Τμημα Ηλεκτρολογων Μηχανικων και Μηχανικων Υπολογιστων

Διαταξεις Υψηλων Συχνοτητων

---

# Σειρά Ασκήσεων 1/2 -Γραμμές Μεταφοράς

---


*Συγγραφέας:*
Σπυρίδων Χατζηγεωργίου
*AEM: 10527*
*spyrchat@ece.auth.gr*


April 30, 2023

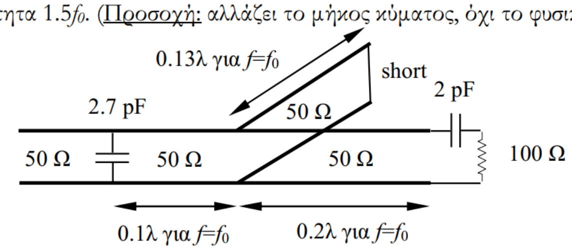
# 1 Άσκηση 1

**<u>1.1. Ανάλυση κυκλώματος γραμμής μεταφοράς - Διάγραμμα Smith</u>**

Δίνεται το παρακάτω κύκλωμα TEM γραμμής μεταφοράς χαρακτηριστικής αντίστασης 50 Ω που λειτουργεί σε συχνότητα $f_0$ = 1 GHz (έστω λ το μήκος κύματος στη γραμμή μεταφοράς για τη συχνότητα αυτή).

**(α)** Υπολογίστε το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο, για τη συχνότητα $f_0$, με το διάγραμμα του Smith.

**(β)** Κάντε το ίδιο για συχνότητα $1.5f_0$. (<u>Προσοχή:</u> αλλάζει το μήκος κύματος, όχι το φυσικό μήκος των γραμμών).




## 1.1 α)

$$ZL = 100 - \frac{1}{2 * \pi * 10^9 * 2 * 10^{-12} j} \tag{1}$$

Τώρα θα πρέπει να γίνει κανονικοποίηση του ZL ώστε να μπορεί να γίνει η χρήση του Διαγράμματος Smith

$$zl = \frac{ZL}{50} = 2 - 1.59j \tag{2}$$

Μετά το zl υπάρχει κομμάτι από Γραμμή Μεταφοράς μήκους 0.2λ. Στο zl βρισκόμαστε περίπου στο 0.292λ στο διάγραμμα Smith άρα 0.292+0.2 = 0.492 η οποία είναι η νέα θέση. Στη θέση αυτή προκύπτει za = 0.3 -0.05j

Στη συνέχεια υπάρχει βραχυκυκλωμένος κλαδωτής. Επομένως γίνεται μετατροπή του za σε αγωγιμότητά, βρίσκοντας το αντιδιαμετρικό σημείο στον σταθερό SWR κύκλο. ya = 3.4 + 0.54j.

Για το βραχυκυκλωμένο κλαδωτή πρέπει στο Διάγραμμα Smith να πραγματοποιηθεί μια ωρολογιακή περιστροφή, από το σημείο με άπειρη αντίσταση, κατά 0.13λ. Έτσι θα προκύψει το σημείο 0.38λ που έχει xsc = -0.912j

$$yb = ya + xsc = 3.4 + 0.54j - 0.912j = 3.4 - 0.372j \tag{3}$$

Μετά τον βραχυκυκλωμένο κλαδωτή υπάρχει άλλη μία Γραμμή Μεταφοράς μήκους 0.1λ. Αφού γίνει μετατροπή από την αγωγιμότητα, σε αντίσταση zb = 0.29 + 0.0318j

Το λ στη zb είναι 0.008.
άρα πρέπει με παρόμοια περιστροφή να προκύψει η θέση $\lambda 2 = 8{*}10^{-3} + 0.1 = 0.108\lambda . \Pi\rho o\kappa\pi\tau\epsilon\iota\tau\iota zc = 0.41 + 0.63j$.

Έπειτα υπάρχει ένας παράλληλος πυκνωτής.Επομένως μετατρέποντας το zc σε αγωγιμότητα, yc = 0.725 - 1.11j.
Για τον πυκνωτή:

$$Ycap = j\omega c = j2\pi * 10^9 * 2.7 * 10^{-12} = 0.01696j \tag{4}$$

Στο Ycap πρέπει να γίνει κανονικοποίηση, άρα:

$$ycap = Ycap * 50 = 0.848j \tag{5}$$

Για το yd:

$$yd = 0.725 - 1.11j + 0.848j = 0.725 - 0.262j \tag{6}$$

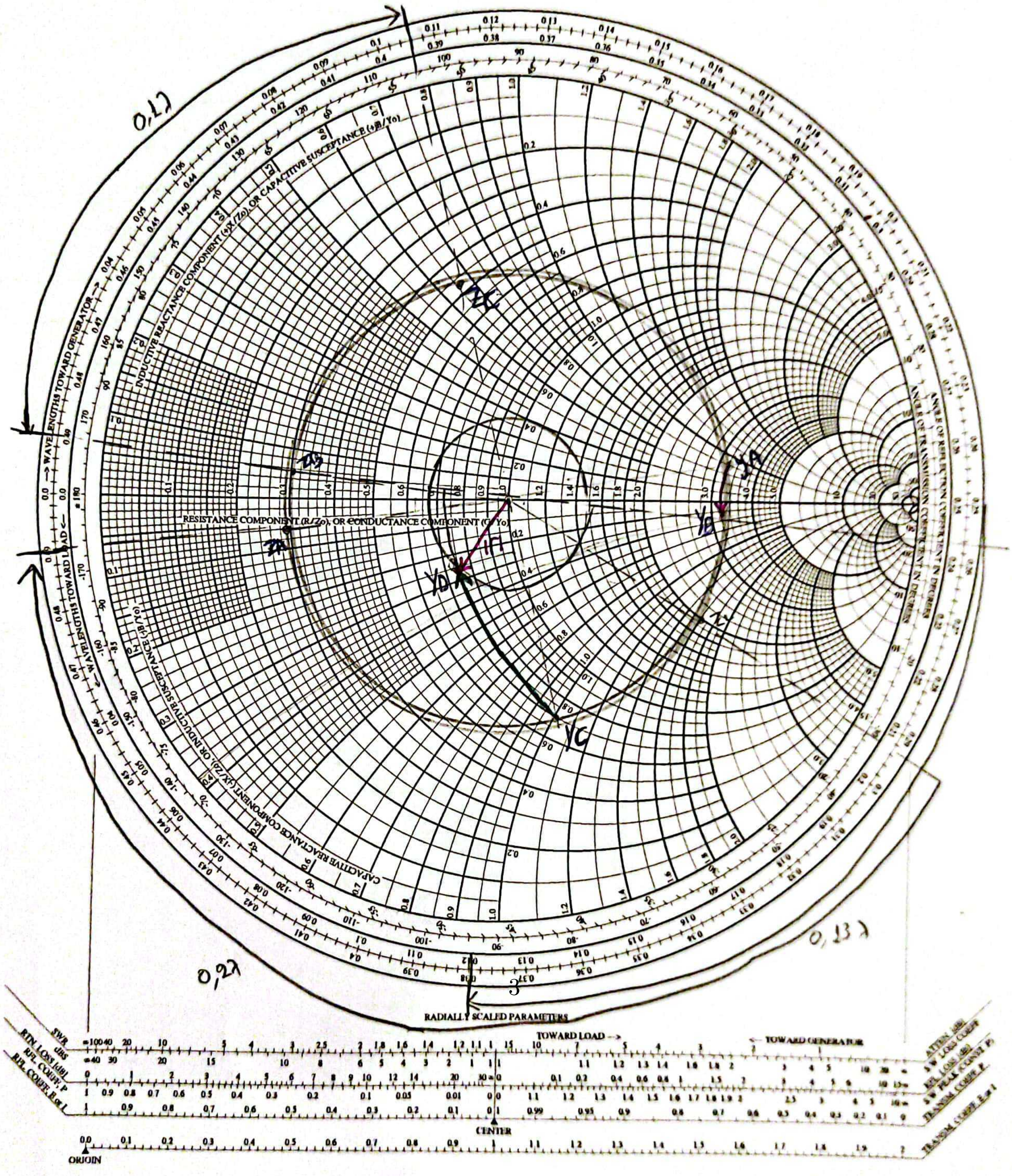
Το |Γ| μπορεί να βρεθεί αν με τον χάρακα μετρηθεί η απόσταση του yd από την αρχή των αξόνων και διαιρεθεί με την ακτίνα του κύκλου του διαγράμματος Smith. Προκύπτει |Γ| = 0.217

Σχόλιο: Στα περισσότερα βήματα που περιλαμβάνουν το διάγραμμα smith έχουν γίνει προσεγγίσεις, με αποτέσμα τα αριθμητικά αποτελέσματα, αν και είναι κοντά (όπως θα δούμε στην προσομοίωση), στην πραγματική τιμή, υπάρχουν αποκλίσεις.

