

ΑΣΚΗΣΗ 3

Μονοφασικός Μετασχηματιστής – Προσομοίωση με Matlab

ΟΜΑΔΑ Δ1:

ΚΑΠΕΝΤΖΩΝΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΚΩΤΣΙΡΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΠΑΣΤΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΣΑΒΒΑΣ ΡΗΓΙΝΟΣ

ΣΑΜΙΩΤΗΣ ΑΠΟΣΤΟΛΟΣ

ΦΑΡΔΕΛΛΑΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

2022

Περιεχόμενα

3.1.1.1. Λειτουργία με ωμικό φορτίο	2
3.1.1.2. Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο	3
3.1.1.3. Λειτουργία με ωμικό-χωρητικό φορτίο.....	10

3.1.1.1. Λειτουργία με ωμικό φορτίο

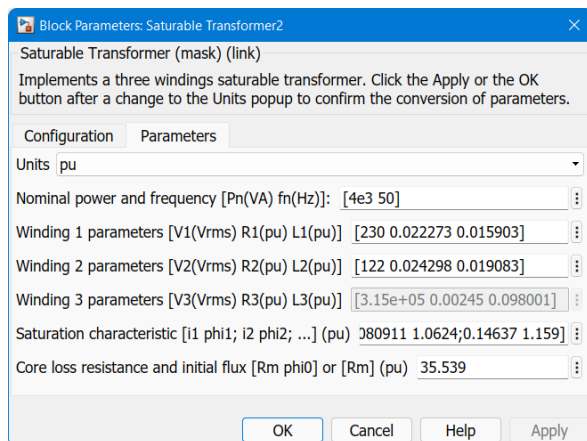
Να διατηρήσετε σταθερή την τάση του πρωτεύοντος $U_1 = U_{1N}$.

Μεταβάλλετε: I_2 από μηδέν έως $1.2I_{2N}$.

Μετρήστε: $U_1, I_1, U_2, I_2, P_1, P_2$.

Σχεδιάστε: $I_1 = f(I_2), U_2 = f(I_2), P_1 = f(I_2)$, βαθμό απόδοσης $\eta = \frac{P_2}{P_1} = f(I_2)$.

Λύση: Από τις παραμέτρους του μονοφασικού μετασχηματιστή συμπεραίνουμε ότι η ονομαστική τιμή της τάσης του πρωτεύοντος είναι $U_{1N} = 230 \text{ V}$. Επιπλέον, οι ονομαστικές τιμές της τάσης δευτερεύοντος U_{2N} και της φαινόμενης ισχύος P_N είναι 122 V και 4 kVA αντίστοιχα.



Εικόνα 1. Ονομαστικές τιμές τάσης μετασχηματιστή.

Από τις ονομαστικές τιμές που μας δίνονται στην Εικόνα 1 μπορούμε να υπολογίσουμε το λόγο μετασχηματισμού n και τις ονομαστικές τιμές των ρευμάτων I_{1N} και I_{2N} . Ισχύει:

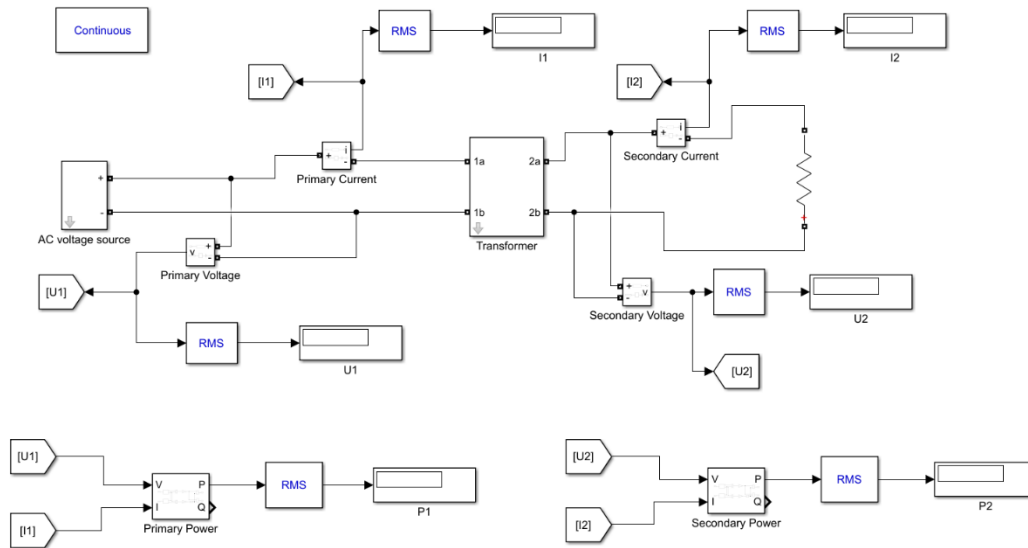
$$n = \frac{w_1}{w_2} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{230}{122} \Rightarrow n = 1.88$$

$$P_N = U_{1N} * I_{1N} \Rightarrow I_{1N} = \frac{P_N}{U_{1N}} = \frac{4000}{230} \Rightarrow I_{1N} = 17.39 \text{ A}$$

$$\frac{I_{1N}}{I_{2N}} = \frac{1}{n} \Rightarrow I_{2N} = n * I_{1N} = 1.88 * 17.39 \Rightarrow I_{2N} = 32.7 \text{ A}$$

Θέλουμε να μεταβάλλουμε το I_2 από 0 έως $1.2 * I_{2N} = 1.2 * 32.7 = 39.24 \text{ A}$, κρατώντας σταθερή την τάση πρωτεύοντος και ίση με την ονομαστική τιμή της, 230 V . Από τη στιγμή που η τάση πρωτεύοντος μένει σταθερή, τότε και η τάση δευτερεύοντος θα παραμένει σταθερή καθώς εμείς αυξάνουμε την I_{2N} . Επομένως, μέσα από τον νόμο του Ohm μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της αντίστασης που χρειάζεται προκειμένου να μεταβάλλουμε σωστά την I_{2N} .

