



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΠΑΤΡΩΝ  
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά  
μαθήματα ΠΠ

# Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα

Ενότητα 5: Απώλειες και ψύξη Ηλεκτρικών Κινητήρων σε  
μεταβατικές και μόνιμες καταστάσεις

Επαμεινώνδας Μητρονίκας

Πολυτεχνική Σχολή

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών

# Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

# Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.



# Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή στα Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα
2. Συγκρότηση ενός Ηλεκτρικού Κινητήριου Συστήματος – είδη φορτίων
3. Μεταφορά Ισχύος
4. Επιλογή Ηλεκτρικών Κινητήρων
- 5. Απώλειες και ψύξη Ηλεκτρικών Κινητήρων σε μεταβατικές και μόνιμες καταστάσεις**
6. Λειτουργική Συμπεριφορά Ηλεκτρικών Κινητήρων
7. Περιγραφή Κινητήρων Σ.Ρ. με χονδρικά διαγράμματα
8. Λειτουργική συμπεριφορά ασύγχρονων κινητήρων
9. Λειτουργική συμπεριφορά σύγχρονων κινητήρων



# Άδειες χρήσης

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.
- Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Ευρωπαϊκή Ένωση  
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



# Σκοποί ενότητας

- Υπολογισμοί σε μεταβατικές καταστάσεις
- Κατανόηση των βασικών υπολογισμών απωλειών κινητήρα σε μεταβατικές καταστάσεις
- Ψύξη ηλεκτρικών κινητηρίων συστημάτων σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας
- Υπολογισμοί για την εύρεση του συντελεστή υπερφόρτισης



# Υπολογισμοί μεταβατικών καταστάσεων

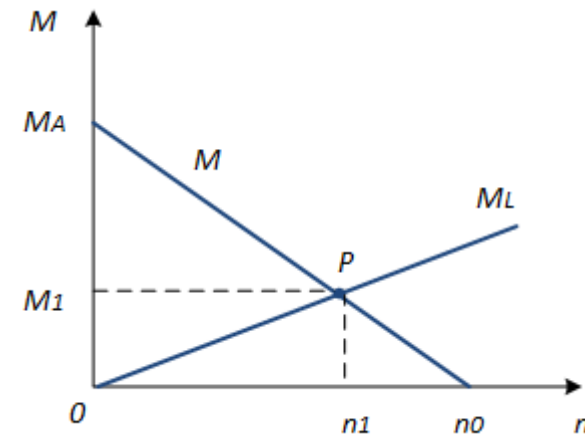
- Υποθέτουμε ότι έχουμε **κινητήρα συνεχούς ρεύματος με αντίσταση εκκίνησης και γραμμική χαρακτηριστική φορτίου.**

- Η τιμή  $n_1$  υπολογίζεται από τη σχέση:

$$n_1 = \frac{n_o}{\frac{Cn_o}{M_A} + 1}$$

- Η εξίσωση κίνησης είναι η:

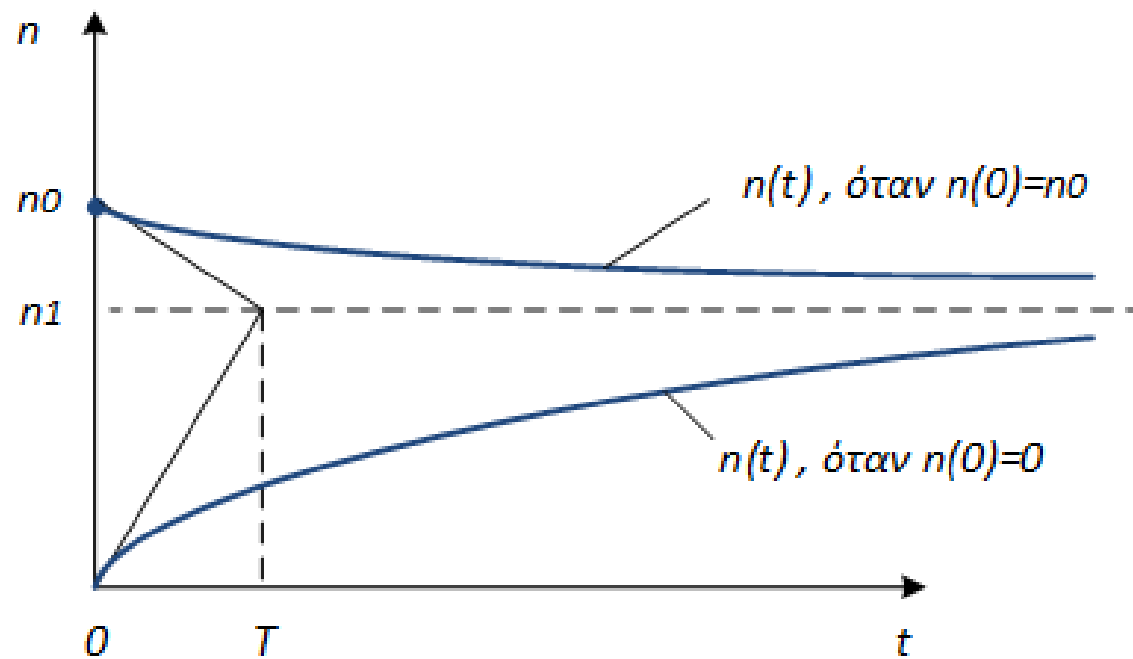
$$M - ML = J \frac{d\Omega}{dt}$$



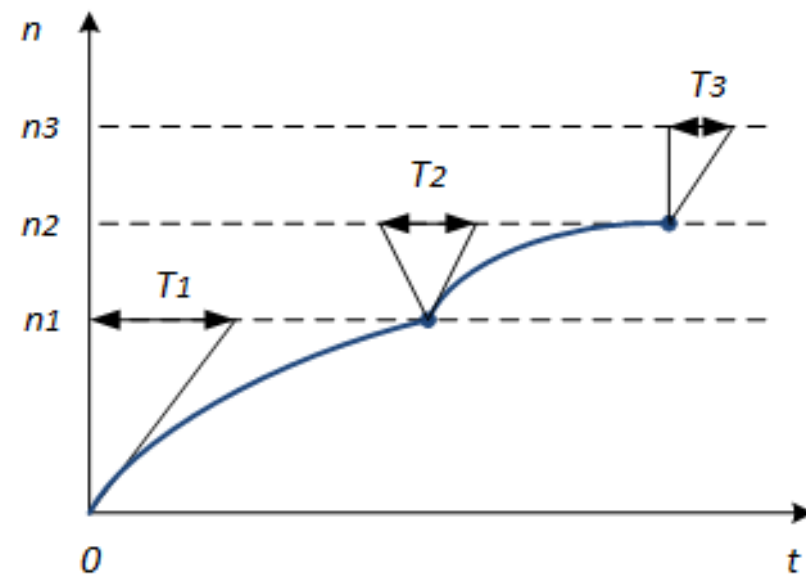
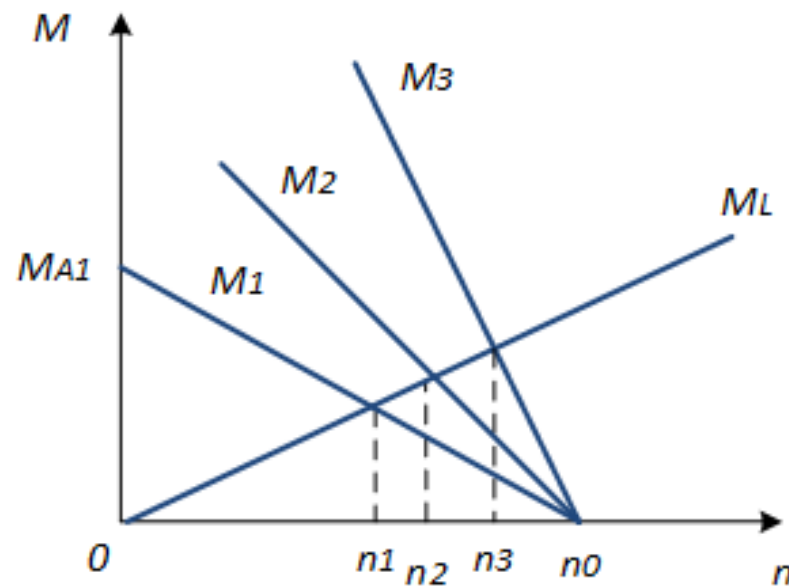


