
Συστήματα Μετάδοσης Πληροφορίας

Γραμμές Μεταφοράς

1

Εισαγωγή

- **Γραμμή μεταφοράς:**
 - το υλικό μέσο που χρησιμοποιείται για τη σύνδεση δύο σημείων με σκοπό τη μεταφορά ισχύος
- **Στόχος:** μικρή απόσβεση και παραμόρφωση
- Γραμμή μεταφοράς είναι και το καλώδιο που μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από το εργοστάσιο σε μια πόλη
- Στα **τηλεπικοινωνιακά συστήματα** συνδέει την κεραία (εκπομπής ή λήψης) με τον πομπό ή το δέκτη
- Πότε και γιατί το μελετάμε ξεχωριστά;
 - Ο χρόνος διάδοσης της τάσης από την πηγή στο φορτίο κατά μήκος της γραμμής γίνεται συγκρίσιμος με το ρυθμό μεταβολής της τάσης της πηγής
 - στις υψηλές συχνότητες εμφανίζονται διάφορα φαινόμενα
 - η γραμμή μεταφοράς παύει να είναι ένα απλό καλώδιο

2

Γραμμές Μεταφοράς

Βασικοί Τύποι

3

Γενικά

- Υπάρχει μια μεγάλη ποικιλία γραμμών μεταφοράς (καλωδίων) με διαφορετικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές
- **Τεχνικά χαρακτηριστικά:**
 - εύκαμπτες ή άκαμπτες
 - θωρακισμένες ή όχι από παρεμβολές και υγρασία
 - διηλεκτρικό τον αέρα ή κάποιο άλλο
- **Ιδιότητες:**
 - ικανότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος
 - ικανότητα μεταφοράς υψηλών συχνοτήτων
- **Γενική κατηγοριοποίηση**
 - παράλληλες γραμμές (χαμηλές συχνότητες)
 - ομοαξονικές γραμμές (κάτω από 18GHz)
 - κυματοδηγοί (πάνω από 1GHz)

4

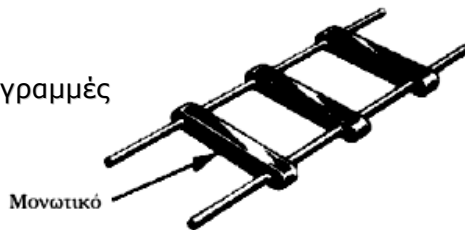
Κατηγοριοποίηση

1. **Παράλληλες Γραμμές**
 - Δισύρματες Γραμμές Ανοιχτού Τύπου
 - Δισύρματες Γραμμές Τύπου Ταινίας
2. **Συνεστραμμένου Ζεύγους**
3. **Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων**
4. **Ομοαξονικές Γραμμές**
 - Άκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές
 - Εύκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές
5. **Κυματοδηγοί**

5

Παράλληλες Γραμμές Ανοιχτού Τύπου

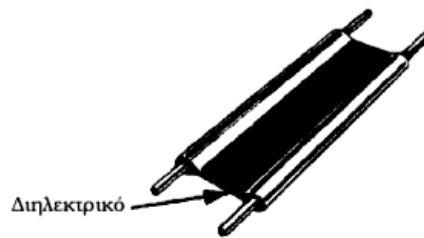
- Δύο αγωγοί σε σταθερή απόσταση μεταξύ τους
 - απόσταση μερικών εκατοστών
 - συγκρατούνται ενδιάμεσα με μονωτικό υλικό
- **Εφαρμογές**
 - μεταφορά ισχύος
 - υπαίθριες τηλεφωνικές γραμμές
- **Πλεονεκτήματα**
 - απλότητα κατασκευής
- **Μειονεκτήματα** (ειδικά για ραδιοσυχνότητες)
 - απώλειες ακτινοβολίας
 - θόρυβος + παρεμβολές λόγω έλλειψης θωράκισης



6

Παράλληλες Γραμμές Τύπου Ταινίας

- Διαφέρουν από τις προηγούμενες επειδή έχει προστεθεί διηλεκτρικό μέσο με μικρές απώλειες
 - συνήθως πολυαιθυλένιο
- Εφαρμογή
 - σύνδεση κεραιάς με δέκτη τηλεόρασης (Αμερική)



7

Συνεστραμμένου Ζεύγους (1/2)

- Δύο σύρματα χαλκού που περιβάλλονται από μονωτικό υλικό και είναι περιστραμμένα μεταξύ τους
 - το μήκος και ο τρόπος πλέξης επηρεάζουν την απόδοση
- Πλεονεκτήματα
 - χαμηλό κόστος
- Μειονεκτήματα
 - δεν ενδείκνυται για υψηλές συχνότητες
 - απώλειες του μονωτικού με την υγρασία (βροχή)
- Εφαρμογές
 - ευρεία χρήση στις ζεύξεις μεγάλων αποστάσεων
 - χρησιμοποιούνται επαναλήπτες
 - δίκτυα υπολογιστών
 - τηλεφωνικό δίκτυο



8

Συνεστραμμένου Ζεύγους (2/2)

- Συνήθως ενώνονται πολλά ζεύγη μονωμένα και σχηματίζουν μία δέσμη σε προστατευτικό περίβλημα
 - η πλέξη μειώνει την παρεμβολή μεταξύ των ζευγών
 - φαινόμενο crosstalk και παράδειγμα από τηλεφωνία
- Το εύρος ζώνης εξαρτάται από το πάχος και την καλυπτόμενη απόσταση
 - λειτουργούν ως χαμηλοπερατό φίλτρο
- **Διάκριση**
 - Αθωράκιστο (UTP: Unshielded Twisted Pair)
 - » CAT5: 4 ζεύγη, 100 Mbps για 100 m
 - » Δίκτυα υπολογιστών
 - Θωρακισμένο (STP: Shielded Twisted Pair)
 - » Προστασία από θόρυβο και παρεμβολές

9

Θωρακισμένα Ζεύγη Καλωδίων

- Δύο παράλληλοι **αγωγοί**
- Στερεό **διηλεκτρικό**
- **Χάλκινο πλέγμα** για προστασία από τυχόν διπλανά ΗΜ πεδία
- Εύκαμπτο **λαστιχένιο περίβλημα** για προστασία από υγρασία και μηχανικές καταπονήσεις