Θα χρειαστεί πρώτα να κατασκευάσουμε το κύκλωμα με το οποίο θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση της λειτουργίας του μετασχηματιστή με ωμικό φορτίο. Στο πρωτεύον τυλίγμα θα συνδέσουμε την ac πηγή τάσης που μας δίνεται, ενώ στο δευτερεύον θα συνδέσουμε την αντίσταση R . Είναι απαραίτητο να συνδέσουμε και σε κάθε τυλίγμα ένα αμπερόμετρο σε σειρά και ένα βολτόμετρο παράλληλα, προκειμένου να κάνουμε τις ζητούμενες μετρήσεις. Επιπλέον, θα περάσουμε τις τιμές τις τάσεις και του ρεύματος κάθε τυλίγματος μέσα από ένα βατόμετρο, έτσι ώστε να μετρήσουμε τις ισχύεις πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Το κύκλωμα αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2. Λειτουργία με ωμικό φορτίο.

Μέσω των μετρήσεων των πραγματοποιήσαμε, συμπληρώσαμε τον Πίνακα 1 και σχεδιάσαμε τις ζητούμενες καμπύλες. Ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή υπολογίστηκε από τη σχέση $\eta = \frac{P_2}{P_1}$.

I_2	R	U_2	I_1	P_1	P_2
0	∞	122	0.97	114	148
3.79	34.2	121.2	2.51	544.4	429.7
7.59	17.1	120.6	4.31	971.8	850.8
11.38	11.4	120.0	6.13	1345	1263
15.18	8.55	119.4	7.94	1814	1668
18.97	6.84	118.4	9.74	2228	2064
22.77	5.7	118.2	11.52	2639	2452
26.56	4.89	117.6	13.28	3042	2830
30.36	4.28	117.1	15.02	3443	3201
34.15	3.8	116.5	16.77	3845	3570
37.95	3.42	115.9	18.48	4239	3927
41.74	3.11	115.3	20.18	4627	4277

Πίνακας 1. Μετρήσεις λειτουργίας με ωμικό φορτίο.

Στην Εικόνα 3, **Error! Reference source not found.** απεικονίζονται οι γραφικές παραστάσεις που σχεδιάστηκαν βάσει του κώδικα που αναπτύχθηκε με χρήση του λογισμικού Matlab για τις καμπύλες $I_1 = f(I_2)$, $U_2 = f(I_2)$, $P_1 = f(I_2)$ και $\eta = \frac{P_2}{P_1} = f(I_2)$. Παρακάτω, ο προαναφερθείς κώδικας:

```
clear all; close all; clc;

i2 = [0 3.57 7.13 10.7 14.27 17.84 21.4 24.97 28.54 32.11 35.67 39.24];

u2 = [122 121.2 120.6 120 119.4 118.4 118.2 117.6 117.1 116.5 115.9 115.3];

i1 = [0.97 2.51 4.31 6.13 7.94 9.74 11.52 13.28 15.02 16.77 18.48 20.18];

p1 = [114 544.4 971.8 1395 1814 2228 2639 3042 3443 3845 4239 4627];
p2 = [148 429.7 850.8 1263 1668 2064 2452 2830 3201 3570 3927 4277];

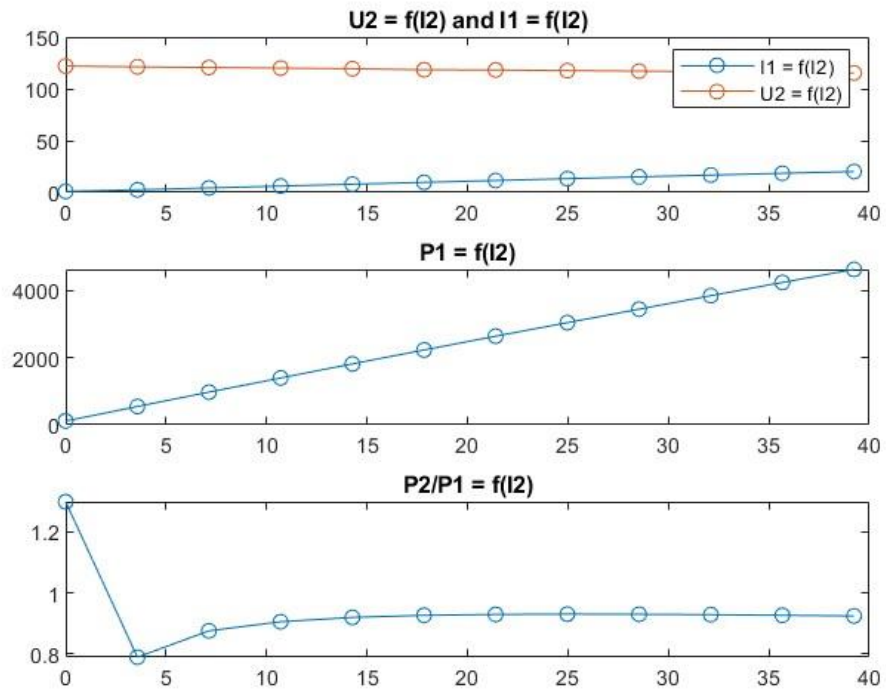
h = p2./p1;

figure();
subplot(3,1,1);
plot(i2,i1,'-o');
hold on;
```

```
plot(i2,u2,'-o');
legend("I1 = f(I2)", "U2 = f(I2)");
title("U2 = f(I2) and I1 = f(I2)");

subplot(3,1,2);
plot(i2,p1,'-o');
title("P1 = f(I2)");

subplot(3,1,3);
plot(i2,h,'-o');
title("P2/P1 = f(I2)");
```



Εικόνα 3. Γραφικές παραστάσεις ζητούμενων καμπυλών.

3.1.1.2. Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο

Να συνδέσετε μια ωμική αντίσταση τιμής $R = 6.5 \Omega$ παράλληλα με μια επαγωγή $L = 20 \text{ mH}$. Να τροφοδοτηθεί το πρωτεύον με τάση 230 V .

