνότητα των 150kHz. Συγκεκριμένα, για τα στοιχεία τα οποία συντονίζουν ισχύει: $\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 150kHz$. Ο συντονισμός αυτός προκαλείται από την Lp και από τις παράλληλες σε αυτήν χωρητικότητες. Λόγω της μορφής του κλάδου συντονισμού (παράλληλες επαγωγές και χωρητικότητες), στη συχνότητα των 150kHz, το modem βλέπει ανοικτοκύκλωμα ή αλλιώς μια τεράστια αντίσταση φορτίου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το ρεύμα $I(R_{modem})$ πρακτικά μηδενίζεται και κατά συνέπεια και η ισχύς εισόδου. Εντούτοις, αφού ο συντονισμός αυτός δεν συμβαίνει ούτε στο εύρος των συχνοτήτων του PLC σήματος ούτε κοντά στα 50-60Hz είναι ακίνδυνος για τη λειτουργία της διάταξης του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη.

Στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται το διάγραμμα της φάσης της ισχύος εισόδου ως προς τη συχνότητα. Το διάγραμμα αυτό σε συνδυασμό με το διάγραμμα του Σχήματος 6.11 επιβεβαιώνουν ότι στα 150kHz υπάρχει συντονισμός, αφού η φάση μεταβάλλεται απότομα κατά 180 μοίρες.



Σχήμα 6.12 Φάση ισχύος εισόδου σε μοίρες

Όσον αφορά τη δεύτερη και μικρότερη βύθιση, από το Σχήμα 6.11 φαίνεται ότι δεν είναι τόσο απότομη όσο η πρώτη βύθιση στα 150kHz. Ξεκινάει από τη συχνότητα 1MHz και κορυφώνεται στα 70MHz. Αντίθετα με την πρώτη βύθιση, δεν αποτελεί συντονισμό αφού η φάση δεν μεταβάλλεται απότομα κατά 180 μοίρες, όπως διαπιστώνεται από το Σχήμα 6.12. Εντούτοις, πρέπει να δοθεί προσοχή στη βύθιση αυτή αφού βρίσκεται αρκετά κοντά στο εύρος συχνοτήτων των PLC σημάτων και μικρές αλλαγές στις τιμές των στοιχείων του συστήματος – κυρίως λόγω αποκλίσεων στα υλικά κατά την κατασκευή – μπορεί να τη μετατρέψουν σε συντονισμό ή να τη μετακινήσουν στη ζώνη 3-50MHz.

Στην πραγματικότητα, συντονισμοί και βυθίσεις υπάρχουν σε όλο το εύρος των συχνοτήτων και δεν είναι δυνατό να αποφευχθούν. Ο κύριος στόχος/κανόνας σχεδίασης είναι ο εξής: η φάση να μεταβάλλεται όσο το δυνατόν λιγότερο στην επιθυμητή ζώνη λειτουργίας. Εκτός των άλλων, η αποκωδικοποίηση σημάτων OFDM επηρεάζεται σημαντικά από τη φάση του σήματος, αφού όσο μεγαλύτερες είναι οι μεταβολές φάσης του σήματος τόσο δυσκολότερα γίνεται η αποκωδικοποίησή του. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, η μεταβολή της φάσης στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων είναι μικρότερη από 10 μοίρες, τιμή που χαρακτηρίζεται ιδανική σε σχέση με τις τιμές που προκύπτουν στην πράξη.

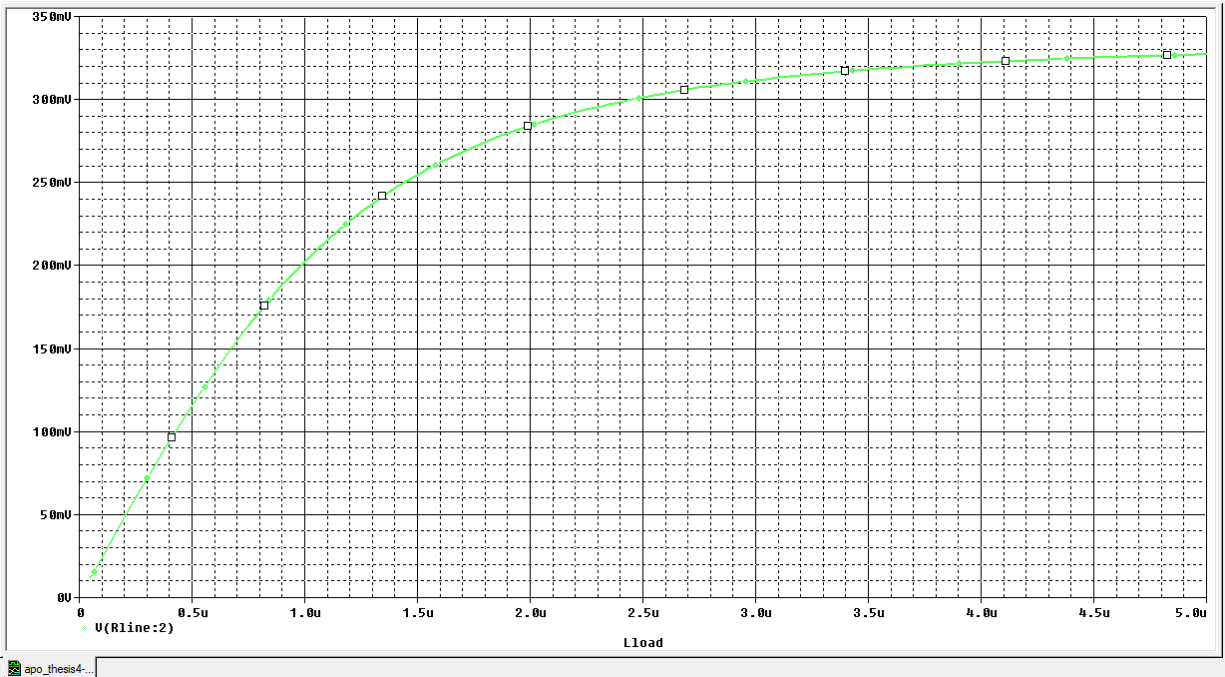
6.3.2 Παραμετρική ανάλυση – Optimization and Parametric sweeps

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο φερριτικός πυρήνας είναι το σημαντικότερο στοιχείο ενός χωρητικού συζεύκτη. Τα υλικά, το σχήμα και το μέγεθός του επηρεάζουν δραστικά την απόκριση συχνότητας του συζεύκτη. Στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 6.5, τα στοιχεία που περιγράφουν τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά του φερριτικού πυρήνα και για τα οποία χρειάζεται να γίνει διερεύνηση των τιμών τους για να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπεριφορά του κυκλώματος είναι τα R_p και L_p .

Επιπλέον, η επιλογή πυκνωτή, και συγκεκριμένα η τιμή της χωρητικότητάς του C_{value} , αξίζει να διερευνηθεί ώστε να προσδιοριστεί η επίδρασή της στην απόκριση συχνότητας του χωρητικού συζεύκτη. Τέλος, επειδή, στην πράξη, ο χωρητικός συζεύκτης μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε σημείο της γραμμής MT, πρέπει να δειχθεί η συμπεριφορά του για διάφορες τιμές της R_{line} .

- Επίδραση της παραμέτρου L_p

Σύμφωνα με τη θεωρία, η παράμετρος που επηρεάζει τη χαμηλή συχνότητα αποκοπής του επιθυμητού εύρους ζώνης συχνοτήτων είναι η L_p . Στο Σχήμα 6.13 απεικονίζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου στα 3MHz – που είναι η επιθυμητή χαμηλή συχνότητα αποκοπής – ανάλογα με την τιμή της παραμέτρου L_p .

