

ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
UNIVERSITY OF WEST ATTICA

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΙΑ 4  
ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΣ

# ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

## ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΦΟΙΤΗΤΗ :

---

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ	:	ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ	ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ	ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ
ΑΡΙΘΜΟΣ		ΜΗΤΡΩΟΥ	:	19390005
ΕΞΑΜΗΝΟ		ΦΟΙΤΗΤΗ	:	6 <sup>ο</sup>
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ		ΦΟΙΤΗΤΗ	:	ΠΡΟΠΤΥΧΙΑΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ		ΣΠΟΥΔΩΝ	:	ΠΑΔΑ
ΤΜΗΜΑ	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ	:	ΤΜΗΜΑ	B1 - ΘΚ 05 11:00-13:00
ΚΑΘΗΓΗΤΕΣ	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ	:	ΧΡΗΣΤΟΣ	ΚΑΜΠΟΥΡΗΣ – ΓΕΩΡΓΙΟΣ
				ΑΝΤΩΝΙΟΥ



## ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ :

---

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ : 25/5/2022

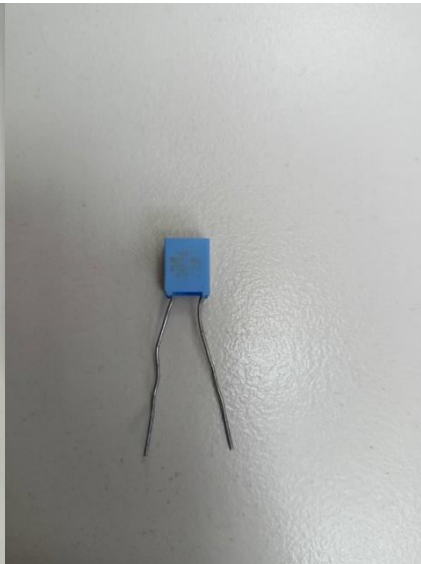
ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΠΑΡΑΔΟΣΗΣ ΑΣΚΗΣΗΣ : 23/6/2022

# ΘΕΩΡΙΑ ΚΥΚΛΩΜΑΤΩΝ

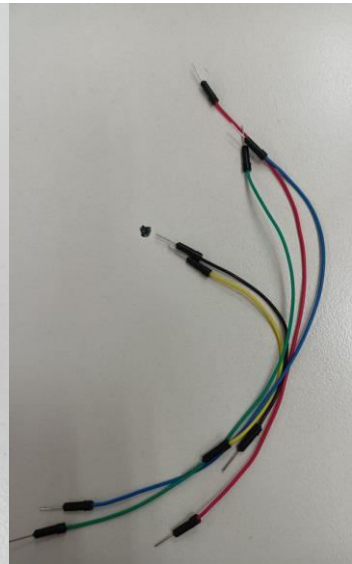
## ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΗΚΑΝ ΣΤΟ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ



Αναλογικό  
Πυκνωτής



Καλώδια



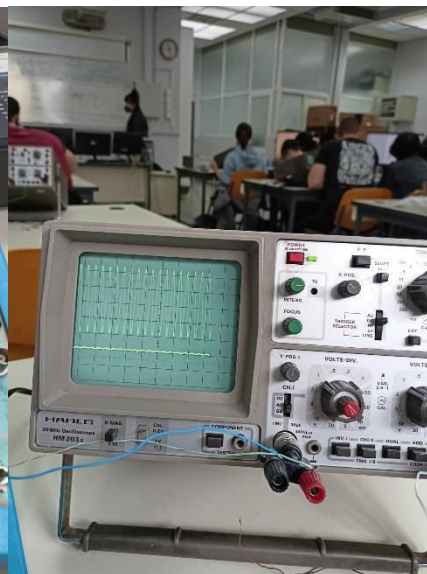
Αντιστάτης



Πολύμετρο  
Ψηφιακό  
Πολύμετρο



Breadboard



Παλμογράφος



Πηνίο

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## 1.1 : Συντονισμός σε κύκλωμα RLC σε σειρά (ΣΕΛΙΔΕΣ 5 - 11)

Γενικά	(ΣΕΛΙΔΑ 5)
Θεωρητική Επίλυση	(ΣΕΛΙΔΑ 5)
Προσομοιωτική Επίλυση	(ΣΕΛΙΔΕΣ 6 - 10)
Πειραματική Επίλυση	(ΣΕΛΙΔΕΣ 10 - 11)

## 1.2 : Συντονισμός σε κύκλωμα RLC σε παράλληλη σύνδεση (ΣΕΛΙΔΕΣ 12 - 17)

Γενικά	(ΣΕΛΙΔΑ 12)
Θεωρητική Επίλυση	(ΣΕΛΙΔΕΣ 12 - 13)
Προσομοιωτική Επίλυση	(ΣΕΛΙΔΕΣ 13 - 17)

## 1.1 : Συντονισμός σε κύκλωμα RLC σε σειρά

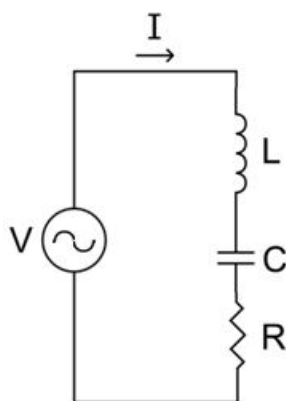
### Γενικά

Στα κεφάλαια «Προσομοιωτική Επίλυση» και «Πειραματική Επίλυση» παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν και οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος με στιγμιότυπα από το λογισμικό «Multisim» και φωτογραφίες του πειράματος από το περιβάλλον του εργαστηρίου αντίστοιχα, ενώ, στο κεφάλαιο «Θεωρητική Επίλυση» αναλύεται γενικά, η συμπεριφορά του κυκλώματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία σύνοψη για την επιλογή της κατάλληλης τιμής πηνίου που χρησιμοποιήσαμε στα κυκλώματα που παρουσιάζονται στα κεφάλαια «Προσομοιωτική Επίλυση» και «Πειραματική Επίλυση».