J 1a

# The Complete Smith Chart

## Black Magic Design



## 1.2 β)

Επειδή αλλάζει η συχνότητα και γίνεται 1.5fo τότε: $\lambda = \frac{vp}{f}$ και $\lambda' = \frac{vp}{f'}$
άρα: $\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{f}{f'} \Rightarrow \lambda = 1.5\lambda'$

Θέλει ιδιαίτερη προσοχή, καθώς το φυσικό μήκος των γραμμών παραμένει το ίδιο. Συνεπώς τα καινούργια μήκη γραμμών (σε μήκη κύματος) είναι:

- $0.2\lambda \rightarrow 1.5 * 0.2\lambda' = 0.3\lambda'$
- $0.13\lambda \rightarrow 1.5 * 0.13\lambda' = 0.195\lambda'$
- $0.1\lambda \rightarrow 1.5 * 0.1\lambda' = 0.15\lambda'$

Σχόλιο: Προφανώς λόγω αλλαγής της συχνότητας θα επηρεαστούν και οι αντιδράσεις των πυκνωτών.

Εκτελώντας την προηγούμενη διαδικασία που περιγράφτηκε αναλυτικά στο προηγούμενο ερώτημα βρίσκουμε:

$$C = \frac{1}{j2\pi * 1.5 * 10^9 * 2 * 10^{-12}} = -53.0516j \tag{7}$$

Κανονικοποιώντας το C προκύπτει: $c = 1.06$
zl = 2 - 1.06j, το σημείο έχει λ' = 0.286.
Έπειτα υπάρχει μια Γραμμή Μεταφοράς μήκους 0.3λ', άρα πρέπει να γίνει μια ωρολογιακή περιστροφή κατά 0.3λ'. Συνολικά l1 = 0.286λ' + 0.3λ' = 0.586λ'.
Το za = 0.5 + 0.46j.

Επειδή υπάρχει παράλληλος βραχυκυκλωμένος κλαδωτής, γίνεται μετατροπή του za σε αγωγιμότητα. ya = 1.08 - j.

Για τον κλαδωτή πρέπει να γίνει ωρολογιακή περιστροφή από το 0.25λ'(άπειρη αντίσταση) κατά 0.195λ'. Ταυτόχρονα πρέπει να γίνει ο υπολογισμός του jb.
Τελικά jb = -0.36j και yb = 1.08 -j -0.36j = 1 - 1.36j
zb = 0.35 + 0.48j (αντιδιαμετρικό σημείο του yb στον κύκλο σταθερού SWR)

Μετά τον κλαδωτή, υπάρχει μια Γραμμή μεταφοράς μήκους 0.15λ'. Άρα με βάσει τα παραπάνω, πρέπει πάλι να πραγματοποιηθεί μια ωρολογιακή περιστροφή στο Smith Chart. Αυτή τη φορά από το σημείο με 0.076λ' κατά 0.15λ'. Συνολικά 0.226λ'. Στο σημείο αυτό:

zc = 3.14 + 1.4j
yc = 0.265 - 0.119j

Για τον πυκνωτή:

$$\Upsilon cap = j2\pi * 10^9 * 1.5 * 2.7 * 10^{-12} = 0.0254j \tag{8}$$

ycap = 50 * Ycap = 1.272j

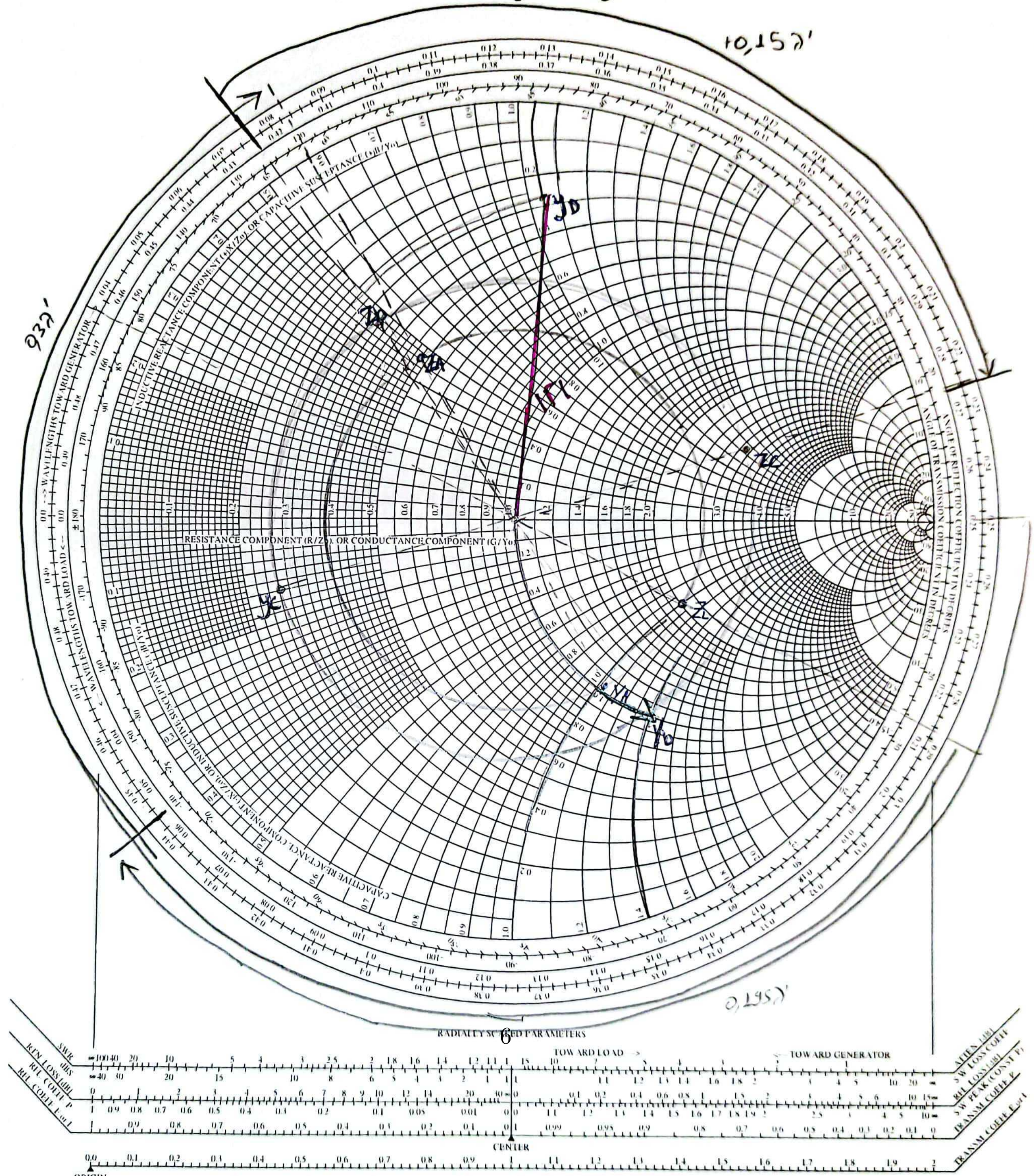
yd = yc + ycap = 0.265 + 1.153j.

Για το $|\Gamma|$ βάσει του προηγούμενου ερωτήματος, προκύπτει ότι: $|\Gamma| = 0.787$

1.1 b

# The Complete Smith Chart

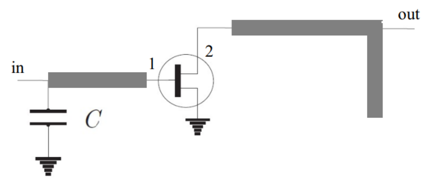
Black Magic Design



# 2 Άσκηση 2

**<u>1.2. Μικροκυματικός ενισχυτής (συζυγής προσαρμογή) – Διάγραμμα Smith</u>**

Μικροκυματικός ενισχυτής (σχήμα) σχεδιάζεται να λειτουργεί στα 2.5 GHz, με το <u>μέγιστο δυνατό κέρδος</u>. Ο ενισχυτής θα τροφοδοτεί φορτίο 50 Ω ενώ και στην είσοδό του θα τροφοδοτείται από κεραία μέσω γραμμής μεταφοράς 50 Ω. Το μικροκυματικό τρανζίστορ έχει χαρακτηριστικά $S_{11} = 0.57\underline{|-163^{\circ}}$ και $S_{22} = 0.76\underline{|-50^{\circ}}$, όπως διαβάζουμε στον πίνακα προδιαγραφών του (είναι οι συντελεστές ανάκλασης στις εισόδους του 1 και 2). Η μορφή του κυκλώματος σε μικροταινία (κάτοψη) φαίνεται στο σχήμα (δεν σχεδιάζεται το κύκλωμα πόλωσης). Όλες οι γραμμές μεταφοράς είναι 50 Ω.