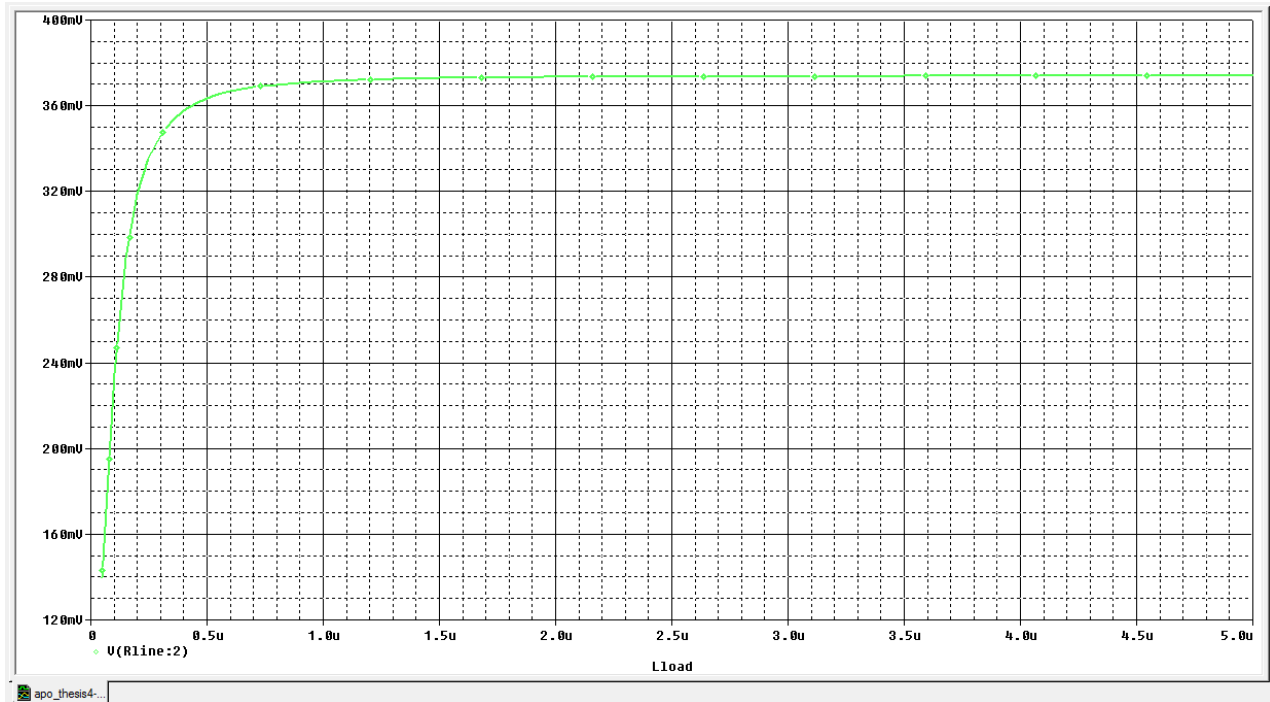


Σχήμα 6.13 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V ($Rline$) από την παράμετρο L_p (από 50nH ως 5μH με βήμα 50nH) για τη συχνότητα των 3MHz

Από το διάγραμμα του Σχήματος 6.13 φαίνεται η επίδραση που έχει η παράμετρος L_p στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα για τη σημασία της παραμέτρου L_p , και κατ' επέκταση του φερριτικού πυρήνα, για τη σχεδίαση ενός ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη:

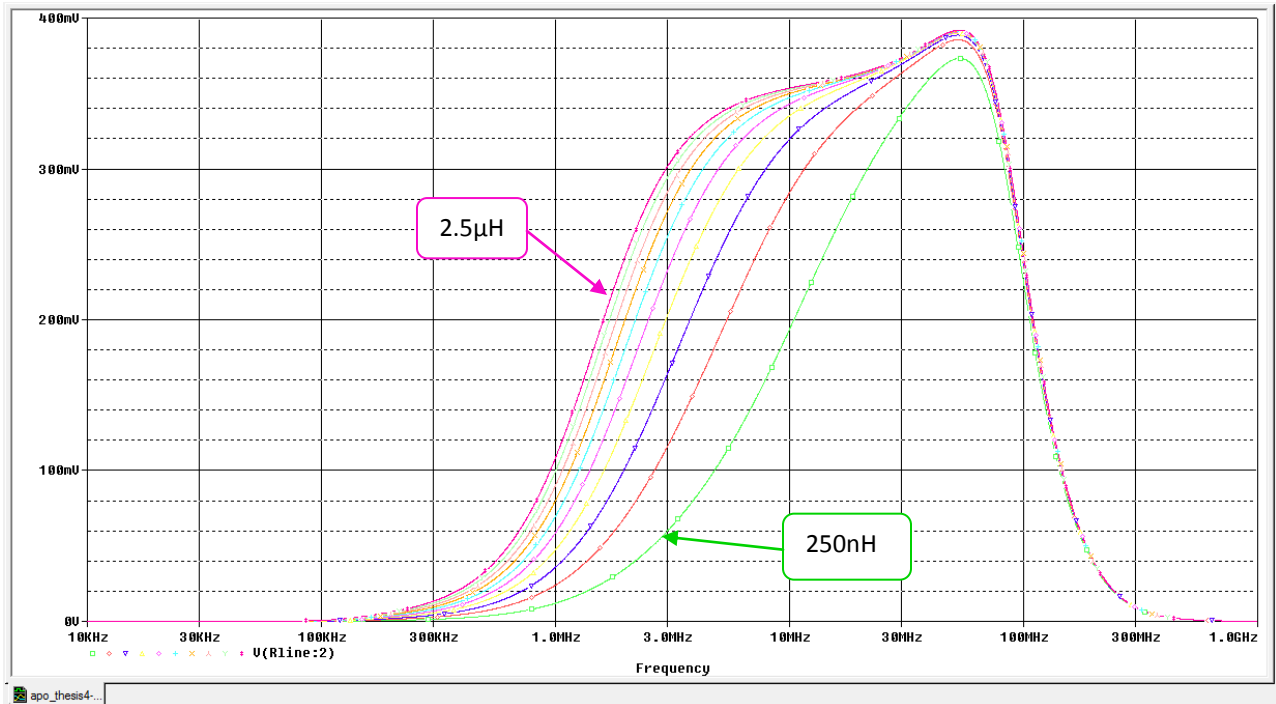
Σύμφωνα με το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 6.5 και το διάγραμμα του Σχήματος 6.6 η συχνότητα f_{3dB} είναι περίπου 4.5MHz για $V_{3dB} = 275V$. Εντούτοις, η επιθυμητή συχνότητα αποκοπής f_{3dB}' προδιαγράφεται στα 3MHz. Με βάση το Σχήμα 6.13, αν χρησιμοποιηθεί φερριτικός πυρήνας με $L_p' = 1.8\mu H$ αντί της αρχικής τιμής $L_p = 1\mu H$, επιτυγχάνεται/ικανοποιείται η συγκεκριμένη προδιαγραφή – υπό την προϋπόθεση ότι η L_p επηρεάζει ελάχιστα τη μέγιστη τάση.

Το ότι η παράμετρος L_p δεν επηρεάζει την τιμή της μέγιστης τάσης και κατ' επέκταση το σήμα που βρίσκεται στις μεσαίες συχνότητες του επιθυμητού εύρους αποδεικνύεται από το διάγραμμα του Σχήματος 6.14. Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται η μεταβολή της τάσης εξόδου στα 30MHz – που είναι μία συχνότητα περίπου στο μέσο του επιθυμητού εύρους συχνοτήτων – συναρτήσει της παραμέτρου L_p . Η σταθερότητα της τάσης εξόδου για τη συχνότητα των 30MHz ως προς L_p επιβεβαιώνει τη θεωρία.



Σχήμα 6.14 Εξάρτηση της τάσης εξόδου $V(Rline)$ από την παράμετρο L_p (από 50nH ως 5μH με βήμα 50nH) για τη συχνότητα των 30MHz

