

## **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ**

### **ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΑΣΚΗΣΗ 5**

#### **ΟΜΑΔΑ Θ4**

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΜΕΡΚΟΥΡΙΑΔΗΣ	ΑΜ:1066637
ΜΑΡΙΟΣ-ΧΡΗΣΤΟΣ ΣΤΑΜΑΤΙΟΥ	ΑΜ:1066488
ΣΩΤΗΡΗΣ ΠΑΝΤΕΛΗΣ	ΑΜ:1066487
ΑΛΕΞΙΑ ΣΟΥΒΑΛΙΩΤΗ	ΑΜ:1066597
ΕΠΑΜΕΙΝΩΝΔΑΣ ΠΕΝΘΕΡΟΥΔΑΚΗΣ	ΑΜ:1066635
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ-ΣΠΥΡΙΔΩΝ ΝΤΕΛΛΑΣ	ΑΜ:1070511

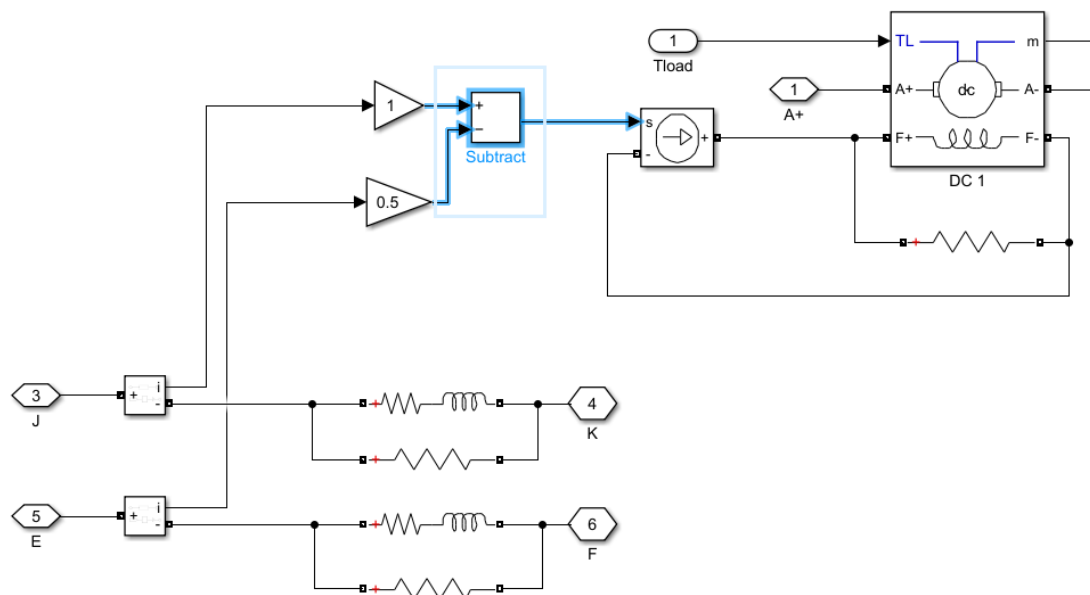
### Σκοπός της άσκησης

Σκοπεύουμε να μελετήσουμε για κάθε διαφορετικό τρόπο διέγερσης ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος (ξένη , παράλληλη, μεικτή και σε σειρά διέγερση) την συμπεριφορά της χαρακτηριστικής καμπύλης ροπής-στροφών του στις ονομαστικές τάσεις:  $V_{TN} = 240 \text{ V}$ ,  $V_{fN} = 240 \text{ V}$ .

### Εισαγωγικά σχόλια

Αρχικά, θα βρούμε την ονομαστική ροπή του κινητήρα και θα την χρησιμοποιήσουμε ως το όριο μέχρι το οποίο θα σχεδιάσουμε την χαρακτηριστική καμπύλη. Ισχύει ότι:  $M_N = \frac{P_N}{\Omega_N}$ , με  $\Omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = 60\pi \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  και  $P_N = 3.8 \text{ kW}$ . Άρα  $M_N = \frac{3800}{60\pi} = 20.1596 \text{ Nm}$ . Θέτουμε το ανώ όριο της ροπής να είναι 20 Nm.

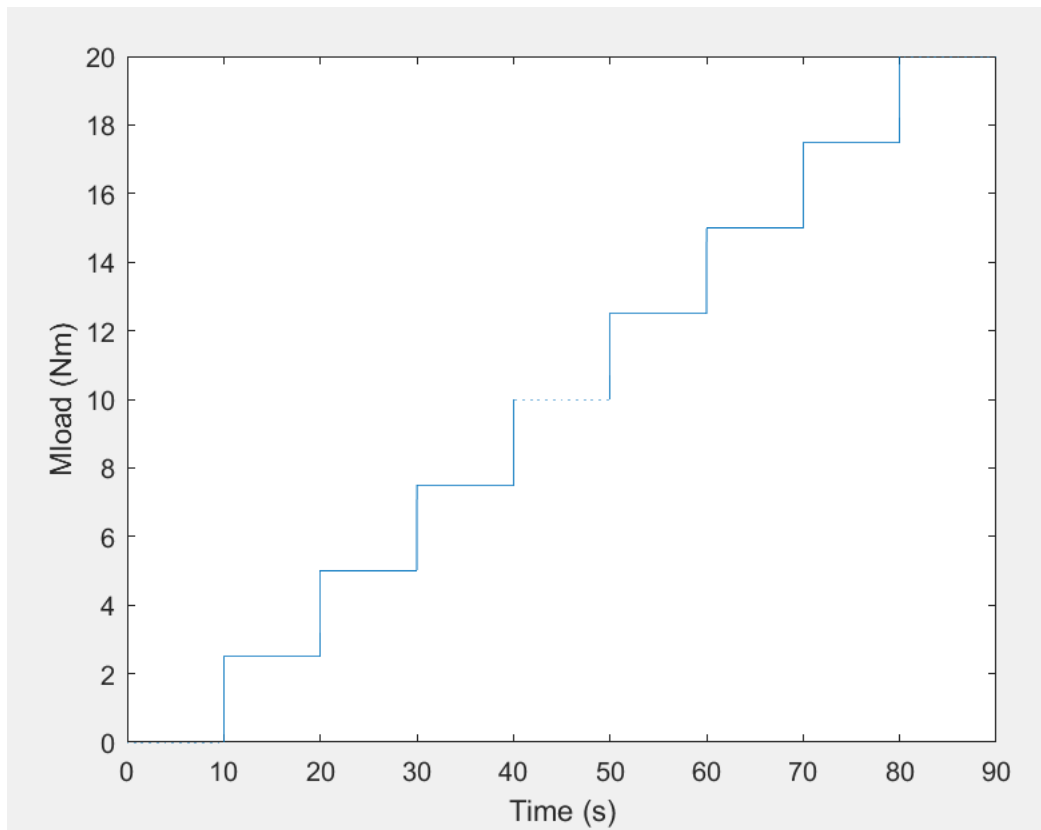
Σχετικά με τις συνδεσμολογίες του κινητήρα καταλαβαίνουμε από την παρακάτω εικόνα,ότι εξαιτίας του subtract block, για να δημιουργήσουν θετική ροή τα τυλίγματα διεγέρσεως, πρέπει το τύλιγμα διεγέρσεως εν παραλλήλω να συνδεθεί ώστε να διαρρέεται με ρεύμα από το J προς το K, και το τύλιγμα διεγέρσεως σε σειρά να συνδεθεί ώστε να διαρρέεται με ρεύμα από το F προς το E.



Τέλος, αναφέρουμε ότι όταν δεν χρησιμοποιείται κάποιο τύλιγμα της μηχανής, συνδέουμε στα άκρα του μία DC πηγή με τιμή 0V για να αποφύγουμε error της Simulink.

### Προσομείωση και εύρεση τιμών

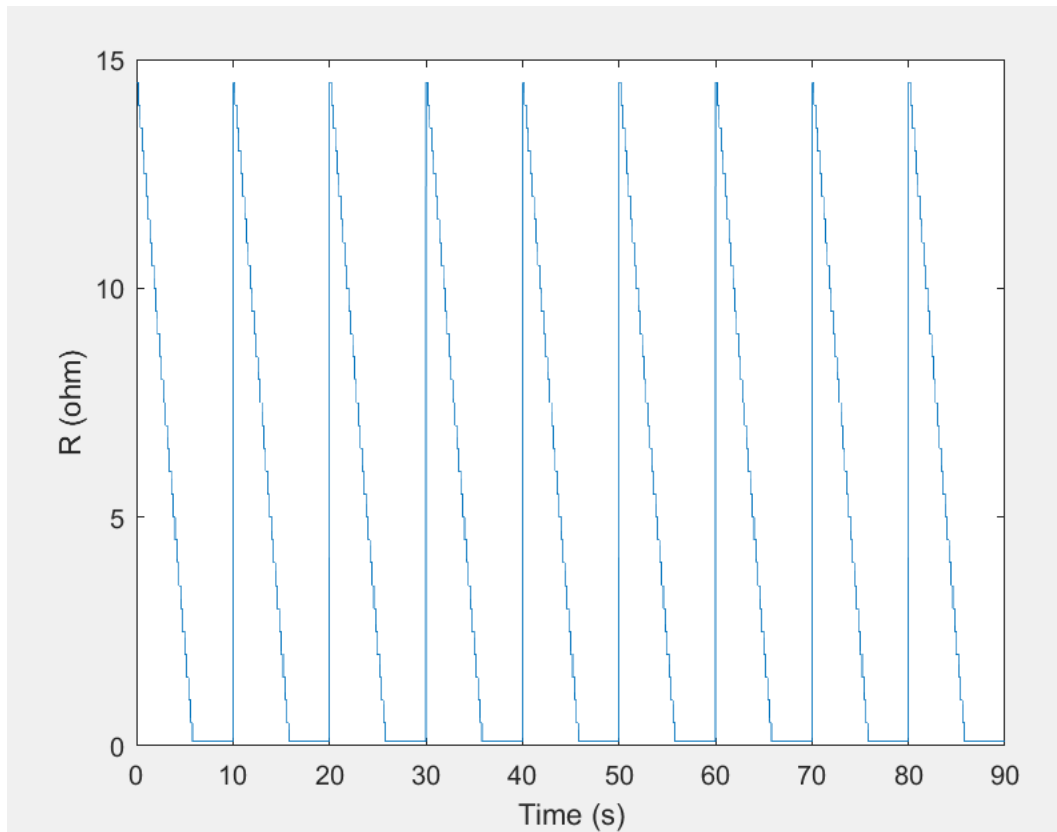
Θέλουμε να βρούμε τις τιμές του ρεύματος τυμπάνου (και του ολικού ρεύματος στην περίπτωση παράλληλης ή μεικτής διέγερσης), της εσωτερικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής, και των στροφών στην λειτουργία μόνιμης κατάστασης για διάφορες τιμές της μηχανικής ροπής φορτίου. Η χαρακτηριστική καμπύλη θα σχεδιάζει τις τιμές των στροφών συναρτήσει των τιμών της ηλεκτρομαγνητικής ροπής σε κάθε σημείο λειτουργίας μόνιμης κατάστασης. Η μηχανική ροπή φορτίου θα παίρνει τιμές από 0 έως 20Nm (~Μονομ) με βήμα 2.5Nm (12.5% Μονομ). Δίνουμε σχετικά μεγάλο βήμα καθώς απαιτείται αρκετός χρόνος για να φτάσουμε την μόνιμη κατάσταση (10s), και εφόσον η προσομείωση γίνεται με χρονικό βήμα 50μs, χρειάζεται πολύ χρόνος για να πάρουμε τις μετρήσεις στο κάθε ένα σημείο λειτουργίας μόνιμης κατάστασης. Τρέχουμε την προσομείωση μόνο μια φορά για 90s (10s για κάθε σημείο λειτουργίας μόνιμης κατάστασης) εφόσον η μηχανική ροπή Tload που εφαρμόζουμε παίρνει τιμές σύμφωνα με την ακόλουθη γραφική παράσταση:



