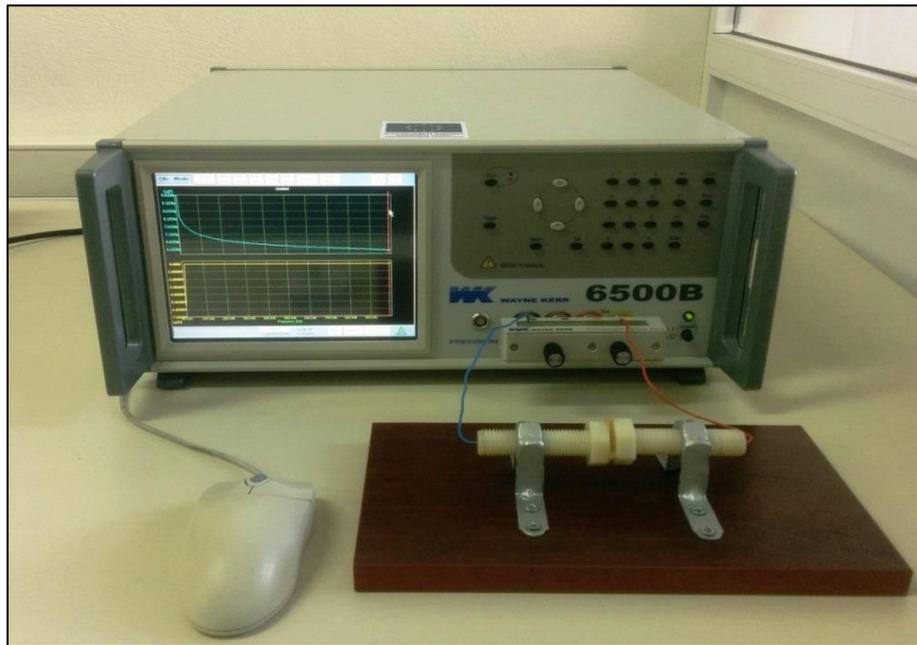




**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία



Κατασκευή & Εφαρμογή Ηλεκτρονικών Φίλτρων με τη Χρήση Σύνθετων Υλικών  
- Νανοτιτανικού Βαρίου ( $\text{BaTiO}_3$ )

Παντελής Ν. Νικολαράκης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Υπολογιστών Δ.Π.Θ.

Επιβλέπων:

κ. Δ. Μανωλάκος, Καθηγητής, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΔΠΜΣ «ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

---

Κατασκευή & Εφαρμογή Ηλεκτρονικών Φίλτρων με τη Χρήση  
Σύνθετων Υλικών - Νανοτιτανικού Βαρίου ( $\text{BaTiO}_3$ )

Μεταπτυχιακή Εργασία

Παντελής Ν. Νικολαράκης

**Επιβλέπων:** Δ. Μανωλάκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 17 Φεβρουαρίου 2016.

.....  
Λ. Ζουμπουλάκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Δ. Μανωλάκος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Ν. Θεοδώρου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

.....  
Παντελής Ν. Νικολαράκης  
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Δ.Π.Θ.

Copyright © Παντελής Ν. Νικολαράκης, 2016

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 το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία αποτελεί συνέχεια της Διδακτορικής διατριβής «Κατασκευή, Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες Σύνθετων Διηλεκτρικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας» του κ. Ιωάννη Ασημακόπουλου, Διδάκτωρα της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του κ. Λουκά Ζουμπουλάκη, Αν Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π..

Η Μεταπτυχιακή εργασία αυτή αποτελείται από δύο μέρη: Στο πρώτο μελετάται η χωρητικότητα (C), η σύνθετη αντίσταση (Z), η ωμική αντίσταση (R), η ηλεκτρική αγωγιμότητα (G), η χωρητική αντίδραση (X) και η επιδεκτικότητα (B) πυκνωτών που θα έχουν ως διηλεκτρικό μέσο Σύνθετα Υλικά πολυμερικής μήτρας με εγκλείσματα κεραμικών υλικών στη νανο-κλίμακα. Συγκεκριμένα, τα πολυμερή που αποτελούν τις πολυμερικές μήτρες των εν λόγω σύνθετων υλικών ανήκουν στις κατηγορίες των ρητινών φαινόλης-φορμαλδεΐδης (και συγκεκριμένα τις νεολάκες), των ακόρεστων πολυεστερικών ρητινών, καθώς και των εποξειδικών ρητινών. Όλα τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τις μετρήσεις των παραπάνω μεγεθών έχουν ως πρόσθετο 10% w/w κεραμικά νανο-σωματίδια τιτανικού Βαρίου ( $\text{BaTiO}_3$ ).

Για την διεξαγωγή των παραπάνω μετρήσεων χρειάστηκε η μελέτη και η κατασκευή διάταξης που θα φιλοξενήσει τα εν λόγω σύνθετα υλικά προς μέτρηση των παραπάνω μεγεθών. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία αυτοσχέδια διάταξη φιλοξένησης των διηλεκτρικών – σύνθετων υλικών, όπου με εναλλαγή του εκάστοτε δοκιμίου (ΣΥΠΙΜ) θα έχουμε και πυκνωτή με διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά. Οι μετρήσεις αυτές πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια οργάνου μετρήσεων LCR για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz, και σε συνθήκες δωματίου (θερμοκρασία: 20 - 30 °C και υγρασία: 30– 40%).

Στο δεύτερο μέρος, χρησιμοποιήθηκαν οι πυκνωτές αυτοί με το εκάστοτε σύνθετο υλικό, ως διηλεκτρικό μέσο, για την κατασκευή και συνδεσμολογία βαθυπερατών, υψιπερατών, ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών ηλεκτρονικών φίλτρων πάνω σε breadboard. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια γεννήτριας ημιτονικού σήματος και παλμογράφου ακολούθησαν οι μετρήσεις σχετικά με τη συχνότητα αποκοπής ( $f_c$ ) των βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων, καθώς και το εύρος ζώνης (bandwidth) των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων (φίλτρα διέλευσης και αποκοπής ζώνης). Λήφθηκαν μετρήσεις σχετικά με τη συχνότητα αποκοπής και το εύρος ζώνης των ηλεκτρονικών φίλτρων για τιμές ποτενσιόμετρου R: 10KΩ, 20KΩ, 50KΩ, 100KΩ, 200KΩ, 300KΩ, 500KΩ.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση και η αξιολόγηση των πειραματικών μετρήσεων, όπως λήφθηκαν από τον παλμογράφο με βάση τις συχνότητες αποκοπής και τον παράγοντα ποιότητας Q των εν λόγω ηλεκτρονικών και παθητικών φίλτρων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας, Ρητίνη Φαινόλης-Φορμαλδεΐδης, Πολυεστερικές Ρητίνες, Εποξειδική Ρητίνη, Νανοτιτανικό Βάριο ( $\text{BaTiO}_3$ ), Πυκνωτές, Διηλεκτρικά Υλικά, Χωρητικότητα (C), Σύνθετη Αντίσταση ή Εμπέδηση (Z), Ωμική Αντίσταση (R), Ηλεκτρική Αγωγιμότητα (G), Χωρητική Αντίδραση (X), Επιδεκτικότητα (B), Όργανο Μετρήσεων LCR, Συχνότητα Αποκοπής ( $f_c$ ), Εύρος Ζώνης (Bandwidth), Ηλεκτρονικά Φίλτρα, Συναρτήσεις Μεταφοράς, Βαθυπερατά Φίλτρα, Υψιπερατά Φίλτρα, Ζωνοπερατά Φίλτρα, Ζωνοφρακτικά Φίλτρα, Γεννήτρια Ημιτονικού Σήματος, Παλμογράφος.

## ABSTRACT

The current postgraduate thesis stands as a sequel to Mr John Asimakopoulos' (Doctor at the Chemical Engineering School of NTUA) Phd project “ **Construction, Characterization and Qualities of Polymeric Matrix's Complex Dielectric Materials**”, under the supervision of Mr. Luke Zoumboulaki, who is Associate Professor of the School of Chemical Engineering of NTUA.

This study consists of two parts: In the first one, the capacity (  $C$  ), the impedance (  $Z$  ), the ohmic resistance (  $R$  ), the electric conductivity (  $G$  ), the capacitive response (  $X$  ) and the susceptibility (  $B$  ) of capacitors that have polymeric matrix's complex materials at the nanoscale as dielectric device, is studied. In particular, the polymers that consist the polymeric matrices of these complex materials are classified to the categories of phenol formaldehyde resins (namely neolakes), unsaturated polyester and epoxy resins. All the composite materials that were used for the measurements of the above sizes have 10% w/w ceramic nanoparticles of barium titanate (  $BaTiO_3$  ) as a supplement.

For conducting the above measurements required the design and construction layout that will accommodate these composites to measure the above sizes. The final result is a host impromptu arrangement of dielectrics – composites, that will have different technical characteristics by rotating each sample (SYPN) . These measurements were achieved with the aid of LCR Meter for the frequency range from 10kHz to 1MHz and in room conditions. (Temperature: 20 - 30 °C and humidity : 30– 40%).

On the other hand, in the second part, these capacitors were used in each complex material as a dielectric for the manufacture and assembly of lowpass , highpass, bandpass and bandstop electronic filters on breadboarded. Afterwards, the measurements on the cutoff frequency (  $f_c$  ) of lowpass and highpass filters and the bandwidth of the bandpass and bandstop filters (pass filters and stopband) took place with the aid of a generator and oscilloscope sinusoid. Measurements were obtained concerning the cutoff frequency and bandwidth of electronic filters' rates potentiometer R: 10K $\Omega$ , 20K $\Omega$ , 50K $\Omega$ , 100K $\Omega$ , 200K $\Omega$ , 300K $\Omega$ , 500K $\Omega$ .

Finally, a comparison and evaluation of the experimental measurements, as were obtained by the oscilloscope, based on the cutoff frequency and the quality factor  $Q$  of those electronic passive filters.

## KEYWORDS

Composites Polymeric Matrix, phenol-formaldehyde resin, Polyester Resins, Epoxy Resin, Nanotitaniko Barium (  $BaTiO_3$  ), Capacitors, Dielectric Materials, capacity (  $C$  ), Impedance or Impedance (  $Z$  ), ohmic resistance (  $R$  ), Electrical Conductivity (  $G$  ) Capacitive Reaction (  $X$  ), Susceptibility (  $B$  ), LCR Meter, cutoff frequency (  $f_c$  ), Bandwidth (Vandwidth), Electronic Filters, transfer function, low pass filters, high pass filters, band-pass filters, bandstop filters, generator sine Signal Oscilloscope.

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα Μεταπτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μετρήσεων της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, καθώς και στο εργαστήριο "Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νανο-Υλικών και Νανοτεχνολογίας" της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών στο διατμηματικό πρόγραμμα «Συστήματα Αυτοματισμού» της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Μανωλάκο Δημήτριο για την ανάθεση του θέματος και για την πολύτιμη επιστημονική του συμβολή και διαρκή επίβλεψη σε όλα τα στάδια της Μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Στην συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. κ. Λουκά Ζουμπουλάκη για τον καθορισμό του θέματος και την ξεχωριστή στήριξη του κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Χάρη στη συνεχή μας επαφή πάνω σε ζητήματα ακαδημαϊκά μπόρεσα να αναπτύξω την ερευνητική αυτή προσπάθεια. Η δική του συμβολή στο συναφές επιστημονικό πεδίο αποτελούσε κίνητρο και έμπνευση της προσπάθειας μου αυτής, ενώ η καθοδήγηση του και οι πολύτιμες συμβουλές του ήταν καθοριστικές για την επιτυχή κατάληξη της Μεταπτυχιακής αυτής εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών κ. Νικόλαο Θεοδώρου που μου έδωσε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσω τις μετρήσεις στα εργαστήρια της Σχολής Η.Μ.&Μ.Υ. του Ε.Μ.Π., καθώς και τον κ. Παναγιώτη Τσαραμπάρη, Λέκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών Ε.Μ.Π. για την καθοδήγηση και την επιστημονική του συμβολή σε όλα τα στάδια της μεταπτυχιακής μου εργασίας μέχρι την αποπεράτωση αυτής.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον κ. Ιωάννη Ασημακόπουλο, Διδάκτορα της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π. που μου έδωσε την δυνατότητα να πραγματοποιήσω την Μεταπτυχιακή μου Εργασία πάνω σε καινοτόμα υλικά (ΣΥΠΙΜ) που ήταν προϊόν του δικού του Διδακτορικού έργου. Επίσης, τον ευχαριστώ για τις συμβουλές και την βοήθεια του σε ακαδημαϊκά και επιστημονικής φύσεως θέματα.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2016

Παντελής Ν. Νικολαράκης  
Διπλ/χος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός & Μηχανικός Η/Υ Δ.Π.Θ.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	iii
ABSTRACT.....	iv
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	v
Α. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Πολυμερή – Σύνθετα Υλικά.....	2
1.1 Πολυμερή Υλικά.....	2
1.1.1 Ταξινόμηση Συνθετικών Πολυμερών.....	2
1.1.2 Δομή των Πολυμερών.....	5
1.2 Σύνθετα Υλικά.....	6
1.2.1 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών.....	7
1.2.2 Πλεονεκτήματα Σύνθετων Υλικών.....	11
1.2.3 Πλεονεκτήματα Πολυμερών ως Μήτρα Σύνθετων Υλικών.....	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πρώτες Ύλες – Πολυμερική Μήτρα Σύνθετων Υλικών.....	13
2.1 Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας.....	13
2.2 Σύνθεση - Σκλήρυνση Φαινόλης – Φορμαλδεΐδης.....	14
2.3 Σύνθεση - Σκλήρυνση Ακόρεστων Πολυεστέρων.....	17
2.4 Σύνθεση - Σκλήρυνση Εποξειδικών Ρητινών (CER).....	19
2.5 Τιτανικό Βάριο ( $BaTiO_3$ ).....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διηλεκτρικά Υλικά – Ηλεκτρικές Ηδιότητες Πολυμερών.....	23
3.1 Διηλεκτρικά Υλικά.....	23
3.1.1 Διηλεκτρικά Μεγέθη.....	24
3.1.2 Παράλληλες Πλάκες με Διηλεκτρικό .....	26
3.1.3 Μηχανισμοί Πόλωσης Διηλεκτρικού.....	27
3.2 Ηλεκτρικές Ηδιότητες Πολυμερών.....	28
3.3 Ηλεκτρονικά Φίλτρα.....	31
3.4 Κατηγορίες Παθητικών Φίλτρων.....	32
3.4.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων.....	32
3.4.2 Φίλτρα Διέλευσης Υψηλών Συχνοτήτων.....	35
3.4.3 Φίλτρα Διέλευσης Ζώνης Συχνοτήτων.....	37
3.4.4 Φίλτρα Αποκοπής Ζώνης Συχνοτήτων.....	39
3.5 Χαρακτηριστικά Πυκνωτών.....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σκοπός Μεταπτυχιακής Εργασίας.....	46

## Β. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικό Μέρος.....	50
5.1 Σύνθετα Διηλεκτρικά Υλικά Πολυμερικής Μήτρας.....	50
5.2 Σύνθεση Μήτρας Φαινόλης – Φορμαλδεΐδης.....	51
5.2.1 Σύνθεση – Σκλήρυνση Νεολάκης με 10% BaTiO <sub>3</sub> w/w.....	53
5.3 Σύνθεση Μήτρας Ακόρεστων Πολυεστέρων.....	54
5.3.1 Σύνθεση – Σκλήρυνση Ακόρεστων Πολυεστέρων με 10% BaTiO <sub>3</sub> w/w.....	57
5.3.2 Εμπορικός Ακόρεστος Πολυεστέρας – CUP.....	59
5.4 Εμπορική Εποξειδική Ρητίνη – CER.....	59
5.5 Χαρακτηριστικά Διηλεκτρικών – Συνθέτων Υλικών.....	62
5.6 Όργανο Μετρήσεων LCR.....	65
5.7 Μελέτη – Κατασκευή Διάταξης Προσαρμογής ΣΥΠΙΜ.....	66
5.8 Πειραματική Διαδικασία.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα Μετρήσεων.....	72
6.1 Πυκνωτές με Διηλεκτρικά τα M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub> -BT & M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub> -BT.....	72
6.1.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub> -BT & M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub> -BT.....	73
6.2 Πυκνωτές με Διηλεκτρικά τα M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub> -BT & M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub> -BT.....	75
6.2.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub> -BT & M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub> -BT.....	76
6.3 Πυκνωτές με Διηλεκτρικά τα M <sub>6</sub> A <sub>4</sub> -BT & CUP-BT.....	77
6.3.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με M <sub>6</sub> A <sub>4</sub> -BT & CUP-BT.....	78
6.4 Πυκνωτής με Διηλεκτρικό την Νεολάκη-BT.....	79
6.4.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων του Πυκνωτή με Νεολάκη-BT.....	80
6.5 Πυκνωτής με Διηλεκτρικό τη CER-BT.....	82
6.5.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων του Πυκνωτή με CER-BT.....	83
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Κατασκευή & Διαδικασία Ελέγχου Ηλεκτρονικών Παθητικών Φίλτρων.....	85
7.1 Βαθυπερατά Φίλτρα.....	85
7.2 Υψιπερατά Φίλτρα.....	87
7.3 Ζωνοπερατά Φίλτρα.....	89
7.4 Ζωνοφρακτικά Φίλτρα.....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: Συμπεράσματα – Προτάσεις για το Μέλλον.....	95
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....	97
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	114

## **A. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Πολυμερή – Σύνθετα Υλικά

### 1.1 Πολυμερή Υλικά

Τα πολυμερικά υλικά απαντώνται στην φύση και χρησιμοποιούνται από τον άνθρωπο για χιλιάδες χρόνια. Μερικά από αυτά είναι το μαλλί, το βαμβάκι, το ξύλο, το δέρμα, το μετάξι. Επίσης, συναντώνται σαν πρωτεΐνες και ένζυμα, διεκδικώντας έτσι ένα ιδιαίτερο ρόλο στην καθημερινότητά μας. Με τις σύγχρονες εξελίξεις στον τομέα των συνθετικών πολυμερών κατέστη δυνατή η ανάπτυξη νέων πολυμερικών υλικών τα οποία συνθέτονται από μικρά οργανικά μόρια. Ετυμολογικά, η σύνθετη λέξη πολυμερές προκύπτει από την λέξη «πολύ» και την λέξη «μέρος». Πολυμερές δηλαδή είναι αυτό που αποτελείται από πολλά μέρη.[30]

Στην επιστήμη των υλικών, πολυμερή ονομάζονται οι χημικές ενώσεις με μεγάλα μόρια, τα λεγόμενα *μακρομόρια*, που σχηματίζονται από τη σύνδεση πολλών όμοιων μικρών μορίων, τα οποία ονομάζονται *μονομερή*. Τα πολυμερή προκύπτουν από τη χημική αντίδραση των μονομερών, που ονομάζεται *πολυμερισμός*.

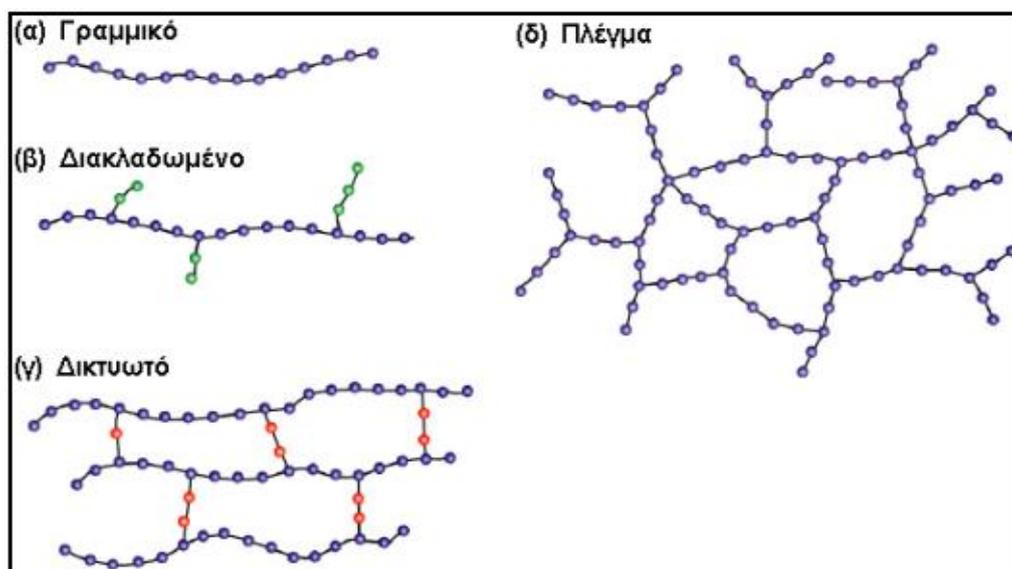
Ωστόσο, υπάρχουν μακρομόρια τα οποία δεν συγκαταλλέγονται στα πολυμερή, επειδή δεν αποτελούνται όλα τους από όμοια μόρια, όπως είναι τα *λιπίδια*.

Τα πολυμερή διακρίνονται εκ της προέλευσής τους σε "φυσικά πολυμερή" και "συνθετικά πολυμερή". Τέτοια φυσικά πολυμερή είναι για παράδειγμα το DNA, το καουτσούκ, το άμυλο, η κυτταρίνη, οι πρωτεΐνες κ.λπ., ενώ συνθετικά πολυμερή είναι τα πλαστικά, οι εκρηκτικές ύλες, οι λευκαντικές ουσίες, τα σαπούνια κ.λπ.[31]

#### 1.1.1 Ταξινόμηση Συνθετικών Πολυμερών

Τα συνθετικά πολυμερή ταξινομούνται ανάλογα:

A) Με την αρχιτεκτονική της πολυμερικής τους αλυσίδας.



Σχήμα 1.1: Ταξινόμηση πολυμερών ανάλογα με την πολυμερική τους αλυσίδα.

Με βάση την αρχιτεκτονική της πολυμερικής τους αλυσίδας τα πολυμερή διακρίνονται σε:

**1. Γραμμικό (linear):** Τα μόρια έχουν τη μορφή απλής αλυσίδας και αναπτύσσονται σε μία διάσταση του χώρου, όπως είναι το πολυαιθυλένιο, το πολυστερένιο και τα πολυαμίδια.

**2. Διακλαδωμένο (branched):** Τα μόρια έχουν τη μορφή κλάδων δέντρου και αποτελούνται από μία βασική αλυσίδα ή κορμός γύρω από την οποία αναπτύσσονται οι πλευρικές διακλαδώσεις οι οποίες δεν ανήκουν στη δομή του μονομερούς. Το διακλαδωμένο μακρομόριο αναπτύσσεται σε δύο διαστάσεις του χώρου όπως είναι το συμπολυμερές αιθυλενίου - εξενίου.

**3. Δικτυωτό:** Οι γειτονικές πλευρικές αλυσίδες ενώνονται μεταξύ τους σε διάφορες θέσεις με ομοιοπολικούς δεσμούς. Τα μόρια αναπτύσσονται σε δύο διαστάσεις του χώρου.

**4. Διασταυρωμένο (crosslinked) ή πλέγμα (network):** Τα μόρια αποτελούνται από αλυσίδες που συνδέονται μεταξύ τους με διασταυρούμενες συνδέσεις σχηματίζοντας πλέγμα. Είναι τρισδιάστες ομάδες μονομερών που διαθέτουν 3 ενεργούς ομοιοπολικούς δεσμούς και σχηματίζουν τρισδιάστατα δίκτυα. Τέτοια δομή παρουσιάζουν οι πολυεστέρες, οι πολυουρεθάνες, οι πολυεποξυδικές ενώσεις, η φορμοφαινόλη.[6][31]

B) Με το είδος των ατόμων που συμμετέχουν στη δομή της κύριας αλυσίδας.

Διακρίνονται σε:

➤ **Ομοαλυσωτά:** Η αλυσίδα τους αποτελείται από ένα είδος ατόμων, π.χ.



➤ **Ετεροαλυσωτά:** Η αλυσίδα τους αποτελείται από περισσότερα είδη ατόμων, π.χ.



Τα συνηθέστερα ετεροάτομα που λαμβάνουν μέρος στο σχηματισμό της κύριας αλυσίδας είναι το O, S, N[2].

Γ) Με την οργάνωση της κύριας αλυσίδας.

Διακρίνονται σε:

➤ **Ομοπολυμερή (homopolymers):** Τα μόρια τους αποτελούνται από ένα είδος δομικών μονάδων, π.χ.



➤ **Συμπολυμερή (copolymers):** Τα μόρια τους αποτελούνται από δύο (συνήθως) ή περισσότερα είδη δομικών μονάδων. Αν δύο μονομερή A και B πολυμεριστούν μαζί, τότε είναι δυνατές οι ακόλουθες τέσσερις διευθετήσεις στη δομή του προκύπτοντος συμπολυμερούς:

• **Τυπικό ή τυχαίο συμπολυμερές (random copolymer):** Η διάταξη των δομικών μονάδων του είναι τυχαία και τα ομοπολυμερή τμήματα του μικρά, π.χ.



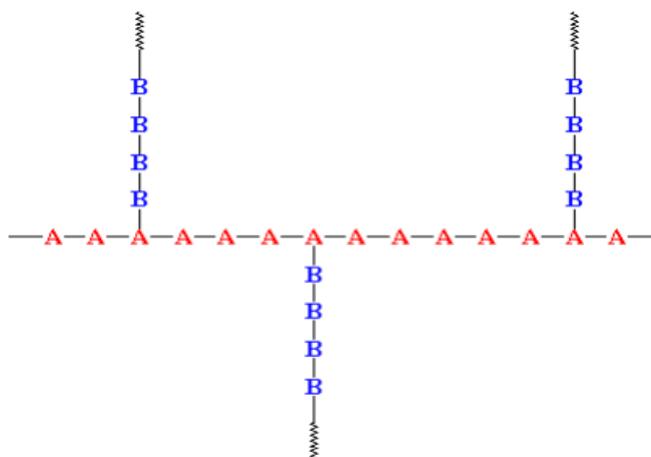
- *Εναλλασσόμενο συμπολυμερές* (alternating copolymer): Οι δύο δομικές μονάδες ακολουθούν κανονικά εναλλασσόμενη διάταξη, π.χ.



- *Αδρομερές συμπολυμερές* (block copolymer): Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει μόριο που αποτελείται από “αδρά” ομοπολυμερή τμήματα, π.χ.



- *Ενοφθαλμισμένο συμπολυμερές* (graft copolymer): Η διάταξη των δομικών μονάδων αποδίδει έναν ομοπολυμερή κορμό, από τον οποίο αναπτύσσονται ομοπολυμερή τμήματα από δομικές μονάδες άλλου είδους, π.χ



Δ) Ανάλογα με τη χρήση τους.

Διακρίνονται σε:

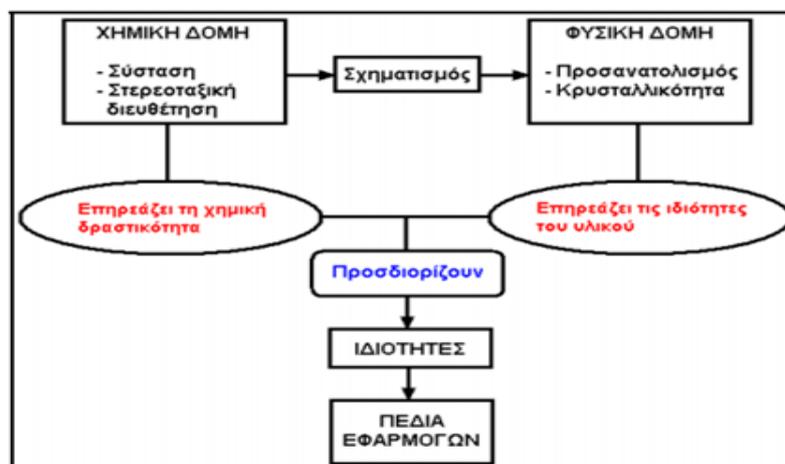
- **Ευρείας χρήσης πολυμερή** (commodity polymers): Παράγονται σε πολύ υψηλό ποσοστό, είναι φθηνά και έχουν ποικίλα πεδία εφαρμογών στην καθημερινή ζωή. Μερικά από αυτά είναι: πολυαιθυλένιο, πολυστυρένιο, PVC, ABS.
- **Τεχνικά πολυμερή** (engineering polymers): Με μηχανικές ιδιότητες σημαντικά ανώτερες από εκείνες των πολυμερών ευρείας χρήσης, χρησιμοποιούνται σε τμήματα μηχανών και κατασκευών σε αντικατάσταση μεταλλικών τμημάτων τους. Μερικά από αυτά είναι: Πολυαμίδια (nylon), πολυανθρακικά (PC), εποξειδικές ρητίνες, κ.ά.
- **Προηγμένα** (high performance polymers): Με εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και μεγάλη σταθερότητα σε υψηλές θερμοκρασίες, παράγονται σε μικρές ποσότητες και προορίζονται για ειδικές εφαρμογές. Μερικά από αυτά είναι: Πολυϊμίδια, πολυ(αιθεροκετόνη), πολυ(μεθακρυλικό μεθύλιο) (PMMA), πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE).[6]

E) Ανάλογα με τις μηχανοθερμικές τους ιδιότητες.

Διακρίνονται σε:

- ❖ **Θερμοπλαστικά ή πλαστομερή ή πλαστικά (thermoplastics):** Αποτελούνται συνήθως από γραμμικά μακρομόρια. Με θέρμανση μαλακώνουν και μετατρέπονται σε ρευστά (χαλάρωση των μοριακών δεσμών), διατηρούν δε την κατάσταση αυτή όσο χρόνο διαρκεί η επίδραση της θερμότητας και στη συνέχεια μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν με άσκηση υψηλών πιέσεων. Η ακολουθούσα απόψυξη αποδίδει στερεό υλικό. Η όλη διεργασία είναι αντιστρεπτή. Τα θερμοπλαστικά διατίθενται σε υγρή ή στερεά μορφή, είναι ευαίσθητα στη θερμοκρασία και τους διαλύτες και παράγονται με πολυμερισμό προσθήκης ή συμπύκνωσης. Τυπικά θερμοπλαστικά πολυμερή είναι: Πολυαιθυλένιο (PE), χλωριούχο πολυβινύλιο (PVC), πολυπροπυλένιο (PP), πολυστυρένιο (PS), πολυακρυλονιτρίλιο (PAN), πολυαμίδια (Nylon), φθοροπολυμερή, κλπ.
- ❖ **Θερμοσκληρυνόμενα ή θερμοσταθερά (thermosettings):** Αποτελούνται από μη γραμμικά και σχετικά μικρά μακρομόρια. Με θέρμανση ή υπό πίεση αρχικά μαλακώνουν και μορφοποιούνται, αλλά με περαιτέρω κατεργασία αποκτούν πυκνή δικτυωτή δομή και μετατρέπονται σε σκληρά στερεά κατά τρόπο μη αντιστρεπτό. Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι άμορφα σκληρά στερεά, άτηκτα και δεν επιδέχονται περαιτέρω κατεργασία, παράγονται δε με πολυμερισμό συμπύκνωσης. Τυπικά θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι: Φαινολικά πολυμερή (φαινολοπλάστες ή βακελίτες), εποξυδικές ρητίνες, αμινοπλάστες, πολυεστέρες, κλπ.
- ❖ **Ελαστομερή ή ελαστικά (elastomers, rubbers):** Είναι συνήθως γραμμικά πολυμερή με διακλαδισμένες αλυσίδες. Εμφανίζουν την ιδιότητα της υπερελαστικότητας, δηλ. κατά τον εφελκυσμό επιδέχονται πολύ μεγάλη επιμήκυνση και κατά την αποφόρτιση ταχύτατη πλήρη επαναφορά. Σε πολλά ελαστομερή η διατήρηση της υπερελαστικής συμπεριφοράς διατηρείται σε ευρεία γκάμα αλλαγών θερμοκρασίας και συνθηκών περιβάλλοντος. Τυπικά ελαστικά είναι: Ελαστικό κόμμι, συνθετικό και φυσικό καουτσούκ, συνθετικό πολυϊσοπρένιο, ελαστικό στυρένιο-βουταδιένιο, πολυχλωροπρένιο, σιλικόνες, κλπ. [31]

### 1.1.2 Δομή των Πολυμερών



Σχήμα 1.2: Δομή πολυμερούς και συσχετισμός της με ιδιότητες και πεδία εφαρμογών του.

Η δομή πολυμερούς καθορίζεται από τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του:

- Σύσταση (Constitution)
- Στερεοταξική διεύθυνση/Απεικόνιση (Configuration)
- Σχηματισμός/Διαμόρφωση (Conformation)
- Προσανατολισμός (Orientation)
- Κρυσταλλικότητα (Crystallinity)

Η σύσταση και η στερεοταξική διεύθυνση αποτελούν τη χημική δομή, ενώ ο προσανατολισμός και η κρυσταλλικότητα καθορίζουν τη φυσική δομή του πολυμερούς. Ο σχηματισμός ευρίσκεται ανάμεσα στις δύο δομές, είναι συνέπεια της σύστασης και στερεοταξικής διεύθυνσης και καθορίζει τον προσανατολισμό και την κρυσταλλικότητα της μακρομοριακής ένωσης.

Η χημική δομή περιλαμβάνει τη δόμηση κάθε μακρομορίου χωριστά και επηρεάζει τη χημική του δραστηριότητα, ενώ η φυσική δομή περιλαμβάνει τη δόμηση συγκροτημάτων μορίων και επηρεάζει τις ιδιότητες του κατασκευαστικού υλικού. Από κοινού τα δύο είδη δομής μαζί με την κινητικότητα των μελών της αλυσίδας και των μακρομορίων προσδιορίζουν τις ιδιότητες και τα πεδία εφαρμογών των πολυμερικών υλικών.[31]

## 1.2 Σύνθετα Υλικά

Για ένα σύστημα ο όρος “σύνθετο” σημαίνει ότι τούτο αποτελείται από δύο ή περισσότερα διακριτά μέρη. Από γενική άποψη, λοιπόν, ένα υλικό αποτελούμενο από δύο ή περισσότερα διαφορετικά υλικά ή φάσεις, μπορεί να χαρακτηριστεί ως σύνθετο υλικό (composite material).

Πιο ειδικά, σήμερα, ως σύνθετα αναγνωρίζονται εκείνα τα υλικά, τα οποία συντίθενται από επιμέρους υλικά με σημαντικά διαφορετικές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες μεταξύ τους, ενώ και το ίδιο το σύνθετο υλικό έχει επίσης σημαντικά διαφορετικές ιδιότητες από εκείνες των συστατικών του.

Για να καταταχθεί ένα υλικό στην κατηγορία των σύνθετων, θα ακολουθείται ο εξής κανόνας: Το υλικό πρέπει να προκύπτει ως συνδυασμός συστατικών μερών, στα οποία οι ιδιότητες του ενός από τα μέρη αυτά να είναι σημαντικά μεγαλύτερες από του άλλου (τουλάχιστον 5πλάσιες) και η κατ’ όγκο περιεκτικότητα του ενός να μην είναι πολύ μικρή (μεγαλύτερη του 10 %). [32]

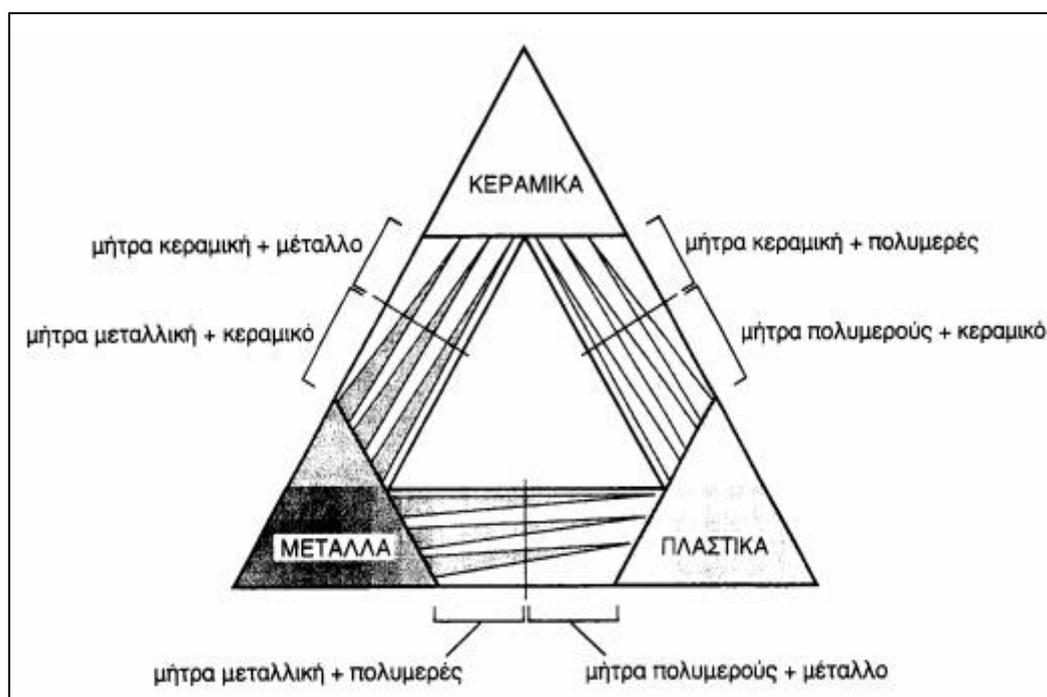
**ΟΡΙΣΜΟΣ (Agarwal–1990):** *Σύνθετα είναι τα υλικά, τα οποία μακροσκοπικά αποτελούνται από δύο ή περισσότερα χημικά ευδιάκριτα συστατικά μέρη που έχουν μια συγκεκριμένη διαχωριστική επιφάνεια μεταξύ τους.*

Το ένα, από τα συστατικά μέρη, χαρακτηρίζεται ως **συστατικό ενίσχυσης** ή **έγκλεισμα** (ασυνεχής φάση) και προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές, κυρίως, ιδιότητες. Το δεύτερο συστατικό καλείται **μήτρα** (συνεχής φάση), είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και η συμμετοχή του στο σύνθετο εξασφαλίζει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των ιδιοτήτων της ενίσχυσης. Σαν τρίτη φάση μπορεί να θεωρηθεί μία ξεχωριστή ενδιάμεση φάση, η οποία έχει μεταβλητές ιδιότητες και αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της μήτρας και της ενίσχυσης για

τα φορτία. Η ενδιάμεση φάση έχει συγκεκριμένο μη μηδενικό πάχος, σχηματίζεται κατά τη διάρκεια κατασκευής του σύνθετου υλικού και είναι ανισότροπη.

Οι ιδιότητες των σύνθετων υλικών είναι συναρτήση των ιδιοτήτων των συνιστωσών τους φάσεων, των σχετικών ποσών, και της γεωμετρίας της διεσπαρμένης φάσης. Με την κατάλληλη επιλογή των αρχικών υλικών καθώς και της τεχνικής ανάμιξης, είναι δυνατή η κατασκευή ενός σύνθετου υλικού με επιθυμητές τελικές ιδότητες και χαρακτηριστικά, το οποίο θα έχει στοχευμένες τεχνολογικές, κατασκευαστικές ή βιομηχανικές εφαρμογές.[23]

Στο Σχήμα 1.3 παρουσιάζεται ο συνδυασμός ανά δύο των βασικών οικογενειών υλικών (μεταλλικά, πολυμερικά και κεραμικά υλικά) και οι ομάδες συνθέτων που προκύπτουν.



Σχήμα 1.3: Κατηγορίες Συνθέτων Υλικών

### 1.2.1 Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά ανάλογα με το κριτήριο που χρησιμοποιούμε κάθε φορά, είναι δυνατό να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Τα κριτήρια μπορεί να συνδέονται με την φύση των επιμέρους υλικών που αποτελούν το σύνθετο, με τον τύπο της ενίσχυσης ή της μήτρας, αλλά και με πολλά άλλα χαρακτηριστικά. Μία κατηγορία σύνθετων υλικών είναι τα φυσικά σύνθετα, όπως το ξύλο, τα οστά, το μπαμπού, οι μύες και άλλοι ιστοί.

Τα σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν βάση του είδους του υλικού της μήτρας και βάση της γεωμετρίας και του μεγέθους της φάσης ενίσχυσης. Έτσι, έχουμε τις εξής κατηγορίες συνθέτων υλικών[2]:

A) Με βάση το υλικό της μήτρας διακρίνονται τα εξής είδη συνθέτων υλικών:

- 1) Σύνθετα Υλικά Πολυμερικής Μήτρας (Polymer Matrix Composites – PMC)
- 2) Σύνθετα Υλικά Μεταλλικής Μήτρας (Metal Matrix Composites – MMC)

### 3) Σύνθετα Υλικά Κεραμικής Μήτρας (Ceramic Matrix Composites – CMC)

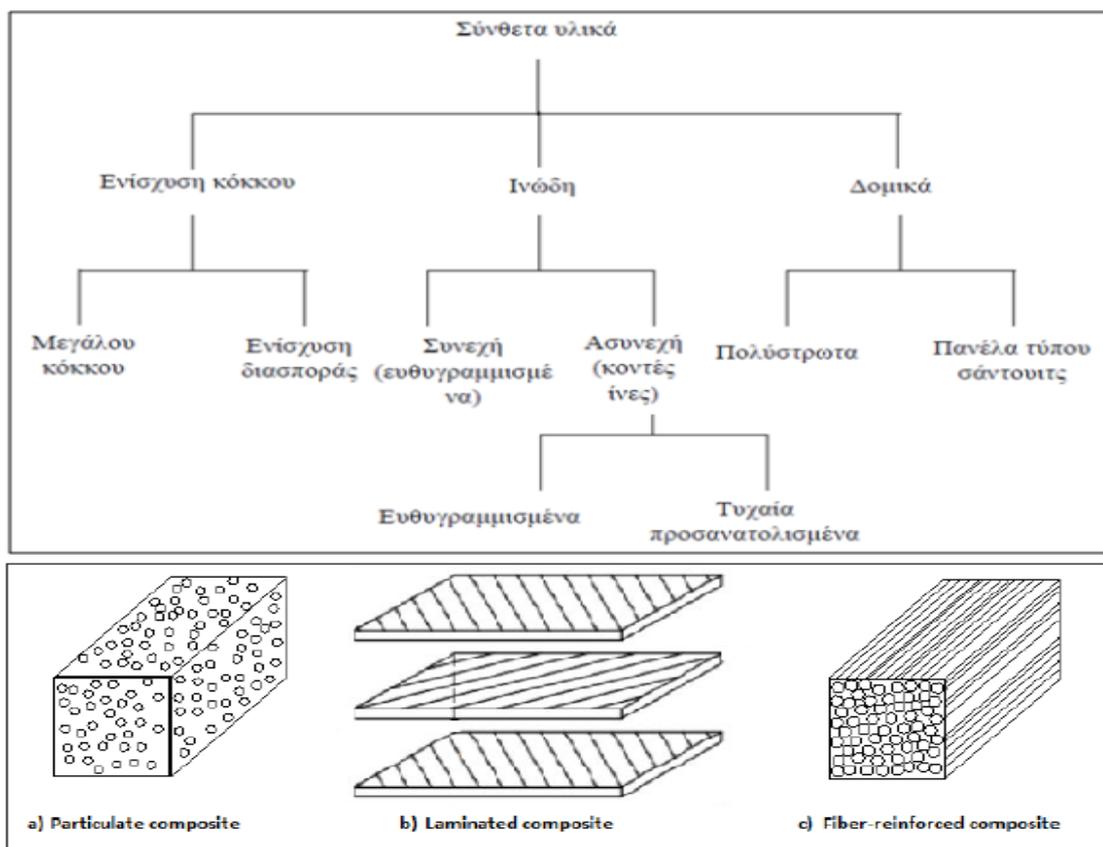
B) Με βάση την τάξη μεγέθους της φάσης ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

i) Σε μικροσύνθετα, όπου η ασυνεχής φάση της ενίσχυσης είναι της τάξης μεγέθους του μικρομέτρου ( $10^{-6}$ m). Υλικά που ανήκουν σε αυτή τη κατηγορία είναι τα μεταλλικά κράματα, τα θερμοπλαστικά ενισχυμένα με λάστιχο και τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά.

ii) Σε μακροσύνθετα, όπου η τάξη μεγέθους του εγκλείσματος ξεκινά από μερικά χιλιοστά ( $10^{-3}$ m) και φτάνει το μέτρο. Σε αυτή τη κατηγορία απαντώνται υλικά όπως, το ενισχυμένο σκυρόδεμα και ο γαλβανισμένος χάλυβας.

iii) Σε νανοσύνθετα, όπου η τάξη μεγέθους της διεσπαρμένης φάσης ποικίλλει από ένα νανόμετρο ( $10^{-9}$ m) έως μερικά εκατοντάδες νανομέτρα. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενοι τύποι ενίσχυσης στην κλίμακα του νανομέτρου είναι τα carbon black, τα σωματίδια πυριτιούχων ενώσεων (silicas), τα σωματίδια από πηλό (clays), οι νανο-ίνες άνθρακα (carbon nanofibers), καθώς και οι νανοσωλήνες άνθρακα (carbon nanotubes).[32]

Γ) Με βάση το είδος της ενίσχυσης τα σύνθετα υλικά διακρίνονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες (Εικόνα 1.1):



**Εικόνα 1.1:** Ταξινόμηση σύνθετων υλικών με βάση το είδος της ενίσχυσης.

α) κοκκώδη, β) πολύστρωτα και γ) ινώδη σύνθετα υλικά.

**I. Κοκκώδη σύνθετα υλικά (particulate composites):** Τα σύνθετα υλικά αυτά αποτελούνται από πολύ μικρά σωματίδια σε σχήμα κόκκου, κάποιου ισχυρού και ανθεκτικού

υλικού, τα οποία είναι διεσπαρμένα μέσα στη μήτρα, η οποία είναι από διαφορετικό υλικό. Οι κόκκοι μπορεί να είναι μεταλλικοί ή μη, όπως επίσης και η μήτρα. Τα κοκκώδη υλικά έχουν υποδεέστερες μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με τα ινώδη, μιας και η συνεισφορά των σωματιδίων στη μηχανική συμπεριφορά του συνθέτου είναι μικρότερη από αυτή των ινών. Η προσθήκη κόκκων σε πολυμερικές ή άλλων τύπων μήτρες δημιουργεί μία μεγάλη ποικιλία νέων υλικών.

Τα κοκκώδη σύνθετα υλικά μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες με βάση το ενισχυτικό υλικό ή το μηχανισμό ενίσχυσης:

- Στα κοκκώδη σύνθετα ενίσχυσης μεγάλων κόκκων.
- Στα κοκκώδη σύνθετα ενίσχυσης διασποράς.

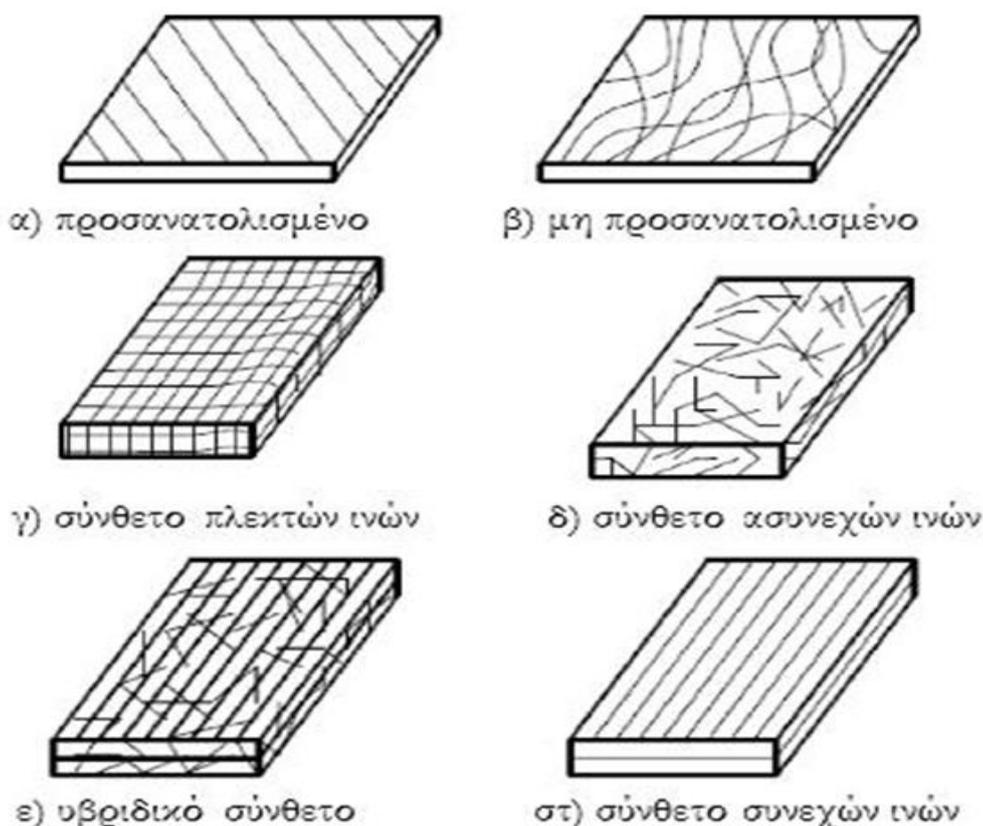
**II. Πολύστρωτα σύνθετα υλικά (laminated composites):** Σε αυτά τα υλικά η μήτρα αλλά και το έγκλεισμα, έχουν τη μορφή τρισδιάστατων φύλλων ή πλακών, τα οποία εναποτίθενται και επικολλώνται, σχηματίζοντας διαδοχικές στρώσεις από το ίδιο ή διαφορετικό υλικό. Ο συνδυασμός τους μπορεί να δώσει ένα σύνθετο υλικό με εξαιρετικές ιδιότητες. Τα πολύστρωτα υλικά κατηγοριοποιούνται περαιτέρω στα διμέταλλα, τα επιμεταλλωμένα μέταλλα, την ύαλο ασφαλείας και τα υλικά με επίστρωση πλαστικού.

**III. Ινώδη σύνθετα υλικά (fiber-reinforced composites):** Στα υλικά αυτά γίνεται ενίσχυση υπό μορφή ινών εμποτισμένων μέσα σε συνεχή μήτρα. Σε αυτού του τύπου τα υλικά, η μήτρα ενισχύεται με ίνες τυχαίου ή μη προσανατολισμού, κάποιου ισχυρότερου υλικού. Τα ινώδη είναι ένας από τους πιο απλούς τύπους συνθέτων υλικών και παρουσιάζουν εξαιρετική ανάπτυξη, με ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Αυτή τους η επιτυχία βασίζεται στο γεγονός ότι συνδυάζουν ιδανικά το υψηλό ειδικό μέτρο ελαστικότητας και την υψηλή ειδική αντοχή που παρουσιάζουν, με την ευκολία στο σχεδιασμό τους, εκτοπίζοντας τα παραδοσιακά υλικά σε πολλές εφαρμογές.[23]

Τα ινώδη σύνθετα υλικά μπορούν να διακριθούν με τρεις τρόπους:

- α) Με βάση το λόγο μήκους προς διάμετρο ( $l/d$ ) των ινών, οι οποίες χαρακτηρίζονται ως:
- Συνεχείς μεγάλου μήκους ίνες (continuous fibers), όταν  $l/d \geq 100$ .
  - Ασυνεχείς ή κοντές ίνες (discontinuous fibers), όταν  $l/d < 100$ .
  - Νημάτια ή τριχίτες (whiskers), με  $d < 1 \mu\text{m}$  και  $l \cong 10 \mu\text{m}$  (νηματικοί μονοκρύσταλλοι).
- β) Με βάση τον προσανατολισμό των ινών. Υπάρχουν δύο γενικές κατηγορίες ινωδών συνθέτων υλικών:
- Προσανατολισμένα (directional) ή Μονοδιευθυντικά σύνθετα, των οποίων οι ίνες είναι συνεχείς και έχουν όλες την ίδια διεύθυνση.
  - Μη προσανατολισμένα (random) ή Πολυδιευθυντικά σύνθετα, των οποίων οι ίνες είναι τυχαία τοποθετημένες στο συνδετικό υλικό.
- γ) Με βάση τον τρόπο τοποθέτησης και συνδυασμού των ινών στο υλικό της μήτρας. Τα ινώδη σύνθετα υλικά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες (εικόνα 1.2):

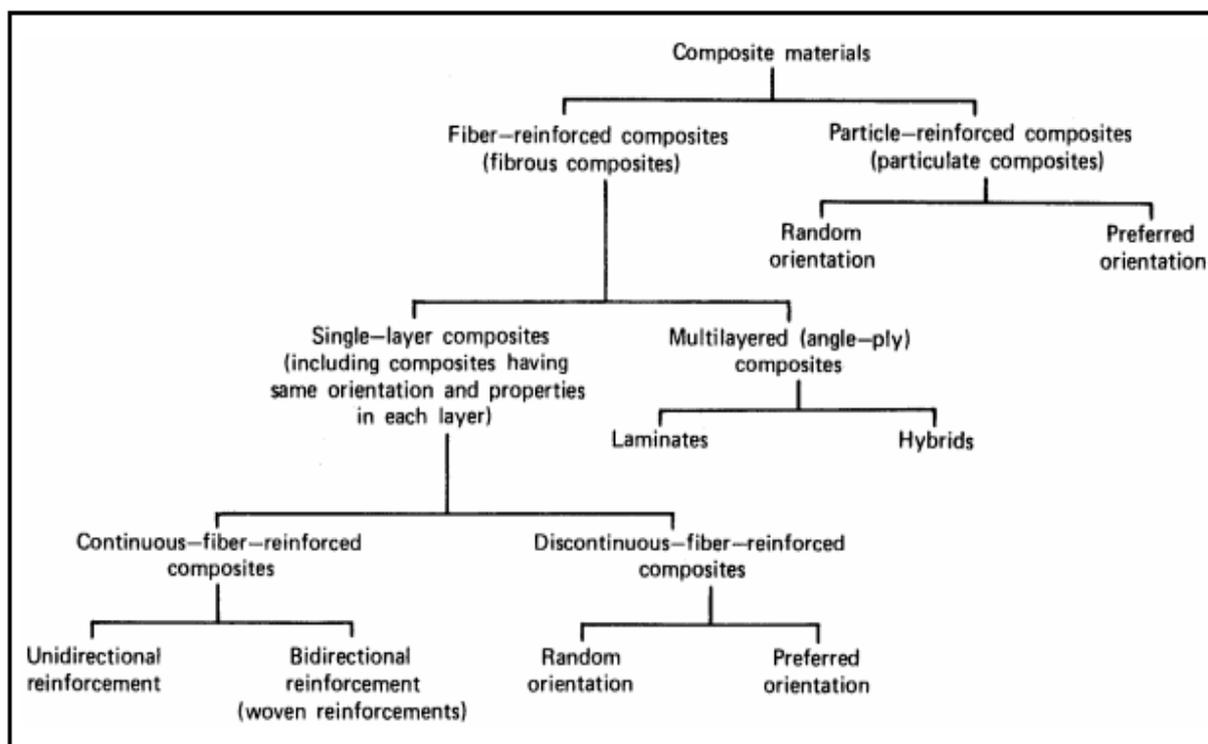
- Υφασμένες ίνες, οι οποίες αποτελούν συνεχές σώμα χωρίς επιμέρους στρώματα, οπότε δε παρουσιάζουν πιθανότητες αποκόλλησης.
- Συνεχείς ίνες, οι οποίες είναι πλεγμένες με διάφορους τρόπους.
- Μη υφασμένα συνεχή νήματα χωρίς προσανατολισμό.
- Στρώματα ασυνεχών ινών, τα οποία έχουν κοντές ίνες διάσπαρτες στη μήτρα και μη προσανατολισμένες.
- Υβριδικά, τα οποία αποτελούνται είτε από συνεχείς και ασυνεχείς ίνες, είτε από περισσότερους του ενός τύπους ινών.
- Συνεχείς ίνες, όπου στρώματα ινών και ρητίνης τοποθετούνται και συνδέονται στην επιθυμητή διεύθυνση αποτελώντας ένα σώμα.



**Εικόνα 1.2:** Τύποι συνθέτων υλικών με ενισχυτικές ίνες.[23]

**ΣΗΜΕΙΩΣΗ:** Οι κοντές ίνες, λόγω του μικρού μήκους τους, δεν χρησιμοποιούνται ως μονοδιευθυντική ενίσχυση, αλλά εφαρμόζονται συνήθως με τη μορφή πλέγματος ινών τυχαίας διεύθυνσης.

Με βάση όσα έχουν ήδη αναφερθεί για τις κατηγορίες των συνθέτων υλικών, έχει καθιερωθεί η ταξινόμηση τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.4:



Σχήμα 1.4: Γενική Ταξινόμηση Σύνθετων Υλικών.[3][4]

## 1.2.2 Πλεονεκτήματα Σύνθετων Υλικών

Τα τελευταία χρόνια έχει παρατηρηθεί η τάση για αντικατάσταση των παραδοσιακών υλικών από σύνθετα σε πολλές τεχνολογικές και κατασκευαστικές εφαρμογές. Η τάση αυτή οφείλεται στα πλεονεκτήματα των σύνθετων υλικών έναντι των παραδοσιακών σε μία σειρά παραμέτρους, καθώς επίσης και στις ανώτερες ιδιότητες των επιμέρους συνιστωσών τους.

Οι ιδιότητες κάθε υλικού κοινού ή σύνθετου μπορούν να διακριθούν σε μηχανικές και μη μηχανικές. Μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού είναι η δυσκαμψία, η αντοχή, η ολκιμότητα, η σκληρότητα, η συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση, ερπυσμό, χαλάρωση και άλλες. Στις μη μηχανικές ιδιότητες ενός υλικού περιλαμβάνονται κυρίως ιδιότητες όπως οι ηλεκτρικές-διηλεκτρικές ιδιότητες, η πυκνότητα, η θερμική συμπεριφορά, η αντίσταση σε διάβρωση και άλλες.

Τα σύνθετα υλικά έχουν το μεγάλο πλεονέκτημα να διαθέτουν συνήθως τις βέλτιστες ιδιότητες, αποτέλεσμα της από κοινού συνεισφοράς ινών και μήτρας στη βελτίωση της συνολικής συμπεριφοράς του συνθέτου.