- Ο πυκνωτής στο κύκλωμα εισόδου μπορεί να είναι είτε στην είσοδο του κυκλώματος (όπως στο σχήμα) είτε στον ακροδέκτη 1 του τρανζίστορ, είτε σε σειρά είτε παράλληλα.
- Στο κύκλωμα εξόδου έχουμε ανοιχτοκυκλωμένο κλαδωτή σε παράλληλη σύνδεση που μπορεί να είναι είτε στην έξοδο (όπως στο σχήμα) είτε στον ακροδέκτη 2 του τρανζίστορ.

Υπολογίστε όλα τα μήκη γραμμών (σε λ) και τη χωρητικότητα του πυκνωτή, ώστε να έχουμε τα μικρότερα δυνατά μήκη γραμμών. Χρησιμοποιήστε το διάγραμμα Smith.

$$Zs1 = \frac{1+S11}{1-S11} = 0.2795 - 0.138j \tag{9}$$

$$Zs2 = \frac{1+S22}{1-S22} = 0.7 - 1.938j \tag{10}$$

Επειδή δεν υπάρχει απευθείας σύνδεση μεταξύ των Γραμμών Μεταφοράς, η ανάλυση του κυκλώματος μπορεί να ξεκινήσει από οποιαδήποτε μεριά. Έστω ότι ξεκινάμε από την δεξιά. Ξεκινώντας από το φορτίο και κανονικοποιώντας την τιμή των 50Ω βρίσκουμε zl = 1. Αυτό σημαίνει ότι το zl βρίσκεται στην αρχή των αξόνων του διαγράμματος Smith. Συνεπώς αν ο βραχυκυκλωμένος κλαδωτής βρισκόταν στον ακροδέκτη 2 του Transistor,τότε η ύπαρξη της γραμμής μεταφοράς δεν θα προσέδιδε καθόλου επιδεκτικότητα καθώς δεν δημιουργείται κύκλος σταθερού SWR αφού το φορτίο είναι zl = 1, δηλαδή ο κύκλος εκφυλίζεται σε σημείο. Άρα ο κλαδωτής πρέπει να τοποθετηθεί στο φορτίο. Επειδή η άσκηση απαιτεί συζηγή προσαρμογή, πρέπει zin = zs2* = 0.7 + 1.938j. Στο διάγραμμα Smith βρίσκω το σημείο τομής του κύκλου με σταθερό πραγματικό φορτίο 1 με την καμπύλη 1.938j και επειδή είναι παράλληλος ο κλαδωτής αυτό το σημείο θα είναι το ya (αγωγιμότητα). Βρίσκουμε και το αντιδιαμετρικό σημείο του zg* στον κύκλο σταθερού SWR μιας και εργαζόμαστε σε αγωγιμότητες. Η απόσταση σε λ μεταξύ του ya και του yg* θα είναι το μήκος της Γραμμής μεταφοράς. Προκύπτει ότι **L1 = 0.237λ**. Για να ολοκληρωθεί η ανάλυση του δεξιού κυκλώματος θα πρέπει να υπολογιστεί και το μήκος του παράλληλου και ανοιχτοκυκλωμένου κλαδωτή. Στο διάγραμμα Smith, ξεκινώντας από το g = 0 (Επειδή υπάρχει Ανοιχτοκύκλωμα και εργαζόμαστε σε αγωγιμότητες) και κάνοντας μια ωρολογιακή περιστροφή μέχρι το σημείο όπου z = 1.938j. Προκύπτει **Ls = 0.185λ**, όπου είναι και το μήκος του παράλληλου και ανοιχτοκυκλωμένου κλαδωτή.

Για το αριστερό κύκλωμα:
Η άσκηση απαιτεί Συζηγή προσαρμογή, άρα: z1 = zg* = 1. Στην προκειμένη περίπτωση δίνεται το ανάποδο πρακτικά πρόβλημα από το προηγούμενο κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα δεν γίνεται να τοποθετηθεί ο πυκνωτής στον ακροδέκτη 1 του Transistor καθώς είτε σε σειρά είτε παράλληλα δεν είναι εφικτό μηδενίζοντας το φανταστικό μέρος του φορτίου φτάσει το φορτίο στο zl = 1 μόνο με μια Γραμμή Μεταφοράς. Αυτό που πρέπει να γίνει είναι μέσω της Γραμμής Μεταφοράς να καταλήξουμε Σε ένα από τα Σημεία Σ1 ή Σ2 τα οποία είναι τα Σημεία τομής του κύκλου με σταθερό zl = 1 με τον κύκλο σταθερού SWR που δημιουργείται από το Zs1 το οποίο έχει υπολογιστεί. Αν κινούμενοι στο Διάγραμμα Smith καταλήξουμε σε αυτά τα σημεία τότε είναι εφικτό προσθέτοντάς ή αφαιρώντας επιδεκτικότητα να φτάσουμε στην αρχή των αξόνων. Αναλυτικότερα με βάσει αυτά που ειπώθηκαν παραπάνω πρέπει να ληφθούν υπόψιν οι παρακάτω περιπτώσεις:

1. Πυκνωτής Παράλληλος:
   Σ1 = 1 + 1.38j, 0.172λ
   Σ2 = 1 - 1.38j, 0.328λ
   Το zs1 = 0.2795 - 0.138j. Άρα το ys1 = 2.876 + 1.42j. Βρήκαμε το αντιδιαμετρικό σημείο γιατί βολεύει να εργαστούμε σε αγωγιμότητες. Για να φτάσουμε από το ys1 στο Σ2 πρέπει να διανύσουμε απόσταση σε μήκη κύματος **L1 = 0.328λ - 0.226λ = 0.102λ**. Από εκεί για να καταλήξει στο κέντρο το φορτίο, θα πρέπει να προστεθεί j1.4, επομένως υπολογίζουμε:

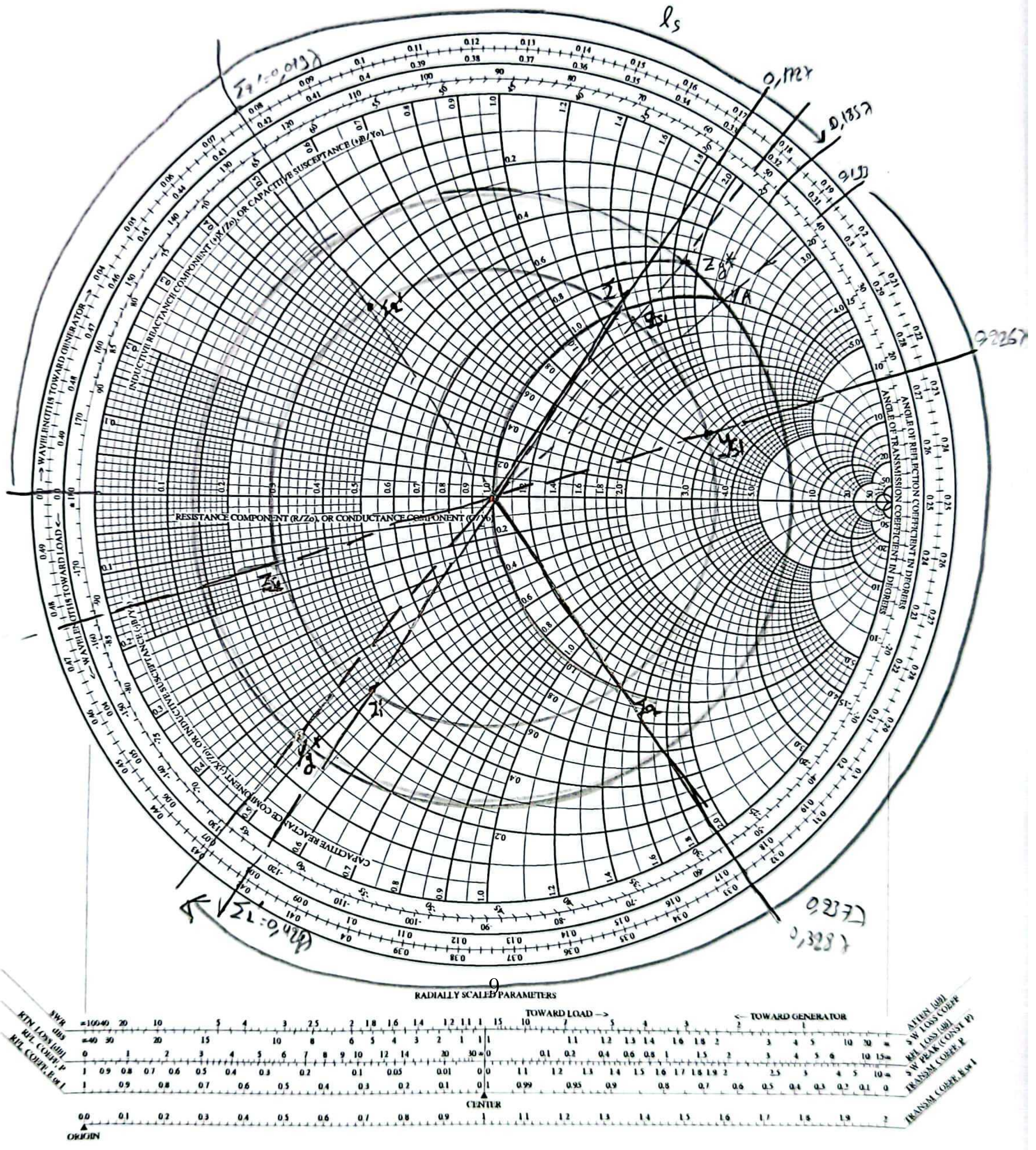
   $$Zo * j * \omega * c = 1.4j \Rightarrow c = 1.783pF \tag{11}$$