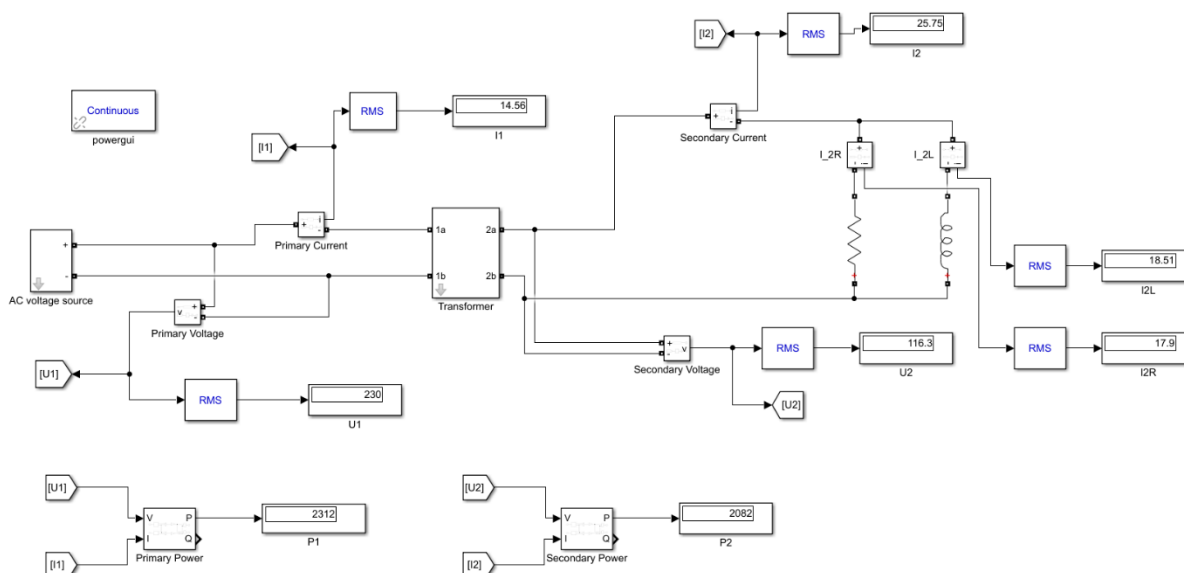
Μετρήστε: $U_1, I_1, U_2, I_2, P_1, P_2, I_{2R}, I_{2L}$.

Υπολογίστε: Τις φασικές γωνίες φ_1, φ_2 .

Σχεδιάστε: το διανυσματικό διάγραμμα. Ξεκινήστε από τα U'_2, I'_2 , κάνετε χρήση των μεγεθών $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma} \approx \frac{X_{lk}}{2}, R_1, R'_2$. Για να λάβετε το διάνυσμα I_1 χρησιμοποιείτε το ρεύμα $\vec{I}_{10} = \vec{I}_{Fe} + j\vec{I}_\mu$ που θα βρείτε από προσομοίωση του μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ.

Συγκρίνετε: τα μεγέθη U_1, I_1, φ_1 που θα προκύψουν από την προσομοίωση και από το διανυσματικό διάγραμμα.

Λύση: Αρχικά, υλοποιούμε το κύκλωμα όπως μας ζητείται. Στο πρωτεύον συνδέουμε μια ac τάση τιμής 230 V και στο δευτερεύον μια αντίσταση τιμής 6.5Ω σε παράλληλη σύνδεση με μια επαγωγή $L = 20 \text{ mH}$. Με παρόμοιο τρόπο με το προηγούμενο ερώτημα, συνδέσουμε τα απαραίτητα βολτόμετρα, αμπερόμετρα και βαττόμετρα για να κάνουμε τις μετρήσεις μας. Το κύκλωμα φαίνεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4. Λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Από την Εικόνα 4, εξάγουμε τις πληροφορίες για τις ζητούμενες μετρήσεις και συμπληρώνουμε τον Πίνακα 2.

Πρωτεύον τύλιγμα	Δευτερεύον τύλιγμα
$U_1 = 230 \text{ V}$	$U_2 = 116.3 \text{ V}$
$I_1 = 14.56 \text{ A}$	$I_2 = 25.75 \text{ A}$
$P_1 = 2312 \text{ W}$	$P_2 = 2082 \text{ W}$
-	$I_{2R} = 18.51 \text{ A}$
-	$I_{2L} = 17.9 \text{ A}$

Πίνακας 2. Μετρήσεις λειτουργίας με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Για να υπολογίσουμε τις φασικές γωνίες φ_1 και φ_2 θα χρειαστεί να υπολογίσουμε τους συντελεστές ισχύος για κάθε τύλιγμα.

$$\cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{U_1 * I_1} = \frac{2312}{230 * 14.56} = 0.6904$$

$$\cos(\varphi_2) = \frac{P_2}{U_2 * I_2} = \frac{2082}{116.3 * 25.75} = 0.6952$$

$$\varphi_1 = \cos^{-1}(0.6904) \Rightarrow \varphi_1 = 46.34^\circ$$

$$\varphi_2 = \cos^{-1}(0.6952) \Rightarrow \varphi_2 = 45.96^\circ$$

Προκειμένου να σχεδιάσουμε το διανυσματικό διάγραμμα, θα χρειαστεί να υπολογίσουμε τα μεγέθη $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma} \approx \frac{X_k}{2}$, R_1 , R'_2 και το διάνυσμα $\vec{I}_{10} = \vec{I}_{Fe} + j\vec{I}_\mu$. Για τον υπολογισμό του διανύσματος \vec{I}_{10} , απαραίτητος είναι ο υπολογισμός των R_{Fe} και X_L , τα οποία και θα υπολογίσουμε από το ισοδύναμο εν κενώ του μετασχηματιστή. Εφαρμόζουμε μια ac τάση $U_{10} = 230\text{ V}$ στο πρωτεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή και αφήνουμε ανοιχτοκυκλωμένο το δευτερεύον. Έπειτα, μετράμε το ρεύμα και την ισχύ πρωτεύοντος, ακριβώς όπως δείχνει και η Εικόνα 5, και υπολογίζουμε τα ζητούμενα μεγέθη από τις εξής σχέσεις:

$$U_1 = I_{Fe} * R_{Fe} = I_\mu * X_{h1}$$

$$P_1 = \frac{U_1^2}{R_{Fe}} = U_1 * I_{Fe} = I_{Fe}^2 * R_{Fe}$$

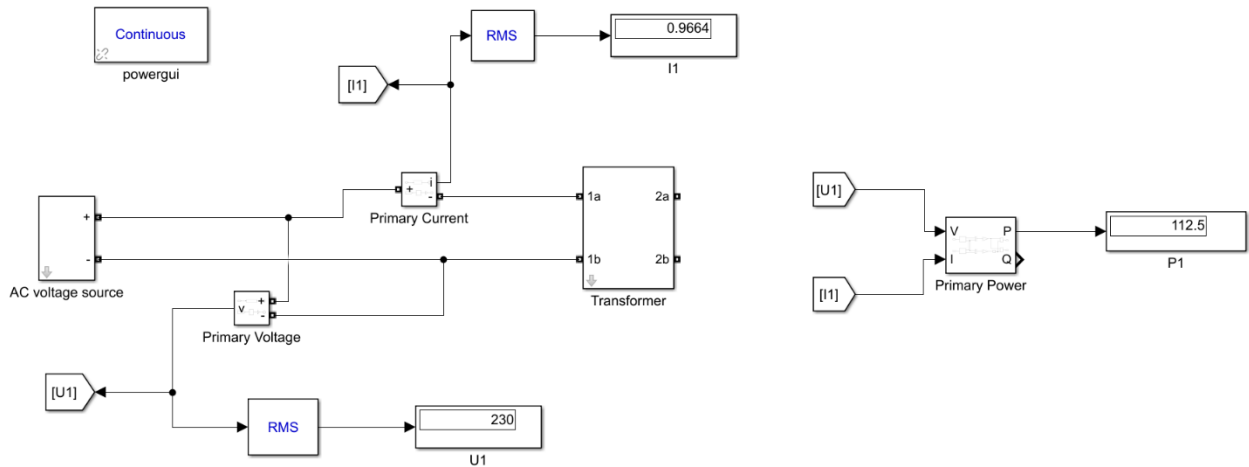
$$P_1 = U_1 * I_0 * \cos(\varphi_0)$$

$$I_0^2 = I_{Fe}^2 + I_\mu^2$$

$$I_{Fe} = I_0 * \cos(\varphi_0)$$

$$I_\mu = I_0 * \sin(\varphi_0)$$

$$\tan(\varphi_0) = \frac{I_\mu}{I_{Fe}} = \frac{R_{Fe}}{X_{h1}}$$



Εικόνα 5. Λειτουργία εν κενώ με ac τάση στο πρωτεύον.

Από τις μετρήσεις της Εικόνα 5 λαμβάνουμε τις τιμές $U_1 = 230\text{ V}$, $I_0 = 0.9664\text{ A}$ και $P_0 = 112.5\text{ W}$.

$$P_0 = U_0 * I_0 * \cos(\varphi_0) \Rightarrow \cos(\varphi_0) = \frac{112.5}{230 * 0.9664} = 0.5061 \Rightarrow \varphi_0 = \cos^{-1}(0.5061) \Rightarrow \varphi_0 = 59.59^\circ$$

$$I_{Fe} = I_0 * \cos(\varphi_0) = 0.9664 * \cos(59.59^\circ) \Rightarrow I_{Fe} = 0.489\text{ A}$$

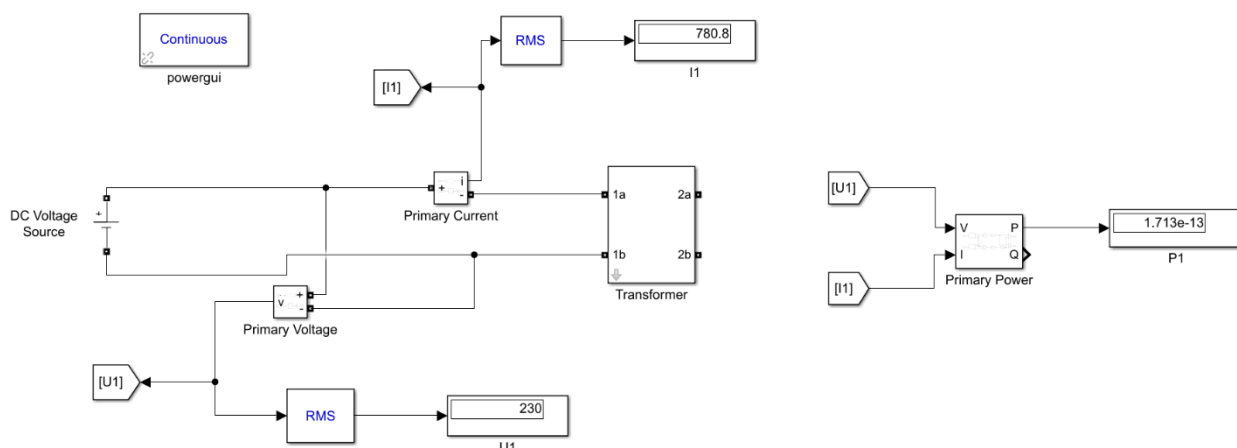
$$I_\mu = I_0 * \sin(\varphi_0) = 0.9664 * \sin(59.59^\circ) \Rightarrow I_\mu = 0.833\text{ A}$$

$$U_1 = I_{Fe} * R_{Fe} \Rightarrow R_{Fe} = \frac{U_1}{I_{Fe}} = \frac{230}{0.489} \Rightarrow R_{Fe} = 470.347 \Omega$$

$$U_1 = I_{\mu} * X_{h1} \Rightarrow X_{h1} = \frac{U_1}{I_{\mu}} = \frac{230}{0.833} \Rightarrow X_{h1} = 276.11 \Omega$$