*Πίνακας 1*

Υλοποίηση	C	L θεωρητικό	L Τυπικό	Απόκλιση από την $f_R$
Σε Σειρά	47nF	0.64 mH	6200 $\mu$ H	681 Hz
Παράλληλα	27nF			

### Θεωρητική Επίλυση



*Εικόνα 1*

Το κύκλωμα της Εικόνας 1 επιτυγχάνει το φαινόμενο του συντονισμού σε κύκλωμα RLC, όπου το πηνίο (L) και ο πυκνωτής (C) είναι συνδεδεμένοι σε σειρά. Το φαινόμενο θα παρατηρηθεί σε συχνότητα, όπου η επαγωγική αντίδραση ( $X_L$ ) και η χωρητική ( $X_C$ ) αλληλοεξουδετερώνονται, δηλαδή, είναι ίσες. Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι :  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  και συνεπώς, κατά το φαινόμενο του συντονισμού η σύνθετη αντίσταση θα είναι ίση με την ωμική (R). Επίσης, κατά τη διάρκεια του φαινομένου παρατηρείται το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, καθώς από το νόμο του Ohm και το νόμο των τάσεων του Kirchhoff έχουμε :

$$V = V_L + V_C + V_R \Rightarrow V = IX_L + IX_C + IR \Rightarrow V = IX_C + IX_C + IR \Rightarrow V = I(2X_C + R)$$

(Από το φαινόμενο του συντονισμού, όπου ισχύει  $X_C = X_L$ )

$$I = V / Z \Rightarrow I = [I(2X_C + R)] / [\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}] \Rightarrow I = [I(2X_C + R)] / R$$

Η τρίτη παρατήρηση είναι ότι το ημιτονοειδές σήμα που εκπέμπει η είσοδος του κυκλώματος (πυκνωτής) με το αντίστοιχο που εκπέμπει η έξοδος του κυκλώματος (πηνίο, το οποίο παρατηρείται με την χρήση του παλμογράφου) είναι συμφασικά, δηλαδή, έχουν την ίδια φάση ( $\sin\phi = 1$ ). Εφόσον, οι τάσεις  $V_C$  και  $V_L$  είναι ίσες σημαίνει ότι η συνολική τάση του κυκλώματος μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές τάσης, δηλαδή, στο κύκλωμα RLC σε σειρά κατά το φαινόμενο του συντονισμού παρατηρούνται υπερτάσεις.

## Προσομοιωτική Επίλυση

### *Πίνακας 2*

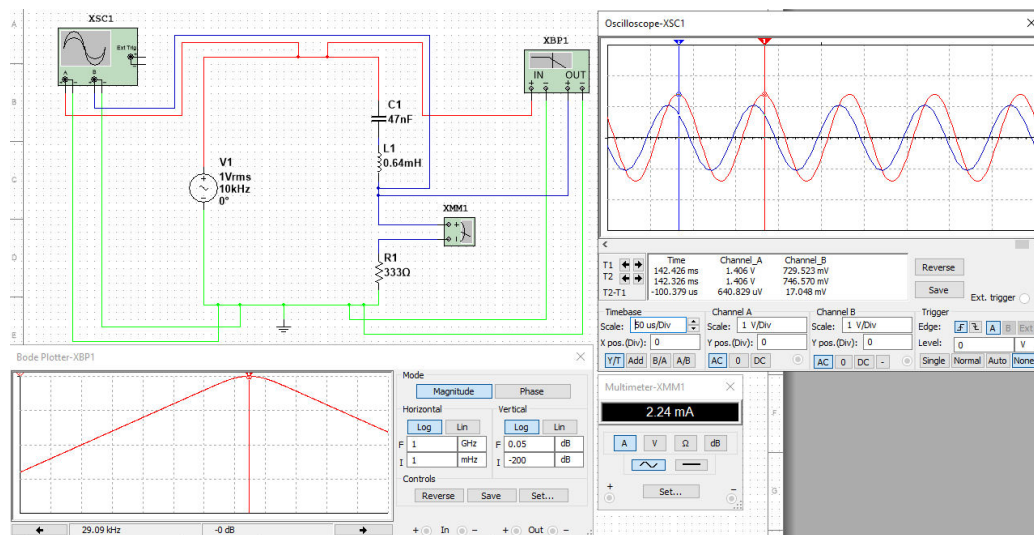
F (Hz)	Z (Ω)	X (Ω)	X <sub>L</sub> (Ω)	X <sub>C</sub> (Ω)	I <sub>rms</sub> (A)	V <sub>Lrms</sub> (V)	V <sub>Crms</sub> (V)
1	3333333333. 3	0.004000 3	0.004	3 * 10 <sup>-6</sup>	296.788 * 10 <sup>-9</sup>	12 * 10 <sup>-10</sup>	9 * 10 <sup>-14</sup>
10	333333333.3 3	0.040003	0.04	3 * 10 <sup>-5</sup>	2.968 * 10 <sup>-6</sup>	12 * 10 <sup>-8</sup>	9 * 10 <sup>-11</sup>
100	33333333.33 3	0.40003	0.4	3 * 10 <sup>-4</sup>	29.625 * 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-5</sup>	9 * 10 <sup>-9</sup>
500							
100 0	3333333.333 3	4.0003	4	3 * 10 <sup>-3</sup>	295.179 * 10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-3</sup>	9 * 10 <sup>-7</sup>
150 0							
250 0							
500 0							
10k							
30k	333	40.003	40	3 * 10 <sup>-2</sup>	2.24 * 10 <sup>-3</sup>	9 * 10 <sup>-2</sup>	7 * 10 <sup>-5</sup>
50k							
100 k	33.3	400.003	400	3 * 10 <sup>-1</sup>	2.01 * 10 <sup>-3</sup>	0.804	6 * 10 <sup>-4</sup>
200 k							
500 k							
1M							
10M							