   Σχόλιο: επειδή το Σ1 έχει θετικό φανταστικό μέρος και ένας πυκνωτής παράλληλος, μπορεί μόνο να προσθέσει στο φανταστικό μέρος ενός φορτίου και όχι να αφαιρέσει, είναι αδύνατον να φτάσει το φορτίο στο σημείο z = 1. Έτσι απορρίπτουμε αυτή τη λύση.

2. Πυκνωτής σε Σειρά:
   Για να φτάσουμε στο Σ1 από το Zs1 απαιτείται μετακίνησή κατά L2 = 0.5λ - 0.476λ + 0.172λ = 0.196λ. Παρατηρούμε ότι είναι μεγαλύτερο από την περίπτωση του παράλληλου πυκνωτή, οπότε με βάσει τα ζητούμενα της άσκησης την απορρίπτουμε. Επίσης απορρίπτουμε την λύση του Σ2 για παρόμοιο λόγο που απορρίψαμε το Σ1 στο προηγούμενο ερώτημα

# The Complete Smith Chart

## Black Magic Design



# 3 Άσκηση 3

**<u>1.3. Ανάλυση κυκλωμάτων γραμμών μεταφοράς στο πεδίο της συχνότητας</u>**

**(α)** Χρησιμοποιώντας όποια προγραμματιστική πλατφόρμα προτιμάτε (Matlab, Python κλπ), υπολογίστε αναλυτικά και κάντε ένα γράφημα του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης, σε καθαρό αριθμό και σε dB, σε όλη τη ζώνη συχνοτήτων από 0 έως $4f_0$ (σε $N$=201 τιμές συχνότητας) για το κύκλωμα της άσκησης 1.1. Επαληθεύστε από το γράφημα τους υπολογισμούς που κάνατε στο 1.1.

<u>Υπόδειξη Α:</u> Θα πρέπει πρώτα να εκφράσετε τη σταθερά διάδοσης σαν συνάρτηση της συχνότητας. Θυμηθείτε ότι $\beta(f)l = (\omega / \upsilon_p)l = 2\pi fl / \upsilon_p$ όπου π.χ. ο κλαδωτής έχει μήκος $l = 0.13\lambda$ για $f = f_0$, άρα $l = 0.13\upsilon_p / f_0$, συνεπώς το όρισμα της εφαπτομένης θα είναι $\beta(f)l = 2\pi f(0.13\upsilon_p / f_0) / \upsilon_p = 0.13 \times 2\pi f / f_0$.

<u>Υπόδειξη Β:</u> Αν χρησιμοποιήσετε το MATLAB μπορείτε π.χ. να ορίσετε ένα διάνυσμα τιμών της συχνότητας, π.χ.

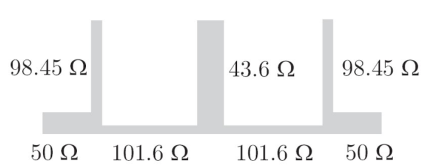
```
f = 0:(4*f0/N):(4*f0);
```

και να υπολογίστε το μέτρο του Γ, αφού πρώτα υπολογίσετε την αντίσταση εισόδου (αμέσως αριστερά του πυκνωτή εισόδου) από τις αναλυτικές σχέσεις, χρησιμοποιώντας διανυσματικές πράξεις (υπενθυμίζεται ότι στο MATLAB μπορούμε να κάνουμε πράξεις μεταξύ διανυσμάτων βάζοντας την τελεία πριν από το σύμβολο της πράξης, π.χ. το A.*B δίνει έναν πίνακα με στοιχεία τα γινόμενα των στοιχείων των πινάκων A και B που έχουν ίδιες διαστάσεις). Σε περίπτωση που δεν σας είναι εύκολος αυτός ο τρόπος, χρησιμοποιήστε ένα απλό βρόχο for. <u>Για να είναι ευανάγνωστο το διάγραμμα σε dB κρατήστε μόνο τις τιμές πάνω από κάποιο κατώφλι που μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν μηδέν (π.χ. -40 ή -60 dB) και όλες τις τιμές χαμηλότερές του θέστε τις ίσες με αυτό.</u>

---

**(β)** Με αντίστοιχο τρόπο, βρείτε την απόκριση συχνότητας του φίλτρου του σχήματος. Ένα φίλτρο είναι, ως γνωστόν, ένα δίθυρο κύκλωμα το οποίο εξασφαλίζει διέλευση του σήματος σε κάποιες περιοχές συχνοτήτων και αποκοπή σε άλλες. Σε μικροκυματικές συχνότητες, υλοποιούνται συνήθως με τμήματα γραμμών μεταφοράς. Στο σχήμα φαίνεται μια πραγματική υλοποίηση του φίλτρου σε κύκλωμα μικροταινίας (κάτοψη) όπου με γκρίζο χρώμα φαίνονται τα μεταλλικά στοιχεία στην πάνω όψη της διηλεκτρικής πλάκας. Στο παράδειγμα αυτό όλα τα τμήματα γραμμών μεταφοράς, εκτός από τις γραμμές μεταφοράς στην είσοδο και στην έξοδο, των οποίων το μήκος δεν προσδιορίζεται, έχουν μήκος λ/8 σε μια συχνότητα 1 GHz (θεωρούμε ότι η μικροταινία είναι πρακτικά γραμμή TEM, δηλ. η φασική ταχύτητα στη γραμμή μεταφοράς είναι ανεξάρτητη της συχνότητας και θεωρείται γνωστή). Η χαρακτηριστική αντίσταση κάθε τμήματος γ. μ. σημειώνεται στο σχήμα. Το παραπάνω κύκλωμα τερματίζεται σε προσαρμοσμένο φορτίο (50 Ω). Τα διακλαδισμένα τμήματα γραμμών μεταφοράς (κλαδωτές) είναι ανοιχτοκυκλωμένα.

Ζωγραφίστε το κυκλωματικό ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς του κυκλώματος. Γράψτε ένα μικρό κώδικα (π.χ. Matlab, Python, κλπ) για την ανάλυσή του, με σκοπό την εύρεση του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο. Ειδικότερα, απεικονίστε το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης (σε dB) καθώς και τον SWR στην είσοδο, στη ζώνη συχνοτήτων 0-3 GHz. Τιμές του συντελεστή ανάκλασης κάτω από -60 dB θέστε τις ίσες με -60 dB, όπως και τιμές του SWR πάνω από 10 θέστε τις ίσες με 10. Συμπεράνετε τί είδους φίλτρο είναι το κύκλωμα.