*Εφαρμοζόμενη μηχανική ροπή φορτίου*

Κάθε φορά που αλλάζουμε βέβαια την μηχανική ροπή που εφαρμόζουμε εμφανίζονται μεταβατικά φαινόμενα στα μηχανικά (στροφές) και ηλεκτρικά ( $T_{el}$ , ρεύματα) μεγέθη του κινητήρα στην μορφή των αποσβενύμενων ταλαντώσεων (μεγάλου πλάτους σε συγκεκριμένες συνδεσμολογίες). Θα μπορούσαμε βέβαια να μεταβάλουμε την ροπή φορτίου με μορφή ράμπας απο την μία τιμή μόνιμης κατάστασης στην άλλη, αλλά θέλαμε να δείξουμε πως αντιμετωπίζουμε τα μεταβατικά φαινόμενα που προκύπτουν. Συγκεκριμένα, όταν αυξάνουμε απότομα την ροπή φορτίου, μειώνονται γρήγορα οι στροφές, άρα μειώνεται η τάση επαγωγής  $U_{επ} = C\Phi\Omega$  και αυξάνεται το ρεύμα  $IT = \frac{U_T - U_{επ}}{Rt}$ , αυξάνοντας έτσι την επαγόμενη ροπή  $M_{el} = C\Phi I$ . Όμως, το ρεύμα ενδέχεται να αυξηθεί πάνω απο το ονομαστικό και να προκληθεί ζημιά στο τύλιγμα οπλισμού του κινητήρα. Για να αποφύγουμε το παραπάνω και για να έχουμε πιο ομαλή μετάβαση στην νέα μόνιμη κατάσταση συνδέουμε μία εξωτερική μεταβαλλόμενη αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα τυμπάνου. Αυτή η αντίσταση παίρνει μέγιστη τιμή την στιγμή που αλλάζει η ροπή και

μειώνεται σύμφωνα με την παρακάτω γραφική. Η μέγιστη τιμή είναι  $14.5\ \Omega$ , που για  $U_{επ}=0$  δίνει ονομαστικό ρεύμα. Η τιμή της εξωτερικής αντίστασης στην λειτουργία μόνιμης κατάστασης είναι  $0.1\ \Omega$ .



*Εξωτερική μεταβαλλόμενη αντίσταση σε σειρά με τύλιγμα τυμπάνου*

Ο κώδικας ο οποίος χρησιμοποιήσαμε για να δημιουργήσουμε τις τιμές της μεταβλητής  $R$  είναι ο ακόλουθος:

```

1      %time
2      t = 0:0.01:90;
3      %res
4      R = [14.5];
5      for i=0:1:8
6          Rmet=[];
7          for j=14.5:-0.5:0.5
8              Rmet = [Rmet; j*ones(20,1)];
9          end
10         Rmet = [Rmet; 0.1*ones(420,1)];
11         R = [R; Rmet];
12     end
13     plot(t, R)
14     xlabel('Time (s)')
15     ylabel('R (ohm)')

```

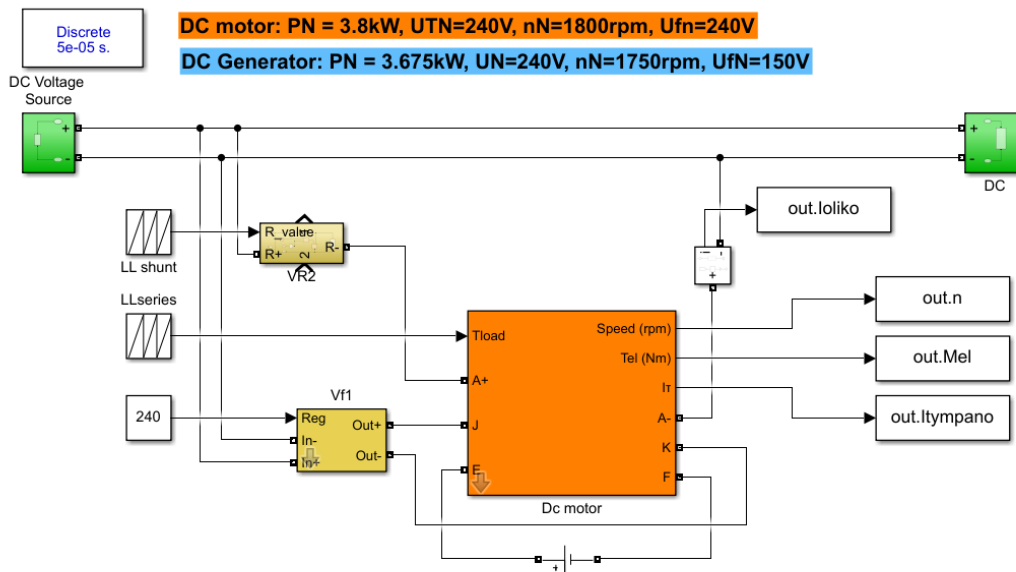
Τέλος, σε κάθε σημείο μόνιμης λειτουργίας λαμβάνουμε μετρήσεις για τα ρεύματα, τις στροφές και την ηλεκτρομαγνητική ροπή την χρονική στιγμή πριν μεταβάλουμε την ροπή φορτίου σύμφωνα με τον ακόλουθο κώδικα:

```

1      Turns = [];
2      Melectric = [];
3      Itympano = [];
4      Ioliko = [];
5      |
6      for i=200000:200000:1800000
7          Turns = [Turns out.n.Data(i)];
8          Melectric = [Melectric out.Mel.Data(i)];
9          Itympano = [Itympano out.Itympano.Data(i)];
10         Ioliko = [Ioliko out.Ioliko.Data(i)];
11     end
12
13     Turns
14     Melectric
15     Itympano
16     Ioliko
17
18     plot(Melectric, Turns)
19     axis([0 23 0 2200])
20     title('n = f(Mel)')
21     xlabel('Mel (Nm)')
22     ylabel('n (rpm)')

```

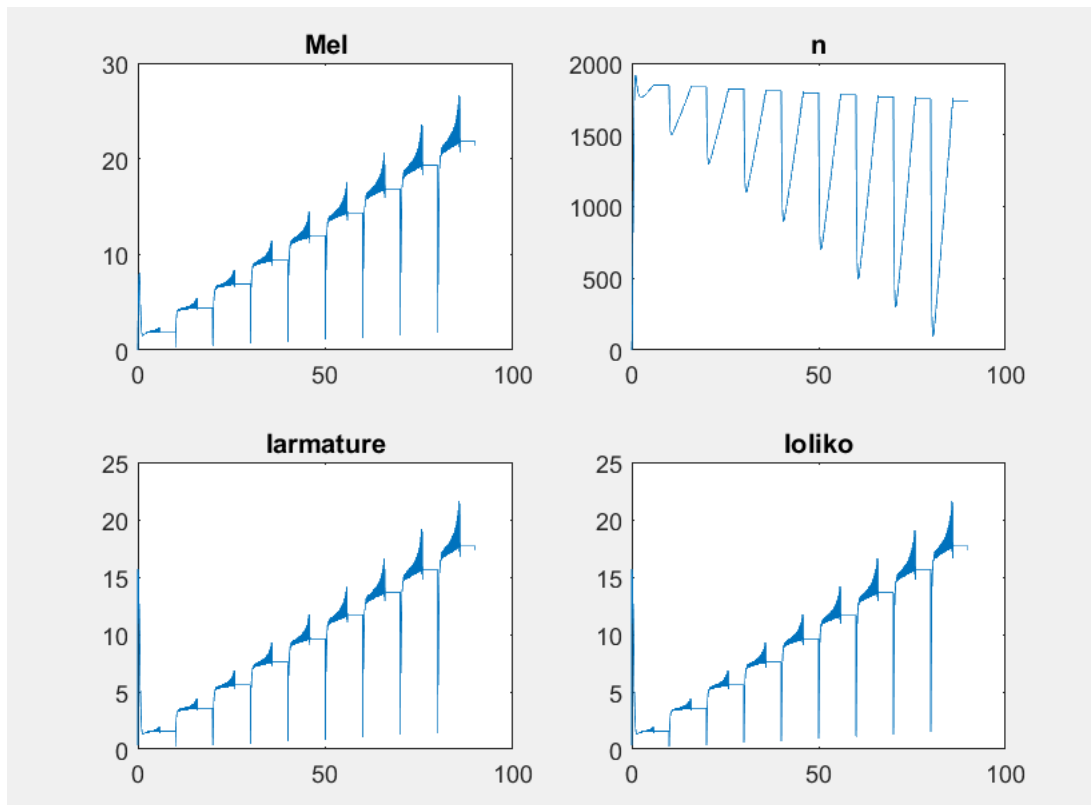
## Κινητήρας με ξένη διέγερση



*Η συνδεσμολογία του μοντέλου .slx*

Στον κινητήρα με ξένη διέγερση, δίνουμε ονομαστική τάση  $V_fN = 240V$  μέσω του block DC πηγής Vf1 στο τύλιγμα διέγερσης J-K (επιλέγουμε το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης επειδή έχει κέρδος 1, όπως βλέπουμε στην εικόνα στις παραπάνω σελίδες). Στο τύλιγμα διέγερσης σε σειρά συνδέουμε DC πηγή τάσης με 0V. Δίνουμε μέσω repeating sequence block τις σωστές τιμές ροπής φορτίου Tload στον κινητήρα και τις σωστές τιμές αντίστασης στο block μεταβαλλόμενης αντίστασης (ροοστάτη). Συνδέουμε το τύλιγμα τυμπάνου σε σειρά με τον ροοστάτη στην τάση δικτύου  $V_{TN} = 240V$ . Μετράμε τις στροφές, την ηλεκτρομαγνητική ροπή και τα ρεύματα (ολικό και τυμπάνου) του κινητήρα είτε μέσω κάποιου measurement signal, είτε μέσω αμπερόμετρου για το  $I_{ολικό}$ .