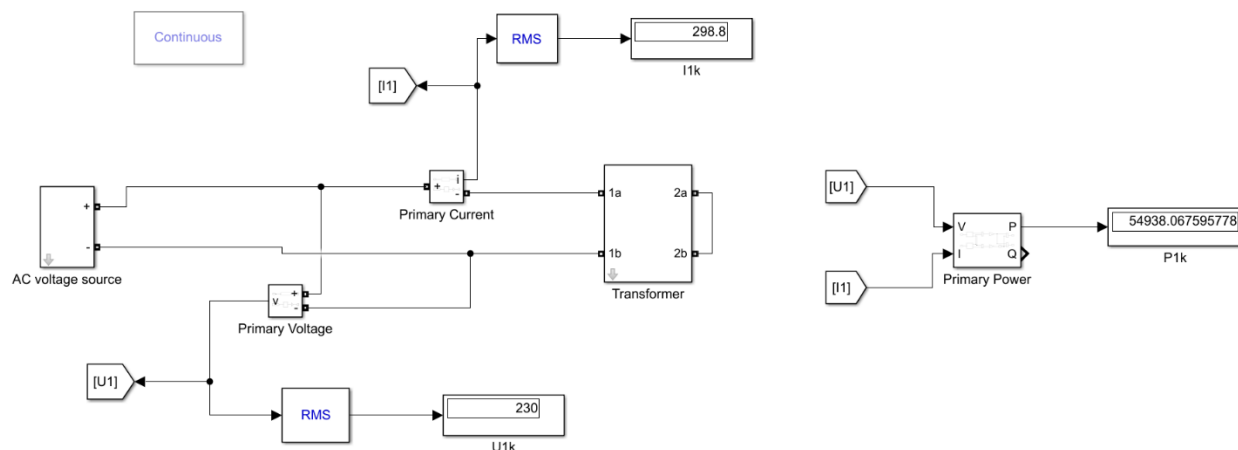
Για να υπολογίσουμε την τιμή της R_1 , θα χρησιμοποιήσουμε ξανά τη λειτουργία εν κενώ, ωστόσο στο πρωτεύον θα εφαρμόσουμε μια dc τάση, ακριβώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6. Με αυτόν τον τρόπο, οι επαγωγές του ισοδύναμου εν κενώ γίνονται βραχυκυκλώματα, με αποτέλεσμα να μένει μόνο η αντίσταση R_1 , την οποία και υπολογίζουμε μέσω του νόμου του Ohm.

Από την Εικόνα 6 βλέπουμε ότι $U_1 = 230 V$ και $I_1 = 780.8 A$, επομένως $R_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{230}{780.8} \Rightarrow R_1 = 0.295 \Omega$.



Εικόνα 6. Λειτουργία εν κενώ με dc τάση στο πρωτεύον.

Τώρα, για να υπολογίσουμε τα μεγέθη R'_2 , $X_{1\sigma}$ και $X'_{2\sigma}$ θα χρησιμοποιήσουμε τη λειτουργία με βραχυκύκλωμα. Εφαρμόζουμε στο πρωτεύον μια ac τάση τιμής $230 V$ και βραχυκυκλώνουμε τα τυλίγματα του δευτερεύοντος, ακριβώς όπως φαίνεται και στην Εικόνα 7. Απόρροια του βραχυκυκλώματος, αφού αγνοήσουμε και τον εγκάρσιο κλάδο, είναι ένα κύκλωμα RL με $R = R_k = R_1 + R'_2$ και $X_L = X_k \approx \frac{X_{1\sigma}}{2} \approx \frac{X_{2\sigma}}{2}$.



Εικόνα 7. Λειτουργία σε βραχυκύκλωμα.

Από την Εικόνα 7 συμπεραίνουμε ότι $U_{1k} = 230 V$, $I_{1k} = 298.8 A$ και $P_{1k} = 54938 W$. Η εμπέδηση Z_k θα βρεθεί από τον νόμο του Ohm, ενώ στη συνέχεια θα βρούμε τη γωνία φ_{1k} , μέσω της οποίας θα υπολογίσουμε τα R_k και X_k .

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} = \frac{230}{298.8} \Rightarrow \mathbf{Z_k = 0.77 \, \Omega}$$

$$\cos(\varphi_{1k}) = \frac{P_{1k}}{U_{1k} * I_{1k}} = \frac{54938}{230 * 298.8} = 0.799 \Rightarrow \varphi_{1k} = \cos^{-1}(0.799) \Rightarrow \mathbf{\varphi_{1k} = 36.93^\circ}$$

$$R_k = Z_k * \cos(\varphi_{1k}) = 0.77 * \cos(36.93^\circ) \Rightarrow \mathbf{R_k = 0.616 \, \Omega}$$

$$R_k = R_1 + R'_2 \Rightarrow R'_2 = R_k - R_1 = 0.616 - 0.295 \Rightarrow \mathbf{R'_2 = 0.321 \, \Omega}$$

$$X_k = Z_k * \sin(\varphi_{1k}) = 0.77 * \sin(36.93^\circ) \Rightarrow \mathbf{X_k = 0.463 \, \Omega}$$

$$X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx \frac{X_k}{2} = \frac{0.463}{2} \Rightarrow \mathbf{X_{1\sigma} \approx X'_{2\sigma} \approx 0.2315 \, \Omega}$$

Τέλος, χρειαζόμαστε τα ανηγμένα στο πρωτεύον μεγέθη U'_2 και I'_2 και τη μεταξύ τους γωνία φ_2 , τα οποία θα υπολογίσουμε μέσω των μεγεθών του Πίνακα 2, $U_2 = 116.3 \, V$, $I_2 = 25.75 \, A$ και $P_2 = 2082 \, W$. Γνωρίζουμε ότι ο λόγος μετασχηματισμού είναι $a = 2$.

$$U'_2 = U_2 * \frac{w_1}{w_2} = U_2 * n = 1.88 * 116.3 \Rightarrow \mathbf{U'_2 = 218.64 \, V}$$

$$I'_2 = I_2 * \frac{w_2}{w_1} = I_2 * \frac{1}{n} = 25.75 * \frac{1}{1.88} \Rightarrow \mathbf{I'_2 = 14.31 \, A}$$

$$\cos(\varphi_2) = \frac{P_2}{U'_2 * I'_2} = \frac{2082}{218.64 * 14.31} = 0.665 \Rightarrow \varphi_2 = \cos^{-1}(0.665) \Rightarrow \mathbf{\varphi_2 = 48.32^\circ}$$