### 3.1 α)

```
N =201; fmin = 0; fmax = 4e9; f0 = 1e9;
f = fmin:((fmax-fmin)/N):fmax;

L0 = 1/5;
L1 = 1/10;
L2 = 0.13;
beta_L0 = 2 * pi * L0 * f / f0;
beta_L1 = 2 * pi * L1 * f / f0;
beta_L2 = 2 * pi * L2 * f / f0;

ZL = 100 + 1./(1j*2*pi*f*2e-12); Z0 = 50; Z2 = 1./(1j*2*pi*f*2.7e-12);

ZinA = Z0 *(ZL+1j*Z0.*tan(beta_L0))./(Z0 + 1j*ZL.*tan(beta_L0));

ZinSC = 1j *Z0.*tan(beta_L2);

ZL1 = (ZinA.*ZinSC)./(ZinA+ZinSC);

ZinC = Z0 .* (ZL1 + 1j*Z0.*tan(beta_L1)) ./ (Z0 + 1j*ZL1.*tan(beta_L1));


ZL2 = (ZinC.*Z2)./(ZinC + Z2);

Zin = ZL2;

S11 = (Zin-Z0)./(Zin+Z0);

plot(f/1e9,abs(S11));
xlabel('Frequency (GHz)'); ylabel('Reflection coefficient ');
plot(f/1e9,20*log10(abs(S11)));
xlabel('Frequency (GHz)'); ylabel('Reflection coefficient (dB)');
```

Παραπάνω φαίνεται ο κώδικας που επιλύει την άσκηση στην προγραμματιστική πλατφόρμα MATLAB

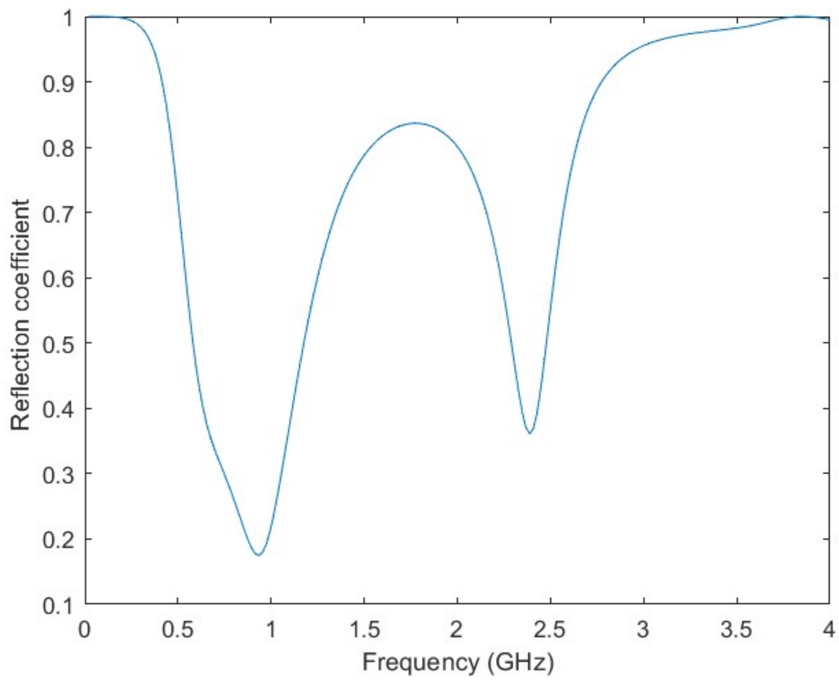



Figure 1: Μέτρο του Συντελεστή ανάκλασης στη ζώνη συχνοτήτων 0 έως 4fo

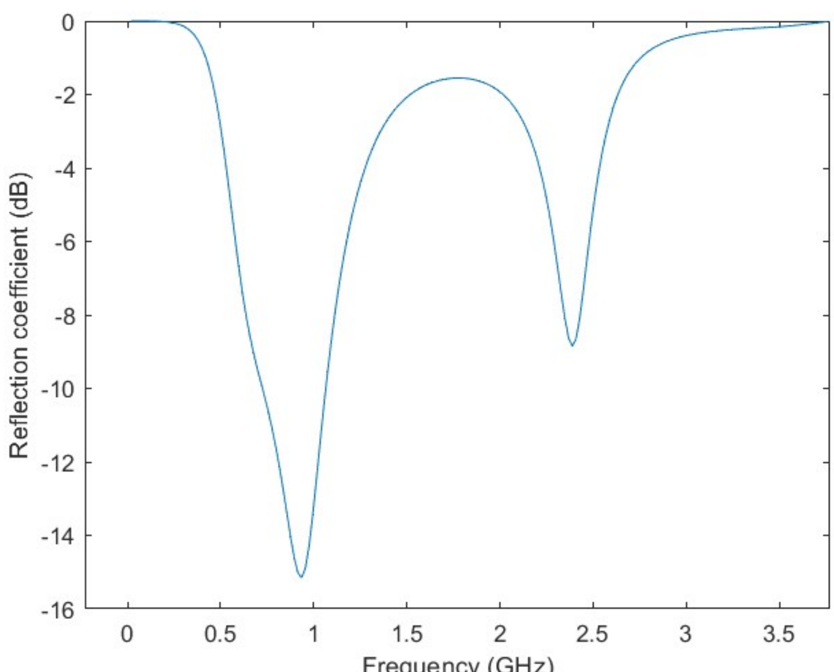





Figure 2: Μέτρο του Συντελεστή ανάκλασης στη ζώνη συχνοτήτων 0 έως 4fo σε DB

Από τα διαγράμματα παραπάνω εύκολα μπορούμε να επιβεβαιώσουμε τα αποτελέσματά της πρώτης άσκησης, δηλαδή $|\Gamma| = 0.217, fo = 1GHz$ και $|\Gamma| = 0.787, fo = 1.5GHz$. Μετά από μεγέθυνση στο διάγραμμα διαπιστώνουμε, ότι οι πραγματικές τιμές είναι $|\Gamma| = 0.2192, fo = 1GHz$ και $|\Gamma| = 0.79, fo = 1.5GHz$

## 3.2 β)

Ο κώδικας για τη μοντελοποίηση του κυκλώματος και την δημιουργία γραφημάτων για τον συντελεστή ανάκλασης (dB) και το SWR είναι ο εξής:

```
Z0 = 50; Z1 = 101.6; Z2 = 101.6; Z3 = 50;
Zs0 = 98.45; Zs1 = 43.6; Zs2 = 98.45;

N = 201; fmin = 0; fmax = 3e9; f0 = 1e9;
f = fmin:((fmax-fmin)/N):fmax;
L = 1/8; % It means that L = lambda/8 for f=f0;
beta_L = 2*pi*L*f/f0;

Zin_s0 = -1j*Zs0./tan(beta_L);
ZL0 = (Zin_s0*Z0)./(Zin_s0 + Z0);
Zin1 = Z1*(ZL0 + 1j*Z1*tan(beta_L))./(Z1+ 1j*ZL0.*tan(beta_L));

Zin_s1 = -1j*Zs1./tan(beta_L);
ZL1 = (Zin_s1.*Zin1)./(Zin_s1 + Zin1);
Zin2 = Z2*(ZL1 + 1j*Z2*tan(beta_L))./(Z2 + 1j*ZL1.*tan(beta_L));

Zin_s2 = -1j*Zs2./tan(beta_L);
ZL2 = (Zin_s2.*Zin2)./(Zin_s2 + Zin2);
Zin = Z3*(ZL2 + 1j*Z3*tan(beta_L))./(Z3 + 1j*ZL2.*tan(beta_L));

S11 = (Zin-Z0)./(Zin+Z0);
S11_dB = 20*log10(abs(S11));

SWR = (1+ abs(S11))./(1-abs(S11));
SWR(SWR>=10)=10;
%plot(f/1e9,SWR);
%xlabel('Frequency (GHz)'); ylabel('SWR');

plot(f/1e9,20*log10(abs(S11)));
xlabel('Frequency (GHz)'); ylabel('Reflection coefficient (dB)');
```