10

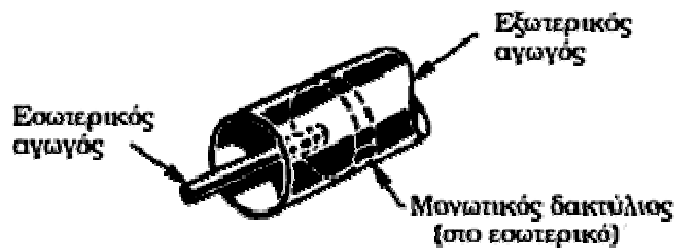
Ομοαξονικές Γραμμές

- Δύο ομόκεντροι αγωγοί τους οποίους χωρίζει κάποιο διηλεκτρικό
- Γενικά πλεονεκτήματα έναντι παράλληλων γραμμών
 - καλύτερη θωράκιση
 - καλύπτουν μεγαλύτερες αποστάσεις
 - υψηλότερες ταχύτητες
- **Διάκριση**
 - άκαμπτες ομοαξονικές γραμμές
 - εύκαμπτες ομοαξονικές γραμμές

11

Άκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές (1/2)

- Εσωτερικός αγωγός μέσα σε σωληνοειδή εξωτερικό αγωγό
 - ο εσωτερικός αγωγός μπορεί να είναι επίσης σωληνοειδής
 - διηλεκτρικό αέρας
 - πλαστικό περίβλημα
 - μονωτικοί δακτύλιοι ανά διαστήματα



12

Άκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές (2/2)

■ Πλεονεκτήματα

- ελάχιστες απώλειες ακτινοβολίας
 - » τα ΗΜ πεδία της γραμμής περιορίζονται στο εσωτερικό της γραμμής
- προστασία από παρεμβολές

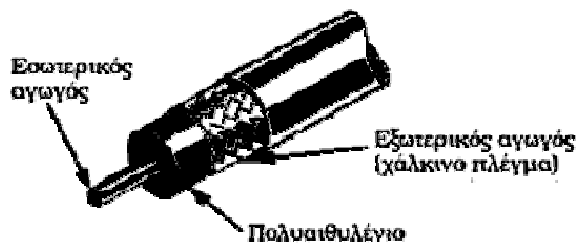
■ Μειονεκτήματα

1. ακριβή κατασκευή και ακαμψία του αγωγού
2. ο αέρας ως διηλεκτρικό μπορεί να παρουσιάσει διαρροές λόγω υγρασίας
 - » πολλές φορές εισάγεται **αέριο υπό πίεση** (άζωτο, ήλιο, αργό) για να μείνει ο χώρος στεγνός
3. στις υψηλές συχνότητες το μήκος της γραμμής περιορίζεται

13

Εύκαμπτες Ομοαξονικές Γραμμές

- Ο εξωτερικός αγωγός είναι χάλκινο πλέγμα που προσδίδει **ελαστικότητα**
- Οι δύο αγωγοί διαχωρίζονται από **πολυαιθυλένιο** ως διηλεκτρικό
 - όλα τα στερεά διηλεκτρικά έχουν μεγαλύτερες απώλειες από τον αέρα
 - το πολυαιθυλένιο έχει γενικά καλές ιδιότητες



14

Κυματοδηγοί

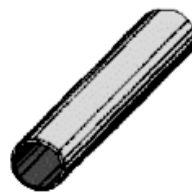
- Μεταλλικοί σωλήνες ορθογωνικής, ελλειπτικής ή κυκλικής διατομής
- Ισχύουν αρκετά διαφορετικά φαινόμενα σε σχέση με τις άλλες γραμμές μεταφοράς

- **Πλεονεκτήματα**

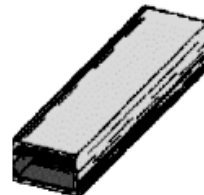
- υψηλές συχνότητες (μικροκυματικές εφαρμογές)
- μεγάλη ισχύς (δεκάδες kW)

- **Μειονεκτήματα**

- άκαμπτες διατάξεις
- σύνθετα διασυνδεδετικά κυκλώματα



Κυκλικής διατομής



Ορθογωνικής διατομής

Γραμμές Μεταφοράς

Απώλειες

(χαλκού, διηλεκτρικού, επαγωγής & ακτινοβολίας)

Απώλειες του Χαλκού

- **Προέλευση**
 - η αντίσταση του χαλκού
 - συγκρούσεις ηλεκτρονίων και παραγωγή θερμότητας
- **Αντίσταση του χάλκινου αγωγού** $R = \frac{\rho l}{A}$
 - ανάλογη του μήκους
 - αντιστρόφως ανάλογη της επιφάνειας διατομής
- **Επιδερμικό φαινόμενο (skin effect)**
 - DC: η ροή των ηλεκτρονίων είναι ομοιόμορφη στη διατομή του αγωγού
 - AC: όσο αυξάνεται η συχνότητα (100MHz), η ροή παύει στο κέντρο και τα ηλεκτρόνια κινούνται στην επιφάνεια
 - εικονική μείωση της διατομής
 - αφαίρεση του εσωτερικού
 - επάλειψη με ασήμι

17

Απώλειες του Διηλεκτρικού

- **Προέλευση**
 - θέρμανση του διηλεκτρικού υλικού
- **Παράγοντες**
 - η διαφορά δυναμικού (τάση) των αγωγών
 - η συχνότητα (επιδερμικό φαινόμενο, συχνότητες <18GHz)
- **Αέρας**
 - αμελητέες απώλειες
 - σπινθήρας
- **Στερεά διηλεκτρικά (για ελαστικότητα)**
 - μεγάλη διηλεκτρική σταθερά
 - αυξημένες απώλειες
 - το πολυαιθυλένιο είναι σχετικά καλό

18

Απώλειες Επαγωγής & Ακτινοβολίας

- Σχετίζονται με τα ΗΜ πεδία του αγωγού και οδηγούν σε απώλεια ισχύος
 - **Απώλειες Επαγωγής**
 - το ΗΜ πεδίο του αγωγού επάγει ρεύμα σε κοντινά μεταλλικά αντικείμενα
 - **Απώλειες Ακτινοβολίας**
 - όταν η γραμμή έχει κατάλληλες διαστάσεις μπορεί να λειτουργήσει ως **κεραία**
 - αντί να μεταφέρει την ΗΜ συχνότητα, την ακτινοβολεί μερικώς στο χώρο
 - **Λύσεις**
 - σωστός τερματισμός της γραμμής
 - θωράκιση και σωστή γείωση
 - » οι ομοαξονικές είναι πολύ καλύτερες από τις παράλληλες
 - » Προσφέρουν κατάλληλη θωράκιση και γείωση του εξωτερικού αγωγού
-