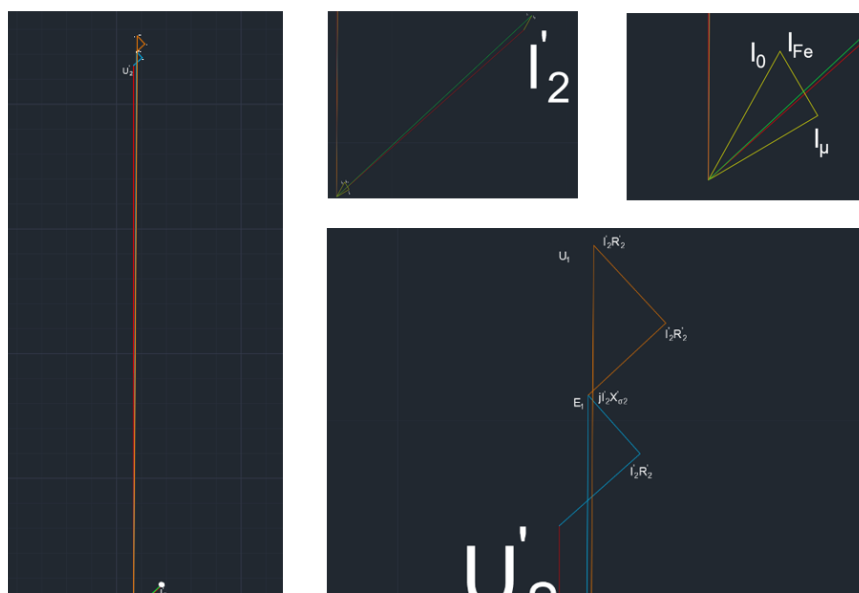
Στον Πίνακα 3 βρίσκονται όλα τα απαραίτητα για τη σχεδίαση του διανυσματικού διαγράμματος ανηγμένα μεγέθη.

U'_2	I'_2	φ_2	R_1	R'_2	$X_{1\sigma}$	$X'_{2\sigma}$	I_{Fe}	I_μ	φ_0
218.64 V	14.31 A	48.32°	0.295 Ω	0.321 Ω	0.2315 Ω	0.2315 Ω	0.833 A	0.489 A	59.59°

Πίνακας 3. Ανηγμένα στη μια πλευρά μεγέθη για τη σχεδίαση του διανυσματικού διαγράμματος για ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Παρακάτω φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα για τη λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

Από το διανυσματικό διάγραμμα της Εικόνα 8, συμπεραίνουμε ότι τα μεγέθη U_1 , I_1 και φ_1 ισούνται με τις τιμές



Εικόνα 8. Διανυσματικό διάγραμμα για λειτουργία με ωμικό-επαγωγικό φορτίο.

230.52 V, 10.36 A και 47° αντίστοιχα. Από την προσομοίωση, ωστόσο, είχαμε σημειώσει στον Πίνακα 2 τις τιμές $U_2 = 230 \, V$

και $I_2 = 14.56 \text{ A}$, ενώ για τη φασική γωνία βρήκαμε μέσω μαθηματικών υπολογισμών ότι ισούται με $\varphi_1 = 46.34^\circ$. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι μέσω του διανυσματικού διαγράμματος μπορούμε να υπολογίσουμε με καλή ακρίβεια ορισμένα μεγέθη.

3.1.1.3. Λειτουργία με ωμικό-χωρητικό φορτίο

Να συνδέσετε μια ωμική αντίσταση παράλληλα με μια χωρητικότητα τέτοια ώστε να προκύψει ένα ρεύμα $I_1 = I_{1N}$ (επιλέξτε τη γωνία).

Μετρήστε: $U_1, I_1, U_2, I_2, P_1, P_2, I_{2R}, I_{2L}$.

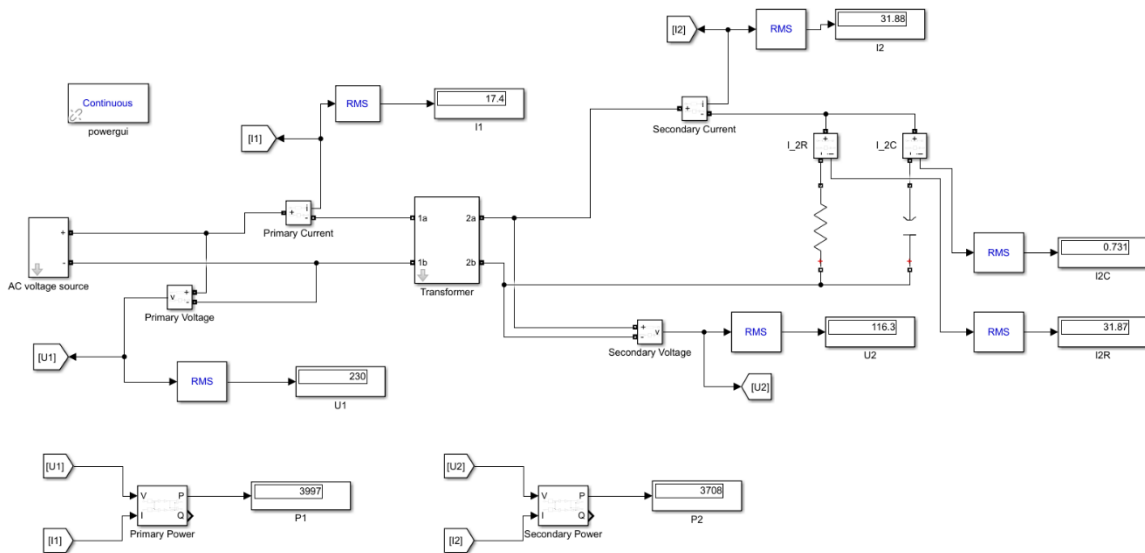
Υπολογίστε: Τις φασικές γωνίες φ_1, φ_2 .

Σχεδιάστε: το διανυσματικό διάγραμμα. Ξεκινήστε από τα U'_2, I'_2 , κάνετε χρήση των μεγεθών $X_{1\sigma} \approx X_{2\sigma} \approx \frac{X_{lk}}{2}, R_1, R'_2$. Για να λάβετε το διάνυσμα I_1 χρησιμοποιείτε το ρεύμα $\vec{I}_{10} = \vec{I}_{Fe} + j\vec{I}_\mu$ που θα βρείτε από προσομοίωση του μετασχηματιστή σε λειτουργία εν κενώ.