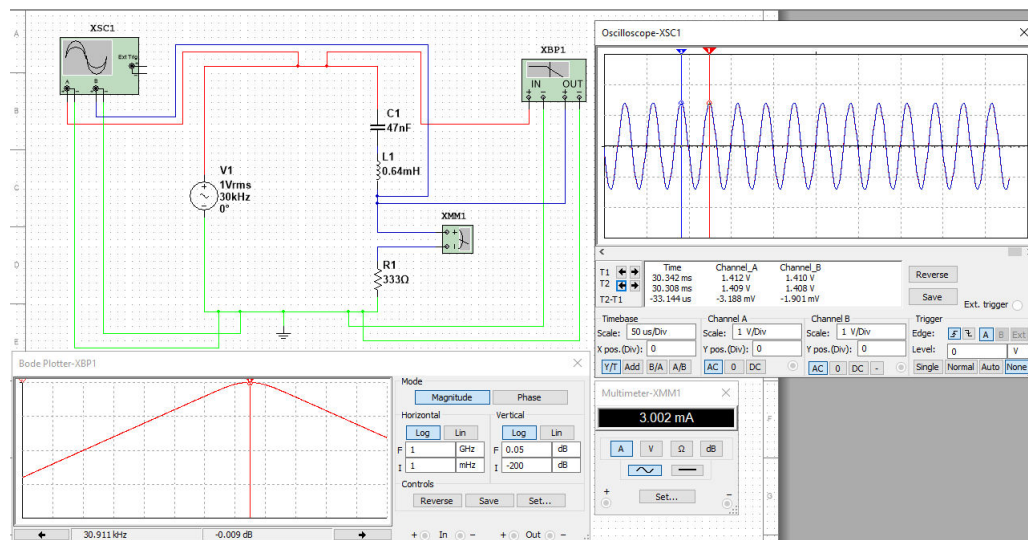


F (Hz )	Vi(V) Καν. Α Μέτρηση	Vo(V) Καν. Β Μέτρηση.	20log10(Vo/Vi) (db) Υπολογιζόμενο	I <sub>rms</sub> (A) Μέτρηση
1	1.410	7.165 * 10 <sup>-6</sup>		296.788 * 10 <sup>-9</sup>
10	61.647 * 10 <sup>-3</sup>	65.028 * 10 <sup>-6</sup>		2.968 * 10 <sup>-6</sup>
100	412.207 * 10 <sup>-3</sup>	7.562 * 10 <sup>-3</sup>		29.625 * 10 <sup>-6</sup>
500	5.417 * 10 <sup>-3</sup>	1.361 * 10 <sup>-3</sup>		147.994 * 10 <sup>-6</sup>
1000	2.260 * 10 <sup>-3</sup>	3.302 * 10 <sup>-3</sup>		295.179 * 10 <sup>-6</sup>
1500	6.370 * 10 <sup>-3</sup>	4.998 * 10 <sup>-3</sup>		440.775 * 10 <sup>-6</sup>
2500	4.487 * 10 <sup>-3</sup>	5.500 * 10 <sup>-3</sup>		724.203 * 10 <sup>-6</sup>
5000	1.118 * 10 <sup>-3</sup>	11.328 * 10 <sup>-3</sup>		1.361 * 10 <sup>-3</sup>
10k	3.094 * 10 <sup>-3</sup>	15.304 * 10 <sup>-3</sup>		2.24 * 10 <sup>-3</sup>
30k	25.755 * 10 <sup>-3</sup>	25.755 * 10 <sup>-3</sup>		3.002 * 10 <sup>-3</sup>
50k	1.577 * 10 <sup>-3</sup>	7.799 * 10 <sup>-3</sup>		2.785 * 10 <sup>-3</sup>
100k	1.691 * 10 <sup>-3</sup>	2.459 * 10 <sup>-3</sup>		2.01 * 10 <sup>-3</sup>
200k	19.784 * 10 <sup>-3</sup>	3.891 * 10 <sup>-3</sup>		1.166 * 10 <sup>-3</sup>
500k				
1M				

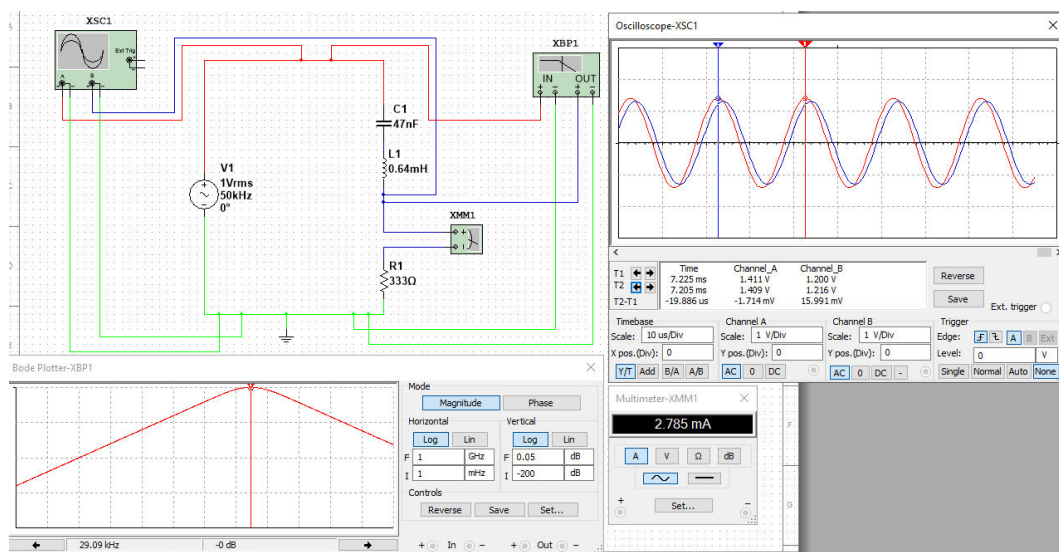
<b>10</b> <b>M</b>				
-----------------------	--	--	--	--



**Εικόνα 2**



**Εικόνα 3**



**Εικόνα 4**

Από την προσομοιωτική επίλυση στο λογισμικό «Multisim» (Εικόνες 2, 3, 4) και από τις μετρήσεις που έχουν καταγραφεί στους πίνακες 2 και 3, αποτυπώνεται με σαφήνεια το φαινόμενο του συντονισμού σε κύκλωμα RLC, όπου πηνίο και πυκνωτής είναι συνδεδεμένοι σε σειρά.

Καταρχάς, η θεωρητική τιμή του πηνίου που σημειώθηκε στην 2<sup>η</sup> γραμμή του πίνακα 1 στο κεφάλαιο «Γενικά» υπολογίστηκε από τον τύπο της συχνότητας του συντονισμού, ο οποίος είναι :  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , όπου «L» η αυτεπαγωγή του πηνίου, «C» η χωρητικότητα του πυκνωτή και « $f_r$ » η συχνότητα συντονισμού. Αναλυτικά, στον πίνακα 2, οι τιμές υπολογίστηκαν με τους εξής τύπους :

$$\text{Σύνθετη αντίσταση } Z = (R^2 + X^2)^{1/2} \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Άεργη αντίσταση } X = X_L - X_C \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Επαγωγική αντίδραση } X_L = 2\pi fL \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Χωρητική αντίδραση } X_C = 1 / 2\pi fC \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$I_{rms} = V_{rms} / Z \quad (\text{σε A})$$

$$V_{Lrms} = I_{rms} * X_L \quad (\text{σε V})$$

$$V_{Crms} = I_{rms} * X_C \quad (\text{σε V})$$

Στον πίνακα 3, οι τιμές σημειώθηκαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο «Multisim». Από τους πίνακες 2 και 3 και τις εικόνες 2, 3 και 4 παρατηρείται και μάλιστα με έντονο κόκκινο χρώμα (εικόνα 3), ότι η συχνότητα συντονισμού είναι 30 kHz. Αυτό δικαιολογείται από τις τρεις εξής παρατηρήσεις :