19

Γραμμές Μεταφοράς

Κατανεμημένα Χαρακτηριστικά

20

Κατανεμημένα Χαρακτηριστικά

- Στα συνηθισμένα ηλεκτρικά κυκλώματα, κάθε στοιχείο (αντίσταση, πυκνωτής, πηνίο) βρίσκεται σε συγκεκριμένο σημείο του κυκλώματος
- Σε μια γραμμή μεταφοράς, τα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά
 - αντίσταση, χωρητικότητα, επαγωγή, αγωγιμότητα
 - βρίσκονται ομοιόμορφα κατανεμημένα σε όλο το μήκος της γραμμής
- Μιλάμε για **κατανεμημένα χαρακτηριστικά**
 - οι τιμές των μεγεθών εκφράζονται **ανά μονάδα μήκους**

21

Μήκος Γραμμής

- **Μήκος Γραμμής**
 - Το φυσικό μήκος της γραμμής σε σύγκριση με το $\frac{1}{4}$ του μήκους κύματος της συχνότητας που μεταφέρει
- 1. **Γραμμή Μικρού Ηλεκτρικού Μήκους**
 - φυσικό μήκος $< \lambda/4$
 - ωμική αντίσταση και η ισχύς μεταφέρεται σχεδόν ολόκληρη στο φορτίο
 - νόμοι του Ohm και συγκεντρωμένα χαρακτηριστικά
- 2. **Γραμμή Μεγάλου Ηλεκτρικού Μήκους**
 - φυσικό μήκος $> \lambda/4$
 - σύνθετη αντίσταση
 - κατανεμημένα χαρακτηριστικά
 - ξεχωριστές ιδιότητες και ανάλυση
- **Παράδειγμα:** γραμμή 3m @ 30kHz και 30GHz

22

Επαγωγή (Inductance)

- Μηχανισμός αυτεπαγωγής σε έναν αγωγό
 - νόμος του Faraday
 - κανόνας του δεξιού χεριού
 - αυξομείωση των μαγνητικών γραμμών
 - αυτεπαγωγή που αντιστέκεται στις αλλαγές του ρεύματος
- Η γραμμή μεταφοράς έχει **επαγωγική συμπεριφορά**
 - κατανεμημένη επαγωγή L
 - μετράται σε Henry/m

23

Χωρητικότητα (Capacitance)

- Οι δύο αγωγοί συμπεριφέρονται σαν τις δύο πλάκες ενός πυκνωτή
- Το ενδιάμεσο υλικό δρα ως το διηλεκτρικό του πυκνωτή
- **Ερώτηση:** Από τι εξαρτάται;
- Η γραμμή μεταφοράς έχει **χωρητική συμπεριφορά**
 - κατανεμημένη χωρητικότητα C
 - μετράται σε Farad/m



24

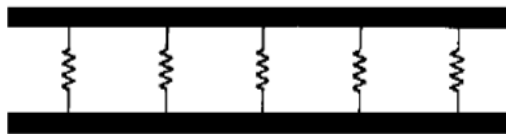
Αντίσταση (Resistance)

- Ο αγωγός έχει συγκεκριμένη αντίσταση
- **Ερώτηση:** Από τι εξαρτάται;
- Η γραμμή μεταφοράς έχει **ωμική συμπεριφορά**
 - κατανεμημένη αντίσταση R
 - μετράται σε Ohms/m

25

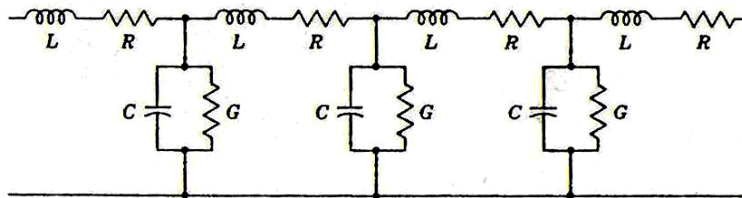
Αγωγιμότητα (Conductance)

- Το διηλεκτρικό μεταξύ των δύο αγωγών δεν είναι τέλειος μονωτής
- Υπάρχει ένα μικρό ρεύμα διαρροής μεταξύ των αγωγών
- Αυτό αντιστοιχεί σε μια αντίσταση μεταξύ των αγωγών που εμφανίζεται σε παράλληλη σύνδεση κατά μήκος του αγωγού
- Καλείται αγωγιμότητα
 - κατανεμημένη **αγωγιμότητα G**
 - γενικά είναι το αντίστροφο της αντίστασης
 - μετράται σε $\text{Ohms}^{-1} / \text{m}$ ή Siemens/m (S/m)



26

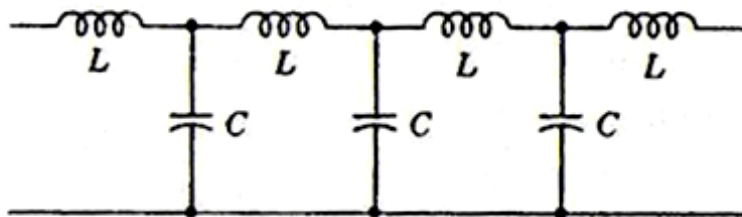
Ισοδύναμη Αναπαράσταση



27

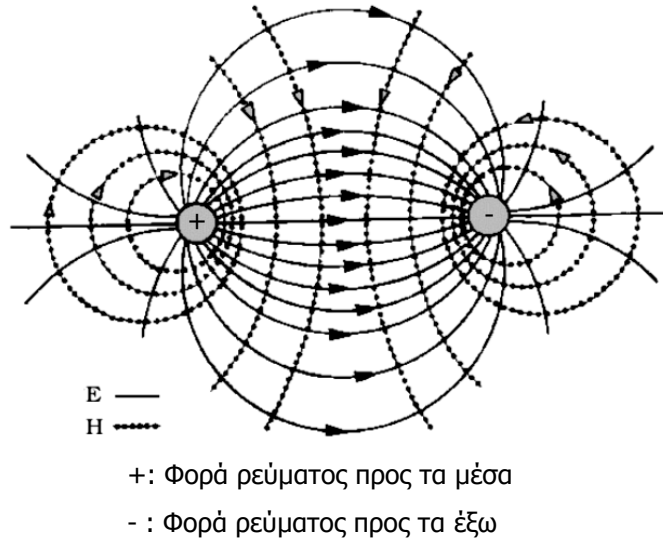
Απλοποιημένη Ισοδύναμη Αναπαράσταση

- Στην περίπτωση των ραδιοσυχνοτήτων (υψηλές τιμές του ω)
 - $\omega L \gg R$
 - $\omega C \gg G$