Οι ιδιότητες των συνθέτων υλικών που τα καθιστούν ανώτερα από τα κοινά υλικά είναι:

1. Χαμηλό βάρος
2. Υψηλή αντοχή
3. Μεγάλη δυσκαμψία
4. Αντίσταση σε διάβρωση
5. Αντίσταση σε φθορά
6. Πολύ καλή συμπεριφορά σε κόπωση και κρούση

7. Καλή θερμική αγωγιμότητα
8. Θερμική μόνωση
9. Ακουστική μόνωση
10. Χαμηλό κόστος συντήρησης

Φυσικά ένα σύνθετο υλικό δεν μπορεί να διαθέτει ταυτόχρονα όλες τις παραπάνω ιδιότητες, αφού στην πράξη δεν υπάρχει ποτέ τέτοια απαίτηση και μάλιστα μερικές από τις ιδιότητες αυτές είναι ασυμβίβαστες μεταξύ τους (π.χ. θερμική μόνωση και θερμική αγωγιμότητα). Κάθε σύνθετο υλικό κατασκευάζεται έτσι ώστε να διαθέτει κάποιες από αυτές τις ιδιότητες. Για παράδειγμα τα ινώδη σύνθετα υλικά ξεχωρίζουν για την αντοχή, τη δυσκαμψία, το βάρος και το κόστος τους.[23]

### 1.3 Πλεονεκτήματα Πολυμερών ως Μήτρα Σύνθετων Υλικών

Τα πολυμερή είναι τα πλέον κατάλληλα υλικά, σαν φέροντα υλικά, για το ρόλο της μήτρας. Συγκεκριμένα, παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα.

- 1) Προστατεύουν την επιφάνεια των σωματιδίων ή των ινών από τις εξωτερικές επιγράσεις.
- 2) Αποτελούν το μέσο για τη μεταφορά εξωτερικών φορτίων στη φάση ενίσχυσης.
- 3) Συμβάλλουν στην αύξηση της αντοχής τόσο σε συνθήκες περιβάλλοντος όσο και σε υψηλές θερμοκρασίες.
- 4) Προστατεύουν από την υγρασία και τα διαβρωτικά υγρά.

Υπάρχουν 6 βασικοί τύποι πολυμερών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μήτρες. Αυτές είναι τα εποξειδικά, τα φαινολικά, οι πολυεστέρες, οι σιλικόνες, τα πολυϊμίδια και τα θερμοπλαστικά πολυμερή. Όλα είναι οργανικές ενώσεις εκτός από τις σιλικόνες.

Κατά τη διάρκεια της παραγωγής του σύνθετου υλικού, πρώτα γίνεται ο πολυμερισμός για την παραγωγή της μήτρας, μετά συνδυάζεται με τη φάση ενίσχυσης και τέλος σκληραίνεται με τη προσθήκη σκληρυντών ή καταλυτών. [2]

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Πρώτες Ύλες – Πολυμερική Μήτρα Σύνθετων Υλικών

### 2.1 Πολυμερική Μήτρα Σύνθετων Υλικών

Τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως το διηλεκτρικό μέσο για την κατασκευή των πυκνωτών (θα γίνει περιγραφή σε επόμενο κεφάλαιο) ανήκουν στην κατηγορία των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας. Συγκεκριμένα, οι μήτρες από τις οποίες είναι κατασκευασμένα τα σύνθετα υλικά μας ανήκουν στην κατηγορία των ρητινών φαινόλης – φορμαλδεΰδης, των πολυεστερικών ρητινών και των εποξειδικών ρητινών. Η φάση ενίσχυσης των συνθέτων αυτών υλικών είναι κεραμικά νανο-σωματίδια τιτανικού βαρίου ( $\text{BaTiO}_3$ ). [2][3]

#### ➤ Ρητίνη Φαινόλης - Φορμαλδεΰδης

Η ρητίνη φαινόλης – φορμαλδεΰδης ή αλλιώς νεολάκη προκύπτει από την αντίδραση φαινόλης και φορμαλδεΰδης με συγκεκριμένο τρόπο. Γενικά, οι φαινολικές ρητίνες χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό ως μήτρες σε σύνθετα υλικά με ίνες ενίσχυσης και σε ηλεκτρονικές εφαρμογές. Διακρίνονται για το χαμηλό τους κόστος και για την αντοχή τους σε θερμοκρασίες άνω των  $250^\circ\text{C}$  χωρίς να παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα. Ωστόσο, τα μειονεκτήματά τους εντοπίζονται στο γεγονός ότι από μόνες τους οι φαινολικές ρητίνες χαρακτηρίζονται από φτωχές μηχανικές ιδιότητες, αλλά και στο ότι κατά τη διάρκεια της σκλήρυνσής τους παράγεται αμμωνία με τη μορφή ατμού η οποία ενδέχεται να προκαλέσει κενά στο σύνθετο υλικό με αποτέλεσμα τη περαιτέρω επιδείνωση των μηχανικών ιδιοτήτων.[7][8]

#### ➤ Πολυεστερικές Ρητίνες

Οι Πολυεστέρες είναι μία κατηγορία πολυμερών που περιέχει τη χαρακτηριστική ομάδα των εστέρων ( $-\text{COO}-$ ) στην κύρια αλυσίδα τους. Ανάλογα με τη χημική δομή, οι πολυεστέρες διακρίνονται σε θερμοπλαστικούς ή θερμοσκληρυνόμενους. Υπάρχουν επίσης πολυεστερικές ρητίνες που σκληραίνουν με σκληρυντές, όμως οι πιο συνηθισμένοι πολυεστέρες είναι θερμοπλαστικοί.

Αν και οι ακόρεστοι πολυεστέρες είναι απλά προϊόντα αντιδράσεως ακόρεστων δικαρβοξυλικών οξέων με διόλες, υπάρχει μεγάλη ποικιλία ιδιοτήτων των τελικών προϊόντων. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη δυνατότητα παραγωγής ακόρεστων πολυεστέρων με ποικιλία δομών, ανάλογα με το είδος και την αναλογία των χρησιμοποιούμενων πρώτων υλών (ακόρεστα δικαρβοξυλικά οξέα ή ανυδρίτες, κορεσμένα δικαρβοξυλικά οξέα, ανυδρίτες, διόλη κλπ.). Η **παραγωγή** των ακόρεστων πολυεστέρων γίνεται ως σταδιακός πολυμερισμός (περίπτωση πολυσυμπυκνώσεως). Αντίθετα, η **σκλήρυνση** τους, κατά την οποία δημιουργούνται διασταυρώσεις πλέγματος ή σταυροδεσμοί, γίνεται ως αλυσωτός πολυμερισμός (περίπτωση μηχανισμού ελευθέρων ριζών) στους διπλούς δεσμούς που προέρχονται από το ακόρεστο οξύ ή ανυδρίτη του, καθώς και στους διπλούς δεσμούς κάποιου μονομερούς (συνήθως στυρενίου), στο οποίον έχει διαλυθεί ο ακόρεστος πολυεστέρας μετά την κυρίως παραγωγή του. Κατά την σκλήρυνση του ακόρεστου πολυεστέρα δεν εκλύονται πτητικές ουσίες, σε αντίθεση προς τη σκλήρυνση ρητινών φορμαλδεΰδης.[1][9]

### ► Πολυεποξειδία (Εποξειδικές Ρητίνες)

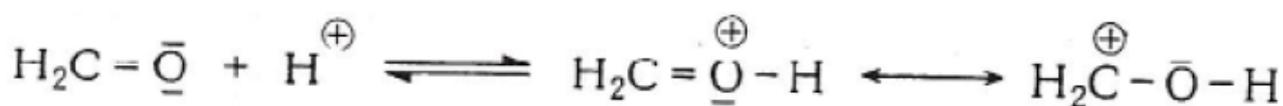
Οι εποξειδικές ρητίνες αποτελούν μία περίπτωση σταδιακού πολυμερισμού που όμως σε αντίθεση με τις περιπτώσεις πολυσυμπύκνωσης (νεολάκες και πολυεστέρες) πραγματοποιείται η σύνθεση μέσω του μηχανισμού της πολυπροσθήκης. Όπως και στις αντιδράσεις πολυσυμπύκνωσης, έτσι και στις αντιδράσεις πολυπροσθήκης το μονομερές πρέπει να έχει έντονα δραστικές ομάδες. Σε αντίθεση όμως με την πολυσυμπύκνωση, στην πολυπροσθήκη γενικά δεν σχηματίζονται δευτερεύοντα παραπροϊόντα (μικρού μοριακού βάρους ενώσεις, όπως  $H_2O$ ). Χαρακτηριστικό αυτού του τύπου των αντιδράσεων είναι ότι μαζί με την σύνδεση των βασικών δομικών μονάδων γίνεται και μία μετάθεση ενός ατόμου υδρογόνου από την μία δραστική ομάδα του ενός μονομερούς προς την δραστική ομάδα του άλλου μονομερούς. Αιτία αυτή της εκδηλώσεως είναι συνήθως η πολικότητα της δραστικής ομάδας με θετικό φορτίο στο άτομο άνθρακα. Αντιδράσεις πολυπροσθήκης γίνονται όχι μόνο με μονομερή που οι δραστικές τους ομάδες φέρουν διπλό δεσμό, αλλά και με μονομερή που έχουν κυκλικούς δεσμούς.[11]

## 2.2 Σύνθεση – Σκλήρυνση Φαινόλης – Φορμαλδεΰδης

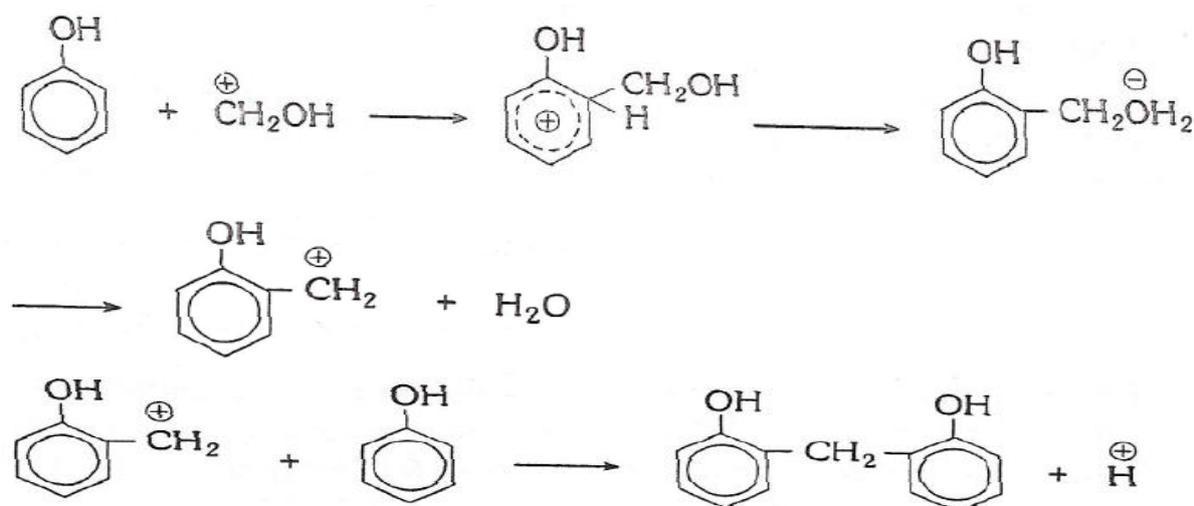
Στις αντιδράσεις πολυσυμπυκνώσεως μεταξύ φαινόλης και φορμαλδεΰδης χρησιμοποιούνται ως καταλύτες βάσεις ή οξέα. Τα προϊόντα που παράγονται κατά την πολυσυμπύκνωση της φαινόλης με τη φορμαλδεΰδη η οποία βρίσκεται σε υποστοιχειομετρική αναλογία και *παρουσία οξέος*, ονομάζονται νεολάκες. Ενώ, τα προϊόντα που παράγονται κατά την πολυσυμπύκνωση με υπερστοιχειομετρική αναλογία της φορμαλδεΰδης και *παρουσία βάσεως*, ονομάζονται **ρεζόλες** (κατά την 1<sup>η</sup> Βαθμίδα Συμπυκνώσεως), **ρεζιτόλες** (κατά την 2<sup>η</sup> Βαθμίδα Συμπυκνώσεως) και **ρεζίτες** (κατά την 3<sup>η</sup> Βαθμίδα Συμπυκνώσεως).

Η τεχνική που ακολουθείται για τη παρασκευή των ρητινών φαινόλης – φορμαλδεΰδης είναι η τεχνική πολυμερισμού μάζας. Κατά τη τεχνική αυτή στο σύστημα πολυμερισμού χρησιμοποιείται αμιγές καθαρό μονομερές και μόνο τα απαραίτητα μέσα για την πορεία και τον έλεγχο της αντίδρασης.[2]

Συγκεκριμένα, κατά το πολυμερισμό της φαινόλης – φορμαλδεΰδης σε όξινο μέσο τα παραγόμενα πολυμερή ονομάζονται νεολάκες. Υπό τη παρουσία  $HCl$  ή οξαλικού οξέως (όξινο υδατικό διάλυμα) το οξυγόνο του καρβονυλίου της φορμαλδεΰδης πρωτονιώνεται αμέσως και σχηματίζεται ένα μεσομερές κατιόν σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:

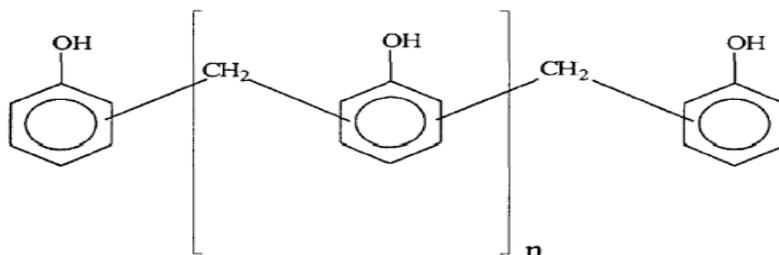


Στη συνέχεια, το καρβένιο κατιόν αντιδρά με την φαινόλη, σχηματίζοντας με τον αρωματικό πυρήνα ένα π-σύμπλοκο, το οποίο ακολούθως μετασχηματίζεται σε μία σ-ένωση. Στο όξινο αυτό διάλυμα η ενδιάμεσα δημιουργούμενη μεθυλοφαινόλη ευρίσκεται ως οξώνιο ιόν το οποίο με απομάκρυνση ύδατος μετατρέπεται σε ένα δραστικό κατιόν βενζυλίου. Το τελευταίο με περίσσεια φαινόλης σχηματίζει ταχιαίως ένα παράγωγο διφαινυλομεθανίου.



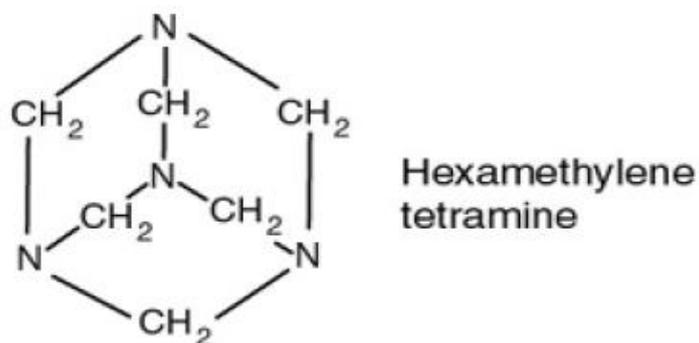
Η αντίδραση προς το σταθερό παράγωγο του διφαινυλομεθανίου πραγματοποιείται με γρήγορο ρυθμό και είναι μία μη αντιστρεπτή διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ιόντα του καρβενίου και του οξωνίου είναι πολύ δραστικά μεταξύ τους.[3][7]

Στη συνέχεια τα σχηματιζόμενα παράγωγα του διφαινυλομεθανίου συμπυκνώνονται με φορμαλδεΐδη και φαινόλη προς ενώσεις πολλαπλών πυρήνων, οι οποίες συνδέονται με γέφυρες μεθυλενίου.

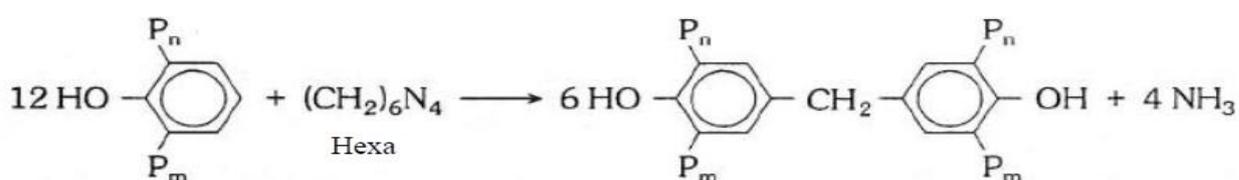


Στην αρχική αναλογία φαινόλης – φορμαλδεΐδης έχουμε περίσσεια φαινόλης ώστε να μην οδηγείται η αντίδραση εξ' αρχής σε διασταυρώμενα μακρομόρια. Έτσι, εξαιτίας της υπερστοιχειομετρικής αναλογίας σε φαινόλη, η παραγώμενη νεολάκη έχει φαινολικές ακραίες ομάδες. Αυτό προσδίδει την ικανότητα στην νεολάκη για αποθήκευση για μεγάλο χρονικό διάστημα σε αντίθεση με τις ρεζιτόλες. Το τελικό προϊόν του πολυμερισμού είναι θερμοπλαστικό και διαλυτό σε οργανικούς διαλύτες, όπως σε αλκοόλες, κετόνες, εστέρες και σε αραιά καυστικά διαλύματα.[7]

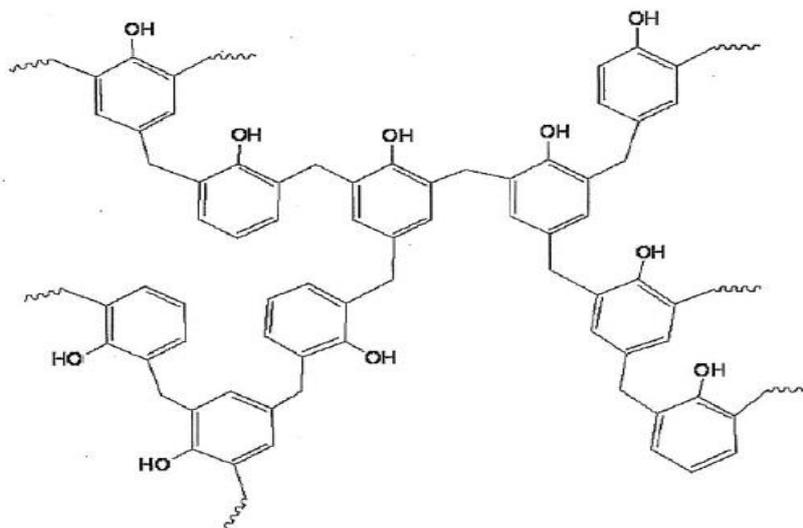
Η διαδικασία σκλήρυνσης της νεολάκης και ο μετασχηματισμός της σε θερμοσκληρυνόμενο πολυμερές γίνεται με τη προσθήκη εξαμεθυλοτετραμίνης με σκοπό να συνδεθούν οι αρωματικοί δακτύλιοι της φαινολικής ρητίνης μέσω γεφυρών μεθυλενίου.



Οι συνδέσεις αυτές γίνονται κατά βάση στη θέση-4 του φαινολικού συγκροτήματος με απομάκρυνση αμμωνίας.



P<sub>n</sub>, P<sub>m</sub>: Είναι το τελικό προϊόν της σύνθεσης πολυμερισμού φαινόλης – φορμαλδεΐδης (με n≠m)

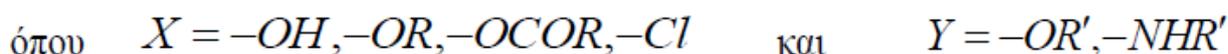
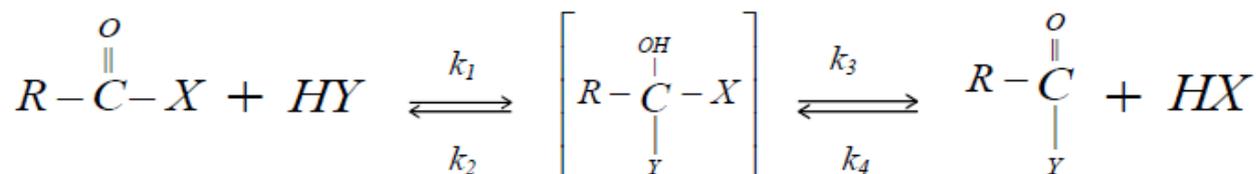


Τελική μορφή ρητίνης φαινόλης - φορμαλδεΐδης (νεολάκη) με ευδιάκριτους τους σταυροδεσμούς (γέφυρες μεθυλενίου – διασταυρώσεις πλέγματος) οι οποίες προσδίδουν στη δομή του σκληρυμένου προϊόντος τη μορφή δικτύου – πλέγματος.

### 2.3 Σύνθεση – Σκλήρυνση Ακόρεστων Πολυεστέρων

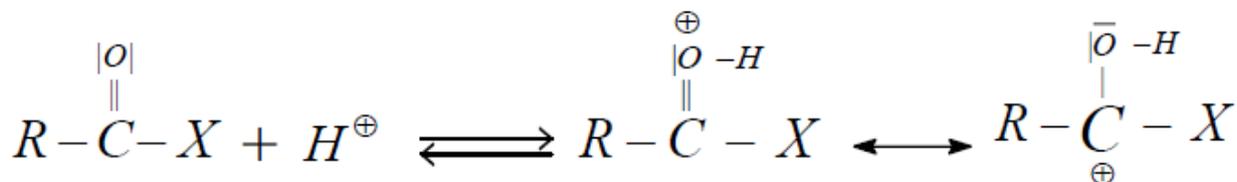
Για τη σύνθεση γραμμικών μακρομορίων, οι σπουδαιότερες αντιδράσεις πολυσυμπυκνώσεως είναι η αντίδραση διδραστικών παραγώγων του ανθρακικού οξέος α) με διόλες, για την παραγωγή πολυεστέρων ή β) με διαμίνες για την παραγωγή πολυαμιδίων.

Στις περιπτώσεις αυτές οι δραστικές ομάδες αντιδρούν κατά ένα πυρηνόφιλο μηχανισμό υποκαταστάσεως σύμφωνα με τον παρακάτω τρόπο:

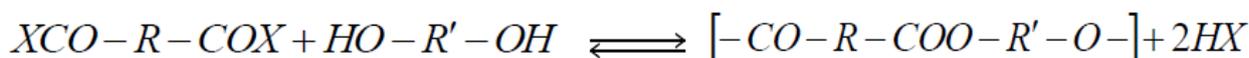


Εάν π.χ.  $R'=H$  τότε  $Y=OH, -NH_2$  δηλαδή το αντίστοιχο μονομερές θα είναι διόλη, διαμίνη.

Ο όρος  $k_1$  προσδιορίζει την ταχύτητα της συνολικής αντιδράσεως. Η κατάλυση με οξέα επηρεάζει τη θέση ισορροπίας της αντιδράσεως επειδή η προσθήκη πρωτονίων ή οξέων κατά Lewis στο άτομο του οξυγόνου δημιουργεί ένα μεσομερές καρβέ-νιο-οξώνιο-κατιόν, το οποίο κατ' επέκταση ως ισχυρό οξύ αντιδρα ευκολότερα με την πυρηνόφιλη βάση που χρησιμοποιείται.



Εκτός από τα δικαρβοξυλικά οξέα για τη σύνθεση των πολυεστέρων μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα παράγωγα του ανθρακικού οξέως όπως είναι οι εστέρες, οι ανυδρίτες και τα χλωρίδια των δικαρβοξυλικών οξέων.



Σε περίπτωση μη ευνοϊκής θέσεως ισορροπίας της αντίδρασης (μικρή σταθερά ισορροπίας της αντίδρασης) πρέπει συνεχώς να απομακρύνεται το παραγόμενο παραπροϊόν  $HX$ , το οποίο συνήθως είναι νερό ή αλκοόλη.[7]

Οι ακόρεστοι πολυεστέρες παράγονται με αντίδραση στοιχειομετρικών ποσοτήτων ακόρεστων οξέων ή ανυδριτών τους με γλυκόλες, χωρίς ή με την παρουσία ισχυρά όξινου καταλύτη (π.χ. τολουολιοσουλφονικό οξύ) σε θερμοκρασίες των  $200^{\circ}\text{C}$  ή και μεγαλύτερες, με ανάδευση και παρουσία αδρανούς ατμόσφαιρας. Το παραγόμενο νερό απομακρύνεται μέσω κατάλληλης διάταξης αποστάξεως (απόσταξη με ανακυκλοφορία), ενώ στο τέλος της αντίδρασης εφαρμόζεται κενό προς πλήρη απομάκρυνσή του.

Ανάλογα με την εφαρμογή τους, η σκλήρυνση των ακόρεστων πολυεστέρων πραγματοποιείται με διάφορους τρόπους. Δύο από τους σημαντικότερους τρόπους σκλήρυνσης είναι: i) η τοποθέτηση τους σε πρέσσα, όπου η μορφοποίηση τους πραγματοποιείται σε θερμοκρασίες της τάξεως των 100°C, και ii) σε συνθήκες περιβάλλοντος (20-30°C & 30-40% υγρασία) με επικάλυψη ή εναπόθεση κάποιου αντικειμένου.[1]

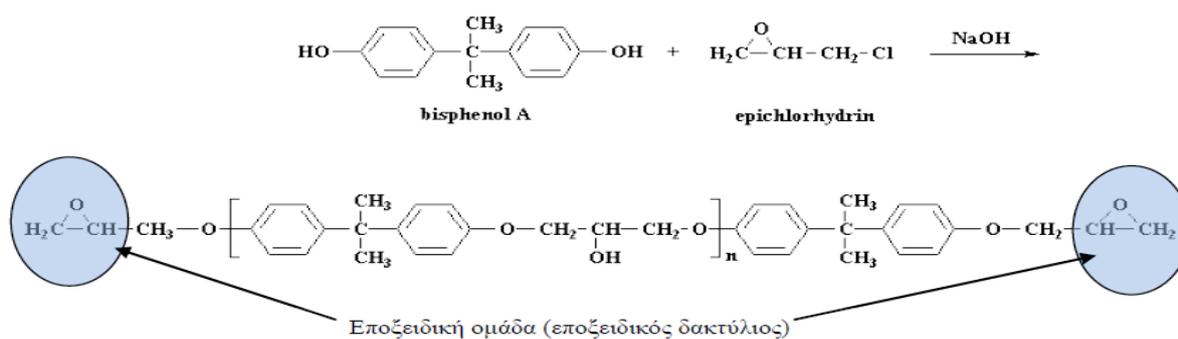
Για την σκλήρυνση των ακόρεστων πολυεστέρων που έχουν παραχθεί με αλυσωτό πολυμερισμό και μηχανισμό ελεθέρων ριζών χρησιμοποιούνται ενώσεις όπως είναι:

1. Οι Διεγέρτες, οι οποίοι διασπώνται σε ρίζες και στη συνέχεια αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια του διπλού δεσμού C-C. Οι ενώσεις αυτές προσδίδουν στο σύστημα πολυμερισμού την κατάλληλη ενέργεια για να γίνει ομολυτική διάσπαση των ατομικών δεσμών. Συνήθης διεγέρτης για αντιδράσεις πολυμερισμού σκληρύνσεως υψηλών θερμοκρασιών που διαρκούν περίπου 5 min είναι το βενζουλοϋπεροξειδίο. Σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος τα υπεροξειδία που χρησιμοποιούνται ως διεγέρτες σε αντιδράσεις σκληρύνσεως είναι το υπεροξειδίο της μεθυλοαιθυλοκετόνης ή το υπεροξειδίο της κυκλοπεντανόνης σε συνδυασμό με ενώσεις κοβαλτίου.
2. Οι Σκληρυντές, οι οποίοι χρησιμοποιούνται συνήθως όταν θέλουμε να σκληρυνθεί μία υγρή ρητίνη προς μία στερεή μάζα.
3. Οι Επιταχυντές, οι οποίοι είναι ενώσεις που επιταχύνουν τη διάσπαση του διεγέρτη. Συνήθεις ενώσεις που χρησιμοποιούνται για την επιτάχυνση της διάσπασης του διεγέρτη είναι οι ενώσεις κοβαλτίου.
4. Οι Επιβραδυντές ή Αναστολείς, οι οποίοι είναι χημικές ουσίες που αντιδρούν με ένα ποσοστό των ελευθέρων ριζών και δίνουν ενώσεις που δεν προκαλούν τον πολυμερισμό των μονομερών.
5. Οι Παρεμποδιστές, οι οποίοι είναι ενώσεις που εμποδίζουν την άμεση αντίδραση ουσιών με τις ελεύθερες ρίζες για πλήρη δέσμευση αυτών και διακοπή της αντιδράσεως πολυμερισμού. Μετά την κατανάλωση της ένωσης του παρεμποδιστή, εφόσον υπάρχει ποσότητα ουσίας που δίνει ελεύθερες ρίζες, συνεχίζεται η αντίδραση πολυμερισμού σκληρύνσεως.

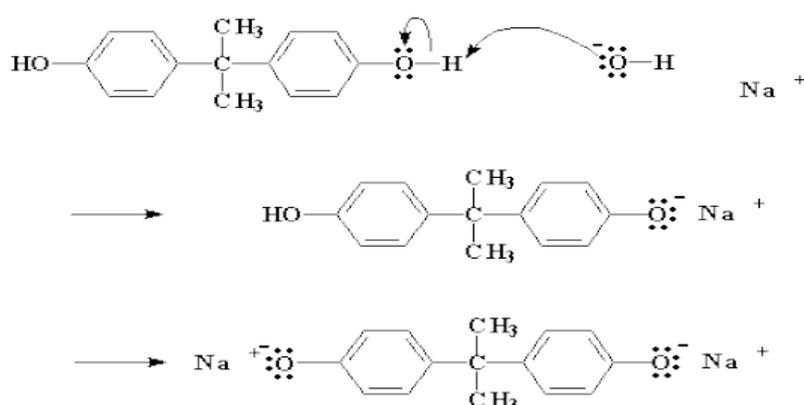
Σε αρκετές περιπτώσεις εκτός της διαδικασίας της σκληρύνσεως ενός πολυεστέρα μπορεί να ακολουθήσει και *μετασκλήρυνση* του ήδη σκληρυμένου προϊόντος. Η διαδικασία της μετασκλήρυνσεως συμβαίνει μόνο όταν υπάρχουν ελεύθερες ρίζες προς έναρξη της διαδικασίας του πολυμερισμού. Η αντίδραση της μετασκλήρυνσεως μπορεί να συμβεί σε θερμοκρασίες 60-80°C για μερικές ώρες ή σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος για μερικές εβδομάδες. [10]

## 2.4 Σύνθεση – Σκλήρυνση Εποξειδικών Ρητινών

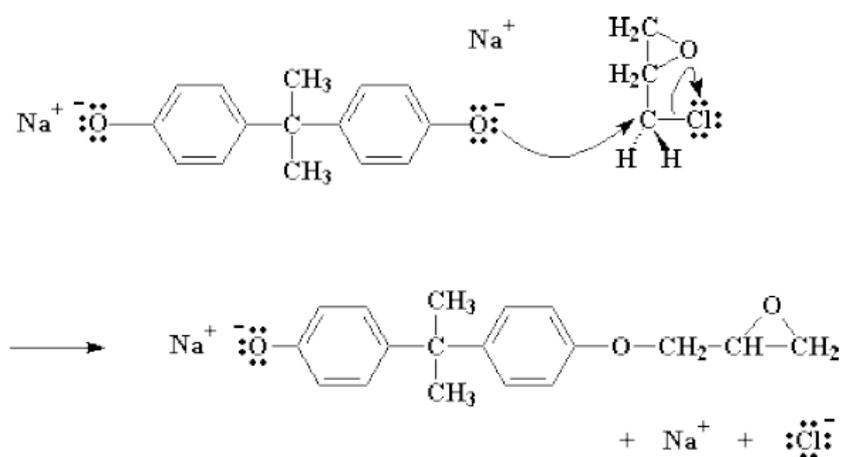
Για τη σύνθεση των εποξειδικών ρητινών παρασκευάζεται αρχικά ένα προπολυμερές χαμηλού μοριακού βάρους (διπολυμερές) από επιχλωριδρίνη με αρωματικές ή αλειφαικές διόλες. Συνήθης διόλη είναι η διφαινόλη Α με τη βοήθεια καταλυτών. Επίσης, εκτός της διφαινόλης Α μπορούν να χρησιμοποιηθούν η διφαινόλη F, η νεολάκη, αλειφατικές ενώσεις, γλυκιδικοί εστέρες και κυκλοαλειφατικές ενώσεις.



Πιο αναλυτικά, έχουμε τη δημιουργία άλατος νατρίου-διφαινόλης Α.

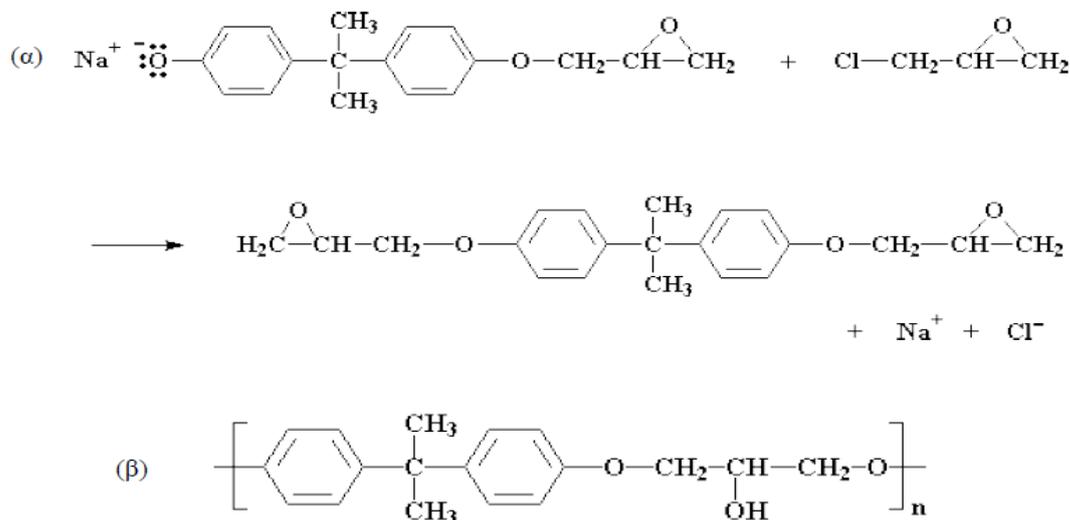


Στη συνέχεια το άλας νατρίου – διφαινόλης Α αντιδρά με την επιχλωριδρίνη.



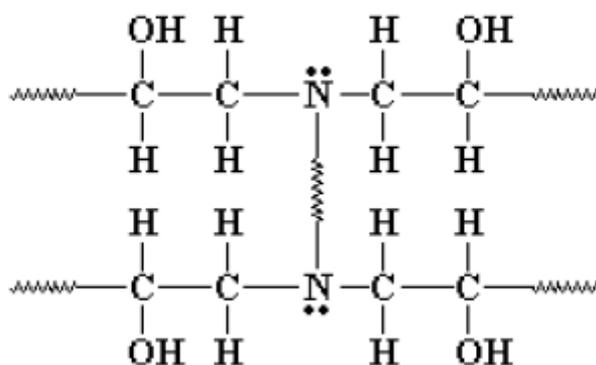
Το μόριο που προκύπτει από την παραπάνω αντίδραση είναι αρκετά όμοιο με αυτό της διφαινόλης Α και αποτελείται από μία μόνο εποξειδική ομάδα. Ως παραπροϊόν της παραπάνω

σύνθεσης είναι το χλωριούχο νάτριο NaCl. Για να υπάρχει άλλη μία εποξειδική ομάδα στο παραπάνω μόριο θα πρέπει να υπάρχει περίσσεια επιχλωριδίνης. Ανάλογα με την ποσότητα της επιχλωριδίνης προς τη ποσότητα της διφαινόλης A μπορούμε να ελέγξουμε πόσο μικρό ή μεγάλο θα γίνει το προπολυμερές μας. Η αντίδραση της εν λόγω σύνθεσης σταματά όταν δεν υπάρχει άλλη ποσότητα της διφαινόλης A να αντιδράσει.[1]



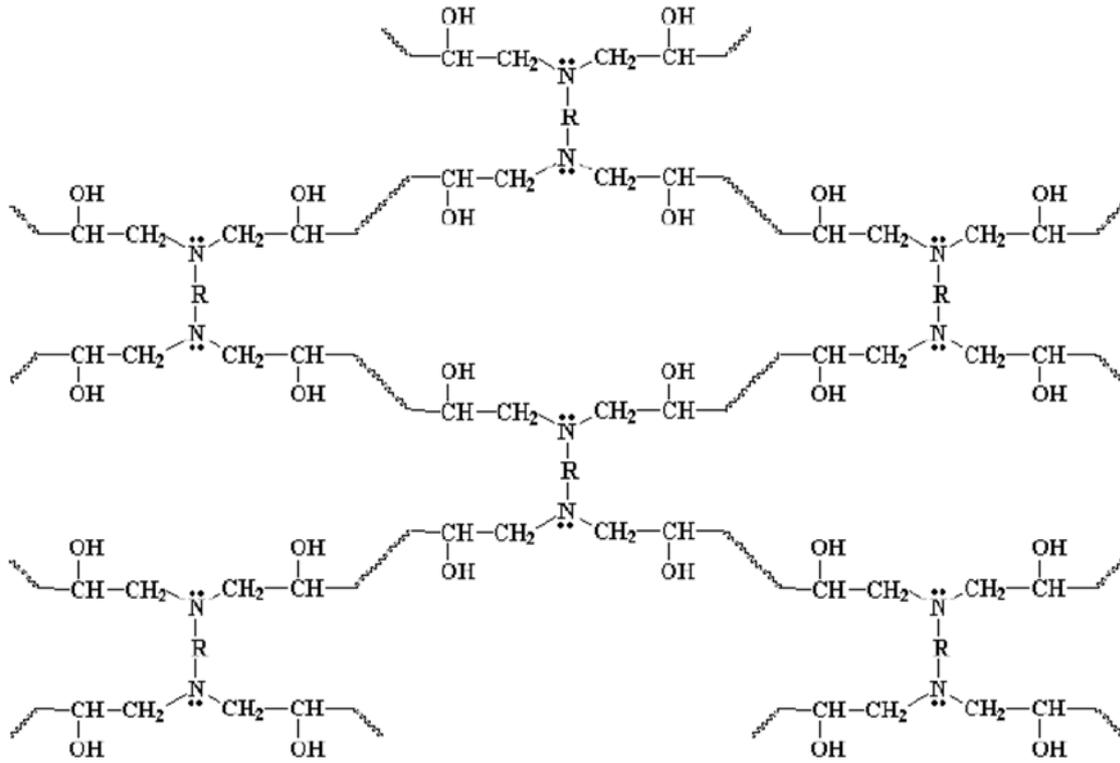
**Σχήμα 2.1:** (α) Περίσσεια επιχλωριδίνης δίνει το επιθυμητό αποτέλεσμα στη δομική μακρομοριακή αλυσίδα του πολυμερούς, (β) Μονομερές πολυμερισμένης εποξειδικής ρητίνης με αντίδραση επιχλωριδίνης με διφαινόλη A.

Η αντίδραση σκλήρυνσης των εποξειδικων ρητίνων επιτυγχάνεται με την προσθήκη διαμίνων. Με μία διαμίνη πραγματοποιούνται αντιδράσεις με 4 εποξειδικές ομάδες αφού κάθε αμινομάδα μπορεί να αντιδράσει με 2 εποξειδικές ομάδες. Συνεπώς, 4 εποξειδικά προπολυμερή μαζί με 1 διαμίνη μας δίνουν το παρακάτω μόριο.



**Σχήμα 2.2:** Ολιγομερή διεποξειδίων ενωμένα σε ένα πολυμερικό δίκτυο.

Έτσι, συνδεδεμένα πολλά τέτοια ολιγομερή μεταξύ τους μας δίνουν το τελικό προϊόν (θερμοσκληρυνόμενο) που είναι η σκληρυμένη πια εποξειδική ρητίνη. [11][12]

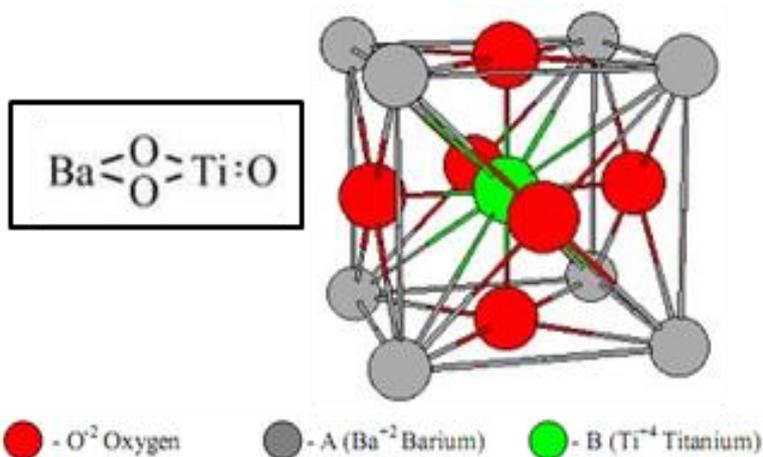


Σχήμα 2.3: Σκληρωμένη Εποξειδική Ρητίνη

## 2.5 Τιτανικό Βάριο (BaTiO<sub>3</sub>)

Η ανόργανη χημική ένωση του τιτανικού βαρίου, χαρακτηρίζεται από τον χημικό τύπο BaTiO<sub>3</sub>. Η μοναδιαία κυψελίδα του τιτανικού βαρίου, εμφανίζει και τα τρία είδη φαινομένων των ενεργών διηλεκτρικών, οπότε το τιτανικό βάριο είναι και πιεζοκρύσταλλος και σιδηροηλεκτρικό (φερροηλεκτρικό) καθώς και πυροηλεκτρικό υλικό. Το τιτανικό βάριο, παρασκευάζεται μέσω του οξειδίου του τιτανίου TiO<sub>2</sub> και κάποιου ακόμα αντιδρώντος, από το οποίο προσλαμβάνεται το στοιχείο βάριο. Δύο πιθανές περιπτώσεις είναι: Είτε μέσω της ένωσης του ανθρακικού βαρίου (BaCO<sub>3</sub>), είτε μέσω του οξειδίου του βαρίου (BaO).

Το τιτανικό βάριο έχει δομή μοναδιαίας κυψελίδας περοβσκίτη CaTiO<sub>3</sub> (perovskite), με γενικό χημικό τύπο ABO<sub>3</sub>, όπου το A είναι ανιόν και B κατιόν και το O το οξυγόνο. Τα άτομα O, σχηματίζουν ανιονικά οκτάεδρα τις κορυφές των οποίων καταλαμβάνουν τα ανιόντα, ενώ τα άτομα B βρίσκονται στο κέντρο κάθε μοναδιαίας κυψελίδας με απλή κυβική συμμετρία. Τα άτομα A, τα οποία χαρακτηρίζονται και αυτά από απλή κυβική συμμετρία, καταλαμβάνουν τις κορυφές του κύβου της μοναδιαίας κυψελίδας. Τα κατιόντα A και B, έχουν διαφορετικό μέγεθος, με μεγαλύτερο το κατιόν A.[1]



Εικόνα 2.5: Δομή μοναδιαίας κυψελίδας τιτανικού βαρίου (δομή περοβσκίτη) και συντακτικός τύπος τιτανικού βαρίου.

Χημικός Τύπος	BaTiO <sub>3</sub>
Δομή μοναδιαίας κυψελίδας	δομή περοβσκίτη
Μοριακό Βάρος	233,192 gr/mol
Μορφή	λευκοί κρύσταλλοι
Πυκνότητα	6,02 gr/cm <sup>3</sup>
Σημείο τήξης	1625°C
Διαλυτότητα σε νερό	Αδιάλυτο
Διαλυτότητα	ελαφρά διαλυτό σε αραιά ανόργανα οξέα, διαλυτό σε πυκνό θειικό οξύ και υδροφθορικό οξύ
Ενεργειακό Χάσμα (E <sub>g</sub> )	3,2 eV (300K)
Μέτρο Young	67 GPa
Σκληρότητα	5 (κλίμακα Moh)
Θερμοκρασία Curie (T <sub>c</sub> )	120°C
Διηλεκτρική σταθερά	1250-10000 (20-120°C, για συχνότητα 1kHz)

Πίνακας 2.2: Ιδιότητες τιτανικού βαρίου (BaTiO<sub>3</sub>)

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Διηλεκτρικά Υλικά – Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πολυμερών

### 3.1 Διηλεκτρικά Υλικά

Όταν ένα ηλεκτρικό πεδίο (Η.Π.) μπορεί να διατηρηθεί με μηδενικές ή σχεδόν μηδενικές απώλειες ισχύος μέσα σε ένα υλικό, τότε αυτό χαρακτηρίζεται ως *διηλεκτρικό* ή ηλεκτρικός μονωτής. Στην πραγματικότητα το διηλεκτρικό δεν είναι ιδανικός μονωτής, αφού κάποιος αριθμός ηλεκτρονίων το διαπερνά. Εξαιτίας των διαδικασιών αλλαγής πολικότητας του υλικού, μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται ως θερμότητα.

Διηλεκτρικό υλικό είναι επομένως εκείνο που έχει την ικανότητα να αποθηκεύει ενέργεια κατά την επιβολή εξωτερικού Η.Π. Όταν εφαρμόζεται μια σταθερή τάση κατά μήκος των παραλλήλων πλακών-οπλισμών ενός πυκνωτή, με διηλεκτρικό ανάμεσα τους, τότε αποθηκεύεται περισσότερη ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι το διηλεκτρικό αυξάνει την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας στον πυκνωτή, εξουδετερώνοντας κάποια από τα φορτία των ηλεκτροδίων που θα συνέβαλλαν στη διαμόρφωση της συνολικής πεδιακής έντασης μεταξύ των οπλισμών.[18]

Η μετρούμενη χωρητικότητα κατά την παρουσία διηλεκτρικού εξαρτάται από τα ηλεκτρικά φορτία του υλικού και σχετίζεται με τη διηλεκτρική σταθερά. Ισχύει ο τύπος:

$$C = \epsilon_r' \cdot C_0 \Rightarrow \epsilon_r' = \frac{C}{C_0}$$

όπου  $C$ ,  $C_0$  είναι οι χωρητικότητες με παρουσία διηλεκτρικού και του κενού αντίστοιχα και  $\epsilon_r'$  είναι η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού.

Τα διηλεκτρικά υλικά χρησιμοποιούνται στη κατασκευή των πυκνωτών. Είναι τα πλέον κατάλληλα για να εμποδίσουν τη δημιουργία ηλεκτρικών ρευμάτων διαμέσου της μάζας τους, ενώ παράλληλα διατηρούν τις διαφορές δυναμικού στα τμήματα των ηλεκτροτεχνικών διατάξεων και εγκαταστάσεων.

Παρατήρηση: Ένα διηλεκτρικό υλικό λέγεται μονωτικό όταν οι ιδιότητές του είναι τέτοιες που να μπορεί να χρησιμεύσει για τη μόνωση ηλεκτρικών εγκαταστάσεων. Συγκεκριμένα η σχετική διηλεκτρική σταθερά ενός μονωτικού υλικού πρέπει να είναι κοντά στο 1, ενώ για ένα διηλεκτρικό γενικά μπορεί να φτάσει ή και να ξεπεράσει κατά πολύ το 10. Οι λέξεις διηλεκτρικό και μονωτικό χρησιμοποιούνται συχνά ως περίπου συνώνυμες, όμως με την πρώτη δίνουμε έμφαση στις ιδιότητες του υλικού από φυσική άποψη, ενώ με τη δεύτερη στη χρήση του σε πρακτικές εφαρμογές.[19]

Τα υλικά που αναφέρονται ως διηλεκτρικά ταξινομούνται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Τα *πολικά διηλεκτρικά*, είναι διηλεκτρικά των οποίων τα μόρια παρουσιάζουν μόνιμη διπολική ροπή, καθώς τα κέντρα βάρους των θετικών και αρνητικών φορτίων δεν συμπίπτουν. Το HCl και το CO αποτελούν δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα πολικών μορίων.
- Τα *μη πολικά διηλεκτρικά*, είναι διηλεκτρικά των οποίων τα μόρια δεν παρουσιάζουν μόνιμη διπολική ροπή, καθώς τα κέντρα βάρους των θετικών και αρνητικών φορτίων τους

συμπίπτουν. Μόρια τα οποία είναι συμμετρικά διευθετημένα στο χώρο και παρουσιάζουν κέντρο συμμετρίας είναι μη πολικά μόρια. Χαρακτηριστικό παράδειγμα το CH<sub>4</sub>. [1]

### 3.1.1 Διηλεκτρικά Μεγέθη

#### Δύναμη μεταξύ φορτίων

Η ηλεκτρική δύναμη μεταξύ των φορτίων του υλικού δίνεται ως γνωστόν από τον ακόλουθο τύπο:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

όπου  $\epsilon_0$ : η διηλεκτρική σταθερά του κενού ( $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$  F/m).

Αν παρεμβάλλεται υλικό μεταξύ των φορτίων η δύναμη μειώνεται και τότε ισχύει ο τύπος:

$$F = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

όπου  $\epsilon$ : η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά ή επιτρεπτότητα, και δίνεται από τη σχέση:  $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ , όπου  $\epsilon_r$ : η σχετική διηλεκτρική σταθερά ή σχετική επιτρεπτότητα.

#### Σχετική μιγαδική διηλεκτρική επιτρεπτότητα ( $\epsilon_r$ )

Το μέγεθος αυτό περιγράφει την αλληλεπίδραση των υλικών με το Η.Π. Είναι ίση με τη μιγαδική επιτρεπτότητα του υλικού διαιρεμένη με τη μιγαδική επιτρεπτότητα του κενού, άρα ισχύει:

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \left( \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \right) - j \cdot \left( \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \right) = \epsilon_r' - j \cdot \epsilon_r''$$

Το  $\epsilon_r'$  αποτελεί ένδειξη για το πόση ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί στο υλικό από το επιβαλλόμενο Η.Π. και λέγεται σχετική διηλεκτρική σταθερά. Για το κενό είναι  $\epsilon_r' = 1$ , ενώ για τα αέρια μονωτικά υλικά είναι  $\epsilon_r' \approx 1$ . Όμως για τα περισσότερα υγρά και στερεά μονωτικά είναι:  $1 \leq \epsilon_r' \leq 10$ . Για τους ημιαγωγούς έχουμε:  $10 \leq \epsilon_r' \leq 20$ , ενώ για τα μέταλλα το  $\epsilon_r'$  τείνει στο άπειρο.

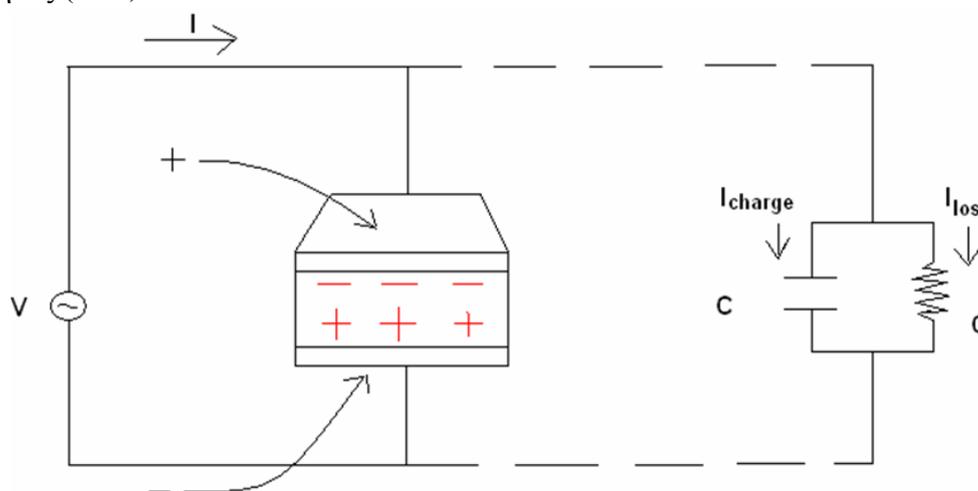
Το  $\epsilon_r''$  εκφράζει τις απώλειες του υλικού και αποτελεί ένδειξη για το πόσο πολικά χαλαρό αναμένεται ότι θα αποδειχθεί το υλικό ως προς το εξωτερικά επιβαλλόμενο Η.Π. Σημειώνουμε ότι χαλαρό υλικό σε μια συχνότητα έχουμε όταν ο κυρίαρχος μηχανισμός πόλωσης του υλικού είναι ικανός να ακολουθεί τις μεταβολές του εφαρμοζόμενου σε αυτό πεδίου. Το  $\epsilon_r''$  είναι ποσότητα πάντα θετική και πρακτικά πολύ μικρότερη του  $\epsilon_r'$ . Σε τελική ανάλυση, το  $\epsilon_r''$  λαμβάνει υπ' όψιν του τους μηχανισμούς των διηλεκτρικών απωλειών και της αγωγιμότητας όγκου των υλικών.

Το  $\epsilon_r$  συναντάται επίσης με το συμβολισμό  $k^* = k' - j \cdot k''$  και ονομάζεται μιγαδική διηλεκτρική σταθερά. Το πραγματικό μέρος  $k' = \epsilon_r'$  ονομάζεται σχετική διηλεκτρική σταθερά, ενώ επίσης ισχύει  $k'' = \epsilon_r''$ . [18][19]

### Εναλλακτική θεώρηση της μιγαδικής διηλεκτρικής σταθεράς

Όταν εφαρμοστεί εναλλασσόμενη τάση σε πυκνωτή που περιέχει διηλεκτρικό, το συνολικά μετρούμενο ρεύμα θα προέρχεται από το ρεύμα φόρτισης ( $I_{\text{charge}}$ ) που διαρρέει τον πυκνωτή και σχετίζεται με τη χωρητικότητα της εξεταζόμενης δομής και το ρεύμα απωλειών ( $I_{\text{loss}}$ ), το οποίο με τη σειρά του σχετίζεται με την αντίσταση όγκου του υλικού. Οι απώλειες μοντελοποιούνται ως μια αγωγιμότητα ( $G$ ) που συνδέεται παράλληλα με τον ιδανικό πυκνωτή.

Χρησιμοποιούμε, λοιπόν το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας - αγωγιμότητας (C-G):



**Σχήμα 3.1:** Ισοδύναμο κύκλωμα χωρητικότητας παράλληλα με αγωγιμότητα.

Το συνολικό ρεύμα που διαρρέει το δοκίμιο μέσα από τον πυκνωτή ( $I_{\text{charge}}$ ) και μέσα από την αντίσταση απωλειών ( $I_{\text{loss}}$ ) είναι:

$$I = I_{\text{Charge}} + I_{\text{loss}} = V \cdot (j \cdot \omega \cdot C + G) = V \cdot (j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \epsilon_r' + G) \Rightarrow$$

$$I = V \cdot (j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot \epsilon_r' + \omega \cdot C_0 \cdot \epsilon_r'') = V \cdot j \cdot \omega \cdot C_0 \cdot (\epsilon_r' - j \cdot \epsilon_r'') = V \cdot (j \cdot \omega \cdot C_0) \cdot \epsilon_r \Rightarrow$$

$$I = V \cdot (j \cdot \omega \cdot C_0) \cdot \epsilon_r$$

Όπου  $G = \omega \cdot C_0 \cdot \epsilon_r'' \Leftrightarrow \epsilon_r'' = \frac{G}{\omega \cdot C_0}$  και  $\epsilon_r = \epsilon_r' - j \cdot \epsilon_r''$ .

Η μιγαδική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  αποτελείται από το πραγματικό μέρος ( $\epsilon_r'$ ), όπου αποδίδεται η αποθήκευση των ηλεκτρικών φορτίων στον ιδανικό πυκνωτή και το φανταστικό ( $\epsilon_r''$ ), όπου αποδίδονται οι απώλειες των ηλεκτρικών φορτίων μέσα από την αγωγιμότητα όγκου ( $G$ ) του εξεταζόμενου συστήματος μόνωσης.[19]

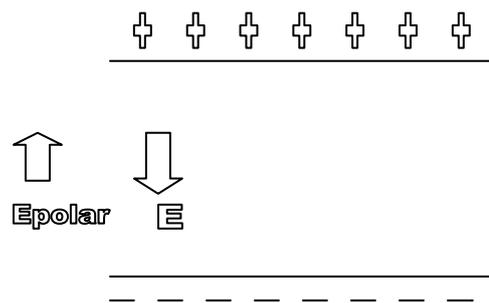
### 3.1.2 Παράλληλες Πλάκες με Διηλεκτρικό

Η χωρητικότητα ενός ζεύγους παράλληλων φορτισμένων πλακών αυξάνεται όταν εισάγουμε ένα διηλεκτρικό υλικό. Ως γνωστό, η χωρητικότητα είναι αντιστρόφως ανάλογη

του Η.Π. μεταξύ των πλακών και η παρουσία διηλεκτρικού μειώνει το ενεργό Η.Π. (effective).

Επίσης ξέρουμε ότι το διηλεκτρικό χαρακτηρίζεται από τη διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  και η χωρητικότητα πολλαπλασιάζεται με τον παράγοντα αυτό. Γενικά για την χωρητικότητα ισχύει:

$$C = \frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_o \cdot A}{d} \quad \text{ενώ για τον αέρα είναι:} \quad C = \frac{\epsilon_o \cdot A}{d}$$



**Σχήμα 3.2:** Παράλληλες φορτισμένες πλάκες.

$$\text{Ισχύει:} \quad E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{V}{d}, \quad E_{effective} = E - E_{polarization} = \frac{\sigma}{\epsilon_r \cdot \epsilon_o}$$

Όταν το διηλεκτρικό τοποθετείται ανάμεσα σε φορτισμένες πλάκες, η πόλωση του μέσου παράγει ένα Η.Π. αντίθετης φοράς προς το Η.Π. που δημιουργούν τα φορτία των πλακών. Η διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$  ορίζεται για να δείξει το ποσό της μείωσης του ενεργού Η.Π.(effective).

Στα διηλεκτρικά έχουμε δύο ειδών απώλειες:

i) Ωμικές απώλειες: Υπάρχει διαφορά μεταξύ αντίστασης όγκου ( $R_v$ ) και επιφανειακής

$$R_{total} = \frac{R_v \cdot R_s}{R_v + R_s}$$

αντίστασης ( $R_s$ ). Η συνολική αντίσταση είναι: Οι ωμικές απώλειες γίνονται αισθητές με την αύξηση της θερμοκρασίας του μονωτήρα, που είναι συχνά αξιοσημείωτη.

ii) Διηλεκτρικές απώλειες: Είναι το αποτέλεσμα αλλαγής της πολικότητας των στοιχειωδών τμημάτων του διηλεκτρικού που οφείλεται στην αλλαγή της φοράς του πεδίου σε κάθε περίοδο. Η αλλαγή αυτή προκαλεί ταλαντώσεις που παράγουν θερμότητα λόγω τριβής, άρα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας χάνεται σε θερμότητα.