Συγκρίνετε: τα μεγέθη U_1, I_1, φ_1 που θα προκύψουν από την προσομοίωση και από το διανυσματικό διάγραμμα.

Επιπλέον, να κάνετε μαθηματική επίλυση του κυκλώματος με το ισοδύναμο Thevenin. Να επιβεβαιώσετε τα αποτελέσματα συγκρίνοντας αυτά από την προσομοίωση.

Λύση: Το κύκλωμα που θα κατασκευάσουμε σε αυτό το ερώτημα έχει παρόμοια μορφή με του προηγούμενου, με μοναδική διαφορά την αντικατάσταση της επαγωγής L με μια χωρητικότητα C . Θέλουμε στο πρωτεύον τύλιγμα να ρέει ρεύμα ίσο με την ονομαστική τιμή $I_{1N} = 1.39 \text{ A}$. Επομένως, υπολογίσαμε πειραματικά ότι η τιμή της αντίστασης του φορτίου πρέπει να ισούται με $R = 3.65 \Omega$. Για την τιμή της χωρητικότητας επιλέξαμε $C = 20 \mu\text{F}$. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται το κύκλωμα μαζί με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.



Εικόνα 9. Λειτουργία με ωμικό-χωρητικό φορτίο.

Εξάγουμε τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την Εικόνα 9 και τα συγκεντρώνουμε στον παρακάτω Πίνακα 4.

U_1	I_1	U_2	I_2	P_1	P_2	I_{2R}	I_{2L}
230 V	17.4 A	116.3 V	31.88 A	3997 W	3708 W	31.87 A	0.731 A

Πίνακας 4. Μετρήσεις λειτουργίας με ωμικό-χωρητικό φορτίο.

Για τον υπολογισμό των φασικών γωνιών φ_1 και φ_2 θα βρούμε τον συντελεστή ισχύος για κάθε τύλιγμα και ύστερα, μέσω του αντιστρόφου του συνημίτονου, θα βρούμε τις γωνίες.

$$\Sigma I_1 = \cos(\varphi_1) = \frac{P_1}{U_1 * I_1} = \frac{3997}{230 * 17.4} = 0.9987 \Rightarrow \varphi_1 = \cos^{-1}(0.9987) \Rightarrow \varphi_1 = 3.24^\circ$$

$$\Sigma I_2 = \cos(\varphi_2) = \frac{P_2}{U_2 * I_2} = \frac{3708}{116.3 * 31.88} = 1 \Rightarrow \varphi_2 = \cos^{-1}(1) \Rightarrow \varphi_2 = 0^\circ$$

Επομένως, οι φασικές γωνίες είναι $\varphi_1 = 3.24^\circ$ και $\varphi_2 = 0^\circ$.

Για τη σχεδίαση του διανυσματικού διαγράμματος θα ακολουθήσουμε παρόμοια διαδικασία με αυτή που πραγματοποιήθηκε και για το ωμικό-επαγωγικό φορτίο στο προηγούμενο ερώτημα. Ωστόσο, πλέον γνωρίζουμε τις απώλειες σιδήρου R_{Fe} , την κύρια αυτεπαγωγμότητα X_{h1} , τις σκεδάσεις $X_{1\sigma}$ και $X'_{2\sigma}$ και τις απώλειες στα τυλίγματα R_1 και R'_2 του μετασχηματιστή, οπότε δεν χρειάζεται να υπολογιστούν αυτά τα μεγέθη ξανά.

Επιπλέον, πρέπει να υπολογίσουμε τα ανηγμένα στο πρωτεύον μεγέθη U'_2 και I'_2 . Από τις τιμές του Πίνακα 4 υπολογίζουμε ότι:

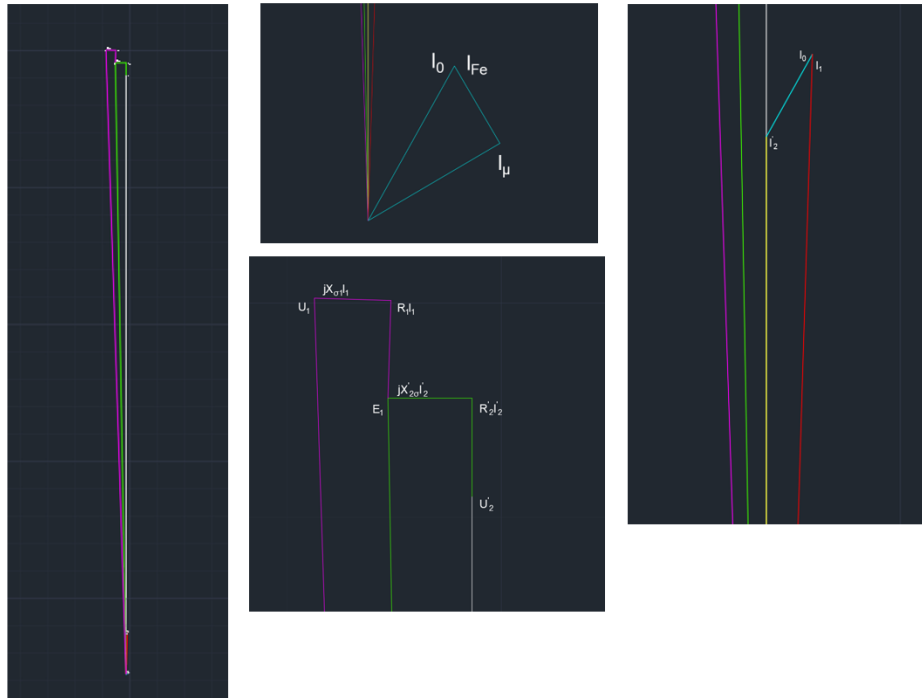
$$U'_2 = \frac{w_1}{w_2} * U_2 = n * U_2 = 1.88 * 116.3 \Rightarrow U'_2 = 218.64 \text{ V}$$

$$I'_2 = \frac{w_2}{w_1} * I_2 = \frac{1}{n} * I_2 = \frac{31.88}{1.88} \Rightarrow I'_2 = 16.96 \text{ A}$$

Παρακάτω, στον Πίνακα 5 βρίσκονται συγκεντρωμένα όλα τα απαραίτητα για τη σχεδίαση του διανυσματικού διαγράμματος μεγέθη.