28

Η/Μ Πεδία σε Παράλληλη Γραμμή



29

Γραμμές Μεταφοράς

Χαρακτηριστική Αντίσταση

30

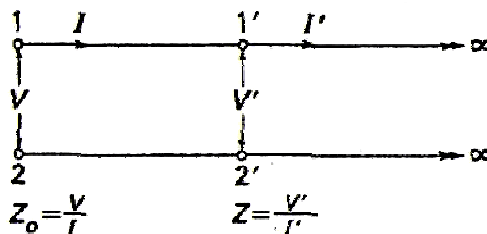
Εισαγωγή

- **Ερώτημα:** πόση είναι η αντίσταση της γραμμής μεταφοράς;
- Εφόσον η γραμμή μεταφοράς περιέχει αντιστάσεις, επαγωγές και χωρητικότητες έχει σύνθετη αντίσταση εισόδου
- Η σύνθετη αντίσταση εξαρτάται από
 - τον τύπο της γραμμής
 - το μήκος
 - τον τρόπο τερματισμού (το είδος του φορτίου που βρίσκεται στην άλλη άκρη)
- **Ορισμός:** Χαρακτηριστική Αντίσταση Γραμμής Μεταφοράς Z_0
 - η σύνθετη αντίσταση στην είσοδο μιας γραμμής αν θεωρήσουμε ότι έχει άπειρο μήκος
- Με βάση αυτόν το συμβατικό ορισμό απαλασσόμαστε από την έννοια του τερματισμού της γραμμής
- Η χαρακτηριστική αντίσταση είναι σημείο αναφοράς της γραμμής

31

Χαρακτηριστική Αντίσταση

$$Z_0 = \frac{V}{I}$$



- Τα σημεία 1'-2' είναι τόσο μακριά από το τέλος της γραμμής όσο και τα σημεία 1-2
- Η σύνθετη εμπέδηση εισόδου στα 1'-2' είναι πάλι Z_0 , αν και η τάση και το ρεύμα έχουν ελαφρώς μικρότερες τιμές από ότι στα 1-2
- **Ισοδύναμος Ορισμός:** Χαρακτηριστική Αντίσταση Z_0 είναι η σύνθετη αντίσταση που μετράται στην είσοδο όταν η γραμμή είναι τερματισμένη σε σύνθετη αντίσταση ίση με Z_0

32

Υπολογισμός Z_0

- Συναρτήσει των R, G, C, L

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

- συνάρτηση της συχνότητας
- R : ωμική αντίσταση
- ωL : Επαγωγική αντίδραση
- ωC : Χωρητική δεκτικότητα

- Γραμμή χωρίς απώλειες ($R=G=0$):

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

- δεν εξαρτάται από τη συχνότητα

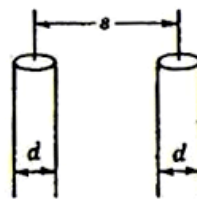
33

Τύποι Z_0

- Παράλληλη γραμμή:
 - k : διηλεκτρική σταθερά (ϵ_r)

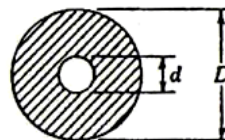
$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{k}} \log \frac{2s}{d}$$

- $150\Omega < Z_0 < 600\Omega$



- Ομοαξονική γραμμή:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{k}} \log \frac{D}{d}$$

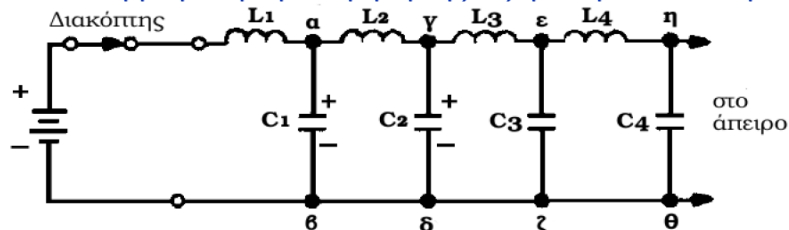


- $40\Omega < Z_0 < 150\Omega$

34

Καθυστέρηση Διάδοσης Κύματος σε Γραμμή Μεταφοράς

- Ανάλυση με βάση τη θεώρησή της ως ηλεκτρικό κύκλωμα



- Χρονική στιγμή $t=0$: Ο διακόπτης κλείνει, η γραμμή είναι αρχικά αφόρτιστη, οι πυκνωτές δρουν ως βραχυκύκλωμα ενώ τα πηνία αντιστέκονται στην αύξηση του ρεύματος
- Χρονική στιγμή $t=0^+$: Ο C_1 φορτίζεται μετά την διέλευση του ρεύματος από την επαγωγική αντίσταση. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης τα α-β και α-γ έχουν την ίδια διαφορά δυναμικού
- Όταν ο C_1 φορτιστεί πλήρως δρα ως ανοιχτοκύκλωμα και το ρεύμα διαρρέει το L_2

$$V_c = \frac{Qc}{C} = \frac{I \cdot t}{C}$$

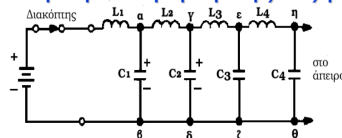
$$V_L = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = L \cdot \frac{I}{t}$$

$$\Rightarrow v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

35

Καθυστέρηση Διάδοσης Κύματος σε Γραμμή Μεταφοράς

- Ανάλυση με βάση τη θεώρησή της ως μέσο διάδοσης ΗΜ κυμάτων



- Ταχύτητα διάδοσης ΗΜ σε ένα μέσο διηλεκτρικού κ :

$$u_p = \frac{u_c}{\sqrt{\kappa}}$$

- Παράγοντας ταχύτητας u_f για ένα διηλεκτρικό μέσο είναι ο λόγος μείωσης της ταχύτητας σε σχέση με την ταχύτητα διάδοσης στο κενό

$$u_f = \frac{u_p}{u_c} = \frac{1}{\sqrt{\kappa}}$$

$$\kappa = 1.2 - 2.8 \Rightarrow u_f = (60\% - 90\%) u_c$$

- Το μήκος κύματος της συχνότητας f σε μια γραμμή μεταφοράς μειώνεται σε

$$\frac{\lambda}{\sqrt{\kappa}}$$

36

Γραμμές Μεταφοράς

Ανακλάσεις

37

Εισαγωγή

- Μια γραμμή μεταφοράς μπορούμε να την αναλύσουμε είτε ως κύκλωμα, είτε ως ένα μέσο διάδοσης ΗΜ πεδίων
 - τάση: ηλεκτρικό πεδίο
 - ρεύμα: μαγνητικό πεδίο
- Όταν ένα «κύκλωμα» συνδέεται σε ένα άλλο, τότε μπορούν να εμφανιστούν **ανακλάσεις**, όπως θα εμφανίζονταν αν το ΗΜ κύμα διερχόταν σε ένα άλλο μέσο
- Η ανάκλαση/μετάδοση εξαρτάται από τις δύο εμπεδήσεις
 - Z_0 : η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής
 - Z_L : η σύνθετη αντίσταση του φορτίου (load)
- **Προσπίπτον ΗΜ πεδίο**: το πεδίο (ρεύμα/τάση) που μεταφέρει η γραμμή
- **Μεταδιδόμενο ΗΜ πεδίο**: το πεδίο που περνάει στο φορτίο
- **Ανακλώμενο ΗΜ πεδίο**: το πεδίο που επιστρέφει στη γραμμή