Το ποσό των απωλειών είναι:  $P = V_{rms}^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot \tan \delta$ , όπου  $\tan \delta$  είναι ο παράγοντας απωλειών και είναι ένα μέτρο των διηλεκτρικών απωλειών, εξαρτώμενο από τη συχνότητα.[18]

### 3.1.3 Μηχανισμοί Πόλωσης Διηλεκτρικού

Σε χρονικά μεταβαλλόμενα συστήματα έχουμε ταυτόχρονη εμφάνιση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα διαδίδεται στον ελεύθερο χώρο με ταχύτητα:

$$c = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{sec}, \text{ διαθέτει ενεργειακό περιεχόμενο σε ευρύ φάσμα μηκών κύματος } (\lambda=c/f) \text{ και}$$

φυσικά όσο αυξάνεται η συχνότητα τόσο μειώνεται το μήκος κύματος.

Πολλά από τα θέματα που αναφέρονται στη διάδοση κύματος, συνδέονται με τη διηλεκτρική σταθερά των υλικών. Για παράδειγμα κατά την μετάβαση ενός κύματος από τον ελεύθερο χώρο στο εσωτερικό ενός υλικού, παρουσιάζεται μια μεταβολή της μιγαδικής αντίστασης στην επιφάνεια, οπότε μέρος της προσπίπτουσας ενέργειας ανακλάται, ενώ το υπόλοιπο διαθλάται και μεταδίδεται μέσα στο υλικό. Στο εσωτερικό του υλικού η ταχύτητα και το μήκος κύματος μειώνονται. Σε ένα χαλαρό υλικό αναμένεται κατά την εισαγωγή του να υπάρχει απώλεια ενέργειας, ενώ κατά τη μεταφορά του κύματος στο εσωτερικό υπάρχει απόσβεση της έντασης του κύματος.

Ένα υλικό μπορεί να αναπτύξει αρκετούς διηλεκτρικούς μηχανισμούς που αναμένεται να συμβάλλουν στη διαμόρφωση της διηλεκτρικής σταθεράς. Τα διηλεκτρικά υλικά εμφανίζουν μια χωρική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων, που μπορεί να μεταβληθεί κατά την επιβολή εξωτερικού Η.Π. Τα φορτία αυτά πολώνονται για να αντισταθμίσουν το Η.Π., δηλαδή τα θετικά και αρνητικά φορτία προσανατολίζονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί πόλωσης, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι: ο ιοντικός, ο διπολικός, ο ατομικός και ο ηλεκτρονικός.

- Η **ηλεκτρονική πόλωση** επιδρά σε κάθε άτομο ή μόριο δεδομένου ότι τα κέντρα μάζας του νέφους ηλεκτρονίων που περιβάλλει τα άτομα θα μετατοπιστούν από το Η.Π. Αυτή η επίδραση είναι εξαιρετικά γρήγορη και μπορεί να παρατηρηθεί μέχρι τις οπτικές συχνότητες.
- Η **ιοντική πόλωση** αναφέρεται σε υλικά τα μόρια των οποίων διαμορφώνουν ιόντα που δε διαχωρίζονται από ασθενή Η.Π. ή χαμηλές θερμοκρασίες. Εκτός από την ηλεκτρική πόλωση που προκαλείται σε τέτοια μόρια από ένα Η.Π., θα εμφανιστούν επίσης και ελαστικές μετατοπίσεις των φορτίων (πυρήνες και ηλεκτρόνια). Κάτι τέτοιο σημαίνει ότι, αυτοί οι τύποι μορίων είναι πολικές ενώσεις, που μπορούν να πολωθούν μέχρι τις υπέρυθρες συχνότητες.
- Η **διπολική πόλωση** αναφέρεται σε υλικά που περιέχουν μόρια με μόνιμες διπολικές ροπές, με τους προσανατολισμούς στατιστικά ομοιόμορφα κατανεμημένους, λόγω της δράσης της θερμικής ενέργειας. Κάτω από την επιρροή του Η.Π., τα δίπολα προσανατολίζονται μόνο μερικώς, οπότε υπάρχει γραμμική εξάρτηση του P με το E του ΗΠ. Η ιοντική και η διπολική πόλωση είναι αρκετά γρήγοροι μηχανισμοί και μπορούν να ακολουθήσουν σε συχνότητες μέχρι την τάξη των MHz ή GHz.
- Η **διεπιφανειακή πόλωση** παρατηρείται κυρίως σε μονωτικά υλικά που αποτελούνται από διαφορετικά διηλεκτρικά υλικά όπως το χαρτί (κυτταρίνη) εμβαπτισμένο σε έλαιο. Ο κακός συνδυασμός διαφορετικών διηλεκτρικών υλικών προκαλεί, υπό την επίδραση ενός ΗΠ, απόθεση κινούμενων θετικών και αρνητικών φορτίων στις διεπιφάνειες των υλικών, διαμορφώνοντας έτσι κάποια είδη διπόλων. Το φαινόμενο αυτό είναι αργό και

γίνεται αντιληπτό στο φάσμα των συχνοτήτων ισχύος. Η μεταφορά φορτίων από στάθμη σε στάθμη μπορεί επίσης να βοηθήσει στη δημιουργία πόλωσης. Είναι μια διαδικασία αργή, έντονα εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία και συναντάται συνήθως στα στερεά.

- Συμπερασματικά, η **διηλεκτρική πόλωση** είναι αποτέλεσμα της σχετικής μετατόπισης θετικών και αρνητικών φορτίων σε ένα υλικό. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το ΗΠ δεν είναι ικανό να αναγκάσει τα φορτία να ξεφύγουν από το υλικό, κάτι που θα προκαλούσε ηλεκτρική αγωγιμότητα.[18][23]

Κάθε ένας από τους διηλεκτρικούς μηχανισμούς πόλωσης συνδέεται με μια χαρακτηριστική συχνότητα συντονισμού (απότομη αύξηση της διηλεκτρικής σταθεράς σε δεδομένη συχνότητα) ή συχνότητα χαλάρωσης (σταδιακή μείωση της διηλεκτρικής σταθεράς με την αύξηση της συχνότητας). Καθώς η συχνότητα αυξάνεται, οι αργότεροι διηλεκτρικοί μηχανισμοί πόλωσης εξαλείφονται, αφήνοντας μόνο τους ταχύτερους να συμβάλλουν στα φαινόμενα αποθήκευσης ενέργειας ( $\epsilon_r'$ ). Αντίστοιχα, ο συντελεστής απωλειών ( $\epsilon_r''$ ) επαυξάνεται σε κάθε κρίσιμη συχνότητα. Τα φαινόμενα συντονισμού συνήθως συνδέονται με την ηλεκτρονική ή ατομική πόλωση. Τα φαινόμενα χαλάρωσης αναπτύσσονται κατά την πόλωση προσανατολισμού και συνδέονται με τη μετατόπιση ιόντων, διπόλων ή και χωρικών φορτίων στον όγκο του υλικού.[19]

### 3.2 Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πολυμερών

Τα πλαστικά συμπεριφέρονται διαφορετικά στα ηλεκτρικά πεδία. Τα **μέταλλα** έχουν πολλά ηλεκτρόνια στην εξωτερική στιβάδα του ατόμου τους, τα οποία με εφαρμογή ενός ηλεκτρικού πεδίου κινούνται και μάλιστα συμμετέχοντας γύρω από όλους τους πυρήνες. Έτσι η ηλεκτρική αγωγιμότητα  $\sigma$  των μετάλλων δεν μεταβάλλεται σημαντικά με την χημική φύση των μετάλλων (π.χ.  $\sigma_{Ag}=590.000 \text{ S/cm}$ ,  $\sigma_{Al}=330.000 \text{ S/cm}$ ,  $\sigma_{Fe}=100.000 \text{ S/cm}$ ).

Προκειμένου για μη ιοντικά (δηλαδή μη διστάμενα σε ιόντα) πολυμερή, τα ηλεκτρόνια τους είναι ισχυρά συνδεδεμένα με τον πυρήνα του ατόμου τους. Τα ζεύγη ηλεκτρονίων των ομοιοπολικών δεσμών μεταξύ δύο ατόμων δεν κατανέμονται ισοδύναμα σε αυτά τα άτομα, δηλαδή πλησιάζουν περισσότερο το ένα άτομο έναντι του άλλου. Το **μόνιμο δίπολο** που προκύπτει, εάν εφαρμοσθεί ένα ηλεκτρικό πεδίο προσανατολίζεται στη διεύθυνση του πεδίου. Σε ορισμένες ομάδες ατόμων, ηλεκτρόνια (δηλαδή αρνητικά φορτισμένα σωματίδια) μετακινούνται στην αντίθετη διεύθυνση, από αυτή των θετικά φορτισμένων πυρήνων των ατόμων, δίνοντας έτσι **δίπολα εξ'επαγωγής**. Η **πολικότητα** είναι δύσκολο να προσδιοριστεί κατ'ευθείαν. Συνήθως αυτή μετράται από τον λόγο χωρητικοτήτων ενός πυκνωτή στο κενό και στο δοκίμιο, δηλαδή έτσι προσδιορίζεται η **σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon_r$**  (relative dielectric constant) του δοκιμίου. Η τιμή της  $\epsilon_r$  είναι χαμηλή για μη πολικά πολυμερή (π.χ. πολυαιθυλένιο), υψηλότερη για πολυμερή με ομάδες που μπορούν να υποστούν πολικότητα (π.χ. πολυστυρένιο) και ακόμη υψηλότερη για πολικά πολυμερή (π.χ. πολυαμίδια ξηρά, δηλαδή χωρίς υγρασία).

Η  $\epsilon_r$  των **μη πολικών πολυμερών** ελαττώνεται με αυξανόμενη θερμοκρασία. Οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε διαστολή του όγκου, οπότε αυξάνει η απόσταση

μεταξύ των ατόμων με συνέπεια να ελαττώνονται οι δυνάμεις διασποράς. Η  $\epsilon_r$  των **πολικών πολυμερών** όμως αυξάνει με αυξανόμενη θερμοκρασία, διότι τα δίπολα αποκτούν μεγαλύτερη κινητικότητα, ιδιαίτερα πάνω από την υαλώδη θερμοκρασία  $T_g$  του πολυμερούς. Η πλαστικοποίηση αυξάνει την κινητικότητα των διπόλων. Η  $\epsilon_r$  αυξάνει επίσης με αυξανόμενη ποσότητα νερού (π.χ. που προέρχεται από υγρασία) στο πλαστικό (καθόσον η  $\epsilon_r$  του νερού είναι  $\epsilon_r=81$ ). Ακόμη η  $\epsilon_r$  αυξάνει με αυξανόμενη κινητικότητα των τμημάτων τη αλυσίδας του μακρομορίου ( $\epsilon_r=13$  για το cis-1.4- πολυϊσοπρένιο, ενώ  $\epsilon_r=3$  έως 8 για πλαστικά). Έτσι πλαστικά τροποποιημένα με ελαστικό έχουν υψηλότερη τιμή  $\epsilon_r$  σύμφωνα με τον κανόνα της αναμείξεως (δηλαδή βάση της συγκεντρώσεως/όγκου τους). Στον Πίνακα 3.1 παρουσιάζονται οι τιμές των ηλεκτρικών ιδιοτήτων διάφορων πολυμερών.

Πολυμερές	$\Delta w$ [%]	$\rho$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$R$ [ $\Omega$ ]	$\epsilon_r$	$\tan\delta$	$S$ [ $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]	$v$ [V]
PTFE	0	1018		2,15	0,0001	40	>600
PE	0,05	1017	1013	2,3	0,0007	70	600
PS	0,1	1018	1015	2,5	0,0002	140	500
ABS		1015	1013	3,2	0,02	15	600
PVC	<1,8	1015	1013	<3,7	0,015	<50	<600
PA 6.ξηρό	0	1015		3,7	0,03	<150	600
PA 6.θερμοστατισμένο		1012		7	0,3	80	600

**Πίνακας 3.1:** Ηλεκτρικές Ιδιότητες Πολυμερών.

Όπου:

$\Delta w$ : προσρόφηση νερού σε 50% σχετική υγρασία

$\epsilon_r$ : σχετική διηλεκτρική σταθερά

$\rho$ : ειδική αντίσταση

$S$ : διηλεκτρική αντοχή

$R$ : ηλεκτρική αντίσταση

$v$ : αντίσταση ανιχνεύσεως

$\tan\delta$ : διηλεκτρική εφραπτομένη απωλειών

Μικρής εντάσεως ηλεκτρικά πεδία προκαλούν ένα προσανατολισμό των διπόλων του διηλεκτρικού υλικού (που τοποθετείται ανάμεσα από τις δύο πλάκες του πυκνωτή). Υψηλότερης εντάσεως πεδία απομακρύνουν ηλεκτρόνια από μερικά άτομα και έτσι προκύπτουν **ιόντα**. Αυτά τα ιόντα είναι εκείνα που **άγουν** ηλεκτρικά στα διηλεκτρικά πολυμερή και **όχι** τα **ηλεκτρόνια**, τα οποία άγουν ηλεκτρικά στα μέταλλα.

Συνεπώς, προκύπτει το συμπέρασμα ότι, η ειδική αντίσταση  $\rho$  ελαττώνεται με αυξανόμενη ποσότητα πολικών ομάδων και κινητικότητα των τμημάτων της αλυσίδας του μακρομορίου. Η τιμή της  $\rho$  διηλεκτρικών πολυμερών ελαττώνεται με αυξανόμενη τιμή της  $\epsilon_r$  και τελικά σταθεροποιείται για  $\epsilon_r > 8$  (Πίνακας 3.1). Επίσης η  $\rho$  ελαττώνεται με την θερμοκρασία, ενώ στα μέταλλα αυξάνει.

Από την άλλη μεριά, η ηλεκτρική επιφανειακή αντίσταση  $R$  εξαρτάται από πολύ περισσότερους παράγοντες σε σχέση με την ειδική αντίσταση  $\rho$ . Ειδική σημασία έχει η **υγρασία**, καθόσον οδηγεί σε σημαντικές ιοντικές αγωγιμότητες, εάν υπάρχουν μικρά ποσά

επιφανειακών ακαθαρσιών. Έτσι ως αριθμητικές τιμές (διότι πρόκειται για δύο διαφορετικά φυσικά μεγέθη) οι αντιστάσεις R είναι συχνά 2 έως 3 τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από τις ειδικές αντιστάσεις ρ. Εξωτερικοί παράγοντες (πέραν της υγρασίας), όπως η θερμοκρασία, αλλά και πρόσθετες ουσίες που ενδεχομένως υπάρχουν στη μορφοποιημένη μάζα του πολυμερούς (όπως πλαστικοποιητές) επηρεάζουν τις ηλεκτρικές ιδιότητες.

Προκειμένου για την **διηλεκτρική απώλεια** (dielectric loss) αυτή οφείλεται σε απώλεια ηλεκτρικής ενέργειας με μετατροπή σε θερμική ενέργεια. Εάν εφαρμοσθεί ένα εναλλασσόμενο ρεύμα (alternating current), τα **δίπολα** προσπαθούν να ακολουθήσουν την διεύθυνση του ηλεκτρικού πεδίου. Ο απαιτούμενος χρόνος εξομαλύνσεως αντιστοιχεί στο χρόνο προσανατολισμού των ομάδων και των μορίων. Όσο ταχύτερη είναι η μεταβολή, τόσο μεγαλύτερη είναι η υστέρηση προσανατολισμού ως προς το πεδίο και τόσο μεγαλύτερη είναι η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται (από μετατροπή σε θερμική ενέργεια).

Ο λόγος της απώλειας ισχύος  $N_{\alpha}$  προς την συνολική ισχύ εξόδου  $N_{\epsilon\xi}$  ονομάζεται **παράγων διηλεκτρικής καταναλώσεως** (dielectric dissipation factor) ή **παράγων ισχύος ή απώλεια εφαιπτομένης** (loss tangent) ή  **$\tan \delta$** . Μπορεί επίσης να εκφραστεί ως ο λόγος της φανταστικής σχετικής διηλεκτρικής σταθεράς  $\epsilon''$  προς την πραγματική σχετική διηλεκτρική σταθερά  $\epsilon'$ :

$$\frac{N_{\alpha}}{N_{\epsilon\xi}} = \tan \delta = \frac{\sin \delta}{\cos \delta} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

Το γινόμενο  $\epsilon \cdot \tan \delta$  ονομάζεται **παράγων απώλειας** (loss factor). Πολυμερή (όπως π.χ. το PVC) με υψηλό παράγοντα απώλειας μπορούν να θερμανθούν και έτσι να συγκολληθούν κάτω από πεδία υψηλών συχνοτήτων. Πολυμερή (όπως π.χ. PE, PS) με χαμηλό παράγοντα απώλειας αποτελούν εξαιρετικούς μονωτές για αγωγούς υψηλών συχνοτήτων. Η φανταστική και η πραγματική διαπερατότητα, εξαρτώνται από την συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος. Το φανταστικό μέρος  $\epsilon''$  προκαλείται από την διάσταση πολικών ομάδων που είναι στο ίδιο πολυμερές ή έχουν εισαχθεί σε αυτό ορισμένες ακαθαρσίες. Αυτές οι πολικές ομάδες πρέπει να είναι ιοντικής φύσεως, επειδή η ηλεκτρική αγωγομότητα συνήθων πλαστικών αυξάνει έντονα με την θερμοκρασία, ενώ η ηλεκτρονική αγωγομότητα μεταβάλλεται πολύ λιγότερο με την θερμοκρασία. Θερμότητα προκαλείται από την  $\epsilon''$ . Η χαμηλή θερμική αγωγομότητα των πλαστικών δεν επιτρέπει την διασκόρπιση (μεταφορά) θερμότητας και έτσι η θερμοκρασία του δοκιμίου αυξάνει. Κατά συνέπεια, η ιοντική ηλεκτρική αγωγομότητα, αυξάνει έντονα μέχρις ότου συμβεί τελικά μία απότομη μεταβολή/διαρροή (breakdown arc-through). Η αντίσταση έναντι μιας τέτοιας διαρροής μετράται με την **διηλεκτρική αντοχή ή διηλεκτρική ισχύς S** (dielectric strength) του πλαστικού.

Μια διαρροή μπορεί επίσης να συμβεί δια μέσου της ανιχνεύσεως επί της επιφάνειας του πλαστικού. Η **αντίσταση ανιχνεύσεως** (tracking resistance) είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω των χαμηλών τιμών της επιφανειακής αντιστάσεως. Για αυτό το λόγο αυτή προσδιορίζεται μέσω πρότυπων μεθόδων που π.χ. προσδιορίζουν την μέγιστη τάση που μπορεί να εφαρμοσθεί στο δοκίμιο χωρίς να προκληθεί αλλοίωση/ανίχνευση σε αυτό το δοκίμιο, όταν ταυτόχρονα προστίθεται ορισμένη ποσότητα υδατικού διαλύματος  $\text{NH}_4\text{Cl}$ . Ένα πολυμερές χαρακτηρίζεται ότι έχει καλή αντίσταση ανιχνεύσεως, εάν κατά την αποικοδόμησή του σχηματίζει πτητικά προϊόντα αποσυνθέσεως και όχι άνθρακα, όπως π.χ. ο σχηματισμός μονομερούς (μεθακρυλικού μεθυλίου) κατά τον σχηματισμό του PMMA.

Μεγάλη σημασία, όχι μόνον θεωρητική, αλλά και πρακτική, έχει η **ηλεκτροστατική φόρτιση** (electrostatic charging) των πολυμερών. Ο **στατικός ηλεκτρισμός** (static electricity) προέρχεται από μία περίσσεια ή έλλειψη ηλεκτρονίων πάνω σε μία μονωτική ή μη γειωμένη επιφάνεια. Αυτός μπορεί να δημιουργηθεί με τριβή δύο επιφανειών μεταξύ τους (τριβοηλεκτρική φόρτιση) ή με επαφή μιας επιφάνειας με ιονισμένο αέρα. Έτσι κατά την τριβή δύο μη-αγωγών, που έχουν επιφανειακή αντίσταση τουλάχιστον  $10^7$  έως  $10^8$  Ω, οι οριακές επιφάνειες τους φορτίζονται διαφορετικά ηλεκτροστατικά με μεταφορά ηλεκτρονίων. Η ύλη γενικά, φορτίζεται ηλεκτροστατικά, εάν η ηλεκτρική αγωγιμότητα της είναι μικρότερη από περίπου  $10^{-8}$  S/cm και η σχετική υγρασία χαμηλότερη από 70%. Όλα τα συνήθη πολυμερή μπορούν να φορτισθούν ηλεκτροστατικά, πράγμα που οφείλεται στην υψηλή επιφανειακή αντίστασή τους. Έτσι, η ηλεκτροστατική φόρτιση μπορεί να εμφανιστεί με επαφή υπό τριβή επιφανειών πολυμερούς με άλλο πολυμερές ή άλλο μη αγωγό, καθώς επίσης με ρεύμα αέρα. Οι αρνητικές συνέπειες αυτού του φαινομένου είναι η έλξη σκόνης, η εμφάνιση σπινθήρων και το κόλλημα μεταξύ λεπτών φύλλων, γεγονότα τα οποία είναι δυσάρεστα κατά την επεξεργασία και τη χρήση των πολυμερών. Έτσι π.χ. σε επικίνδυνους για έκρηξη χώρους πρέπει να προσεχθεί ότι δάπεδα από πολυμερή (πχ. PVC) μπορούν να προκαλέσουν τη φόρτιση των διερχομένων προσώπων και κατά συνέπεια να σχηματισθούν σπινθήρες κατά την επαφή τους με γειωμένα αντικείμενα.

Η ηλεκτροστατική φόρτιση μπορεί να αντιμετωπιστεί με ενσωμάτωση αγωγικών προσθέτων (όπως carbon black, σκόνη μετάλλων) μέσα στο πλαστικό, γεγονός που χαρακτηρίζεται ως χρησιμοποίηση **εσωτερικών αντιστατικών μέσων** (internal antistatics). Τα **εξωτερικά αντιστατικά μέσα** (external antistatics), ελαττώνουν την επιφανειακή τάση αυξάνοντας την πολικότητα της επιφάνειας με χρησιμοποίηση πρόσθετων που απορροφούν υγρασία ή με ελάττωση της τριβής με λιπαντικά ή με επικάλυψη του υλικού με PTFE. Τα εξωτερικά αντιστατικά μέσα φθείρονται και πρέπει να ανανεώνονται κατά ορισμένα χρονικά διαστήματα. Η προσθήκη των αντιστατικών μέσων (ιδιαίτερα των εσωτερικών) γίνεται κατά την επεξεργασία τροποποιήσεως και μορφοποιήσεως του πολυμερούς. Η αποφυγή της επιφανειακής φορτίσεως μπορεί επίσης να γίνει με ιονισμό του αέρα, ενέργεια που μερικές φορές επιχειρείται σε βιομηχανικές μονάδες. [6]

### 3.3 Ηλεκτρονικά Φίλτρα

Γενικά ένα ηλεκτρονικό φίλτρο είναι στοιχείο ή διάταξη που μπορεί να διαβιβάξει ή να διαχωρίζει σε μέρη, ή να ανακόπτει ένα σήμα σε ένα φάσμα συχνοτήτων, δηλ. μια συγκεκριμένη ομάδα συχνοτήτων. Το φάσμα αυτό μπορεί να είναι είτε συνεχές, είτε διακοπτόμενο, είτε διακριτό (γραμμικό).

Από τις πιο συνηθισμένες χρήσεις των φίλτρων είναι ο διαχωρισμός του σήματος από το θόρυβο. Σήμα είναι ένα πεπερασμένο σύνολο δεδομένων συχνοτήτων που μας ενδιαφέρει. Θόρυβος είναι ένα σύνολο ανεπιθύμητων διαταραχών του σήματος, που καλύπτουν ένα φάσμα συχνοτήτων. Με το κατάλληλο ηλεκτρονικό φιλτράρισμα μπορούμε να απομακρύνουμε άλλα ανεπιθύμητα σήματα η αυτές τις θορυβικές διαταραχές, αποκόποντας π.χ. το φάσμα του θορύβου όταν αυτό είναι δυνατό και αφήνοντας να περάσει μόνο το φάσμα του επιθυμητού σήματος. Κύριο χαρακτηριστικό μέγεθος ενός φίλτρου είναι η συνάρτηση

μεταφοράς  $H(s)$  αυτού. Αυτή ορίζεται ως το μιγαδικό πηλίκο (λόγος) της τάσης εξόδου,  $V_o(s)$  προς την αντίστοιχη τάση εισόδου,  $V_i(s)$ , δηλ.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

όπου  $s = j\omega$ , με  $\omega = 2\pi f$  η κυκλική συχνότητα σήματος και  $f$  είναι η (γραμμική) συχνότητα αυτού, ενώ το  $j$  παριστάνει τη μιγαδική μονάδα [ $j = \sqrt{-1}$ ].

Στην πράξη ενδιαφέρει ιδιαίτερα το μέτρο,  $|H(j\omega)|$ , της συνάρτησης μεταφοράς, το οποίο εκφράζει το επίπεδο της ενίσχυσης ή απολαβής τάσης (σε dB) που δίνει το φίλτρο. Η καμπύλη που εικονίζει την εξάρτηση της ενίσχυσης αυτής από τη συχνότητα,  $\omega$  ή  $f$ , αποτελεί την καμπύλη απόκρισης συχνοτήτων του φίλτρου.[27]

Τα ηλεκτρονικά φίλτρα χωρίζονται σε δύο μεγάλες ομάδες:

i) Τα **παθητικά φίλτρα** αποτελούνται μόνο από παθητικά στοιχεία, δηλ. αντιστάσεις, πυκνωτές και πηνία. Στην πράξη έχουν ένα σοβαρό μειονέκτημα, ότι δηλαδή, στις χαμηλές συχνότητες χρειάζονται μεγάλες επαγωγικές αντιστάσεις, άρα απαιτούν ογκώδη πηνία. Επίσης, είναι μη γραμμικά και προκαλούν υποβιβασμό του σήματος, με μεγάλο συντελεστή απωλειών. Τέλος, δημιουργούν έντονα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που αποτελούν αιτία ενοχλητικότητας ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Γι' αυτούς τους λόγους, η χρήση τους συνήθως αποφεύγεται και πραγματοποιείται μόνο εκεί, όπου τα ενεργά φίλτρα μειονεκτούν, δηλ. σε υψηλές συχνότητες και μεγάλες ισχύεις.

ii) Τα **ενεργά φίλτρα** αποτελούνται από ενεργά στοιχεία (τρανζίστορ, τελεστικοί ενισχυτές, κτλ) συνδυασμένα με παθητικά στοιχεία (πυκνωτές και αντιστάσεις). Τα φίλτρα αυτά είναι απαλλαγμένα από τα μειονεκτήματα των παθητικών φίλτρων που αναφέραμε πιο πάνω, είναι αποδοτικά και κοστίζουν λίγο. Γι' αυτό και χρησιμοποιούνται ευρέως, ιδίως σε χαμηλές συχνότητες και χαμηλές ισχύεις.[28]

### 3.4 Κατηγορίες Παθητικών Φίλτρων

Ανάλογα με το φάσμα συχνοτήτων στις οποίες επιτρέπουν ή απαγορεύουν τη διέλευση, τα παθητικά φίλτρα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες :

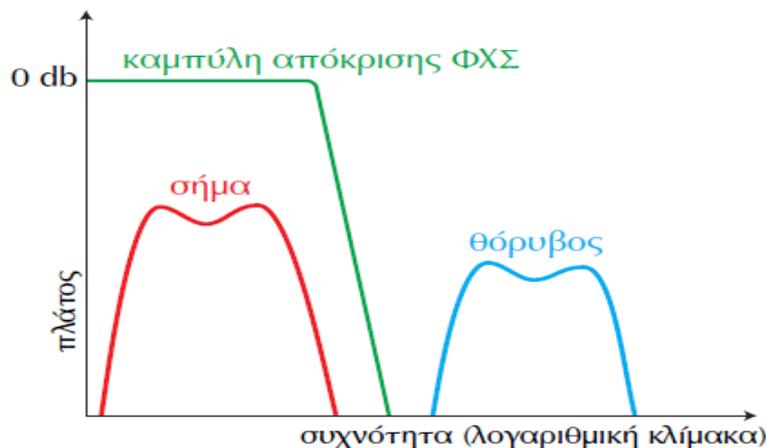
- α) Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων (Βαθυπερατά Φίλτρα).
- β) Φίλτρα Διέλευσης Υψηλών Συχνοτήτων (Υψιπερατά Φίλτρα).
- γ) Φίλτρα Διέλευσης Ζώνης Συχνοτήτων (Ζωνοπερατά Φίλτρα).
- δ) Φίλτρα Αποκοπής Ζώνης Συχνοτήτων (Ζωνοφρακτικά Φίλτρα).

[16][17]

#### 3.4.1 Φίλτρα Διέλευσης Χαμηλών Συχνοτήτων (ΦΔΧΣ)

Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση σημάτων μόνο χαμηλών συχνοτήτων, ενώ ανακόπτουν τα σήματα υψηλοτέρων συχνοτήτων.

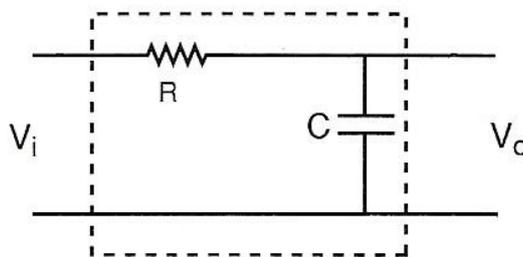
Η ζώνη διέλευσής τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλ. από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα που ονομάζεται **συχνότητα αποκοπής  $f_c$** . Από αυτήν και μετά η ενίσχυση μειώνεται δραστικά και το φίλτρο περνάει στη ζώνη αποκοπής, η συχνότητα της οποίας εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα.[27]



**Σχήμα 3.3:** Απόκριση φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων (ΦΧΣ).

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο (υψηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος, η δε ζώνη αποκοπής το φάσμα του θορύβου, κατά τον τρόπο που απεικονίζει το Σχ.3.3.[13] [27]

Η μορφή ενός τέτοιου χαμηλοπερατού φίλτρου δίνεται στο παρακάτω κύκλωμα:



Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω φίλτρου είναι:  $H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_C}{V_i}$ ,  $V_i = V_{in}$ .

Όπου, η τάση εξόδου, δηλαδή η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι:

$$V_C = I \cdot Z_C = \frac{I}{jC\omega} = \frac{V_i}{jC\omega Z_{ολ.}} \quad \text{με} \quad Z_{ολ.} = R + \frac{1}{jC\omega}$$

Άρα, η τάση εξόδου θα είναι ίση με:  $V_C = \frac{V_i}{jC\omega \cdot (R + \frac{1}{jC\omega})} = \frac{V_i}{1 + jRC\omega}$

Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + jRC\omega}$$

Τώρα, θέτουμε:  $\omega_c = \frac{1}{RC} \xrightarrow{\omega=2\pi f} 2\pi f_c = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$  [15]

Η συνάρτηση μεταφοράς παίρνει τη μορφή [13][26]:

$$H(j\omega) = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_c}} = \frac{1}{1 + j\frac{2\pi f}{2\pi f_c}} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_c}}$$

Συνεπώς, το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι ίσο με:

$$|H(j\omega)| = \frac{|V_o|}{|V_{in}|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$$

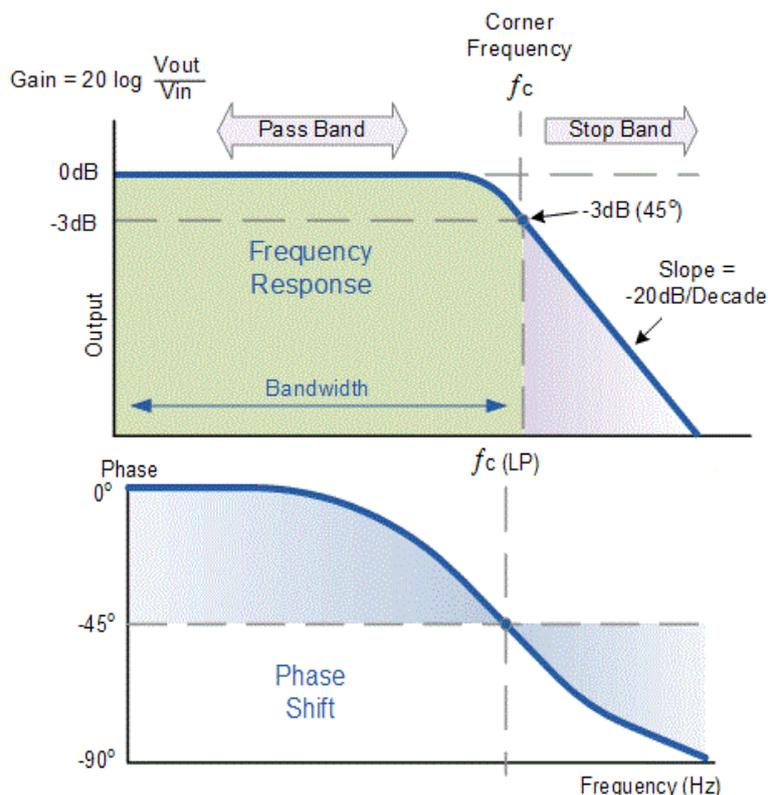
Σε μονάδες decibel η παραπάνω σχέση εκφράζεται [26]:

$$|H(j\omega)|(\text{dB}) = 20\log\frac{|V_o|}{|V_{in}|} = -20\log\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$$

Ισχύει ότι:

- Όταν  $f=f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| = 0,707$  και  $\varphi_0 = -45^\circ$ .
- Όταν  $f \ll f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| \rightarrow 1$  και  $\varphi_0 \rightarrow 0^\circ$ .
- Όταν  $f \gg f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| \rightarrow 0$  και  $\varphi_0 \rightarrow -90^\circ$ . [13]

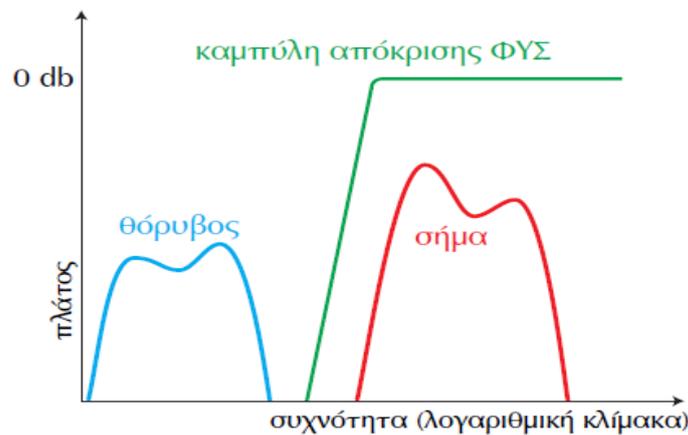
Όπου  $f_c$  η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου.



**Εικόνα 3.1:** Διάγραμματα Bode R-C Χαμηλοπερατού Φίλτρου.[26][28]

### 3.4.2 Φίλτρα Διέλευσης Υψηλών Συχνοτήτων (ΦΔΥΣ)

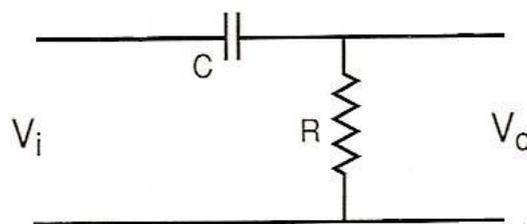
Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν τα σήματα χαμηλών συχνοτήτων και επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων υψηλών συχνοτήτων. Η ζώνη αποκοπής τους αρχίζει από μηδενική συχνότητα (δηλ. από σήματα dc) και φτάνει μέχρι μια συχνότητα  $f_c$  που καλείται **συχνότητα αποκοπής**. Από εκείνη τη συχνότητα αρχίζει η ζώνη διέλευσης, η οποία εκτείνεται μέχρι την άπειρη συχνότητα.[14]



Σχήμα 3.4: Απόκριση φίλτρου υψηλών συχνοτήτων (ΦΥΣ).

Στην περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο (χαμηλής συχνότητας), λαμβάνεται φροντίδα ώστε η μεν ζώνη αποκοπής να καλύπτει το φάσμα του θορύβου, η δε ζώνη διέλευσης το φάσμα του σήματος, κατά τον τρόπο που απεικονίζεται το Σχ.3.4.[27]

Η μορφή ενός τέτοιου υπερπαρατού φίλτρου δίνεται στο παρακάτω κύκλωμα:



Η συνάρτηση μεταφοράς του παραπάνω φίλτρου είναι:  $H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_R}{V_i}$ ,  $V_i = V_{in}$

Όπου, η τάση εξόδου, δηλαδή η τάση στα άκρα της αντίστασης είναι:

$$V_R = I \cdot R$$

Η τάση εισόδου είναι:  $V_{in} = I \cdot Z_{ολ} = I \cdot (R + \frac{1}{j\omega C})$

Επομένως η συνάρτηση μεταφοράς γίνεται:

$$H(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{V_R}{V_i} = \frac{I \cdot R}{I \cdot (R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + \frac{1}{Rj\omega C}}$$

Τώρα, θέτουμε:  $\omega_c = \frac{1}{RC} \xrightarrow{\omega=2\pi f} 2\pi f_c = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}$  [15]

Η συνάρτηση μεταφοράς παίρνει τη μορφή:

$$H(j\omega) = \frac{V_0}{V_i} = \frac{V_R}{V_i} = \frac{1}{1 + \frac{1}{jRC\omega}} = \frac{1}{1 - j\frac{\omega_c}{\omega}} = \frac{1}{1 - j\frac{f_c}{f}}$$

Συνεπώς, το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι [14]:

$$|H(j\omega)| = \frac{|V_0|}{|V_i|} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$$

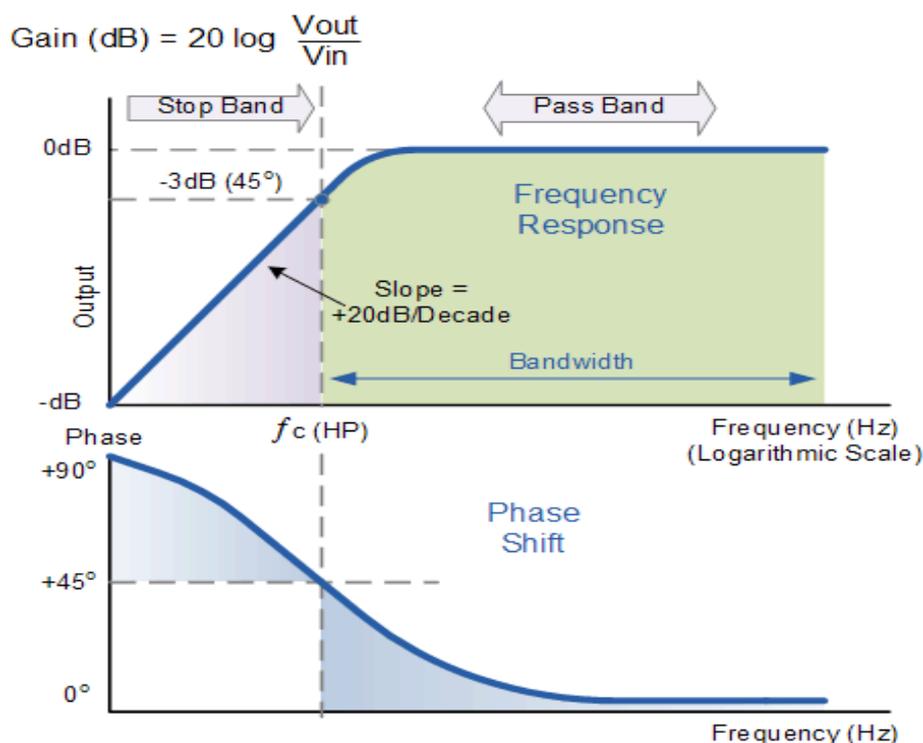
Και σε μονάδες decibel είναι:

$$|H(j\omega)|(\text{dB}) = 20\log\frac{|V_0|}{|V_i|} = -20\log\sqrt{1 + \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$$

Ισχύει ότι:

- Όταν  $f = f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_0}{U_{in}}\right| = 0,707$  και  $\varphi_0 = 45^\circ$ .
- Στη περιοχή διέλευσης. Όταν  $f \gg f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_0}{U_{in}}\right| \rightarrow 1$  και  $\varphi_0 \rightarrow 0^\circ$ .
- Στην περιοχή αποκοπής. Όταν  $f \ll f_c$  τότε:  $\left|\frac{U_0}{U_{in}}\right| \rightarrow 0$  και  $\varphi_0 \rightarrow 90^\circ$ . [14][26][15]

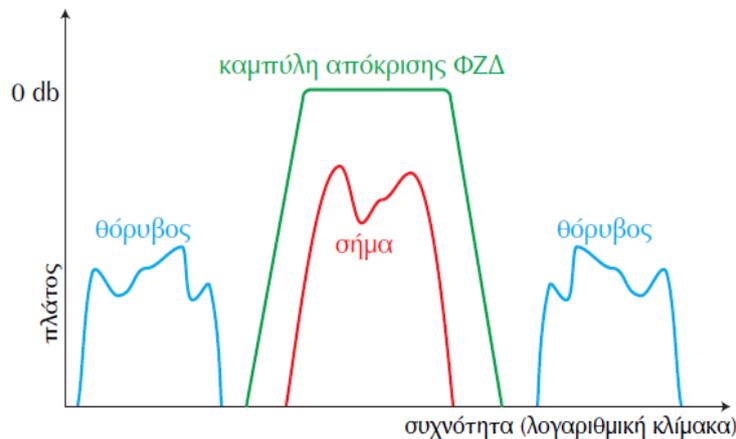
Όπου  $f_c$  η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου.



Εικόνα 3.2: Διαγράμματα Bode R-C Υψηλερατού Φίλτρου.[27]

### 3.4.3 Φίλτρα Διέλευσης Ζώνης Συχνοτήτων (ΦΔΖΣ)

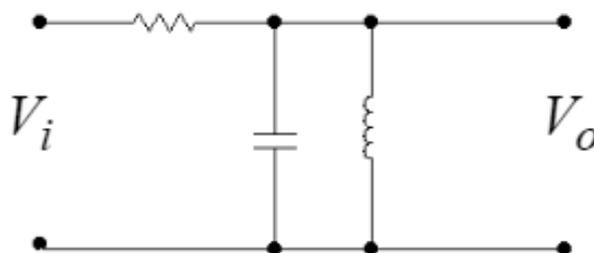
Τα φίλτρα αυτά επιτρέπουν τη διέλευση μόνο σημάτων που η συχνότητά τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και ανακόπτουν όλες τις υπόλοιπες συχνότητες. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη αποκοπής, από μηδενική συχνότητα (δηλ. από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής  $f_{C1}$ , μετά ακολουθεί η ζώνη διέλευσης από τη συχνότητα  $f_{C1}$  μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής  $f_{C2}$ , και τέλος εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη αποκοπής, από τη συχνότητα  $f_{C2}$  μέχρι την άπειρη συχνότητα.[27]



Σχήμα 3.5: Απόκριση φίλτρου διέλευσης συχνοτήτων (ΦΔΖΣ).

Αν το Φίλτρο Διέλευσης Ζώνης Συχνοτήτων (ΦΔΖΣ) χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο χαμηλής και υψηλής συχνότητας λαμβάνεται φροντίδα, ώστε η ζώνη διέλευσης να καλύπτει το φάσμα του σήματος και οι δύο ζώνες αποκοπής το φάσμα του θορύβου κατά τον τρόπο που δείχνει το Σ.χ.3.5.[28]

Ένα ζωνοπερατό φίλτρο δίνεται στο παρακάτω κύκλωμα:



Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$H(s) = \frac{s}{s^2 + \frac{s}{RC} + \frac{1}{LC}}$$

όπου  $s=j\omega$ .

Το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$|H(j\omega)| = \frac{\frac{\omega}{RC}}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{RC}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\omega RC - \frac{1}{\omega L}\right)^2}}$$

Το μέτρο της συνάρτησης μεταφορά γίνεται μέγιστο  $H_{\text{Max}}=1$ , όταν:

$$\left(\frac{1}{LC} - \omega^2\right)^2 = 0$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει, ότι η γωνιακή συχνότητα για την οποία το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς γίνεται μέγιστο είναι η:

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

Στις συχνότητες αποκοπής, το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) H_{\text{max}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

και αυτό γίνεται όταν:

$$\left(\omega_c RC - \frac{1}{\omega_c L}\right) = \pm 1$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν οι συχνότητες αποκοπής:

$$\omega_{c1} = -\frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad , \quad \omega_{c2} = \frac{1}{2RC} + \sqrt{\left(\frac{1}{2RC}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

Το εύρος ζώνης (BW, BandWidth) είναι ίσο με:

$$BW = \omega_{c2} - \omega_{c1} = \frac{1}{RC}$$

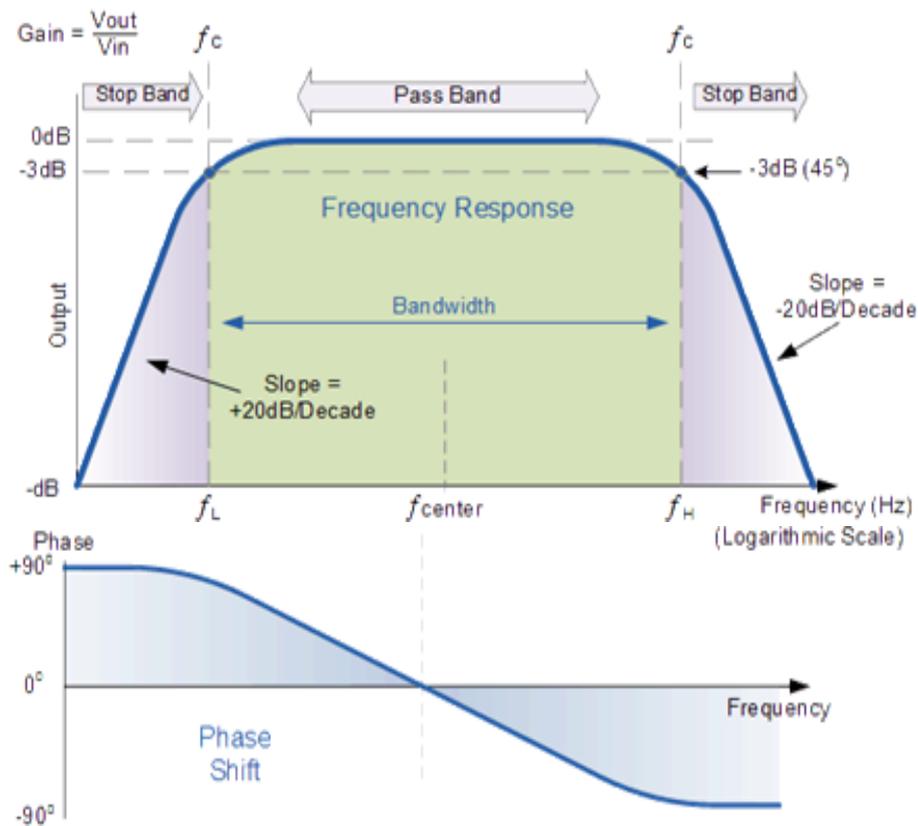
Ο παράγοντας ποιότητας (Q, Quality Factor) του φίλτρου είναι [26]:

$$Q = \frac{\omega_0}{BW} = \sqrt{\frac{R^2 C}{L}}$$

Ισχύει ότι:

- Όταν  $f = f_{C1} = f_{C2}$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| = 0,707$  και  $\varphi_0 = +45^\circ$  ή  $\varphi_0 = -45^\circ$ .
- Όταν  $f_{C1} < f < f_{C2}$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| \rightarrow 1$  και  $-45^\circ < \varphi_0 < +45^\circ$ .
- Όταν  $f \ll f_{C1}$  ή  $f \gg f_{C2}$  τότε:  $\left|\frac{U_o}{U_{in}}\right| \rightarrow 0$  και  $\varphi_0 \rightarrow 90^\circ$  ή  $\varphi_0 \rightarrow -90^\circ$ . [27][28]

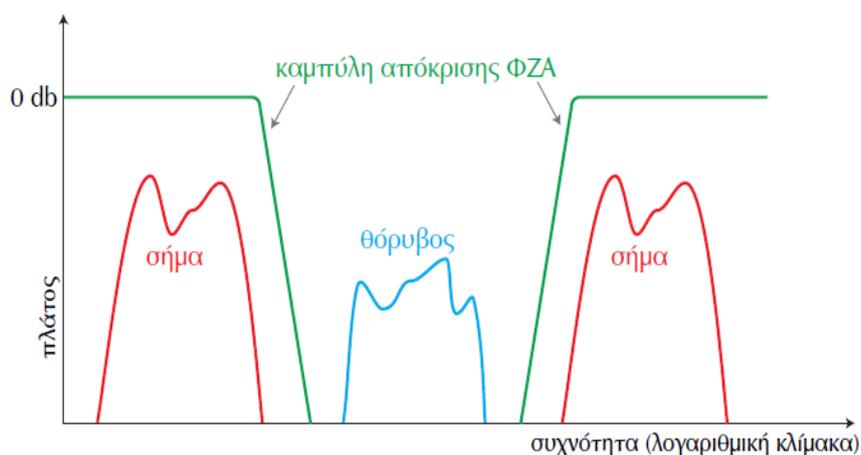
Όπου  $f_{C1}$  η κάτω συχνότητα αποκοπής και όπου  $f_{C2}$  η άνω συχνότητα αποκοπής.



Εικόνα 3.3: Διαγράμματα Bode Ζωνοπερατού Φίλτρου.[27]

### 3.4.4 Φίλτρα Αποκοπής Ζώνης Συχνοτήτων (ΦΑΖΣ)

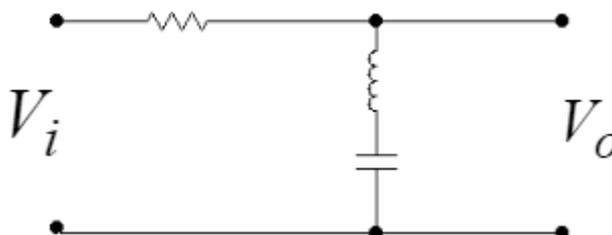
Τα φίλτρα αυτά ανακόπτουν μόνο σήματα που η συχνότητά τους περιλαμβάνεται μέσα σε μια ζώνη συχνοτήτων και επιτρέπουν τη διέλευση όλων των υπόλοιπων συχνοτήτων. Τα φίλτρα αυτά έχουν μια πρώτη ζώνη διέλευσης, από μηδενική συχνότητα (δηλ. από το dc) μέχρι μια (κάτω) συχνότητα αποκοπής  $f_{C1}$ , μετά ακολουθεί η ζώνη αποκοπής από τη συχνότητα  $f_{C1}$  μέχρι μια (άνω) συχνότητα αποκοπής  $f_{C2}$ , και τέλος εμφανίζεται η δεύτερη ζώνη διέλευσης, από τη συχνότητα  $f_{C2}$  μέχρι την άπειρη συχνότητα.[28]



Σχήμα 3.6: Απόκριση φίλτρου αποκοπής συχνοτήτων (ΦΑΖΣ)

Στο ίδιο σχήμα απεικονίζεται η συσχέτιση των ζωνών αποκοπής και διέλευσης του φίλτρου με το φάσμα σήματος και το φάσμα θορύβου, για την περίπτωση που το φίλτρο χρησιμοποιείται για το διαχωρισμό του σήματος από το θόρυβο. Το ΦΑΖΣ μπορεί να προκύψει αν συνδυάσουμε παράλληλα ένα ΦΔΧΣ με ένα ΦΔΥΣ. [27]

Ένα ζωνοφρακτικό φίλτρο δίνεται στο παρακάτω κύκλωμα



Η συνάρτηση μεταφοράς είναι:

$$H(j\omega) = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}}$$

Το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$|H(j\omega)| = \frac{\sqrt{\left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}}{\sqrt{R^2 + \left(L\omega - \frac{1}{C\omega}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R}{L\omega - \frac{1}{C\omega}}\right)^2}}$$

Το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς παίρνει την ελάχιστη τιμή, ίση με το μηδέν, όταν:

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

Στις πολύ χαμηλές και πολύ υψηλές συχνότητες το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς παίρνει τιμή ίση με τη μονάδα. [26]

Στις συχνότητες αποκοπής το μέτρο της συνάρτησης μεταφοράς είναι:

$$\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) H_{\max} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

και αυτό γίνεται όταν:

$$\left(\frac{R}{L\omega_c - \frac{1}{C\omega_c}}\right)^2 = \pm 1$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτουν οι συχνότητες αποκοπής:

$$\omega_{c1} = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad , \quad \omega_{c2} = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 + \frac{1}{LC}}$$

Το εύρος ζώνης (BW, BandWidth) του φίλτρου είναι ίσο με:

$$BW = \frac{R}{L}$$

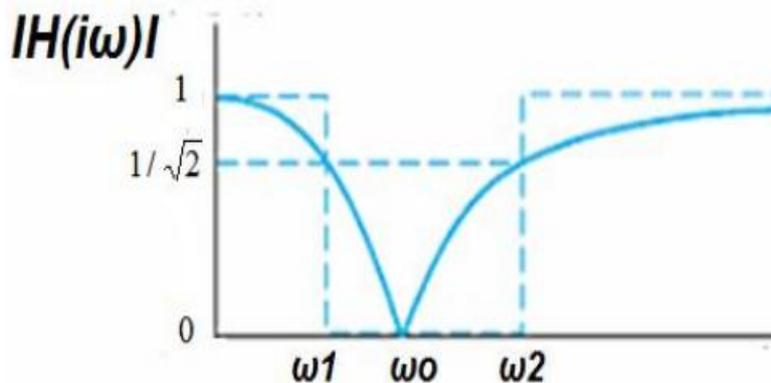
Ο παράγοντας ποιότητας (Q, Quality Factor) του φίλτρου είναι [26]:

$$Q = \sqrt{\frac{L}{R^2C}}$$

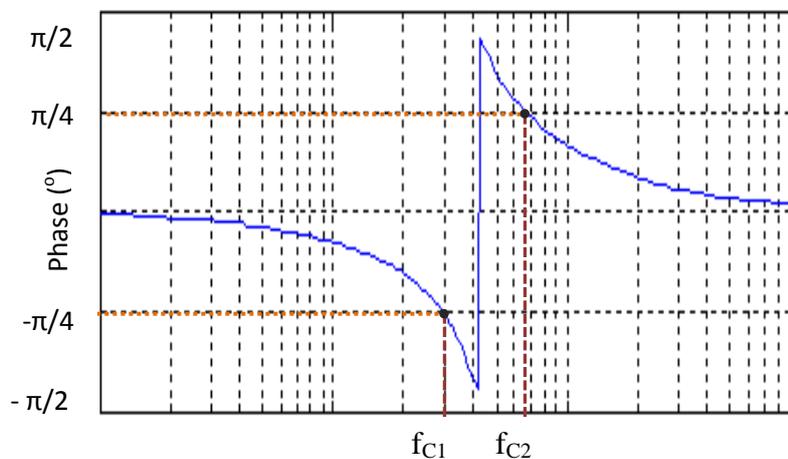
Ισχύει ότι:

- Όταν  $f = f_{C1} = f_{C2}$  τότε:  $\left| \frac{U_o}{U_{in}} \right| = 0,707$  και  $\varphi_0 = -45^\circ$  ή  $\varphi_0 = +45^\circ$ .
- Όταν  $f_{C1} < f < f_{C2}$  τότε:  $\left| \frac{U_o}{U_{in}} \right| \rightarrow 0$  και  $-45^\circ < \varphi_0 < +45^\circ$ .
- Όταν  $f \ll f_{C1}$  ή  $f \gg f_{C2}$  τότε:  $\left| \frac{U_o}{U_{in}} \right| \rightarrow 1$  και  $\varphi_0 \rightarrow 0^\circ$ .

Όπου  $f_{C1}$  η κάτω συχνότητα αποκοπής του φίλτρου και  $f_{C2}$  η άνω συχνότητα αποκοπής του φίλτρου.



**Εικόνα 3.4:** Διάγραμμα Πλάτους Ζωνοφρακτικού Φίλτρου.



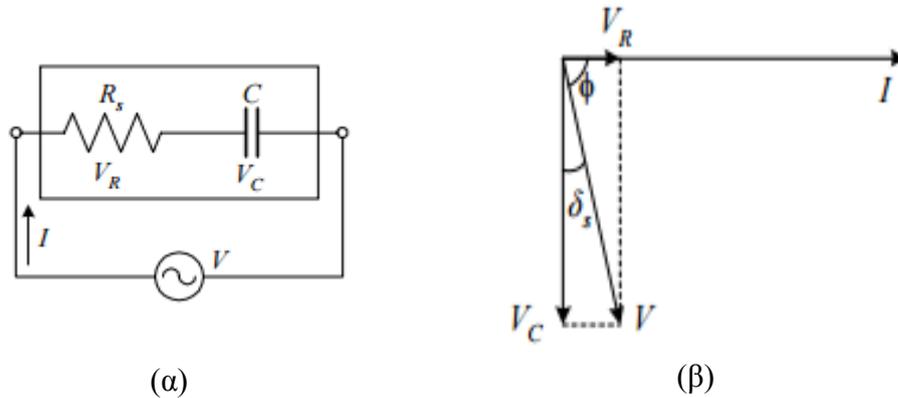
**Εικόνα 3.5:** Διάγραμμα Φάσης Ζωνοφρακτικού Φίλτρου.

### 3.5 Χαρακτηριστικά Πυκνωτών

Οι πυκνωτές παρουσιάζουν απώλειες, λόγω της αγωγιμότητας του διηλεκτρικού τους, και παριστάνονται με μία αντίσταση σε σειρά ή παράλληλα με τα στοιχεία αυτά.

#### Πυκνωτές με Απώλειες

A) Σύνδεση σε σειρά.