□ Τελικά προκύπτει η εξίσωση:

$$n(t) = n_1 \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right) + n(0) \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$



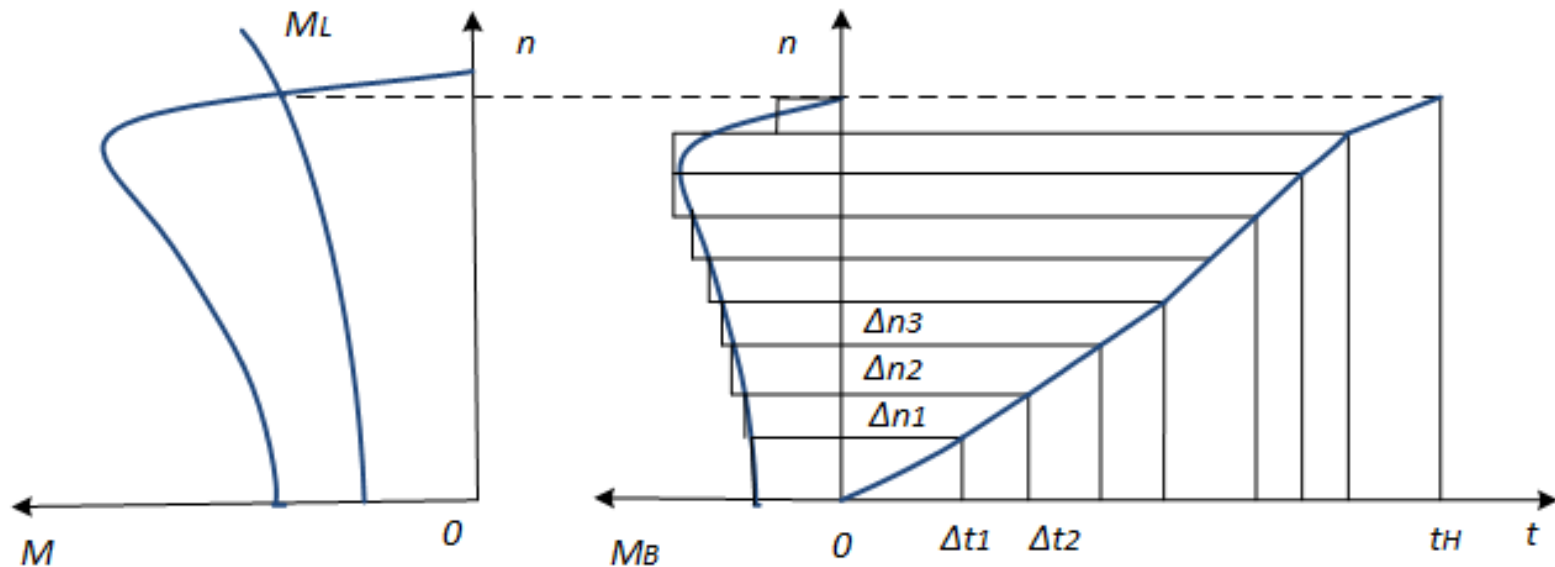
- Για επιτάχυνση με μεταβολή της αντίστασης σε βαθμίδες, η μορφή της ταχύτητας φαίνεται παρακάτω.



# Γραφική μέθοδος για την εύρεση της $n(t)$

- Η καμπύλη  $n(t)$  υπολογίζεται γραφικά θεωρώντας διαδοχικές, πολύ μικρές μεταβολές ταχύτητας  $\Delta n$  και υπολογίζοντας τα χρονικά διαστήματα για τις διαδοχικές μεταβατικές καταστάσεις από την εξίσωση κίνησης, οπότε προκύπτει η σχέση:

$$\Delta t = \frac{2\pi J \Delta n}{M_B}$$



Απώλειες κινητήρα σε  
μεταβατικές καταστάσεις

## Απώλειες μεταβατικών καταστάσεων για μηχανές συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (1/2)

- Η γενική σχέση για τον υπολογισμό των απωλειών είναι:

$$W_V = \int_0^t (i_T)^2 R_T dt$$

- Για επιτάχυνση εν κενώ:

$$W_V = \frac{1}{2} J(\Omega_o)^2$$

- Για πέδηση (με αλλαγή της πολικότητας της τάσης τυμπάνου):

$$W_V = \frac{3}{2} J(\Omega_o)^2$$



## Απώλειες μεταβατικών καταστάσεων για μηχανές συνεχούς ρεύματος ξένης διέγερσης (2/2)

- Για πέδηση μέσω αντίστασης (λειτουργία ως γεννήτρια):

$$W_v = \frac{1}{2} J(\Omega_o)^2$$

- Για αντιστροφή φοράς περιστροφής:

$$W_v = \frac{4}{2} J(\Omega_o)^2$$



## Απώλειες μεταβατικών καταστάσεων για τριφασική ασύγχρονη μηχανή (1/2)

- Η γενική σχέση για τον υπολογισμό των απωλειών είναι:

$$W_V = \int_0^t [R_1(i_1)^2 + R_2(i_2)^2] dt$$

- Για επιτάχυνση εν κενώ:

$$W_V = \frac{1}{2} \cdot \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) J(\Omega_1)^2$$



## Απώλειες μεταβατικών καταστάσεων για τριφασική ασύγχρονη μηχανή (2/2)

- Για πέδηση:

$$W_V = \frac{3}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) J(\Omega_1)^2$$

- Για αντιστροφή φοράς περιστροφής:

$$W_V = \frac{4}{2} \cdot \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) J(\Omega_1)^2$$





Ψύξη κινητηρίου συστήματος σε  
μόνιμη κατάσταση λειτουργίας

## Θέρμανση ηλεκτρικών μηχανών

- ❑ Ο κινητήρας θερμαίνεται εξαιτίας κυρίως των απωλειών ενέργειας στα τυλίγματα, στο σίδηρο και λόγω μηχανικών τριβών.
- ❑ Οι απώλειες έχουν ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του κινητήρα.
- ❑ Αν η απαγωγή θερμότητας δεν είναι ικανοποιητική, η τελική θερμοκρασία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη γήρανση και τελικά την καταστροφή των μονώσεων της μηχανής.
- ❑ Εμπειρικά καλό είναι να ξέρουμε ότι βάσει του κανόνα του Montsinger, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10oC πέρα από την οριακή επιτρεπτέα τιμή που καθορίζει ο κατασκευαστής, έχει ως συνέπεια μείωση της διάρκειας ζωής του κινητήρα κατά το ήμισυ.



# Ηλεκτρικές απώλειες

<b>α) Απώλειες εν κενώ:</b>	<u>Απώλειες σιδήρου</u>
	Δινορεύματα ( $\sim B^2 f^2$ )
	Υστέρηση ( $\sim B^2 f$ )
	<u>Απώλειες λόγω τριβών</u>
	Έδρανα ( $\mu$ )
	Ψήκτρες ( $n$ )
	Εξαεριστήρας ( $n, n^2, n^3$ )
<b>β) Απώλειες διέγερσης:</b>	Ωμικές απώλειες στο τύλιγμα διέγερσης
	Απώλειες στους δακτυλίους ολίσθησης.
<b>γ) Απώλειες φορτίου</b>	Απώλειες στις ωμικές αντιστάσεις των τυλιγμάτων που διαρρέονται από το κύριο ρεύμα.



# Κατηγορίες μονώσεων

Χαρακτηρισμός	Υ	A	E	B	F	H	C
$\Theta_{\max}$ σε °C	90	105	120	130	155	180	>180
Υλικά (για διάρκεια ζωής 20 ετών)	Βαμβάκι Χαρτί Πρεσπάν		Τεχνητή ρητίνη	Άσβεστος			



# Θέρμανση ηλεκτρικών μηχανών

- ❑ Ο κινητήρας θερμαίνεται εξαιτίας κυρίως των απωλειών ενέργειας στα τυλίγματα, στο σίδηρο και λόγω μηχανικών τριβών.
- ❑ Οι απώλειες έχουν ως αποτέλεσμα να αυξάνεται η θερμοκρασία του κινητήρα.
- ❑ Αν η απαγωγή θερμότητας δεν είναι ικανοποιητική, η τελική θερμοκρασία μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη γήρανση και τελικά την καταστροφή των μονώσεων της μηχανής.
- ❑ Εμπειρικά καλό είναι να ξέρουμε ότι βάσει του κανόνα του Montsinger, αύξηση της θερμοκρασίας κατά 10οC πέρα από την οριακή επιτρεπτέα τιμή που καθορίζει ο κατασκευαστής, έχει ως συνέπεια μείωση της διάρκειας ζωής του κινητήρα κατά το ήμισυ.