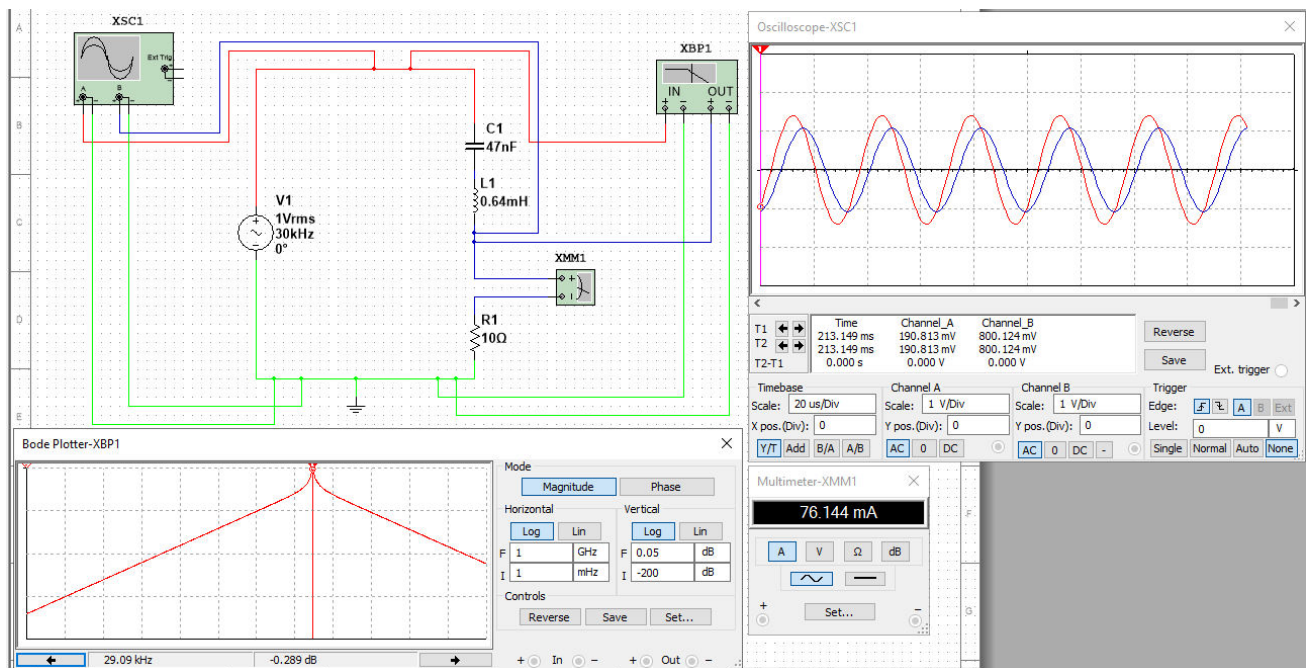
1. Το ημιτονοειδές σήμα που εκπέμπει ο πυκνωτής (είσοδος του κυκλώματος) έχει ίδια φάση με το αντίστοιχο που εκπέμπει η έξοδος του κυκλώματος (πηνίο) και αυτό παρατηρείται με την βοήθεια του παλμογράφου στην Εικόνα 3.
2. Η αντίσταση του κυκλώματος «Z» από την καταμέτρηση στον πίνακα 2, παρατηρείται ότι είναι ίση με την ωμική αντίσταση «R» (333 Ω). Αυτό δικαιολογείται από τον τύπο της σύνθετης αντίστασης «Z», ο οποίος είναι :  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  και κατά την διάρκεια του συντονισμού, η επαγωγική αντίδραση « $X_L$ » αλληλοεξουδετερώνεται με την χωρητική αντίδραση « $X_C$ », δηλαδή, είναι ίσες. Συνεπώς,  $Z = R^2 \Rightarrow Z = R$ .
3. Το ρεύμα που διαρρέει στο κύκλωμα στη συχνότητα συντονισμού (Εικόνα 3) είναι το μέγιστο, καθώς, σε συχνότητες που ξεπερνούν την συχνότητα συντονισμού (Εικόνα 4), το ρεύμα μειώνεται.

Τέλος, κατά την διάρκεια του συντονισμού παρατηρείται από τους πίνακες 2 και 3, ότι οι τιμές της τάσης του πυκνωτή  $V_C$  και του πηνίου  $V_L$  είναι αρκετά υψηλές αποδεικνύοντας την διατύπωση στην «Θεωρητική Επίλυση» για τα φαινόμενα υπέρτασης που παρουσιάζονται σε κύκλωμα RLC, όπου πυκνωτής και πηνίο είναι συνδεδεμένοι σε σειρά, κατά την διάρκεια του συντονισμού.

**Πίνακας 4**

Αντίσταση (Ω)	$Q_{ser} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$	$I_R$ (mA)
1k	0.117	$999.952 * 10^{-3}$
500	0.233	2
220	0.53	4.542
100	1.17	9.964
10	11.7	76.144

1	117	116.66
---	-----	--------



**Εικόνα 5**

Σύμφωνα, με τις μετρήσεις που έχουν καταγραφεί στον πίνακα 4, όσο μειώνεται η ωμική αντίσταση «R» του κυκλώματος, τόσο αυξάνεται το ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα. Αυτό δικαιολογείται από το νόμο του Ohm ( $I = V / R$ ), όπου η αντίσταση (R) και η ένταση του ρεύματος (I) είναι αντιστρόφως ανάλογα μεγέθη. Επίσης, όσο μειώνεται η αντίσταση τόσο αυξάνεται και ο συντελεστής απόδοσης του κυκλώματος Q, από τον τύπο  $Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Τέλος, αξίζει να σημειωθεί από την εικόνα 5 ότι η συχνότητα συντονισμού του κυκλώματος δεν είναι η συχνότητα των 30 kHz, όσο η τιμή της ωμικής αντίστασης είναι 10 Ω. Αυτό παρατηρείται από τα σήματα εισόδου και εξόδου που παρουσιάζονται στον παλμογράφο. Τα δύο σήματα δεν είναι συμφασικά και μάλιστα προηγείται το σήμα της επαγωγικής αντίδρασης « $X_L$ ».