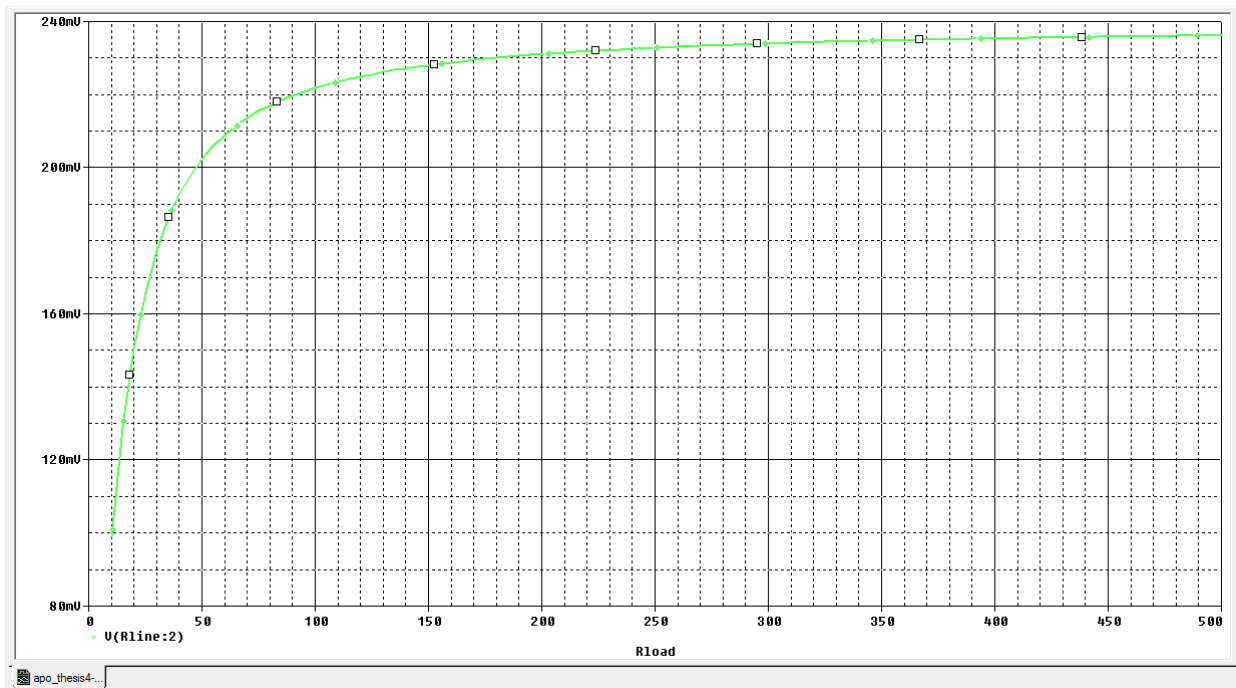
Στο Σχήμα 6.15 απεικονίζονται διαγράμματα της τάσης εξόδου για διάφορες τιμές της παραμέτρου L_p στο εύρος συχνοτήτων 10kHz ως 1GHz. Η καμπύλη με το μικρότερο εύρος αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τιμή της L_p . Όσο αυξάνεται η L_p τόσο αυξάνεται και το εύρος. Είναι εμφανής η καθοριστική επίδραση της L_p στις συχνότητες κοντά στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής. Οι μεσαίες συχνότητες της ζώνης διέλευσης επηρεάζονται ελάχιστα ενώ μένουν ανεπηρέαστες οι συχνότητες κοντά την υψηλή συχνότητα αποκοπής.



Σχήμα 6.15 Εξάρτηση της τάσης εξόδου $V(Rline)$ από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου L_p (250nH ως 2.5μH με βήμα 250nH)

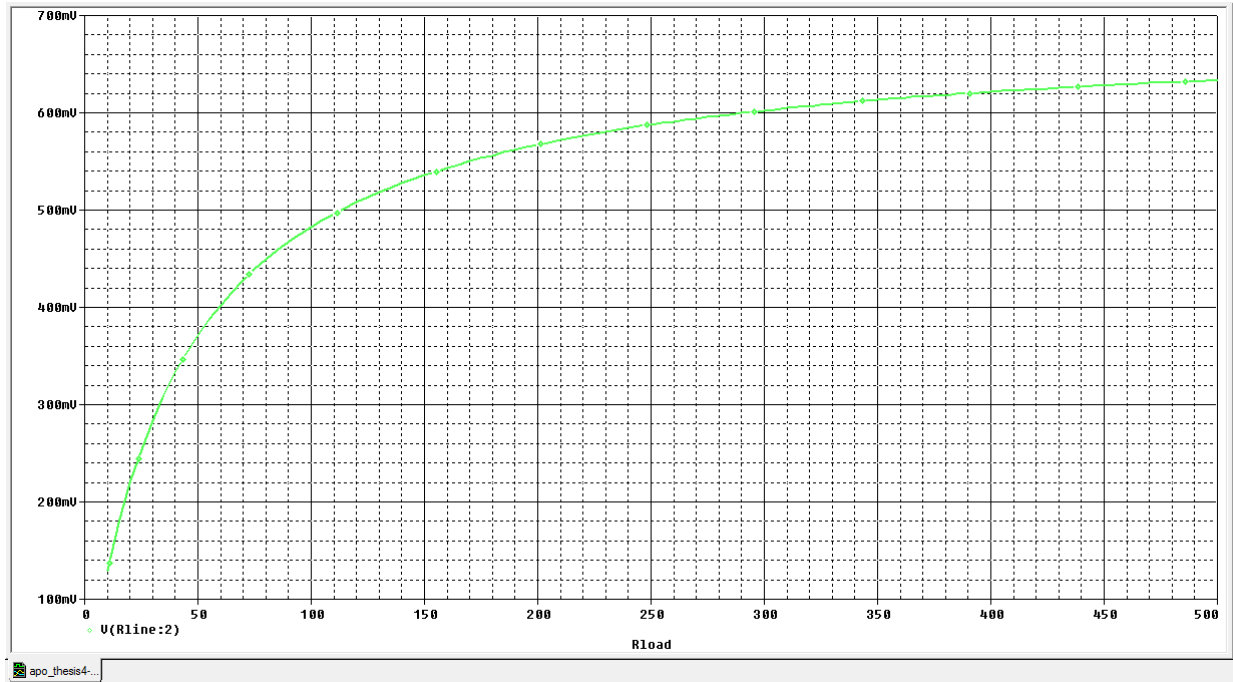
- Επίδραση της παραμέτρου R_p

Στο Σχήμα 6.16 απεικονίζεται το διάγραμμα της μεταβολής της τάσης εξόδου στα 3MHz – όπου βρίσκεται η επιθυμητή χαμηλή συχνότητα αποκοπής – σε σχέση με την τιμή της παραμέτρου R_p . Παρατηρείται ότι η παράμετρος R_p δεν επηρεάζει σημαντικά την τάση της χαμηλής συχνότητας αποκοπής, ειδικά για τιμές της R_p υψηλότερες των 50Ω, όπου η μέγιστη μεταβολή είναι λίγο μικρότερη από 40mV.



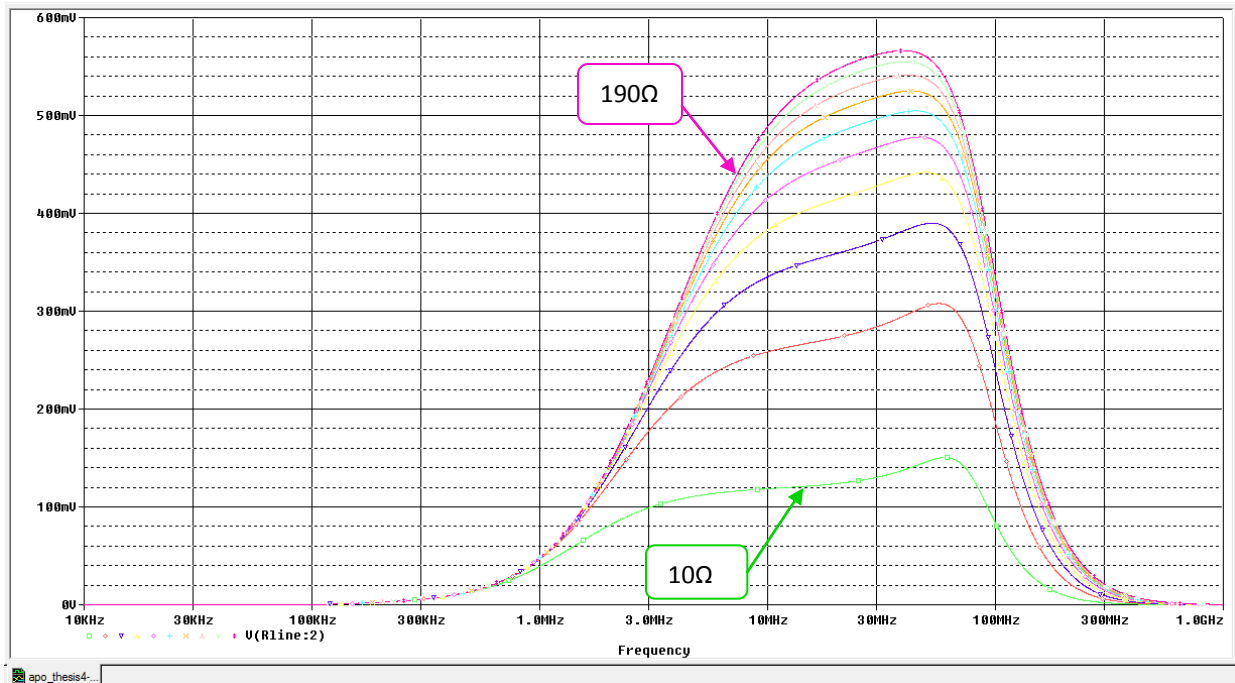
Σχήμα 6.16 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V (R_{line}) από την παράμετρο R_p (από 10Ω ως 500Ω με βήμα 5Ω) για τη συχνότητα των 3MHz

Η επίδραση της παραμέτρου R_p στις μεσαίες συχνότητες της επιθυμητής ζώνης λειτουργίας – συγκεκριμένα στη συχνότητα των 30 MHz – φαίνεται στο Σχήμα 6.17. Παρατηρείται ότι η τάση εξόδου $V(Rline)$ επηρεάζεται δραστικά από τη μεταβολή της R_p , ειδικά για τις χαμηλότερες τιμές της R_p ($10\Omega - 250\Omega$) που αποτελούν συνηθισμένες τιμές για ευρυζωνικούς φερριτικούς πυρήνες. Όπως είναι αναμενόμενο, η τάση εξόδου αυξάνεται ανάλογα με την R_p , αφού όσο μεγαλύτερη είναι η R_p τόσο μικρότερο ρεύμα ρέει προς τον κλάδο της (Σχήμα 6.5) με αποτέλεσμα να χάνεται λιγότερο ρεύμα στον πυρήνα.