## Μεταβατικά φαινόμενα προσομείωσης



Όπως βλέπουμε παραπάνω, τα μεταβατικά φαινόμενα που συνοδεύουν την απότομη αύξηση της μηχανικής ροπής φορτίου στον κινητήρα ξένης διέγερσης, είναι μια απότομη μείωση του ρεύματος τυμπάνου (άρα και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής και του ολικού ρεύματος) και των στροφών του κινητήρα. Στη συνέχεια, επανέρχονται γρήγορα τα ρεύματα και η εσωτερική ροπή στις προηγούμενες τιμές τους και μετά απο μια ταλάντωση φτάνουν στην μόνιμη κατάσταση. Η παραπάνω συμπεριφορά εξηγείται ως εξής: η αύξηση της ροπής φορτίου συνεπάγεται την μείωση των στροφών, και την μείωση της επαγόμενης τάσης  $U_{επ} = C\Phi\Omega$  (η διέγερση  $\Phi$  μένει σταθερή), άρα την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου. Αυτή η αύξηση είναι επικίνδυνη, και γι' αυτό αυξάνουμε την τιμή της αντίστασης του ροοστάτη ταυτόχρονα με την αύξηση της ροπής φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, όταν αυξάνεται η ροπή φορτίου, λόγω της στιγμιαίας αύξησης της αντίστασης, να μειώνεται δραματικά το ρεύμα τυμπάνου, άρα και η ηλεκτρομαγνητική ροπή. Έτσι, οι στροφές του κινητήρα πέφτουν ακόμα πιο πολύ, που με τη σειρά του αυξάνει το ρεύμα στην προηγούμενη τιμή του (μικρότερη από το ονομαστικό ρεύμα, εφόσον οι στροφές  $> 0$ ). Καθώς μειώνουμε



σταδιακά την εξωτερική αντίσταση, αυξάνεται σταδιακά με ταλαντώσεις το ρεύμα και η ροπή στον άξονα, ώστε να φτάσουν οι στροφές του κινητήρα την τιμή της μόνιμης κατάστασης. Την απότομη μείωση του ρεύματος οπλισμού, θα μπορούσαμε να αποφύγουμε αν αυξάναμε την εξωτερική αντίσταση σταδιακά στην μέγιστη τιμή της, την οποία θα έφτανε μετά από μικρή χρονική καθυστέρηση απο την αύξηση της ροπής φορτίου. Έτσι, η μείωση του ρεύματος εξαιτίας της αντίστασης θα αντιστάθμιζε την αύξηση του ρεύματος εξαιτίας της μείωσης των στροφών.

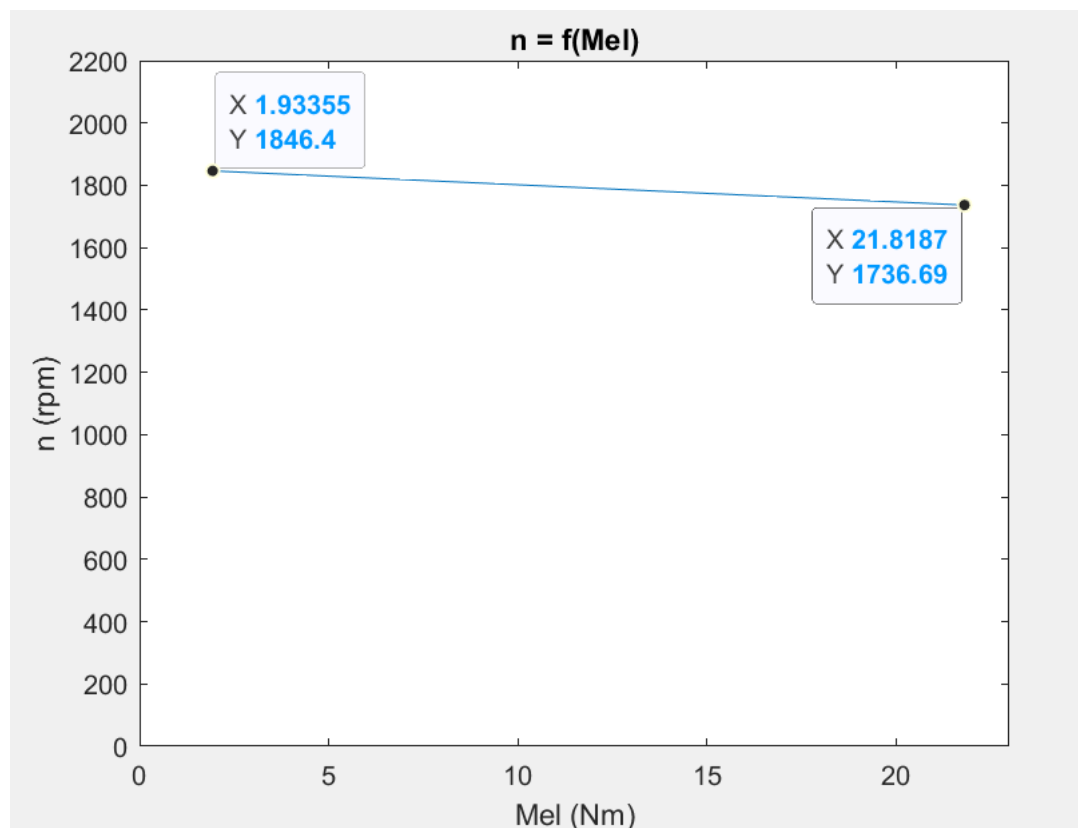
#### Μετρήσεις μόνιμης κατάστασης

Tload (Nm)	Telec (Nm)	Turns (rpm)	I tympano (A)
0	1.9335	1846.4	1.5668
2.5	4.4192	1832.7	3.5809
5	6.9048	1819.0	5.5950
7.5	9.3905	1805.3	7.6091
10	11.8761	1791.5	9.6232
12.5	14.3617	1777.8	11.6373
15	16.8474	1764.1	13.6514
17.5	19.3330	1750.4	15.6655
20	21.8187	1736.7	17.6797

Μεταβάλλοντας την μηχανική ροπή, παρατηρούμε μια ελαφρή μείωση στις στροφές, η οποία συνεπάγεται ανάλογη μείωση της επαγόμενης τάσης  $U_{επ} = C\Phi\Omega$  άρα και ανάλογη αύξηση του ρεύματος τυμπάνου  $IT = \frac{UT - U_{επ}}{Rt}$ , και της ηλεκτρομαγνητικής ροπής  $MeI = C\Phi I$ . Η ηλεκτρομαγνητική ροπή είναι λίγο μεγαλύτερη της ροπής στον άξονα, λόγω της τριβής: Είναι  $M_{τριβή} = Bm * \Omega = 0.01 * \frac{2\pi * 1736.7}{60} = 1.8187 \text{ Nm}$ , όπου  $Bm$ : *Viscous friction coefficient*,  $Bm = 0.01$ , από παραμετρους της μηχανής στην Simulink. Στο περιβάλλον του

εργαστηρίου, θα οφείλονται επίσης και οι απώλειες εξαερισμού, οι κατενευγμένες απώλειες, οι ωμικές απώλειες στον δρομέα και οι απώλειες σιδήρου.

### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών



Ο κινητήρας με ξένη διέγερση, για σταθερή τάση  $V_f$ , έχει σταθερή μαγνητική ροή  $\Phi$ . Η εξίσωση ροπής στροφών κινητήρα, ανεξαρτήτως της συνδεσμολογίας είναι:  $\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} - \frac{R_t}{(C\Phi)^2} M_{el}$ . Στην προκειμένη περίπτωση, όπου η τάση τυμπάνου  $U_T$  και η μαγνητική ροή  $\Phi$  μένουν σταθερές, οι στροφές εν κενώ είναι  $n_0 = \frac{60\Omega_0}{2\pi} = \frac{60U_T}{2\pi C\Phi}$ . Η αύξηση της ροπής κατά  $\Delta M$  συνεπάγεται μείωση των στροφών κατά  $\frac{R_t}{(C\Phi)^2} \Delta M_{el}$ . Έτσι, η χαρακτηριστική καμπύλη παίρνει την μορφή ευθείας με κλίση  $-\frac{R_t}{(C\Phi)^2}$ .