## Πειραματική Επίλυση

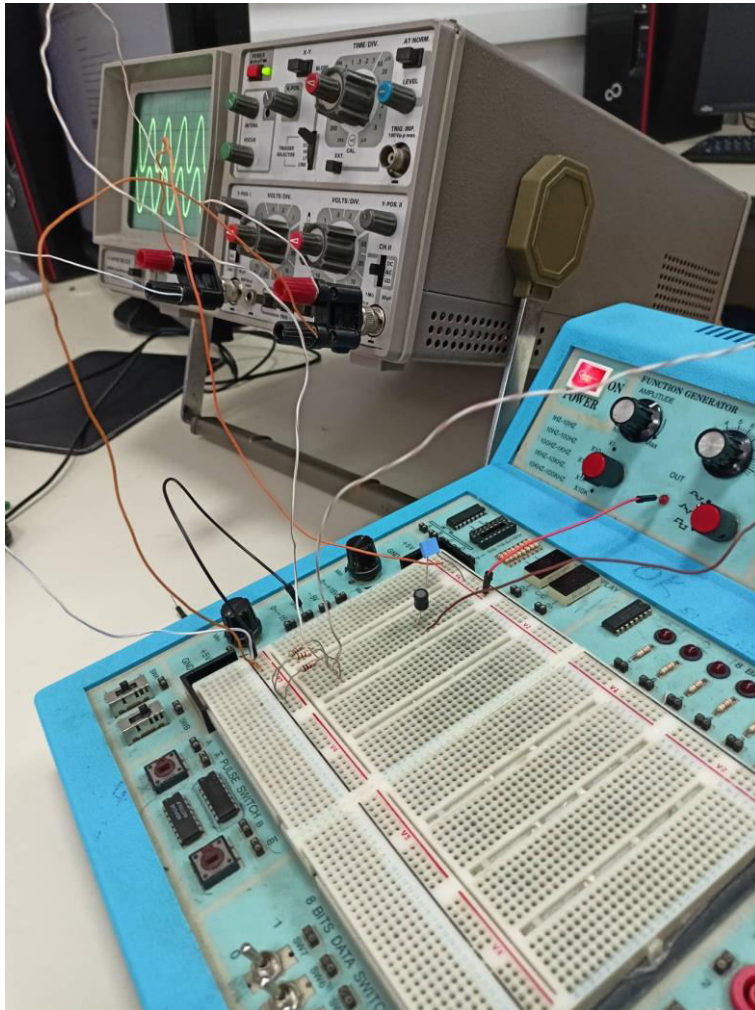
Για την πειραματική επίλυση που πραγματοποιήθηκε στο περιβάλλον του εργαστηρίου, χρησιμοποιήθηκαν το «breadboard», ο παλμογράφος, ένα αναλογικό πολύμετρο ρυθμισμένο να υπολογίζει ένταση ρεύματος (αμπερόμετρο), καλώδια, τρεις αντιστάσεις του 1 kΩ, ένας πυκνωτής χωρητικότητας 470 nF και ένα πηνίο με αυτεπαγωγή του 1 mH.

Ξεκινώντας, συνδέσαμε με ένα καλώδιο, την πηγή εναλλασόμενης τάσης σε μία βραχυκυκλωμένη γραμμή πάνω στο «breadboard» και την γείωση με ένα άλλο καλώδιο σε επίσης άλλη βραχυκυκλωμένη γραμμή. Στη συνέχεια, πήραμε τις τρεις αντιστάσεις του 1 kΩ, και τις συνδέσαμε παράλληλα, ώστε να σχηματίσουμε έμμεσα, την ισόδυναμη αντίσταση των 333 Ω, που χρησιμοποιήσαμε στην «Προσομοιωτική Επίλυση». Αμέσως μετά, συνδέσαμε σε σειρά με τις τρεις αντιστάσεις τον πυκνωτή και το πηνίο και ξεκινήσαμε το πείραμα συνδέοντας και τα όργανα μέτρησης. Πιο αναλυτικά, σε σειρά με το ένα άκρο της ισόδυναμης αντίστασης και με το ένα άκρο του πηνίου (όπως φαίνεται στην Εικόνα 6) συνδέσαμε το αναλογικό πολύμετρο ρυθμισμένο να είναι αμπερόμετρο, ώστε να μετρήσουμε το ρεύμα που διαρρέει στο κύκλωμα. Επίσης, το ένα κανάλι του παλμογράφου το συνδέσαμε στην πηγή (είσοδος του κυκλώματος  $V_{in}$ ) και το άλλο στο πηνίο (εξόδος του κυκλώματος  $V_{out}$ ), ώστε να παρατηρήσουμε τις κυματομορφές που εκπέμπουν ο πυκνωτής και το πηνίο. Όπως παρατηρούμε στην Εικόνα 6, οι φάσεις των δύο ημιτονοειδών σημάτων είναι ίσες (συμφασικές) στα 5 kHz,



που σημαίνει ότι βρισκόμαστε στην συχνότητα συντονισμού. Στην Εικόνα 7 παρουσιάζεται η ένδειξη του αμπερομέτρου σε συχνότητα μεγαλύτερη των 5 kHz (που είναι η συχνότητα συντονισμού) στα 2 mA. Κατά την συχνότητα συντονισμού το ρεύμα έφτασε στα 9 mA, όπου ήταν και το μέγιστο, καθώς, όσο αυξάναμε την συχνότητα εισόδου από την πηγή, το ρεύμα μειωνόταν σταδιακά. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται το διάγραμμα αντίσταση-συχνότητα, όπου απεικονίζει την τιμή της επαγωγική αντίδρασης ( $X_L$ ) και την τιμή της χωρητικής αντίδρασης ( $X_C$ ) για διάφορες τιμές συχνότητας εισόδου από την πηγή. Όπως, βέβαια παρατηρείται οι δύο τιμές είναι ίσες σε κάποια συχνότητα και η τιμή της σύνθετης αντίστασης του κυκλώματος είναι σταθερή, δηλαδή, η ωμική αντίσταση, σηματοδοτώντας ότι πρόκειται για την συχνότητα συντονισμού.