Σχήμα 6.17 Εξάρτηση της τάσης εξόδου $V(Rline)$ από την παράμετρο R_p (από 10Ω ως 500Ω με βήμα 5Ω) για τη συχνότητα των 30MHz

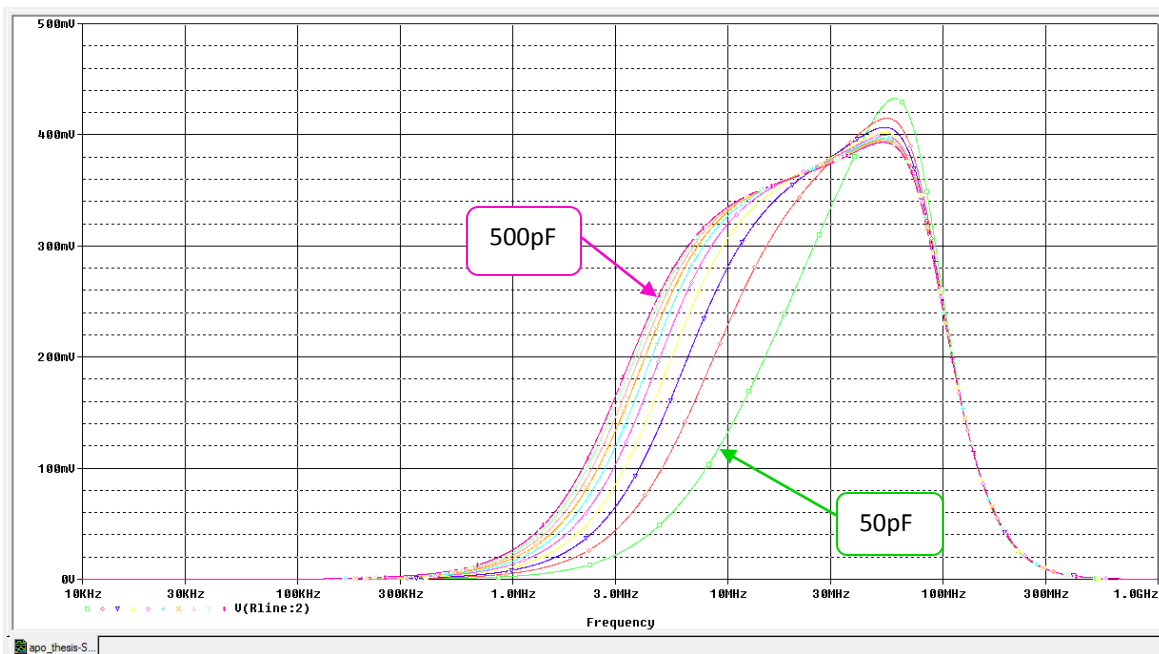
Στο Σχήμα 6.18 απεικονίζονται διαγράμματα της τάσης εξόδου για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_p στο εύρος συχνοτήτων 10kHz ως 1GHz. Η καμπύλη με τη μικρότερη μέγιστη τιμή εξόδου αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τιμή της R_p . Είναι εμφανής η δραματική επίδραση της R_p στις μεσαίες συχνότητες του επιθυμητού εύρους λειτουργίας ενώ οι συχνότητες κοντά στην υψηλή και τη χαμηλή συχνότητα αποκοπής επηρεάζονται σε πολύ μικρότερο βαθμό



Σχήμα 6.18 Εξάρτηση της τάσης εξόδου V ($Rline$) από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_p (10Ω ως 190Ω με βήμα 20Ω)

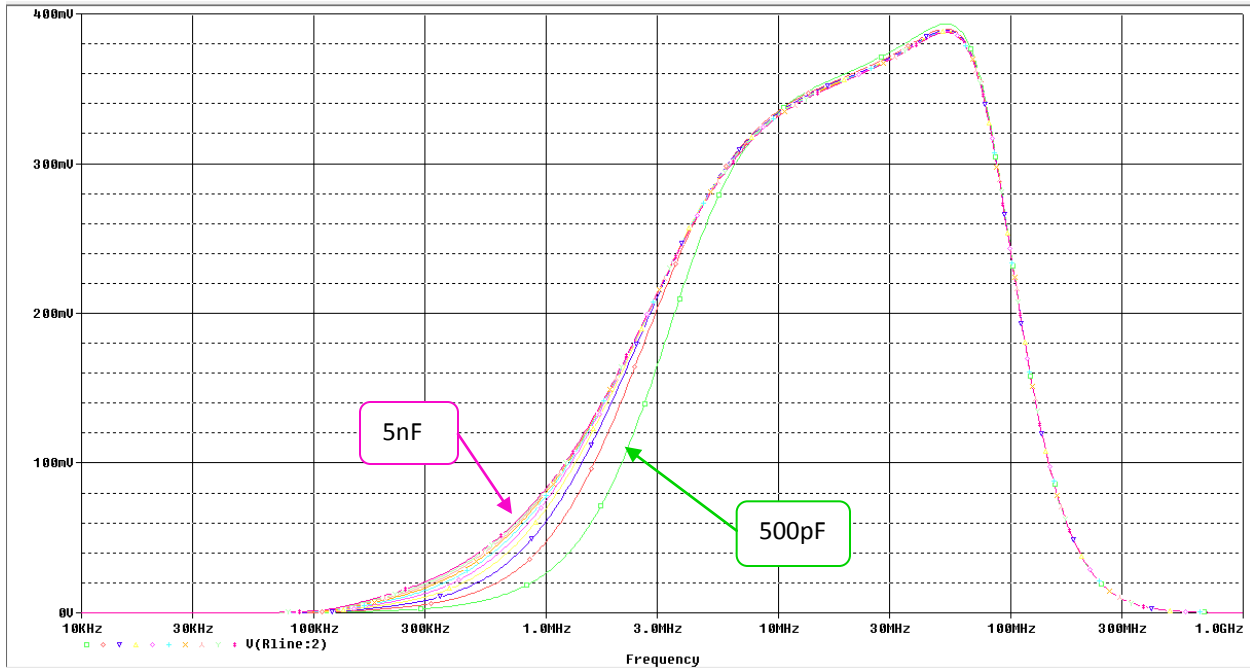
- Επίδραση της παραμέτρου C_{value}

Στο Σχήμα 6.19 απεικονίζονται διαγράμματα της τάσης εξόδου για διάφορες τιμές της παραμέτρου C_{value} στο εύρος συχνοτήτων 10kHz ως 1GHz. Η καμπύλη με το μικρότερο εύρος αντιστοιχεί στη χαμηλότερη τιμή της C_{value} . Όσο αυξάνεται η C_{value} τόσο αυξάνεται και το εύρος. Συγκεκριμένα, μεταβάλλεται η χαμηλή συχνότητα αποκοπής ενώ η υψηλή συχνότητα παραμένει ανεπηρέαστη. Επιπλέον, παρατηρείται ότι όσο μειώνεται η χωρητικότητα του πυκνωτή τόσο αυξάνεται η μέγιστη τιμή της τάσης εξόδου. Αυτό συμβαίνει διότι στις συχνότητες ανάμεσα στα 70 και 100MHz τείνει να υπάρξει συντονισμός ανάμεσα στη C_{value} και ενδεχομένως στην ESL , οι οποίες είναι σε σειρά. Ο συντονισμός αυτού του κλάδου τείνει να δημιουργήσει βραχυκύκλωμα, δηλαδή απειρισμό της τάσης.



Σχήμα 6.19 Εξάρτηση της τάσης εξόδου $V(Rline)$ από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου C_{value} (50pF ως 500pF με βήμα 50pF)

Από το Σχήμα 6.20 προκύπτει ότι για τιμές της C_{value} μεγαλύτερες των 500pF η μεταβολή του διαγράμματος της τάσης εξόδου είναι πολύ μικρή επηρεάζοντας σε μικρό βαθμό το εύρος συχνοτήτων 100kHz έως 5MHz.