38

Προσαρμογή Γραμμής

1. $Z_L = Z_0$
 - η γραμμή είναι **προσαρμοσμένη (matched)** στο φορτίο
 - μη-συντονισμένη (non-resonant) ή επίπεδη (flat)
 - βέλτιστη μεταφορά ισχύος από τη γραμμή στο φορτίο
 - δεν υπάρχουν ανακλάσεις
 2. $Z_L \neq Z_0$
 - **συντονισμένη (resonant)** γραμμή
 - ένα μέρος της τάσης/ρεύματος που μεταφέρεται (προσπίπτων) μεταδίδεται στο φορτίο (μεταδιδόμενο)
 - ένα μέρος ανακλάται (ανακλώμενο)
 - ένα μέρος της ισχύος δε μεταφέρεται στο φορτίο λόγω ανακλάσεων
 - στη γραμμή μεταφοράς λαμβάνουμε το άθροισμα του προσπίπτοντος κύματος και των ανακλάσεών του
- **Παρατήρηση:** η προσαρμογή συμβαίνει και στη σύνδεση πηγής - γραμμής μεταφοράς

39

Συντελεστές Ανάκλασης

- **Λόγος ανάκλασης τάσεων**
1. γενικά είναι μιγαδικός αριθμός
 2. $0 \leq |\rho| \leq 1$
 3. Αν $\rho = 0$, δεν υπάρχει ανάκλαση
 4. Αν $|\rho| = 1$, υπάρχει πλήρης ανάκλαση
 5. Αν $\rho < 0$, υπάρχει αλλαγή φάσης

$$\rho = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

- **Λόγος ανάκλασης ρεύματος**

$$T = \frac{I_r}{I_i} = -\rho$$

- **Λόγος ανάκλασης ισχύος**

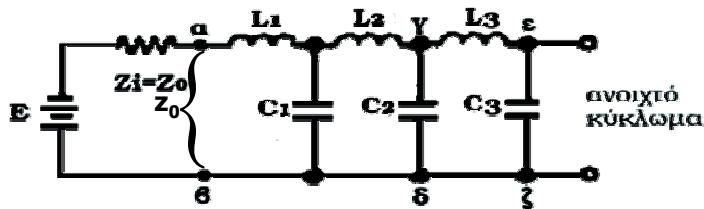
$$R = \frac{P_r}{P_i} = |\rho|^2$$

- ελαχιστοποιείται για $Z_L = Z_0^*$
- τι σημαίνει αυτό για πραγματικό και μιγαδικό Z_0 ;

40

Ανάκλαση DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα (1/2)

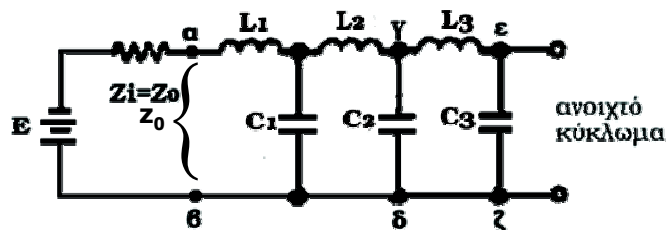
1. Μόλις φορτιστεί ο C_3 σε $E/2$, το ρεύμα τείνει να μηδενιστεί
2. Το L_3 αντιδρά παράγοντας επιπλέον ρεύμα προς την ίδια κατεύθυνση και φορτίζει τον πυκνωτή μέχρι E , δεδομένου ότι η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο ισοδυναμεί με αυτή στον πυκνωτή
3. Ο C_3 γίνεται ανοιχτό κύκλωμα
4. Το ρεύμα στο L_2 τείνει να μηδενιστεί, οπότε συνεχίζεται η ίδια διαδικασία προς τα πίσω
 - Το προσπίπτον κύμα μεταφέρει την τάση $E/2$ και το ρεύμα από την πηγή στο ανοιχτό κύκλωμα
 - Το ανακλώμενο κύμα κινείται από το φορτίο στην πηγή



41

Ανάκλαση DC σε Ανοιχτό Κύκλωμα (2/2)

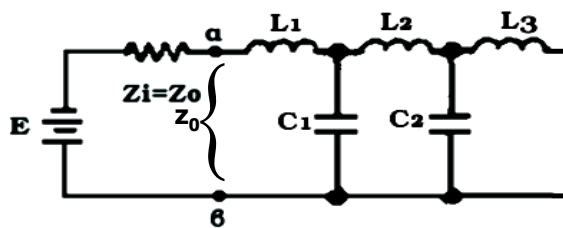
- Η πηγή είναι προσαρμοσμένη στη γραμμή ($Z_i=Z_0$)
 - δε γίνεται ανάκλαση εκεί
- Ανοιχτό κύκλωμα: $Z_L=\infty$
- $\rho=1$: πλήρης ανάκλαση
 - η τάση ανακλάται συμφασικά $V_r = V_i$
 - το ρεύμα ανακλάται με αντίθετη πολικότητα $I_r = -I_i$
- Η τελική τάση (των πυκνωτών) είναι E
- Το ρεύμα τελικά μηδενίζεται (αναμενόμενο λόγω ανοιχτού κυκλώματος)



42

Ανάκλαση DC σε Βραχυκύκλωμα (1/2)

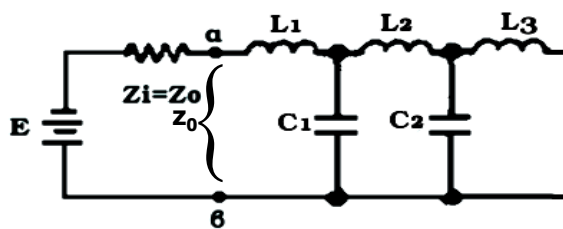
1. Ο C_2 φορτίζεται μέσω του L_2
2. Όταν φορτιστεί σε $E/2$ γίνεται ανοιχτό κύκλωμα
3. Η αποθηκευμένη ενέργεια του L_3 δεν απορροφάται από κάποιον επόμενο πυκνωτή και το πηνίο γίνεται πηγή ρεύματος αντίθετης πολικότητας
4. Ο πυκνωτής C_2 εκφορτίζεται και βραχυκυκλώνει το L_2 με τον C_1
5. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι την πηγή