## Συντελεστής απόδοσης

Στον κινητήρα με ξένη διέγερση ο συντελεστής απόδοσης η ορίζεται ως:

$$\eta = \frac{P_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma}}{P_{\tau\acute{\upsilon}\mu\pi\alpha\nu\omicron} + P_{\delta\iota\acute{\epsilon}\gamma\epsilon\rho\sigma\eta}} = \frac{M_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma}\Omega}{U_T * I_T + U_f * I_f}. \text{ Για να μετρήσουμε τον συντελεστή}$$

απόδοσης συγκεκριμένα στην ονομαστική λειτουργία θα εφαρμόσουμε

ροπή φορτίου την ονομαστική ροπή  $M_N = \frac{3800}{60\pi} \text{ Nm}$ . Όμως, για την

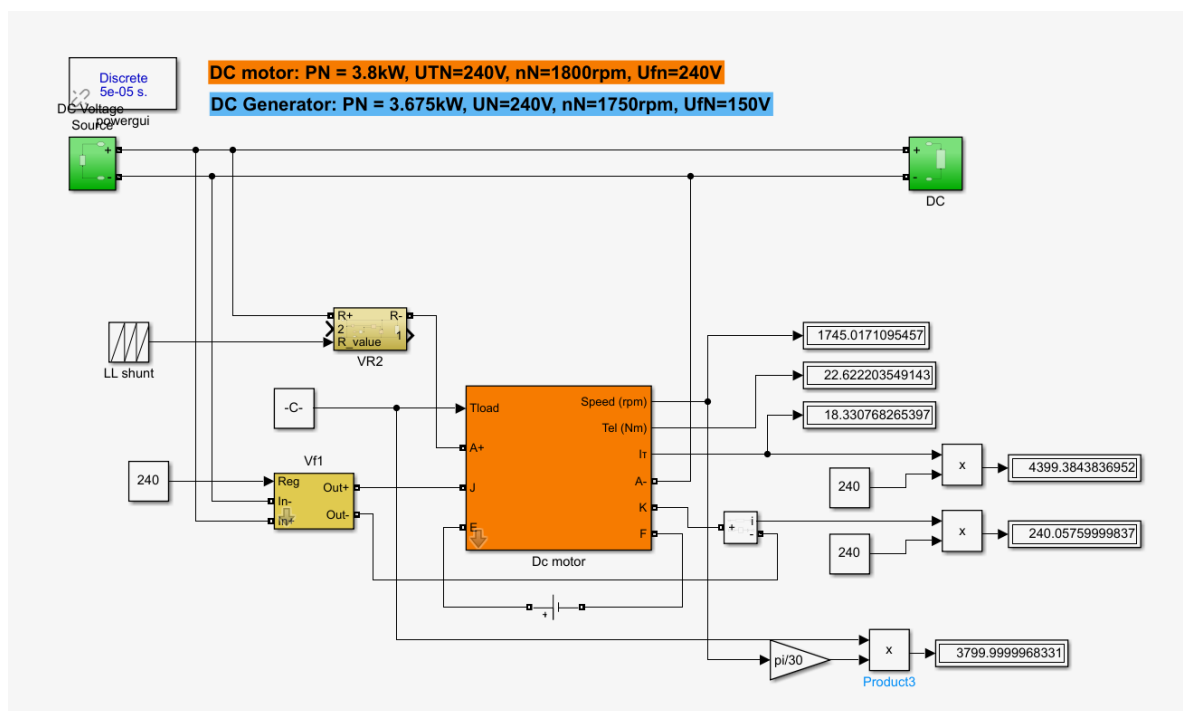
προηγούμενη τιμή οι στροφές δεν φτάνουν την ονομαστική τιμή των

1800, αλλά μένουν στις ~1745. Για να έχουμε ονομαστική ισχύ εξόδου

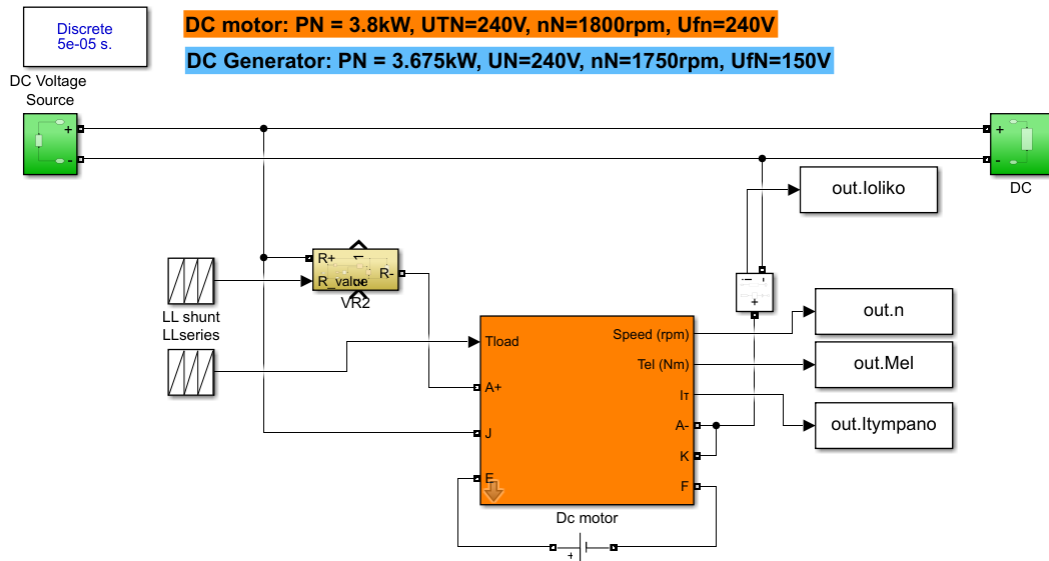
(3.8kW) τότε, εφαρμόζουμε ροπή  $M_{load} = \frac{3800}{60\pi * (\frac{1745}{1800})} \text{ Nm}$ . Βλέπω μέσω

του display στην παρακάτω εικόνα ότι έχουμε  $P_{in} = 4399.4 + 240.1 =$

$4639.5 \text{ W}$ ,  $P_{out} = 3800 \text{ W}$ ,  $\eta = \frac{P_{in}}{P_{out}} = 0.819$ .



## Κινητήρας με παράλληλη διέγερση

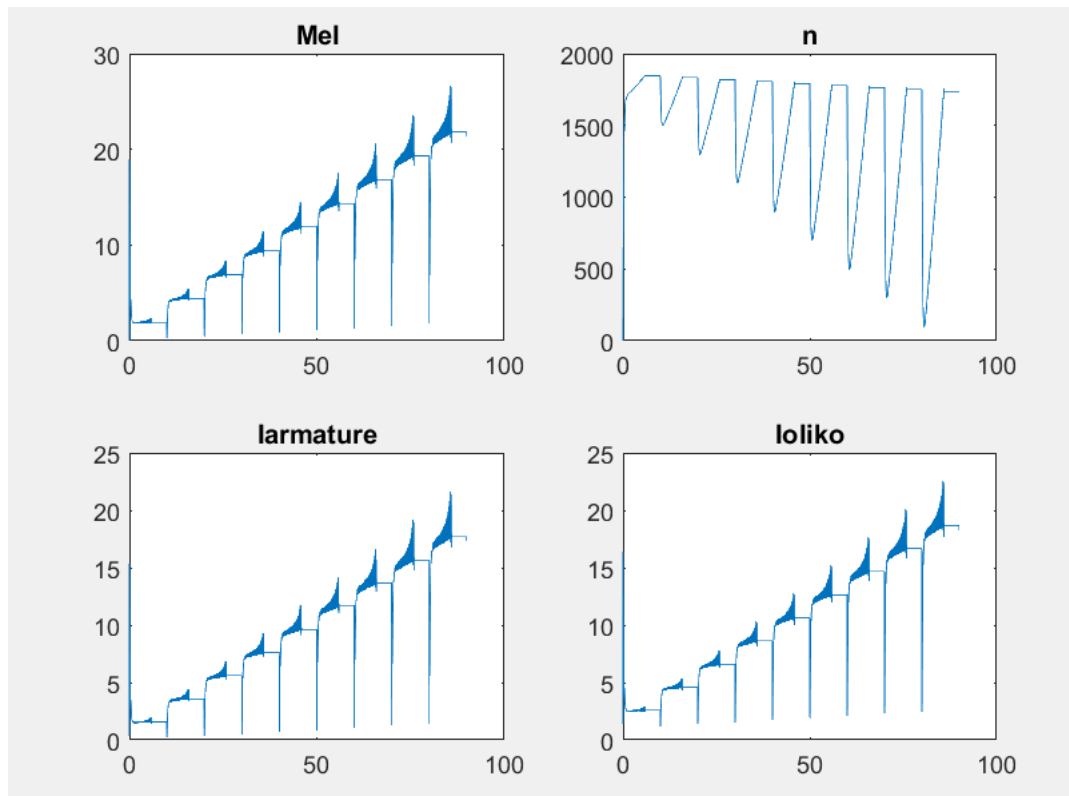


*Η συνδεσμολογία του μοντέλου .slx*

Στον κινητήρα παράλληλης διέγερσης, συνδέουμε το τύλιγμα παράλληλης διέγερσης άμεσα με το δίκτυο, χωρίς να παρεμβαίνει ο ροοστάτης. Το τύλιγμα εν σειρά διέγερσης μένει βραχυκυκλωμένο μέσω DC πηγής. Συνδέουμε το τύλιγμα τυμπάνου σε σειρά με τον ροοστάτη και έπειτα με το δίκτυο. Η ροπή φορτίου και η αντίσταση του ροοστάτη παίρνουν τις ίδιες τιμές με πριν, από τα repeating sequence block. Οι μετρήσεις λαμβάνονται με τον ίδιο με πριν τρόπο.

### Μεταβατικά φαινόμενα προσομείωσης

Εφόσον η τάση που εφαρμόζεται στο τύλιγμα παράλληλης διέγερσης μένει σταθερή στα 240V, η διέγερση είναι και σε αυτή την περίπτωση ίδια σε μέγεθος με τον κινητήρα ξένης διέγερσης. Έτσι παρατηρούμε την ίδια ακριβώς συμπεριφορά και φτάνουμε στα ίδια συμπεράσματα με πριν.