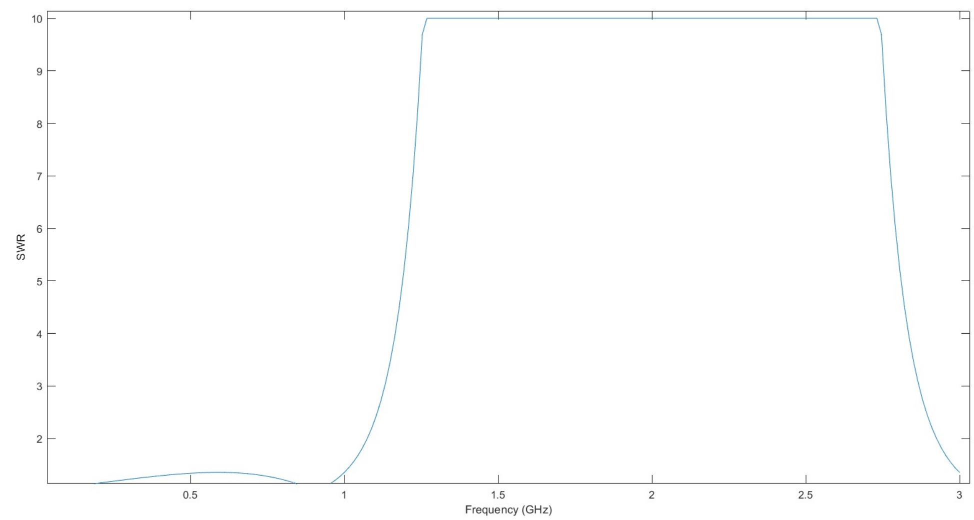



Figure 3: SWR στην είσοδο στη ζώνη συχνοτήτων 0 έως 3GHz

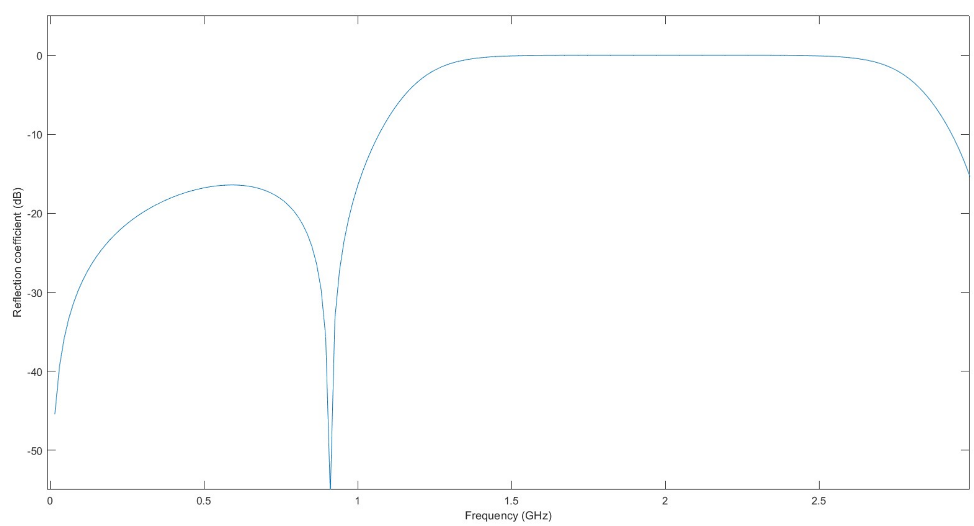
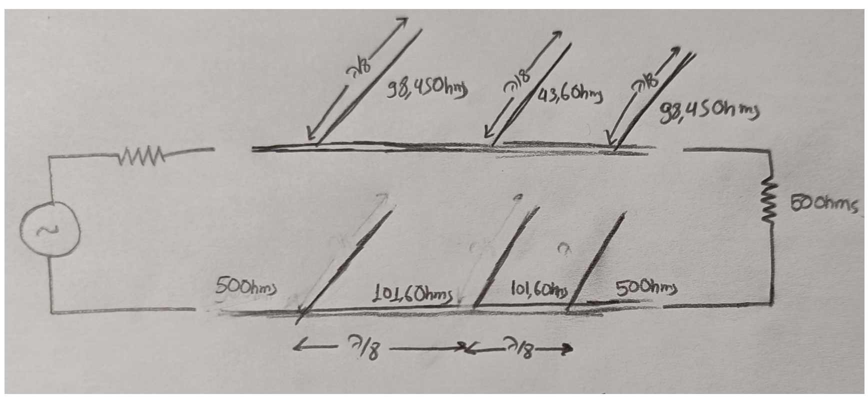


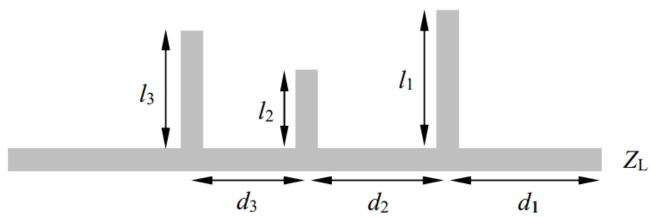

Figure 4: Μέτρο του Συντελεστή ανάκλασης στη ζώνη συχνοτήτων 0 έως 3GHz σε DB

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να καταλάβουμε ότι το φίλτρο είναι band-stop. Αποκόπτει τις συχνότητες 1-3GHz αφού το SWR και ο συντελεστής ανάκλασης αυξάνονται πολύ και απότομα σε αυτές τις συχνότητες.

Το κυκλωματικό ισοδύναμο είναι:



# 4 Άσκηση 4




**(α)** Φτιάξτε μια συνάρτηση Matlab με είσοδο ένα διάνυσμα $p$ (θα είναι το διάνυσμα των παραμέτρων της βελτιστοποίησης [$d_1$ $d_2$ $d_3$ $l_1$ $l_2$ $l_3$]), η οποία θα υπολογίζει το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης (σε καθαρό αριθμό) στην είσοδο του κυκλώματος, σε μια ζώνη συχνοτήτων. Ορίστε ένα διάνυσμα κανονικοποιημένης συχνότητας ($f/f_0$) και δώστε τιμές από 0.5 έως 1.5 (που αντιστοιχεί σε ζώνη συχνοτήτων 0.5 $f_0$ έως 1.5 $f_0$):

```
normf =  (0.5:0.01:1.5)´;
```

Υπολογίστε έτσι το μέτρο του συντελεστή ανάκλασης στην είσοδο για όλες τις παραπάνω κανονικοποιημένες συχνότητες (αφού γράψετε σωστά πώς μεταβάλλεται η σταθερά διάδοσης με την κανονικοποιημένη συχνότητα). Στη συνέχεια ορίστε η συνάρτηση να επιστρέφει το μέσο όρο του |Γ| στη ζώνη συχνοτήτων που ορίσατε. Αυτό θα χρησιμοποιηθεί ως ένα «μέτρο» του πόσο καλή είναι η προσαρμογή στη ζώνη αυτή και θα προσπαθήσουμε να το ελαχιστοποιήσουμε.

**(β)** Χρησιμοποιώντας το έτοιμο εργαλείο βελτιστοποίησης γενετικού αλγορίθμου του Matlab (είναι μέρος του γενικότερου εργαλείο βελτιστοποίησης optimtool), προσπαθήστε να ελαχιστοποιήσετε το παραπάνω «μέτρο προσαρμογής». Δώστε στο fitness function το όνομα της συνάρτησης (που θα την έχετε αποθηκεύσει φυσικά σε αρχείο με το ίδιο όνομα), βάζοντας μπροστά το @. Δώστε στο Number of variables τον αριθμό 6. Καθορίστε στα bounds (lower) το διάνυσμα των ελάχιστων τιμών των έξι μεταβλητών (να είναι όλες θετικές και για λόγους δυνατότητας κατασκευής, τα $d_2$ και $d_3$ να μην είναι μικρότερα από 0.05λ). Για upper bounds δώστε άνω όρια σε όλες τις μεταβλητές ίσα με λ (μονάδες). Επιλέξτε στα plots να σας εμφανίζει το Best fitness και ξεκινήστε τη βελτιστοποίηση (Start). Μετά το τέλος, θα σας εμφανίσει το διάνυσμα των βέλτιστων παραμέτρων, το οποίο μπορείτε να κάνετε Export to Workspace. Για καλύτερα αποτελέσματα μπορείτε να αυξήσετε το Population Size (π.χ. από 20 σε 200) και στα Stopping criteria να αυξήσετε το πλήθος των γενεών (π.χ. Generations από 100 σε 1000, Stall generations από 50 σε 500 και Stall time limit από 20 σε 200).

**(γ)** Κάνοντας Export to Workspace το βέλτιστο σετ παραμέτρων, απεικονίστε το διάγραμμα του μέτρου του συντελεστή ανάκλασης (σε καθαρό αριθμό) σε μια ζώνη από 0.01 $f_0$ έως 2 $f_0$ :

```
normf =  (0.01:0.01:2)´;
```

Για το σκοπό αυτό μπορείτε να χρησιμοποιήσετε ένα αντίγραφο της συνάρτησης που φτιάξατε στο (α) η οποία θα δέχεται σαν είσοδο το διάνυσμα βέλτιστων παραμέτρων και θα ζωγραφίζει το αποτέλεσμα.

**(δ)** Προσπαθήστε να κάνετε βελτιστοποίηση προσπαθώντας να μειώσετε το μέσο συντελεστή ανάκλασης σε όλη την περιοχή από 0.01 $f_0$ έως 2 $f_0$.