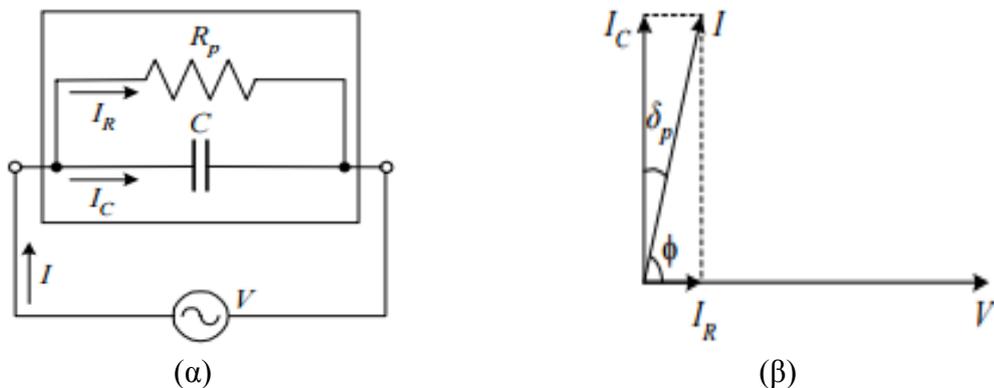


**Σχήμα 3.7:** α) Ισοδύναμο κύκλωμα σειράς πρακτικού πυκνωτή.  
β) Διανυσματικό Διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων. [13]

Από το ισοδύναμο κύκλωμα σειράς έχουμε [13]:

- $V_R = R_s \cdot I$
- $V_C = -j \frac{1}{\omega C_\sigma} \cdot I$
- $Z = R_\sigma + \frac{1}{j\omega C_\sigma}$  (Σύνθετη Αντίσταση Πυκνωτή με Απώλειες)
- $\tan\delta = \omega \cdot R_\sigma \cdot C_\sigma$

B) Σύνδεση Παράλληλα.



**Σχήμα 3.8:** α) Ισοδύναμο κύκλωμα παράλληλης σύνδεσης πρακτικού πυκνωτή.  
β) Διανυσματικό Διάγραμμα τάσεων – ρευμάτων. [13]

Από το παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα έχουμε [13]:

$$\begin{aligned}
 - \quad I_{R\pi} &= \frac{1}{R_{\pi}} \cdot U \\
 - \quad I_{C\pi} &= j\omega C_{\pi} \cdot U \\
 - \quad Z &= \frac{R_{\pi} \cdot \frac{1}{j\omega C_{\pi}}}{R_{\pi} + \frac{1}{j\omega C_{\pi}}} = \frac{R_{\pi}}{1 + (\omega R_{\pi} C_{\pi})^2} - j \frac{\omega R_{\pi}^2 C_{\pi}}{1 + (\omega R_{\pi} C_{\pi})^2} \\
 - \quad \tan\delta &= \frac{1}{\omega R_{\pi} C_{\pi}}
 \end{aligned}$$

Παρακάτω γίνεται αναφορά των χαρακτηριστικών και των μετρούμενων μεγεθών των πυκνωτών.

1. **Χωρητικότητα C του πυκνωτή**, δηλαδή του συστήματος δύο αγωγών με διηλεκτρικό υλικό ανάμεσα τους, ονομάζουμε το σταθερό πηλίκο του φορτίου  $Q$ , που εμφανίζεται στους οπλισμούς του, διά της διαφοράς δυναμικού  $V$  που παρουσιάζεται σε αυτούς, δηλαδή:  $C = Q/V$ .

Η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εξαρτάται από το σχήμα των οπλισμών του, από την μεταξύ τους απόσταση και από το υλικό που υπάρχει ανάμεσά τους. Ισχύει ότι:

- Αν μεταξύ των οπλισμών δεν παρεμβάλλεται κάποιο διηλεκτρικό υλικό τότε η χωρητικότητα του πυκνωτή δίδεται από τον τύπο:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

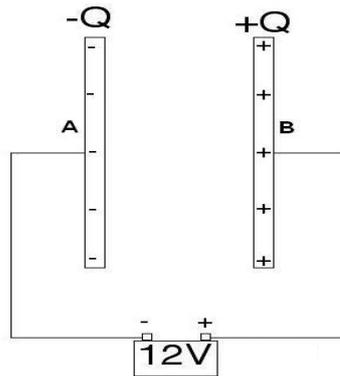
όπου  $S$  το εμβαδό των μεταλλικών πλακών,  $d$  η απόσταση μεταξύ των δύο οπλισμών και  $\epsilon_0$  μία φυσική σταθερά, η **διηλεκτρική σταθερά του κενού**.

- Αν μεταξύ των οπλισμών παρεμβάλλεται κάποιο διηλεκτρικό υλικό τότε η χωρητικότητα του πυκνωτή δίδεται από τον εξής τύπο:

$$C = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \frac{S}{d} = \epsilon \cdot \frac{S}{d}$$

όπου το μέγεθος  $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$  ονομάζεται **διηλεκτρική σταθερά** του υλικού και έχει τις διαστάσεις του  $\epsilon_0$  (F/m).

Αν λοιπόν έχουμε έναν πυκνωτή, που είναι συνδεδεμένος σύμφωνα με το κύκλωμα του Σχήματος 3.7, τότε τα αρνητικά φορτία  $-Q$  της πηγής θα συγκεντρωθούν στην εσωτερική επιφάνεια του οπλισμού A και λόγω της ηλεκτρίσεως εξ' επιδράσεως θα δημιουργήσουν την εμφάνιση ίσου φορτίου, αλλά αντιθέτου προσήμου  $+Q$ , στην επιφάνεια του οπλισμού B που είναι στραμμένη προς τον A.[33]



**Σχήμα 3.9:** Πυκνωτής με απουσία Διηλεκτρικού.

Έτσι, οι δύο οπλισμοί εμφανίζονται να έχουν ο ένας απέναντι του άλλου ίσα αρνητικά και θετικά φορτία, ενώ συγχρόνως, ανάμεσά τους, δημιουργείται ομογενές ηλεκτρικό πεδίο.

2. Ο πυκνωτής εμφανίζει ένα εμπόδιο στην διέλευση του εναλλασσομένου ρεύματος, το οποίο γίνεται τόσο μεγαλύτερο όσο μειώνεται η συχνότητα. Το εμπόδιο αυτό ονομάζεται **χωρητική αντίδραση**, συμβολίζεται με το  $X_c$  και έχει για μονάδα το  $\Omega$ .

Ισχύει μάλιστα ότι :  $X_c = 1/2\pi f C$ , όπου  $\pi=3,14$ ,  $f$  είναι η συχνότητα σε Hertz και  $C$  είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή σε Farads .

Η διέλευση του εναλλασσομένου ρεύματος μέσα στο κύκλωμα που περιέχει πυκνωτή, οφείλεται στην παλινδρομική κίνηση των φορτίων στους αγωγούς που συνδέουν τους δύο οπλισμούς του. Στον χώρο που είναι ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή δεν γίνεται καμία μετακίνηση φορτίων.[34]

3. Όπως παρουσιάστηκε προηγουμένως ένας μη ιδανικός πυκνωτής έχει χωρητικές και ωμικές απώλειες οι οποίες μπορούν να αναλυθούν είτε σε σειριακό είτε σε παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα (Παράγραφος 3.5). Συνεπώς, η δυσκολία η οποία παρουσιάζει το εναλλασσόμενο ρεύμα να διέλθει μέσα από τον μη ιδανικό πυκνωτή οφείλεται και στις δύο αιτίες, την καθαρά **ωμική αντίσταση  $R$  ( $\Omega$ )** που υπάρχει στο κύκλωμα, καθώς και από την **χωρητική αντίδραση  $X_c = \frac{1}{j\omega C}$  ( $\Omega$ )** που εμφανίζεται σε αυτό.

**Η σύνθετη αντίσταση  $Z$  ( $\Omega$ )** λοιπόν, αποτελείται από δύο στοιχεία, ένα πραγματικό, που είναι η καθαρά ωμική αντίσταση  $R$  του κυκλώματος και ένα φανταστικό που είναι η αντίδραση  $X$  που παρουσιάζει το κύκλωμα κατά την διέλευση του εναλλασσομένου ρεύματος μέσα από αυτό. Στο παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα είναι  $R/X_c$ .

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης του πυκνωτή  $|Z|$  για παράλληλο ισοδύναμο κύκλωμα δίνεται από τον τύπο:

$$|Z_P| = \frac{R_\pi}{\sqrt{1 + (\omega R_\pi C_\pi)^2}}$$

4. Ενώ η ωμική αντίσταση  $R$  ( $\Omega$ ) μας δείχνει κατά πόσο εμποδίζονται τα φορτία στην μετακίνησή τους μέσα στον πυκνωτή, η **ηλεκτρική αγωγιμότητα  $G$**  εκφράζει ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή την ευκολία με την οποία τα φορτία και κατ' επέκταση το ρεύμα, κινείται μέσα σε αυτόν.  
Για την ακρίβεια η αγωγιμότητα είναι το αντίστροφο της αντίστασης. Συμβολίζεται με το γράμμα  $G$  και ισχύει ότι :  $G = 1/R_p$ . Μονάδα μέτρησης της αγωγιμότητας είναι το Siemens (S) .[34]
5. Η **επιδεκτικότητα  $B$**  είναι το αντίστροφο της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Είναι  $B = 1/X_C$ . Μονάδα μετρησης της επιδεκτικότητας είναι το Siemens (S).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: Σκοπός Μεταπτυχιακής Εργασίας

Τα ηλεκτρονικά φίλτρα βρίσκουν πληθώρα εφαρμογών σε διάφορους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας όπως είναι οι ασύρματες και οι ενσύρματες τηλεπικοινωνίες, η ηλεκτροακουστική, οι κεραίες μετάδοσης και λήψης σήματος, τα ηλεκτρονικά ισχύος σε φωτοβολταϊκά πάρκα και σε συστήματα μετάδοσης κίνησης και ηλεκτροπαραγωγής.

Ο σκοπός της συγκεκριμένης Μεταπτυχιακής εργασίας είναι η κατασκευή ηλεκτρονικών φίλτρων (βαθυπερατά, υψιπερατά, φίλτρα διέλευσης και αποκοπής ζώνης) με χρήση σύνθετων υλικών νανοτιτανικού βαρίου  $BaTiO_3$ . Συγκεκριμένα, τα σύνθετα υλικά τα οποία θα αποτελούν τα διηλεκτρικό μέσο στους πυκνωτές θα είναι:

- 1) Η νεολάκη με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 2) Ο ακόρεστος πολυεστέρας  $M_1A_3PA_6$  με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 3) Ο ακόρεστος πολυεστέρας  $M_3A_4PA_3$  με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 4) Ο ακόρεστος πολυεστέρας  $M_4A_4PA_2$  με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 5) Ο ακόρεστος πολυεστέρας  $M_7A_2PA_1$  με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 6) Ο ακόρεστος πολυεστέρας  $M_6A_4$  με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 7) Ο εμπορικός ακόρεστος πολυεστέρας CUP με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.
- 8) Η εμπορική εποξειδική ρητίνη με 10% w/w σε σωματίδια τιτανικού βαρίου.

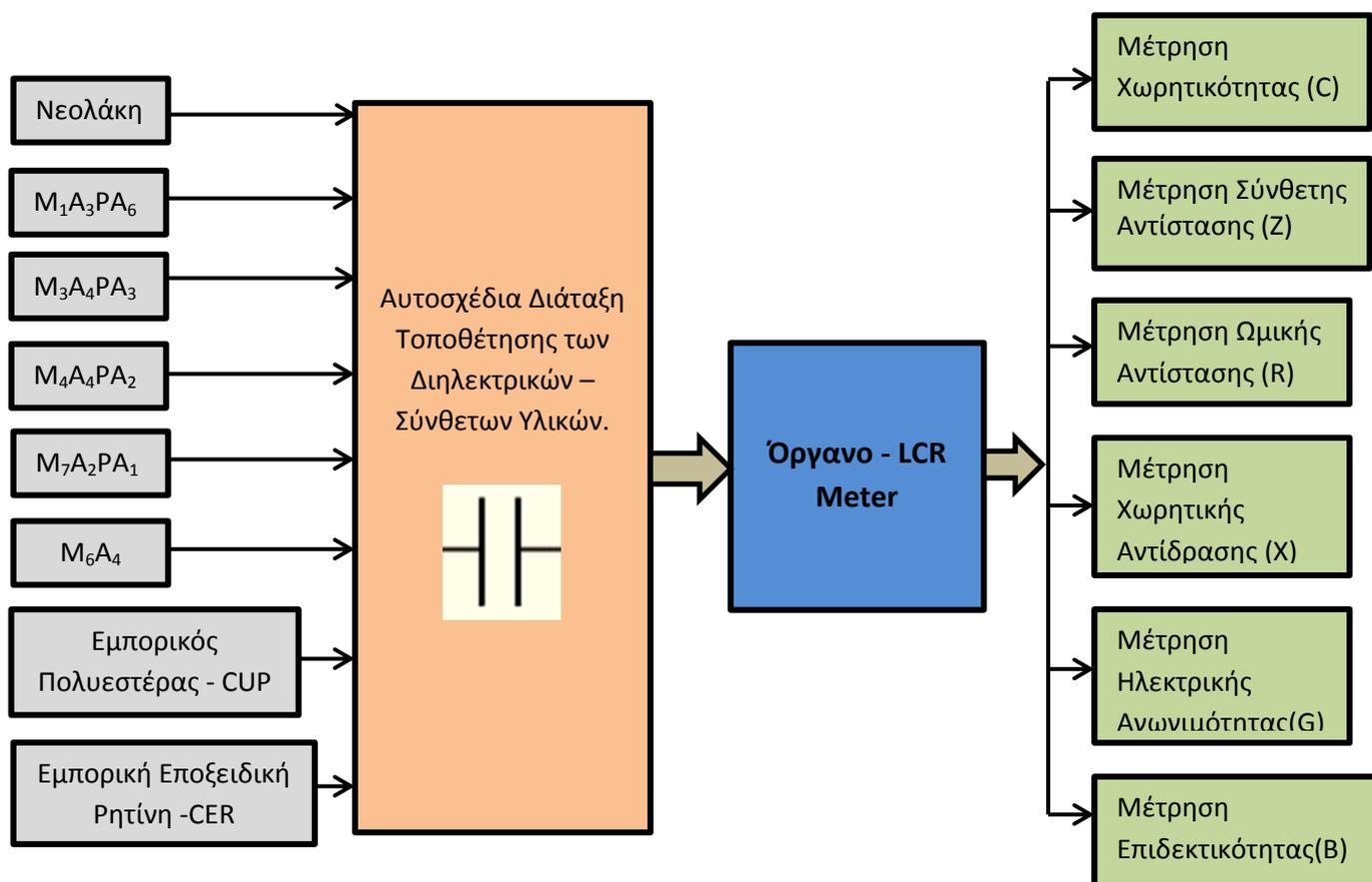
Για το σκοπό αυτό θα απαιτηθεί η μελέτη και η κατασκευή διάταξης η οποία θα φιλοξενήσει την εκάστοτη φορά ένα από τα παραπάνω διηλεκτρικά. Τα υλικά από τα οποία θα κατασκευασθεί η εν λόγω διάταξη θα αναθερθούν στο επόμενο κεφάλαιο. Στη συνέχεια, θα τοποθετείται κάθε φορά ένα από τα παραπάνω δείγματα (σύνθετα υλικά) στην αυτοσχέδια διάταξη και θα συνδέεται σε όργανο LCR Meter προς μέτρηση της χωρητικότητας (C), της σύνθετης αντίστασης (Z), της ωμικής αντίστασης (R), της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (G), της χωρητικής αντίδρασης ( $X_C$ ) και της επιδεκτικότητας (B) του κάθε πλέον κατασκευασθέν πυκνωτή. Τα μεγέθη αυτά θα μετρηθούν από όργανο LCR Meter σε φασμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz. Κατά αυτόν τον τρόπο θα ληφθούν τα ακόλουθα διαγράμματα C-f, Z-f, R-f, G-f,  $X_C$ -f και B-f. Οι μέτρησεις που θα γίνουν και τα διαγράμματα που θα ληφθούν θα μας υποδείξουν την τρόπο μεταβολής των παραπάνω μεγεθών σε συνάρτηση με την συχνότητα f.

Κατόπιν, γνωρίζοντας τα μεγέθη – χαρακτηριστικά του κάθε πλέον πυκνωτή θα πραγματοποιηθούν οι παρακάτω συνδεσμολογίες σε breadboard (όπως φαίνονται στο Διάγραμμα Ροής) προς δημιουργία των βαθυπερατών, υψιπερατών, ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων. Με χρήση γεννήτριας παλμών θα τροφοδοτηθεί το εκάστοτε κύκλωμα με εναλλασόμενη τάση και με τη χρήση ψηφιακού παλμογράφου θα ληφθούν οι μετρήσεις σχετικά με τη συχνότητα αποκοπής των βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων, καθώς και το bandwidth (εύρος ζώνης) των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων. Για την συνδεσμολογία των βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων θα χρησιμοποιηθεί ποτενσιόμετρο μέγιστης ωμικής αντιστάσεως 500KΩ, ενώ για την σύνθεση των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων θα χρησιμοποιηθεί πέρα του ποτενσιόμετρου των 500KΩ και πηνίο αυτεπαγωγής 20mH. Για το κάθε φίλτρο-κύκλωμα που θα δημιουργηθεί θα γίνουν μετρήσεις σχετικά με τις συχνότητες αποκοπής των βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων, καθώς και το

εύρος ζώνης (bandwidth) διέλευσης ή αποκοπής των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων, για τιμές ποτενσιόμετρου 10kΩ, 20kΩ, 50kΩ, 100kΩ, 200kΩ, 300 kΩ και 500 kΩ.

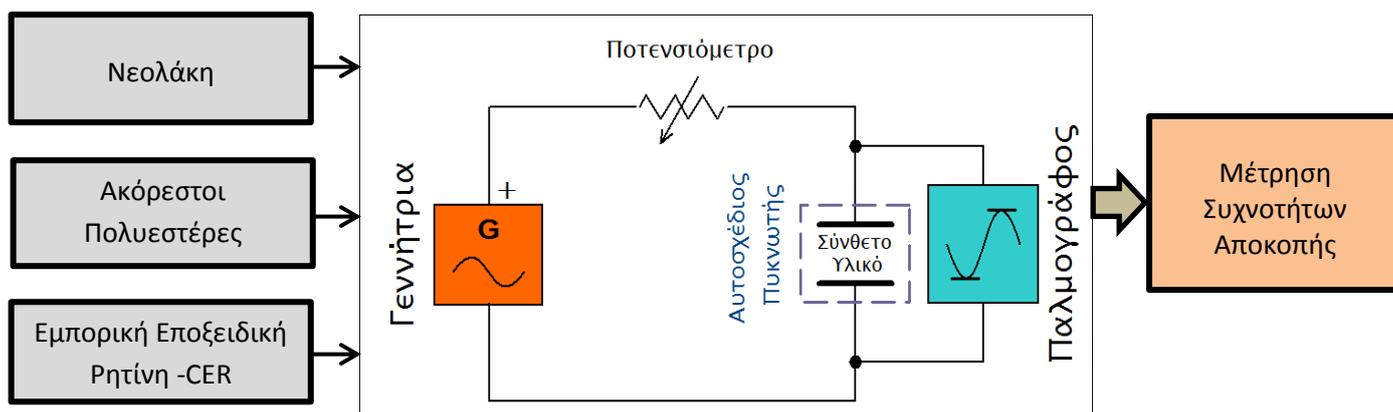
Τέλος, οι μετρήσεις που θα ληφθούν εργαστηριακά θα συγκριθούν και θα αξιολογηθούν με βάση τις συχνότητες αποκοπής και τον παράγοντα ποιότητας Q των εν λόγω παθητικών ηλεκτρονικών φίλτρων.

### Πειραματικό Μέρος 1<sup>ο</sup>

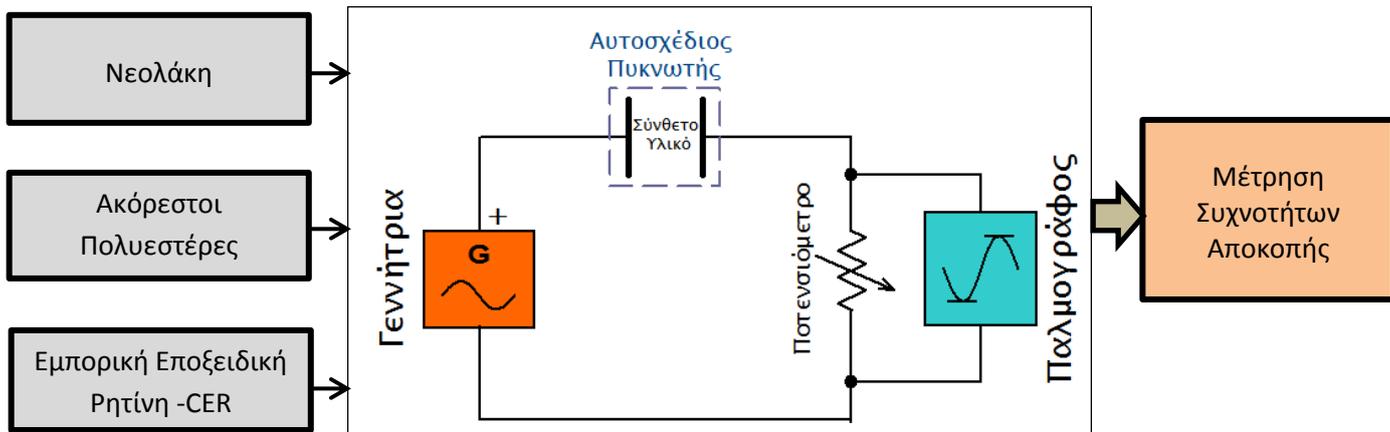


### Πειραματικό Μέρος 2<sup>ο</sup>

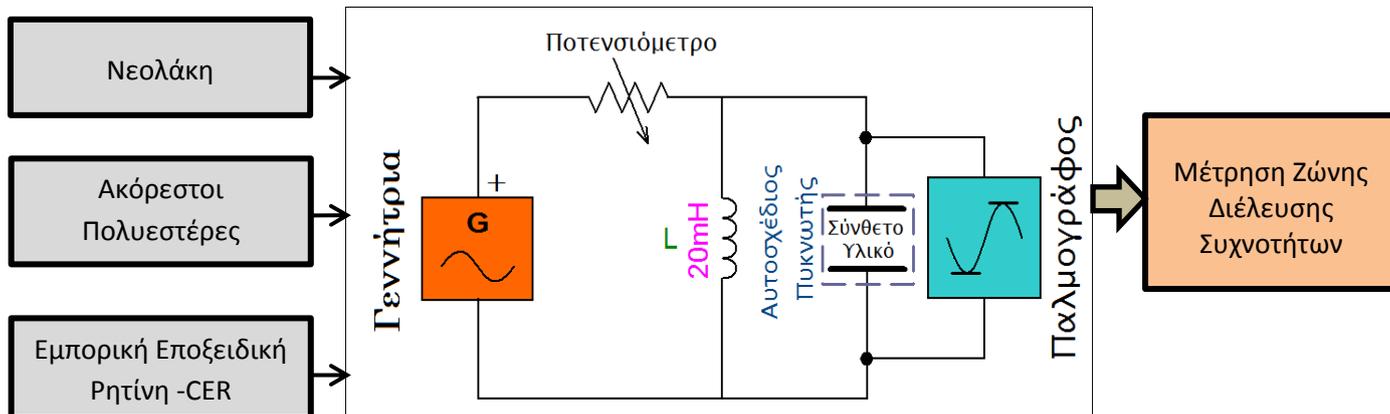
#### Σύνθεση Βαθυπερατού Φίλτρου



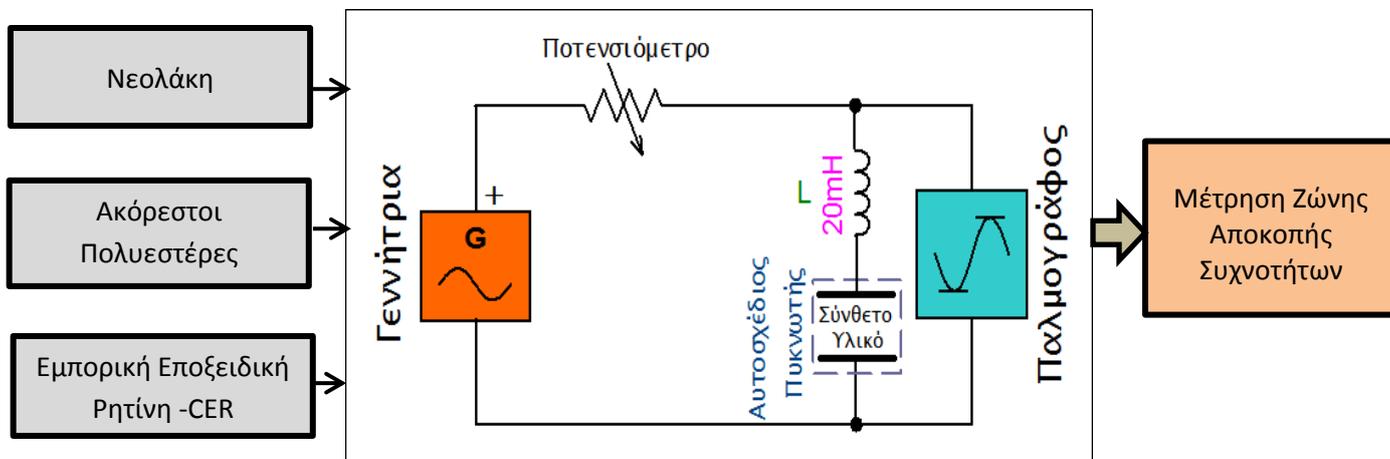
**Σύνθεση Υψηλερατού Φίλτρου**



**Σύνθεση Φίλτρου Διέλευσης Συχνοτήτων (Ζωνοπερατό Φίλτρο)**



**Σύνθεση Φίλτρου Αποκοπής Συχνοτήτων (Ζωνοφρακτικό Φίλτρο)**

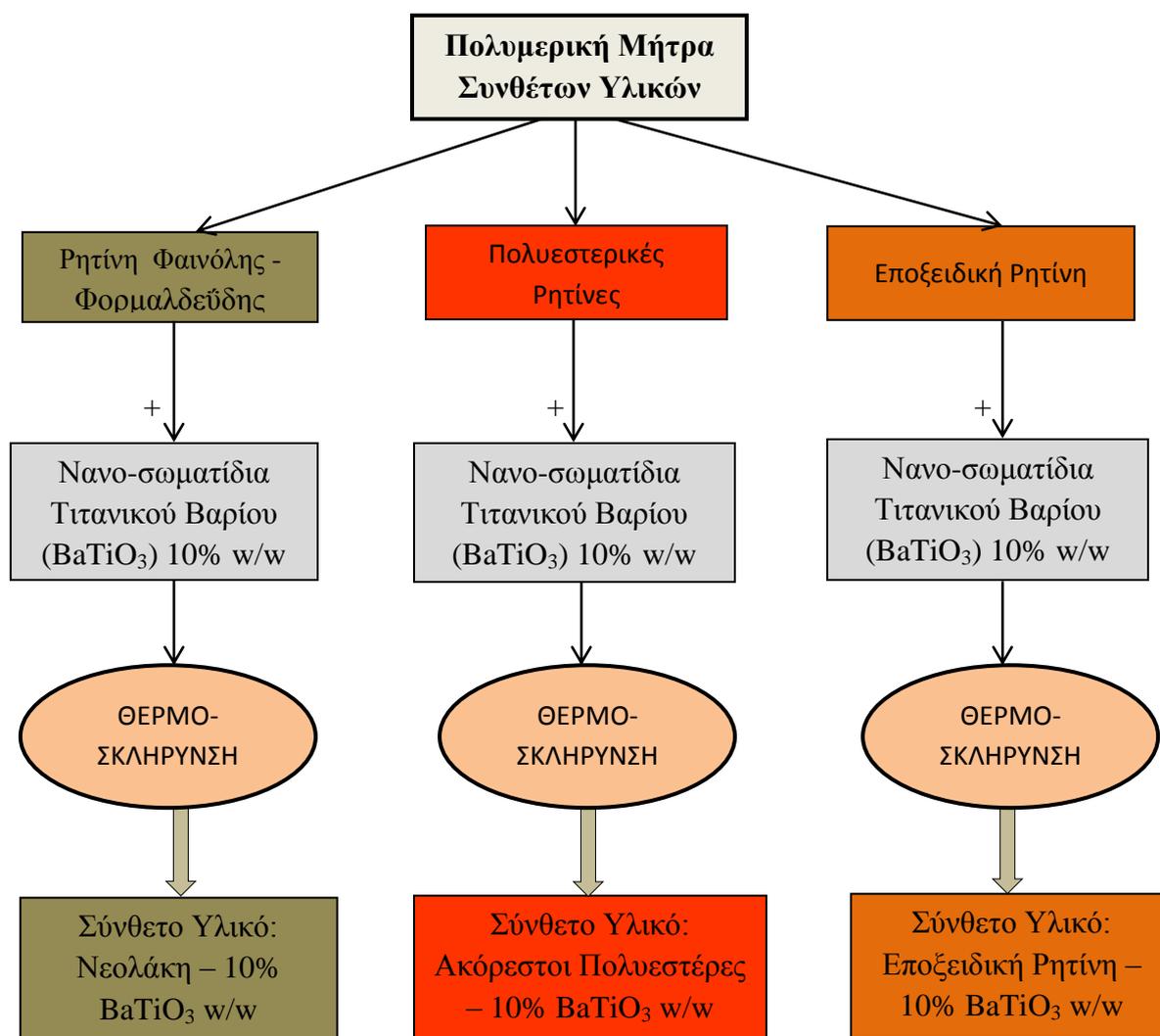


## **B. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: Πειραματικό Μέρος

### 5.1 Σύνθετα Διηλεκτρικά Υλικά Πολυμερικής Μήτρας

Όπως έχει αναφερθεί, τα σύνθετα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν ως το διηλεκτρικό μέσο για την κατασκευή των πυκνωτών ανήκουν στην κατηγορία των συνθέτων υλικών πολυμερικής μήτρας. Συγκεκριμένα, οι μήτρες από τις οποίες είναι κατασκευασμένα τα εν λόγω σύνθετα υλικά ανήκουν στην κατηγορία των ρητινών φαινόλης – φορμαλδεΐδης, των πολυεστερικών ρητινών και των εποξειδικών ρητινών. Τα εγκλείσματα που αποτελούν την φάση ενίσχυσης των συνθέτων αυτών υλικών είναι κεραμικά νανο-σωματίδια τιτανικού βαρίου ( $\text{BaTiO}_3$ ).



**Σχήμα 5.1:** Σχηματικό διάγραμμα σύνθεσης των διηλεκτρικών – σύνθετων υλικών.

## 5.2 Σύνθεση Μήτρας Φαινόλης – Φορμαλδεΐδης

Η ρητίνη φαινόλης – φορμαλδεΐδης που αποτελεί την πολυμερική μήτρα του σύνθετου υλικού Νεολάκη – 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w έχει παραχθεί μέσω **σταδιακού πολυμερισμού** και μηχανισμού **πολυσυμπυκνώσεως**. Οι πρώτες ύλες από τις οποίες έχει συντεθεί η ρητίνη φαινόλης – φορμαλδεΐδης είναι:

1. **Φαινόλη** (Merck, 1.00206.1000, 1kg. Η φαινόλη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Χημικό τύπο C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>OH και μοριακό βάρος 94,11gr/mol.
2. **Διάλυμα Φορμαλδεΐδης 37% v/v** (Merck, 1.04003.2500, 2,5L, 1L=1,09kg). Το διάλυμα φορμαλδεΐδης 37% v/v έχει ως διαλύτη το H<sub>2</sub>O. Η φορμαλδεΐδη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Χημικό τύπο CH<sub>2</sub>O και μοριακό βάρος 30,03gr/mol.
3. **Διένυδρο Οξαλικό οξύ** (Riedel de Haen, 27725, 500gr). Το διένυδρο οξαλικό οξύ έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Μοριακό τύπο C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O και μοριακό βάρος 127,07gr/mol.

Ακόμα, για την παρακολούθηση της προόδου της αντίδρασης πολυμερισμού έχουν χρησιμοποιηθεί οι παρακάτω ενώσεις.

1. **Υδροχλωρική Υδροξυλαμίνη** (Fluka, 55469, 250gr, p.a.≥98,0%). Η υδροχλωρική υδροξυλαμίνη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Μοριακό τύπο NH<sub>4</sub>OH HCl και μοριακό βάρος 69,49 gr/mol.
2. **Δείκτης Κυανούν Βρωμοφαινόλης Άλας Νατρίου** (Riedel de Haen, 32768, 10gr). Ο δείκτης έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Μοριακό τύπο C<sub>19</sub>H<sub>9</sub>Br<sub>4</sub>NaO<sub>5</sub>S και μοριακό βάρος 691,94gr/mol.
3. **Υδροξείδιο του Νατρίου** (J.T.Baker, 0288, 1kg). Το υδροξείδιο του Νατρίου έχει τα εξής χαρακτηριστικά: Χημικό τύπο NaOH και μοριακό βάρος 40gr/mol.
4. **Απιονισμένο Νερό** (Deionized Water).[1]

Η εν λόγω φαινολική ρητίνη έχει παραχθεί με περίσσεια φαινόλης, έτσι ώστε να μην οδηγείται η αντίδραση εξ' αρχής σε διασταυρώμενα μακρομόρια.

Παρακάτω, παραθέτω μία σύντομη περιγραφή της διαδικασίας σύνθεσης της εν λόγω φαινολικής ρητίνης, η οποία εκτελέστηκε από τον κ. Ιωάννη Ασημακόπουλο, Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. υπό την επίβλεψη του κ. Λουκά Ζουμπουλάκη, Αν. Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. στο εργαστήριο "Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νανο-Υλικών και Νανοτεχνολογίας" της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π..

Σε αντιδραστήρα 2 λίτρων τοποθετήθηκαν:

- 434gr φαινόλης
- Διάλυμα φορμαλδεΐδης 37% v/v ( 324gr διαλύματος φορμαλδεΐδης, δηλαδή 120gr καθαρής φορμαλδεΐδης)
- Διένυδρο οξαλικό οξύ 1,5% w/w ως προς την ποσότητα της φαινόλης (6,6gr).

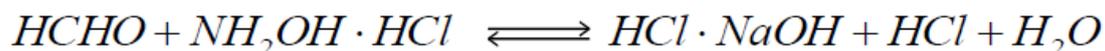
Η γραμμομοριακή αναλογία (mol/mol) φαινόλης ως προς διάλυμα φορμαλδεΐδης 37% v/v είναι 3,6:1. Στην αρχή εισήχθησαν οι στερεοί μορφής κόκκοι φαινόλης, ύστερα το υδατικό διάλυμα της φορμαλδεΐδης και τέλος οι στερεής μορφής κόκκοι του οξαλικού οξέως. Ο πολυμερισμός για την παραγωγή της νεολάκης διήρκεσε 3h, ενώ η θερμοκρασία κυμαινόταν

μεταξύ 98°C – 105°C. Ο πολυμερισμός ξεκίνησε μόλις η θερμοκρασία εντός του αντιδραστήρα γίνει 100°C. Αρχικά, το διάλυμα των αντιδρώντων είναι διαφανές, ενώ μετά από 20 λεπτά το διάλυμα αρχίζει να παίρνει ένα άσπρο χρώμα το οποίο θα είναι και το τελικό χρώμα μετά το πέρας του πολυμερισμού.

Αφού ολοκληρώθηκε η διαδικασία του πολυμερισμού το προϊόν που δημιουργήθηκε είναι ένα διαφανικό διάλυμα. Η φάση με την μεγαλύτερη πυκνότητα είναι η νεολάκη η οποία βρίσκεται στον πυθμένα του αντιδραστήρα ενώ η φάση με την μικρότερη πυκνότητα είναι τα παραχθέντα μόρια νερού. Κατόπιν, τα παραχθέντα μόρια νερού απομακρύνθηκαν και η νεολάκη τοποθετήθηκε σε φόρμα αλουμινίου για να εισαχθεί σε πυραντήριο (στους 120°C για 6 hours) ώστε να απομακρυνθούν και τα εναπομείναντα μόρια του H<sub>2</sub>O.

Με από χρονικό διάστημα 6 hours στο πυραντήριο το προϊόν άλλαξε έχοντας μετατραπεί σε ένα υαλώδους μορφής στερεό με κοκκινωπή απόχρωση ως αποτέλεσμα της οξείδωσης που είχε λάβει χώρα εντός του πυραντηρίου.

Η παρακολούθηση της πορείας πολυσυμπυκνώσεως προ σχηματισμό της φαινολικής ρητίνης έγινε μέσω τιτλοδότησης με διάλυμα καυστικού νατρίου, δείκτη κυανού της βρωμοφαινόλης άλας Νατρίου και διάλυμα υδροχλωρικής υδροξυλαμίνης NH<sub>4</sub>OH HCl με διαλύτη το νερό. Η διαδικασία της τιτλοδότησης έγινε κάθε 30 λεπτά ώστε να υπολογισθεί η ποσότητα της ελεύθερης φορμαλδεΐδης στον αντιδραστήρα. Κατά την τιτλοδότηση, η φορμαλδεΐδη αντιδρά με την υδροχλωρική υδροξυλαμίνη που προστίθεται και παράγεται υδροχλωρικό οξύ. Στη συνέχεια, προστέθηκε ο δείκτης κυανού της βρωμοφαινόλης ο οποίος για τιμές PH<3 έχει κίτρινο χρώμα ενώ για τιμές pH>4,6 έχει ιώδες-μπλέ χρώμα. Το χρώμα του διαλύματος στην αρχή είναι κίτρινο. Στη συνέχεια, προστέθηκε το καυστικό νάτριο NaOH 0,5M και το pH του διαλύματος αυξήθηκε με αποτέλεσμα το χρώμα του διαλύματος να μετατραπεί σε κυανού. [2][3]



Έτσι, μετρώντας την ποσότητα του καυστικού νατρίου που χρειάστηκε για να εξουδετερωθεί η ποσότητα του HCl με την αλλαγή του χρώματος σε κυανού υπολογίστηκε το ποσοστό της ελεύθερης φορμαλδεΐδης κάθε 30 min μέσω του παρακάτω τύπου.

$$\% \text{ ελεύθερης φορμαλδ.} = \frac{3 \cdot V_{NaOH} \cdot N \cdot f}{V_{\text{δείγματος}}}$$

Όπου:

- V<sub>NaOH</sub>: Ο όγκος του καυστικού Νατρίου που απαιτήθηκε για την αλλαγή του χρώματος του διαλύματος σε κυανού.
- V<sub>δείγματος</sub>: Ο όγκος του δείγματος που ελήφθη κάθε 30min.
- N: Συντελεστής ο οποίος σχετίζεται με τη συγκέντρωση του ρυθμιστικού διαλύματος NaOH.
- f: Συντελεστής διόρθωσης.

### 5.2.1 Σύνθεση – Σκλήρυνση Νεολάκης με 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w

Η σύνθεση – σκλήρυνση της Νεολάκης με 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w έγινε μέσω της μεθόδου hot molding technique (τεχνική χύτευσης μέσω θερμοσυμπίεσης). Για την θερμοσκλήρυνση της νεολάκης χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω χημικές ενώσεις:

1. **Εξαμεθυλενοτετραμίνη (Hexa, HMTA)** (Riedel de Haën, 33233, 1kg). Η εξαμεθυλενοτετραμίνη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99,5%, μοριακό τύπο C<sub>6</sub>H<sub>12</sub>N<sub>4</sub> και μοριακό βάρος 140,19 gr/mol.
2. **Πολύ(τετραφθοροαιθυλένιο) (Teflon, PTFE)** (Bison, 400ml). Το πολύ(τετραφθοροαιθυλένιο) έχει ως βασική δομική μονάδα πολυμερούς: (C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)<sub>n</sub>.
3. **Τιτανικό Βάριο (BT)**. Το τιτανικό βάριο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χημικό τύπο BaTiO<sub>3</sub> και μοριακό βάρος 233,192 g/mol.

Αρχικά κονιορτοποιήθηκε η μάζα της συντεθειμένης νεολάκης και του σκληρυντή Hexa ώστε να μειωθεί το μέγεθος της κοκκομετρίας και των δύο υλικών και να υπάρχει καλύτερη ομοιογένεια του μίγματος στερεής νεολάκης και στερεής Hexa (μίγμα solid/solid), και τελικά αποδοτικότερη θερμοσκλήρυνση μεταξύ τους. Η αναλογία νεολάκης προς σκληρυντή Hexa είναι 7:2.

Στην συνέχεια προστέθηκε τα νανο-σωματίδια τιτανικού βαρίου σε ποσοστό 10% w/w και το μίγμα [ρητίνης-Hexa]-BT εισήχθει σε ανοιχτό καλούπι εντός της θερμοπρέσσας για να ξεκινήσει η διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης. Το Teflon χρησιμοποιήθηκε ως λιπαντικό μεταξύ των εξαρτημάτων του καλουπιού όσο και μεταξύ της μεταλλικής μήτρας και του μίγματος στερεού-στερεού.[1][4]

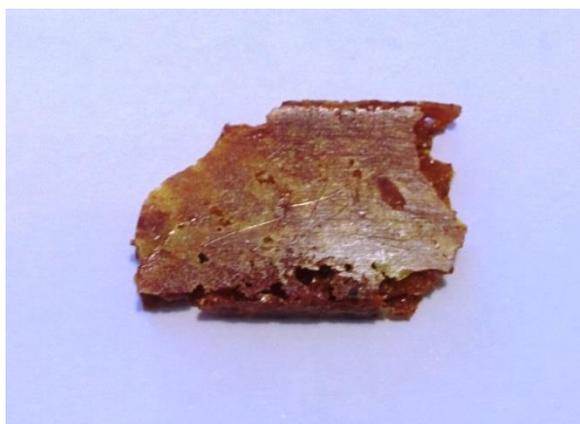
Τα στάδια που έγιναν κατά τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης είναι:

**1<sup>ο</sup> Στάδιο:** Θέρμανση της Νεολάκης – 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w στους 140°C για 1 ώρα με μηδενική πίεση.

**2<sup>ο</sup> Στάδιο:** Θέρμανση της Νεολάκης – 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w στους 170°C με ρυθμό ανόδου θερμοκρασίας 12°C. Παραμονή στην θερμοκρασία αυτή για 1 ώρα με πίεση 8mtn.

**3<sup>ο</sup> Στάδιο:** Ψύξη της Νεολάκης – 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w σε θερμοκρασία δωματίου με ρυθμό πτώσεως της θερμοκρασίας 6°C.

**4<sup>ο</sup> Στάδιο:** Παραμονή της Νεολάκης – 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w σε θερμοκρασία δωματίου για 2 ώρες.[1]



**Εικόνα 5.1:** Νεολάκη – BaTiO<sub>3</sub> 10% w/w

### 5.3 Σύνθεση Μήτρας Ακόρεστων Πολυεστέρων

Οι ακόρεστοι πολυεστέρες με συνθέσεις  $M_1A_3PA_6$ ,  $M_3A_4PA_3$ ,  $M_4A_4PA_2$ ,  $M_7A_2PA_1$  και  $M_6A_4$  που αποτελούν τις πολυμερικές μήτρες των σύνθετων υλικών παρήχθησαν μέσω της αντίδρασης **σταδιακού πολυμερισμού** και μηχανισμού **πολυσυμπυκνώσεως**. Οι ενώσεις από τις οποίες συντέθηκαν οι παραπάνω ακόρεστοι πολυεστέρες δίδονται παρακάτω:

1. **Αδιπικό οξύ (A)** (Fluka, 02130, 1kg). Το αδιπικό οξύ έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99%, μοριακό τύπο  $C_6H_{10}O_4$  και μοριακό βάρος 146,14gr/mol.
2. **Μαλεϊκό οξύ (M)** (Merck, 8.003801000, 1kg). Το μαλεϊκό οξύ έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99%, μοριακό τύπο  $C_4H_4O_4$  και μοριακό βάρος 116,07gr/mol.
3. **Φθαλικός Ανυδρίτης (PA)** (Fluka, 80020, 5kg). Ο φθαλικός ανυδρίτης έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 97%, μοριακό τύπο  $C_8H_4O_3$  και μοριακό βάρος 148,12gr/mol.
4. **Αιθυλενογλυκόλη (EG)** (Fluka, 03750, 2,5L). Η αιθυλενογλυκόλη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99,5%, μοριακό τύπο  $C_2H_6O_2$  και μοριακό βάρος 62,07gr/mol.
5. **Υδροκινόνη (HQ)** (Fluka, 53960, 100gr). Η υδροκινόνη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99%, μοριακό τύπο  $C_6H_6O_2$  και μοριακό βάρος 110,1gr/mol.
6. **Τολουένιο (TL)** (Merck, 1.08325.2500, 2,5L, 1L=0,87kg). Το τολουένιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χημικό τύπο  $C_6H_5CH_3$  και μοριακό βάρος 92,14gr/mol.

Για τον υπολογισμό του αριθμού οξέως των πολυεστερικών ρητινών χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω ενώσεις:

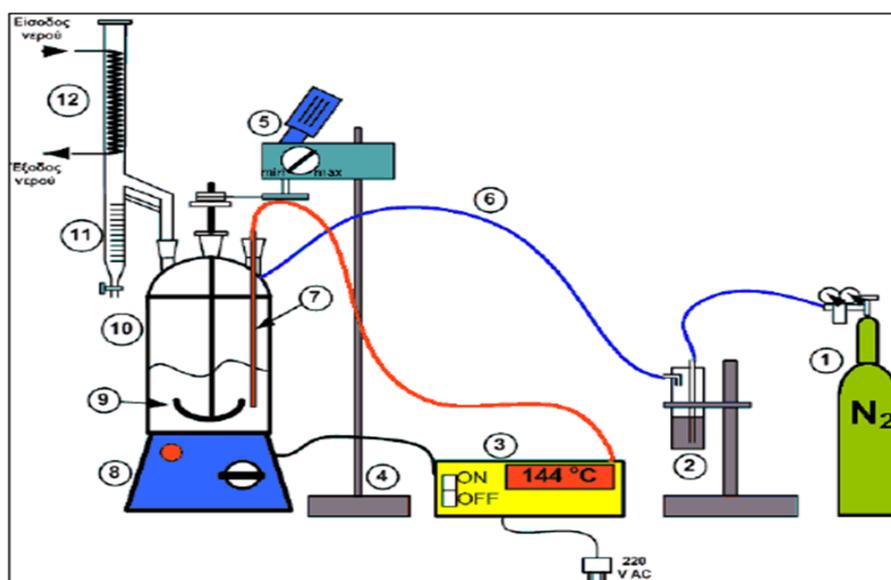
1. **Μεθανόλη** (Riedel de Haen, 32213, 2,5L). Η μεθανόλη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99,8%, χημικό τύπο  $CH_3OH$  και μοριακό βάρος 32,04 gr/mol.
2. **Αιθανόλη** (Emsure, 1.00983.2511, 2,5L). Η αιθανόλη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χημικό τύπο  $CH_3CH_2OH$  και μοριακό βάρος 46,07gr/mol.
3. **Δείκτης Φαινολοφθαλεΐνης** (Alfa Aesar, A17135, 50gr). Ο δείκτης έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 98%, μοριακό τύπο  $C_{20}H_{14}O_4$  και μοριακό βάρος 318,32gr/mol.
4. **Υδροξείδιο του Καλίου** (Chem-Lab, CL00.1135.1000, 1kg). Το υδροξείδιο του καλίου έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χημικό τύπο  $KOH$  και μοριακό βάρος 39,99gr/mol.

Παρακάτω, παραθέτω μία σύντομη περιγραφή της διαδικασίας σύνθεσης των εν λόγω πολυεστερικών ρητινών, η οποία εκτελέστηκε από τον κ. Ιωάννη Ασημακόπουλο, Διδάκτωρα του Ε.Μ.Π., υπό την επίβλεψη του κ. Λουκά Ζουμπουλάκη, Αν. Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. στο εργαστήριο "Ερευνητική Μονάδα Προηγμένων, Σύνθετων, Νανο-Υλικών και Νανοτεχνολογίας" της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π.

Η σύνθεση των ακόρεστων πολυεστέρων πραγματοποιήθηκε στην παρακάτω διάταξη η οποία ονομάζεται διάταξη πολυεστεροποίησης. Με τη διάταξη αυτή πραγματοποιείται η παραγωγή των πολυεστερικών ρητινών μέσω της μεθόδου «αποστάξεως με ανακυκλοφορία» ή αλλιώς «αζεοτροπικής αποστάξεως». Κατά τη μέθοδο αυτή υπάρχει συνεχής απομάκρυνση

ύδατος/τολουενίου από το μίγμα των αντιδρώντων και ανακυκλοφορία του αζεοτροπικού μέσου (τολουενίου) ξανά εντός του αντιδραστήρα. Επίσης, η μέθοδος αυτή έχει να κάνει και με την τελική απομόνωση του πολυεστέρα (προϊόν πολυμερισμού) σε μορφή παχύρευστου υγρού.[1][3]

Κατά τη διάρκεια της μεθόδου, θερμάνθηκε το μίγμα των πρώτων υλών και σχηματίστηκαν ατμοί (μίγμα παραπάνω ατμών) μέχρι τη θερμοκρασία όπου δεν πια παραγόταν άλλο νερό, οπότε ο πολυμερισμός είχε φτάσει σε σημείο κορεσμού.



**Σχήμα 5.2:** Σχηματική απεικόνιση της πειραματικής διάταξης πολυεστεροποίησης μέσω της μεθόδου «αποστάξεως με ανακυκλοφορία» ή αλλιώς «αζεοτροπικής αποστάξεως».

- |    |                                |     |                                 |
|----|--------------------------------|-----|---------------------------------|
| 1. | Φιάλη Αζώτου (N <sub>2</sub> ) | 7.  | Θερμοστοιχείο                   |
| 2. | Πλυντρίδα<br>Πυρογαλλόλης      | 8.  | Ηλεκτρικός Μανδύας<br>θέρμανσης |
| 3. | Ρυθμιστής θερμοκρασίας         | 9.  | Μηχανικός Αναδευτήρας           |
| 4. | Βάση στήριξης Κινητήρα         | 10. | Αντιδραστήρας                   |
| 5. | Κινητήρας                      | 11. | Προχοΐδα                        |
| 6. | Διοχέτευση Αζώτου              | 12. | Αποστακτήρας                    |

Μέσω της παραπάνω διάταξης επιτυγχάνθηκε η πολυεστεροποίηση, ενώ παράλληλα παρακολουθείτο η κινητική της αντίδρασης πολυσυμπύκνωσης και ο προσδιορισμός του βαθμού μετατροπής της αντίδρασης.

Οι γραμμομοριακές αναλογίες με τις οποίες συντέθηκαν οι ακόρεστοι πολυεστέρες φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Κωδικός πολυεστέρα	% mol διοξέων / συνολικά mol			% mol Διόλης / συνολικά mol
	Μαλεϊκό οξύ (M)	Αδιπικό οξύ (A)	Φθαλικός Ανυδρίτης (PA)	Αιθυλενογλυκόλη (EG)
M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub>	10	30	60	110
M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub>	30	40	30	110
M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub>	40	40	20	110
M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub>	70	20	10	110
M <sub>6</sub> A <sub>4</sub>	60	40	0	110

**Πίνακας 5.1:** Γραμμομοριακές αναλογίες πρώτων υλών επί τοις εκατό (% mol/mol) για την παραγωγή των ακόρεστων πολυεστέρων.

Ο πολυμερισμός που έλαβε χώρα για την παραγωγή των εν λόγω ακόρεστων πολυεστέρων έχει να κάνει με μία διόλη (η οποία περιέχει 2 υδροξυλομάδες (-OH)) με 2 διοξέα (όπου το κάθε διοξύ έχει από 2 ομάδες καρβοξυλίου (-COOH)) και έναν ανυδρίτη διοξέος. Έτσι, επιτυγχάνθηκε η αντίδραση πολυεστεροποίησης μέσω σταδιακού πολυμερισμού και πιο συγκεκριμένα μέσω του μηχανισμού πολυσυμπυκνώσεως.

Κάθε δεσμός μεταξύ ενός μορίου αιθυλενογλυκόλης και ενός εκ των δύο οξέων και του ενός ανυδρίτη σε μία από τις δύο ενεργές θέσεις του κάθε μορίου, έλαβε χώρα ανεξάρτητα από τους δύο άλλους. Κατά αυτόν τον τρόπο παράχθηκε ακόρεστος πολυεστέρας ο οποίος έχει διπλούς δεσμούς εξαιτίας του μαλεϊκού οξέος, το οποίο είναι ακόρεστο δικαρβοξυλικό οξύ. Το αποτέλεσμα είναι τα τελικά μακρομόρια να περιέχουν τους διπλούς δεσμούς στην αλυσίδα τους (οι οποίοι προέρχονται από το μαλεϊκό οξύ) με συνέπεια να προκύπτει ακόρεστος πολυεστέρας. Αυτοί οι διπλοί δεσμοί ανοίγουν, μέσω της κατάλληλης ενεργοποίησης, κατά την σκλήρυνση του πολυεστέρα και έχουμε τελικά την δημιουργία σταυροδεσμών (τρισδιάστατο πλέγμα).[1][6]

Η αντίδραση πολυμερισμού που συντελέστηκε για την παραγωγή πολυεστερικών ρητινών είναι εξώθερμη και αποτελείται από τις 2 επιμέρους αντιδράσεις:

- Αντίδραση σχηματισμού μονοεστέρα που συμβαίνει στο θερμοκρασιακό διάστημα μεταξύ 100<sup>ο</sup>-150<sup>ο</sup>C και συνοδεύεται από έκλυση θερμότητας.
- Αντίδραση Πολυσυμπυκνώσεως που συντελείται πάνω από τους 160<sup>ο</sup>C. Το μοριακό βάρος του παραγόμενου πολυεστέρα εξαρτάται από την έκταση-απόδοση αυτής της αντίδρασης.

Η διακοπή της αντίδρασης πολυσυμπυκνώσεως σηματοδοτήθηκε με την διακοπή δημιουργίας νέων μορίων νερού. Αυτό έχει να κάνει με το γεγονός ότι δεν υπήρχαν πλέον εναπομένοντα ελεύθερα καρβοξύλια και υδροξύλια για να αντιδράσουν μεταξύ τους και να συνεχιστεί ο πολυμερισμός. Έτσι, το τελικό προϊόν του εκάστοτε ακόρεστου πολυεστέρα απομακρύνθηκε, ώστε να ψυχθεί σε θερμοκρασία δωματίου.

Ο χρόνος που απαιτήθηκε για την παραγωγή του εκάστοτε είδους ακόρεστου πολυεστέρα κυμάνθηκε μεταξύ από 5 μέχρι 8 hours ενώ η τελική θερμοκρασία όπου διακόπτεται ο σχηματισμός μακρομορίων ακόρεστου πολυεστέρα ήταν μεταξύ από 180-220°C. Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι ένα παχυρευστο μίγμα.

Η τιτλοδότηση του εκάστοτε ακόρεστου πολυεστέρα έγινε προσδιορίζοντας τον αριθμό οξέως του εκάστοτε δείγματος. Η τιτλοδότηση για τον προσδιορισμό του αριθμού οξέως του εκάστοτε δείγματος έγινε με διάλυμα υδροξειδίου-καλίου μεθανόλης, διάλυμα δείκτη φαινολοφθαλεΐνης και διάλυμα δείκτη τολουολίου-μεθανόλης.

Ο αριθμός οξέως του εκάστοτε πολυεστέρα θα πρέπει να είναι μικρότερος του 50 για να είναι αποδεκτός και να διακοπεί η διαδικασία πολυμερισμού. Ο αριθμός οξέως δηλώνει πόσα mg KOH ανά 1gr ακόρεστου πολυεστέρα καταναλώθηκαν και υπολογίζεται από τον εξής τύπο:

$$A.O. = \frac{V_{KOH} \cdot 0,5 \cdot f \cdot 56,11}{\text{βάρους}_{\text{ακόρεστου πολυεστέρα}}}$$

Όπου:

**f:** Συντελεστής διορθώσεως του διαλύματος KOH.

**V<sub>KOH</sub>:** Ο όγκος του διαλύματος καυστικού καλίου που απαιτείται για την εξουδετέρωση.

**0,5:** Είναι ο συντελεστής ο οποίος σχετίζεται με τη συγκέντρωση του διαλύματος KOH.

**56,11 (gr/mol):** Το μοριακό βάρος του KOH.[1][2]

### 5.3.1 Σύνθεση – Σκλήρυνση Ακόρεστων Πολυεστέρων με 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w

Η σύνθεση – σκλήρυνση των ακόρεστων πολυεστέρων με 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w έγινε μέσω της μεθόδου hot molding technique (τεχνική χύτευσης μέσω θερμοσυμπίεσης). Για την θερμοσκλήρυνση των ακόρεστων πολυεστέρων χρησιμοποιήθηκαν οι παρκάτω χημικές ενώσεις:

- 1. Υδροκινόνη (HQ)** (Fluka, 53960, 100gr). Η υδροκινόνη έχει τα εξής χαρακτηριστικά: καθαρότητα μεγαλύτερη του 99,0%, μοριακό τύπο C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O<sub>2</sub> και μοριακό βάρος 110,1 gr/mol.
- 2. Στυρένιο (St)** (Merck, 8.07679.1000, 1L, 1L=0,906kg). Το στυρένιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: μοριακό τύπο C<sub>8</sub>H<sub>8</sub> και μοριακό βάρος 104,15 gr/mol.
- 3. Ναφθενικό Κοβάλτιο (NpCo)** (Fluka, 60830, 250ml, ~10% Co). Το ναφθενικό κοβάλτιο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: μοριακό τύπο CoC<sub>22</sub>H<sub>14</sub>O<sub>4</sub> και μοριακό βάρος 401,02 g/mol.
- 4. Υπεροξείδιο της μέθυλο-αίθυλο-κετόνης (MEKP)** (Neotex PE-6/TC, MEKP 50). Το υπεροξείδιο της μέθυλο-αίθυλο-κετόνης έχει τα εξής χαρακτηριστικά: μοριακό τύπο C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>O<sub>4</sub> και μοριακό βάρος 210,22 g/mol.
- 5. Τιτανικό Βάριο (BT).** Το τιτανικό βάριο έχει τα εξής χαρακτηριστικά: χημικό τύπο BaTiO<sub>3</sub> και μοριακό βάρος 233,192 g/mol.