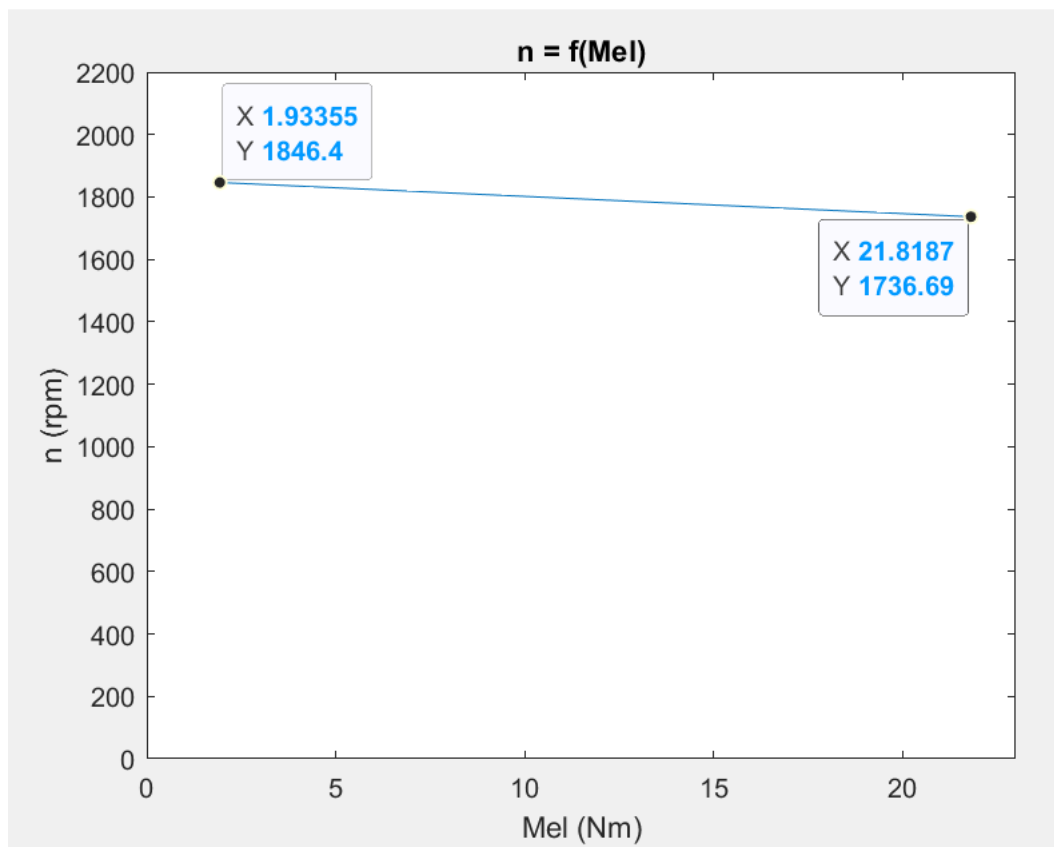
### Μετρήσεις μόνιμης κατάστασης

Παρατηρούμε τα ίδια ακριβώς μεγέθη που είχαμε και στον κινητήρα ξένης διέγερσης, καθώς η μαγνητική ροή μένει σταθερή στην ίδια τιμή με πριν, αφού εφαρμόζουμε σταθερή τάση 240V στο τύλιγμα J-K. Παρατηρούμε ότι το ολικό ρεύμα είναι κατά 1.0002 A μεγαλύτερο του ρεύματος τυμπάνου για κάθε σημείο μόνιμης κατάστασης, καθώς ισχύει  $I_{ολικό} = I_{τυμπάνου} + I_{διέγερσης}$ ,  $I_{διέγερσης} = 1.0002 \text{ A}$ .

Tload (Nm)	Telec (Nm)	Turns (rpm)	I tympano (A)	I oliko (A)
0	1.9335	1846.4	1.5668	2.5670
2.5	4.4192	1832.7	3.5809	4.5811
5	6.9048	1819.0	5.5950	6.5952
7.5	9.3905	1805.3	7.6091	8.6093

10	11.8761	1791.5	9.6232	10.6234
12.5	14.3617	1777.8	11.6373	12.6376
15	16.8474	1764.1	13.6514	14.6517
17.5	19.3330	1750.4	15.6655	16.6658
20	21.8187	1736.7	17.6797	18.6799

### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών

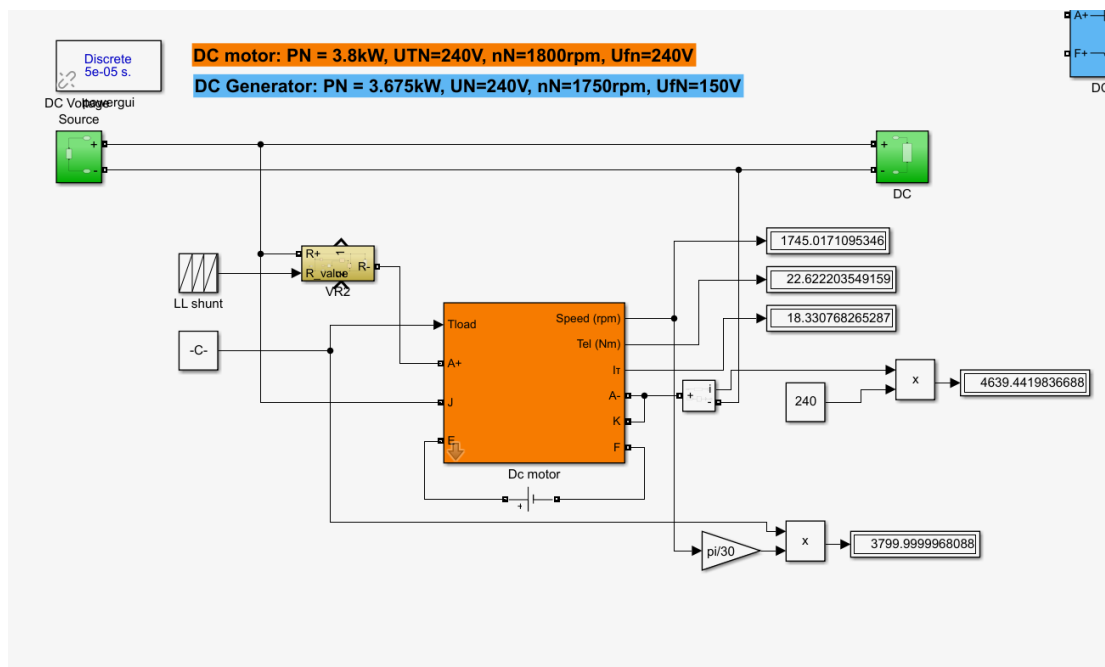


Η εξίσωση ροπής στροφών κινητήρα, ανεξαρτήτως της συνδεσμολογίας είναι:  $\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} - \frac{R_t}{(C\Phi)^2} M_{el}$ . Ο όρος  $C\Phi$  είναι αμετάβλητος για κάθε τιμή της ροπής  $M_{el}$ , άρα παρατηρείται η ίδια ευθεία με πριν. Έχει κλίση  $-\frac{R_t}{(C\Phi)^2}$  και στροφές εν κενώ  $n_0 = \frac{60\Omega_0}{2\pi} = \frac{60U_T}{2\pi C\Phi}$ .

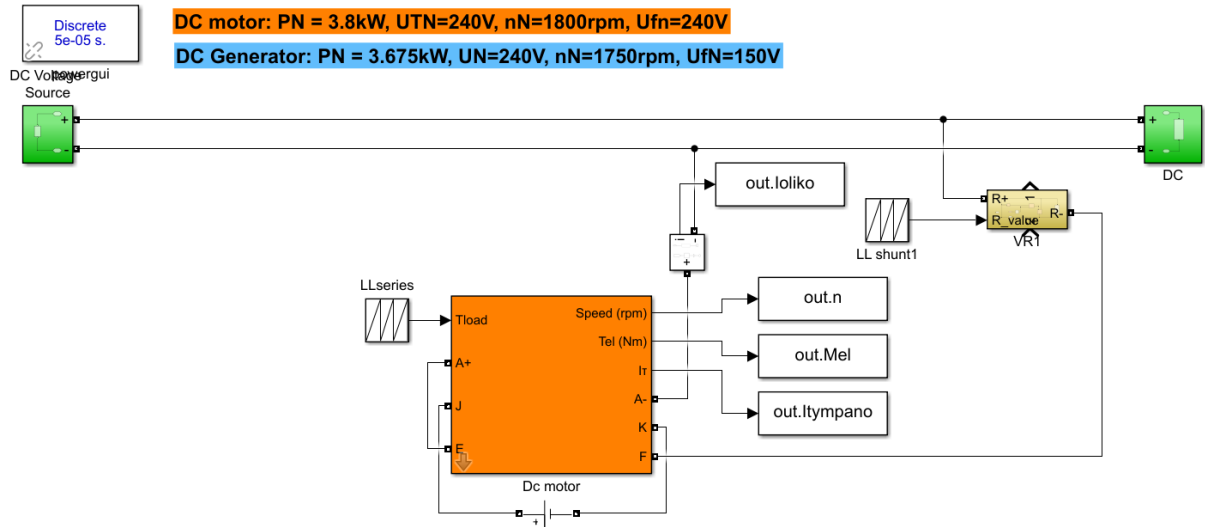
## Συντελεστής απόδοσης

Στον κινητήρα με παράλληλη διέγερση ο συντελεστής απόδοσης  $\eta$  ορίζεται ως:  $\eta = \frac{P_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma}}{P_{\tau\acute{\upsilon}\mu\pi\alpha\nu\omicron} + P_{\delta\iota\acute{\epsilon}\gamma\epsilon\rho\sigma\eta}} = \frac{M_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma} * \Omega}{U_T * I_{\omicron\lambda\iota\kappa\omicron}}$ . Για να μετρήσουμε τον συντελεστή απόδοσης συγκεκριμένα στην ονομαστική λειτουργία θα εφαρμόσουμε ροπή φορτίου την ονομαστική ροπή  $M_N = \frac{3800}{60\pi} \text{ Nm}$ .

Όμως, για την προηγούμενη τιμή οι στροφές δεν φτάνουν την ονομαστική τιμή των 1800, αλλά μένουν στις ~1745. Για να έχουμε ονομαστική ισχύ εξόδου (3.8kW) τότε, εφαρμόζουμε ροπή  $M_{load} = \frac{3800}{60\pi * (\frac{1745}{1800})} \text{ Nm}$ . Το ρεύμα τυμπάνου εδώ ισούται με 18.33 A. Βλέπω μέσω του display στην παρακάτω εικόνα ότι έχουμε  $P_{in} = 4639.4 \text{ W}$ ,  $P_{out} = 3800 \text{ W}$ ,  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 0.819$ . Ο συντελεστής απόδοσης είναι ίδιος με τον κινητήρα ξένης διέγερσης, καθώς εφαρμόζουμε την ίδια τάση στα τυλίγματα τυμπάνου και διέγερσης και την ίδια ροπή φορτίου.