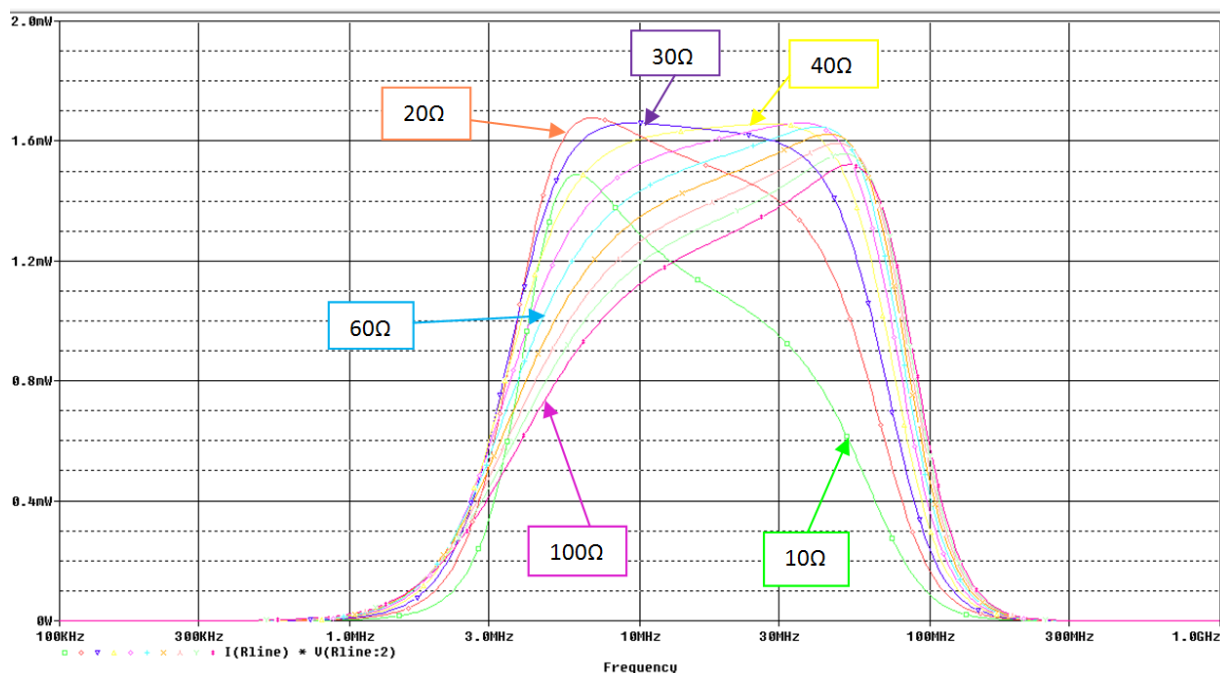


Σχήμα 6.20 Εξάρτηση της τάσης εξόδου $V(Rline)$ από τη συχνότητα (10kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου C_{value} (500pF ως 5nF με βήμα 500pF)

- Επίδραση της παραμέτρου *Rline*

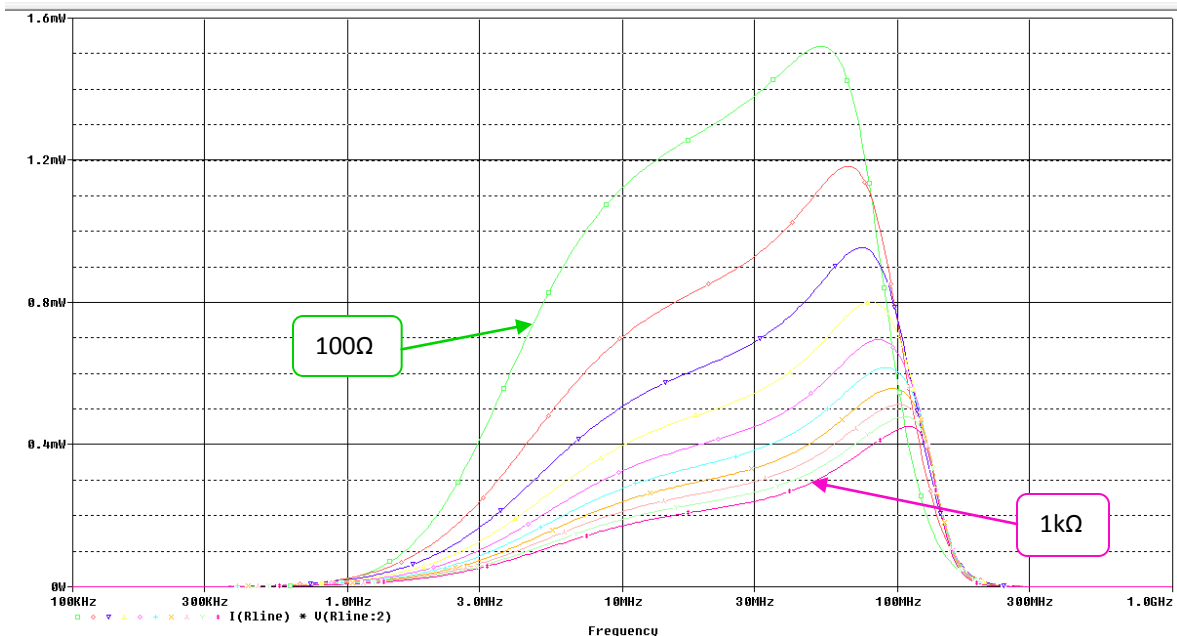
Από την αρχή της μελέτης, έχει γίνει η υπόθεση ότι ο χωρητικός συζεύκτης είναι τοποθετημένος περίπου στο μέσο ενός κλάδου εναέριας γραμμής MT χαρακτηριστικής αντίστασης 200Ω, ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στα άκρα του. Επομένως, ο συζεύκτης βλέπει τον παράλληλο συνδυασμό δύο αντιστάσεων 200Ω, δηλαδή 100Ω. Εντούτοις, στην πράξη, η χαρακτηριστική αντίσταση ποικίλλει για διαφορετικά εναέρια ΗΔ και ο χωρητικός συζεύκτης δεν τοποθετείται στο μέσο της γραμμής. Άρα η τιμή της *Rline* ποικίλλει και μπορεί να πάρει τιμές από 10Ω μέχρι και 1kΩ σε ακραίες περιπτώσεις.

Στο Σχήμα 6.21 απεικονίζονται διαγράμματα της ισχύος εξόδου για διάφορες τιμές της παραμέτρου *Rline* μικρότερες των 100Ω σε ένα εύρος συχνοτήτων (100kHz-1GHz). Παρατηρείται ότι μεταβάλλοντας την παράμετρο *Rline* από 10Ω έως 100Ω επηρεάζεται ολόκληρη η μορφή του διαγράμματος της απόκρισης συχνότητας του χωρητικού συζεύκτη χωρίς όμως να μεταβάλλεται αισθητά η μέγιστη τιμή του. Για τις τιμές 10Ω έως 30Ω παρατηρείται χαμηλή εξασθένηση κοντά στη χαμηλή συχνότητα αποκοπής, ενώ για τις τιμές 40Ω έως 100Ω παρατηρείται χαμηλή εξασθένηση κοντά στην υψηλή συχνότητα αποκοπής. Για τις τιμές 30Ω έως 40Ω παρατηρείται όμοια εξασθένηση σε όλο το επιθυμητό εύρος συχνοτήτων.