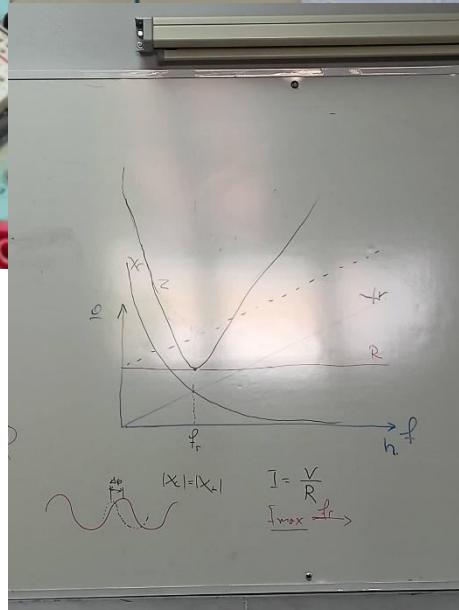
Συνοψίζοντας, και από τα δύο πειράματα διαπιστώνουμε ότι επαληθεύουν ορθά τις διατυπώσεις που έχουν καταγραφεί στην «Θεωρητική Επίλυση».



Εικόνα 6



Εικόνα 7



Εικόνα 8

## 1.2 : Συντονισμός σε κύκλωμα RLC σε παράλληλη σύνδεση

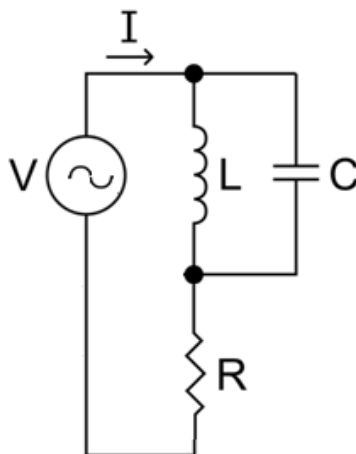
### Γενικά

Στο κεφάλαιο «Προσομοιωτική Επίλυση» παρουσιάζονται αναλυτικά τα εξαρτήματα που χρησιμοποιήθηκαν και οι παρατηρήσεις που σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια του πειράματος με στιγμιότυπα από το λογισμικό «Multisim», ενώ, στο κεφάλαιο «Θεωρητική Επίλυση» αναλύεται γενικά, η συμπεριφορά του κυκλώματος. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται μία σύνοψη για την επιλογή της κατάλληλης τιμής πηνίου που χρησιμοποιήσαμε στο κύκλωμα που παρουσιάζεται στο κεφάλαιο «Προσομοιωτική Επίλυση».

*Πίνακας 5*

Υλοποίηση	C	L Θεωρητικό	L Τυπικό	Απόκλιση από την $f_R$
Σε Σειρά	47nF	0.64 mH	6200 $\mu$ H	681 Hz
Παράλληλα	27nF	3.3 mH	3300 $\mu$ H	

### Θεωρητική Επίλυση



*Εικόνα 8*

Το κύκλωμα της Εικόνας 8 επιτυγχάνει το φαινόμενο του συντονισμού σε κύκλωμα RLC, όπου το πηνίο (L) και ο πυκνωτής (C) είναι συνδεδεμένοι παράλληλα. Το φαινόμενο θα παρατηρηθεί σε συχνότητα, όπου η επαγωγική αντίδραση ( $X_L$ ) και η χωρητική ( $X_C$ ) αλληλοεξουδετερώνονται, δηλαδή, είναι ίσες. Η σύνθετη αντίσταση του κυκλώματος είναι :  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  και συνεπώς, κατά το φαινόμενο του συντονισμού η σύνθετη αντίσταση θα είναι ίση με την ωμική (R). Επίσης, κατά τη διάρκεια του φαινομένου παρατηρείται το μέγιστο ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα, καθώς από το νόμο του Ohm και το νόμο των τάσεων του Kirchhoff έχουμε :

$$V = V_L + V_C + V_R \quad \square \quad V = IX_L + IX_C + IR \quad \square \quad V = IX_C + IX_C + IR \quad \square \quad V = I(2X_C + R)$$

(Από το φαινόμενο του συντονισμού, όπου ισχύει  $X_C = X_L$ )

$$I = V / Z \quad \square \quad I = [I(2X_C + R)] / [\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}] \quad \square \quad I = [I(2X_C + R)] / R$$

Η τρίτη παρατήρηση είναι ότι το ημιτονοειδές σήμα που εκπέμπει η είσοδος του κυκλώματος (πυκνωτής) με το αντίστοιχο που εκπέμπει η έξοδος του κυκλώματος (πηνίο, το οποίο παρατηρείται με την χρήση του παλμογράφου) είναι συμφασικά, δηλαδή, έχουν την ίδια φάση (συνφ = 1). Σε αντίθεση με το

κύκλωμα RLC, όπου πυκνωτής και πηνίο είναι συνδεδεμένοι σε σειρά και οι τάσεις  $V_C$  και  $V_L$  είναι ίσες που σημαίνει ότι η συνολική τάση του κυκλώματος μπορεί να πάρει μεγάλες τιμές τάσης, δηλαδή, στο κύκλωμα κατά το φαινόμενο του συντονισμού παρατηρούνται υπερτάσεις, στο αντίστοιχο κύκλωμα με παράλληλη σύνδεση, κατά το φαινόμενο του συντονισμού παρατηρούνται μεγάλες εντάσεις ρευμάτων, δηλαδή, στο κύκλωμα παρουσιάζονται υπερεντάσεις.