### Κινητήρας με διέγερση σε σειρά



Η συνδεσμολογία του μοντέλου .slx

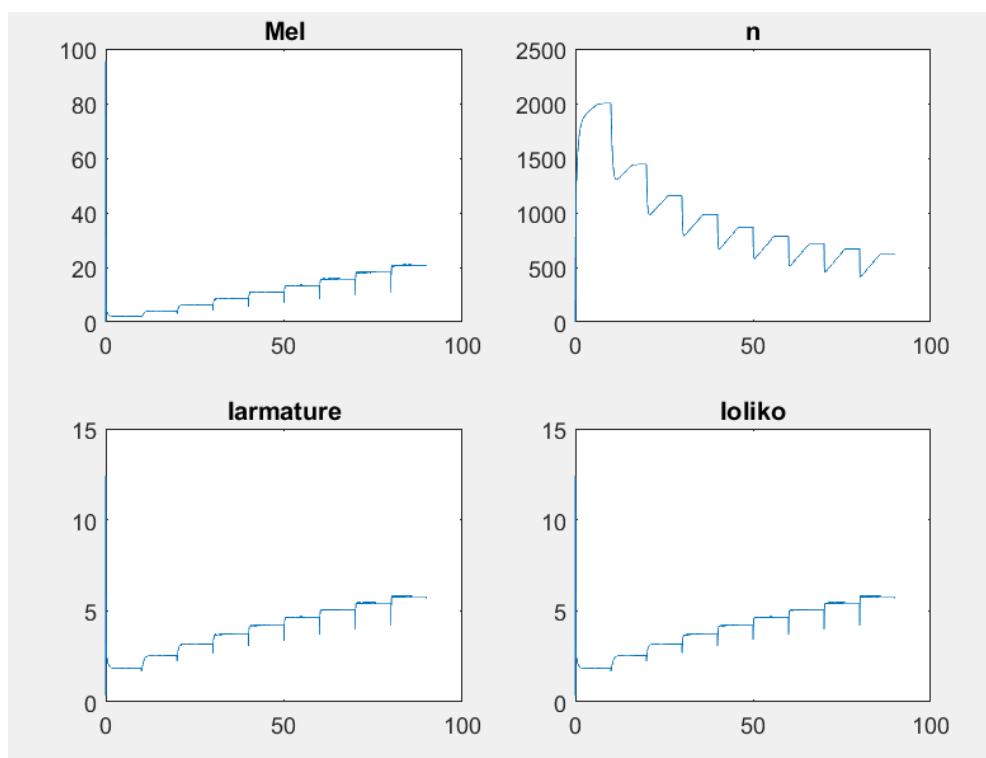
Στον κινητήρα με διέγερση σε σειρά συνδέουμε το τύλιγμα διέγερσης σε σειρά (F-E) με τον ροοστάτη, και έπειτα συνδέουμε εν σειρά το τύλιγμα τυμπάνου (E-A+ και A- με δίκτυο). Μπορούμε εναλλακτικά να συνδέσουμε πρώτα το τύλιγμα τυμπάνου με τον ροοστάτη και έπειτα το τύλιγμα διέγερσης σε σειρά (A- με F και E με δίκτυο). Τώρα συνδέουμε την DC πηγή τάσης 0V με το τύλιγμα J-K. Η ροπή φορτίου και η μεταβαλλόμενη αντίσταση παραμένουν όπως πριν.

## Μεταβατικά φαινόμενα προσομείωσης

Σύμφωνα με τις παρακάτω γραφικές, παρατηρούμε ότι όταν αυξάνεται στιγμιαία η ροπή φορτίου και η αντιστάση του ροοστάτη (με σκοπό την προστασία του οπλισμού), υπάρχει μια σχετική απότομη μείωση στο ρεύμα τυμπάνου και συνεπώς στην ηλεκτρομαγνητική ροπή. Έπειτα, το ρεύμα και η εσωτερική ροπή αυξάνονται γρήγορα περίπου στις προηγούμενες τιμές τους και μετά από μια ταλάντωση πολύ μικρού πλάτους φτάνουν την μόνιμη κατάσταση. Οι στροφές ακολουθούν την ίδια απότομη μείωση, με την διαφορά ότι αυξάνονται πάλι σταδιακά στην μόνιμη τιμή τους. Συμβαίνει το εξής: η στιγμιαία αύξηση της



εξωτερικής αντίστασης μειώνει απότομα το ρεύμα και συνεπώς την ροπή αλλά και την μαγνητική ροή. Η απότομη μείωση της μαγνητικής ροής συνεπάγεται την απότομη μείωση της επαγόμενης τάσης, άρα και την απότομη αύξηση του ρεύματος και της εσωτερικής ροπής. Συνολικά, το αποτέλεσμα είναι μια απότομη μείωση μεν του ρεύματος τυμπάνου και της εσωτερικής ροπής (άρα απότομη μείωση και των στροφών), αλλά όχι όσο μεγάλη όσο την μείωση που παρατηρήσαμε στους κινητήρες ξένης και παράλληλης διέγερσης. Στη συνέχεια η σταδιακή μείωση της εξωτερικής αντίστασης, αυξάνει ανάλογα το ρεύμα και την εσωτερική ροπή, με αποτέλεσμα να αυξάνονται σταδιακά τις στοφές. Η αύξηση των στροφών αυξάνει την επαγόμενη τάση που με τη σειρά της μειώνει την εσωτερική ροπή και το ρεύμα, δηλαδή συμβαίνει μια ταλάντωση μικρού πλάτους στις τιμές του ρεύματος τυμπάνου και εσωτερικής ηλεκτρομαγνητικής ροπής, μέχρι να φτάσει ο κινητήρας την λειτουργία μόνιμης κατάστασης.



### Μετρήσεις μόνιμης κατάστασης

Tload (Nm)	Telec (Nm)	Turns (rpm)	I tympano (A)
0	2.0952	2000.7	1.8429
2.5	4.0100	1442.0	2.5495
5	6.2103	1155.7	3.1728
7.5	8.5303	983.9	3.7185
10	10.9092	868.3	4.2052
12.5	13.3213	784.3	4.6469
15	15.7540	720.0	5.0534
17.5	18.2004	668.8	5.4316
20	20.6564	626.8	5.7865

Στον κινητήρα με διέγερση σε σειρά, παρατηρούμε μια σημαντική μείωση στον αριθμό στροφών συναρτήσει αύξησης της ηλεκτρομαγνητικής ροπής. Επίσης βλέπουμε ότι το ρεύμα τυμπάνου δεν αυξάνεται με τους ίδιους ρυθμούς με πριν, είναι μόνο ~5 A για ροπή φορτίου 20 Nm, ενώ στις προηγούμενες διατάξεις έφτανε τιμές των ~17 A. Όλα αυτά οφείλονται στο γεγονός ότι τώρα η μαγνητική ροή είναι συνάρτηση του ρεύματος:  $\Phi = L_f * I_T$ . Συνεπάγεται πως  $M_{el} = C\Phi I_T = C L_f * I_T^2$ , άρα για γραμμική αύξηση της ροπής, το ρεύμα πλέον αυξάνεται παραβολικά ( $I \propto \sqrt{M}$ ). Η συμπεριφορά των στροφών συναρτήσει των στροφών θα αναλυθεί ακριβώς παρακάτω.

### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών

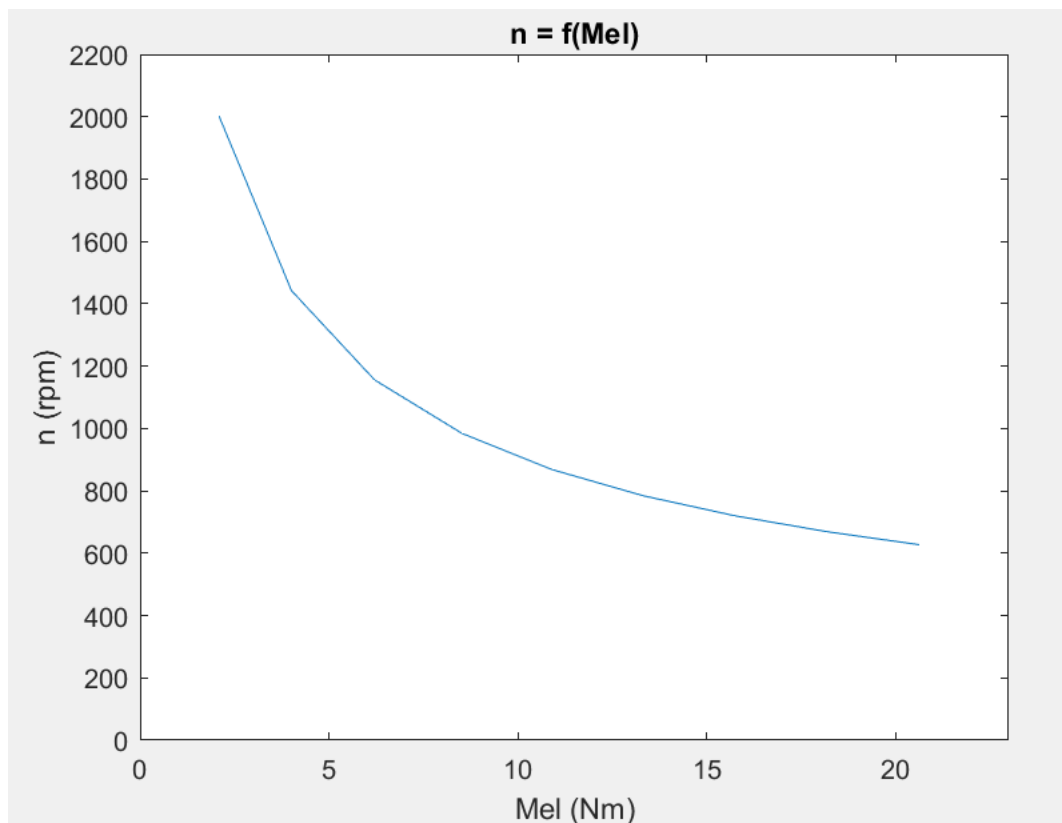
Η εξίσωση ροπής στροφών κινητήρα, ανεξαρτήτως της συνδεσμολογίας είναι:  $\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} - \frac{R_t}{(C\Phi)^2} M_{el}$ . Στον κινητήρα διέγερσης σε σειρά είναι :  $\Phi = L_f * I_T$ , άρα η προηγούμενη εξίσωση παίρνει την ακόλουθη

μορφή:  $\Omega = \frac{U_T}{CL_f I_T} - \frac{R_t}{(CL_f I_T)^2} M_{el}$ , με  $M_{el} = CL_f * I_T^2$ , άρα κάνοντας

αντικατάσταση ως προς την ροπή καταλήγουμε στον τύπο:

$$\Omega = \frac{U_T}{\sqrt{CL_f M_{el}}} - \frac{R_t}{CL_f}. \text{ Βλέπουμε όντως και από την γραφική ότι οι}$$

στροφές μειώνονται με την αντίστροφη τετραγωνική ρίζα της ροπής. Οι στροφές εν κενώ σε αυτή την περίπτωση είναι άπειρες καθώς για  $T_{load} = 0$  πρέπει  $T_{el} = 0$ , άρα  $I_T = 0$  δηλαδή  $U_{επ} = C\Phi\Omega = U_T$ , αλλά είναι  $\Phi = L_f I_T = 0$ , άρα πρέπει να απειρίζονται οι στροφές.