**(ε)** Επαναλάβετε το (δ) για φορτίο $Z_L = 10 + j15\ \Omega$ και μετά για φορτίο $Z_L = 200 + j150\ \Omega$.

## 4.1 α)

Η παρακάτω συνάρτηση παίρνει ως όρισμα ένα διάνυσμα p το οποίο περιέχει τις διαστάσεις των Γραμμών Μεταφοράς του κυκλώματος και υπολογίζει τον μέσο όρο του |Γ| στην επιθυμητή ζώνη συχνοτήτων

```
function meanGamma = calculateGamma(p)
    d1 = p(1); d2 = p(2); d3 = p(3); l1 = p(4); l2 = p(5); l3 = p(6);
    normf = (0.5:0.01:1.5)
    Z0 = 50;
    beta_D1 = 2*pi*d1.*normf;
    beta_L1 = 2*pi*l1.*normf;
    beta_D2 = 2*pi*d2.*normf;
    beta_L2 = 2*pi*l2.*normf;
    beta_D3 = 2*pi*d3.*normf;
    beta_L3 = 2*pi*l3.*normf;

    ZL = 120-1j*80;

    Zin0 = Z0.*(ZL + 1j*Z0.*tan(beta_D1))./(Z0 + 1j*ZL.*tan(beta_D1));
    Zin_s0 = -1j*Z0./tan(beta_L1);
    ZL1 = (Zin_s0.*Zin0)./(Zin_s0 + Zin0);


    Zin2 = Z0.*(ZL1 + 1j*Z0*tan(beta_D2))./(Z0+ 1j*ZL1.*tan(beta_D2));
    Zin_s1 = -1j*Z0./tan(beta_L2);
    ZL2 = (Zin_s1.*Zin2)./(Zin_s1 + Zin2);

    Zin3 = Z0.*(ZL2 + 1j*Z0*tan(beta_D3))./(Z0 + 1j*ZL2.*tan(beta_D3));
    Zin_s2 = -1j*Z0./tan(beta_L3);
    ZL3 = (Zin_s2.*Zin3)./(Zin_s2 + Zin3);

    S11 = (ZL3-Z0)./(ZL3+Z0);
    meanGamma = mean(abs(S11));
    %plot(normf,abs(S11));xlabel('Frequency normalized');
    %ylabel('Reflection coefficient');
end
```

## 4.2 β)

Γίνεται χρήση γενετικού αλγόριθμου βελτιστοποίησης, προκειμένου να βρεθούν τα βέλτιστα μήκη. Ορίζουμε ως άνω και κάτω όρια των παραμέτρων βελτιστοποίησης ως: **lowerbounds = [0, 0.05, 0.05, 0, 0, 0]** και **upperbounds = [1, 1, 1, 1, 1, 1]**. Παράλληλα για να πετύχουμε τον καλύτερο δυνατό μέσο συντελεστή ανάκλασης, Θέτουμε PopulationSize = 200, Stall Generations = 500, Max Generations = 1000, StallTimeLimit = 200.

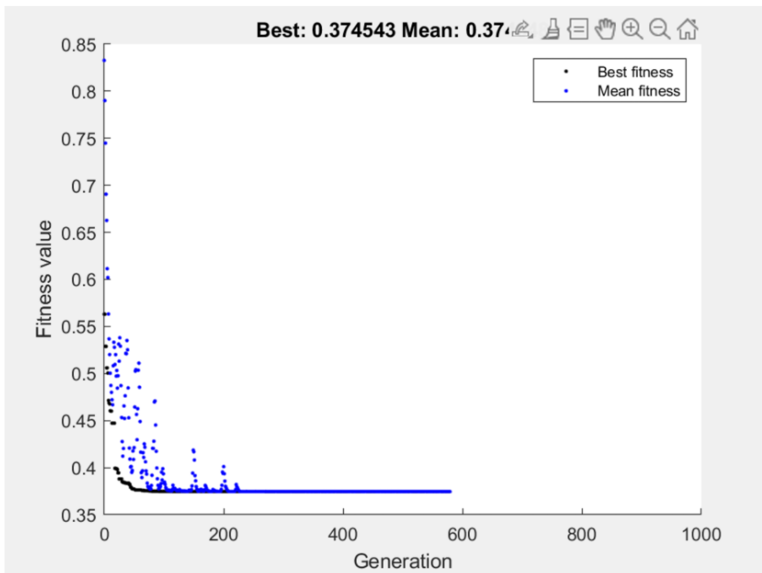



Figure 5: optimization results

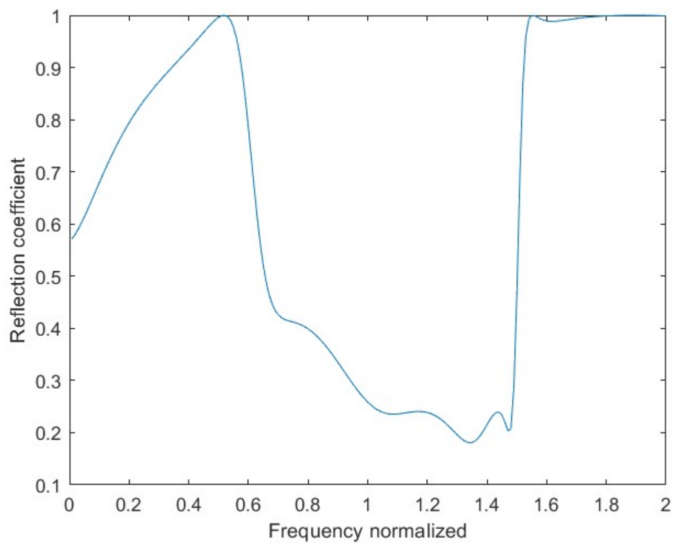
Οι βέλτιστες παράμετροι που προκύπτουν είναι:

1. d1 = 0.1805
2. d2 = 0.0639
3. d3 = 0.1222
4. l1 = 0.4832
5. l2 = 0.1319
6. l3 = 0.074

### 4.3 γ)

Αν στη συνάρτηση βάλω ως είσοδο το διάνυσμα p που προέκυψε από την βελτιστοποίηση ,ταυτόχρονα βγάλουμε τα plot που βρίσκονται σε σχόλια και αλλάξουμε το διάνυσμα συχνοτήτων, θα πάρουμε το παρακάτω διάγραμμα συντελεστή ανάκλασης:

```
function meanGamma = calculateGamma(p)
    d1 = p(1); d2 = p(2); d3 = p(3); l1 = p(4); l2 = p(5); l3 = p(6);
    normf = (0.01:0.01:2);
    Z0 = 50;
    beta_D1 = 2*pi*d1.*normf;
    beta_L1 = 2*pi*l1.*normf;
    beta_D2 = 2*pi*d2.*normf;
    beta_L2 = 2*pi*l2.*normf;
    beta_D3 = 2*pi*d3.*normf;
    beta_L3 = 2*pi*l3.*normf;

    ZL = 120-1j*80;

    Zin0 = Z0.*(ZL + 1j*Z0.*tan(beta_D1))./(Z0 + 1j*ZL.*tan(beta_D1));
    Zin_s0 = -1j*Z0./tan(beta_L1);
    ZL1 = (Zin_s0.*Zin0)./(Zin_s0 + Zin0);


    Zin2 = Z0.*(ZL1 + 1j*Z0*tan(beta_D2))./(Z0+ 1j*ZL1.*tan(beta_D2));
    Zin_s1 = -1j*Z0./tan(beta_L2);
    ZL2 = (Zin_s1.*Zin2)./(Zin_s1 + Zin2);

    Zin3 = Z0.*(ZL2 + 1j*Z0*tan(beta_D3))./(Z0 + 1j*ZL2.*tan(beta_D3));
    Zin_s2 = -1j*Z0./tan(beta_L3);
    ZL3 = (Zin_s2.*Zin3)./(Zin_s2 + Zin3);

    S11 = (ZL3-Z0)./(ZL3+Z0);
    meanGamma = mean(abs(S11));
    plot(normf,abs(S11));xlabel('Frequency normalized');
    ylabel('Reflection coefficient');
end
```




## 4.4 δ)

Θα προσπαθήσουμε να κάνουμε βελτιστοποίηση στην περιοχή από 0.01fo έως 2fo. Χρησιμοποιώντας παρόμοιες ρυθμίσεις στον γενετικό αλγόριθμο με το προηγούμενο ερώτημα, προκύπτει:

1. d1 = 0.1668
2. d2 = 0.0786
3. d3 = 0.1014
4. l1 = 0.0993
5. l2 = 0.0961
6. l3 = 0.0572