### Προσομοιωτική Επίλυση



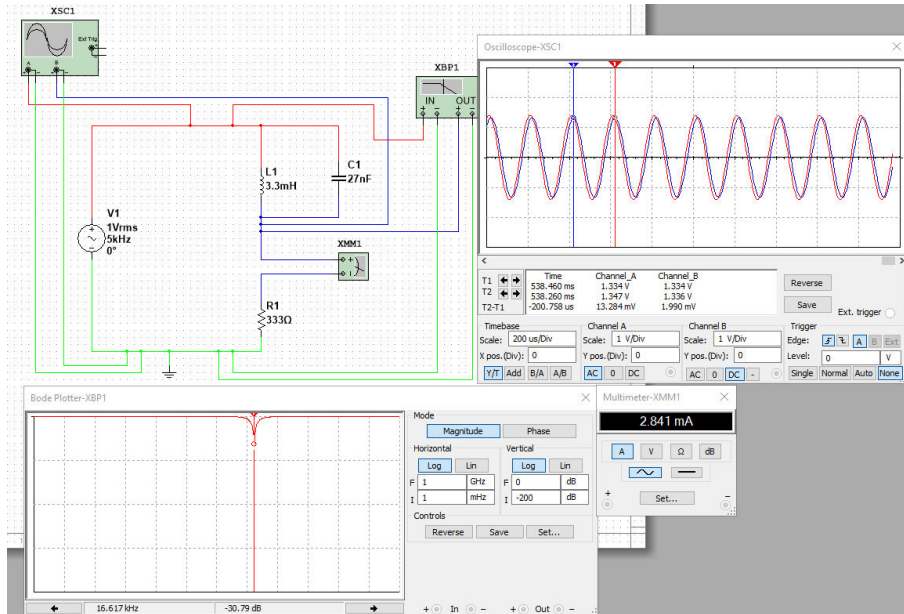
F (Hz)	Z (Ω)	X (Ω)	X <sub>L</sub> (Ω)	X <sub>C</sub> (Ω)	I <sub>rms</sub> (A)	V <sub>Lrms</sub> (V)	V <sub>Crms</sub> (V)
1	0.02	218430.2 5	0.02	218430.2 7	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	0.00006	6559.5
10	0.2	21842.82 7	0.2	21843.02 7	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	0.0006	655.95
100	2	2182.302 7	2	2184.302 7	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	0.006	65.59
500	0.33	426.86	10	436.86	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	0.03	1.31
1000	0.33	198.43	20	218.43	2.997 * 10 <sup>-3</sup>	0.06	0.6
1500	0.33	114.92	30	144.92	2.99 * 10 <sup>-3</sup>	0.09	0.4
2500	0.33	38.9	50	88.9	2.965 * 10 <sup>-3</sup>	0.1	0.3
5000	0.33	56.5	100	44.5	2.841 * 10 <sup>-3</sup>	0.3	0.12
10k	0.33	178.2	200	21.8	2.159 * 10 <sup>-3</sup>	0.4	0.05
30k	0.33	592.6	600	7.4	2.28 * 10 <sup>-3</sup>	1.3	0.02
50k	0.33	995.5	1000	4.5	2.79 * 10 <sup>-3</sup>	2.8	0.01
100k	0.33	1997.9	2000	2.1	2.955 * 10 <sup>-3</sup>	5.9	0.006
200k	0.33	3999	4000	1	2.991 * 10 <sup>-3</sup>	12	0.003
500k	0.33	9999.5	10000	0.5	3.001 * 10 <sup>-3</sup>	30	0.002
1M	0.33	1999.5	20000	0.2	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	60	0.0006
10M	0.33	19999.98	20000 0	0.02	3.003 * 10 <sup>-3</sup>	600	0.00006

*Πίνακας 6*

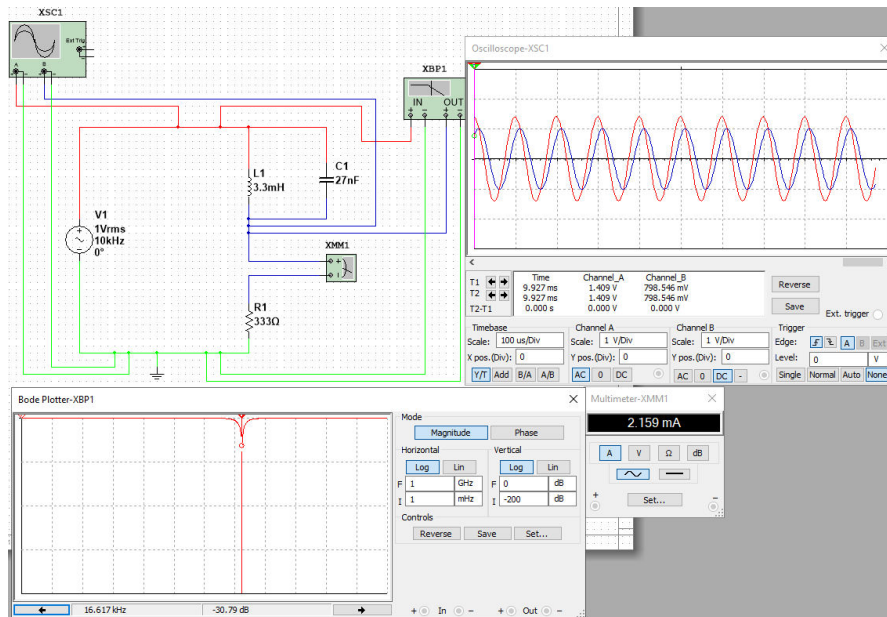
*Πίνακας 7*

<b>F (Hz)</b>	<b>Vi(V) Καν. A</b> <b>Μέτρηση</b>	<b>Vo(V) Καν. B</b> <b>Μέτρηση.</b>	<b>20log10(Vo/Vi)</b> <b>(db) πολογιζόμενο</b>	<b>I<sub>rms</sub> (A)</b> <b>Μέτρηση</b>
<b>1</b>	1.518 * 10 <sup>-3</sup>	166.442 * 10 <sup>-3</sup>		3.003 * 10 <sup>-3</sup>
<b>10</b>	829.431 * 10 <sup>-3</sup>	1.433		3.003 * 10 <sup>-3</sup>
<b>100</b>	75.065 * 10 <sup>-3</sup>	1.505 * 10 <sup>-3</sup>		3.003 * 10 <sup>-3</sup>
<b>500</b>	14.992 * 10 <sup>-3</sup>	8.228 * 10 <sup>-3</sup>		3.003 * 10 <sup>-3</sup>
<b>1000</b>	8.852 * 10 <sup>-3</sup>	3.734 * 10 <sup>-3</sup>		2.997 * 10 <sup>-3</sup>
<b>1500</b>	29.343 * 10 <sup>-3</sup>	36.154 * 10 <sup>-3</sup>		2.99 * 10 <sup>-3</sup>
<b>2500</b>	6.786 * 10 <sup>-3</sup>	1.161 * 10 <sup>-3</sup>		2.965 * 10 <sup>-3</sup>
<b>5000</b>	13.188 * 10 <sup>-3</sup>	1.021 * 10 <sup>-3</sup>		2.841 * 10 <sup>-3</sup>
<b>10k</b>	2.469 * 10 <sup>-3</sup>	18.884 * 10 <sup>-3</sup>		2.159 * 10 <sup>-3</sup>
<b>30k</b>	4.351 * 10 <sup>-3</sup>	3.521 * 10 <sup>-3</sup>		2.28 * 10 <sup>-3</sup>
<b>50k</b>	1.201 * 10 <sup>-3</sup>	7.637 * 10 <sup>-3</sup>		2.79 * 10 <sup>-3</sup>
<b>100k</b>	1.025 * 10 <sup>-3</sup>	11.740 * 10 <sup>-3</sup>		2.955 * 10 <sup>-3</sup>
<b>200k</b>	87.475 * 10 <sup>-3</sup>	61.391 * 10 <sup>-3</sup>		2.991 * 10 <sup>-3</sup>
<b>500k</b>				3.001 * 10 <sup>-3</sup>
<b>1M</b>				3.003 * 10 <sup>-3</sup>
<b>10M</b>				3.003 * 10 <sup>-3</sup>