### Συντελεστής απόδοσης

Στον κινητήρα με διέγερση σε σειρά, ο συντελεστής απόδοσης  $\eta$

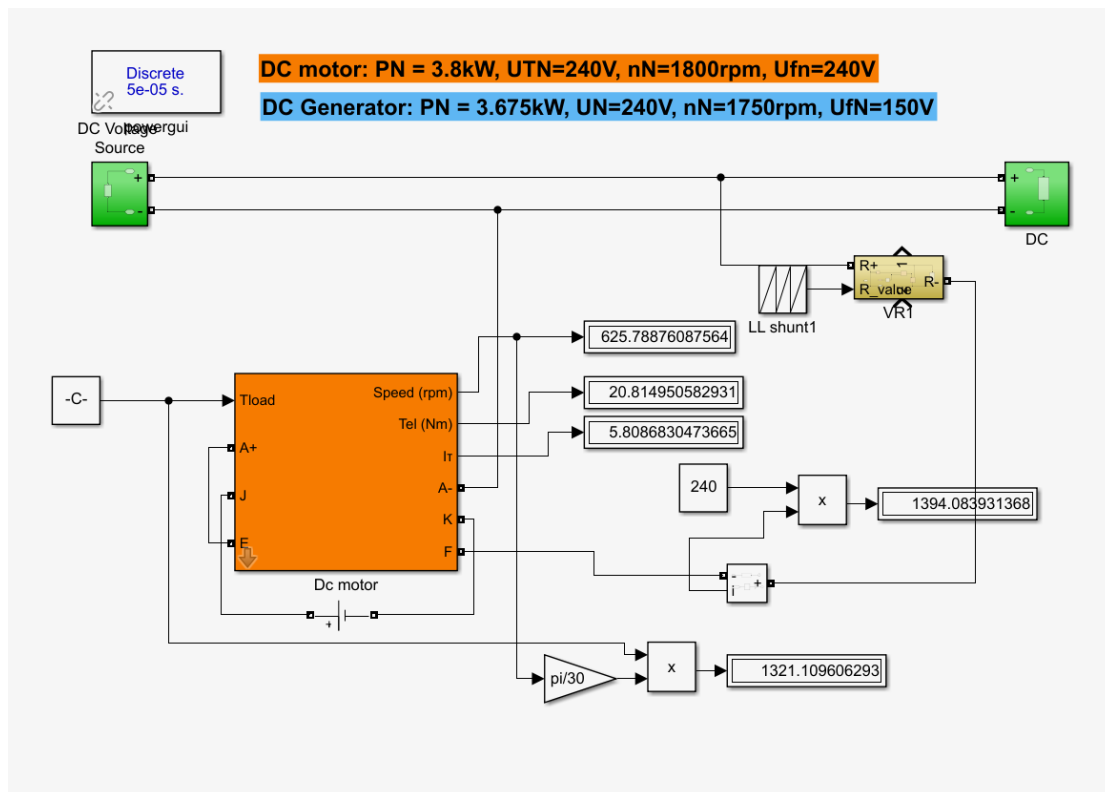
ορίζεται ως:  $\eta = \frac{P_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma}}{P_{\tau\acute{\upsilon}\mu\pi\alpha\nu\omicron} + P_{\delta\iota\acute{\epsilon}\gamma\epsilon\rho\sigma\eta}} = \frac{M_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma} * \Omega}{U_T * I_{\tau\acute{\upsilon}\mu\pi\alpha\nu\omicron}}$ . Για να μετρήσουμε τον

συντελεστή απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία, εφαρμόζουμε

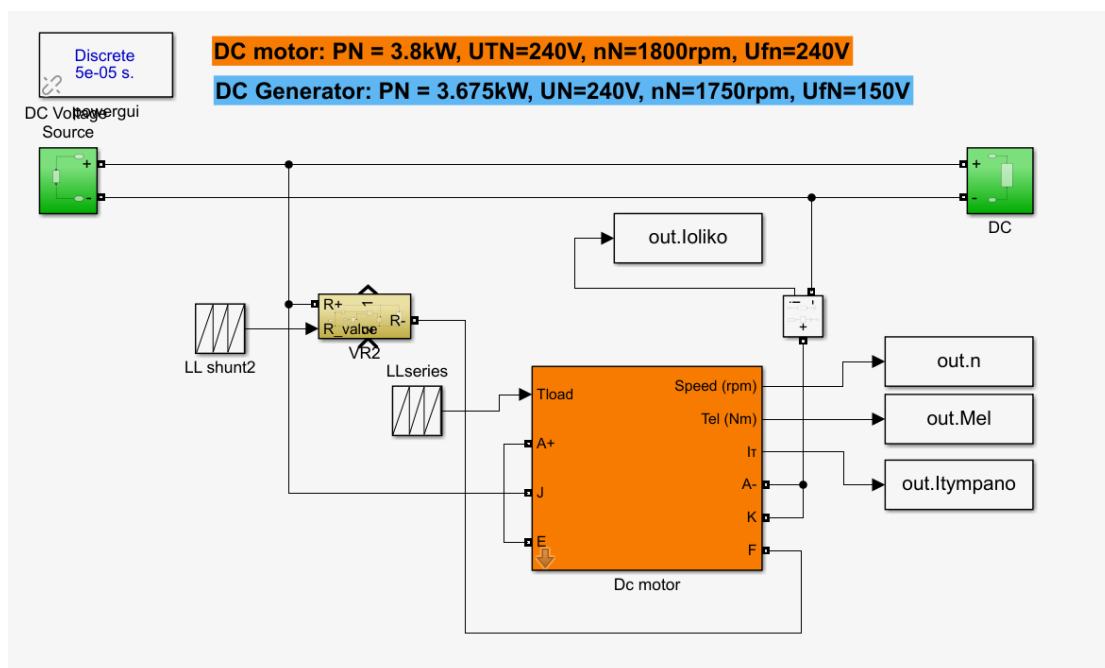
ονομαστική ροπή  $M_N = \frac{3800}{60\pi} \text{ Nm}$ , όμως καθώς στον κινητήρα με

διέγερση σε σειρά η ροπή αυξάνεται με το τετράγωνο του ρεύματος

τυμπάνου και οι στροφές μειώνονται με την αντίστροφη ρίζα της ροπής, καταλήγουμε να έχουμε για ονομαστική ροπή φορτίου ρεύμα τυμπάνου 5.8 A, αντί για 18.33 A όπως πριν και στροφές 625, αντί για 1745 όπως πριν. Βλέπω μέσω του display στην παρακάτω εικόνα ότι έχουμε  $P_{in} = 1394.1\text{ W}$ ,  $P_{out} = 1321.1\text{ W}$ ,  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 0.941$ . Ο συντελεστής απόδοσης τώρα παίρνει μεγαλύτερη τιμή, καθώς οι ωμικές απώλειες και οι απώλειες τριβής (μόνο αυτές τις απώλειες προσομοιώνει η Simulink) είναι μικρότερες για μικρότερο ρεύμα τυμπάνου και αριθμό στροφών.



## Κινητήρας με μεικτή διέγερση

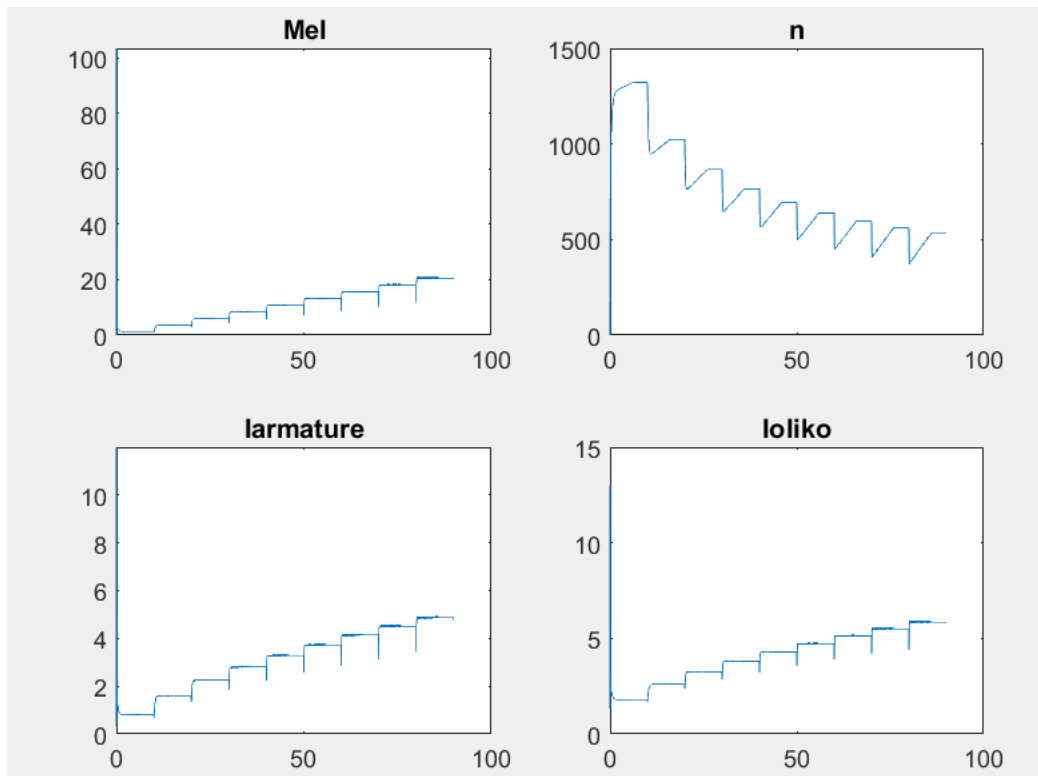


*Η συνδεσμολογία του μοντέλου .slx*

Στον κινητήρα με σύνθετη διέγερση συνδέουμε το J (τύλιγμα παράλληλης διέγερσης) άμεσα με το δίκτυο, παρακάμπτοντας την μεταβαλλόμενη αντίσταση, την οποία συνδέουμε στο F (τύλιγμα διέγερσης σε σειρά). Έπειτα, συνδέεται το E στο A+ (το τύλιγμα διέγερσης σε σειρά με το τύμπανο) και τέλος, βραχυκυκλώνουμε το A- με το K και τα συνδέουμε στο δίκτυο. Η ροπή φορτίου και η μεταβαλλόμενη αντίσταση παραμένουν όπως πριν.