43

Ανάκλαση DC σε Βραχυκύκλωμα (2/2)

- Βραχυκύκλωμα: $Z_L = 0$
- $\rho = -1$ (γιατί;): πλήρης ανάκλαση
 - η τάση ανακλάται με αντίθετη πολικότητα $V_r = -V_i$
 - το ρεύμα ανακλάται συμφασικά $I_r = I_i$
- Η τελική τάση (των πυκνωτών) είναι 0 (αναμενόμενο λόγω βραχυκυκλώματος)
- Το ρεύμα τελικά είναι $I = I_r + I_i = E/Z_0$



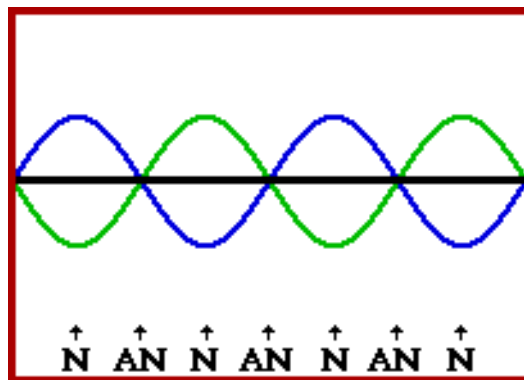
44

Ανακλάσεις σε AC

- Αν στα άκρα μιας γραμμής μεταφοράς εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση, τότε αυτή μεταδίδεται κατά τρόπο αντιστοιχο της DC κατά μήκος της γραμμής
- Σε κάθε σημείο της γραμμής, η τάση μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο
- Αν «παγώσω» το χρόνο και δω την τάση κατά μήκος της γραμμής είναι επίσης ημιτονοειδής
- Πρόκειται για ένα κύμα που μεταδίδεται κατά μήκος της γραμμής
- Η ταχύτητα μετάδοσης είναι η ταχύτητα μετάδοσης v_p ($< c$)
- Στο άκρο της γραμμής συμβαίνουν ανακλάσεις με τους ίδιους κανόνες όπως και στην περίπτωση DC
- Τελικά, πάνω στη γραμμή υπάρχουν δύο ημιτονοειδή κύματα:
 - **προσπίπτον**: από την πηγή προς το φορτίο
 - **ανακλώμενο**: από το φορτίο προς την πηγή
- Η τελική τάση είναι το άθροισμά τους που καλείται **στάσιμο κύμα**

45

Στάσιμο Κύμα

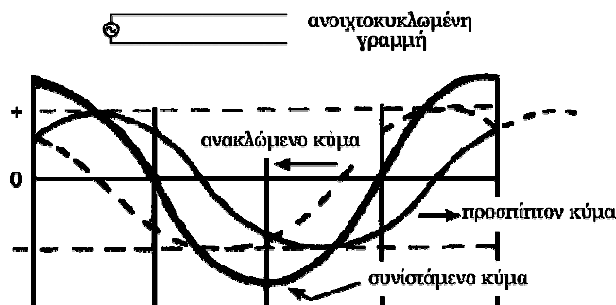


- **Προσοχή**: είναι animation (το στάσιμο κύμα-μαύρο- δεν είναι πάντοτε μηδέν)

46

Ανάκλαση AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα (1/2)

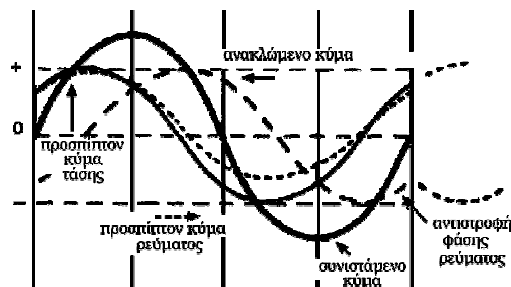
- Όπως και στην περίπτωση DC, η τάση ανακλάται με την ίδια πολικότητα
- Το άθροισμα των δύο κυμάτων δημιουργεί ένα **στάσιμο κύμα τάσης**:
 - μεγιστοποιείται στο σημείο τερματισμού
 - μηδενίζεται σε απόσταση $\lambda/4$ από τον τερματισμό
 - το μοτίβο επαναλαμβάνεται ανά $\lambda/2$



47

Ανάκλαση AC σε Ανοιχτό Κύκλωμα (2/2)

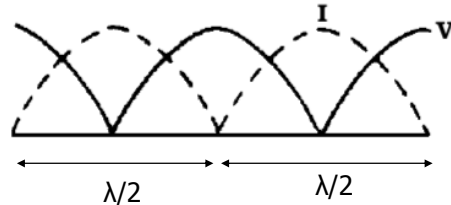
- Η **ανάκλαση του ρεύματος** γίνεται με αντίθετη πολικότητα
- Στο σημείο τερματισμού το ολικό ρεύμα είναι πάντοτε μηδενικό (αναμενόμενο λόγω ανοιχτού κυκλώματος)
- Το άθροισμα των δύο κυμάτων δημιουργεί ένα **στάσιμο κύμα ρεύματος**:
 - μηδενίζεται στο σημείο τερματισμού
 - μεγιστοποιείται σε απόσταση $\lambda/4$ από τον τερματισμό
 - το μοτίβο επαναλαμβάνεται ανά $\lambda/2$



48

Στάσιμο Κύμα σε Ανοιχτό Κύκλωμα

- Όταν μελετάμε τα στάσιμα κύματα, μας ενδιαφέρουν οι μέγιστες απόλυτες τιμές των μεγεθών

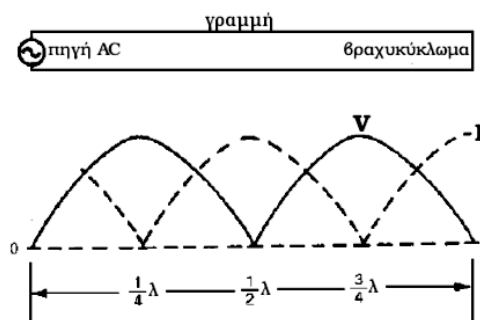


- Παρατηρήσεις:
 1. μέγιστο τάσης στον τερματισμό
 2. μηδενισμός τάσης σε $\lambda/4$
 3. μέγιστο ρεύματος σε $\lambda/4$
 4. μηδενισμός ρεύματος στον τερματισμό
 5. περιοδικότητα $\lambda/2$