U'_2	I'_2	φ_2	R_1	R'_2	$X_{1\sigma}$	$X'_{2\sigma}$	I_{Fe}	I_μ	φ_0
218.64 V	16.96 A	0°	0.295 Ω	0.321 Ω	0.2315 Ω	0.2315 Ω	0.489 A	0.833 A	59.59°

Πίνακας 5. Ανηγμένα στη μια πλευρά μεγέθη για τη σχεδίαση του διανυσματικού διαγράμματος για ωμικό-χωρητικό φορτίο.



Εικόνα 10. Διανυσματικό Διάγραμμα για λειτουργία με ωμικό-χωρητικό φορτίο.

Παραπάνω, στην Εικόνα 10 φαίνεται το διανυσματικό διάγραμμα που πραγματοποιήθηκε για την λειτουργία με ωμικό-χωρητικό φορτίο.

Σχετικά με τη σύγκριση των αποτελεσμάτων για τα μεγέθη U_1 , I_1 και φ_1 που προέκυψαν από το διανυσματικό διάγραμμα και την προσομοίωση, έχουμε $\mathbf{U}_1 = 227.9 \text{ V}$, $\mathbf{I}_1 = 15.4 \text{ A}$ και $\varphi_1 = 4^\circ$ για το διανυσματικό διάγραμμα και $\mathbf{U}_1 = 230 \text{ V}$, $\mathbf{I}_1 = 17.4 \text{ A}$ και $\varphi_1 = 3^\circ$ για την προσομοίωση. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι μέσω του διανυσματικού διαγράμματος μπορούμε να υπολογίσουμε με καλή ακρίβεια ορισμένα μεγέθη.

Για τον αναλυτικό υπολογισμό τάσεων και ρευμάτων του μετασχηματιστή υπό φορτίο, χρειάζεται να υπολογίσουμε το ανηγμένο στο πρωτεύον ωμικό-χωρητικό φορτίο Z'_{RC} , το ρεύμα I'_L , την τάση e_1 , την εμπέδηση Z_{Th} και την τάση U_{Th} , από την οποία θα υπολογίσουμε την U_1 .

Γνωρίζουμε τα ανηγμένα στο πρωτεύον μεγέθη U'_2 , I'_2 , αλλά και την εμπέδηση $Z'_2 = R'_2 + jX'_{\sigma 2} = 0.321 + j0.2315 = 0.396 \angle 35.8^\circ \Omega$.

Υπολογίζουμε το φορτίο $Z_{RC} = R + jX_C = 3.5 - j \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} = 3.5 - j159.15 = 159.19 \angle -88.74^\circ \Omega$, και στη συνέχεια το ανηγμένο στο πρωτεύον $\mathbf{Z}'_{RC} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 * Z_{RC} = 1.88^2 * 159.19 \angle -88.74^\circ = \mathbf{562.64 \angle -88.74^\circ \Omega}$.

Υπολογίζουμε το ρεύμα $\mathbf{I}'_L = \frac{U'_2}{Z'_{RC}} = \frac{218.64 \angle 0^\circ}{562.64 \angle -88.74^\circ} = \mathbf{0.389 \angle 88.74^\circ \text{ A}}$.

Ισχύει ότι $I'_L = \frac{e_1 - U'_2}{Z'_2} \Rightarrow e_1 = I'_L * Z'_2 + U'_2 \Rightarrow \mathbf{e_1 = 0.389 \angle 88.74^\circ * 0.396 \angle 35.8^\circ + 218.64 \angle 0^\circ = 218.55 \angle 0.03^\circ \text{ V}}$.

$$\begin{aligned} Z_{Th} = R_{Th} + jX_{Th} = (R_{Fe} || jX_{h1}) || (R_1 + jX_{\sigma 1}) &= \frac{470.35 * j276.11}{470.35 + j276.35} || (0.295 + j0.2315) = 83.24 \angle 59.59^\circ || 0.375 \angle 23.12^\circ \\ &= \frac{83.24 \angle 59.59^\circ * 0.375 \angle 23.12^\circ}{83.24 \angle 59.59^\circ + 0.375 \angle 23.12^\circ} \Rightarrow \mathbf{Z_{Th} = 0.374 \angle 23.27^\circ \Omega} \end{aligned}$$

$$\frac{U_{Th} - e_1}{Z_{Th}} = I'_L \Rightarrow U_{Th} = I'_L * Z_{Th} + e_1 = 0.389 \angle 88.74^\circ * 0.374 \angle 23.27^\circ + 218.55 \angle 0.03^\circ \Rightarrow \mathbf{U_{Th} = 218.5 \angle 0.07^\circ \text{ V}}$$

$$\mathbf{R_{Fe} || jX_{h1} = 470.35 || j276.11 = \frac{470.35 * j276.11}{470.35 + j276.11} = 238.11 \angle 59.59^\circ \Omega}$$

$$\begin{aligned} U_{Th} = U_1 * \frac{R_{Fe} || jX_{h1}}{R_1 + jX_{\sigma 1} + R_{Fe} || jX_{h1}} &= U_1 * \frac{238.11 \angle 59.59^\circ}{0.295 + j0.2315 + 238.11 \angle 59.59^\circ} = U_1 * 0.9985 \angle 0.03^\circ \Rightarrow U_1 = \frac{218.5 \angle 0.07^\circ}{0.9985 \angle 0.03^\circ} \\ &\Rightarrow \mathbf{U_1 = 218.83 \angle 0.04^\circ \text{ V}} \end{aligned}$$

Παρατηρούμε από το τελικό αποτέλεσμα της U_1 ότι υπάρχει απόκλιση από το αντίστοιχο αποτέλεσμα της προσομοίωσης, επομένως, η μαθηματική επίλυση μέσω θεωρήματος Thevenin ενδέχεται να μην είναι η καλύτερη επιλογή.