Αρχικά, δημιουργήθηκε μίγμα του εκάστοτε ακόρεστου πολυεστέρα με στυρένιο (βινυλικό μονομερές) και υδροκινόνη (αναστολέας – επιβραδυντής) και ομογενοποιήθηκε σε διάταξη με

παράλληλη θέρμανση έως τους 60°C. Ο χρόνος ομογενοποίησης των ενώσεων ακόρεστος πολυεστέρας-στυρένιο-υδροκινόνη κυμάνθηκε για το κάθε είδος ακόρεστου πολυεστέρα από 30 λεπτά έως 1 ώρα. Η σκλήρυνση ακόρεστων πολυεστέρων είναι μια αντίδραση *αλυσωτού πολυμερισμού* η οποία γίνεται με *μηχανισμό ελευθέρων ριζών*. Είναι γεγονός πως πριν τη διαδικασία της σκλήρυνσης, ο εκάστοτε πολυεστέρας είναι *θερμοπλαστικός* με τη μορφή γραμμικού μη-διακλαδισμένου πολυμερούς, ενώ μετά τη σκλήρυνση γίνεται *θερμοσκληρονόμενος* (thermosetting) (τρισδιάστατη δομή πλέγματος μέσω σταυροδεσμών).

Κατόπιν, δημιουργήθηκαν τα μίγματα [ρητίνης-διεγέρτη-επιταχυντή]-BT, που σε αυτήν την περίπτωση επρόκειτο για μίγματα υγρού-στερεού. Συγκεκριμένα, έχουμε τον διαλυμένο με στυρένιο πολυεστέρα, στον οποίο προστέθηκε ο επιταχυντής (Ναφθενικό Κοβάλτιο (NpCo) 1% v/w) και πραγματοποιήθηκε μαγνητική ανάδευση μέχρι να ομογενοποιηθεί το μίγμα. Στη συνέχεια προστέθηκε 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w ξαναομογενοποιούμε μέσω μαγνητικής ανάδευσης και τέλος προστέθηκε ο διεγέρτης (Υπεροξείδιο της μέθυλο-αίθυλο-κετόνης (MEKP) 3% v/w). Τέλος, τα μίγματα των ακόρεστων πολυεστέρων εισήχθησαν σε κλειστού τύπου καλούπια και τοποθετήθηκαν σε θερμοπρέσσα για να πραγματοποιηθεί το παρακάτω θερμοκρασιακό πρόγραμμα. [1][6]

Τα βήματα που έγιναν κατά τη διαδικασία της θερμοσκλήρυνσης των ακόρεστων πολυεστέρων είναι:

**1° Βήμα:** Τα δοκίμια παρέμειναν στους 60°C για 15min με μηδενική πίεση.

**2° Βήμα:** Τα δοκίμια παρέμειναν στους 60°C με άσκηση πίεσης 8mtn για χρονική διάρκεια 15min.

**3° Βήμα:** Τα δοκίμια αφέθηκαν να ψυχθούν ομαλά σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



M<sub>1</sub>A<sub>3</sub>PA<sub>6</sub>-BaTiO<sub>3</sub>



M<sub>7</sub>A<sub>2</sub>PA<sub>1</sub> - BaTiO<sub>3</sub>



M<sub>3</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>3</sub>-BaTiO<sub>3</sub>



M<sub>4</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>2</sub> - BaTiO<sub>3</sub>



M<sub>6</sub>A<sub>4</sub> - BaTiO<sub>3</sub>

**Εικόνα 5.2:** Σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα ακόρεστους πολυεστέρες.

### 5.3.2 Εμπορικός Ακόρεστος Πολυεστέρας - CUP

Ο εμπορικός ακόρεστος πολυεστέρας (commercial unsaturated polyester, CUP) αποτελεί την πολυμερική μήτρα του έβδομου σύνθετου υλικού CUP - 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w. Η εμπορική του ονομασία είναι PE-6/TC, Preaccelerated Thixotropic Polyester Resin, Neotex, δηλαδή θιξοτροπικός πολυεστέρας με επιταχυντή. Η σύνθεση-σκλήρυνση του σύνθετου υλικού CUP - 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w έγινε με τον ίδιο τρόπο και με τις ίδιες ενώσεις με τις οποίες σκληρύνθηκαν οι προηγούμενοι εργαστηριακοί ακόρεστοι πολυέστερες με την μόνη διαφορά ότι δεν χρησιμοποιήθηκε καθόλου επιταχυντής κατά την σκλήρυνση του παρά μόνο διεγέρτης σε ποσοστό 3% v/w της ποσότητας πολυεστέρα-στυρενίου (MEKP: Υπεροξειδίο της μέθυλο-αίθυλο-κετόνης). Το τελικό δοκίμιο CUP-BT εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά και έλλειψη ελαστικότητας.[1]



Εικόνα 5.3: Σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα εμπορικός ακόρεστος πολυεστέρας CUP.

### 5.4 Εμπορική Εποξειδική Ρητίνη - CER

Η εποξειδική ρητίνη που αποτελεί την πολυμερική μήτρα του όγδοου σύνθετου υλικού είναι μία εμπορικού τύπου εποξειδική ρητίνη και η επιλογή της έγινε με βάση τις ηλεκτρολογικές-ηλεκτρονικές εφαρμογές της. Η εμπορική ονομασία της συγκεκριμένη εποξειδικής ρητίνης είναι Epoxol 2874, Συστατικό Α' (ρητίνη), Συστατικό Β' (σκληρυντής) από την Neotex A.E.B.E. Γενικά, οι εποξειδικές ρητίνες συντίθενται με βάση τον μηχανισμό της πολυπροσθήκης σταδιακού πολυμερισμού.

Παρακάτω παρατίθεται το δελτίο δεδομένων Ασφάλειας για το συστατικό Α (ρητίνη) και για το συστατικό Β (σκληρυντής).

**Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας Συστατικού Α (ρητίνη)**  
**για την εμπορική εποξειδική ρητίνη Eroxol 2874, Neotex A.E.B.E.**

ΔΕΛΤΙΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ		NEOTEX® A.E.B.E.	
Προϊόν	ΕΡΟΧΟΛ® 2874 Α΄ - ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ		
Έκδοση	1.00	Ημ/νία αναθεώρησης	01/07/2003

**1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ**

<b>1.1 Στοιχεία του παρασκευάσματος</b>	
Όνομασία προϊόντος	ΕΡΟΧΟΛ® 2874 Α΄ - ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ
<b>1.2 Χρήση του παρασκευάσματος</b>	
Μίγμα εποξειδικών ρητινών για μάρμαρα, εγκιβωτισμούς και δάπεδα	
<b>1.3 Στοιχεία της εταιρείας</b>	
Προμηθευτής	NEOTEX AEBE Βασιλείου Μοίρα, 19600 Μάνδρα Αττικής, Αθήνα
Τηλ. Επικοινωνίας	(210) 55 57 579, fax: (210) 55 58 482
Τηλ. έκτακτης ανάγκης	(210) 55 57 579
Τηλ. κέντρου δηλητηριάσεων	(210) 77 93 777

**2. ΣΥΣΤΑΣΗ/ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ**

Είδος	Εποξειδική ρητίνη			
Συστατικά	Αριθμός CAS	Σύμβολα	Φράσεις R	Ποσοστό (%κβ)
Εποξειδική ρητίνη (μέσου μοριακού βάρους <700)	25068-38-6	Xi,N	36/38,43,51/53	>50
Εποξειδική ρητίνη (μέσου μοριακού βάρους <700)	28064-14-4	Xi,N	36/38,43,51/53	10-25
Aliphatic glycidether	68081-84-5	Xi,N	36/38,43,51/53	10-25

**Δελτίο Δεδομένων Ασφαλείας Συστατικού Β (σκληρυντής)**  
**για την εμπορική εποξειδική ρητίνη Eroxol 2874, Neotex A.E.B.E.**

ΔΕΛΤΙΟ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ		NEOTEX® A.E.B.E.	
Προϊόν	ΕΡΟΧΟΛ® 2874 Β΄ - ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ		
Έκδοση	1.00	Ημ/νία αναθεώρησης	01/07/2003

**1. ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑΣ**

<b>1.1 Στοιχεία του παρασκευάσματος</b>	
Όνομασία προϊόντος	ΕΡΟΧΟΛ® 2874 Β΄ - ΣΥΣΤΑΤΙΚΟ
<b>1.2 Χρήση του παρασκευάσματος</b>	
Σκληρυντής εποξειδικών ρητινών για μάρμαρα, εγκιβωτισμούς και δάπεδα	
<b>1.3 Στοιχεία της εταιρείας</b>	
Προμηθευτής	NEOTEX AEBE Βασιλείου Μοίρα, 19600 Μάνδρα Αττικής, Αθήνα
Τηλ. Επικοινωνίας	(210) 55 57 579, fax: (210) 55 58 482
Τηλ. έκτακτης ανάγκης	(210) 55 57 579
Τηλ. κέντρου δηλητηριάσεων	(210) 77 93 777

**2. ΣΥΣΤΑΣΗ/ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΓΙΑ ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ**

Είδος	Σκληρυντής εποξειδικών ρητινών			
Συστατικά	Αριθμός CAS	Σύμβολα	Φράσεις R	Ποσοστό (%κβ)
3-aminomethyl-3,5,5-trimethylcyclohexamine	2855-13-2	C	21/22,34,43,52/53	25-35
Benzyl alcohol	100-51-6	Xn	20/22	35-50
Phenol, 4,4-(1-methylethylidene)bis-polymer with 5 amino-1,3,3-trimethylcyclohexanemrthan amine and (chromomethyl)oxirane	38294-64-3	C,N	21/22,34,43,51/53	25-35

Η σύνθεση-σκληρυνση του σύνθετου υλικού CER - 10% BaTiO<sub>3</sub> w/w έγινε με τον ίδιο τρόπο (τεχνική χύτευσης μέσω θερμοσυμπίεσης) με τον οποίο σκληρύνθηκαν οι εργαστηριακοί

ακόρεστοι πολυέστερες. Η αναλογία εποξειδικής ρητίνης (Συστατικό Α) προς σκληρυντή (Συστατικό Β) ήταν 1:0,58.[1][2]



**Εικόνα 5.4:** Σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα εποξειδικής ρητίνης.

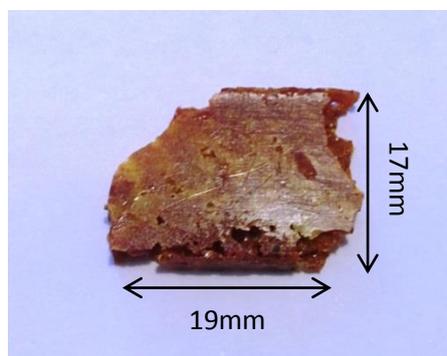
## 5.5 Χαρακτηριστικά Διηλεκτρικών - Σύνθετων Υλικών

A) Νεολάκη με 10% w/w σε Νανοτιτανικό Βάριο.

Οι πιο σημαντικές ιδιότητες της νεολάκης είναι: η αντοχή τους σε υψηλές θερμοκρασίες σε σχέση με άλλα πολυμερή, η διαστασιακή τους σταθερότητα, η υψηλή χημική τους αντίσταση σε διαβρωτικούς παράγοντες, ηλεκτρική μόνωση, και η αντίστασή τους στην φλόγα. Η νεολάκη δεν έχει σημείο τήξεως παρά μόνο σημείο αποσυνθέσεως. Ένα ακόμα πάρα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα της νεολάκης είναι πως πολυμερίζεται πλήρως (απόδοση πολυμερισμού: 93%) κατά την σκλήρυνσή της, ενώ διακρίνεται και για την ικανότητα αποθήκευσής της για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς αλλοιώσεις. Το σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα φαινόλης-φορμαλδεΰδης δεν παρουσιάζει συνεχή δομή, όπως οι ακόρεστοι πολυεστέρες με 10% w/w σε τιτανικό βάριο, αλλά η δομή του είναι μακρο-πορώδες, με αποτέλεσμα το δοκίμιο μας να είναι αρκετά ψαθυρό. [1][4]

➤ Διαστάσεις Σύνθετου Υλικού Νεολάκη με 10% w/w Νανοτιτανικού Βαρίου.

Είδος ΣΥΠΜ	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
NV-BT	19	17	3,0



**Εικόνα 5.5:** Νεολάκη – BT

B) Ακόρεστοι Πολυεστέρες με 10% w/w σε Νανοτιτανικό Βάριο.

Τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα ακόρεστων πολυεστέρων διακρίνονται για τα υψηλά ποσοστά πολυεστεροποίησης τα οποία φτάνουν της τάξεως του 85 με 90% (ποσοστά που είναι πολύ υψηλά για πολυμερισμούς πολυμερών). Το βασικότερο πλεονέκτημα των ακόρεστων πολυεστέρων είναι το γεγονός της οικονομικής τους αξίας. Οι ακόρεστοι πολυεστέρες μαζί με τους βινυλεστέρες είναι τα φθηνότερα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή που υπάρχουν αυτή την στιγμή στην αγορά.

Το δοκίμιο CUP-BT έχει παρόμοια δομή με την εποξειδική ρητίνη CER-BT, δηλαδή εμφανίζουν ψαθυρή συμπεριφορά και έλλειψη ελαστικότητας. Εν αντιθέσει όλα τα υπόλοιπα είδη εργαστηριακών πολυεστέρων θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως ελαστομερικού τύπου, μιας και εμφανίζουν ελαστικότητα και ολκιμότητα. Επίσης, το δοκίμιο M<sub>1</sub>A<sub>3</sub>PA<sub>6</sub>-BT, εμφανίζει

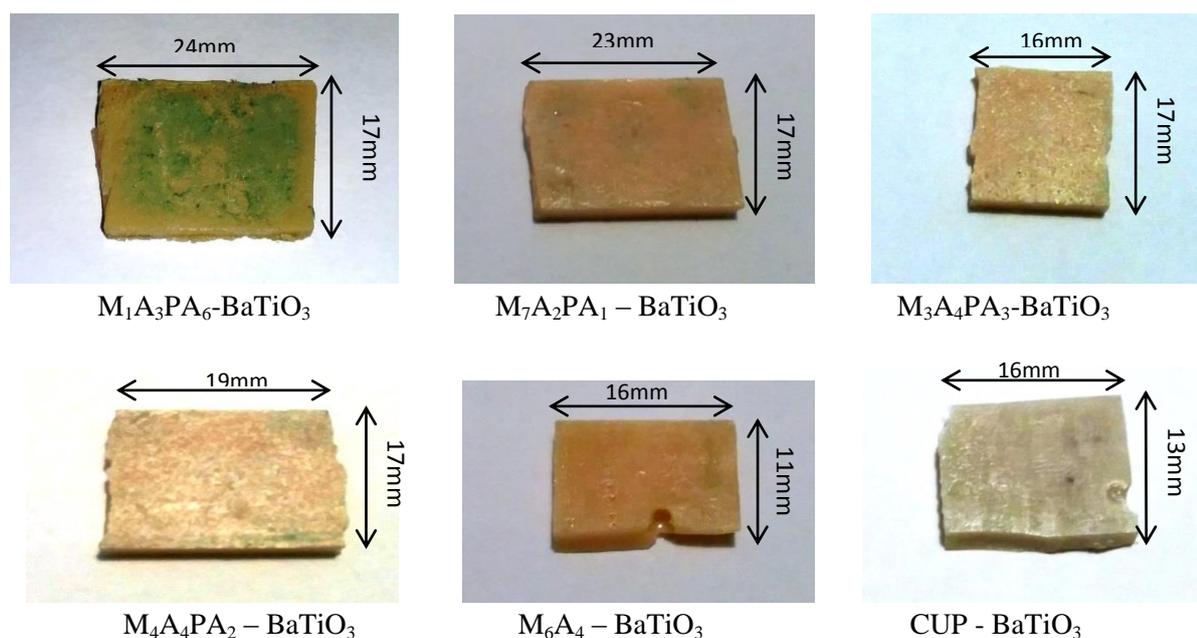
το φαινόμενο του λυγισμού εξαιτίας της βαρύτητας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο περισσότερο μαλεϊκό οξύ υπάρχει στη σύνθεση του εκάστοτε πολυεστέρα τόσο πιο άκαμπτα συνδεδεμένα μεταξύ τους είναι τα μακρομόρια των ακόρεστων πολυεστέρων (Το μαλεϊκό οξύ είναι αυτό που παρέχει τους διπλούς δεσμούς οι οποίοι κατά την σκλήρυνση ανοίγουν και δημιουργούν σταυροδεσμούς με το στυρένιο μετά τον συμπολυμερισμό με αυτό). Γι' αυτό το δοκίμιο  $M_1A_3PA_6$ -BT είναι λογικό να έχουν την λιγότερο διασταυρούμενη δομή (φαινόμενο λυγισμού), ενώ το δοκίμιο  $M_6A_4$ -BT εμφανίζουν συγκριτικά με τα υπόλοιπα την περισσότερο άκαμπτη δομή. Το δοκίμιο  $M_1A_3PA_6$ -BT δεν παρουσιάζει αστοχία σε κάμψη και διάτμηση, ενώ τα εργαστηριακά σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα ακόρεστων πολυεστέρων δεν παρουσιάζουν αστοχία σε κάμψη.[1][5]

Τέλος, περισσότερο αδιπικό οξύ και φθαλικός ανυδρίτης στη σύνθεση των ακόρεστων πολυεστέρων δίνουν περισσότερη ευλυγισία και ευκινησία στη ρητίνη.

➤ Διαστάσεις Σύνθετων Υλικών Ακόρεστων Πολυεστέρων με 10% w/w Νανοτιτανικού Βαρίου.

Είδος ΣΥΠΜ	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
$M_1A_3PA_6$ -BT	24	17	3,00
$M_7A_2PA_1$ -BT	23	17	3,18
$M_3A_4PA_3$ -BT	16	17	3,09
$M_4A_4PA_2$ -BT	19	17	3,01
$M_6A_4$ -BT	16	11	3,00
CUP-BT	16	13	3,00

**Πίνακας 5.2:** Διαστάσεις ΣΥΠΜ ακόρεστων πολυεστέρων.



**Εικόνα 5.6:** Σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα ακόρεστους πολυεστέρες.

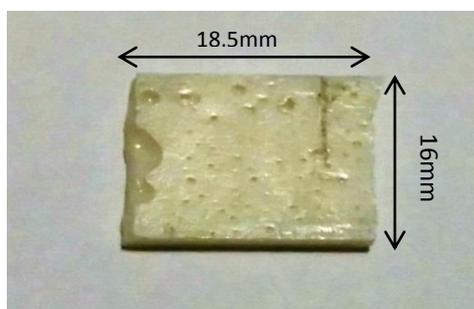
### Γ) Εποξειδική Ρητίνη με 10% w/w σε Νανοτιτανικό Βάριο.

Το σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα εποξειδικής ρητίνης και 10% w/w σε τιτανικό βάριο CER-BT εμφανίζει τις καλύτερες μηχανικές ιδιότητες σε σύγκριση με τα άλλα θερμοσκληρυνόμενα σύνθετα υλικά. Οι πιο σημαντικές ιδιότητες των εποξειδικών ρητινών είναι: θερμοανθεκτικότητα, θερμομονωτικότητα, αντιδιαβρωτικότητα, χημική ανθεκτικότητα χαμηλή αναφλεξιμότητα, αντοχή στην κόπωση, εύκολες στον χειρισμό. Επίσης, έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους πολυεστέρες σε σχέση με τον λόγο αντοχή/αναλογία βάρους. Ένα ακόμα πλεονέκτημα της εποξειδικής ρητίνης σε αντίθεση με τους ακόρεστους πολυεστέρες είναι το γεγονός ότι η εποξειδική ρητίνη μπορεί να σε δύο διαφορετικά δοχεία (στο βρίσκονται τα ολιγομερή και στο άλλο ο σκληρυντής) χωρίς αλλοιώσεις για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ακόμα, το σύνθετο υλικό CER-BT έχει συνεχή δομή και δεν εμφανίζει μακρο-πορώδες, όπως γίνεται με το σύνθετο υλικό NV-BT.[1][10]

Τέλος, υπερτερούν σε σχέση με τους πολυεστέρες στο ότι έχουν πολύ καλές ιδιότητες πρόσφυσης σε άλλα υλικά όπως μέταλλα, μετόν, άλλα πολυμερή. Βέβαια μειονεκτούν στην υποβάθμισή τους από την UV ακτινοβολία.

#### ➤ Διαστάσεις Σύνθετου Υλικού Εποξειδικής Ρητίνης με 10% w/w σε Νανοτιτανικό Βάριο.

Είδος ΣΥΠΗΜ	Μήκος (mm)	Πλάτος (mm)	Πάχος (mm)
<b>CER-BT</b>	18,5	16	2,90



**Εικόνα 5.7:** Σύνθετο υλικό με πολυμερική μήτρα εποξειδική ρητίνη.

## 5.6 Όργανο Μετρήσεων LCR

Για τη μέτρηση της χωρητικότητας (C), της σύνθετης αντίστασης (Z), της ωμικής αντίστασης (R), της χωρητικής αντίδρασης ( $X_C$ ), της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (G) και της επιδεκτικότητας (B) του εκάστοτε πυκνωτή ο οποίος φιλοξενεί ως διηλεκτρικό ένα από τα παραπάνω σύνθετα υλικά την κάθε φορά χρησιμοποιήθηκε το όργανο μέτρησης LCR – Wayne Kerr 6500B. Το συγκεκριμένο όργανο είναι κατάλληλο για έλεγχο εισερχόμενων εξαρτημάτων σε μια γραμμή παραγωγής, τον έλεγχο ποιότητας παραγωγής, καθώς και για εργαστηριακή ή ερευνητική χρήση.

Το εν λόγω όργανο μπορεί να μετρήσει τις παραμέτρους ισοδύναμου κυκλώματος LCR, υλικών και διατάξεων ημιαγωγών σε ένα ευρύ φάσμα μεταβλητών συχνοτήτων (από 20 Hz έως 5 MHz) με πειραματικά σήματα επιπέδου 10 mV ως 1 V<sub>rms</sub> (Option 01: AC Drive).

α)



β)



**Εικόνα 5.8:** α) Όργανο Μέτρησης LCR Wayne Kerr 6500B.

β) Υποδοχή μέτρησης δοκιμίων 1J1011.[20]

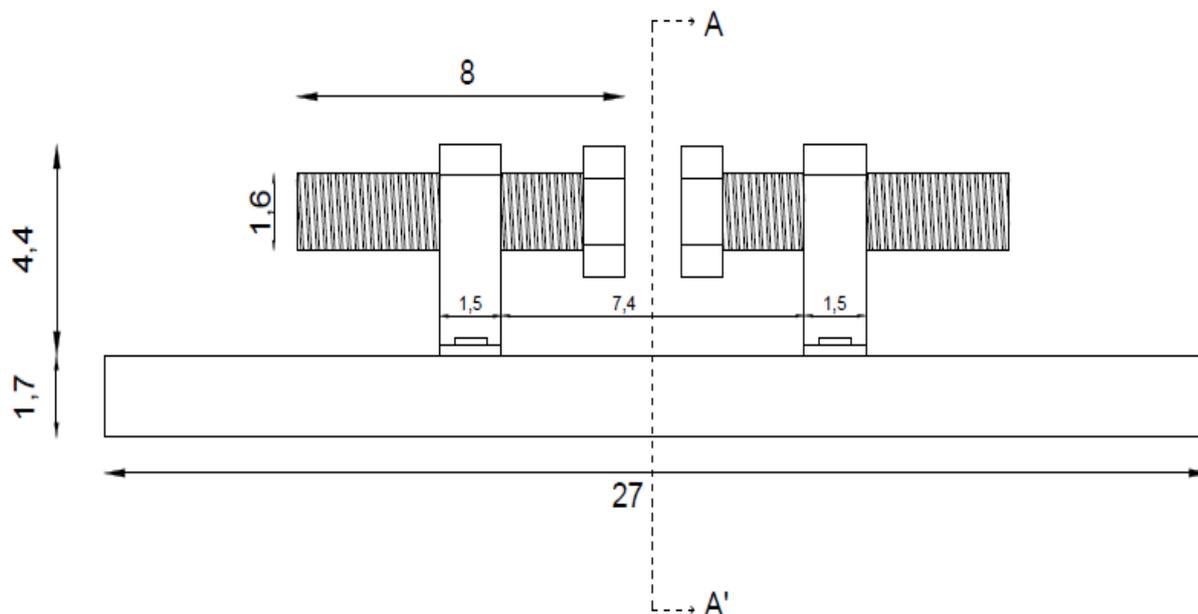
Το συγκεκριμένο όργανο παρέχει μετρήσεις χωρητικότητας-εμπέδησης (C-Z), ωμικής αντίστασης-χωρητικής αντίδρασης (R- $X_C$ ) και ηλεκτρικής αγωγιμότητας – επιδεκτικότητας (G-B) με βασική ακρίβεια 0.05%.

Παράμετροι	Όρια Όργάνου	Ακρίβεια
R,Z,X	0,01mΩ έως 2GΩ	±0,05%
G,B	0,01nS έως 2kS	±0,05%
C	1fF έως 1F	±0,05%

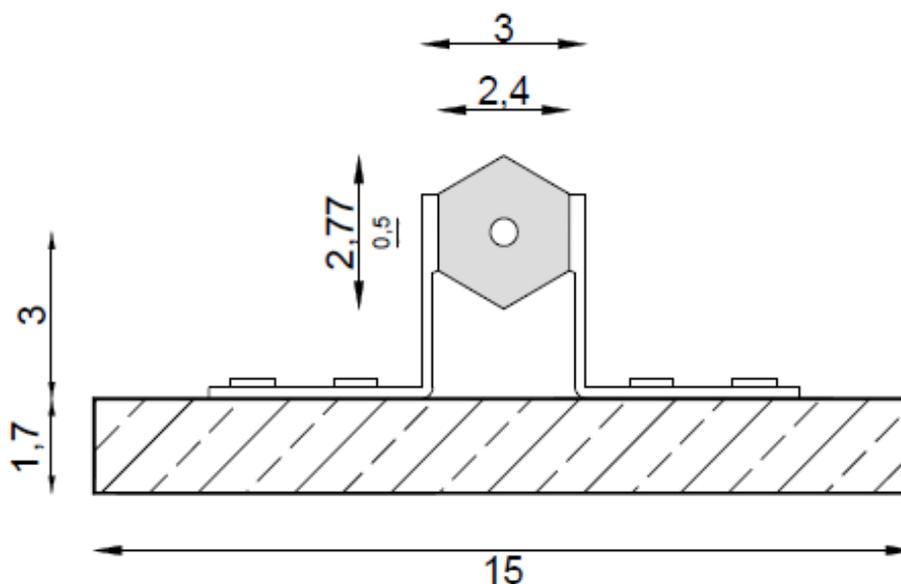
**Πίνακας 5.3:** Μετρούμενα μεγέθη και ακρίβεια που παρέχει το όργανο μέτρησης LCR.

## 5.7 Μελέτη - Κατασκευή Διάταξης Προσαρμογής ΣΥΠΜ

Για την μέτρηση των παραμέτρων των πυκνωτών που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των ηλεκτρονικών φίλτρων απαιτήθηκε η μελέτη και η κατασκευή διάταξης, στην οποία θα προσαρμοζόταν κάθε φορά, ως διηλεκτρικό μέσο, ένα από τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας που αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Παρακάτω παρατίθενται τα μελετητικά σχέδια της εν λόγω διάταξης:



Σχέδιο 5.1: Πρόσοψη Διάταξης Προσαρμογής ΣΥΠΜ.



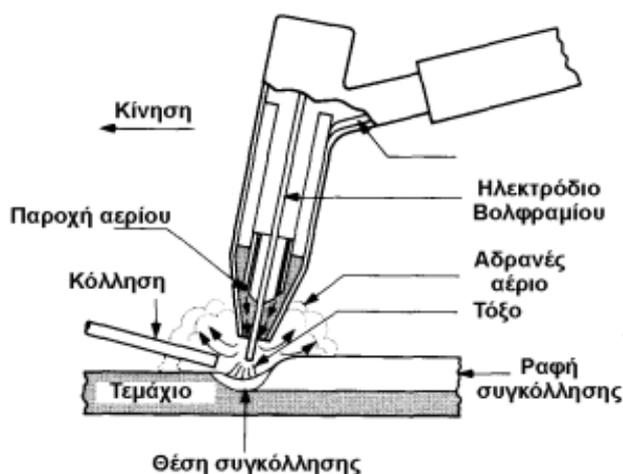
Σχέδιο 5.2: Τομή Διάταξης Προσαρμογής ΣΥΠΜ.

\* Όλες οι διαστάσεις είναι σε cm.

Για την κατασκευή της εν λόγω διάταξης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω υλικά:

- i. 4 Σιδερένιες μεταλλικές γωνίες.
- ii. 2 Ανοξείδωτα περικόχλια βιδών M16.
- iii. 2 Βίδες από PVC: 16 x 80 mm.
- iv. 1 Κομμάτι ξύλου με διαστάσεις: 27 x 15 x 1,7 cm.
- v. 4 Βίδες: 4 x 16 mm.

Στη συνέχεια έγινε ηλεκτροσυγκόλληση με την μέθοδο TIG μεταξύ των μεταλλικών γωνιών και των ανοξείδωτων βιδών. Η μέθοδος TIG χρησιμοποιείται για μόνωση της θέσης συγκόλλησης από τον αέρα, δηλαδή ουσιαστικά από το οξυγόνο και το άζωτο που επηρεάζουν τη συγκόλληση. Για τη μόνωση αυτή χρησιμοποιούνται τα αέρια Αργό (Ar) και Ήλιο (He). Από τα δύο αυτά αέρια χρησιμοποιείται περισσότερο το αργό, γιατί η παραγωγή του έχει μικρότερο κόστος.[29]



**Εικόνα 5.9:** Ηλεκτροσυγκόλληση με την μέθοδο TIG. [29]

Κατόπιν, έγινε οριζόντια οπή διαμέτρου 0,5cm με ηλεκτρικό τριπάνι κατά μήκος των 2 βιδών από PVC, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα εισόδου των καλωδίων των οπλισμών του εκάστοτε πυκνωτή. Η επιλογή των βιδών από PVC έγινε με σκοπό την αποφυγή διαρροής ρεύματος κατά τις μετρήσεις στο όργανο μέτρησης LCR και την μόνωση των οπλισμών του εκάστοτε πυκνωτή.

Στην συνέχεια, έγινε η τοποθέτηση των μεταλλικών γωνιών-ανοξείδωτων περικόχλιων σε κομμάτι από ξύλο, όπου βιδώθηκαν με 4 βίδες το καθένα πάνω σε αυτό, ώστε να υπάρχει κατά το δυνατόν η μικρότερη ροπή κατά το σφύξιμο των 2 PVC βιδών.

Παρακάτω, παρατίθεται η φωτογραφία της εν λόγω κατασκευής.

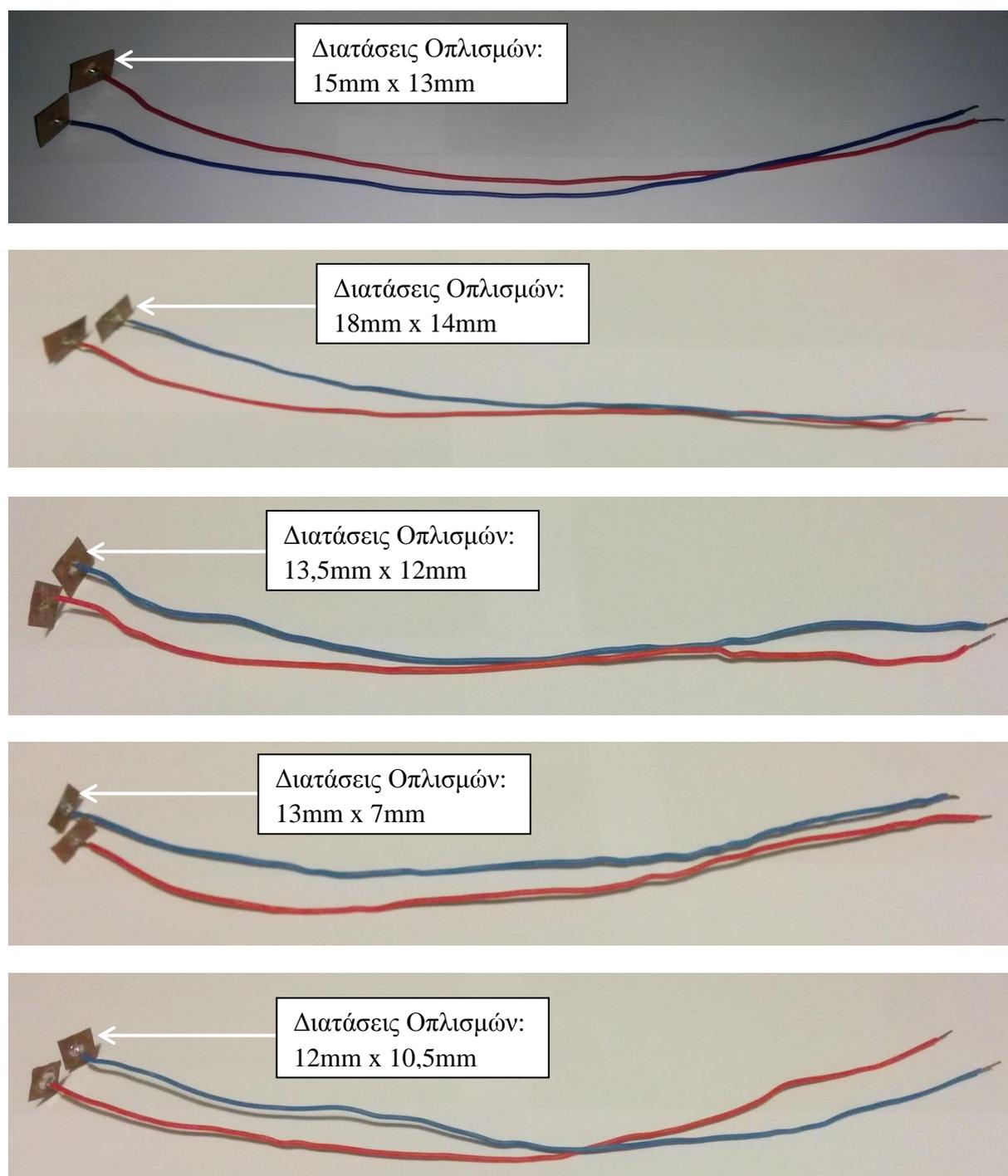


**Εικόνα 5.10:** Αυτοσχέδια Διάταξη Προσαρμογής ΣΥΠΜ.

Στην συνέχεια πραγματοποιήθηκε η κόλληση φύλλων χαλκού με συγκεκριμένες διαστάσεις (βλ. Πίνακα 5.4 ) με μονόκλινα καλώδια (1mm) μήκους 24-27cm. Η κόλληση έγινε με χρήση ηλεκτρικού θερμοκολλητικού εργαλείου (κολλητήρι). Οι διαστάσεις των οπλισμών είναι μικρότερες από τις διαστάσεις των σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας, ώστε να μην υπάρχει αλληλοεπικάλυψη του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου από τους 2 οπλισμούς. Συνολικά, έχουμε 5 ζεύγη καλωδίων-οπλισμών για τους κατασκευασθείς πυκνωτές. Τα ζεύγη αλλάζουν στην διάταξη μας ανάλογα με το εκάστοτε διηλεκτρικό-συνθετο υλικό κάθε φορά.

Είδος ΣΥΠΜ	Πάχος (mm)	Διαστάσεις ΣΥΠΜ (mm)	Διαστάσεις Οπλισμών (mm)
NV - BT	3,0	19mm x 17mm	12mm x 10,5mm
M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub> -BT	3,0	24mm x 17mm	18mm x 14mm
M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub> -BT	3,13	23mm x 17mm	
M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub> -BT	3,09	16mm x 17mm	13,5mm x 12mm
M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub> - BT	3,01	19mm x 17mm	
M <sub>6</sub> A <sub>4</sub> -BT	3,0	16mm x 11mm	13mm x 7mm
CUP-BT	3,0	16mm x 13mm	
CER-BT	2,90	18,5mm x 16mm	15mm x 13mm

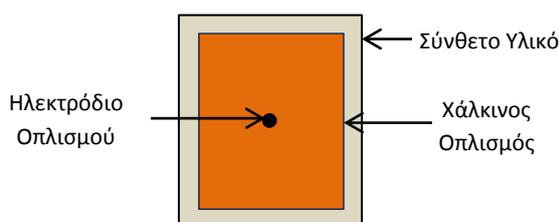
**Πίνακας 5.4:** Διαστάσεις ΣΥΠΜ & Διαστάσεις Οπλισμών Χαλκού.



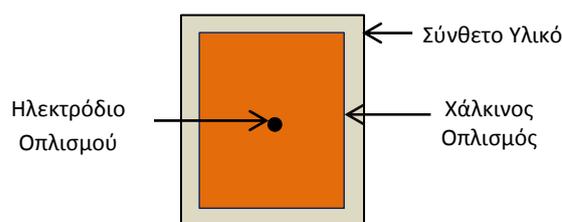
Εικόνα 5.11: Οπλισμοί Φύλων Χαλκού.

## 5.8 Πειραματική Διαδικασία

Στην αυτοσχέδια διάταξη η οποία περιγράφηκε προηγουμένως, τοποθετούνταν κάθε φορά οι εκάστοτε οπλισμοί με το ανάλογο σε μέγεθος διηλεκτρικό – σύνθετο υλικό πολυμερικής μήτρας και συνδέαμε τα ηλεκτρόδια των οπλισμών στον υποδοχέα του οργάνου μέτρησης LCR. Τα διηλεκτρικά – σύνθετα υλικά τοποθετούνταν κατά τέτοιο τρόπο, ώστε το κέντρο και οι πλευρές των οπλισμών να βρίσκονται κατά το δυνατόν στους ίδιους οριζόντιους άξονες, και να μην υπάρχει επικάλυψη ηλεκτρικού πεδίου.



**Σχήμα 5.6:** Αριστερή Όψη Οπλισμού - Διηλεκτρικού Υλικού



**Σχήμα 5.7:** Δεξιά Όψη Οπλισμού - Διηλεκτρικού Υλικού

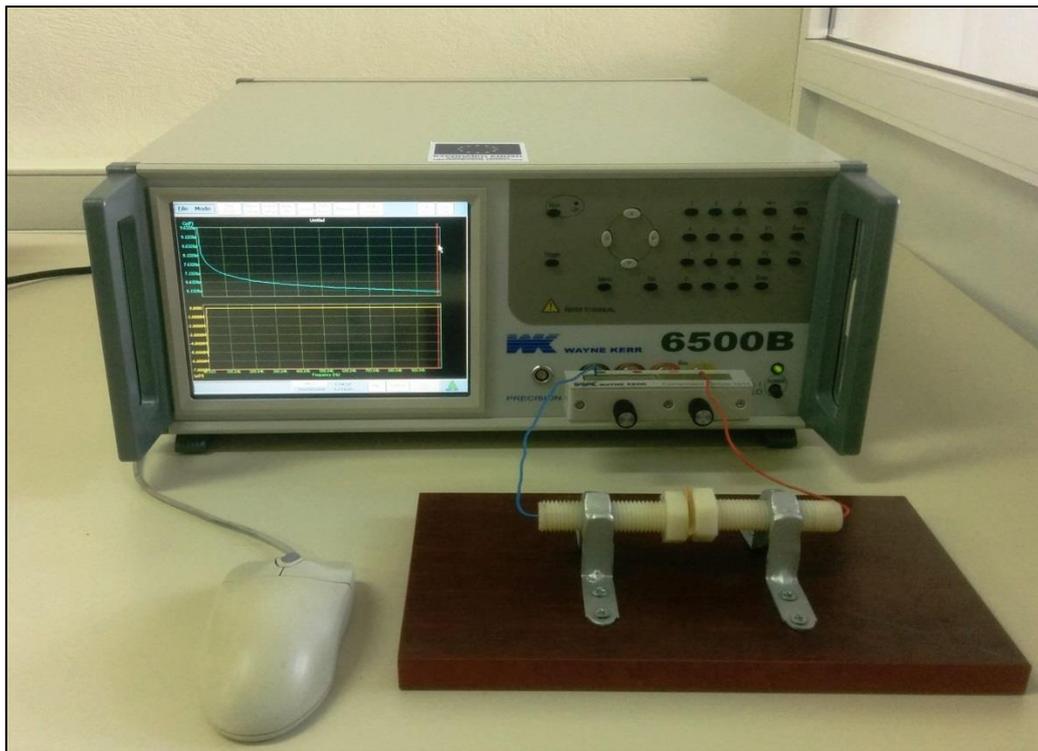
Για τα διηλεκτρικά – σύνθετα υλικά με τους τύπους  $M_1A_3PA_6$ -BT &  $M_7A_2PA_1$ -BT χρησιμοποιήθηκαν οι οπλισμοί με διαστάσεις **18mm x 14mm**, για τα διηλεκτρικά  $M_3A_4PA_2$ -BT &  $M_4A_2PA_2$ -BT οι οπλισμοί με διαστάσεις **13,5mm x 12mm**, για τα διηλεκτρικά  $M_6A_4$ -BT & CUP-BT οι οπλισμοί με διαστάσεις **13mm x 7mm**, για την εποξειδική ρητίνη CER-BT οι οπλισμοί **15mm x 13mm** και για την νεολάκη NV-TB οι οπλισμοί **12mm x 10,5mm**.

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν ως εξής: τοποθετούσαμε κάθε φορά τους οπλισμούς με τις ανάλογες διαστάσεις στην αυτοσχέδια διάταξη και στερεώναμε με παράλληλο σφύξιμο των βιδών της διάταξης το σύνθετο κάθε φορά υλικό μας. Συνδέαμε τα ηλεκτρόδια των οπλισμών στον υποδοχέα του οργάνου μέτρησης LCR και πέρναμε μετρήσεις για τα μεγέθη  $C_p$ ,  $R_p$ ,  $X_p$ ,  $Z_p$ ,  $G_p$  και  $B_p$  του εκάστοτε υλικού για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

Οι παράμετροι που ορίζονταν για τις μετρήσεις στο όργανο μέτρησης LCR ήταν:

1. Κλίμακα συχνοτήτων: Αναλογική
2. Μετρούμενα μεγέθη:  $C_p$ ,  $R_p$ - $X_p$ ,  $Z_p$ ,  $G_p$ - $B_p$  (χωρητικότητα, ωμική αντίσταση – χωρητική αντίδραση, μέτρο εμπέδησης, ηλεκτρική αγωγιμότητα – επιδεκτικότητα: σε παράλληλη σύνδεση)
3. Υποδοχή οργάνου μέτρησης LCR: 1J1011
4. Ζώνη συχνοτήτων:  $f_{start}=10$  kHz ,  $f_{stop}=1$  MHz
5. Συχνотικό Βήμα: 10100,8 Hz
5. Ταχύτητα Μετρήσεων: Maximum Speed
6. Χρόνος μεταξύ των μετρήσεων: 70ms
7. Πλάτος τάσης: 1V
8. Integration factor: long (εσωτερική ρύθμιση του οργάνου)
9. Σε κάθε συχνότητα το αποτέλεσμα ήταν ο μέσος όρος 16 μετρήσεων.

Στην συνέχεια αποθηκεύτηκαν οι μετρήσεις σε USB flash και επαναλήφθηκε η ίδια διαδικασία για τα υπόλοιπα σύνθετα υλικά. Όλες οι μετρήσεις έγιναν σε συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία: 20 – 30°C και υγρασία: 30 – 40%) και η μηχανική πίεση που ασκούνταν κάθε φορά στο σύνθετο υλικό ήταν η μέγιστη από το σφύξιμο το βιδών. Εξαιρέση αποτελεί το σύνθετο υλικό νεολάκη NV-BT στο οποίο δεν ασκήθηκε η μέγιστη μηχανική πίεση από τις βίδες της αυτοσχέδιας διάταξης, καθώς το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό χαρακτηρίζεται από φτωχές μηχανικές ιδιότητες.



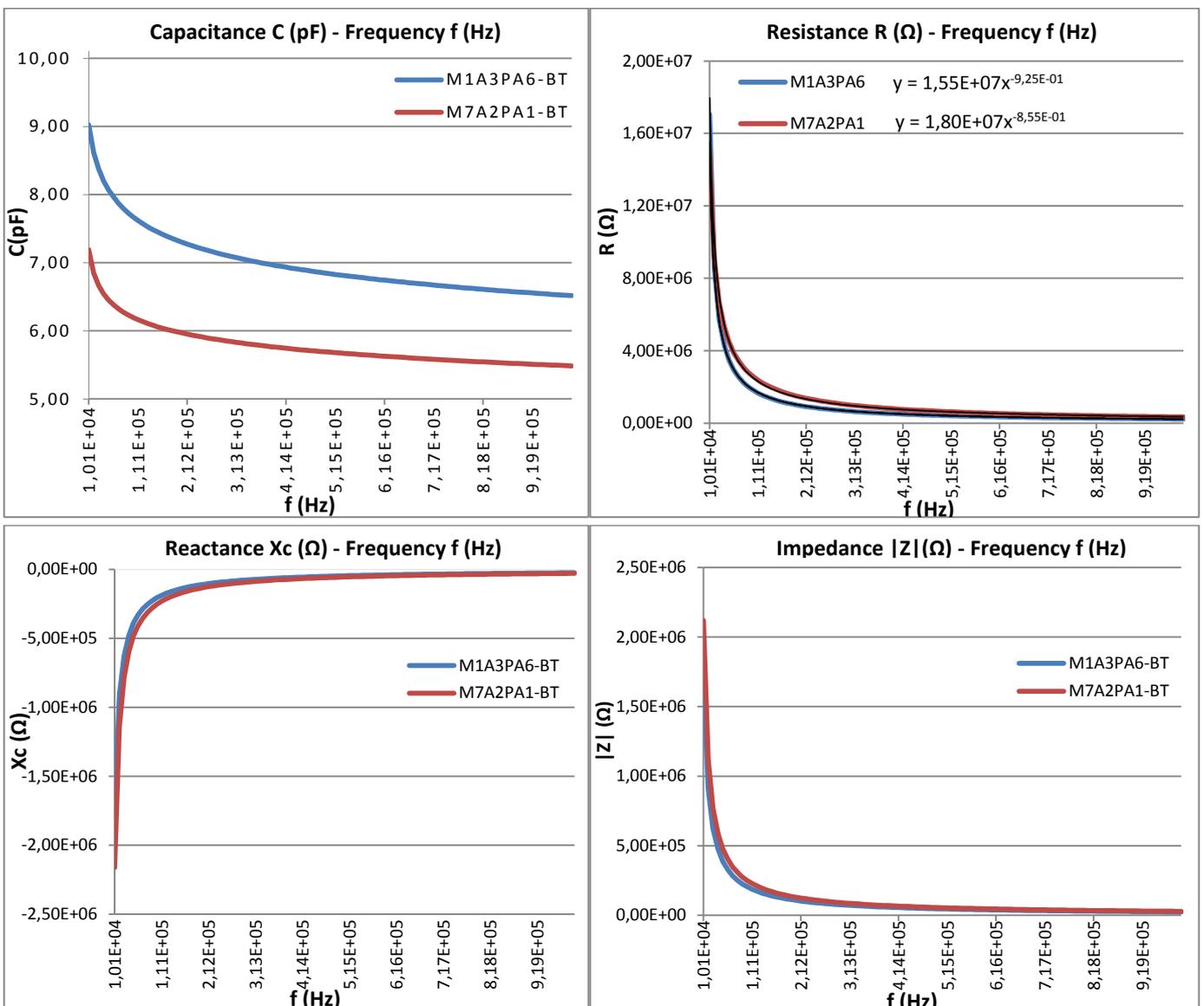
**Εικόνα 5.12:** Σύνδεση Οργάνου μέτρησης LCR με Πυκνωτή.

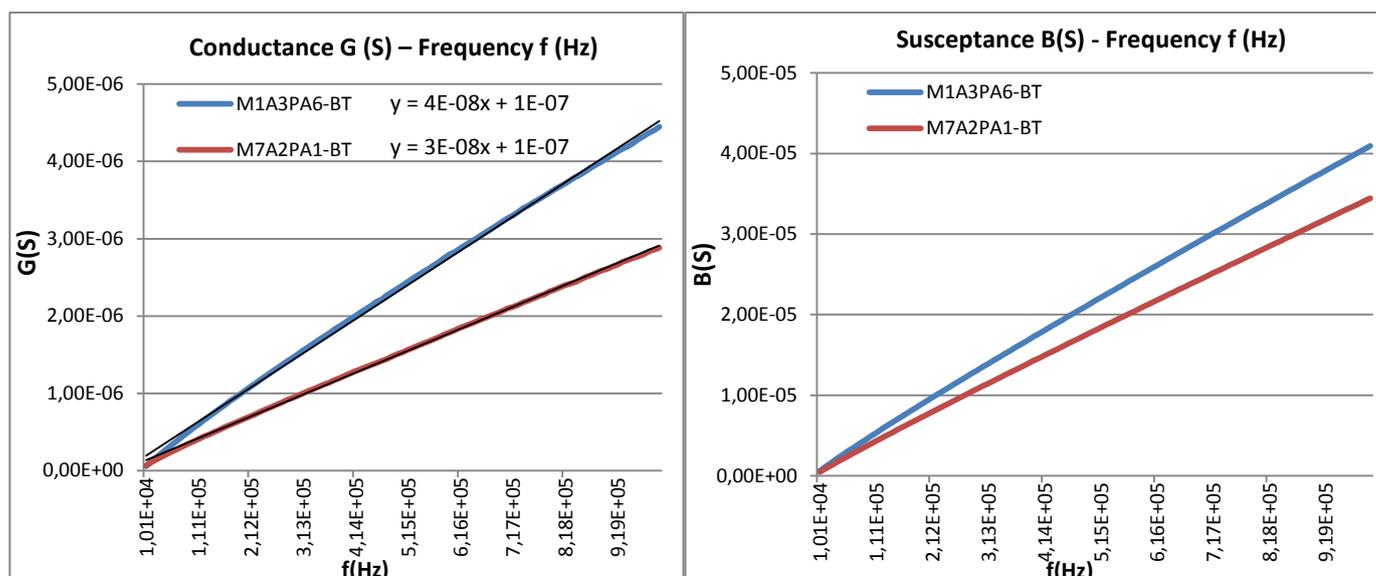
Στο Παράρτημα παραθέτονται αναλυτικά οι τιμές για την χωρητικότητα ( $C$ ), την ωμική αντίσταση ( $R$ ), την χωρητική αντίδραση ( $X_c$ ), το μέτρο της σύνθετης αντίστασης ( $|Z|$ ), την ηλεκτρική αγωγιμότητα  $G(S)$  και την επιδεκτικότητα ( $B$ ) των 6 σύνθετων υλικών πολυμερικής μήτρας ακόρεστων πολυεστέρων, εποξειδικής ρητίνης και της νεολάκης με συχνοτικό βήμα  $f_{\beta\eta\mu\alpha}=10100,8\text{Hz}$ .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: Αποτελέσματα Μετρήσεων

Στο κεφάλαιο αυτό δίδονται τα διαγράμματα όπως προέκυψαν, σύμφωνα με την πειραματική διαδικασία η οποία περιγράφεται στην Παράγραφο 5.8, σχετικά με την χωρητικότητα, την ωμική αντίσταση, την χωρητική ανίδραση, την εμπέδηση, την ηλεκτρική αγωγιμότητα και την επιδεκτικότητα των πυκνωτών που έχουν ως διηλεκτρικό υλικό ένα από τα σύνθετα υλικά M<sub>1</sub>A<sub>3</sub>PA<sub>6</sub>-BT, M<sub>7</sub>A<sub>2</sub>PA<sub>1</sub>, M<sub>3</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>3</sub>-BT, M<sub>4</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>2</sub>-BT, M<sub>6</sub>A<sub>4</sub>-BT, CUP-BT, NV-BT και CER-BT για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz και για συνθήκες δωματίου (20-30°C και υγρασία 30-40%).

### 6.1 Πυκνωτές με Διηλεκτρικά τα M<sub>1</sub>A<sub>3</sub>PA<sub>6</sub> – BT & M<sub>7</sub>A<sub>2</sub>PA<sub>1</sub> – BT





**Εικόνα 6.1:** Συγκριτικά Διαγράμματα των πυκνωτών με διηλεκτρικά τα  $M_1A_3PA_6$ -BT και  $M_7A_2PA_1$ -BT ως προς C, R, Xc, Z, G και B για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

### 6.1.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με Διηλεκτρικά τα $M_1A_3PA_6$ – BT & $M_7A_2PA_1$ – BT

Ο πυκνωτής που εμπεριέχει ως διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_1A_3PA_6$  – BT 10% w/w έχει τις ίδιες διαστάσεις σπλισμών (18mm x 14mm) με τον πυκνωτή που έχει ως διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_7A_2PA_1$  – BT 10% w/w.

#### - Διάγραμμα C(pF) – f (Hz)

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα παρατηρούμε ότι ο πυκνωτής με διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_1A_3PA_6$  – BT 10% w/w έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_7A_2PA_1$  – BT 10% w/w σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz. Το γεγονός αυτό οφείλεται έξι φορές μεγαλύτερη ποσότητα φθαλικού ανυδρίτη που έχει χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή του σύνθετου υλικού  $M_1A_3PA_6$  – BT 10%. Ακόμα, παρατηρούμε στο εν λόγω διάγραμμα ότι οι χωρητικότητες μειώνονται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας, το οποίο είναι λογικό καθώς η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή επειδή τα δίπολα λόγω αδράνειας δεν ακολουθούν τον προσανατολισμό του πεδίου με αποτέλεσμα την ελάττωση της πόλωσης του υλικού που εκδηλώνεται με ελάττωση της διηλεκτρικής σταθεράς και κατά συνέπεια την μείωση της χωρητικότητας.

#### - Διάγραμμα R(Ω) – f(Hz)

Στο διάγραμμα αυτό η ωμική παράλληλη αντίσταση και των δύο πυκνωτών μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας, καθώς όπως γνωρίζουμε από την θεωρία το ρεύμα απωλειών  $I_{loss}$  είναι ανάλογο της κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Με την αύξηση της συχνότητας οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων αυξάνονται μέσα από την αγωγιμότητα όγκου του εκάστοτε συστήματος μόνωσης.

- Διάγραμμα  $X_c(\Omega) - f(\text{Hz})$

Η χωρητική αντίδραση και των δύο πυκνωτών αυτών αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας καθώς όπως είναι γνωστό από τη θεωρία ισχύει ότι:  $X_C = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $X_c \rightarrow 0$ . Οι πυκνωτές τείνουν να συμπεριφερθούν ως βραχυκυκλώματα στις μεγάλες συχνότητες.

- Διάγραμμα  $|Z|(\Omega) - f(\text{Hz})$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζουν οι δύο αυτοι πυκνωτές μειώνεται σύναρτηση της συχνότητας καθώς ισχύει ότι:  $|Z_p| = \frac{R \cdot X_c}{\sqrt{(R^2 + X_c^2)}}$ , όπου οι όροι R και  $|X_c|$  μειώνονται εκθετικά όπως αναφέραμε προηγουμένως. Ισχύει ότι:  $|Z|_{M1A3PA6-BT} \approx |Z|_{M7A2PA1-BT}$ .

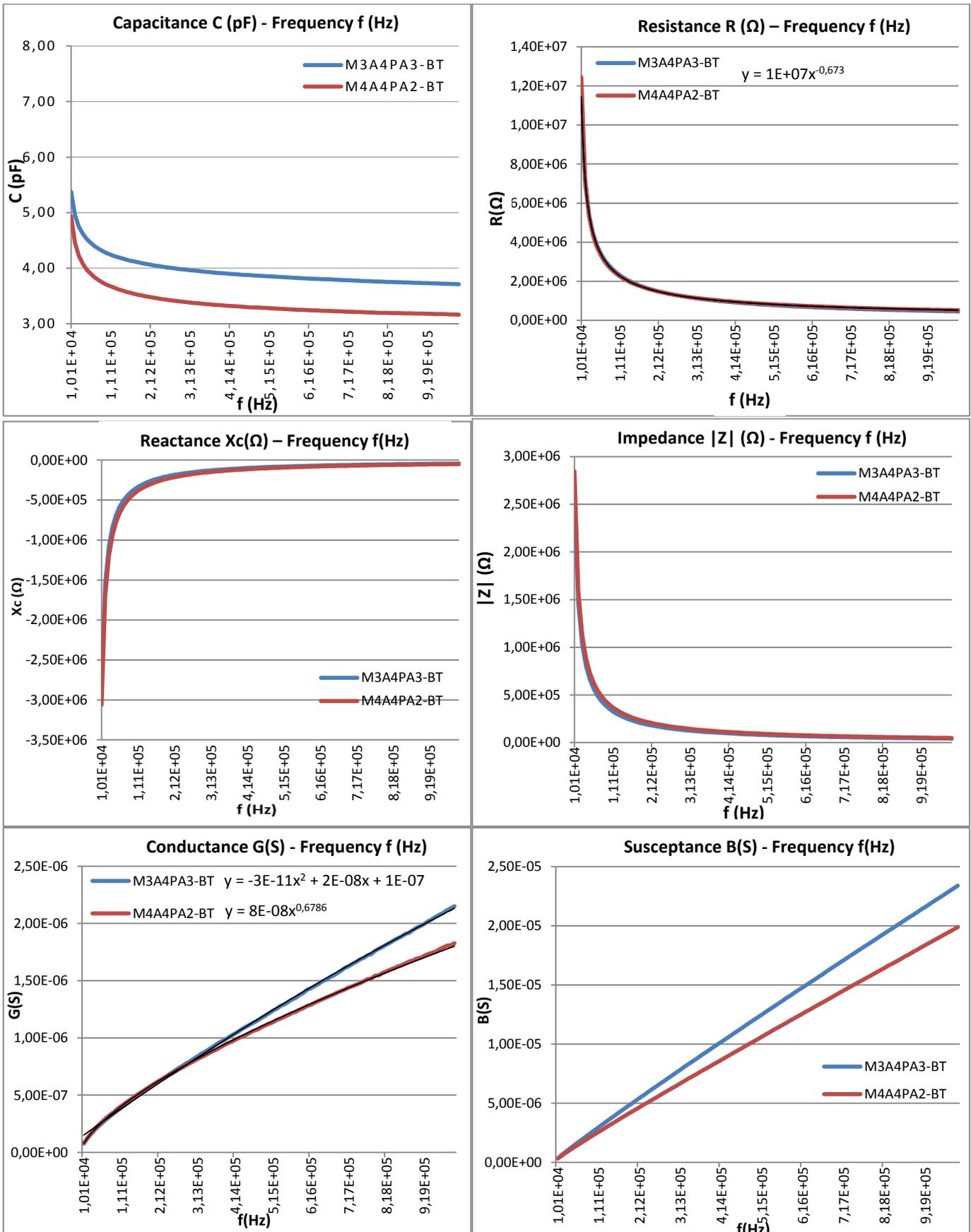
- Διάγραμμα  $G(S) - f(\text{Hz})$

Το διάγραμμα ηλεκτρικής αγωγιμότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της παράλληλης ωμικής αντίστασης του πυκνωτή. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα και των δύο πυκνωτών αυξάνεται με την αύξηση της συχνότητας γραμμικά. Η γραμμική σχέση που δείχνει την αύξηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την συχνότητα για τον πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_1A_3PA_6 - BT$  10% w/w είναι:  $\gamma = 4E-08x + 1E-07$ , ενώ για τον πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_7A_2PA_1 - BT$  10% w/w είναι:  $\gamma = 3E-08x + 1E-07$ . Η κλίση της ευθείας για τον πρώτο πυκνωτή (Πυκνωτής:  $M_1A_3PA_6 - BT$  10%) είναι μεγαλύτερη από αυτή του δεύτερου (Πυκνωτής:  $M_7A_2PA_1 - BT$  10% w/w) κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων μέσα από τον όγκο του πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_1A_3PA_6 - BT$  είναι μεγαλύτερες από ότι στον πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_7A_2PA_1 - BT$  όπως φαίνεται από το διάγραμμα R-f.