49

Στάσιμο Κύμα σε Βραχυκύκλωμα

- Συμβαίνουν τα αντίθετα από ότι στο ανοιχτό κύκλωμα



- Παρατηρήσεις:
 1. μηδενισμός τάσης στον τερματισμό (βραχυκύκλωμα)
 2. μέγιστο τάσης σε $\lambda/4$
 3. μέγιστο ρεύματος στον τερματισμό (βραχυκύκλωμα)
 4. μηδενισμός ρεύματος σε $\lambda/4$
 5. περιοδικότητα $\lambda/2$

50

Στάσιμα Κύματα

- **Πλήρης ανάκλαση:** όπως είδαμε υπάρχουν σημεία που το στάσιμο κύμα μηδενίζεται



- **Καθόλου ανάκλαση:** η τάση/ρεύμα είναι ημιτονοειδής και η συμβατική αναπαράσταση του στάσιμου κύματος είναι ευθεία γραμμή
- **Μερική ανάκλαση:** δεν έχω σημεία μηδενισμού – η τάση κυμαίνεται μεταξύ V_{max} και V_{min}



51

Λόγος Στάσιμου Κύματος

- Για να προσδιορίσω πόσο κοντά βρίσκομαι σε μία από τις δύο ακραίες καταστάσεις (πλήρους και καθόλου ανάκλασης),
 - ορίζω το **λόγο στάσιμου κύματος (standing wave ratio)**

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{1+|\rho|}{1-|\rho|}$$

- **Παρατηρήσεις:**

1. Αφού $0 \leq |\rho| \leq 1$, τότε $1 \leq |SWR| \leq \infty$
2. Χωρίς ανάκλαση: $\rho = 0 \Leftrightarrow SWR = 1$
3. Πλήρης ανάκλαση: $|\rho| = 1 \Leftrightarrow SWR \rightarrow \infty$
4. Ο SWR προσφέρει έναν πρακτικό τρόπο υπολογισμού του ρ

$$|\rho| = \frac{SWR - 1}{SWR + 1}$$

52

Αντίσταση Γραμμής σε Απόσταση L (1/3)

- Νόμος του Ohm: σε κάθε σημείο της γραμμής, ισχύει ότι

$$Z_0 = \frac{V}{I}$$

- Ωστόσο, αυτό ισχύει **ξεχωριστά** για κάθε ένα από τα κύματα που μεταδίδονται μέσα στη γραμμή (προσπίπτον, ανακλώμενο)
- Πάνω στη γραμμή μεταδίδεται το άθροισμα των κυμάτων,
 - δεν ισχύει ο παραπάνω νόμος
 - η σύνθετη αντίσταση (εμπέδηση) της γραμμής είναι διαφορετική από σημείο σε σημείο
 - ανάλογα με τους μηδενισμούς και τα μέγιστα των στάσιμων κυμάτων ρεύματος και τάσης

53

Αντίσταση Γραμμής σε Απόσταση L (2/3)

- Ορίζω την αντίσταση γραμμής **σε απόσταση l** από τον τερματισμό ($x=0$) (V, I στάσιμων κυμάτων)

$$Z_{in}(l) = \frac{V(x)}{I(x)} \Big|_{x=-l}$$

- Αποδεικνύεται ότι

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l}$$

- όπου $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

- και το λ είναι το μήκος κύματος κατά τη μετάδοση μέσα στη γραμμή και όχι στο κενό
- Δύσκολη η χρήση του τύπου
 - χρησιμοποιούνται γραφικοί τρόποι υπολογισμού του $Z_{in}(l)$
 - π.χ. **χάρτης Smith**

54

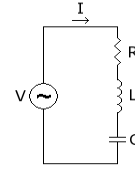
Επανάληψη: Συντονιστές RLC

- Θεωρούμε την περίπτωση $R \approx 0$

1. Κύκλωμα RLC σε σειρά

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$$

- Για ω_0 , η εμπέδηση σχεδόν μηδενίζεται (μόνο ωμική)
- Για $\omega > \omega_0$, επαγωγική συμπεριφορά ($Im\{Z\} > 0$)
- Για $\omega < \omega_0$, χωρητική συμπεριφορά ($Im\{Z\} < 0$)

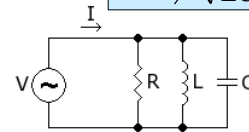


$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

2. Κύκλωμα RLC παράλληλο

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{R} + j\left(\omega C - \frac{1}{\omega L}\right)$$

- Για ω_0 , η εμπέδηση σχεδόν απειρίζεται (μόνο ωμική)
- Για $\omega > \omega_0$, χωρητική συμπεριφορά
- Για $\omega < \omega_0$, επαγωγική συμπεριφορά



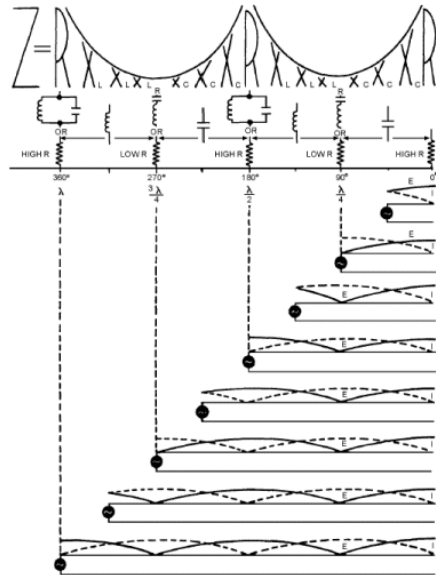
55

Αντίσταση Γραμμής σε Απόσταση L (3/3)

- Η σύνθετη αντίσταση της γραμμής δεν είναι σταθερή κατά μήκος της γραμμής
- Ανάλογα
 - σε ποιο σημείο θα κόψω μια γραμμή μεταφοράς
 - και τον τρόπο τερματισμού της,
- η αντίσταση εισόδου της μπορεί να πάρει όλες τις δυνατές τιμές
 - κύκλωμα με μεγάλη ωμική αντίσταση (parallel LC)
 - κύκλωμα με μικρή ωμική αντίσταση (series LC)
 - κύκλωμα με επαγωγική συμπεριφορά
 - κύκλωμα με χωρητική συμπεριφορά