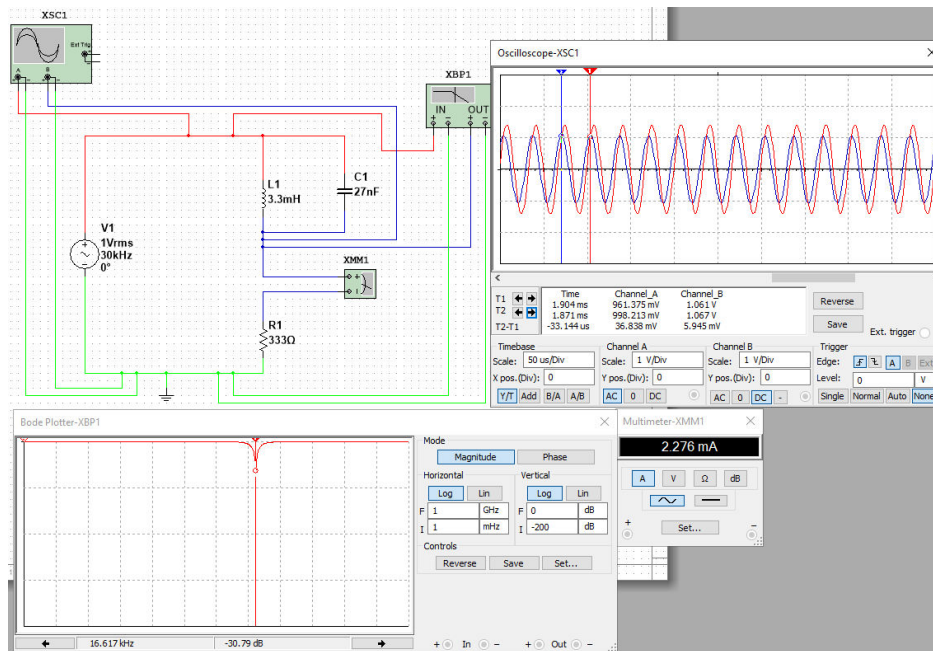




**Εικόνα 9**



**Εικόνα 10**



**Εικόνα 11**

Από την προσομοιωτική επίλυση στο λογισμικό «Multisim» (Εικόνες 9, 10, 11) και από τις μετρήσεις που έχουν καταγραφεί στους πίνακες 6 και 7, αποτυπώνεται με σαφήνεια το φαινόμενο του συντονισμού σε κύκλωμα RLC, όπου πηνίο και πυκνωτής είναι συνδεδεμένοι παράλληλα.

Καταρχάς, η θεωρητική τιμή του πηνίου που σημειώθηκε στην 3<sup>η</sup> γραμμή του πίνακα 4 στο κεφάλαιο «Γενικά» υπολογίστηκε από τον τύπο της συχνότητας του συντονισμού, ο οποίος είναι :  $f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ , όπου «L» η αυτεπαγωγή του πηνίου, «C» η χωρητικότητα του πυκνωτή και « $f_r$ » η συχνότητα συντονισμού. Αναλυτικά, στον πίνακα 6, οι τιμές υπολογίστηκαν με τους εξής τύπους :

$$\text{Σύνθετη αντίσταση } Z = 1 / (1 / R^2 + 1 / X^2)^{1/2} \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Άεργη αντίσταση } X = X_L - X_C \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Επαγωγική αντίδραση } X_L = 2\pi fL \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$\text{Χωρητική αντίδραση } X_C = 1 / 2\pi fC \quad (\text{σε } \Omega)$$

$$I_{\text{rms}} = V_{\text{rms}} / Z \quad (\text{σε A})$$

$$V_{L_{\text{rms}}} = I_{\text{rms}} * X_L \quad (\text{σε V})$$

$$V_{C_{\text{rms}}} = I_{\text{rms}} * X_C \quad (\text{σε V})$$

Στον πίνακα 7, οι τιμές σημειώθηκαν από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στο «Multisim». Από τους πίνακες 6 και 7 και τις εικόνες 9, 10 και 11 παρατηρείται και μάλιστα με έντονο κόκκινο χρώμα (εικόνα 10), ότι η συχνότητα συντονισμού είναι 10 kHz. Αυτό δικαιολογείται από τις τρεις εξής παρατηρήσεις :

4. Το ημιτονοειδές σήμα που εκπέμπει ο πυκνωτής (είσοδος του κυκλώματος) έχει ίδια φάση με το αντίστοιχο που εκπέμπει η έξοδος του κυκλώματος (πηνίο) και αυτό παρατηρείται με την βοήθεια του παλμογράφου στην Εικόνα 10.
5. Η αντίσταση του κυκλώματος «Z» από την καταμέτρηση στον πίνακα 6, παρατηρείται ότι είναι ίση με την ωμική αντίσταση «R» (333 Ω). Αυτό δικαιολογείται από τον τύπο της σύνθετης αντίστασης «Z», ο οποίος είναι :  $Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}}$  και κατά την διάρκεια του συντονισμού, η επαγωγική αντίδραση « $X_L$ »

αλληλοεξουδετερώνεται με την χωρητική αντίδραση « $X_C$ », δηλαδή, είναι ίσες. Συνεπώς,  $Z = R^2 \Rightarrow Z = R$ .

6. Το ρεύμα που διαρρέει στο κύκλωμα στη συχνότητα συντονισμού (Εικόνα 10) είναι το ελάχιστο, καθώς, σε συχνότητες που ξεπερνούν την συχνότητα συντονισμού (Εικόνες 9, 11), το ρεύμα αυξομειώνεται.

Τέλος, κατά την διάρκεια του συντονισμού παρατηρείται από τους πίνακες 6 και 7, ότι οι τιμές της τάσης του  $I_{rms}$  είναι αρκετά υψηλές αποδεικνύοντας την διατύπωση στην «Θεωρητική Επίλυση» για τα φαινόμενα υπερεντασης που παρουσιάζονται σε κύκλωμα RLC, όπου πυκνωτής και πηνίο είναι συνδεδεμένοι παράλληλα, κατά την διάρκεια του συντονισμού.