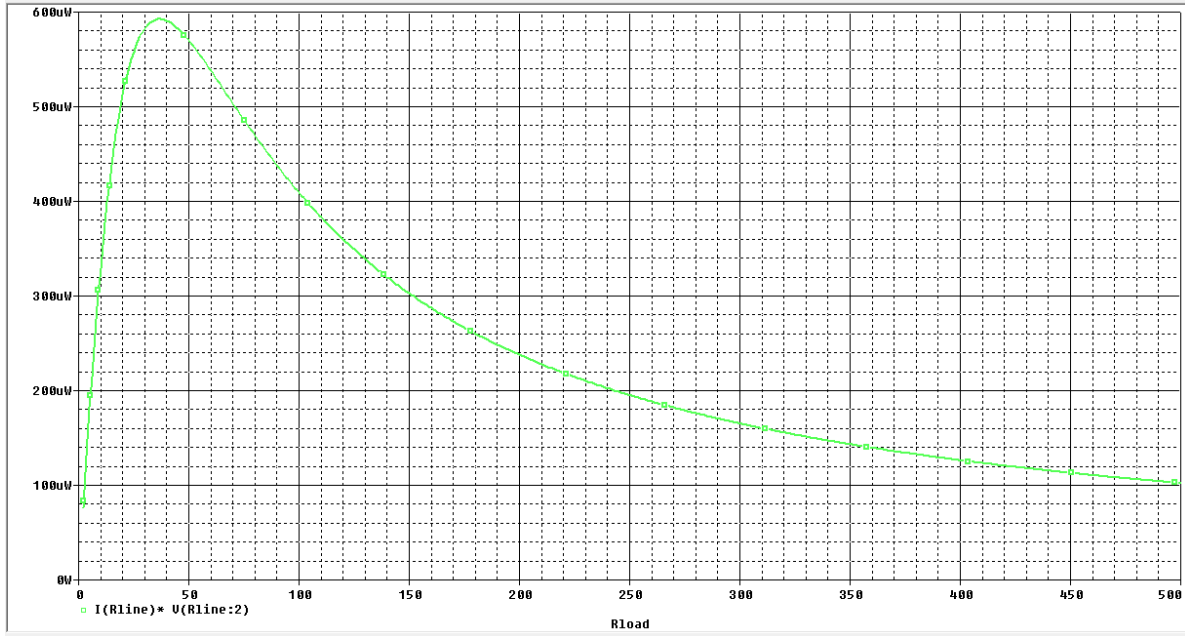
Σχήμα 6.21 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (*Rline*) από τη συχνότητα (100kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου *Rline* (10Ω ως 100Ω με βήμα 10Ω)

Στο Σχήμα 6.22 απεικονίζονται διαγράμματα της ισχύος εξόδου για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_{line} μεγαλύτερες των 100Ω στο εύρος συχνοτήτων 100kHz ως 1GHz. Παρατηρείται ότι όσο αυξάνεται η τιμή της R_{line} μειώνεται η μέγιστη τιμή της ισχύος εξόδου, η οποία εμφανίζεται σε όλο και υψηλότερη συχνότητα.

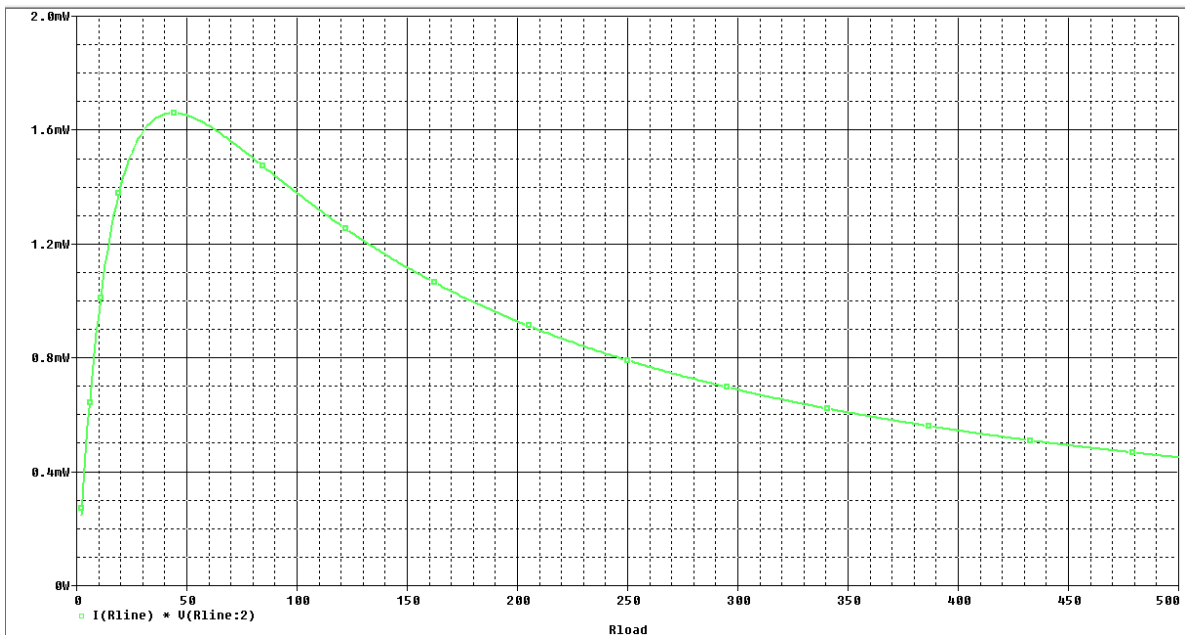


Σχήμα 6.22 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου $P(R_{line})$ από τη συχνότητα (100kHz-1GHz) για διάφορες τιμές της παραμέτρου R_{line} (100Ω ως $1k\Omega$ με βήμα 100Ω)

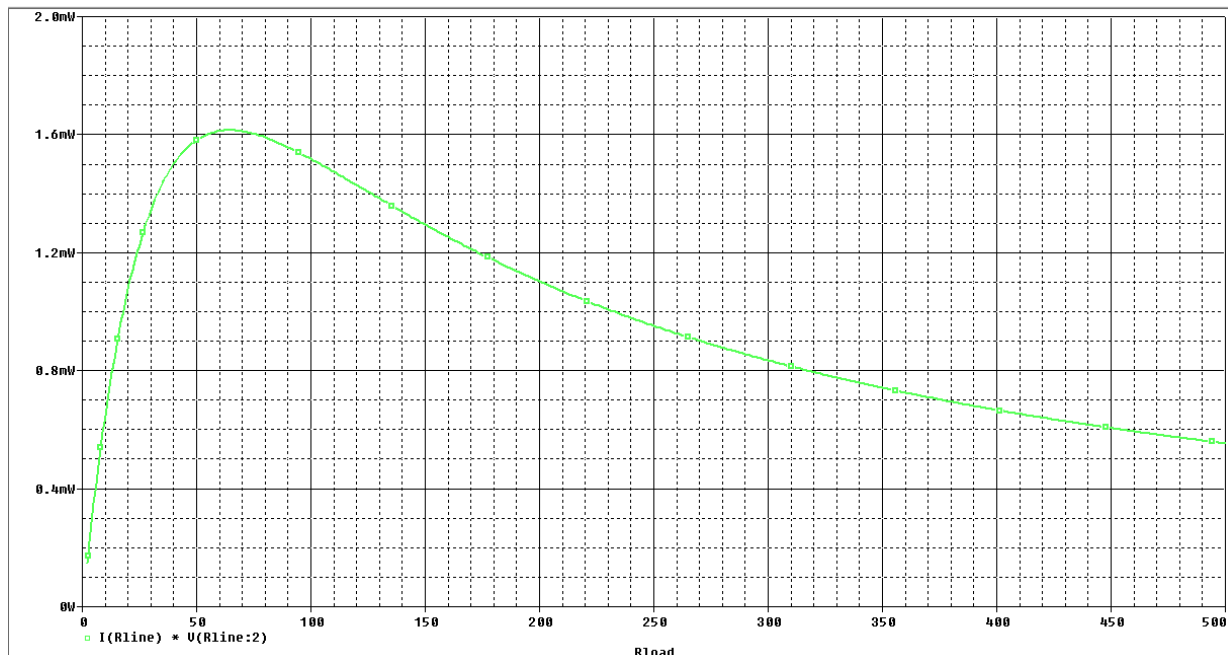
Στα Σχήματα 6.23, 6.24 και 6.25 απεικονίζεται η εξάρτηση της ισχύος εξόδου από την παράμετρο R_{line} για τις συχνότητες 3MHz, 30MHz και 50MHz, αντίστοιχα. Από τα Σχήματα 6.20 έως και 6.25 γίνεται αντιληπτή η ανάγκη για προσαρμογή των αντιστάσεων στις δύο πλευρές του χωρητικού συζεύκτη (η μία πλευρά προς στη γραμμή MT και η άλλη πλευρά προς το modem). Παρατηρείται ότι ο συγκεκριμένος χωρητικός συζεύκτης (του Σχήματος 6.5) επιτυγχάνει μέγιστη μεταφορά ισχύος στο επιθυμητό εύρος λειτουργίας όταν η αντίσταση που βλέπει προς την πλευρά της γραμμής MT είναι 30 έως 50Ω . Μεταβάλλοντας το πλήθος περιελίξεων των πηνίων του μετασχηματιστή φερριτικού πυρήνα, δηλαδή μεταβάλλοντας το λόγο αντιστάσεων, μπορεί να επιτευχθεί αντίστοιχη συμπεριφορά του χωρητικού συζεύκτη για διάφορες τιμές της R_{line} . Εντούτοις, επειδή στην πράξη η R_{line} μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο του ίδιου κλάδου εναέριας γραμμής, δεν είναι δυνατό να σχεδιασθούν χωρητικοί πυκνωτές έκαστος των οποίων έχει διαφορετικό αριθμό περιελίξεων. Για αυτό το λόγο σχεδιάζονται συζεύκτες οι οποίοι εμφανίζουν ικανοποιητική συμπεριφορά για μεγάλο εύρος τιμών της παραμέτρου R_{line} .