56

Εμπέδηση Εισόδου σε Ανοιχτό Κύκλωμα



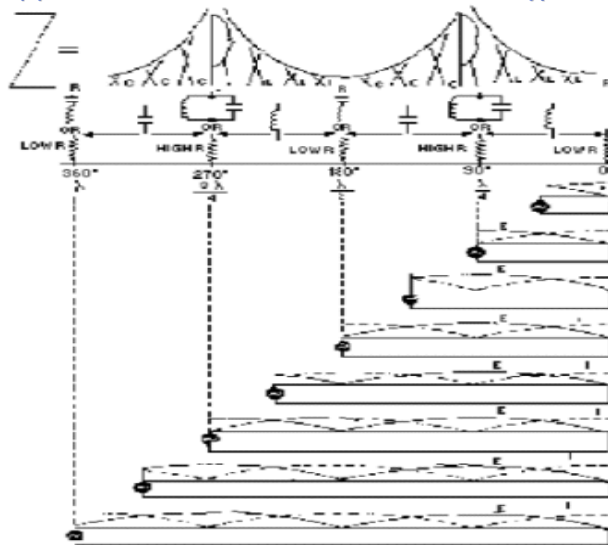
■ Παρατηρήσεις:

1. ανοιχτό κύκλωμα: άπειρη αντίσταση ή συμπεριφορά parallel LC
2. $\lambda/4$: αμελητέα αντίσταση ή συμπεριφορά series LC
3. αν μετακινηθώ λίγο από τα σημεία των ακρότατων είναι σα να φεύγω λίγο από τη συχνότητα συντονισμού και έχω χωρητική/επαγωγική συμπεριφορά
4. περιοδικότητα $\lambda/2$
5. Τάση μέγιστη στα σημεία $n\lambda/2$ (εμπέδηση θεωρητικά άπειρη) και μηδενική ($n\lambda/2 + \lambda/4$)

57

Εμπέδηση Εισόδου σε Βραχυκύκλωμα

- Συμβαίνουν τα αντίθετα από ότι στο ανοιχτό κύκλωμα



58

Τερματισμός Γραμμής (1/2)

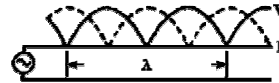
1. Τερματισμός σε Βραχυκύκλωμα

$$Z_L = 0, \rho = -1, SWR \rightarrow \infty$$



2. Τερματισμός σε Ανοιχτό κύκλωμα

$$Z_L \rightarrow \infty, \rho = 1, SWR \rightarrow \infty$$



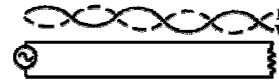
3. Τερματισμός σε Ωμική Αντίσταση $Z_L \in R$

- $Z_L = Z_0$, προσαρμοσμένη γραμμή $\rho = 0, SWR = 1$

- $Z_L > Z_0$ $\rho > 0, SWR = \frac{Z_L}{Z_0}$



- $Z_L < Z_0$ $\rho < 0, SWR = \frac{Z_0}{Z_L}$



59

Τερματισμός Γραμμής (2/2)

4. Τερματισμός σε Άεργο Φορτίο (πυκνωτή/πηνίο) $Z_L = jX$

$$|\rho| = 1, SWR = \infty$$

- πλήρης ανάκλαση
- οι θέσεις των μεγίστων / μηδενισμών του στάσιμου δε θα είναι στο σημείο τερματισμού αλλά μετακινημένα ανάλογα με την τιμή X (εμφανίζονται σε απόσταση $\lambda/8$ στην περίπτωση της προσαρμογής)

5. Τερματισμός σε Μιγαδικό Φορτίο

- μερική ανάκλαση $0 < |\rho| < 1, SWR > 1$

- μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας ανακλάται
- το ανακλώμενο ρεύμα/τάση είναι τροποποιημένο κατά φάση και πλάτος
- οι ελάχιστες τιμές δεν είναι μηδενικές

60

Επίδραση της Προσαρμογής

- Όταν το φορτίο δεν είναι **προσαρμοσμένο** στη γραμμή μεταφοράς, εμφανίζονται **προβλήματα**:
 - ανακλώμενα κύματα: βλάβη της γεννήτριας
 - στάσιμα κύματα: υπερθέρμανση και καταστροφή της γραμμής
 - εντονότερα προβλήματα θορύβου
 - φαινόμενα «ghosting»
 - απώλεια ισχύος: απαίτηση για μεγαλύτερη ισχύ εκπομπής
- Υπάρχουν διάφορα κυκλώματα προσαρμογής

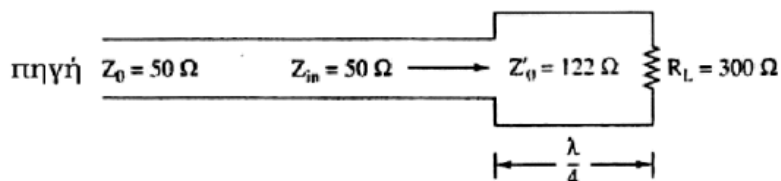
61

Προσαρμογή με Μετασχηματιστή $\lambda/4$

- Πριν συνδεθεί το (Ω μικό) φορτίο στη γραμμή παρεμβάλλεται γραμμή μήκους $L = \lambda/4$ για την επιθυμητή συχνότητα λειτουργίας
- και χαρακτηριστικής αντίστασης $Z'_0 = \sqrt{Z_0 Z_L}$ που προκύπτει από:

$$Z_{in}(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad \begin{matrix} l = \lambda/4 \\ \Rightarrow \\ Z_0 = Z'_0 \end{matrix} \quad Z_{in}(\lambda/4) = \frac{(Z'_0)^2}{Z_L}$$

- Για την προσαρμογή στη γραμμή πρέπει: $Z_{in}(\lambda/4) = Z_0$



62

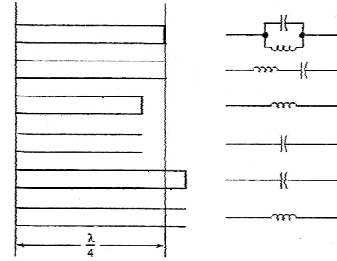
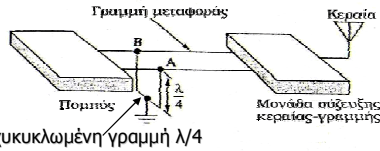
Εφαρμογές

■ Εξομοίωση Συγκεντρωμένων Κυκλωμάτων

- Πράξη: βραχυκυκλωμένη γραμμή ηλεκτρικού μήκους $\lambda/4$

Φίλτρα

- Καταστολή άρτιων αρμονικών μιας συχνότητας



■ Μετατροπείς Baluns

- Ισορροπημένη (balanced) γραμμή: μεταφέρει 2 σήματα με διαφορά φάσης 180° αναφορικά με το έδαφος
- Μη ισορροπημένη (unbalanced) γραμμή: ένας αγωγός για το σήμα και ο άλλος στη γείωση
- Μετατροπέας (balanced to unbalanced): συνδέει μια balanced γραμμή σε unbalanced γραμμή ή κεραία καθώς και μιας ομοαξονικής γραμμής σε ένα δίπολο