- Διάγραμμα  $B(S) - f(\text{Hz})$

Το διάγραμμα επιδεκτικότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Η επιδεκτικότητα των πυκνωτών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας. Ισχύει από τη θεωρία ότι:  $B = 2\pi f \cdot C \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $B \rightarrow \infty$ . (Η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή.)

## 6.2 Πυκνωτές με Διηλεκτρικά τα $M_3A_4PA_3 - BT$ & $M_4A_4PA_2 - BT$



Εικόνα 6.2: Συγκριτικά Διαγράμματα των πυκνωτών με διηλεκτρικά τα  $M_3A_4PA_3-BT$  και  $M_4A_4PA_2-BT$  ως προς C, R,  $X_c$ , Z, G και B για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

### 6.2.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με Διηλεκτρικά τα $M_3A_4PA_3 - BT$ & $M_4A_4PA_2 - BT$

Ο πυκνωτής που εμπεριέχει ως διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_3A_4PA_3 - BT$  10% w/w έχει τις ίδιες διαστάσεις οπλισμών (13,5mm x 12mm) με τον πυκνωτή που έχει ως διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_4A_4PA_2 - BT$  10% w/w.

#### - Διάγραμμα $C(pF) - f(Hz)$

Στο διάγραμμα χωρητικότητας - πυκνότητας παρατηρούμε ότι ο πυκνωτής με διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_3A_4PA_3 - BT$  10% w/w έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_4A_4PA_2 - BT$  10% w/w σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz. Ωστόσο, μετά τα 50kHz, παρατηρούμε ότι η διαφορά χωρητικότητας μεταξύ αυτών των δύο πυκνωτών σε όλο το φάσμα συχνοτήτων είναι της τάξεως των 0,5pF. Αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς οι αναλογίες των αρχικών ενώσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνθεση των εν λόγω συνθέτων είναι περίπου οι ίδιες. Ακόμα, παρατηρούμε στο εν λόγω διάγραμμα ότι οι χωρητικότητες μειώνονται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας, καθώς η  $C$  για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή επειδή τα δίπολα λόγω αδράνειας δεν ακολουθούν τον προσανατολισμό του πεδίου.

#### - Διάγραμμα $R(\Omega) - f(Hz)$

Στο διάγραμμα αυτό η καμπύλη που απεικονίζει την ωμική παράλληλη αντίσταση του πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_3A_4PA_3 - BT$  10% w/w συμπέφτει με την καμπύλη της αντίστοιχης αντίστασης του πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_4A_4PA_2 - BT$  10% w/w. Η αιτία του γεγονότος αυτού είναι ότι τα διηλεκτρικά μέσα που έχουν χρησιμοποιηθεί σε αυτούς τους πυκνωτές έχουν παραπλήσιες αναλογίες αρχικών πρώτων υλών.

#### - Διάγραμμα $X_c(\Omega) - f(Hz)$

Η χωρητική αντίδραση και των δύο πυκνωτών αυτών αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας καθώς όπως είναι γνωστό από τη θεωρία ισχύει ότι:  $X_C = -\frac{1}{2\pi f C} \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $X_c \rightarrow 0$ . Για τον ίδιο λόγο, όπως προηγουμένως η καμπύλη της χωρητικής αντίδρασης του πρώτου πυκνωτή συμπέφτει με την αντίστοιχη καμπύλη του δεύτερου.

#### - Διάγραμμα $|Z|(\Omega) - f(Hz)$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζουν οι δύο αυτοί πυκνωτές μειώνεται σύναρτηση της συχνότητας καθώς ισχύει ότι:  $|Z_P| = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{(R^2 + X_C^2)}}$ , όπου οι όροι  $R$  και  $|X_c|$  μειώνονται εκθετικά όπως αναφέραμε προηγουμένως. Είναι  $Z_{M_3A_4PA_3 - BT} \approx Z_{M_4A_4PA_2 - BT}$ , αφού  $R_{M_3A_4PA_3 - BT} \approx R_{M_4A_4PA_2 - BT}$  και  $X_{C_{M_3A_4PA_3 - BT}} \approx X_{C_{M_4A_4PA_2 - BT}}$ .

#### - Διάγραμμα $G(S) - f(Hz)$

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_3A_4PA_3 - BT$  10% w/w αυξάνεται σύμφωνα με την πολυωνική σχέση:  $y = -3E-11x^2 + 2E-08x + 1E-07$ , ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_4A_4PA_2 - BT$  10% w/w σύμφωνα με τη σχέση:  $y = 8E-08x^{0,6786}$ . Οι καμπύλες της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δύο αυτών πυκνωτών συμπέφτουν

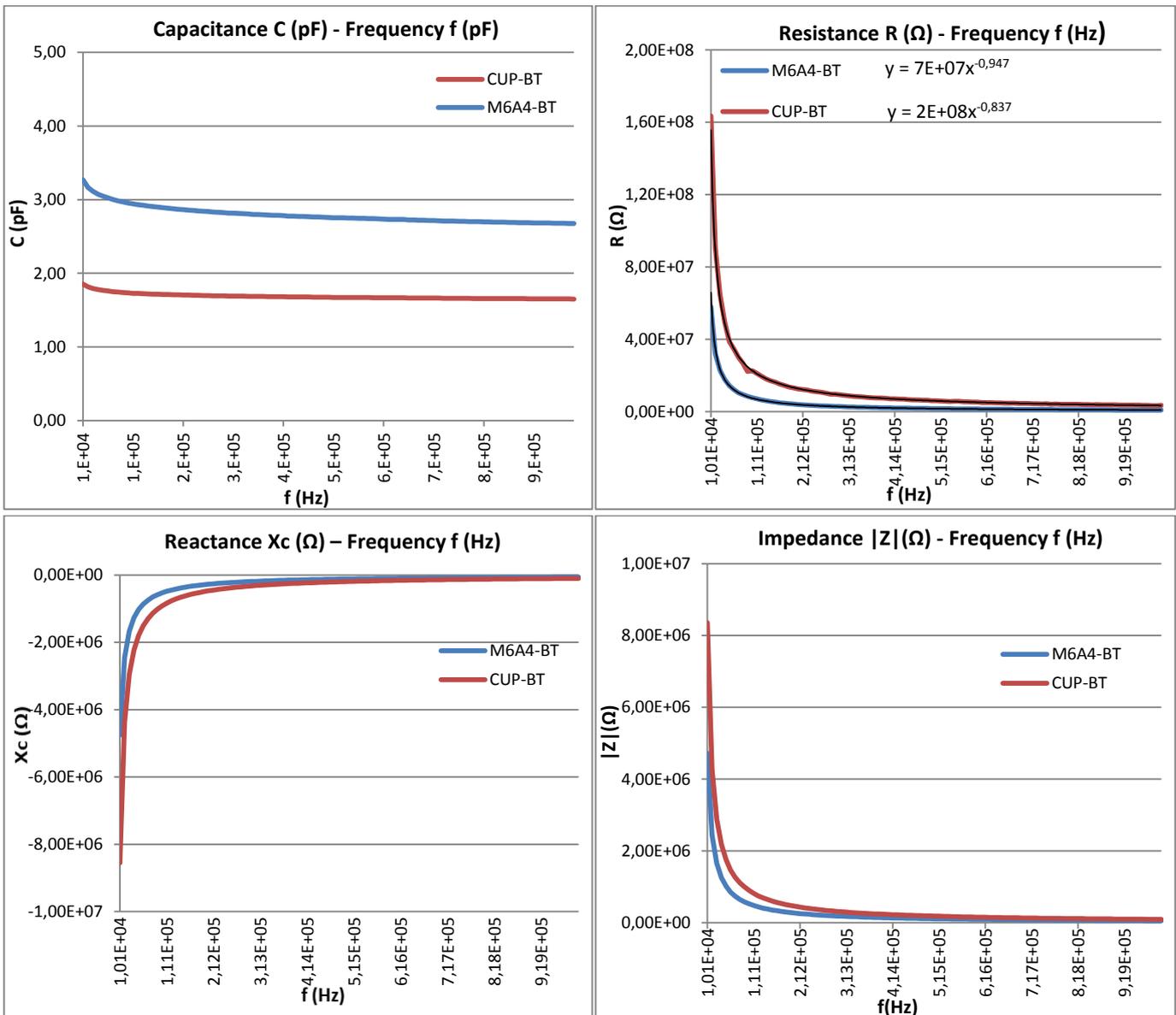
μέχρι την συχνότητα των 300kHz, ενώ πάνω από τα 300kHz έχουν μικρή σχετικά απόκλιση μεταξύ τους.

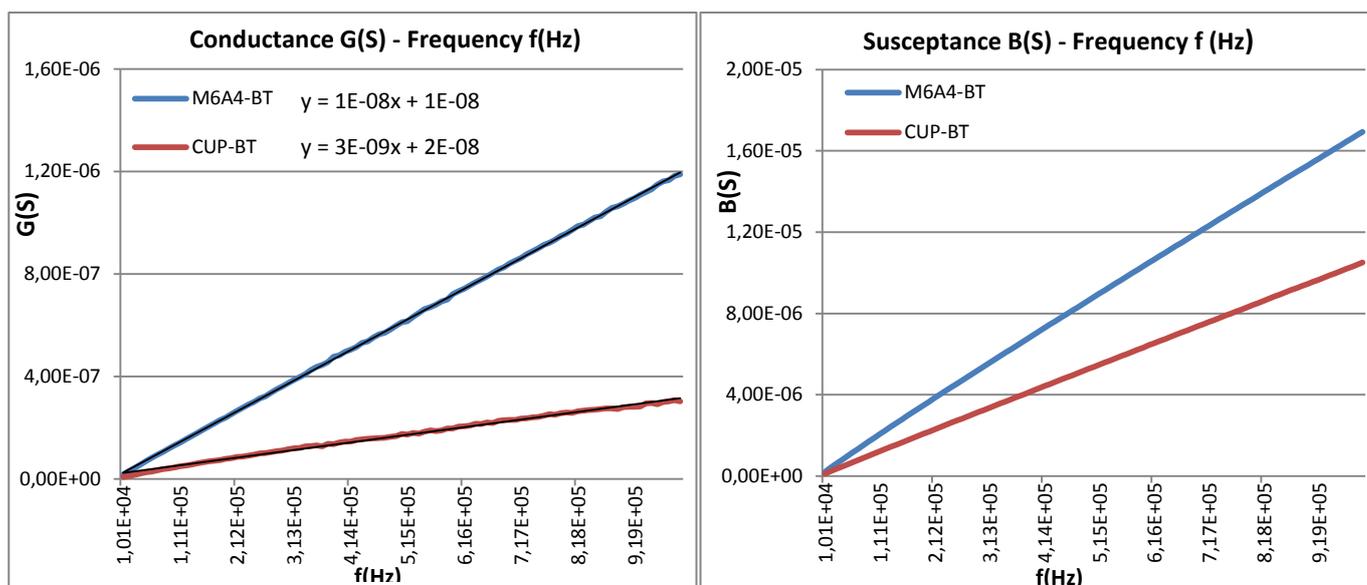
- Διάγραμμα B(S) – f(Hz)

Το διάγραμμα επιδεκτικότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Η επιδεκτικότητα των πυκνωτών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας. Ισχύει από τη θεωρία ότι:  $B = 2\pi f \cdot C \cdot j$ .

Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $B \rightarrow \infty$ . ( Η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή.)

**6.3 Πυκνωτές με Δηλεκτρικά τα M<sub>6</sub>A<sub>4</sub> – BT & CUP – BT**





**Εικόνα 6.3:** Συγκριτικά Διαγράμματα των πυκνωτών με διηλεκτρικά τα  $M_6A_4$ -BT και CUP-BT ως προς C, R,  $X_c$ , Z, G και B για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

### 6.3.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων των Πυκνωτών με Διηλεκτρικά τα $M_6A_4$ – BT & CUP – BT

Ο πυκνωτής που εμπεριέχει ως διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_6A_4$  – BT 10% w/w έχει τις ίδιες διαστάσεις οπλισμών (13mm x 7mm) με τον πυκνωτή που έχει ως διηλεκτρικό το σύνθετο CUP – BT 10% w/w.

#### - Διάγραμμα C(pF) – f (Hz)

Στο διάγραμμα χωρητικότητας - συχνότητας παρατηρούμε ότι ο πυκνωτής με διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό  $M_6A_4$  – BT 10% w/w έχει μεγαλύτερη χωρητικότητα από τον πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό CUP – BT 10% w/w σε όλο το φάσμα των συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz. Επίσης, ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό CUP-BT (εμπορικός ακόρεστος πολυεστέρας – τιτανικό βάριο) παρουσιάζει μία σχεδόν σταθερή χωρητικότητα συναρτήση της συχνότητας. Τα δίπολα του εμπορικού ακόρεστου πολυεστέρα δεν ακολουθούν τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου.

#### - Διάγραμμα R( $\Omega$ ) – f(Hz)

Στο διάγραμμα αυτό η ωμική παράλληλη αντίσταση και των δύο πυκνωτών μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας, καθώς όπως γνωρίζουμε από την θεωρία το ρεύμα απωλειών  $I_{loss}$  είναι ανάλογο της κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Με την αύξηση της συχνότητας οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων αυξάνονται μέσα από την αγωγιμότητα όγκου του εκάστοτε συστήματος μόνωσης.

#### - Διάγραμμα $X_c$ ( $\Omega$ ) – f(Hz)

Η χωρητική αντίδραση και των δύο πυκνωτών αυτών αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας καθώς όπως είναι γνωστό από τη θεωρία ισχύει ότι:  $X_C = -\frac{1}{2\pi f C} \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $X_c \rightarrow 0$ . Ισχύει ότι:  $|X_c|_{CUP-BT} \geq |X_c|_{M_6A_4-BT}$  με μεγαλύτερη απόκλιση στις συχνοότητες από

50 έως 250kHz. Οι πυκνωτές τείνουν να συμπεριφερθούν ως βραχυκυκλώματα στις μεγάλες συχνότητες.

- Διάγραμμα  $|Z|(\Omega) - f(\text{Hz})$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης που παρουσιάζουν οι δύο αυτοι πυκνωτές μειώνεται σύμφωνα με την συχνότητα καθώς ισχύει ότι:  $|Z_p| = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$ , όπου οι όροι R και  $|X_C|$  μειώνονται εκθετικά όπως αναφέραμε προηγουμένως.

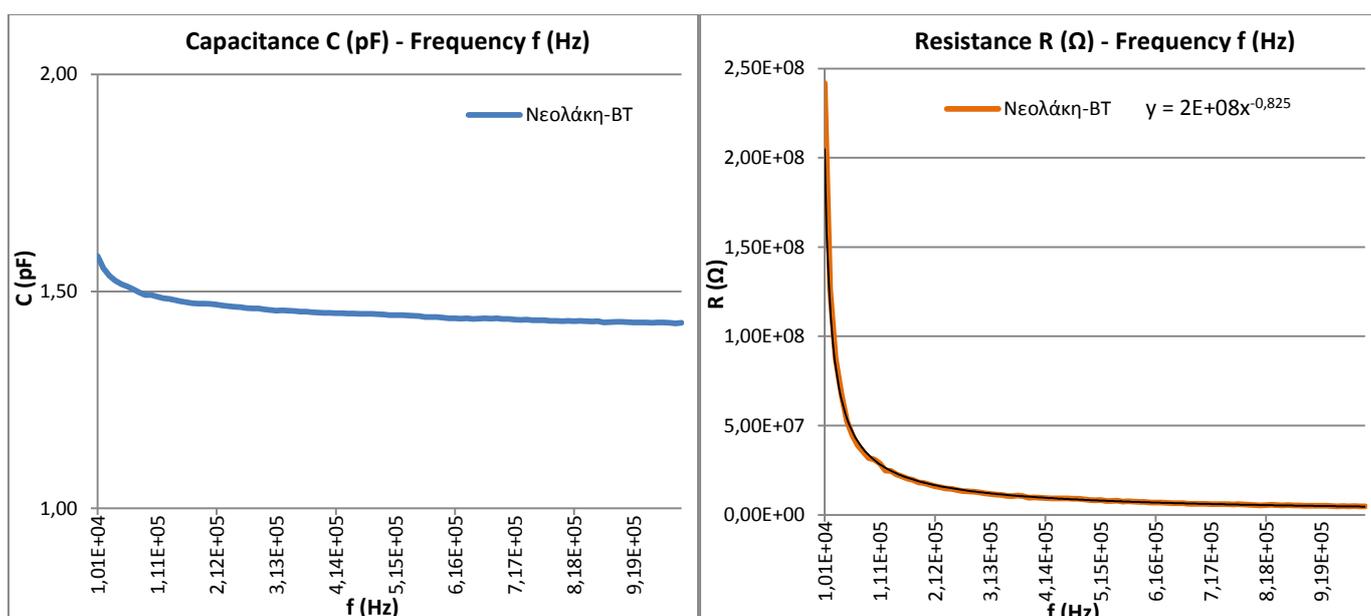
- Διάγραμμα  $G(S) - f(\text{Hz})$

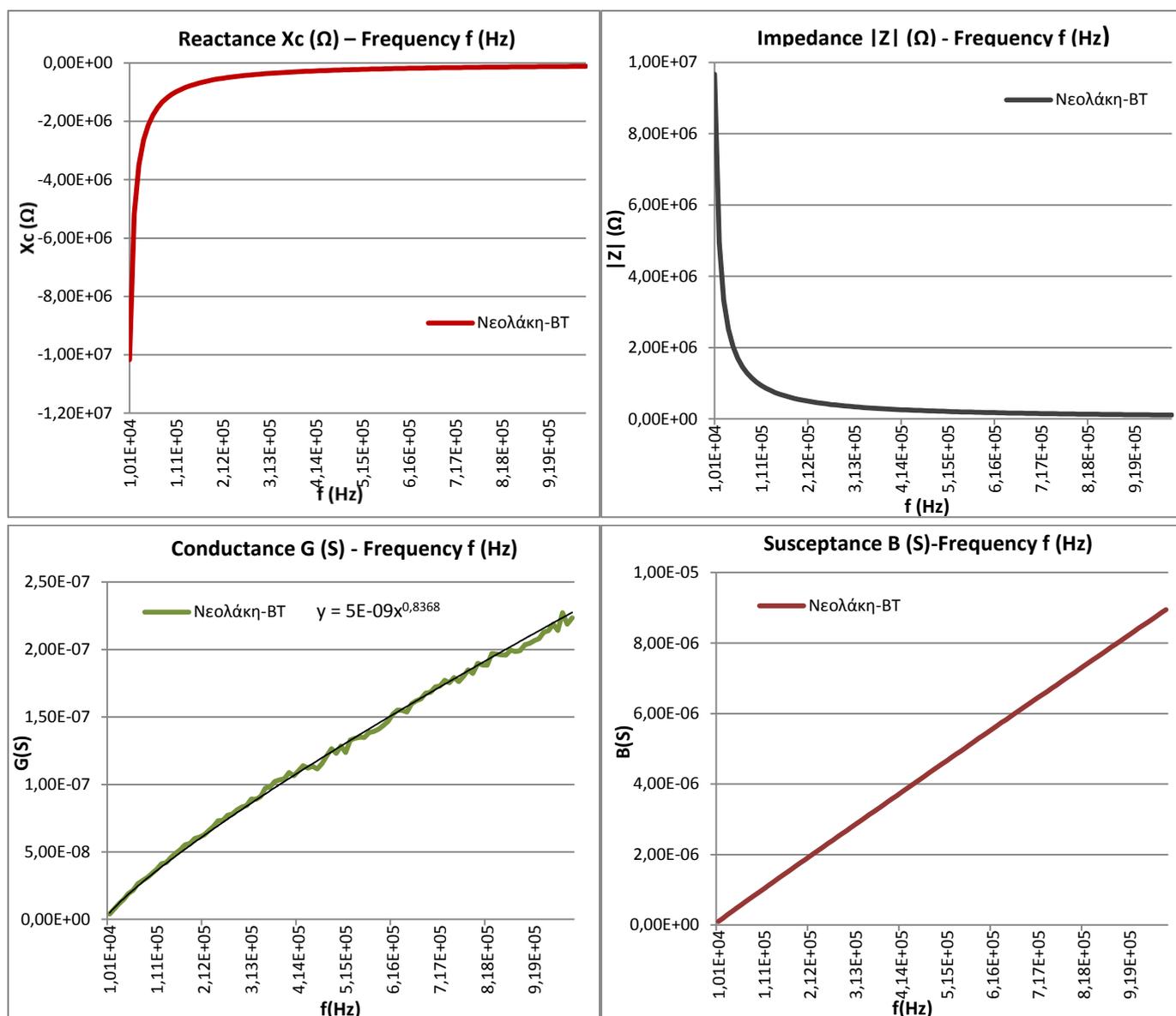
Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_6A_4 - BT$  10% w/w αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με την σχέση:  $\gamma = 3E-09x + 2E-08$ , ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό  $CUP - BT$  10% w/w σύμφωνα με τη σχέση:  $\gamma = 1E-08x + 1E-08$ . Η κλίση της ευθείας για τον πρώτο πυκνωτή (Πυκνωτής:  $M_6A_4 - BT$  10%) είναι μεγαλύτερη από αυτή του δεύτερου (Πυκνωτής:  $CUP - BT$  10% w/w) κάτι το οποίο είναι λογικό, καθώς οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων μέσα από τον όγκο του πυκνωτή με διηλεκτρικό  $M_6A_4 - BT$  είναι μεγαλύτερες από ότι στον πυκνωτή με διηλεκτρικό  $CUP - BT$  όπως φαίνεται από το διάγραμμα R-f.

- Διάγραμμα  $B(S) - f(\text{Hz})$

Το διάγραμμα επιδεκτικότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Η επιδεκτικότητα των πυκνωτών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας. Ισχύει από τη θεωρία ότι:  $B = 2\pi f \cdot C \cdot j$ . Είναι  $B_{M_6A_4 - BT} > B_{CUP - BT}$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $B \rightarrow \infty$ . ( Η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή.)

### 6.4 Πυκνωτής με Διηλεκτρικό τη Νεολάκη – BT





**Εικόνα 6.4:** Διαγράμματα του πυκνωτή με διηλεκτρικό την Νεολάκη - BT ως προς C, R, Xc, Z, G και B για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

#### 6.4.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων του Πυκνωτή με Διηλεκτρικό τη Νεολάκη – BT

Ο πυκνωτής που εμπεριέχει ως διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό Νεολάκη – BT 10% w/w έχει διαστάσεις οπλισμών 12mm x 10,5mm.

##### - Διάγραμμα C(pF) – f (Hz)

Στο διάγραμμα χωρητικότητας - συχνότητας παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό Νεολάκη – BT 10% w/w μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας. Στις υψηλές συχνότητες (> 600kHz) παρατηρούμε μία κυμάτωση της καμπύλης η οποία πιθανόν να οφείλεται στο γεγονός ότι το διηλεκτρικό αυτό – σύνθετο υλικό είναι πορώδες. Ακόμα, σημαντικό είναι να αναφέρουμε πως ο εν λόγω πυκνωτής μας έχει την μικρότερη χωρητικότητα σε σχέση με τους άλλους πυκνωτές (πυκνωτές με διηλεκτρικό ακόρεστους πολυεστέρες και πυκνωτής με διηλεκτρικό το συνθετο υλικό εποξειδική ρητίνη όπως θα δούμε παρακάτω) σε όλο το φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz. Πάνω από τα

400kHz τα δίπολα του εν λόγω σύνθετου υλικού δεν ακολουθούν τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου και η χωρητικότητα τείνει να πάρει σταθερή τιμή.

- Διάγραμμα  $R(\Omega) - f(\text{Hz})$

Στο διάγραμμα αυτό η ωμική παράλληλη αντίσταση μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας σύμφωνα με τη σχέση:  $\gamma = 2E+08x^{-0.825}$ . Από την θεωρία γνωρίζουμε ότι το ρεύμα απωλειών  $I_{\text{loss}}$  είναι ανάλογο της κυκλικής συχνότητας  $\omega$ . Με την αύξηση της συχνότητας οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων αυξάνονται μέσα από την αγωγιμότητα όγκου του συστήματος μόνωσης.

- Διάγραμμα  $X_C(\Omega) - f(\text{Hz})$

Η χωρητική αντίδραση του εν λόγω πυκνωτή αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας καθώς όπως είναι γνωστό από τη θεωρία ισχύει ότι:  $X_C = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $X_C \rightarrow 0$ . Οι πυκνωτές τείνουν να συμπεριφερθούν ως βραχυκυκλώματα στις μεγάλες συχνότητες.

- Διάγραμμα  $|Z|(\Omega) - f(\text{Hz})$

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μειώνεται σύμφωνα με τη σχέση της συχνότητας καθώς ισχύει ότι:  $|Z_P| = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{(R^2 + X_C^2)}}$ , όπου οι όροι  $R$  και  $|X_C|$  μειώνονται εκθετικά όπως αναφέραμε προηγουμένως.

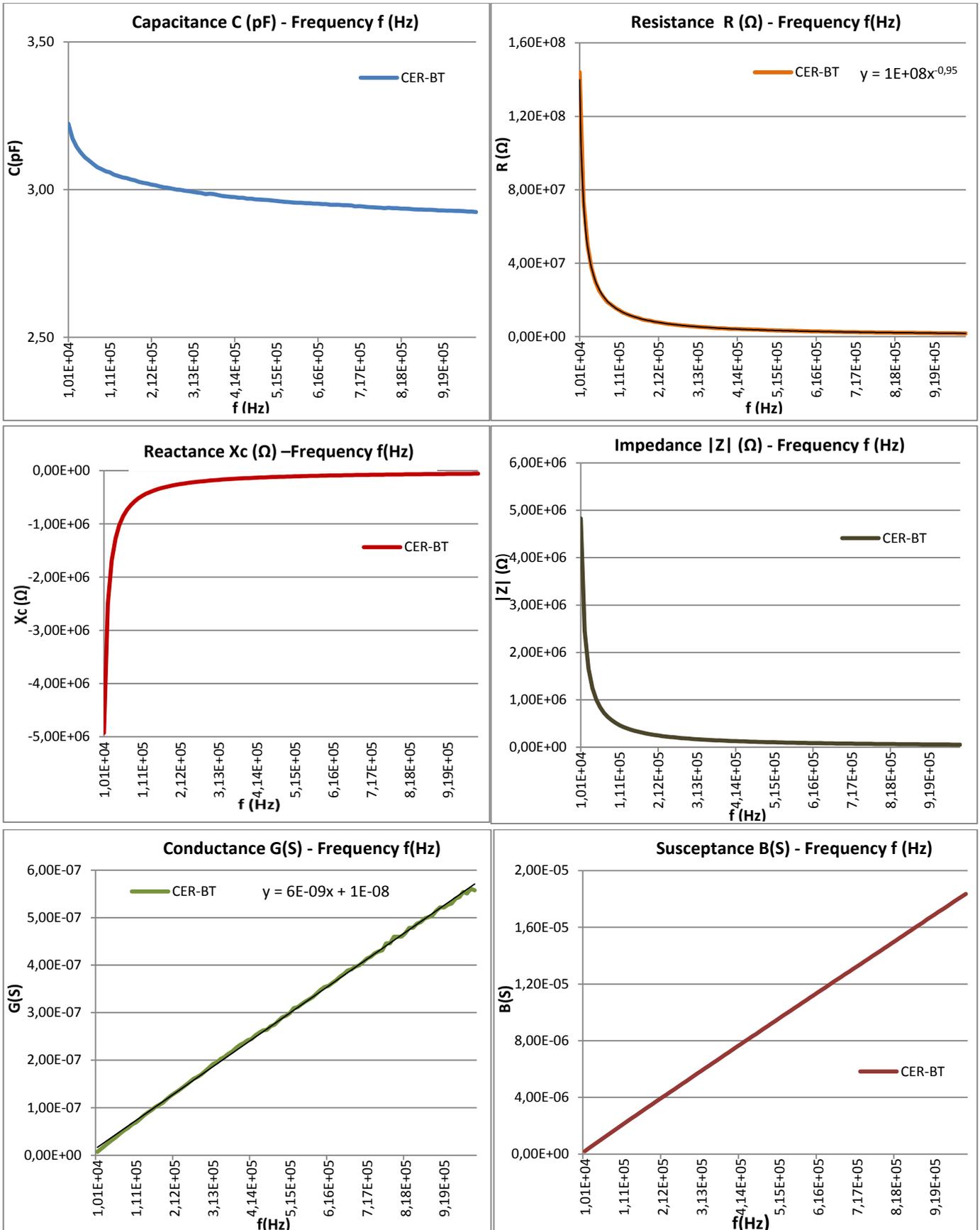
- Διάγραμμα  $G(S) - f(\text{Hz})$

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό Νεολάκη – ΒΤ 10% w/w αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με την σχέση:  $\gamma = 5E-09x^{0.8368}$ . Στο διάγραμμα αυτό, η κυμάτωση που παρουσιάζει ο πυκνωτής οφείλεται στο γεγονός ότι το υλικό μας είναι πορώδες και στην ουσία είναι σαν να έχουμε 2 διηλεκτρικά υλικά (Νεολάκη – ΒΤ 10% w/w και αέρας). Τα δίπολα του εκάστοτε υλικού προσανατολίζονται διαφορετικά υπο την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, γι' αυτό και παρουσιάζεται η κυμάτωση αυτή.

- Διάγραμμα  $B(S) - f(\text{Hz})$

Το διάγραμμα επιδεκτικότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Η επιδεκτικότητα των πυκνωτών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας. Ισχύει από τη θεωρία ότι:  $B = 2\pi f \cdot C \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $B \rightarrow \infty$ . ( Η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή.)

### 6.5 Πυκνωτής με Διηλεκτρικό την Εποξειδική Ρητίνη CER – BT



Εικόνα 6.5: Διαγράμματα του πυκνωτή με διηλεκτρικό την CER - BT ως προς C, R,  $X_c$ , Z, G και B για φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz.

### 6.5.1 Σχολιασμός Διαγραμμάτων του Πυκνωτή με Διηλεκτρικό την Εποξειδική ρητίνη – BT (CER – BT)

Ο πυκνωτής που εμπεριέχει ως διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό CER – BT 10% w/w έχει διαστάσεις οπλισμών 15mm x 13mm.

#### - Διάγραμμα C(pF) – f (Hz)

Στο διάγραμμα χωρητικότητας - συχνότητας παρατηρούμε ότι η χωρητικότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό μέσο το σύνθετο υλικό CER – BT 10% w/w μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας. Ακόμα, τα δίπολα του εν λόγω σύνθετου ακολουθούν κατά ενάν ομαλό τρόπο τον προσανατολισμό του ηλεκτρικού πεδίου (βέβαια η πολωσιμότητα των διπόλων του εν λόγω υλικού είναι πολύ μικρότερη από ότι τα σύνθετα υλικά με πολυμερική μήτρα ακόρεστων πολυεστέρων. Είναι:  $2,90\text{pF} \leq C_{\text{CER-BT}} \leq 3,25\text{pF}$ ). Πάνω από τα 900kHz η χωρητικότητα του τείνει να σταθεροποιηθεί.

#### - Διάγραμμα R(Ω) – f(Hz)

Στο διάγραμμα αυτό η ωμική παράλληλη αντίσταση μειώνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας σύμφωνα με τη σχέση:  $\gamma = 1\text{E}+08x^{-0,95}$ . Με την αύξηση της συχνότητας οι απώλειες ηλεκτρικών φορτίων αυξάνονται μέσα από την αγωγιμότητα όγκου του συστήματος μόνωσης.

#### - Διάγραμμα X<sub>c</sub>(Ω) – f(Hz)

Η χωρητική αντίδραση του εν λόγω πυκνωτή αυξάνεται εκθετικά με την αύξηση της συχνότητας καθώς όπως είναι γνωστό από τη θεωρία ισχύει ότι:  $X_C = -\frac{1}{2\pi f \cdot C} \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $X_c \rightarrow 0$ . Από την θεωρία γνωρίζουμε, ότι οι πυκνωτές στις μεγάλες συχνότητες τείνουν να συμπεριφερθούν ως βραχυκυκλώματα.

#### - Διάγραμμα |Z|(Ω) – f(Hz)

Το μέτρο της σύνθετης αντίστασης μειώνεται σύναρτηση της συχνότητας καθώς ισχύει ότι:  $|Z_p| = \frac{R \cdot X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$ , όπου οι όροι R και  $|X_c|$  μειώνονται εκθετικά όπως αναφέραμε προηγουμένως.

#### - Διάγραμμα G(S) – f(Hz)

Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πυκνωτή με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό CER-BT 10% w/w αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με την σχέση:  $\gamma = 6\text{E}-09x + 1\text{E}-08$ . Η κλήση της ευθείας χαρακτηρίζει τις απώλειες ηλεκτρικών φορτίων μέσα από το υλικό μόνωσης (σύνθετο υλικό).

#### - Διάγραμμα B(S) – f(Hz)

Το διάγραμμα επιδεκτικότητας – συχνότητας απεικονίζει το αντίστροφο του μεγέθους της χωρητικής αντίδρασης του πυκνωτή. Η επιδεκτικότητα των πυκνωτών αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της συχνότητας. Ισχύει από τη θεωρία ότι:  $B = 2\pi f \cdot C \cdot j$ . Όταν  $f \rightarrow \infty$  τότε  $B \rightarrow \infty$ .

( Η C για μεγάλες συχνότητες τείνει να πάρει σταθερή τιμή.)

➤ **Συγκριτικός Πίνακας Χωρητικότητας, Ηλ. Αγωγιμότητας & Εμπέδησης για  $f=100\text{KHz}$ .**

Παρακάτω παρατίθεται ο συγκριτικός πίνακας σχετικά με την χωρητικότητα (C), την ηλεκτρική αγωγιμότητα (G) και την σύνθετη αντίσταση (Z) για συχνότητα  $f=100\text{KHz}$ .

$f=100\text{KHz}$	Πυκνωτής $M_1A_3PA_6\text{-BT}$	Πυκνωτής $M_7A_2PA_1\text{-BT}$	Πυκνωτής $M_3A_4PA_3\text{-BT}$	Πυκνωτής $M_4A_4PA_2\text{-BT}$
C (pF)	7,67	6,19	4,27	3,703
G (S)	$5,49 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-7}$	$3,69 \cdot 10^{-7}$	$3,83 \cdot 10^{-7}$
Z  ( $\Omega$ )	$2,04 \cdot 10^5$	$2,50 \cdot 10^5$	$3,56 \cdot 10^5$	$4,01 \cdot 10^5$

$f=100\text{KHz}$	Πυκνωτής $M_6A_4\text{-BT}$	Πυκνωτής $CUP\text{-BT}$	Πυκνωτής $CER\text{-BT}$	Πυκνωτής $NV\text{-BT}$
C (pF)	2,95	1,74	3,062	1,491
G (S)	$1,30 \cdot 10^{-7}$	$4,47 \cdot 10^{-8}$	$6,47 \cdot 10^{-8}$	$3,41 \cdot 10^{-8}$
Z  ( $\Omega$ )	$5,25 \cdot 10^5$	$8,98 \cdot 10^5$	$5,12 \cdot 10^5$	$1,03 \cdot 10^6$

**Πίνακας 6.1:** Συγκριτικός Πίνακας μετρούμενων Μεγεθών για  $f=100\text{KHz}$ .

Παρατηρούμε ότι για  $f=100\text{kHz}$ , ο πυκνωτής με την μεγαλύτερη χωρητικότητα (C) και ηλεκτρική αγωγιμότητα (G) είναι αυτός με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_1A_3PA_6\text{-BT}$ , ενώ με την μικρότερη χωρητικότητα (C) και ηλεκτρική αγωγιμότητα (G) είναι αυτός με διηλεκτρικό το σύνθετο  $NV\text{-BT}$ .

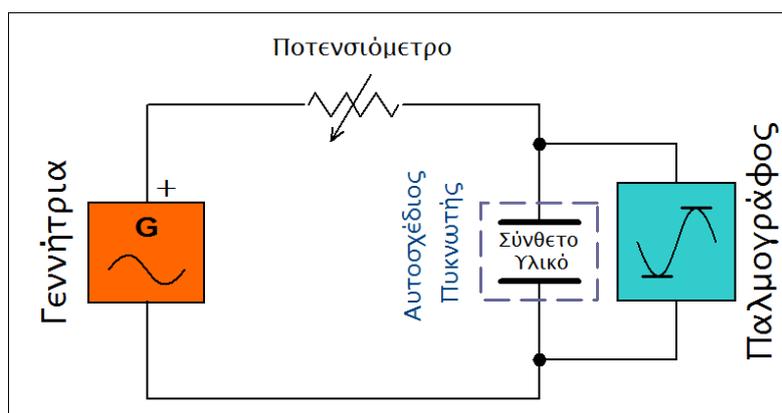
Αντίστροφα, ο πυκνωτής με το μεγαλύτερο μέτρο σύνθετης αντίστασης (|Z|) είναι αυτός με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό Νεολάκη  $\text{-BaTiO}_3$ , ενώ ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_1A_3PA_6\text{-BT}$  έχει τη μικρότερη τιμή όσο αναφορά το μέτρο της σύνθετης αντίστασης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: Κατασκευή & Διαδικασία Ελέγχου Ηλεκτρονικών Παθητικών Φίλτρων

Τα φίλτρα που κατασκευάστηκαν ανήκουν στην κατηγορία των παθητικών φίλτρων και συγκεκριμένα είναι: βαθυπερατά, υψιπερατά, ζωνοπερατά και ζωνοφρακτικά φίλτρα. Τον ρόλο του πυκνωτή στα εν λόγω φίλτρα αποτέλεσε η αυτοσχέδια διάταξη με την προσαρμογή του εκάστοτε σύνθετου υλικού ως διηλεκτρικό. Οι πυκνωτές κατόπιν συνδέθηκαν σε σειρά με ποτενσιόμετρο μέγιστης ωμικής αντιστάσεως 500KΩ πάνω σε breadboard για την δημιουργία των βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων. Για την σύνθεση των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων χρησιμοποιήθηκε επίσης και πηνίο 20mH σε παράλληλη και εν σειρά συνδεσμολογία αντίστοιχα. Με τη χρήση γεννήτριας ημιτονικού σήματος (Hung Chang 9205) τροφοδοτούνταν με τάση τα παθητικά φίλτρα και με τη χρήση παλμογράφου (Tektronix TBS 1052B) που συνδέαμε παράλληλα στην έξοδο των φίλτρων καταγράφησαν οι συχνότητες αποκοπής των εν λόγω βαθυπερατών και υψιπερατών φίλτρων, καθώς και οι ζώνες διέλευσης ή αποκοπής των ζωνοπερατών και ζωνοφρακτικών φίλτρων.

### 7.1 Βαθυπερατά Φίλτρα

Για την δημιουργία των βαθυπερατών φίλτρων χρησιμοποιήθηκε ως πυκνωτής η αυτοσχέδια διάταξη με διηλεκτρικό ένα από τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας κάθε φορά, η οποία συνδέθηκε σε σειρά πάνω σε breadboard με το ποτενσιόμετρο των 500KΩ. Με τη χρήση γεννήτριας ημιτονικού σήματος δόθηκε ημιτονικός παλμός στο κύκλωμα και μετρήθηκε η έξοδος (τάση) στα άκρα του πυκνωτή με την βοήθεια παλμογράφου. Η τάση με την οποία τροφοδοτήθηκε το κύκλωμα ήταν η μέγιστη κάθε φορά (28,4V) που μπορεί να παράσχει η γεννήτρια παλμών. Παρακάτω δίδεται η σχηματική απεικόνιση του εν λόγω κυκλώματος.



Σχήμα 7.1: Βαθυπερατό φίλτρο

Για το εκάστοτε σύνθετο υλικό που προσαρμολοζόταν κάθε φορά στην αυτοσχέδια διάταξη μεταβάλλαμε την τιμή του ποτενσιόμετρου με τη βοήθεια πολύμετρου δίδοντας συγκεκριμένες τιμές  $R_{\text{ποτενσ.}}=10\text{K}\Omega$ ,  $20\text{K}\Omega$ ,  $50\text{K}\Omega$ ,  $100\text{K}\Omega$ ,  $200\text{K}\Omega$ ,  $300\text{K}\Omega$  και  $500\text{K}\Omega$ . Κατόπιν, για την εκάστοτε τιμή ποτενσιόμετρου μεταβάλλαμε την συχνότητα της γεννήτριας μας ώστε να ελέγξουμε σε ποιά συχνότητα ακριβώς είναι η συχνότητα αποκοπής του φίλτρου. Δηλαδή,

παρατηρούσαμε στον παλμογράφο σε ποιά συχνότητα από 10Hz έως 2MHz ισχύει  $V_{out}=0,707 \cdot V_{in}$ . Έτσι, με εναλλαγή του διηλεκτρικού – σύνθετου υλικού έχουμε 8 διαφορετικούς πυκνωτές και κατ' επέκταση 56 διαφορετικά βαθυπερατά φίλτρα. Παρακάτω, δίδονται οι συχνότητες αποκοπής των βαθυπερατών μας φίλτρων.

	Πυκνωτής M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub> -BT	Πυκνωτής M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub> -BT	Πυκνωτής M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub> -BT	Πυκνωτής M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub> -BT
R <sub>Ποτενσιομέτρου</sub> (KΩ)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)
10	243701	331687	259681	255916
20	117555	183781	114022	127034
50	41304	61981	45808	45711
100	17288	28693	19284	19085
200	5368	12171	6108	5828
300	1097	5839	274,8	*
500	*	*	*	*

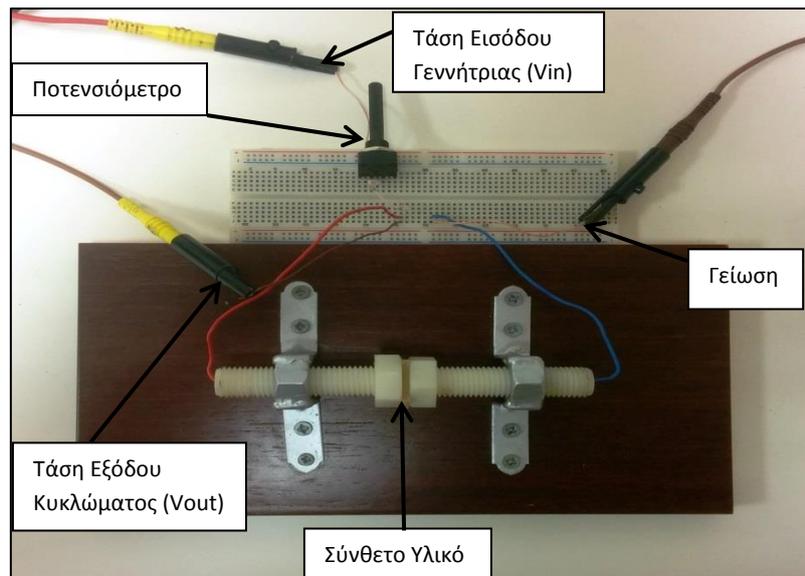
(\*): Για μεγάλες τιμές αντίστασης ποτενσιομέτρου R=500KΩ έχουμε:

$$V_{out} < 0,707 \cdot V_{in} \text{ για } 10\text{Hz} \leq f \leq 20\text{Hz}$$

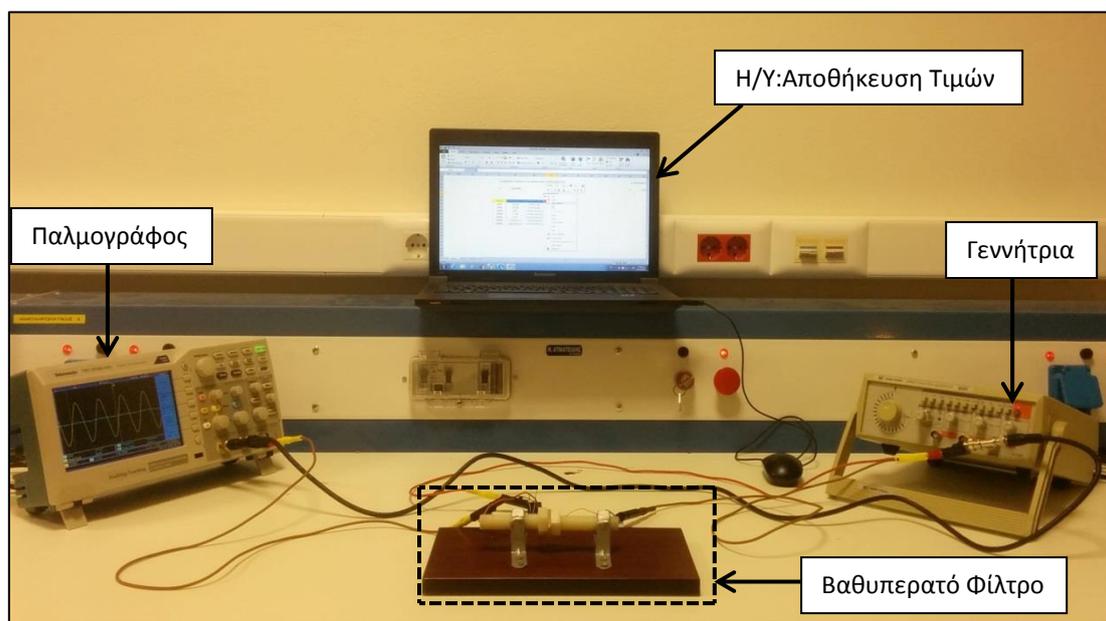
	Πυκνωτής M6A4-BT	Πυκνωτής CUP-BT	Πυκνωτής Νεολάκη-BT	Πυκνωτής CER-BT
R <sub>Ποτενσιομέτρου</sub> (KΩ)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)	Συχνότητα Αποκοπής f <sub>c</sub> (Hz)
10	283017	278338	332465	284316
20	142875	144281	161041	146429
50	55300	55799	65607	56071
100	25179	26463	29561	26524
200	10126	10918	12956	11018
300	5091	5569	6486	5765
500	*	*	*	*

(\*): Για μεγάλες τιμές αντίστασης ποτενσιομέτρου R=500KΩ έχουμε:

$$V_{out} < 0,707 \cdot V_{in} \text{ για } 10\text{Hz} \leq f \leq 20\text{Hz}$$



Εικόνα 7.1: Βαθυπερατό Φίλτρο

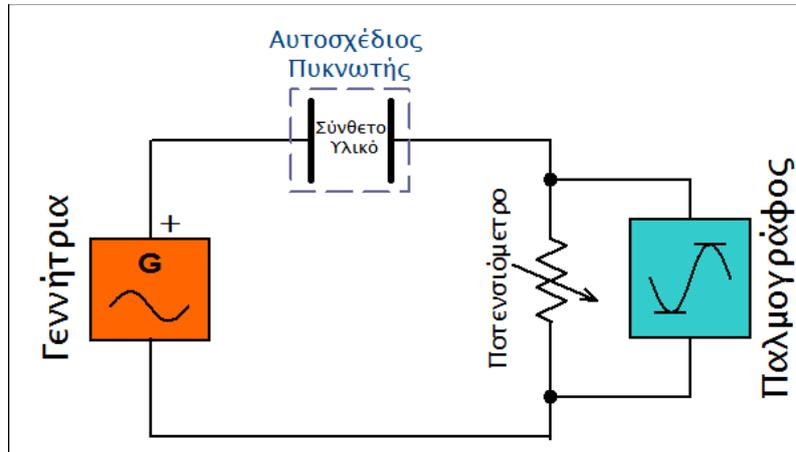


Εικόνα 7.2: Πειραματική Διαδικασία

## 7.2 Υψιπερατά Φίλτρα

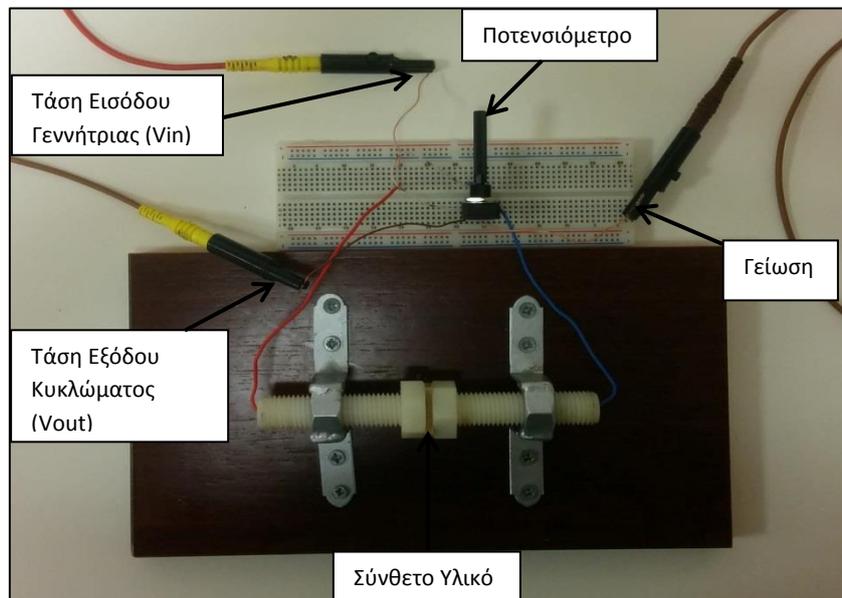
Η ίδια διαδικασία πραγματοποιήθηκε και για τον χαρακτηρισμό των υψιπερατών φίλτρων ως προς την συχνότητα αποκοπής ( $f_c$ ). Οι πυκνωτές τοποθετήθηκαν σε σειρά με το ποτενσιόμετρο μέγιστης ωμικής αντιστάσεως 500KΩ και παρατηρούσαμε την τάση εξόδου με την βοήθεια του παλμογράφου στα άκρα του ποτενσιομέτρου. Για τις ίδιες τιμές ποτενσιομέτρου όπως και πριν ( $R_{\text{ποτενσ.}}=10\text{K}\Omega, 20\text{K}\Omega, 50\text{K}\Omega, 100\text{K}\Omega, 200\text{K}\Omega, 300\text{K}\Omega$  και  $500\text{K}\Omega$ ) μεταβάλλαμε την συχνότητα του ημιτονικού σήματος από την γεννήτρια (έισοδος κυκλώματος) και παρατηρούσαμε αν υπάρχει συχνότητα μεταξύ 10Hz έως 2MHz στην οποία να ισχύει:  $V_{\text{out}}=0,707 \cdot V_{\text{in}}$ . Από την θεωρία γνωρίζουμε ότι, τα υψιπερατά φίλτρα αφήνουν σήματα από μία συχνότητα  $f_c$  και πάνω

να περάσουν. Η αυτή διαδικασία πραγματοποιήθηκε όπως και πριν και για τους 8 πυκνωτές και κατ'επέκταση και για τα 56 υψιπερατά φίλτρα.



Σχήμα 7.2: Υψιπερατό Φίλτρο

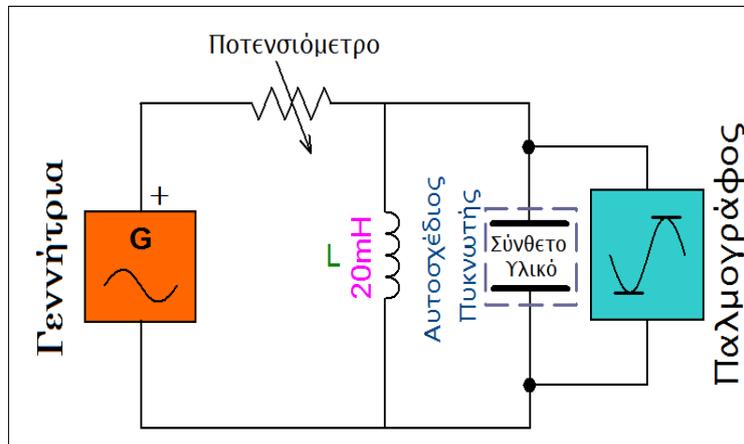
Στα εν λόγω κυκλώματα που σχεδιάστηκαν και εισήχθει σε αυτά ημιτονικό σήμα με την βοήθεια γεννήτριας δεν παρατηρήθηκε κάποια συχνότητα αποκοπής στον παλμογράφο. Δηλαδή, δεν υπήρχε συχνότητα μεταξύ 10Hz και 2MHz στην οποία να ισχύει  $V_{out}=0,707 \cdot V_{in}$ . Την συμπεριφορά αυτή επέδειξαν και τα 56 κυκλώματα με τους 8 διαφορετικούς πυκνωτές. Η συμπεριφορά αυτή των φίλτρων οφείλεται στο γεγονός ότι οι συγκεκριμένοι πυκνωτές χαρακτηρίζονται από πολύ μικρή χωρητικότητα της τάξεως των pF και κατά συνέπεια η συχνότητα αποκοπής των εν λόγω φίλτρων εκτείνεται πέρα από τα όρια της γεννήτριας όσο αναφορά την συχνότητα ( $10\text{Hz} \leq f_{\text{generator}} \leq 2\text{MHz}$ ).



Εικόνα 7.3: Υψιπερατό Φίλτρο

### 7.3 Ζωνοπερατά Φίλτρα

Για την συνδεσμολογία των ζωνοπερατών φίλτρων χρησιμοποιήθηκε και πηνίο 20mH, το οποίο συνδέθηκε παράλληλα με τον εκάστοτε πυκνωτή. Παρακάτω δίδεται η συνδεσμολογία του ζωνοπερατού φίλτρου.



Σχήμα 7.3: Ζωνοπερατό Φίλτρο

Με τη χρήση πολύμετρου ρυθμίζαμε το ποτενσιόμετρο σε μία από τις εξής τιμές  $R_{\text{Ποτενσιόμετρο}} = 10\text{K}\Omega, 20\text{K}\Omega, 50\text{K}\Omega, 100\text{K}\Omega, 200\text{K}\Omega, 300\text{K}\Omega$  και  $500\text{K}\Omega$ , και στην συνέχεια μεταβάλλαμε την συχνότητα του σήματος εισόδου από την γεννήτρια ώστε να παρατηρήσουμε από τον παλμογράφο τα όρια της ζώνης διέλευσης συχνοτήτων του εκάστοτε φίλτρου. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιήθηκε και για τα 8 σύνθετα – διηλεκτρικά υλικά. Όπως γνωρίζουμε από την θεωρία, το εύρος ζώνης των ζωνοπερατών φίλτρων ορίζεται μεταξύ των συχνοτήτων  $f_{C1}$  και  $f_{C2}$ , για τις οποίες ισχύει ότι: η τάση εξόδου  $V_{\text{out}}$  ισούται με το 0,707 της τάσεως εισόδου  $V_{\text{in}}$ , δηλαδή:

$$V_{\text{out}} = 0,707 * V_{\text{in}}, \text{ όταν } f=f_{C1} \text{ και } f=f_{C2}.$$

Παρακάτω δίδονται οι τιμές των συχνοτήτων  $f_{C1}$  και  $f_{C2}$  για τα συγκεκριμένα ζωνοπερατά φίλτρα, η συχνότητα για την οποία έχουμε συντονισμό  $f_0$  (δηλαδή για  $f=f_0$  είναι:  $\left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| = 1$ ), καθώς και ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  ( $Q = \frac{\omega_0}{\text{BW}}$ ) των εν λόγω φίλτρων. Το Bandwidth (εύρος ζώνης) του κάθε φίλτρου δίδεται από τη σχέση:  $\text{BW} = \omega_2 - \omega_1$ .