Σχήμα 6.23 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (R_{line}) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των $3MHz$



Σχήμα 6.24 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (R_{line}) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των $30MHz$

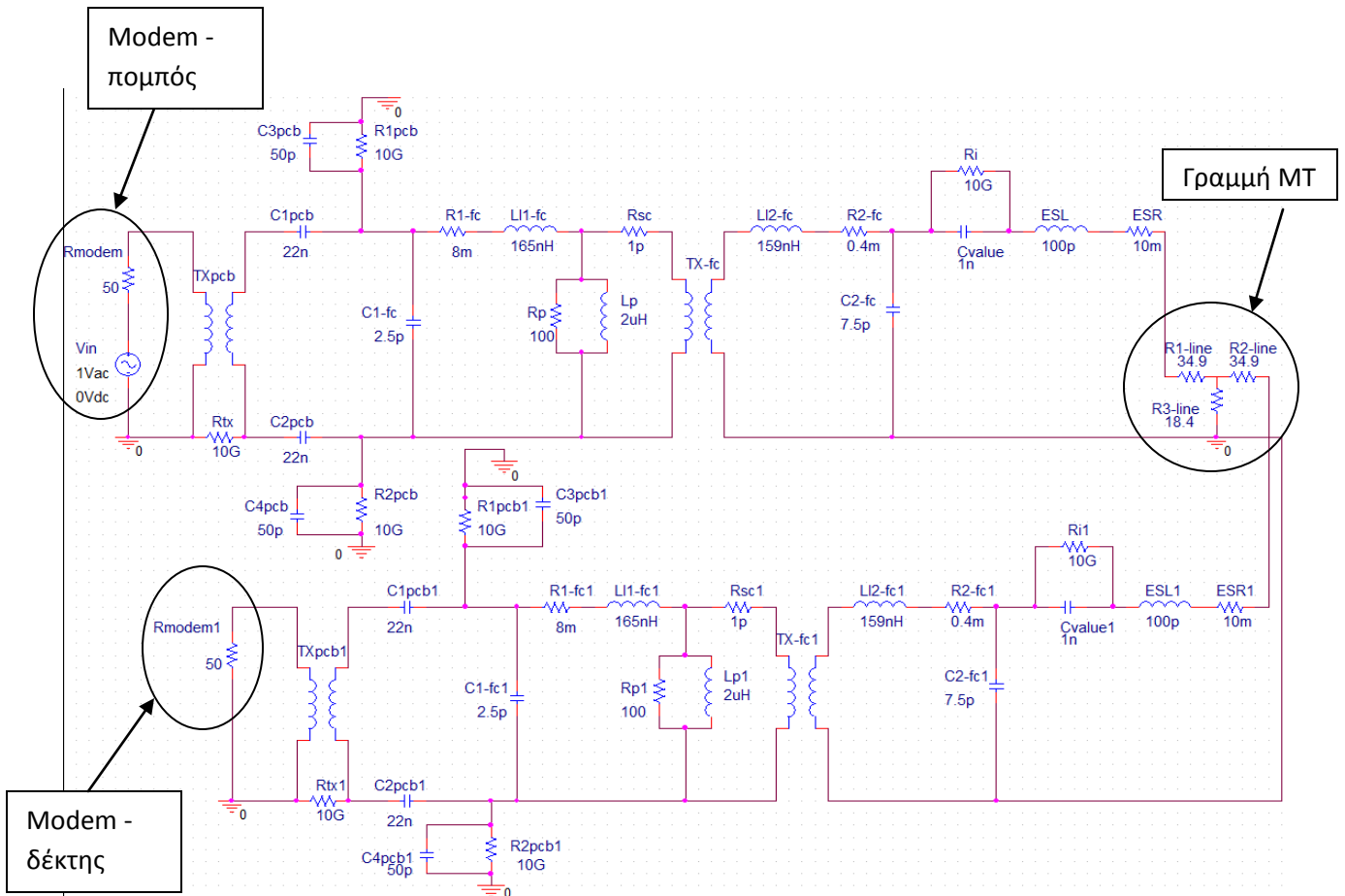


Σχήμα 6.25 Εξάρτηση της ισχύος εξόδου P (R_{line}) από την παράμετρο R_{line} (από 2Ω ως 500Ω με βήμα 1Ω) για τη συχνότητα των 50MHz

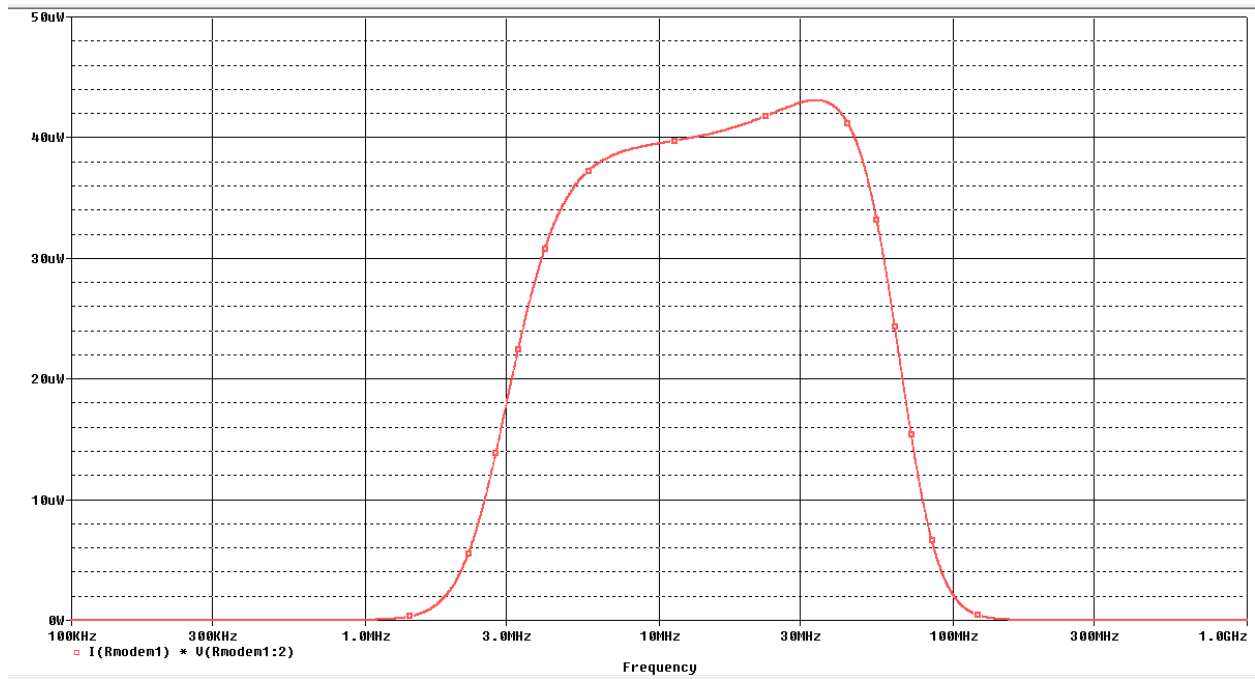
6.4 Μετάδοση PLC σήματος από κόμβο σε κόμβο – Αποτελέσματα προσομοίωσης

Στο Σχήμα 6.26 απεικονίζεται το ισοδύναμο κύκλωμα δύο γειτονικών ευρυζωνικών χωρητικών συζευκτών που είναι εγκατεστημένοι επί εναέριας γραμμής MT. Οι παράμετροι που δεν έχουν δείκτη αφορούν το συζεύκτη-πομπό, ενώ οι παράμετροι με το δείκτη 1 αφορούν το συζεύκτη-δέκτη. Θεωρείται ότι:

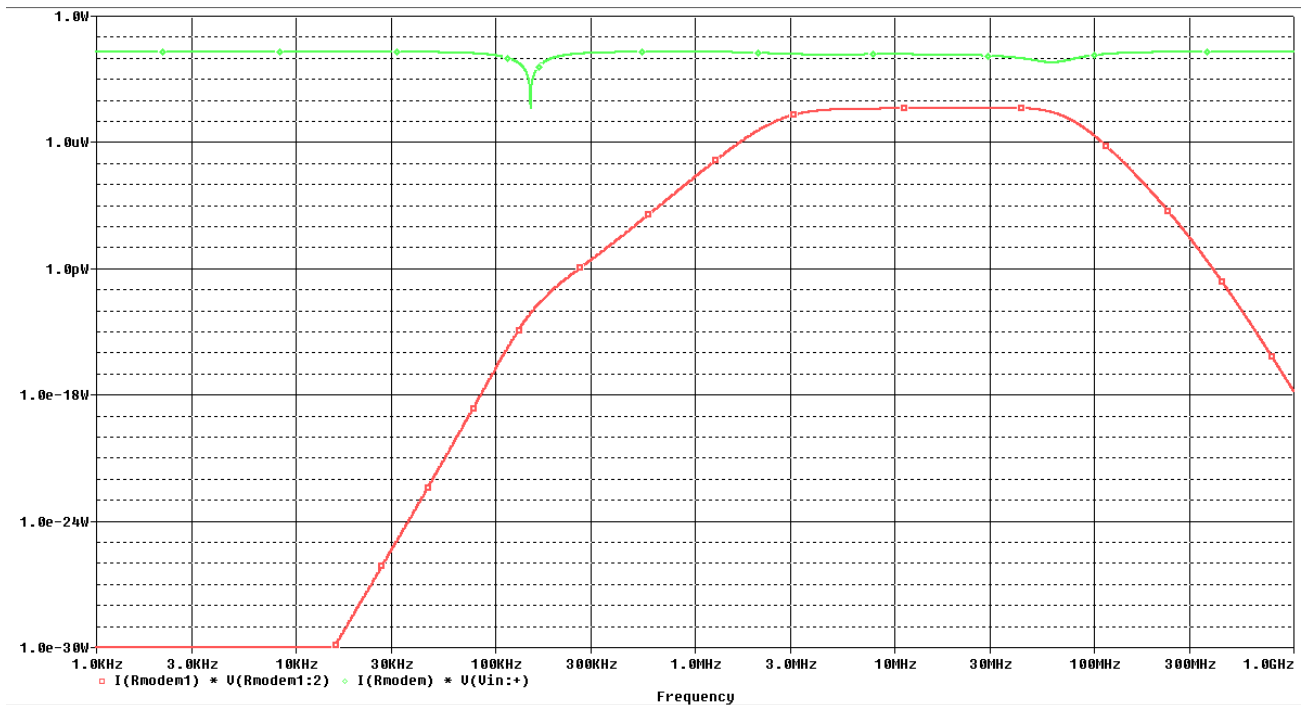
- Η απόσταση μεταξύ των δύο συζευκτών είναι 500m .
- Στο εναέριο καλώδιο τα PLC σήματα εξασθενούν κατά 3dB ανά 100m , τιμή που προσεγγίζει την πραγματική εξασθένιση εναέριων γραμμών MT. Άρα η συνολική εξασθένιση που επιφέρει η γραμμή MT είναι 15dB .
- Οι συζεύκτες, προς την πλευρά που ενώνονται στη γραμμή MT, βλέπουν αντίσταση 50Ω .
- Η συμπεριφορά της γραμμής MT προσομοιώνεται από ένα Τα ισοδύναμο δίθυρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.26. Οι τιμές των αντιστάσεων ***R1-line***, ***R2-line***, ***R3-line***, επιλέχθηκαν έτσι ώστε η ισοδύναμη αντίσταση που βλέπει ο συζεύκτης προς την πλευρά της γραμμής επί της οποίας εγκαθίσταται να είναι 50Ω και το PLC σήμα από το ένα άκρο του κλάδου της γραμμής μέχρι το άλλο να εξασθενεί κατά 15dB .



Σχήμα 6.26 Ισοδύναμο κύκλωμα δύο γειτονικών ευρυζωνικών χωρητικών συζευκτών εγκατεστημένων σε εναέρια γραμμή MT



Σχήμα 6.27 Ισχύς στο modem του δέκτη $P(R_{modem1})$ σε γραμμική κλίμακα



Σχήμα 6.28 Ισχύς εισόδου P_{in} και ισχύς εξόδου $P(Rmodem1)$ σε λογαριθμική κλίμακα

Στο Σχήμα 6.27 απεικονίζεται το διάγραμμα της ισχύος εξόδου $P_{out} = P(Rmodem1)$ σε γραμμική κλίμακα και στο Σχήμα 6.28 απεικονίζονται τα διαγράμματα ισχύος εισόδου $P_{in} = V_{in} \cdot I(Rmodem)$ και ισχύος εξόδου P_{out} σε λογαριθμική κλίμακα.

Για ισχύ εισόδου $P_{in} = 20mW$, η μέγιστη εξασθένηση του σήματος είναι περίπου 30dB αφού η ισχύς εξόδου P_{out} κυμαίνεται από 18μW στα 3MHz έως 43μW κοντά στα 30MHz.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τις παραμέτρους R_p, R_{p1}, L_p, L_{p1} δεν χρησιμοποιήθηκαν οι τιμές εκκίνησης του Σχήματος 6.5 αλλά αποδόθηκαν οι τιμές οι οποίες, όπως αποδείχθηκε από την προηγούμενη ανάλυση βελτιώνουν την επίδοση του χωρητικού συζεύκτη στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων (3 έως 50MHz). Συγκεκριμένα, $R_p = R_{p1} = 100\Omega$ και $L_p = L_{p1} = 2\mu H$. Ομοίως, η αντίσταση που βλέπει ο συζεύκτης προς τη γραμμή MT επιλέχθηκε να είναι 50Ω, τιμή που στην πράξη ποικίλει ανάλογα με το σημείο σύνδεσης του συζεύκτη στη γραμμή καθώς επίσης και από πολλούς άλλους παράγοντες.

6.5 Συμπεράσματα προσομοιώσεων

Μέσω των προσομοιώσεων, αποδείχθηκε ότι:

- Η διάταξη του ευρυζωνικού χωρητικού συζεύκτη που παρουσιάστηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία εγχέει PLC σήματα σε γραμμές MT και τα εξάγει αποτελεσματικά.
- Ο φερριτικός πυρήνας (παράμετροι Lp και Rp), ο πυκνωτής (παράμετρος $Cvalue$) και η αντίσταση που βλέπει ο συζεύκτης προς τη μεριά της γραμμής MT (παράμετρος $Rline$) είναι καθοριστικής σημασίας για την επίδοση της διάταξης στο επιθυμητό εύρος συχνοτήτων λειτουργίας.

Βιβλιογραφία

- [1] Γ.Μ. Χατζής, “Εφαρμογή Τεχνολογίας W-BPL σε γραμμή ΜΤ με Φωτοβολταϊκή Παραγωγή”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2012
- [2] Α.Γ. Λαζαρόπουλος, “Ευρυζωνική μετάδοση σημάτων μέσω γραμμών Μέσης Τάσης: Μοντέλα Διάδοσης – Χωρητικότητα”, Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Φεβρουάριος 2010
- [3] A.M. Sarafi, G.I. Tsiropoulos and P.G. Cottis, “Hybrid Wireless-Broadband over Power Lines: A Promising Broadband Solution in Rural Areas”, IEEE Communications Magazine, p.p. 140-147, November 2009
- [4] Θ.Σ. Μπρισίμη, “Πολλαπλή πρόσβαση σε δίκτυα BPL σύμφωνα με το πρότυπο IEEE 1901. Προσομοίωση λειτουργίας TDMA”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2011
- [5] Ν.Ι. Χιωτέλλης, “Η χρήση της ζώνης NB-PLC για επικοινωνίες ευφυούς δικτύου μέσω γραμμών μεταφοράς Μέσης Τάσης”, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Οκτώβριος 2012
- [6] <http://www.freepatentsonline.com/7535685.html> United States Patent 7535685, “Radio frequency signal coupler, coupling system and method”, 2009
- [7] <http://www.fair-rite.com/newfair/pdf/Broadband.pdf> “Use of Ferrites in Broadband Transformers”
- [8] <http://kambing.ui.ac.id/onnopurbo/orari-diklat/teknik/balun/qx3Trask.pdf> “Designing Wide-band Transformers for HF and VHF Power Amplifiers”, Chris Trask, 2005
- [9] <http://d4magnetics.com/page5/page5.html> “Leakage Inductance”, Chapter 5
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitance> “Capacitance”, Wikipedia
- [11] http://my.execpc.com/~endlr/cap_model.html “Capacitor Electrical Model”
- [12] P.F. Evangelides, C.A. Christodoulou, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos, “Parameters’ selection for metal oxide surge arresters models using genetic algorithm”, 30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010, 1315-1 – 1315-5
- [13] Εσωτερικές αναφορές της εταιρείας Amperion, Inc