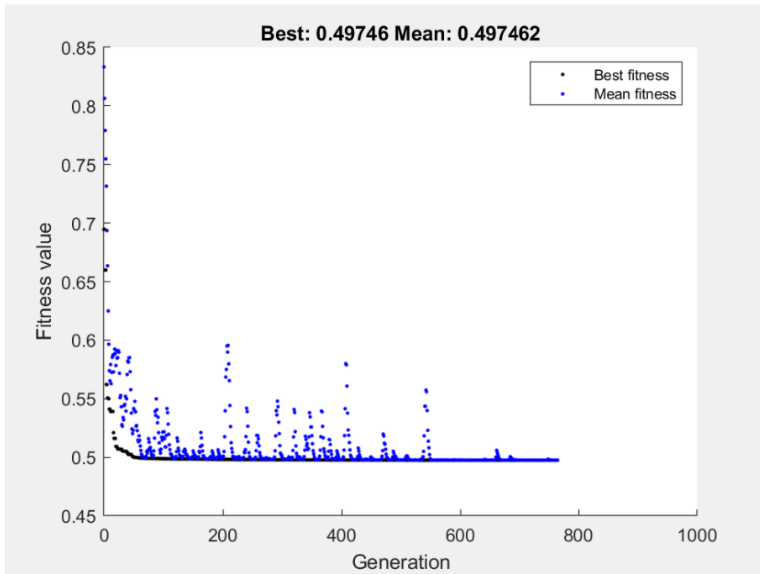
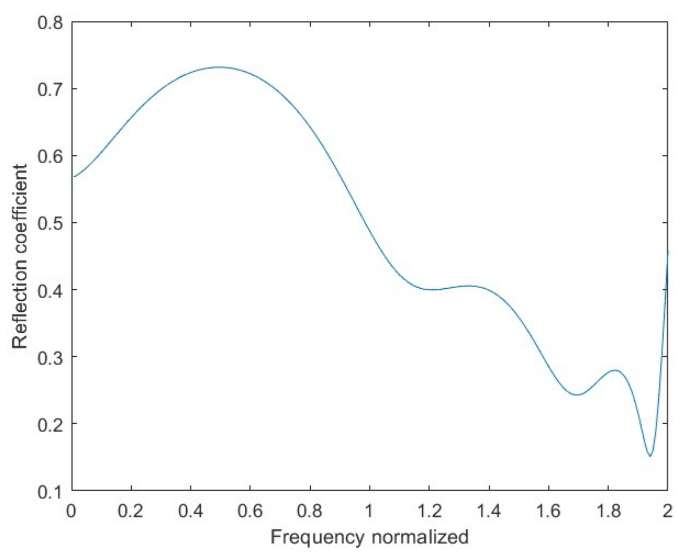


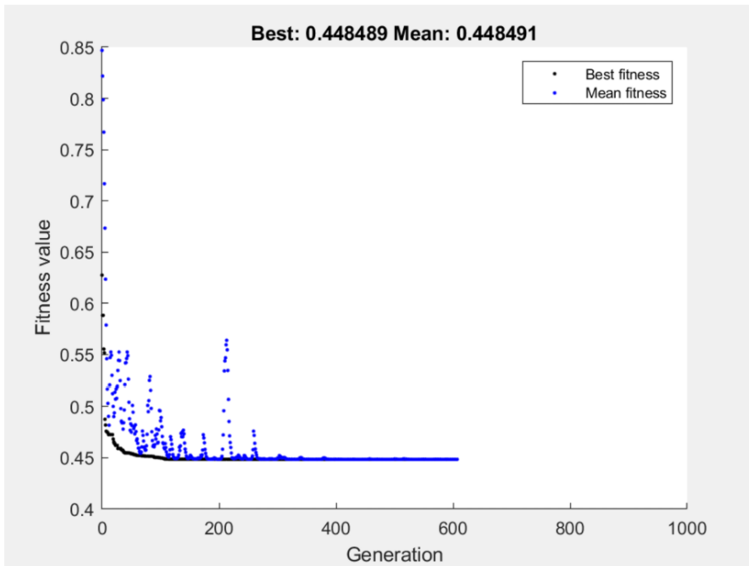

Figure 6: optimization results

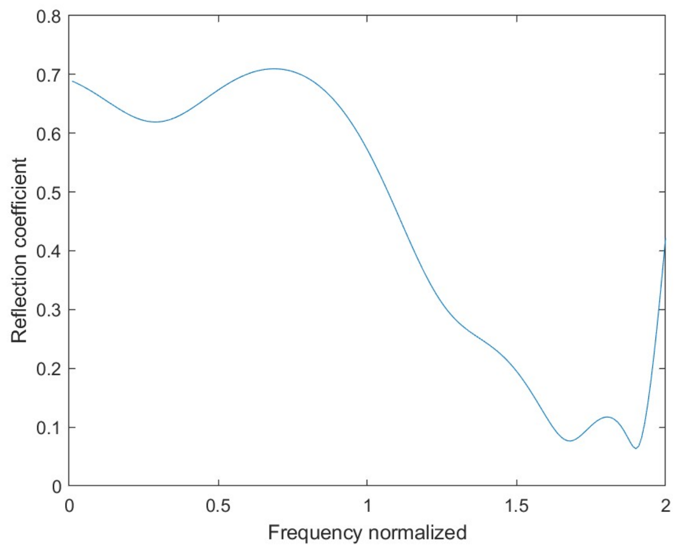



## 4.5 ε)

Θα επαναλάβουμε την παραπάνω διαδικασία απλά για δύο διαφορετικά φορτία

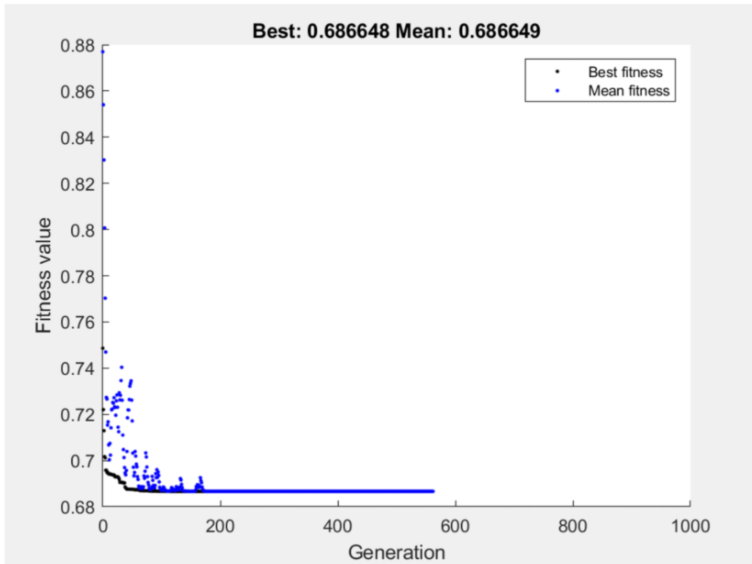
1. **ZL = 10 + 15j**:
   Με παρόμοιο τρόπο, βρίσκουμε: **x: [0.0047 0.3676 0.1308 0.1045 0.0659 0.0438]** να είναι το διάνυσμα εισόδου μετά από την βελτιστοποίηση ([d1 d2 d3 l1 l2 l3])

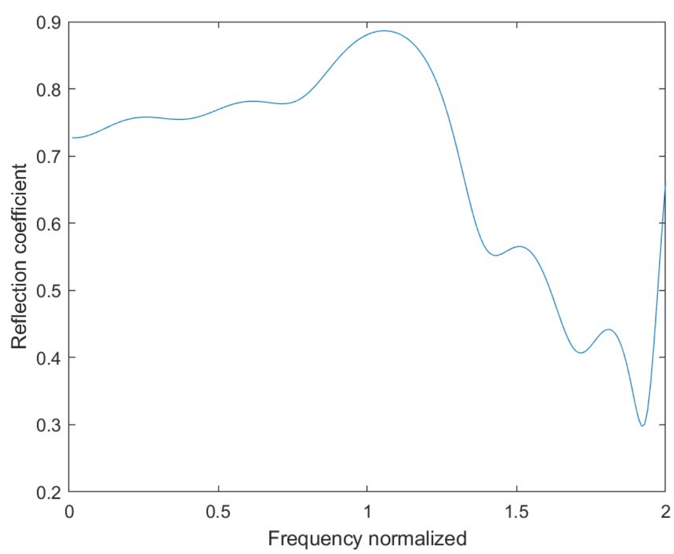





2. **ZL = 200 +150j**:
   Εδώ μετά από την βελτιστοποίηση, προκύπτει για διάνυσμα εισόδου το **x:** [**0.1974 0.4007 0.4324 0.0878 0.0511 0.0292**] και με fitness value: 0.688 (λιγότερο ικανοποιητικό). Ο συντελεστής ανάκλασης συναρτήσει της συχνότητας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

Σχόλιο: στο συγκεκριμένο ερώτημα έπρεπέ να αλλάξουν λίγο τα κάτω όρια, διότι πολλές φορές το αποτέλεσμα του γενετικού αλγορίθμου έδινε πολύ μικρό μήκος σε κάποιες γραμμές (κάτω από $10^{-5}$), το οποίο θεωρήθηκε μη υλοποιήσιμο. Τα κάτω όρια λοιπόν για αυτό το υποερώτημα έγιναν **lb** = [**0.01 0.05 0.05 0.01 0.01 0.01**]




## 4.6 Επίλογος

Η παρακάτω εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του μαθήματος "Διατάξεις Υψηλών Συχνοτήτων" του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών

Υπολογιστών του ΑΠΘ, από τον φοιτητή Χατζηγεωργίου Σπύρο, το ακαδημαϊκό έτος 2022-2023.