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή $M_1A_3PA_6$ -BT				
$R_{\text{Ποτενσιόμετρο}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας $Q$
10	60180	282530	132896	0,597688329
20	89133	186071	133634	1,378551239
50	115893	147557	134937	4,261527287

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή $M_7A_2PA_1$ -BT				
$R_{\text{Ποτενσιομέτρου}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	63805	327282	145011	0,550374416
20	87422	232743	147230	1,013136436
50	118992	169420	149012	2,954945665

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή $M_3A_4PA_3$ -BT				
$R_{\text{Ποτενσιομέτρου}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	60975	281485	133798	0,606766133
20	87503	194431	135694	1,269022146
50	114578	152221	136003	3,612969211

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή $M_4A_4PA_2$ -BT				
$R_{\text{Ποτενσιομέτρου}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	58133	305611	138284	0,558772901
20	88863	197932	138817	1,272744776
50	113766	152160	137217	3,5739178

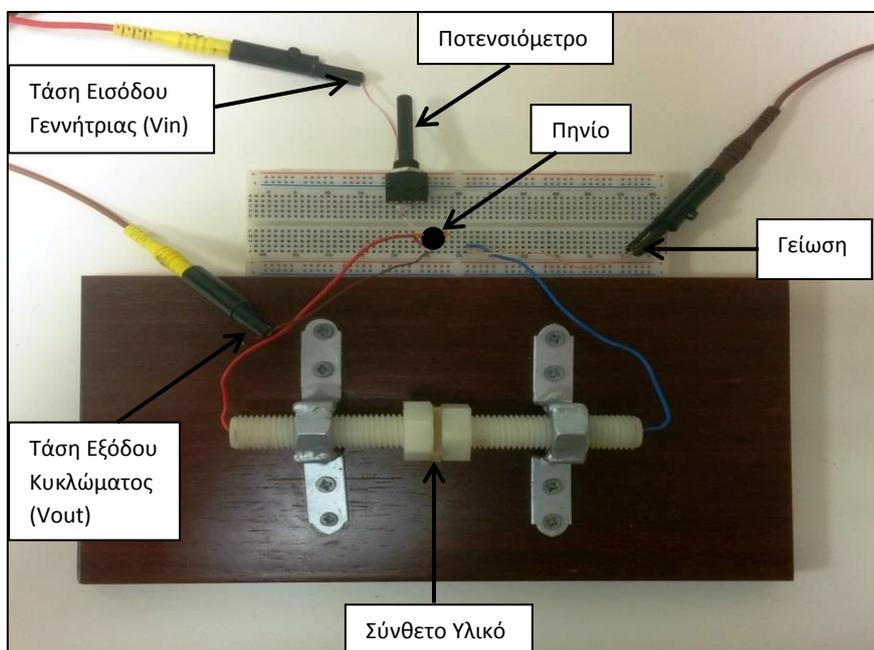
Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή $M_6A_4$ -BT				
$R_{\text{Ποτενσιομέτρου}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	61570	302857	143430	0,59443733
20	88147	208807	141528	1,172948782
50	113804	162735	142650	2,91532975

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή CUP-BT				
$R_{\text{Ποτενσιομέτρου}}$ (KΩ)	Συχνότητα $f_1$	Συχνότητα $f_2$	Κεντρική Συχνότητα $f_0$ (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	58284	341571	151518	0,534856877
20	88412	220115	148893	1,130520945
50	117196	175222	150900	2,60055837

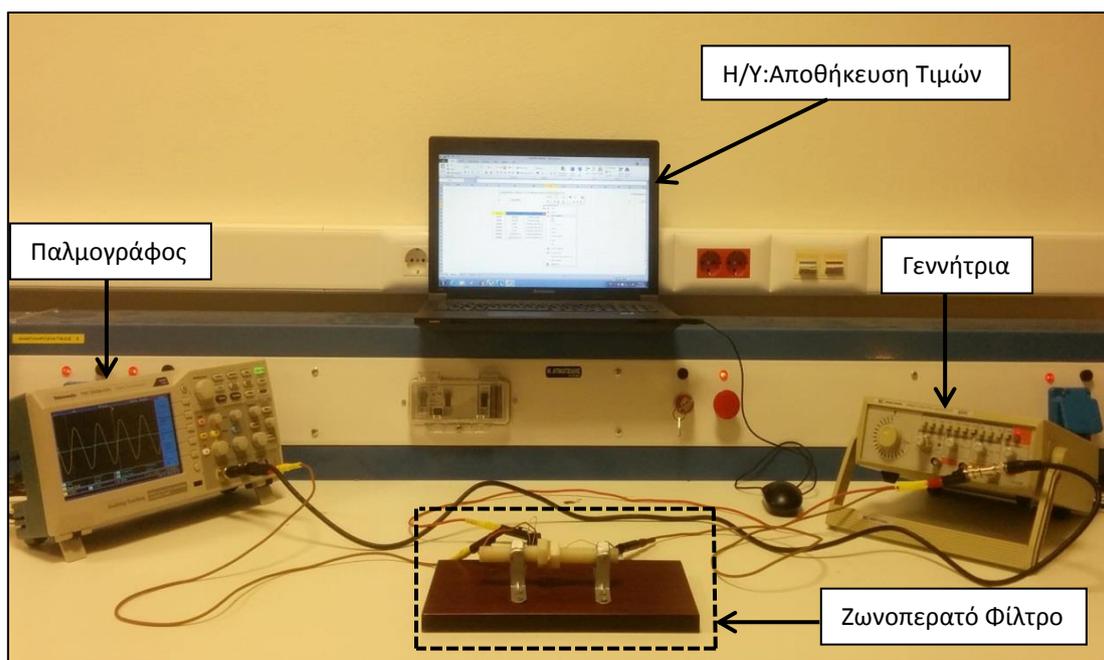
Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή CER-BT				
R <sub>Ποτενσιομέτρου</sub> (KΩ)	Συχνότητα f1	Συχνότητα f2	Κεντρική Συχνότητα f <sub>0</sub> (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	59133	330409	146567	0,540287383
20	86157	230942	146524	1,012010913
50	116812	169496	142261	2,700269532

Ζωνοπερατό Φίλτρο με Πυκνωτή Νεολάκη-BT				
R <sub>Ποτενσιομέτρου</sub> (KΩ)	Συχνότητα f1	Συχνότητα f2	Κεντρική Συχνότητα f <sub>0</sub> (Hz)	Παράγοντας Ποιότητας Q
10	58997	331199	144395	0,530470019
20	87664	223272	146170	1,07788626
50	116448	170269	138857	2,579978075

Παρατηρήσαμε ότι για τιμές ποτενσιομέτρου  $R_{\text{ποτενσ.}} > 50\text{K}\Omega$  υπήρχε σημαντική πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση του ποτενσιομέτρου με αποτέλεσμα να είναι:  $\left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| < 1$ . Για τέτοιες τιμές αντίστασης ποτενσιομέτρου τα συγκεκριμένα κυκλώματα δεν επιδύκνειαν κατάλληλη συμπεριφορά ζωνοπερατών φίλτρων.



**Εικόνα 7.4:** Ζωνοπερατό Φίλτρο



Εικόνα 7.5: Πειραματική Διαδικασία

➤ Συγκριτικός Πίνακας σχετικά με τον παράγοντα Q των Ζωνοπερατών Φίλτρων.

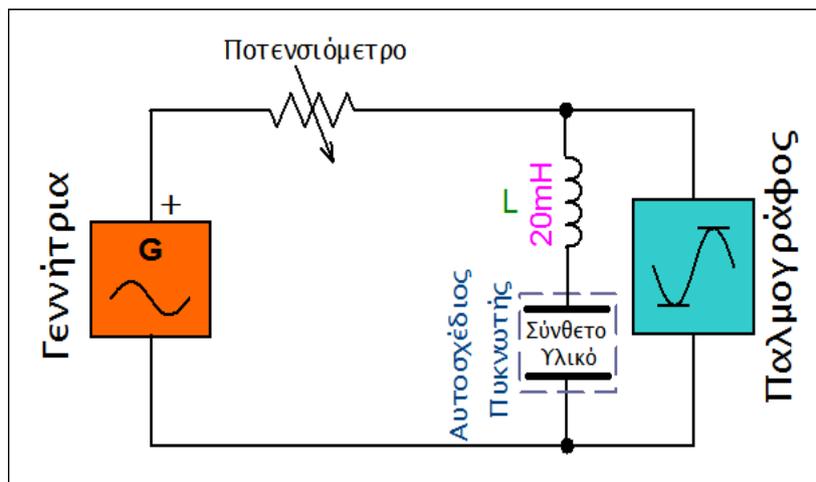
Ρποτεν. (KΩ)	Ποκνωτής M <sub>1</sub> A <sub>3</sub> PA <sub>6</sub> -BT	Ποκνωτής M <sub>7</sub> A <sub>2</sub> PA <sub>1</sub> -BT	Ποκνωτής M <sub>3</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>3</sub> -BT	Ποκνωτής M <sub>4</sub> A <sub>4</sub> PA <sub>2</sub> -BT
10	0,597	0,55	0,606	0,558
20	1,378	1,013	1,269	1,272
50	4,261	2,954	3,612	3,573

Ρποτεν. (KΩ)	Ποκνωτής M <sub>6</sub> A <sub>4</sub> -BT	Ποκνωτής CUP-BT	Ποκνωτής CER-BT	Ποκνωτής NV-BT
10	0,594	0,534	0,54	0,53
20	1,172	1,130	1,012	1,077
50	2,915	2,600	2,700	2,579

Πίνακας 7.1: Συγκριτικός Πίνακας Ζωνοπερατών Φόλτρων.

## 7.4 Ζωνοφρακτικά Φίλτρα

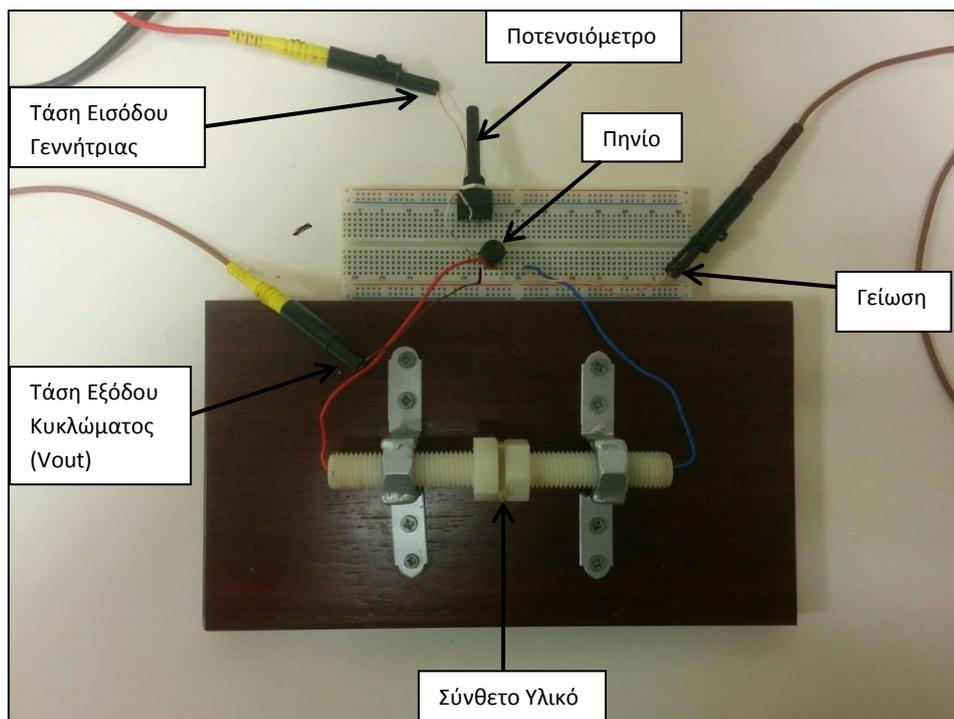
Για την συνδεσμολογία των ζωνοφρακτικών φίλτρων χρησιμοποιήθηκε το πηνίο αυτεπαγωγής 20mH σε σειρά με τους πυκνωτές και με το ποτενσιόμετρο μέγιστης ωμικής αντιστάσεως 500KΩ. Παρακάτω φαίνεται η συνδεσμολογία των ζωνοφρακτικών φίλτρων που σχεδιάστηκαν



Σχήμα 7.4: Ζωνοφρακτικό Φίλτρο

Η έξοδος του συγκεκριμένου κυκλώματος είναι το πηνίο αυτεπαγωγής 20mH σε σειρά με την αυτοσχέδια διάταξη που φιλοξενεί κάθε φορά ως διηλεκτρικό υλικό ένα από τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για αντίσταση ποτενσιόμετρου  $R_{\text{ποτενσ.}} = 10\text{K}\Omega, 20\text{K}\Omega, 50\text{K}\Omega, 100\text{K}\Omega, 200\text{K}\Omega, 300\text{K}\Omega$  και  $500\text{K}\Omega$ . Όπως και στις προηγούμενες μετρήσεις με τη χρήση γεννήτριας ημιτονικού σήματος τροφοδοτούσαμε με εναλλασόμενη τάση την είσοδο του εκάστοτε κυκλώματος και παρατηρούσαμε από τον παλμογράφο σε ποιες συχνότητες έχουμε αποκοπή του σήματος εξόδου. Αντίστροφα με τα ζωνοπερατά φίλτρα αναζητούσαμε τις συχνότητες  $f_{C1}$  και  $f_{C2}$  για τις οποίες ισχύει:

- Για  $f=f_{C1}$  και  $f=f_{C2} \Rightarrow \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| = 0,707$  και
- Για  $f=f_0 \Rightarrow \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| = 0$



**Εικόνα 7.6:** Ζωνοφρακτικό Φίλτρο

Τα εν λόγω κυκλώματα που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν πάνω σε breadboard δεν επέδειξαν κατάλληλη συμπεριφορά ζωνοφρακτικού φίλτρου, καθώς για τιμή αντίστασης ποτενσιομέτρου  $R_{\text{ποτενσ.}} < 100\text{K}\Omega$  είχαμε ότι:

$$\text{Για } f \rightarrow f_0 \text{ έχουμε: } \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| \neq 0.$$

Δηλαδή, για συχνότητα γεννήτριας κόντα στην συχνότητα συντονισμού (αποκοπής) του κυκλώματος είχαμε διέλευση ημιτονικού σήματος από το κύκλωμα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός, ότι το πηνίο μας είναι της τάξεως των mH.

Ακόμα, για  $R_{\text{ποτενσ.}} > 100\text{K}\Omega$  παρατηρήθηκε ότι:

$$\text{Για } f \rightarrow f_0 \text{ έχουμε: } \left| \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} \right| < 0,707.$$

Δηλαδή, δεν υπήρχε το άνω όριο συχνότητας για διέλευση του σήματος εισόδου. Η αιτία του γεγονότος αυτού οφείλεται στο ότι έχουμε μεγάλη πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση του ποτενσιομέτρου για  $R_{\text{ποτενσ.}} > 100\text{K}\Omega$ .

## Κεφάλαιο 8: Συμπεράσματα – Προτάσεις για το Μέλλον

Από τα σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας που χρησιμοποιήθηκαν ως διηλεκτρικά για την κατασκευή των πυκνωτών και κατ' επέκταση για την σχεδίαση και υλοποίηση των ηλεκτρονικών παθητικών φίλτρων ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο με πολυμερική μήτρα τον ακόρεστο πολυεστέρα  $M_1A_3PA_6$  έχει την μεγαλύτερη χωρητικότητα (C) από τους υπόλοιπους πυκνωτές με διηλεκτρικά τα σύνθετα με πολυμερική μήτρα ακόρεστους πολυεστέρες, την νεολάκη και την εποξειδική ρητίνη. Στο φάσμα συχνοτήτων από 10kHz έως 1MHz ο συγκεκριμένος πυκνωτής καταγράφει τιμές χωρητικότητας μεγαλύτερες από τους υπόλοιπους πυκνωτές ενώ επίσης, χαρακτηρίζεται και από την μεγαλύτερη ηλεκτρική αγωγιμότητα G(S). Ο αμέσως επόμενος πυκνωτής με τις μεγαλύτερες τιμές χωρητικότητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας είναι αυτός με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_7A_2PA_1$ -BT για φάσμα συχνοτήτων από 10KHz έως 1MHz.

Ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό Νεολάκη-BT χαρακτηρίζεται για την μικρότερη χωρητικότητα από όλα τα υπόλοιπα υλικά καθώς και για την μικρότερη ηλεκτρική του αγωγιμότητα G(S). Αυτό εστιάζεται στο γεγονός ότι το συγκεκριμένο σύνθετο υλικό είναι πορώδες. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά του υλικού αυτού  $\epsilon_r$  είναι αποτέλεσμα της διηλεκτρικής σταθεράς του σύνθετου υλικού  $\epsilon_r$  συνθ. υλικό και της διηλεκτρικής σταθεράς του αέρα  $\epsilon_r$  αέρα. Ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό το εμπορικό ακόρεστο πολυεστέρα-τιτανικό βάριο (CUP-BT) καταλαμβάνει την αμέσως επόμενη θέση μικρότερης χωρητικότητας και ηλεκτρικής αγωγιμότητας μετά τον πυκνωτή με διηλεκτρικό το NV-BT.

Σε μεγάλες συχνότητες (>900KHz) οι πυκνωτές διηλεκτρικό τα σύνθετα υλικά  $M_1A_3PA_6$ -BT και  $M_7A_2PA_1$ -BT τείνουν να λάβουν μία σταθερή τιμή χωρητικότητας καθώς τα δίπολα τους λόγω αδράνειας δεν ακολουθούν τον προσανατολισμό του ομογενούς ηλεκτρικού πεδίου. Για τους πυκνωτές με διηλεκτρικό τα σύνθετα  $M_3A_4PA_3$ -BT και  $M_4A_4PA_2$ -BT αυτό συμβαίνει για τιμές συχνότητας μεγαλύτερες των 700KHz. Ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο  $M_6A_4$ -BT τείνει να λάβει σταθερή τιμή χωρητικότητας για  $f > 300KHz$ , ενώ ο πυκνωτής με διηλεκτρικό τον εμπορικό ακόρεστο πολυεστέρα CUP-BT παρουσιάζει μια σχεδόν σταθερή χωρητικότητα (C) σε όλο το φάσμα συχνοτήτων από 10KHz έως 1MHz. Τέλος, ο πυκνωτής με διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό CER-BT αποκτά μια σχεδόν σταθερή χωρητικότητα μετά τα 600KHz, ενώ για τον πυκνωτή NV-BT αυτό συμβαίνει μετά τα 200KHz.

Τα βαθυπερατά φίλτρα που σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν με χρήση των παραπάνω πυκνωτών επέδειξαν αρκετά καλή συμπεριφορά ως φίλτρα αποκοπής ζώνης συχνοτήτων καθώς για χαμηλές συχνότητες έχουμε διέλευση του σήματος εισόδου ενώ για υψηλές συχνότητες πραγματοποιείται αποκοπή. Με αύξηση της τιμής αντίστασης του ποτενσιομέτρου έχουμε μείωση όσο αναφορά την συχνότητα αποκοπής των φίλτρων το οποίο είναι αναμενόμενο ενώ για τιμή αντίστασης ποτενσιομέτρου  $R=500K\Omega$  έχουμε μεγάλη πτώση τάσης με αποτέλεσμα ο λόγος  $\left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right|$  να είναι μικρότερος από 0,707 για συχνότητες μικρότερες από 20Hz. Την ίδια συμπεριφορά επέδειξε και το βαθυπερατό φίλτρο με πυκνωτή  $M_4A_4PA_2$ -BT για τιμή ποτενσιομέτρου  $R=300K\Omega$ .

Όσο αναφορά τα ζωνοπερατά φίλτρα που σχεδιάστηκαν με βάση τους εν λόγω πυκνωτές παρουσίασαν μια καλή συμπεριφορά φίλτρων διέλευσης ζώνης συχνοτήτων για τιμές αντίστασης ποτενσιομέτρου  $R_{\text{ποτεν.}} \leq 50\text{K}\Omega$ . Για τιμές αντίστασης ποτενσιομέτρου  $R > 50\text{K}\Omega$  παρατηρήσαμε πως ο λόγος της τάσεως εξόδου προς την είσοδο είναι:

$$\left| \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \right| < 1 \text{ για } f \rightarrow f_0.$$

Αυτό οφείλεται στην μεγάλη πτώση τάσης πάνω στην αντίσταση του ποτενσιομέτρου με αποτέλεσμα τα εν λόγω κυκλώματα να μην έχουν κατάλληλη συμπεριφορά ζωνοπερατού φίλτρου. Επίσης παρατηρήσαμε, όπως ήταν αναμενόμενο (για  $R_{\text{ποτεν.}} < 50\text{K}\Omega$ ), πως με αύξηση της αντίστασης του ποτενσιομέτρου από  $10\text{K}\Omega$  στα  $50\text{K}\Omega$  βελτιώνεται σημαντικά ο παράγοντας ποιότητας  $Q$  των ζωνοπερατών φίλτρων με μεγαλύτερο αυτό συντελεστή να έχει το ζωνοπερατό φίλτρο με πυκνωτή που έχει ως διηλεκτρικό το σύνθετο υλικό  $M_1A_3PA_6$ -BT. Όπως, γνωρίζουμε από την θεωρία ο παράγοντας ποιότητας χαρακτηρίζει την "επιλεκτικότητα", την ευκρίνεια και κατ'επέκταση την ποιότητα των RLC κυκλωμάτων. Συνεπώς, η ταξινόμηση των ζωνοπερατών φίλτρων (RLC) βάσει του παράγοντα ποιότητας μπορεί να γίνει ως ακολούθως:

Είναι  $L =$  σταθερά.

- Για  $R_{\text{ποτεν.}} = 10\text{K}\Omega$  έχουμε:

$$Q_{\text{RLC}(M3A4PA3)} > Q_{\text{RLC}(M1A3PA6)} > Q_{\text{RLC}(M6A4)} > Q_{\text{RLC}(M4A4PA2)} > Q_{\text{RLC}(M7A2PA1)} > Q_{\text{RLC}(CER)} > Q_{\text{RLC}(CUP)} > Q_{\text{RLC}(\text{Νεολάκη})}$$

- Για  $R_{\text{ποτεν.}} = 20\text{K}\Omega$  έχουμε:

$$Q_{\text{RLC}(M1A3PA6)} > Q_{\text{RLC}(M4A4PA2)} > Q_{\text{RLC}(M3A4PA3)} > Q_{\text{RLC}(M6A4)} > Q_{\text{RLC}(CUP)} > Q_{\text{RLC}(\text{Νεολάκη})} > Q_{\text{RLC}(M7A2PA1)} > Q_{\text{RLC}(CER)}$$

- Για  $R_{\text{ποτεν.}} = 50\text{K}\Omega$  έχουμε:

$$Q_{\text{RLC}(M1A3PA6)} > Q_{\text{RLC}(M3A4PA3)} > Q_{\text{RLC}(M4A4PA2)} > Q_{\text{RLC}(M7A2PA1)} > Q_{\text{RLC}(M6A4)} > Q_{\text{RLC}(CER)} > Q_{\text{RLC}(CUP)} > Q_{\text{RLC}(\text{Νεολάκη})}$$

Τα εν λόγω φίλτρα μπορούν να εφαρμοσθούν σε ηλεκτρονικά ολοκληρωμένα κυκλώματα, σε κεραίες εκπομπής και λήψης σημάτων υψηλών συχνοτήτων καθώς και σε συνδυασμό με ενεργητικά φίλτρα σε συστήματα αντιστάθμισης ισχύος και αποκοπής των αρμονικών των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, μια μελλοντική εργασία όσο αναφορά τα εν λόγω σύνθετα υλικά πολυμερικής μήτρας είναι διερεύνηση τους ως προς την διηλεκτρική αντοχή τους στο εναλλασσόμενο ρεύμα. Ο υπολογισμός της τάσης διάσπασης αυτών των υλικών θα ήταν σημαντικός για εφαρμογές ως μονωτικά υλικά σε συστήματα υψηλών τάσεων. Επίσης, πεδίο επιστημονικής έρευνας θα μπορούσε αποτελέσει και η μελέτη της τάσεως λειτουργίας των πυκνωτών αυτών από σύνθετα υλικά ώστε να εξασφαλίζονται στο ακέραιο οι δυνατότητες εφαρμογής των πυκνωτών αυτών σε σύνθετα ηλεκτρικά κυκλώματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1: Πυκνωτής  $M_1A_3PA_6$  - ΒΤ 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R( $\Omega$ )	Xc ( $\Omega$ )	Z  ( $\Omega$ )	G(S)	B(S)
10120,8	9,02567	1,71E+07	-1,74E+06	1,74E+06	5,86E-08	5,74E-07
20221,6	8,61539	8,53E+06	-9,14E+05	9,09E+05	1,17E-07	1,09E-06
30322,4	8,37357	5,74E+06	-6,27E+05	6,24E+05	1,74E-07	1,60E-06
40423,2	8,20323	4,34E+06	-4,80E+05	4,78E+05	2,31E-07	2,08E-06
50524	8,07186	3,50E+06	-3,90E+05	3,88E+05	2,85E-07	2,56E-06
60624,8	7,96641	2,95E+06	-3,30E+05	3,28E+05	3,39E-07	3,03E-06
70725,7	7,87588	2,54E+06	-2,86E+05	2,84E+05	3,94E-07	3,50E-06
80826,5	7,79713	2,24E+06	-2,53E+05	2,51E+05	4,46E-07	3,96E-06
90927,3	7,72899	2,01E+06	-2,26E+05	2,25E+05	4,97E-07	4,42E-06
101028	7,67056	1,82E+06	-2,05E+05	2,04E+05	5,49E-07	4,87E-06
111129	7,61786	1,67E+06	-1,88E+05	1,87E+05	6,00E-07	5,32E-06
121230	7,57015	1,53E+06	-1,73E+05	1,73E+05	6,52E-07	5,77E-06
131331	7,52696	1,43E+06	-1,61E+05	1,60E+05	7,00E-07	6,21E-06
141431	7,48627	1,33E+06	-1,50E+05	1,50E+05	7,50E-07	6,65E-06
151532	7,45018	1,25E+06	-1,41E+05	1,40E+05	8,00E-07	7,09E-06
161633	7,41611	1,18E+06	-1,33E+05	1,32E+05	8,49E-07	7,53E-06
171734	7,38169	1,11E+06	-1,26E+05	1,25E+05	8,99E-07	7,97E-06
181835	7,35288	1,06E+06	-1,19E+05	1,18E+05	9,45E-07	8,40E-06
191935	7,32595	1,01E+06	-1,13E+05	1,13E+05	9,93E-07	8,83E-06
202036	7,29774	9,60E+05	-1,08E+05	1,07E+05	1,04E-06	9,26E-06
212137	7,27398	9,16E+05	-1,03E+05	1,03E+05	1,09E-06	9,70E-06
222238	7,24996	8,79E+05	-9,88E+04	9,83E+04	1,14E-06	1,01E-05
232339	7,22554	8,43E+05	-9,48E+04	9,44E+04	1,19E-06	1,05E-05
242439	7,2038	8,12E+05	-9,11E+04	9,07E+04	1,23E-06	1,10E-05
252540	7,18236	7,82E+05	-8,77E+04	8,73E+04	1,28E-06	1,14E-05
262641	7,16431	7,55E+05	-8,46E+04	8,42E+04	1,32E-06	1,18E-05
272742	7,14371	7,30E+05	-8,17E+04	8,13E+04	1,37E-06	1,22E-05
282843	7,12445	7,05E+05	-7,90E+04	7,86E+04	1,42E-06	1,27E-05
292943	7,1075	6,83E+05	-7,64E+04	7,61E+04	1,46E-06	1,31E-05
303044	7,08959	6,63E+05	-7,41E+04	7,38E+04	1,51E-06	1,35E-05
313145	7,07305	6,43E+05	-7,19E+04	7,16E+04	1,56E-06	1,39E-05
323246	7,05697	6,25E+05	-6,98E+04	6,95E+04	1,60E-06	1,43E-05
333347	7,04083	6,07E+05	-6,78E+04	6,75E+04	1,65E-06	1,47E-05
343447	7,02667	5,90E+05	-6,59E+04	6,57E+04	1,69E-06	1,52E-05
353548	7,01157	5,76E+05	-6,42E+04	6,39E+04	1,74E-06	1,56E-05
363649	6,99797	5,62E+05	-6,25E+04	6,23E+04	1,78E-06	1,60E-05
373750	6,98486	5,47E+05	-6,10E+04	6,07E+04	1,83E-06	1,64E-05
383851	6,97244	5,35E+05	-5,95E+04	5,92E+04	1,87E-06	1,68E-05
393952	6,95702	5,22E+05	-5,81E+04	5,78E+04	1,92E-06	1,72E-05
404052	6,94598	5,10E+05	-5,67E+04	5,65E+04	1,96E-06	1,76E-05
414153	6,93469	4,99E+05	-5,54E+04	5,52E+04	2,00E-06	1,80E-05
424254	6,9208	4,88E+05	-5,42E+04	5,40E+04	2,05E-06	1,84E-05
434355	6,91104	4,78E+05	-5,30E+04	5,28E+04	2,09E-06	1,89E-05
444456	6,89873	4,68E+05	-5,19E+04	5,17E+04	2,14E-06	1,93E-05
454556	6,8906	4,58E+05	-5,08E+04	5,06E+04	2,18E-06	1,97E-05
464657	6,87848	4,50E+05	-4,98E+04	4,96E+04	2,22E-06	2,01E-05
474758	6,86824	4,41E+05	-4,88E+04	4,86E+04	2,27E-06	2,05E-05
484859	6,85789	4,32E+05	-4,79E+04	4,77E+04	2,31E-06	2,09E-05
494960	6,84744	4,25E+05	-4,70E+04	4,68E+04	2,35E-06	2,13E-05
505060	6,83901	4,17E+05	-4,61E+04	4,59E+04	2,40E-06	2,17E-05

515161	6,82786	4,09E+05	-4,52E+04	4,51E+04	2,44E-06	2,21E-05
525262	6,81805	4,02E+05	-4,44E+04	4,43E+04	2,49E-06	2,25E-05
535363	6,81054	3,95E+05	-4,37E+04	4,35E+04	2,53E-06	2,29E-05
545464	6,80057	3,88E+05	-4,29E+04	4,27E+04	2,58E-06	2,33E-05
555564	6,7937	3,82E+05	-4,22E+04	4,20E+04	2,62E-06	2,37E-05
565665	6,78558	3,76E+05	-4,15E+04	4,13E+04	2,66E-06	2,41E-05
575766	6,77556	3,70E+05	-4,08E+04	4,06E+04	2,71E-06	2,45E-05
585867	6,76637	3,63E+05	-4,01E+04	4,00E+04	2,75E-06	2,49E-05
595968	6,75932	3,57E+05	-3,95E+04	3,93E+04	2,80E-06	2,53E-05
606068	6,75067	3,53E+05	-3,89E+04	3,87E+04	2,83E-06	2,57E-05
616169	6,74359	3,48E+05	-3,83E+04	3,81E+04	2,88E-06	2,61E-05
626270	6,73554	3,43E+05	-3,77E+04	3,76E+04	2,92E-06	2,65E-05
636371	6,72861	3,38E+05	-3,72E+04	3,70E+04	2,96E-06	2,69E-05
646472	6,72182	3,33E+05	-3,66E+04	3,65E+04	3,00E-06	2,73E-05
656573	6,71504	3,28E+05	-3,61E+04	3,60E+04	3,05E-06	2,77E-05
666673	6,7061	3,24E+05	-3,56E+04	3,55E+04	3,09E-06	2,81E-05
676774	6,70005	3,19E+05	-3,51E+04	3,50E+04	3,13E-06	2,85E-05
686875	6,69303	3,15E+05	-3,46E+04	3,45E+04	3,18E-06	2,89E-05
696976	6,68622	3,11E+05	-3,42E+04	3,40E+04	3,22E-06	2,93E-05
707077	6,67881	3,06E+05	-3,37E+04	3,36E+04	3,26E-06	2,97E-05
717177	6,67231	3,03E+05	-3,33E+04	3,31E+04	3,30E-06	3,01E-05
727278	6,66484	2,99E+05	-3,28E+04	3,27E+04	3,35E-06	3,05E-05
737379	6,65814	2,95E+05	-3,24E+04	3,23E+04	3,39E-06	3,08E-05
747480	6,65098	2,92E+05	-3,20E+04	3,19E+04	3,43E-06	3,12E-05
757581	6,64577	2,88E+05	-3,16E+04	3,15E+04	3,47E-06	3,16E-05
767681	6,63812	2,85E+05	-3,12E+04	3,11E+04	3,51E-06	3,20E-05
777782	6,63261	2,82E+05	-3,09E+04	3,07E+04	3,55E-06	3,24E-05
787883	6,6269	2,78E+05	-3,05E+04	3,04E+04	3,59E-06	3,28E-05
797984	6,62099	2,75E+05	-3,01E+04	3,00E+04	3,64E-06	3,32E-05
808085	6,61413	2,72E+05	-2,98E+04	2,97E+04	3,67E-06	3,36E-05
818185	6,60989	2,69E+05	-2,94E+04	2,93E+04	3,71E-06	3,40E-05
828286	6,60248	2,66E+05	-2,91E+04	2,90E+04	3,76E-06	3,44E-05
838387	6,59694	2,63E+05	-2,88E+04	2,87E+04	3,80E-06	3,48E-05
848488	6,59209	2,61E+05	-2,85E+04	2,83E+04	3,83E-06	3,51E-05
858589	6,58622	2,58E+05	-2,81E+04	2,80E+04	3,87E-06	3,55E-05
868689	6,58056	2,55E+05	-2,78E+04	2,77E+04	3,92E-06	3,59E-05
878790	6,57517	2,52E+05	-2,75E+04	2,74E+04	3,96E-06	3,63E-05
888891	6,56957	2,50E+05	-2,73E+04	2,71E+04	4,00E-06	3,67E-05
898992	6,56499	2,47E+05	-2,70E+04	2,69E+04	4,04E-06	3,71E-05
909093	6,55998	2,45E+05	-2,67E+04	2,66E+04	4,08E-06	3,75E-05
919194	6,556	2,42E+05	-2,64E+04	2,63E+04	4,13E-06	3,79E-05
929294	6,54935	2,40E+05	-2,61E+04	2,60E+04	4,16E-06	3,82E-05
939395	6,54428	2,38E+05	-2,59E+04	2,58E+04	4,20E-06	3,86E-05
949496	6,53983	2,36E+05	-2,56E+04	2,55E+04	4,24E-06	3,90E-05
959597	6,53457	2,33E+05	-2,54E+04	2,53E+04	4,29E-06	3,94E-05
969698	6,52969	2,31E+05	-2,51E+04	2,50E+04	4,33E-06	3,98E-05
979798	6,52506	2,29E+05	-2,49E+04	2,48E+04	4,37E-06	4,02E-05
989899	6,52094	2,27E+05	-2,47E+04	2,46E+04	4,40E-06	4,06E-05
1000000	6,51681	2,25E+05	-2,44E+04	2,43E+04	4,45E-06	4,09E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 2: Πυκνωτής M<sub>7</sub>A<sub>2</sub>PA<sub>1</sub> - BT 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	Xc(Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	7,19278	1,49E+07	-2,16E+06	2,12E+06	6,43E-08	4,58E-07
20221,6	6,84655	9,06E+06	-1,14E+06	1,12E+06	1,06E-07	8,7E-07
30322,4	6,66334	6,70E+06	-7,81E+05	7,70E+05	1,44E-07	1,27E-06
40423,2	6,54357	5,36E+06	-5,97E+05	5,89E+05	1,8E-07	1,66E-06
50524	6,45305	4,50E+06	-4,84E+05	4,78E+05	2,15E-07	2,05E-06
60624,8	6,38438	3,89E+06	-4,08E+05	4,03E+05	2,48E-07	2,43E-06
70725,7	6,32481	3,44E+06	-3,53E+05	3,49E+05	2,82E-07	2,81E-06
80826,5	6,27319	3,09E+06	-3,12E+05	3,08E+05	3,14E-07	3,19E-06
90927,3	6,23335	2,81E+06	-2,79E+05	2,76E+05	3,45E-07	3,56E-06
101028	6,19737	2,58E+06	-2,53E+05	2,50E+05	3,77E-07	3,94E-06
111129	6,16287	2,38E+06	-2,31E+05	2,28E+05	4,07E-07	4,3E-06
121230	6,13349	2,22E+06	-2,13E+05	2,10E+05	4,4E-07	4,67E-06
131331	6,10597	2,08E+06	-1,97E+05	1,95E+05	4,68E-07	5,04E-06
141431	6,08198	1,95E+06	-1,84E+05	1,82E+05	5E-07	5,4E-06
151532	6,05871	1,84E+06	-1,72E+05	1,70E+05	5,3E-07	5,77E-06
161633	6,03722	1,74E+06	-1,62E+05	1,60E+05	5,6E-07	6,13E-06
171734	6,01787	1,65E+06	-1,53E+05	1,51E+05	5,92E-07	6,5E-06
181835	6,00023	1,57E+06	-1,45E+05	1,44E+05	6,19E-07	6,86E-06
191935	5,98509	1,50E+06	-1,38E+05	1,36E+05	6,5E-07	7,22E-06
202036	5,96753	1,44E+06	-1,31E+05	1,30E+05	6,78E-07	7,57E-06
212137	5,95241	1,38E+06	-1,25E+05	1,24E+05	7,07E-07	7,93E-06
222238	5,93767	1,32E+06	-1,20E+05	1,19E+05	7,37E-07	8,29E-06
232339	5,92548	1,27E+06	-1,15E+05	1,14E+05	7,7E-07	8,64E-06
242439	5,91041	1,22E+06	-1,11E+05	1,09E+05	7,95E-07	9E-06
252540	5,89597	1,18E+06	-1,06E+05	1,05E+05	8,27E-07	9,35E-06
262641	5,88377	1,14E+06	-1,03E+05	1,01E+05	8,56E-07	9,71E-06
272742	5,87336	1,11E+06	-9,89E+04	9,79E+04	8,85E-07	1,01E-05
282843	5,86446	1,07E+06	-9,56E+04	9,46E+04	9,16E-07	1,04E-05
292943	5,85143	1,04E+06	-9,24E+04	9,14E+04	9,42E-07	1,08E-05
303044	5,84057	1,01E+06	-8,95E+04	8,86E+04	9,72E-07	1,11E-05
313145	5,83112	9,79E+05	-8,68E+04	8,59E+04	1E-06	1,15E-05
323246	5,82211	9,51E+05	-8,42E+04	8,33E+04	1,03E-06	1,18E-05
333347	5,81055	9,25E+05	-8,18E+04	8,10E+04	1,06E-06	1,22E-05
343447	5,80337	9,00E+05	-7,95E+04	7,87E+04	1,09E-06	1,25E-05
353548	5,79452	8,80E+05	-7,74E+04	7,66E+04	1,11E-06	1,29E-05
363649	5,78428	8,59E+05	-7,54E+04	7,46E+04	1,14E-06	1,32E-05
373750	5,77727	8,34E+05	-7,34E+04	7,26E+04	1,17E-06	1,36E-05
383851	5,76681	8,17E+05	-7,16E+04	7,08E+04	1,2E-06	1,39E-05
393952	5,7599	7,98E+05	-6,99E+04	6,91E+04	1,23E-06	1,43E-05
404052	5,75287	7,81E+05	-6,82E+04	6,74E+04	1,26E-06	1,46E-05
414153	5,7442	7,65E+05	-6,66E+04	6,59E+04	1,29E-06	1,49E-05
424254	5,73725	7,49E+05	-6,51E+04	6,44E+04	1,31E-06	1,53E-05
434355	5,72998	7,31E+05	-6,37E+04	6,30E+04	1,34E-06	1,56E-05
444456	5,72182	7,18E+05	-6,23E+04	6,16E+04	1,37E-06	1,6E-05
454556	5,71555	7,06E+05	-6,10E+04	6,03E+04	1,39E-06	1,63E-05
464657	5,70965	6,91E+05	-5,97E+04	5,91E+04	1,42E-06	1,67E-05
474758	5,70349	6,78E+05	-5,85E+04	5,79E+04	1,45E-06	1,7E-05
484859	5,69731	6,65E+05	-5,74E+04	5,67E+04	1,48E-06	1,74E-05
494960	5,69172	6,52E+05	-5,63E+04	5,56E+04	1,51E-06	1,77E-05

505060	5,68665	6,41E+05	-5,52E+04	5,46E+04	1,53E-06	1,8E-05
515161	5,67967	6,29E+05	-5,42E+04	5,36E+04	1,57E-06	1,84E-05
525262	5,67531	6,17E+05	-5,32E+04	5,26E+04	1,59E-06	1,87E-05
535363	5,66789	6,06E+05	-5,22E+04	5,17E+04	1,62E-06	1,91E-05
545464	5,66433	5,97E+05	-5,13E+04	5,08E+04	1,65E-06	1,94E-05
555564	5,65873	5,88E+05	-5,04E+04	4,99E+04	1,67E-06	1,97E-05
565665	5,65282	5,77E+05	-4,96E+04	4,90E+04	1,7E-06	2,01E-05
575766	5,64679	5,68E+05	-4,87E+04	4,82E+04	1,73E-06	2,04E-05
585867	5,64265	5,57E+05	-4,79E+04	4,75E+04	1,76E-06	2,08E-05
595968	5,63768	5,50E+05	-4,72E+04	4,67E+04	1,79E-06	2,11E-05
606068	5,63124	5,42E+05	-4,64E+04	4,59E+04	1,82E-06	2,14E-05
616169	5,62757	5,34E+05	-4,57E+04	4,52E+04	1,85E-06	2,18E-05
626270	5,62298	5,26E+05	-4,50E+04	4,45E+04	1,88E-06	2,21E-05
636371	5,61768	5,18E+05	-4,43E+04	4,39E+04	1,9E-06	2,25E-05
646472	5,61301	5,10E+05	-4,37E+04	4,32E+04	1,93E-06	2,28E-05
656573	5,60918	5,04E+05	-4,30E+04	4,26E+04	1,96E-06	2,31E-05
666673	5,60363	4,96E+05	-4,24E+04	4,20E+04	1,98E-06	2,35E-05
676774	5,59951	4,90E+05	-4,18E+04	4,14E+04	2,01E-06	2,38E-05
686875	5,5945	4,82E+05	-4,12E+04	4,08E+04	2,04E-06	2,41E-05
696976	5,59142	4,76E+05	-4,07E+04	4,02E+04	2,07E-06	2,45E-05
707077	5,58695	4,70E+05	-4,01E+04	3,97E+04	2,1E-06	2,48E-05
717177	5,58217	4,63E+05	-3,96E+04	3,92E+04	2,12E-06	2,51E-05
727278	5,57906	4,58E+05	-3,91E+04	3,86E+04	2,14E-06	2,55E-05
737379	5,5739	4,53E+05	-3,86E+04	3,82E+04	2,17E-06	2,58E-05
747480	5,57157	4,47E+05	-3,81E+04	3,77E+04	2,2E-06	2,61E-05
757581	5,56504	4,41E+05	-3,76E+04	3,72E+04	2,23E-06	2,65E-05
767681	5,56189	4,36E+05	-3,71E+04	3,67E+04	2,26E-06	2,68E-05
777782	5,55741	4,31E+05	-3,67E+04	3,63E+04	2,28E-06	2,71E-05
787883	5,5548	4,25E+05	-3,62E+04	3,58E+04	2,32E-06	2,75E-05
797984	5,55021	4,20E+05	-3,58E+04	3,54E+04	2,34E-06	2,78E-05
808085	5,54505	4,15E+05	-3,54E+04	3,50E+04	2,37E-06	2,81E-05
818185	5,54435	4,11E+05	-3,49E+04	3,46E+04	2,4E-06	2,85E-05
828286	5,5404	4,06E+05	-3,45E+04	3,42E+04	2,42E-06	2,88E-05
838387	5,5363	4,02E+05	-3,41E+04	3,38E+04	2,44E-06	2,91E-05
848488	5,53141	3,97E+05	-3,38E+04	3,34E+04	2,47E-06	2,95E-05
858589	5,52931	3,93E+05	-3,34E+04	3,30E+04	2,51E-06	2,98E-05
868689	5,52572	3,89E+05	-3,30E+04	3,27E+04	2,53E-06	3,01E-05
878790	5,52296	3,85E+05	-3,27E+04	3,23E+04	2,56E-06	3,05E-05
888891	5,51954	3,81E+05	-3,23E+04	3,20E+04	2,59E-06	3,08E-05
898992	5,516	3,78E+05	-3,19E+04	3,16E+04	2,61E-06	3,11E-05
909093	5,51328	3,73E+05	-3,16E+04	3,13E+04	2,64E-06	3,15E-05
919194	5,51021	3,69E+05	-3,13E+04	3,10E+04	2,67E-06	3,18E-05
929294	5,5068	3,66E+05	-3,10E+04	3,07E+04	2,7E-06	3,21E-05
939395	5,50368	3,62E+05	-3,06E+04	3,04E+04	2,72E-06	3,25E-05
949496	5,50109	3,58E+05	-3,03E+04	3,00E+04	2,75E-06	3,28E-05
959597	5,49829	3,55E+05	-3,00E+04	2,97E+04	2,77E-06	3,31E-05
969698	5,4949	3,52E+05	-2,97E+04	2,95E+04	2,8E-06	3,35E-05
979798	5,49117	3,48E+05	-2,94E+04	2,92E+04	2,84E-06	3,38E-05
989899	5,48904	3,45E+05	-2,91E+04	2,89E+04	2,86E-06	3,41E-05
1000000	5,48419	3,42E+05	-2,89E+04	2,86E+04	2,88E-06	3,45E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3: Πυκνωτής M<sub>3</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>3</sub> - BT 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	X <sub>c</sub> (Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	5,37689	1,09E+07	-2,83E+06	2,61E+06	7,963E-08	3,447E-07
20221,6	4,95431	7,03E+06	-1,55E+06	1,46E+06	1,258E-07	6,344E-07
30322,4	4,74807	5,40E+06	-1,08E+06	1,03E+06	1,648E-07	9,104E-07
40423,2	4,61674	4,48E+06	-8,37E+05	8,01E+05	2,015E-07	1,181E-06
50524	4,52282	3,87E+06	-6,85E+05	6,59E+05	2,317E-07	1,444E-06
60624,8	4,45359	3,44E+06	-5,81E+05	5,61E+05	2,62E-07	1,705E-06
70725,7	4,39482	3,11E+06	-5,05E+05	4,89E+05	2,903E-07	1,963E-06
80826,5	4,34802	2,85E+06	-4,48E+05	4,35E+05	3,175E-07	2,218E-06
90927,3	4,30886	2,64E+06	-4,02E+05	3,91E+05	3,443E-07	2,472E-06
101028	4,2731	2,46E+06	-3,65E+05	3,56E+05	3,691E-07	2,725E-06
111129	4,24333	2,31E+06	-3,35E+05	3,26E+05	3,95E-07	2,976E-06
121230	4,21538	2,18E+06	-3,09E+05	3,01E+05	4,162E-07	3,225E-06
131331	4,19307	2,07E+06	-2,87E+05	2,80E+05	4,441E-07	3,474E-06
141431	4,17272	1,97E+06	-2,68E+05	2,62E+05	4,683E-07	3,72E-06
151532	4,15179	1,88E+06	-2,51E+05	2,46E+05	4,897E-07	3,969E-06
161633	4,13416	1,79E+06	-2,37E+05	2,32E+05	5,139E-07	4,214E-06
171734	4,11894	1,72E+06	-2,24E+05	2,19E+05	5,367E-07	4,459E-06
181835	4,10292	1,65E+06	-2,12E+05	2,08E+05	5,597E-07	4,701E-06
191935	4,08733	1,59E+06	-2,02E+05	1,98E+05	5,815E-07	4,946E-06
202036	4,0749	1,54E+06	-1,92E+05	1,89E+05	6,051E-07	5,185E-06
212137	4,06203	1,48E+06	-1,84E+05	1,81E+05	6,259E-07	5,43E-06
222238	4,04955	1,44E+06	-1,76E+05	1,73E+05	6,47E-07	5,671E-06
232339	4,03834	1,39E+06	-1,69E+05	1,66E+05	6,683E-07	5,911E-06
242439	4,02678	1,35E+06	-1,62E+05	1,60E+05	6,917E-07	6,152E-06
252540	4,01634	1,31E+06	-1,56E+05	1,54E+05	7,128E-07	6,392E-06
262641	4,00839	1,28E+06	-1,51E+05	1,48E+05	7,359E-07	6,632E-06
272742	3,99749	1,24E+06	-1,45E+05	1,43E+05	7,54E-07	6,869E-06
282843	3,98874	1,20E+06	-1,41E+05	1,38E+05	7,776E-07	7,109E-06
292943	3,98033	1,18E+06	-1,36E+05	1,34E+05	7,951E-07	7,346E-06
303044	3,97267	1,15E+06	-1,32E+05	1,30E+05	8,175E-07	7,583E-06
313145	3,96322	1,12E+06	-1,28E+05	1,26E+05	8,376E-07	7,82E-06
323246	3,9566	1,09E+06	-1,24E+05	1,22E+05	8,605E-07	8,06E-06
333347	3,94879	1,07E+06	-1,20E+05	1,19E+05	8,793E-07	8,293E-06
343447	3,94182	1,04E+06	-1,17E+05	1,16E+05	8,992E-07	8,527E-06
353548	3,9356	1,02E+06	-1,14E+05	1,13E+05	9,2E-07	8,765E-06
363649	3,92881	1,00E+06	-1,11E+05	1,10E+05	9,441E-07	8,999E-06
373750	3,92082	9,82E+05	-1,08E+05	1,07E+05	9,643E-07	9,23E-06
383851	3,91443	9,63E+05	-1,06E+05	1,04E+05	9,803E-07	9,469E-06
393952	3,91088	9,44E+05	-1,03E+05	1,02E+05	9,999E-07	9,705E-06
404052	3,90356	9,26E+05	-1,01E+05	9,94E+04	1,022E-06	9,94E-06
414153	3,89852	9,09E+05	-9,83E+04	9,72E+04	1,038E-06	1,017E-05
424254	3,89338	8,95E+05	-9,61E+04	9,49E+04	1,058E-06	1,041E-05
434355	3,88751	8,76E+05	-9,40E+04	9,28E+04	1,082E-06	1,063E-05
444456	3,88175	8,64E+05	-9,20E+04	9,08E+04	1,099E-06	1,087E-05
454556	3,87867	8,49E+05	-9,00E+04	8,90E+04	1,117E-06	1,11E-05
464657	3,87545	8,35E+05	-8,82E+04	8,71E+04	1,135E-06	1,134E-05
474758	3,86995	8,21E+05	-8,64E+04	8,54E+04	1,155E-06	1,158E-05
484859	3,86452	8,09E+05	-8,47E+04	8,38E+04	1,175E-06	1,181E-05
494960	3,86198	7,95E+05	-8,31E+04	8,21E+04	1,196E-06	1,204E-05

505060	3,8563	7,83E+05	-8,15E+04	8,06E+04	1,215E-06	1,227E-05
515161	3,85259	7,69E+05	-8,00E+04	7,91E+04	1,24E-06	1,25E-05
525262	3,84816	7,54E+05	-7,86E+04	7,77E+04	1,256E-06	1,273E-05
535363	3,84331	7,48E+05	-7,72E+04	7,63E+04	1,279E-06	1,296E-05
545464	3,83864	7,37E+05	-7,58E+04	7,50E+04	1,294E-06	1,319E-05
555564	3,8355	7,28E+05	-7,45E+04	7,37E+04	1,314E-06	1,342E-05
565665	3,83103	7,15E+05	-7,33E+04	7,24E+04	1,335E-06	1,365E-05
575766	3,82759	7,06E+05	-7,21E+04	7,13E+04	1,35E-06	1,388E-05
585867	3,82341	6,96E+05	-7,09E+04	7,01E+04	1,373E-06	1,411E-05
595968	3,82119	6,87E+05	-6,97E+04	6,90E+04	1,392E-06	1,434E-05
606068	3,81702	6,77E+05	-6,87E+04	6,79E+04	1,421E-06	1,457E-05
616169	3,81367	6,69E+05	-6,76E+04	6,69E+04	1,432E-06	1,479E-05
626270	3,80969	6,59E+05	-6,66E+04	6,58E+04	1,453E-06	1,502E-05
636371	3,80789	6,49E+05	-6,56E+04	6,49E+04	1,47E-06	1,525E-05
646472	3,8046	6,42E+05	-6,46E+04	6,39E+04	1,494E-06	1,548E-05
656573	3,80128	6,34E+05	-6,37E+04	6,30E+04	1,507E-06	1,571E-05
666673	3,79788	6,25E+05	-6,28E+04	6,21E+04	1,53E-06	1,594E-05
676774	3,79449	6,19E+05	-6,19E+04	6,12E+04	1,546E-06	1,618E-05
686875	3,79128	6,11E+05	-6,10E+04	6,04E+04	1,565E-06	1,641E-05
696976	3,78883	6,05E+05	-6,02E+04	5,96E+04	1,587E-06	1,663E-05
707077	3,7849	5,97E+05	-5,94E+04	5,87E+04	1,612E-06	1,686E-05
717177	3,78165	5,91E+05	-5,86E+04	5,80E+04	1,626E-06	1,709E-05
727278	3,77844	5,85E+05	-5,78E+04	5,72E+04	1,646E-06	1,732E-05
737379	3,77455	5,79E+05	-5,71E+04	5,65E+04	1,665E-06	1,754E-05
747480	3,77204	5,71E+05	-5,64E+04	5,58E+04	1,688E-06	1,777E-05
757581	3,76862	5,66E+05	-5,57E+04	5,51E+04	1,699E-06	1,799E-05
767681	3,7664	5,59E+05	-5,50E+04	5,44E+04	1,722E-06	1,822E-05
777782	3,76349	5,52E+05	-5,43E+04	5,37E+04	1,732E-06	1,844E-05
787883	3,75992	5,46E+05	-5,36E+04	5,31E+04	1,76E-06	1,867E-05
797984	3,75718	5,43E+05	-5,30E+04	5,25E+04	1,781E-06	1,89E-05
808085	3,75472	5,36E+05	-5,24E+04	5,18E+04	1,796E-06	1,912E-05
818185	3,75273	5,30E+05	-5,18E+04	5,12E+04	1,816E-06	1,935E-05
828286	3,74995	5,24E+05	-5,12E+04	5,06E+04	1,832E-06	1,957E-05
838387	3,7469	5,20E+05	-5,06E+04	5,01E+04	1,854E-06	1,979E-05
848488	3,74524	5,16E+05	-5,00E+04	4,95E+04	1,871E-06	2,002E-05
858589	3,74407	5,09E+05	-4,95E+04	4,90E+04	1,887E-06	2,025E-05
868689	3,74131	5,06E+05	-4,89E+04	4,84E+04	1,908E-06	2,047E-05
878790	3,73962	4,99E+05	-4,84E+04	4,79E+04	1,918E-06	2,07E-05
888891	3,73618	4,95E+05	-4,79E+04	4,74E+04	1,942E-06	2,092E-05
898992	3,73425	4,92E+05	-4,74E+04	4,69E+04	1,964E-06	2,115E-05
909093	3,73198	4,87E+05	-4,69E+04	4,64E+04	1,978E-06	2,137E-05
919194	3,72891	4,83E+05	-4,64E+04	4,59E+04	1,995E-06	2,159E-05
929294	3,72671	4,77E+05	-4,59E+04	4,55E+04	2,018E-06	2,182E-05
939395	3,72541	4,74E+05	-4,54E+04	4,50E+04	2,036E-06	2,204E-05
949496	3,72157	4,70E+05	-4,50E+04	4,46E+04	2,058E-06	2,227E-05
959597	3,71995	4,65E+05	-4,45E+04	4,41E+04	2,076E-06	2,249E-05
969698	3,71763	4,62E+05	-4,41E+04	4,37E+04	2,092E-06	2,271E-05
979798	3,71508	4,56E+05	-4,37E+04	4,33E+04	2,116E-06	2,294E-05
989899	3,71424	4,54E+05	-4,32E+04	4,28E+04	2,134E-06	2,316E-05
1000000	3,71216	4,50E+05	-4,28E+04	4,24E+04	2,151E-06	2,339E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 4: Πυκνωτής M<sub>4</sub>A<sub>4</sub>PA<sub>2</sub> - BT 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	Xc (Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	4,93476	1,25E+07	-3,06E+06	2,85E+06	7,61E-08	3,17E-07
20221,6	4,45783	7,20E+06	-1,70E+06	1,58E+06	1,30E-07	5,72E-07
30322,4	4,22155	5,35E+06	-1,20E+06	1,13E+06	1,72E-07	8,10E-07
40423,2	4,07443	4,38E+06	-9,41E+05	8,84E+05	2,09E-07	1,04E-06
50524	3,9714	3,76E+06	-7,75E+05	7,31E+05	2,43E-07	1,27E-06
60624,8	3,8967	3,34E+06	-6,60E+05	6,25E+05	2,74E-07	1,49E-06
70725,7	3,83337	3,02E+06	-5,77E+05	5,48E+05	3,04E-07	1,71E-06
80826,5	3,78336	2,75E+06	-5,12E+05	4,88E+05	3,31E-07	1,93E-06
90927,3	3,74066	2,56E+06	-4,61E+05	4,40E+05	3,55E-07	2,14E-06
101028	3,70363	2,39E+06	-4,19E+05	4,01E+05	3,83E-07	2,36E-06
111129	3,67196	2,25E+06	-3,85E+05	3,69E+05	4,07E-07	2,57E-06
121230	3,64487	2,12E+06	-3,55E+05	3,41E+05	4,32E-07	2,78E-06
131331	3,61774	2,01E+06	-3,31E+05	3,18E+05	4,56E-07	3,00E-06
141431	3,59605	1,92E+06	-3,09E+05	2,98E+05	4,79E-07	3,21E-06
151532	3,57301	1,83E+06	-2,91E+05	2,80E+05	5,01E-07	3,41E-06
161633	3,55515	1,76E+06	-2,74E+05	2,64E+05	5,23E-07	3,62E-06
171734	3,53629	1,69E+06	-2,59E+05	2,50E+05	5,44E-07	3,83E-06
181835	3,52075	1,63E+06	-2,46E+05	2,38E+05	5,66E-07	4,04E-06
191935	3,50533	1,57E+06	-2,34E+05	2,26E+05	5,87E-07	4,24E-06
202036	3,49218	1,52E+06	-2,24E+05	2,16E+05	6,07E-07	4,45E-06
212137	3,47802	1,47E+06	-2,14E+05	2,07E+05	6,27E-07	4,65E-06
222238	3,46655	1,42E+06	-2,05E+05	1,98E+05	6,47E-07	4,85E-06
232339	3,45425	1,38E+06	-1,97E+05	1,90E+05	6,66E-07	5,06E-06
242439	3,44337	1,35E+06	-1,89E+05	1,83E+05	6,85E-07	5,26E-06
252540	3,43378	1,31E+06	-1,82E+05	1,76E+05	7,04E-07	5,46E-06
262641	3,42373	1,28E+06	-1,76E+05	1,70E+05	7,23E-07	5,67E-06
272742	3,41537	1,24E+06	-1,70E+05	1,65E+05	7,41E-07	5,87E-06
282843	3,40612	1,21E+06	-1,64E+05	1,59E+05	7,61E-07	6,07E-06
292943	3,39809	1,19E+06	-1,59E+05	1,54E+05	7,78E-07	6,27E-06
303044	3,38956	1,16E+06	-1,53E+05	1,50E+05	7,96E-07	6,47E-06
313145	3,38174	1,14E+06	-1,49E+05	1,45E+05	8,13E-07	6,67E-06
323246	3,37389	1,11E+06	-1,44E+05	1,41E+05	8,31E-07	6,87E-06
333347	3,3672	1,09E+06	-1,40E+05	1,37E+05	8,48E-07	7,07E-06
343447	3,36113	1,07E+06	-1,37E+05	1,33E+05	8,66E-07	7,27E-06
353548	3,35425	1,05E+06	-1,33E+05	1,30E+05	8,82E-07	7,47E-06
363649	3,34826	1,03E+06	-1,29E+05	1,26E+05	8,96E-07	7,67E-06
373750	3,34218	1,01E+06	-1,26E+05	1,23E+05	9,17E-07	7,86E-06
383851	3,33522	9,93E+05	-1,23E+05	1,20E+05	9,37E-07	8,05E-06
393952	3,33078	9,73E+05	-1,20E+05	1,18E+05	9,52E-07	8,26E-06
404052	3,32636	9,61E+05	-1,17E+05	1,15E+05	9,66E-07	8,45E-06
414153	3,32062	9,45E+05	-1,15E+05	1,12E+05	9,84E-07	8,65E-06
424254	3,3161	9,31E+05	-1,12E+05	1,10E+05	9,99E-07	8,85E-06
434355	3,31182	9,14E+05	-1,10E+05	1,07E+05	1,01E-06	9,05E-06
444456	3,30649	9,02E+05	-1,07E+05	1,05E+05	1,03E-06	9,24E-06
454556	3,30193	8,91E+05	-1,05E+05	1,03E+05	1,05E-06	9,45E-06
464657	3,29762	8,79E+05	-1,03E+05	1,01E+05	1,06E-06	9,64E-06
474758	3,29287	8,63E+05	-1,01E+05	9,89E+04	1,07E-06	9,84E-06
484859	3,29108	8,53E+05	-9,90E+04	9,70E+04	1,09E-06	1,00E-05
494960	3,28632	8,39E+05	-9,71E+04	9,51E+04	1,11E-06	1,02E-05