### Μεταβατικά φαινόμενα προσομείωσης

Στον κινητήρα μεικτής διέγερσης τα μεταβατικά φαινόμενα που παρουσιάζονται είναι τα ίδια με αυτά στον κινητήρα διέγερσης σε σειρά, καθώς αν και εδώ η μαγνητική ροή (διέγερση) που δημιουργείται έχει δύο συνιστώσες:  $\Phi_{\text{παράλληλα}} = \frac{L_f}{R_f} * U_T$ ,  $\Phi_{\text{σειρά}} = L_f * I_T$ , η μεταβαλλόμενη με το ρεύμα  $\Phi_{\text{σειρά}}$  διαμορφώνει τις μεταβατικές ταλαντώσεις όμοιες με αυτές του κινητήρα διέγερσης σε σειρά.



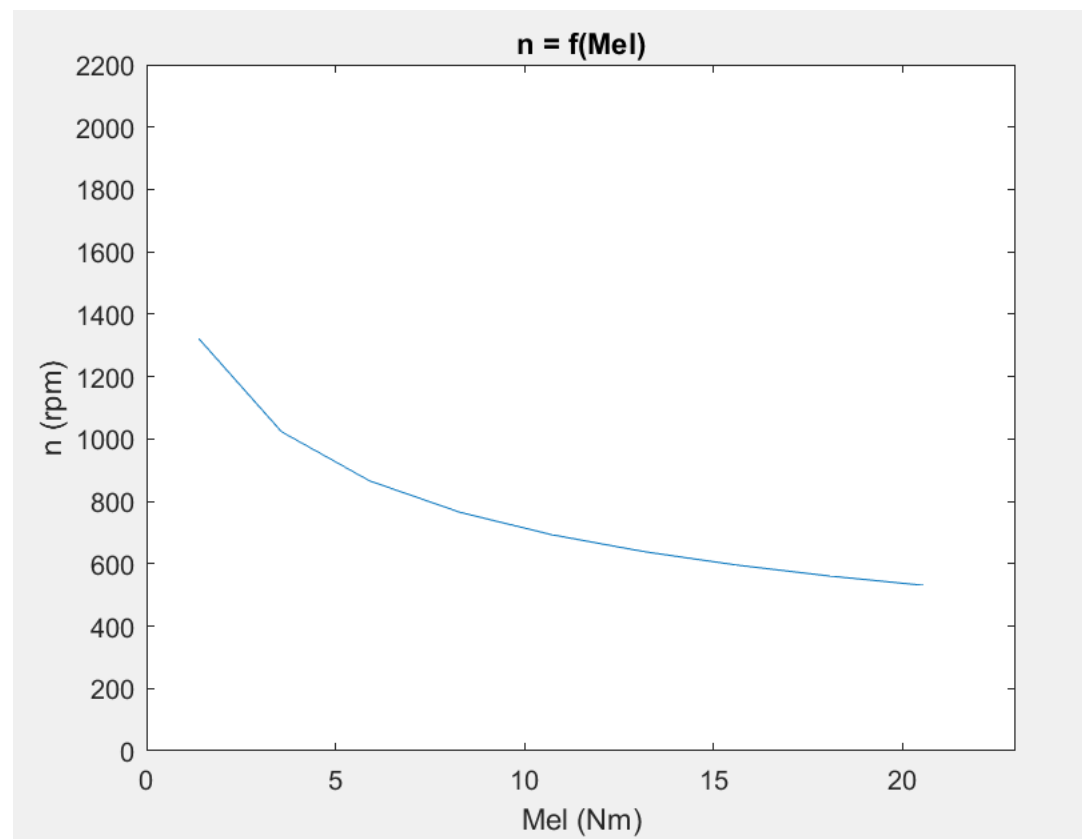
### Μετρήσεις μόνιμης κατάστασης

Tload (Nm)	Telec (Nm)	Turns (rpm)	I tympano (A)	I oliko (A)
0	1.3842	1321.8	0.8009	1.8012
2.5	3.5718	1023.5	1.6056	2.6058
5	5.9065	865.7	2.2517	3.2519
7.5	8.3008	764.7	2.8019	3.8021
10	10.7258	693.1	3.2878	4.2880
12.5	13.1689	638.8	3.7270	4.7273
15	15.6238	595.7	4.1307	5.1309
17.5	18.0869	560.5	4.5060	5.5063
20	20.5560	530.9	4.8582	5.8585

Στον κινητήρα με μεικτή διέγερση, η αυξημένη μαγνητική ροή συγκριτικά με τους κινητήρες ξένης/παράλληλης και σε σειρά

διέγερσης, έχει ως αποτέλεσμα ακόμα μικρότερο ρεύμα τυμπάνου για κάθε μια δεδομένη ροπή φορτίου. Η διαφορά μεταξύ ολικού ρεύματος και ρεύματος τυμπάνου είναι και πάλι 1.0002 A. Οι στροφές ακολουθούν περίπου τον ίδιο ρυθμό μεταβολής με τον κινητήρα διέγερσης σε σειρά, αλλά παίρνουν μικρότερη αρχική τιμή (~1300 αντί για 2000) εξαιτίας της αυξημένης μαγνητικής ροής.

### Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής-στροφών



Η εξίσωση ροπής στροφών κινητήρα, ανεξαρτήτως της συνδεσμολογίας

είναι:  $\Omega = \frac{U_T}{C\Phi} - \frac{R_t}{(C\Phi)^2} M_{el}$ . Για την μαγνητική ροή ισχύει:  $\Phi =$

$\Phi_{\text{παράλληλη}} + \Phi_{\text{σειρά}}$ , με  $\Phi_{\text{παράλληλη}} = \frac{L_f}{R_f} * U_T = \Phi_0$ ,  $\Phi_{\text{σειρά}} = L_f *$

$I_T$ , άρα η προηγούμενη εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:  $\Omega =$

$\frac{U_T}{C\Phi_0 + CL_f I_T} - \frac{R_t}{(C\Phi_0 + CL_f I_T)^2} M_{el}$ , με  $M_{el} = C\Phi I_T = C\Phi_0 I_T + CL_f * I_T^2$ .

Βλέπουμε από την γραφική ότι οι στροφές μειώνονται με την αύξηση

της ροπής παρόμοια με την χαρακτηριστική του κινητήρα διέγερσης σε σειρά, (η σχέση  $\Omega = f(M_{el})$  εδώ είναι πιο περίπλοκη), αλλά ο ρυθμός μείωσης των στροφών συναρτήσει της αύξησης της ροπής είναι πιο ομαλός σχετικά με την προηγούμενη περίπτωση. Επίσης οι στροφές εν κενώ ( $M_{el} = 0$  και  $I_T = 0$ ) ισούνται με  $n_0 = \frac{60\Omega_0}{2\pi} = \frac{60U_T}{2\pi C\Phi_0}$ .

### Συντελεστής απόδοσης

Στον κινητήρα με μεικτή διέγερση, ο συντελεστής απόδοσης η ορίζεται

$$\text{ως: } \eta = \frac{P_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma}}{P_{\tau\acute{\upsilon}\mu\pi\alpha\nu\omicron} + P_{\delta\iota\epsilon\gamma\epsilon\rho\sigma\eta}} = \frac{M_{\acute{\alpha}\xi\omicron\nu\alpha\varsigma} * \Omega}{U_T * I_{\omicron\lambda\iota\kappa\acute{o}}}. \text{ Για να μετρήσουμε τον}$$

συντελεστή απόδοσης στην ονομαστική λειτουργία, εφαρμόζουμε ονομαστική ροπή  $M_N = \frac{3800}{60\pi} \text{ Nm}$ , όμως καθώς στον κινητήρα με μεικτή διέγερση μια συνιστώσα της ροπής αυξάνεται με το τετράγωνο του ρεύματος τυμπάνου και οι στροφές μειώνονται μη γραμμικά συναρτήσει της ροπής, καταλήγουμε να έχουμε για ονομαστική ροπή φορτίου ρεύμα τυμπάνου 4.9 A, αντί για 18.33 A όπως στην ξένη/παράλληλη διέγερση και στροφές 530, αντί για 1745. Επίσης το ρεύμα τυμπάνου και οι στροφές εδώ είναι ακόμα χαμηλότερες συγκριτικά με την διέγερση σε σειρά, επειδή εδώ έχουμε μεγαλύτερη μαγνητική ροπή εξαιτίας του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης. Βλέπω μέσω του display στην παρακάτω εικόνα ότι έχουμε  $P_{in} = 1411.3 \text{ W}$ ,  $P_{out} = 1119.2 \text{ W}$ ,  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = 0.793$ . Ο συντελεστής απόδοσης τώρα παίρνει χαμηλότερη τιμή, καθώς προσθέτονται στις απώλειες οι ωμικές απώλειες του τυλίγματος παράλληλης διέγερσης, οι οποίες μένουν σταθερές για κάθε τιμή της ισχύος εισόδου, άρα μειώνουν σημαντικά τον συντελεστή απόδοσης όταν αυτός υπολογίζεται σε χαμηλότερες ισχύεις εισόδου, όπως τώρα.