505060	3,2827	8,28E+05	-9,53E+04	9,34E+04	1,12E-06	1,04E-05
515161	3,2798	8,19E+05	-9,35E+04	9,17E+04	1,14E-06	1,06E-05
525262	3,27388	8,03E+05	-9,18E+04	9,01E+04	1,16E-06	1,08E-05
535363	3,27143	7,96E+05	-9,02E+04	8,85E+04	1,17E-06	1,10E-05
545464	3,26691	7,88E+05	-8,87E+04	8,70E+04	1,19E-06	1,12E-05
555564	3,26279	7,76E+05	-8,71E+04	8,55E+04	1,20E-06	1,14E-05
565665	3,25962	7,66E+05	-8,57E+04	8,41E+04	1,22E-06	1,16E-05
575766	3,25652	7,59E+05	-8,43E+04	8,27E+04	1,23E-06	1,18E-05
585867	3,25309	7,50E+05	-8,29E+04	8,14E+04	1,25E-06	1,20E-05
595968	3,25012	7,38E+05	-8,16E+04	8,01E+04	1,26E-06	1,22E-05
606068	3,24754	7,30E+05	-8,03E+04	7,88E+04	1,28E-06	1,24E-05
616169	3,2427	7,22E+05	-7,90E+04	7,76E+04	1,29E-06	1,26E-05
626270	3,24055	7,12E+05	-7,79E+04	7,65E+04	1,31E-06	1,28E-05
636371	3,23744	7,07E+05	-7,67E+04	7,53E+04	1,32E-06	1,30E-05
646472	3,23528	6,98E+05	-7,56E+04	7,42E+04	1,34E-06	1,32E-05
656573	3,2325	6,88E+05	-7,45E+04	7,32E+04	1,35E-06	1,34E-05
666673	3,22966	6,84E+05	-7,34E+04	7,21E+04	1,37E-06	1,35E-05
676774	3,22637	6,76E+05	-7,24E+04	7,11E+04	1,38E-06	1,37E-05
686875	3,22342	6,70E+05	-7,14E+04	7,02E+04	1,40E-06	1,39E-05
696976	3,22241	6,62E+05	-7,04E+04	6,92E+04	1,41E-06	1,41E-05
707077	3,21826	6,55E+05	-6,95E+04	6,83E+04	1,42E-06	1,43E-05
717177	3,2163	6,48E+05	-6,86E+04	6,74E+04	1,44E-06	1,45E-05
727278	3,21316	6,42E+05	-6,76E+04	6,65E+04	1,45E-06	1,47E-05
737379	3,21041	6,35E+05	-6,68E+04	6,57E+04	1,46E-06	1,49E-05
747480	3,20939	6,29E+05	-6,59E+04	6,48E+04	1,48E-06	1,51E-05
757581	3,20589	6,22E+05	-6,51E+04	6,40E+04	1,49E-06	1,53E-05
767681	3,20385	6,14E+05	-6,43E+04	6,32E+04	1,51E-06	1,55E-05
777782	3,20136	6,10E+05	-6,35E+04	6,25E+04	1,52E-06	1,57E-05
787883	3,19885	6,03E+05	-6,28E+04	6,17E+04	1,54E-06	1,59E-05
797984	3,19629	5,98E+05	-6,20E+04	6,10E+04	1,55E-06	1,60E-05
808085	3,19455	5,96E+05	-6,13E+04	6,03E+04	1,57E-06	1,62E-05
818185	3,19296	5,88E+05	-6,06E+04	5,96E+04	1,58E-06	1,64E-05
828286	3,19118	5,84E+05	-5,99E+04	5,89E+04	1,60E-06	1,66E-05
838387	3,19036	5,78E+05	-5,92E+04	5,82E+04	1,61E-06	1,68E-05
848488	3,18848	5,75E+05	-5,85E+04	5,76E+04	1,62E-06	1,70E-05
858589	3,18782	5,70E+05	-5,79E+04	5,69E+04	1,64E-06	1,72E-05
868689	3,1875	5,66E+05	-5,72E+04	5,63E+04	1,65E-06	1,74E-05
878790	3,18617	5,62E+05	-5,66E+04	5,57E+04	1,67E-06	1,76E-05
888891	3,1839	5,57E+05	-5,60E+04	5,51E+04	1,68E-06	1,78E-05
898992	3,18356	5,55E+05	-5,54E+04	5,45E+04	1,69E-06	1,80E-05
909093	3,18179	5,49E+05	-5,48E+04	5,39E+04	1,70E-06	1,82E-05
919194	3,17905	5,46E+05	-5,42E+04	5,34E+04	1,72E-06	1,84E-05
929294	3,17842	5,41E+05	-5,37E+04	5,28E+04	1,73E-06	1,85E-05
939395	3,17524	5,36E+05	-5,31E+04	5,23E+04	1,74E-06	1,87E-05
949496	3,17374	5,33E+05	-5,26E+04	5,18E+04	1,75E-06	1,89E-05
959597	3,17239	5,29E+05	-5,21E+04	5,13E+04	1,77E-06	1,91E-05
969698	3,17031	5,26E+05	-5,16E+04	5,08E+04	1,79E-06	1,93E-05
979798	3,16769	5,22E+05	-5,11E+04	5,03E+04	1,81E-06	1,95E-05
989899	3,16507	5,18E+05	-5,07E+04	4,98E+04	1,81E-06	1,97E-05
1000000	3,16185	5,16E+05	-5,03E+04	4,93E+04	1,83E-06	1,99E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 5: Πυκνωτής  $M_6A_4$  - ΒΤ 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R( $\Omega$ )	Xc ( $\Omega$ )	Z  ( $\Omega$ )	G(S)	B(S)
10120,8	3,26925	5,78E+07	-4,76E+06	4,73E+06	1,70E-08	2,09E-07
20221,6	3,16628	3,19E+07	-2,46E+06	2,44E+06	3,07E-08	4,05E-07
30322,4	3,11232	2,27E+07	-1,67E+06	1,66E+06	4,35E-08	5,97E-07
40423,2	3,07363	1,77E+07	-1,27E+06	1,26E+06	5,61E-08	7,86E-07
50524	3,04533	1,43E+07	-1,03E+06	1,02E+06	6,94E-08	9,73E-07
60624,8	3,02346	1,22E+07	-8,61E+05	8,56E+05	8,18E-08	1,16E-06
70725,7	3,00061	1,04E+07	-7,44E+05	7,39E+05	9,44E-08	1,34E-06
80826,5	2,98207	9,26E+06	-6,54E+05	6,51E+05	1,06E-07	1,52E-06
90927,3	2,9675	8,37E+06	-5,85E+05	5,82E+05	1,17E-07	1,71E-06
101028	2,95364	7,62E+06	-5,28E+05	5,25E+05	1,30E-07	1,89E-06
111129	2,94322	6,99E+06	-4,82E+05	4,80E+05	1,42E-07	2,07E-06
121230	2,93273	6,42E+06	-4,44E+05	4,41E+05	1,54E-07	2,25E-06
131331	2,92336	5,92E+06	-4,11E+05	4,09E+05	1,67E-07	2,43E-06
141431	2,91342	5,51E+06	-3,83E+05	3,81E+05	1,79E-07	2,61E-06
151532	2,90511	5,18E+06	-3,58E+05	3,56E+05	1,91E-07	2,79E-06
161633	2,89716	4,85E+06	-3,37E+05	3,35E+05	2,04E-07	2,96E-06
171734	2,88994	4,61E+06	-3,18E+05	3,16E+05	2,16E-07	3,14E-06
181835	2,88485	4,37E+06	-3,01E+05	3,00E+05	2,29E-07	3,32E-06
191935	2,87686	4,13E+06	-2,86E+05	2,84E+05	2,39E-07	3,49E-06
202036	2,86992	3,91E+06	-2,72E+05	2,71E+05	2,53E-07	3,67E-06
212137	2,86521	3,74E+06	-2,60E+05	2,58E+05	2,65E-07	3,84E-06
222238	2,85913	3,58E+06	-2,48E+05	2,47E+05	2,77E-07	4,02E-06
232339	2,85472	3,45E+06	-2,38E+05	2,37E+05	2,90E-07	4,19E-06
242439	2,84722	3,30E+06	-2,29E+05	2,28E+05	3,00E-07	4,37E-06
252540	2,842	3,19E+06	-2,20E+05	2,19E+05	3,13E-07	4,54E-06
262641	2,8388	3,06E+06	-2,12E+05	2,11E+05	3,23E-07	4,71E-06
272742	2,83325	2,95E+06	-2,04E+05	2,03E+05	3,36E-07	4,89E-06
282843	2,82922	2,84E+06	-1,97E+05	1,96E+05	3,50E-07	5,06E-06
292943	2,82335	2,74E+06	-1,91E+05	1,90E+05	3,61E-07	5,23E-06
303044	2,8188	2,67E+06	-1,85E+05	1,84E+05	3,73E-07	5,40E-06
313145	2,81664	2,57E+06	-1,79E+05	1,78E+05	3,86E-07	5,58E-06
323246	2,81169	2,50E+06	-1,74E+05	1,73E+05	3,98E-07	5,75E-06
333347	2,80791	2,43E+06	-1,69E+05	1,68E+05	4,08E-07	5,92E-06
343447	2,80413	2,36E+06	-1,64E+05	1,63E+05	4,25E-07	6,09E-06
353548	2,79918	2,29E+06	-1,59E+05	1,59E+05	4,36E-07	6,26E-06
363649	2,79693	2,22E+06	-1,55E+05	1,54E+05	4,45E-07	6,43E-06
373750	2,79457	2,16E+06	-1,51E+05	1,50E+05	4,56E-07	6,60E-06
383851	2,78984	2,10E+06	-1,47E+05	1,47E+05	4,77E-07	6,77E-06
393952	2,78717	2,06E+06	-1,44E+05	1,43E+05	4,82E-07	6,94E-06
404052	2,78551	2,01E+06	-1,40E+05	1,40E+05	4,96E-07	7,11E-06
414153	2,78192	1,98E+06	-1,37E+05	1,36E+05	5,04E-07	7,28E-06
424254	2,77783	1,92E+06	-1,34E+05	1,33E+05	5,14E-07	7,46E-06
434355	2,77537	1,88E+06	-1,31E+05	1,30E+05	5,30E-07	7,62E-06
444456	2,77345	1,85E+06	-1,28E+05	1,27E+05	5,37E-07	7,79E-06
454556	2,77177	1,80E+06	-1,25E+05	1,25E+05	5,52E-07	7,96E-06
464657	2,76886	1,76E+06	-1,23E+05	1,22E+05	5,64E-07	8,13E-06
474758	2,76579	1,73E+06	-1,20E+05	1,20E+05	5,70E-07	8,30E-06
484859	2,7635	1,69E+06	-1,18E+05	1,17E+05	5,83E-07	8,47E-06
494960	2,76206	1,67E+06	-1,16E+05	1,15E+05	5,98E-07	8,64E-06

505060	2,7589	1,62E+06	-1,13E+05	1,13E+05	6,11E-07	8,81E-06
515161	2,75499	1,59E+06	-1,11E+05	1,11E+05	6,16E-07	8,98E-06
525262	2,75412	1,57E+06	-1,09E+05	1,09E+05	6,33E-07	9,14E-06
535363	2,75296	1,54E+06	-1,07E+05	1,07E+05	6,47E-07	9,31E-06
545464	2,75125	1,51E+06	-1,05E+05	1,05E+05	6,63E-07	9,48E-06
555564	2,74866	1,49E+06	-1,03E+05	1,03E+05	6,70E-07	9,65E-06
565665	2,74726	1,46E+06	-1,02E+05	1,01E+05	6,80E-07	9,81E-06
575766	2,7456	1,43E+06	-9,99E+04	9,93E+04	6,93E-07	9,99E-06
585867	2,74377	1,41E+06	-9,82E+04	9,77E+04	7,00E-07	1,01E-05
595968	2,74167	1,38E+06	-9,67E+04	9,61E+04	7,21E-07	1,03E-05
606068	2,73985	1,35E+06	-9,51E+04	9,46E+04	7,33E-07	1,05E-05
616169	2,73605	1,34E+06	-9,36E+04	9,31E+04	7,43E-07	1,07E-05
626270	2,73305	1,31E+06	-9,22E+04	9,17E+04	7,55E-07	1,08E-05
636371	2,73274	1,29E+06	-9,08E+04	9,03E+04	7,67E-07	1,10E-05
646472	2,73002	1,28E+06	-8,94E+04	8,89E+04	7,78E-07	1,12E-05
656573	2,72997	1,25E+06	-8,81E+04	8,76E+04	7,90E-07	1,13E-05
666673	2,72599	1,23E+06	-8,68E+04	8,63E+04	8,03E-07	1,15E-05
676774	2,72361	1,21E+06	-8,56E+04	8,51E+04	8,17E-07	1,17E-05
686875	2,72179	1,20E+06	-8,44E+04	8,39E+04	8,26E-07	1,18E-05
696976	2,72023	1,19E+06	-8,32E+04	8,27E+04	8,40E-07	1,20E-05
707077	2,71792	1,17E+06	-8,21E+04	8,16E+04	8,53E-07	1,22E-05
717177	2,71549	1,15E+06	-8,10E+04	8,05E+04	8,62E-07	1,23E-05
727278	2,71395	1,13E+06	-7,99E+04	7,94E+04	8,77E-07	1,25E-05
737379	2,71078	1,11E+06	-7,89E+04	7,84E+04	8,88E-07	1,27E-05
747480	2,70999	1,10E+06	-7,78E+04	7,74E+04	8,99E-07	1,28E-05
757581	2,70907	1,09E+06	-7,69E+04	7,64E+04	9,13E-07	1,30E-05
767681	2,70701	1,07E+06	-7,59E+04	7,55E+04	9,22E-07	1,32E-05
777782	2,70395	1,06E+06	-7,50E+04	7,45E+04	9,33E-07	1,33E-05
787883	2,70372	1,05E+06	-7,41E+04	7,37E+04	9,48E-07	1,35E-05
797984	2,70068	1,03E+06	-7,32E+04	7,28E+04	9,58E-07	1,36E-05
808085	2,70025	1,02E+06	-7,23E+04	7,19E+04	9,72E-07	1,38E-05
818185	2,69768	1,01E+06	-7,15E+04	7,10E+04	9,86E-07	1,40E-05
828286	2,69759	9,95E+05	-7,06E+04	7,02E+04	9,94E-07	1,41E-05
838387	2,69489	9,86E+05	-6,98E+04	6,94E+04	1,01E-06	1,43E-05
848488	2,69321	9,79E+05	-6,90E+04	6,86E+04	1,02E-06	1,45E-05
858589	2,69328	9,66E+05	-6,82E+04	6,79E+04	1,03E-06	1,46E-05
868689	2,69075	9,57E+05	-6,75E+04	6,71E+04	1,04E-06	1,48E-05
878790	2,68944	9,41E+05	-6,67E+04	6,64E+04	1,06E-06	1,50E-05
888891	2,68888	9,33E+05	-6,60E+04	6,57E+04	1,06E-06	1,51E-05
898992	2,68766	9,27E+05	-6,53E+04	6,50E+04	1,07E-06	1,53E-05
909093	2,68595	9,17E+05	-6,46E+04	6,43E+04	1,09E-06	1,55E-05
919194	2,68419	9,04E+05	-6,39E+04	6,36E+04	1,10E-06	1,56E-05
929294	2,68247	8,95E+05	-6,33E+04	6,29E+04	1,11E-06	1,58E-05
939395	2,68291	8,87E+05	-6,26E+04	6,23E+04	1,12E-06	1,59E-05
949496	2,68169	8,77E+05	-6,20E+04	6,16E+04	1,13E-06	1,61E-05
959597	2,68094	8,66E+05	-6,13E+04	6,10E+04	1,15E-06	1,63E-05
969698	2,67888	8,59E+05	-6,07E+04	6,04E+04	1,16E-06	1,64E-05
979798	2,67805	8,49E+05	-6,01E+04	5,98E+04	1,17E-06	1,66E-05
989899	2,67671	8,40E+05	-5,95E+04	5,93E+04	1,18E-06	1,68E-05
1000000	2,67578	8,29E+05	-5,90E+04	5,87E+04	1,19E-06	1,69E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 6: Πυκνωτής CUP - BT 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	Xc (Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	1,85E+00	1,64E+08	-8,55E+06	8,36E+06	6,28E-09	1,20E-07
20221,6	1,82E+00	9,03E+07	-4,37E+06	4,28E+06	1,10E-08	2,34E-07
30322,4	1,79E+00	6,46E+07	-2,95E+06	2,89E+06	1,60E-08	3,46E-07
40423,2	1,78E+00	4,95E+07	-2,23E+06	2,19E+06	2,08E-08	4,58E-07
50524	1,77E+00	3,86E+07	-1,80E+06	1,76E+06	2,53E-08	5,68E-07
60624,8	1,76E+00	3,47E+07	-1,50E+06	1,47E+06	2,81E-08	6,80E-07
70725,7	1,75E+00	2,99E+07	-1,30E+06	1,27E+06	3,37E-08	7,89E-07
80826,5	1,75E+00	2,66E+07	-1,14E+06	1,12E+06	3,82E-08	8,97E-07
90927,3	1,74E+00	2,22E+07	-1,02E+06	9,96E+05	4,10E-08	1,01E-06
101028	1,74E+00	2,26E+07	-9,17E+05	8,98E+05	4,47E-08	1,12E-06
111129	1,73E+00	2,10E+07	-8,36E+05	8,18E+05	4,90E-08	1,22E-06
121230	1,73E+00	1,96E+07	-7,67E+05	7,52E+05	5,17E-08	1,33E-06
131331	1,72E+00	1,81E+07	-7,10E+05	6,96E+05	5,53E-08	1,44E-06
141431	1,72E+00	1,70E+07	-6,61E+05	6,47E+05	6,01E-08	1,55E-06
151532	1,72E+00	1,63E+07	-6,18E+05	6,05E+05	6,41E-08	1,66E-06
161633	1,72E+00	1,52E+07	-5,80E+05	5,68E+05	6,76E-08	1,76E-06
171734	1,71E+00	1,44E+07	-5,47E+05	5,35E+05	7,05E-08	1,87E-06
181835	1,71E+00	1,36E+07	-5,17E+05	5,06E+05	7,25E-08	1,98E-06
191935	1,71E+00	1,31E+07	-4,90E+05	4,80E+05	7,84E-08	2,08E-06
202036	1,71E+00	1,25E+07	-4,66E+05	4,57E+05	8,08E-08	2,19E-06
212137	1,71E+00	1,21E+07	-4,45E+05	4,36E+05	8,55E-08	2,30E-06
222238	1,70E+00	1,18E+07	-4,25E+05	4,16E+05	8,61E-08	2,41E-06
232339	1,70E+00	1,13E+07	-4,07E+05	3,99E+05	9,09E-08	2,51E-06
242439	1,70E+00	1,09E+07	-3,90E+05	3,83E+05	9,38E-08	2,62E-06
252540	1,70E+00	1,06E+07	-3,75E+05	3,67E+05	9,87E-08	2,73E-06
262641	1,70E+00	1,02E+07	-3,61E+05	3,54E+05	1,00E-07	2,83E-06
272742	1,70E+00	9,64E+06	-3,48E+05	3,41E+05	1,04E-07	2,94E-06
282843	1,69E+00	9,62E+06	-3,36E+05	3,29E+05	1,08E-07	3,05E-06
292943	1,69E+00	9,25E+06	-3,24E+05	3,18E+05	1,11E-07	3,15E-06
303044	1,69E+00	8,99E+06	-3,13E+05	3,07E+05	1,15E-07	3,26E-06
313145	1,69E+00	8,68E+06	-3,04E+05	2,98E+05	1,19E-07	3,37E-06
323246	1,69E+00	8,47E+06	-2,94E+05	2,89E+05	1,21E-07	3,47E-06
333347	1,69E+00	8,32E+06	-2,86E+05	2,80E+05	1,26E-07	3,58E-06
343447	1,69E+00	8,11E+06	-2,77E+05	2,72E+05	1,27E-07	3,68E-06
353548	1,69E+00	7,86E+06	-2,69E+05	2,65E+05	1,30E-07	3,79E-06
363649	1,69E+00	7,66E+06	-2,63E+05	2,58E+05	1,26E-07	3,90E-06
373750	1,69E+00	7,51E+06	-2,55E+05	2,51E+05	1,36E-07	4,00E-06
383851	1,68E+00	7,56E+06	-2,49E+05	2,45E+05	1,35E-07	4,11E-06
393952	1,68E+00	7,35E+06	-2,42E+05	2,38E+05	1,41E-07	4,21E-06
404052	1,68E+00	6,98E+06	-2,36E+05	2,33E+05	1,46E-07	4,32E-06
414153	1,68E+00	7,08E+06	-2,31E+05	2,27E+05	1,45E-07	4,42E-06
424254	1,68E+00	6,87E+06	-2,25E+05	2,22E+05	1,51E-07	4,53E-06
434355	1,68E+00	6,87E+06	-2,20E+05	2,17E+05	1,54E-07	4,63E-06
444456	1,68E+00	6,57E+06	-2,15E+05	2,12E+05	1,56E-07	4,74E-06
454556	1,68E+00	6,49E+06	-2,11E+05	2,07E+05	1,57E-07	4,85E-06
464657	1,68E+00	6,42E+06	-2,06E+05	2,03E+05	1,58E-07	4,95E-06
474758	1,68E+00	6,30E+06	-2,02E+05	1,99E+05	1,61E-07	5,06E-06
484859	1,68E+00	6,23E+06	-1,98E+05	1,94E+05	1,64E-07	5,17E-06
494960	1,67E+00	6,04E+06	-1,93E+05	1,90E+05	1,67E-07	5,27E-06

505060	1,67E+00	5,99E+06	-1,90E+05	1,87E+05	1,76E-07	5,38E-06
515161	1,67E+00	5,79E+06	-1,86E+05	1,83E+05	1,72E-07	5,48E-06
525262	1,67E+00	5,74E+06	-1,82E+05	1,80E+05	1,79E-07	5,59E-06
535363	1,67E+00	5,58E+06	-1,79E+05	1,76E+05	1,76E-07	5,69E-06
545464	1,67E+00	5,65E+06	-1,76E+05	1,73E+05	1,84E-07	5,80E-06
555564	1,67E+00	5,62E+06	-1,73E+05	1,70E+05	1,89E-07	5,90E-06
565665	1,67E+00	5,39E+06	-1,70E+05	1,67E+05	1,87E-07	6,01E-06
575766	1,67E+00	5,38E+06	-1,67E+05	1,64E+05	1,89E-07	6,12E-06
585867	1,67E+00	5,29E+06	-1,64E+05	1,61E+05	1,96E-07	6,23E-06
595968	1,67E+00	5,26E+06	-1,61E+05	1,59E+05	1,97E-07	6,32E-06
606068	1,67E+00	5,00E+06	-1,59E+05	1,56E+05	2,04E-07	6,43E-06
616169	1,67E+00	4,99E+06	-1,56E+05	1,53E+05	2,05E-07	6,54E-06
626270	1,67E+00	4,93E+06	-1,54E+05	1,51E+05	2,08E-07	6,64E-06
636371	1,67E+00	4,79E+06	-1,51E+05	1,49E+05	2,15E-07	6,74E-06
646472	1,67E+00	4,71E+06	-1,49E+05	1,46E+05	2,14E-07	6,85E-06
656573	1,67E+00	4,68E+06	-1,47E+05	1,44E+05	2,20E-07	6,96E-06
666673	1,66E+00	4,68E+06	-1,44E+05	1,42E+05	2,17E-07	7,06E-06
676774	1,66E+00	4,65E+06	-1,42E+05	1,40E+05	2,26E-07	7,17E-06
686875	1,66E+00	4,52E+06	-1,40E+05	1,38E+05	2,29E-07	7,27E-06
696976	1,66E+00	4,51E+06	-1,38E+05	1,36E+05	2,31E-07	7,38E-06
707077	1,66E+00	4,44E+06	-1,36E+05	1,34E+05	2,29E-07	7,48E-06
717177	1,66E+00	4,26E+06	-1,34E+05	1,32E+05	2,35E-07	7,58E-06
727278	1,66E+00	4,37E+06	-1,33E+05	1,30E+05	2,36E-07	7,68E-06
737379	1,66E+00	4,17E+06	-1,31E+05	1,28E+05	2,40E-07	7,79E-06
747480	1,66E+00	4,28E+06	-1,29E+05	1,27E+05	2,41E-07	7,90E-06
757581	1,66E+00	4,04E+06	-1,27E+05	1,25E+05	2,46E-07	8,00E-06
767681	1,66E+00	4,15E+06	-1,26E+05	1,24E+05	2,53E-07	8,10E-06
777782	1,66E+00	3,99E+06	-1,24E+05	1,22E+05	2,50E-07	8,21E-06
787883	1,66E+00	4,03E+06	-1,23E+05	1,21E+05	2,56E-07	8,32E-06
797984	1,66E+00	3,97E+06	-1,21E+05	1,19E+05	2,58E-07	8,42E-06
808085	1,66E+00	4,01E+06	-1,20E+05	1,18E+05	2,57E-07	8,52E-06
818185	1,66E+00	4,02E+06	-1,18E+05	1,16E+05	2,64E-07	8,62E-06
828286	1,66E+00	3,86E+06	-1,17E+05	1,15E+05	2,67E-07	8,73E-06
838387	1,66E+00	3,87E+06	-1,15E+05	1,13E+05	2,68E-07	8,84E-06
848488	1,66E+00	3,77E+06	-1,14E+05	1,12E+05	2,70E-07	8,94E-06
858589	1,66E+00	3,82E+06	-1,13E+05	1,11E+05	2,72E-07	9,04E-06
868689	1,66E+00	3,73E+06	-1,12E+05	1,09E+05	2,75E-07	9,15E-06
878790	1,65E+00	3,79E+06	-1,10E+05	1,08E+05	2,75E-07	9,25E-06
888891	1,66E+00	3,70E+06	-1,09E+05	1,07E+05	2,72E-07	9,36E-06
898992	1,65E+00	3,73E+06	-1,08E+05	1,06E+05	2,80E-07	9,45E-06
909093	1,65E+00	3,63E+06	-1,07E+05	1,05E+05	2,82E-07	9,56E-06
919194	1,65E+00	3,62E+06	-1,06E+05	1,03E+05	2,81E-07	9,66E-06
929294	1,65E+00	3,59E+06	-1,05E+05	1,02E+05	2,83E-07	9,78E-06
939395	1,65E+00	3,51E+06	-1,03E+05	1,01E+05	2,95E-07	9,89E-06
949496	1,65E+00	3,50E+06	-1,02E+05	1,00E+05	2,96E-07	9,98E-06
959597	1,65E+00	3,46E+06	-1,01E+05	9,91E+04	2,91E-07	1,01E-05
969698	1,65E+00	3,41E+06	-1,00E+05	9,81E+04	3,00E-07	1,02E-05
979798	1,65E+00	3,33E+06	-9,92E+04	9,71E+04	3,02E-07	1,03E-05
989899	1,65E+00	3,30E+06	-9,82E+04	9,62E+04	3,08E-07	1,04E-05
1000000	1,65E+00	3,41E+06	-9,72E+04	9,52E+04	3,02E-07	1,05E-05

## ΠΙΝΑΚΑΣ 7: Πυκνωτής CER - BT 10% w/w

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	X <sub>c</sub> (Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	3,22321	1,44E+08	-4,93E+06	4,83E+06	6,85E-09	2,05E-07
20221,6	3,17346	7,36E+07	-2,50E+06	2,46E+06	1,39E-08	4,03E-07
30322,4	3,14473	4,95E+07	-1,68E+06	1,66E+06	2,03E-08	5,98E-07
40423,2	3,12555	3,73E+07	-1,27E+06	1,25E+06	2,69E-08	7,93E-07
50524	3,1093	3,00E+07	-1,02E+06	1,01E+06	3,35E-08	9,86E-07
60624,8	3,098	2,50E+07	-8,55E+05	8,42E+05	3,97E-08	1,18E-06
70725,7	3,08681	2,16E+07	-7,35E+05	7,24E+05	4,65E-08	1,37E-06
80826,5	3,07629	1,89E+07	-6,46E+05	6,36E+05	5,27E-08	1,56E-06
90927,3	3,06917	1,74E+07	-5,75E+05	5,67E+05	5,78E-08	1,75E-06
101028	3,06231	1,57E+07	-5,19E+05	5,12E+05	6,47E-08	1,94E-06
111129	3,05812	1,45E+07	-4,73E+05	4,66E+05	6,92E-08	2,13E-06
121230	3,05106	1,31E+07	-4,34E+05	4,28E+05	7,57E-08	2,32E-06
131331	3,04632	1,22E+07	-4,01E+05	3,96E+05	8,34E-08	2,51E-06
141431	3,04155	1,14E+07	-3,73E+05	3,69E+05	8,96E-08	2,70E-06
151532	3,03902	1,06E+07	-3,49E+05	3,45E+05	9,47E-08	2,89E-06
161633	3,0346	1,01E+07	-3,28E+05	3,24E+05	1,01E-07	3,08E-06
171734	3,03146	9,27E+06	-3,09E+05	3,05E+05	1,06E-07	3,27E-06
181835	3,02619	8,93E+06	-2,92E+05	2,88E+05	1,10E-07	3,45E-06
191935	3,02284	8,59E+06	-2,77E+05	2,74E+05	1,18E-07	3,64E-06
202036	3,02105	8,07E+06	-2,63E+05	2,60E+05	1,25E-07	3,83E-06
212137	3,01725	7,78E+06	-2,51E+05	2,48E+05	1,30E-07	4,02E-06
222238	3,01429	7,40E+06	-2,40E+05	2,37E+05	1,36E-07	4,20E-06
232339	3,01068	6,98E+06	-2,30E+05	2,27E+05	1,42E-07	4,38E-06
242439	3,00805	6,77E+06	-2,20E+05	2,18E+05	1,48E-07	4,57E-06
252540	3,00603	6,54E+06	-2,12E+05	2,09E+05	1,54E-07	4,76E-06
262641	3,00288	6,27E+06	-2,04E+05	2,01E+05	1,61E-07	4,95E-06
272742	3,00036	6,10E+06	-1,96E+05	1,94E+05	1,65E-07	5,13E-06
282843	2,9993	5,91E+06	-1,89E+05	1,87E+05	1,70E-07	5,32E-06
292943	2,99645	5,70E+06	-1,83E+05	1,81E+05	1,77E-07	5,50E-06
303044	2,99497	5,53E+06	-1,77E+05	1,75E+05	1,84E-07	5,69E-06
313145	2,9927	5,27E+06	-1,71E+05	1,69E+05	1,92E-07	5,88E-06
323246	2,99036	5,13E+06	-1,66E+05	1,64E+05	1,95E-07	6,06E-06
333347	2,98875	5,01E+06	-1,61E+05	1,59E+05	2,02E-07	6,25E-06
343447	2,98477	4,89E+06	-1,57E+05	1,55E+05	2,07E-07	6,43E-06
353548	2,98615	4,75E+06	-1,52E+05	1,50E+05	2,13E-07	6,61E-06
363649	2,98487	4,55E+06	-1,48E+05	1,46E+05	2,18E-07	6,81E-06
373750	2,98156	4,55E+06	-1,44E+05	1,43E+05	2,26E-07	6,99E-06
383851	2,97889	4,41E+06	-1,40E+05	1,39E+05	2,32E-07	7,18E-06
393952	2,97727	4,26E+06	-1,37E+05	1,35E+05	2,36E-07	7,36E-06
404052	2,9753	4,16E+06	-1,34E+05	1,32E+05	2,42E-07	7,54E-06
414153	2,97472	4,17E+06	-1,30E+05	1,29E+05	2,44E-07	7,73E-06
424254	2,97267	4,07E+06	-1,27E+05	1,26E+05	2,52E-07	7,91E-06
434355	2,97215	3,96E+06	-1,24E+05	1,23E+05	2,58E-07	8,10E-06
444456	2,96935	3,91E+06	-1,22E+05	1,20E+05	2,63E-07	8,28E-06
454556	2,9693	3,79E+06	-1,19E+05	1,18E+05	2,64E-07	8,47E-06
464657	2,96747	3,82E+06	-1,16E+05	1,15E+05	2,71E-07	8,66E-06
474758	2,96661	3,67E+06	-1,14E+05	1,13E+05	2,75E-07	8,84E-06
484859	2,96576	3,62E+06	-1,12E+05	1,10E+05	2,83E-07	9,03E-06

494960	2,96461	3,51E+06	-1,09E+05	1,08E+05	2,90E-07	9,21E-06
505060	2,96348	3,41E+06	-1,07E+05	1,06E+05	2,93E-07	9,39E-06
515161	2,96206	3,34E+06	-1,05E+05	1,04E+05	2,99E-07	9,58E-06
525262	2,96044	3,29E+06	-1,03E+05	1,02E+05	3,10E-07	9,77E-06
535363	2,95896	3,26E+06	-1,01E+05	1,00E+05	3,12E-07	9,95E-06
545464	2,95781	3,19E+06	-9,95E+04	9,84E+04	3,18E-07	1,01E-05
555564	2,95634	3,16E+06	-9,77E+04	9,66E+04	3,23E-07	1,03E-05
565665	2,95543	3,11E+06	-9,60E+04	9,49E+04	3,28E-07	1,05E-05
575766	2,95525	3,06E+06	-9,43E+04	9,33E+04	3,33E-07	1,07E-05
585867	2,95446	3,00E+06	-9,27E+04	9,17E+04	3,40E-07	1,09E-05
595968	2,95401	2,93E+06	-9,11E+04	9,01E+04	3,48E-07	1,10E-05
606068	2,95269	2,88E+06	-8,97E+04	8,87E+04	3,54E-07	1,12E-05
616169	2,95253	2,78E+06	-8,82E+04	8,73E+04	3,56E-07	1,14E-05
626270	2,95086	2,79E+06	-8,68E+04	8,59E+04	3,62E-07	1,16E-05
636371	2,95069	2,75E+06	-8,55E+04	8,46E+04	3,68E-07	1,18E-05
646472	2,94889	2,70E+06	-8,42E+04	8,33E+04	3,76E-07	1,20E-05
656573	2,94859	2,67E+06	-8,29E+04	8,20E+04	3,81E-07	1,22E-05
666673	2,94885	2,64E+06	-8,17E+04	8,08E+04	3,89E-07	1,23E-05
676774	2,94694	2,59E+06	-8,05E+04	7,97E+04	3,91E-07	1,25E-05
686875	2,94697	2,53E+06	-7,93E+04	7,85E+04	3,97E-07	1,27E-05
696976	2,94617	2,49E+06	-7,82E+04	7,74E+04	4,00E-07	1,29E-05
707077	2,94337	2,48E+06	-7,71E+04	7,62E+04	4,06E-07	1,31E-05
717177	2,94377	2,44E+06	-7,60E+04	7,52E+04	4,14E-07	1,32E-05
727278	2,94243	2,40E+06	-7,50E+04	7,42E+04	4,18E-07	1,34E-05
737379	2,94084	2,36E+06	-7,40E+04	7,32E+04	4,24E-07	1,36E-05
747480	2,94039	2,30E+06	-7,30E+04	7,23E+04	4,29E-07	1,38E-05
757581	2,93949	2,30E+06	-7,21E+04	7,13E+04	4,31E-07	1,40E-05
767681	2,93902	2,29E+06	-7,12E+04	7,04E+04	4,46E-07	1,41E-05
777782	2,9375	2,27E+06	-7,03E+04	6,95E+04	4,46E-07	1,43E-05
787883	2,93907	2,21E+06	-6,94E+04	6,87E+04	4,60E-07	1,45E-05
797984	2,93733	2,21E+06	-6,85E+04	6,78E+04	4,60E-07	1,47E-05
808085	2,93733	2,17E+06	-6,77E+04	6,70E+04	4,60E-07	1,49E-05
818185	2,936	2,15E+06	-6,68E+04	6,62E+04	4,67E-07	1,51E-05
828286	2,93587	2,11E+06	-6,61E+04	6,54E+04	4,78E-07	1,53E-05
838387	2,93488	2,09E+06	-6,53E+04	6,46E+04	4,79E-07	1,54E-05
848488	2,93366	2,07E+06	-6,45E+04	6,38E+04	4,87E-07	1,56E-05
858589	2,93247	2,05E+06	-6,38E+04	6,31E+04	4,91E-07	1,58E-05
868689	2,93295	2,04E+06	-6,31E+04	6,24E+04	4,98E-07	1,60E-05
878790	2,9317	2,00E+06	-6,23E+04	6,17E+04	5,01E-07	1,62E-05
888891	2,93161	1,98E+06	-6,17E+04	6,10E+04	5,04E-07	1,63E-05
898992	2,93121	1,97E+06	-6,10E+04	6,04E+04	5,14E-07	1,65E-05
909093	2,92974	1,93E+06	-6,03E+04	5,97E+04	5,22E-07	1,67E-05
919194	2,92969	1,91E+06	-5,97E+04	5,91E+04	5,21E-07	1,69E-05
929294	2,92879	1,88E+06	-5,90E+04	5,84E+04	5,27E-07	1,71E-05
939395	2,92875	1,85E+06	-5,84E+04	5,78E+04	5,30E-07	1,73E-05
949496	2,9283	1,86E+06	-5,78E+04	5,72E+04	5,40E-07	1,74E-05
959597	2,9279	1,85E+06	-5,72E+04	5,67E+04	5,43E-07	1,76E-05
969698	2,92705	1,83E+06	-5,66E+04	5,61E+04	5,54E-07	1,78E-05
979798	2,92557	1,78E+06	-5,60E+04	5,55E+04	5,51E-07	1,80E-05
989899	2,92554	1,79E+06	-5,55E+04	5,50E+04	5,61E-07	1,82E-05
1000000	2,92414	1,78E+06	-5,49E+04	5,44E+04	5,58E-07	1,84E-05

**ΠΙΝΑΚΑΣ 8: Πυκνωτής Νεολάκη - ΒΤ 10% w/w**

f (Hz)	C (pF)	R(Ω)	Xc (Ω)	Z  (Ω)	G(S)	B(S)
10120,8	1,58139	2,42E+08	-1,02E+07	9,67E+06	4,05E-09	1,01E-07
20221,6	1,55361	1,26E+08	-5,19E+06	4,95E+06	7,90E-09	1,97E-07
30322,4	1,53578	8,76E+07	-3,49E+06	3,33E+06	1,17E-08	2,93E-07
40423,2	1,5244	6,78E+07	-2,64E+06	2,52E+06	1,50E-08	3,87E-07
50524	1,51693	5,26E+07	-2,13E+06	2,03E+06	1,92E-08	4,81E-07
60624,8	1,51125	4,46E+07	-1,78E+06	1,70E+06	2,16E-08	5,75E-07
70725,7	1,5051	3,90E+07	-1,53E+06	1,46E+06	2,64E-08	6,67E-07
80826,5	1,49729	3,53E+07	-1,35E+06	1,29E+06	2,90E-08	7,60E-07
90927,3	1,49188	3,17E+07	-1,20E+06	1,15E+06	3,11E-08	8,52E-07
101028	1,49157	3,11E+07	-1,08E+06	1,03E+06	3,41E-08	9,45E-07
111129	1,48768	2,87E+07	-9,86E+05	9,41E+05	3,71E-08	1,04E-06
121230	1,48446	2,48E+07	-9,07E+05	8,66E+05	4,12E-08	1,13E-06
131331	1,48261	2,47E+07	-8,38E+05	7,99E+05	4,22E-08	1,22E-06
141431	1,48001	2,27E+07	-7,79E+05	7,44E+05	4,59E-08	1,31E-06
151532	1,4771	2,17E+07	-7,29E+05	6,96E+05	4,89E-08	1,40E-06
161633	1,47449	2,03E+07	-6,83E+05	6,53E+05	5,15E-08	1,49E-06
171734	1,47274	1,96E+07	-6,44E+05	6,16E+05	5,52E-08	1,59E-06
181835	1,47144	1,82E+07	-6,09E+05	5,83E+05	5,63E-08	1,68E-06
191935	1,47203	1,78E+07	-5,78E+05	5,52E+05	5,99E-08	1,77E-06
202036	1,47105	1,70E+07	-5,50E+05	5,25E+05	6,10E-08	1,86E-06
212137	1,46939	1,60E+07	-5,24E+05	5,00E+05	6,25E-08	1,95E-06
222238	1,46744	1,55E+07	-5,01E+05	4,78E+05	6,59E-08	2,04E-06
232339	1,46583	1,47E+07	-4,80E+05	4,58E+05	6,89E-08	2,13E-06
242439	1,46427	1,45E+07	-4,60E+05	4,39E+05	7,31E-08	2,22E-06
252540	1,46351	1,39E+07	-4,41E+05	4,22E+05	7,34E-08	2,31E-06
262641	1,46167	1,33E+07	-4,25E+05	4,06E+05	7,72E-08	2,40E-06
272742	1,46083	1,32E+07	-4,09E+05	3,92E+05	7,80E-08	2,50E-06
282843	1,46051	1,29E+07	-3,95E+05	3,78E+05	8,12E-08	2,59E-06
292943	1,45852	1,26E+07	-3,82E+05	3,66E+05	8,33E-08	2,68E-06
303044	1,45726	1,21E+07	-3,69E+05	3,54E+05	8,42E-08	2,77E-06
313145	1,45552	1,17E+07	-3,58E+05	3,43E+05	8,92E-08	2,86E-06
323246	1,45623	1,14E+07	-3,47E+05	3,32E+05	8,91E-08	2,95E-06
333347	1,45571	1,12E+07	-3,37E+05	3,22E+05	9,10E-08	3,04E-06
343447	1,45514	1,07E+07	-3,27E+05	3,13E+05	9,72E-08	3,13E-06
353548	1,45347	1,04E+07	-3,18E+05	3,05E+05	9,81E-08	3,22E-06
363649	1,45307	1,08E+07	-3,09E+05	2,96E+05	1,02E-07	3,30E-06
373750	1,45213	1,05E+07	-3,01E+05	2,88E+05	1,03E-07	3,40E-06
383851	1,45099	9,64E+06	-2,93E+05	2,81E+05	1,04E-07	3,49E-06
393952	1,45047	9,78E+06	-2,86E+05	2,74E+05	1,09E-07	3,58E-06
404052	1,45008	9,51E+06	-2,78E+05	2,67E+05	1,06E-07	3,67E-06
414153	1,44965	9,43E+06	-2,72E+05	2,61E+05	1,10E-07	3,76E-06
424254	1,44973	9,26E+06	-2,66E+05	2,55E+05	1,14E-07	3,85E-06
434355	1,44895	9,26E+06	-2,59E+05	2,49E+05	1,12E-07	3,94E-06
444456	1,44861	9,29E+06	-2,54E+05	2,43E+05	1,14E-07	4,03E-06
454556	1,44825	9,19E+06	-2,48E+05	2,38E+05	1,11E-07	4,12E-06
464657	1,44798	9,01E+06	-2,43E+05	2,33E+05	1,15E-07	4,21E-06
474758	1,44784	9,07E+06	-2,37E+05	2,28E+05	1,21E-07	4,30E-06
484859	1,44725	8,66E+06	-2,33E+05	2,24E+05	1,27E-07	4,39E-06
494960	1,44656	8,35E+06	-2,28E+05	2,19E+05	1,23E-07	4,48E-06

505060	1,44488	8,11E+06	-2,24E+05	2,15E+05	1,28E-07	4,57E-06
515161	1,44514	8,31E+06	-2,19E+05	2,11E+05	1,24E-07	4,66E-06
525262	1,44498	7,88E+06	-2,15E+05	2,07E+05	1,33E-07	4,75E-06
535363	1,4446	7,71E+06	-2,11E+05	2,03E+05	1,34E-07	4,84E-06
545464	1,4438	7,90E+06	-2,07E+05	1,99E+05	1,35E-07	4,93E-06
555564	1,44266	7,50E+06	-2,04E+05	1,96E+05	1,35E-07	5,02E-06
565665	1,4411	7,55E+06	-2,00E+05	1,92E+05	1,39E-07	5,11E-06
575766	1,44047	7,45E+06	-1,97E+05	1,89E+05	1,39E-07	5,20E-06
585867	1,44047	7,33E+06	-1,93E+05	1,85E+05	1,41E-07	5,29E-06
595968	1,43947	7,27E+06	-1,90E+05	1,82E+05	1,44E-07	5,38E-06
606068	1,43819	6,97E+06	-1,87E+05	1,80E+05	1,47E-07	5,47E-06
616169	1,438	6,98E+06	-1,84E+05	1,77E+05	1,52E-07	5,56E-06
626270	1,43689	6,84E+06	-1,81E+05	1,74E+05	1,55E-07	5,65E-06
636371	1,43793	6,68E+06	-1,78E+05	1,71E+05	1,55E-07	5,74E-06
646472	1,43609	6,60E+06	-1,75E+05	1,69E+05	1,54E-07	5,83E-06
656573	1,43683	6,54E+06	-1,73E+05	1,66E+05	1,60E-07	5,92E-06
666673	1,43788	6,51E+06	-1,70E+05	1,64E+05	1,62E-07	6,01E-06
676774	1,43717	6,18E+06	-1,68E+05	1,61E+05	1,63E-07	6,10E-06
686875	1,43806	6,27E+06	-1,65E+05	1,59E+05	1,68E-07	6,19E-06
696976	1,4366	6,21E+06	-1,63E+05	1,56E+05	1,68E-07	6,28E-06
707077	1,43631	6,18E+06	-1,60E+05	1,54E+05	1,72E-07	6,37E-06
717177	1,43465	6,06E+06	-1,58E+05	1,52E+05	1,73E-07	6,46E-06
727278	1,43454	5,95E+06	-1,56E+05	1,50E+05	1,77E-07	6,54E-06
737379	1,43517	5,94E+06	-1,54E+05	1,48E+05	1,75E-07	6,63E-06
747480	1,43321	5,99E+06	-1,52E+05	1,46E+05	1,79E-07	6,72E-06
757581	1,43374	5,75E+06	-1,50E+05	1,44E+05	1,76E-07	6,81E-06
767681	1,43342	5,93E+06	-1,48E+05	1,42E+05	1,80E-07	6,90E-06
777782	1,43191	5,75E+06	-1,46E+05	1,41E+05	1,85E-07	6,99E-06
787883	1,43184	5,68E+06	-1,45E+05	1,39E+05	1,82E-07	7,08E-06
797984	1,43147	5,51E+06	-1,43E+05	1,37E+05	1,90E-07	7,16E-06
808085	1,43163	5,36E+06	-1,41E+05	1,35E+05	1,89E-07	7,26E-06
818185	1,43103	5,47E+06	-1,39E+05	1,34E+05	1,88E-07	7,34E-06
828286	1,43176	5,62E+06	-1,38E+05	1,32E+05	1,97E-07	7,43E-06
838387	1,43119	5,45E+06	-1,36E+05	1,31E+05	1,97E-07	7,52E-06
848488	1,43024	5,23E+06	-1,34E+05	1,29E+05	1,96E-07	7,61E-06
858589	1,43093	5,39E+06	-1,33E+05	1,28E+05	1,96E-07	7,70E-06
868689	1,42807	5,27E+06	-1,31E+05	1,26E+05	2,00E-07	7,79E-06
878790	1,42933	5,26E+06	-1,30E+05	1,25E+05	1,98E-07	7,88E-06
888891	1,42984	5,19E+06	-1,28E+05	1,23E+05	1,99E-07	7,97E-06
898992	1,42958	5,07E+06	-1,27E+05	1,22E+05	2,04E-07	8,06E-06
909093	1,42878	5,16E+06	-1,26E+05	1,20E+05	2,05E-07	8,15E-06
919194	1,42855	5,18E+06	-1,24E+05	1,19E+05	2,07E-07	8,24E-06
929294	1,42828	5,17E+06	-1,23E+05	1,18E+05	2,08E-07	8,33E-06
939395	1,42843	4,99E+06	-1,21E+05	1,16E+05	2,13E-07	8,42E-06
949496	1,42783	4,83E+06	-1,20E+05	1,15E+05	2,14E-07	8,50E-06
959597	1,42853	4,91E+06	-1,19E+05	1,14E+05	2,19E-07	8,59E-06
969698	1,42808	4,78E+06	-1,18E+05	1,13E+05	2,14E-07	8,68E-06
979798	1,42726	4,85E+06	-1,16E+05	1,12E+05	2,27E-07	8,77E-06
989899	1,4264	4,79E+06	-1,15E+05	1,11E+05	2,19E-07	8,86E-06
1000000	1,42781	4,76E+06	-1,14E+05	1,10E+05	2,23E-07	8,95E-06

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ι.Α.Ασημακόπουλος, «Κατασκευή, Χαρακτηρισμός και Ιδιότητες Σύνθετων Διηλεκτρικών Υλικών Πολυμερικής Μήτρας», υπό την επίβλεψη του κ. Λουκά Ζουμπουλάκη, Αν. Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών Ε.Μ.Π., Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2015.
- [2] Λ.Θ. Ζουμπουλάκης, «Ενισχυμένα Πολυμερή με ίνες άνθρακος σε σύστημα ρητίνης νεολάκης-ινών άνθρακα», Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1980.
- [3] Ιωάννης Α. Ασημακόπουλος, Γεώργιος Χ. Ψαρράς, Λουκάς Ζουμπουλάκης, «Συγκριτική Μελέτη Σύνθετων Υλικών: αποτελούμενα από Θερμο-Σκληρυνόμενες Πολυμερικές μήτρες τριών ειδών (φαινόλης-φορμαλδεΰδης, 8 διαφορετικών συνθέσεων ακόρεστου πολυεστέρα και εποξειδικής) και Νανο-Σωματιδίων Φερροηλεκτρικού Κεραμικού Τιτανικού Βαρίου» 2015, 10<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Χημικής Μηχανικής, Πάτρα, σελ. 2-23.
- [4] I. Asimakopoulos, L. Zoumpoulakis, G.C. Psarras, “Development and Characterization of a Novolac Resin/BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles Composite System”, Journal of Applied Polymer Science, Journal of Applied Polymer Science, 2012, 125 (5), 3737-3744.
- [5] J. Simitzis, K. Karagiannis, L. Zoumpoulakis, “Influence of Biomass on the Curing of Nonolac-Composites”, Eur. Polym. J., 1996, 32 (1), 857-863.
- [6] Ι.Χρ. Σιμιτζής, “Επιστήμη και Τεχνική Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών”, Τόμος Ι, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2011, σελ.161-165.
- [7] Ι.Χρ. Σιμιτζής, “Επιστήμη και Τεχνική Πολυμερών και Σύνθετων Υλικών”, Τόμος ΙΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2012, σελ.684-689.
- [8] Ι.Χρ. Σιμιτζής, “Εργαστηριακές Ασκήσεις μαθήματος Πολυμερή και Σύνθετα Υλικά”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2009, σελ.15-18, 21-24.
- [9] Ι.Χρ. Σιμιτζής, “Εργαστηριακές Ασκήσεις μαθήματος Ενόργανες και Μη Καταστρεπτικές Μέθοδοι Εξέτασης των Υλικών-Εφαρμογές στο Εργαστήριο”, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005, σελ.119-128.
- [10] Αν.Δ. Ντόντος, “Συνθετικά Μακρομόρια. Βασική Θεώρηση”, Κωσταράκη, Αθήνα, 2006, σελ.71-73.
- [11] University of Southern Mississippi, Department of Polymer Science, Polymer Science Learning Center, 2005, από τη σελίδα του Διαδικτύου: <http://pslc.ws/macrog/epoxy.htm>
- [12] University of Rochester, Department of Chemistry, Synthetic Polymer Chemistry, Epoxy Polymers, 1999, από τη σελίδα του Διαδικτύου: <http://chem.chem.rochester.edu/~chem424/epoxy.htm>
- [13] Ν.Ι.Θεοδώρου, “Ηλεκτρικές Μετρήσεις: Κλασσικές Μετρήσεις”, Τεύχος Ι, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2007, σελ. 137-152, 171-196.
- [14] Ν.Ι. Θεοδώρου, “Ηλεκτρικές Μετρήσεις: Ηλεκτρονικές και Ψηφιακές Μετρήσεις”, Τεύχος ΙΙ, Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα, 2007, σελ. 17-22

- [15] D.E. Johnson, “Introduction to Filter Theory” Prentice – Hall Inc., 1976, ISBN: 0-13-483776-2.
- [16] Ν.Η. Παπαμάρκος, “Ανάλυση Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων”, Τόμος Β, Β. Γκιούρδας Εκδοτική, Αθήνα, 2007, σελ. 2.1-2.98.
- [17] Μ.Δ. Αθανασοπούλου, «Διηλεκτρικές Ιδιότητες Υλικών», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2012.
- [18] Ι.Α. Μέργος, «Διηλεκτρικά Υλικά και Περιβάλλον», Διδακτορική Διατριβή, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2007.
- [19] “Precision Impedance Analyzers 6500B Series: Product Specification”, Issue B, Wayne Kerr Electronics, USA, 2008.
- [20] Δ. Μανωλάκος, “Σημειώσεις Μαθήματος Εφαρμογές Προηγμένων Υλικών”, Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2004.
- [21] Π.Α. Ταραντίλη, “Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνολογία Πολυμερών”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 2013, σελ. 1-26.
- [22] Μ.Ε. Μητρούση, «Μελέτη της Μεταβολής της Απόσβεσης Πολυμερών και Συνθέτων Υλικών με την Προσθήκη Νανοσωματιδίων», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014.
- [23] T. Tanaka, G.C Montanari, R Mülhaupt, “Polymer Nanocomposites as dielectrics and electrical insulation-perspectives for processing technologies, material characterization and future application”, Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11 (5), 763-784.
- [24] Τ. Πατσίδης, «Νανο-Διηλεκτρικά Εποξειδικής Ρητίνης-BaTiO<sub>3</sub>: Ανάπτυξη, Ηλεκτρική Απόκριση και Λειτουργικότητα», Μεταπτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Πάτρα, 2009.
- [25] “Φίλτρα με Παθητικά Στοιχεία”, από την σελίδα του Διαδικτύου:  
<http://www.eln.teilam.gr/sites/default/files/10%20FILTRA.pdf>
- [26] Κ. Giannaras, “Ideal and real filters“, in Sector of Electronics and Robotics, 2011, από την σελίδα του Διαδικτύου:  
<http://users.sch.gr/kgiannaras/mathimata/analogika-ilektronika/idanika-kai-pragmatika/filtra.html>
- [27] G. Malandrakis, K. Tsakwna, K. Mpourlesi, “Passive Filters”, Athens, 2014, από τη σελίδα του Διαδικτύου: <http://ilektronikafiltra.blogspot.gr/>
- [28] Department of Production Engineering & Management, Technical University of Crete, “Basic Principles Weld”, από τη σελίδα του Διαδικτύου:  
<http://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/CNC/SHMEIWSEIS/5-WELD.pdf>
- [29] “Πολυμερές”, από τη σελίδα του Διαδικτύου:  
<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CF%85%CE%BC%CE%B5%CF%81%CE%AD%CF%82>

- [30] “Πολυμερή Υλικά”, από τη σελίδα του Διαδικτύου:  
[http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1\\_Polimeri\\_Genika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/A1_Polimeri_Genika.pdf)
- [31] “Σύνθετα Υλικά”, από τη σελίδα του Διαδικτύου:  
[http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1\\_Sintheta\\_ilika.pdf](http://courseware.mech.ntua.gr/ml00001/mathimata/C1_Sintheta_ilika.pdf)
- [32] “6<sup>η</sup> Εργαστηριακή Άσκηση: Μέτρηση Διηλεκτρικής Σταθεράς σε κύκλωμα RLC”, από τη σελίδα του Διαδικτύου: [http://www.metal.ntua.gr/uploads/3190/226/6th\\_ex.pdf](http://www.metal.ntua.gr/uploads/3190/226/6th_ex.pdf)
- [33] “Μελέτη της Χωρητικότητας Πυκνωτή και Μέτρηση της Διηλεκτρικής Σταθεράς”, από τη σελίδα του Διαδικτύου:  
[http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis\\_ergasthrion/askhsh\\_10.pdf](http://www.physics.ntua.gr/ergasthria/askhseis_ergasthrion/askhsh_10.pdf)
- [34] I.A. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Barium Titanate/polyester resin nanocomposites: Development, Structure-Properties Relationship and Energy Storage Capability*”, **Express Polymer Letters**, 2014, 8 (9), 692-707.
- [35] I.A. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Study on maleic acid/adipic acid/phthalic anhydride/ethylene glycol based unsaturated polyesters, with embedded ferroelectric BaTiO<sub>3</sub> nano-particles, composite systems*”, 10<sup>th</sup> Hellenic Polymer Society Conference (10<sup>th</sup> HPSC) with International Participation, University of Patras, Patras, Greece, 4-6 December 2014, Conference Proceedings pp.296-298.
- [36] I.A. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Mechanical and Dielectric Properties versus Structure: Study of epoxy resin /barium titanate nanocomposites*”, 30<sup>th</sup> Panhellenic Conference on Solid-State Physics and Materials Science (30<sup>th</sup> SSPMS), Foundation for Research and Technology, Heraklion, Crete, Greece, 21-24 September 2014, Conference Proceeding pp.187.
- [37] I.A. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Structure-Properties relationship and Energy Storage capability of Nano-Composite System: polyester polymer matrix/barium titanate particles*”, 28<sup>th</sup> Panhellenic Conference on Solid State Physics and Materials Science (28<sup>th</sup> SSPMS), University of Patras, Patras, Greece, 23-26 September 2012, Conference Proceeding <http://xxviii.physics.upatras.gr/program.html>.
- [38] I.A. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Mechanical and Dielectric Properties of Barium Titanate/Polyester Nano-Composite Materials*”, 9<sup>th</sup> International Conference on Nanosciences & Nanotechnologies (NN12), I. Vellidis Congress Center, Thessaloniki, Greece, 3-6 July 2012, Conference Proceeding pp.215.
- [39] I. Asimakopoulos, G.C. Psarras, L. Zoumpoulakis, “*Development and Characterization of a Novolac resin/ BaTiO<sub>3</sub> nanoparticles composite system*”, 8<sup>th</sup> Hellenic Polymer Society Symposium (HPOL8), Hersonissos, Crete, Greece, 24-29 October 2010, Conference Proceeding pp.215.