# Μέθοδοι ψύξης

- ❑ **Φυσική ψύξη:** Η θερμότητα αποβάλλεται από τον κινητήρα μέσω του αέρα του περιβάλλοντος χώρου.
- ❑ **Ιδιοανεμιστήρας:** Η ψύξη επιτυγχάνεται μέσω ανεμιστήρα τοποθετημένου στον άξονα του κινητήρα που περιστρέφεται μαζί με το δρομέα. Συνηθίζεται σε κινητήρες που λειτουργούν  $n$  κοντά στον ονομαστικό αριθμό στροφών.
- ❑ **Ξένος ανεμιστήρας:** Ο ανεμιστήρας ψύξης κινείται από ξεχωριστό κινητήρα. Συνίσταται για κινητήρες που λειτουργούν σε όλο το εύρος των στροφών.
- ❑ **Κυκλοφοριακή ψύξη:** Το μέσο ψύξης μπορεί να είναι υγρό, αέρας, υδρογόνο και κυκλοφορεί εντός κλειστού κυκλώματος.



## Θερμικοί νόμοι

- Η σχέση που διέπει την ανταλλαγή θερμότητας μεταξύ μηχανής είναι:

$$P_V dt = C d\theta + A\theta dt$$

Θερμότητα λόγω απωλειών

Θερμότητα που αποθηκεύεται στον κινητήρα ως αύξηση της θερμοκρασίας

Αποδιδόμενη θερμότητα στο ψυκτικό

- Από τη σχέση προκύπτει η διαφορική εξίσωση:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{A}{C}\theta = \frac{P_V}{C}$$



# Θερμικοί νόμοι

- Η λύση της παραπάνω εξίσωσης είναι:

$$\theta = \theta_E - (\theta_E - \theta_{(t=0)})e^{\frac{t}{T_W}}$$

- Όπου:

$\theta_E = \frac{P_V}{A}$  είναι η τελική θερμοκρασία της μηχανής στην κατάσταση ισορροπίας

$T_W = \frac{C}{A}$  είναι η θερμική σταθερά χρόνου της μηχανής

$\theta_{(t=0)}$  είναι η θερμοκρασία μόλις εμφανιστεί η  $P_V$





# Ενδεικτικές τιμές $T_w$

<b>Χαρακτηριστικές τιμές <math>T_w</math></b>	
Μικρές μηχανές με προστασία	30 min
Ανοιχτές αεριζόμενες μηχανές	50-70 min
Κλειστές μηχανές	80-120 min
Μηχανές εντός στερεού περιβλήματος	180-300min
<b>Σχέση της σταθεράς <math>T_w</math> υπό κανονική λειτουργία ως προς την τιμή <math>T_{wo}</math> στην ηρεμία</b>	
Μηχανές με ξένη ψύξη	1
Κλειστές μηχανές με ίδιο εξαερισμό	0,7
Ανοιχτές μηχανές με ίδιο εξαερισμό	0,5



## Εξάρτηση από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (1/2)

- **Θερμοκρασία ψυκτικού μέσου:** Η ονομαστική ισχύς ενός κινητήρα αναφέρεται σε μια τυποποιημένη θερμοκρασία ψυκτικού ίση με 40° C. Για διαφορετική θερμοκρασία, προσαρμόζεται σύμφωνα με τον πίνακα:

Θερμοκρασία ψυκτικού σε °C	40	45	50	60
% της ονομαστικής ισχύος	100	96	92	84



## Εξάρτηση από τους περιβαλλοντικούς παράγοντες (2/2)

### □ Ατμοσφαιρικό ύψος:

Ύψος από την επιφάνεια της θάλασσας (m)	1000	2000	3000	4000	5000
% της ονομαστικής ισχύος	100	95	90	85	80



□ Ορισμοί:

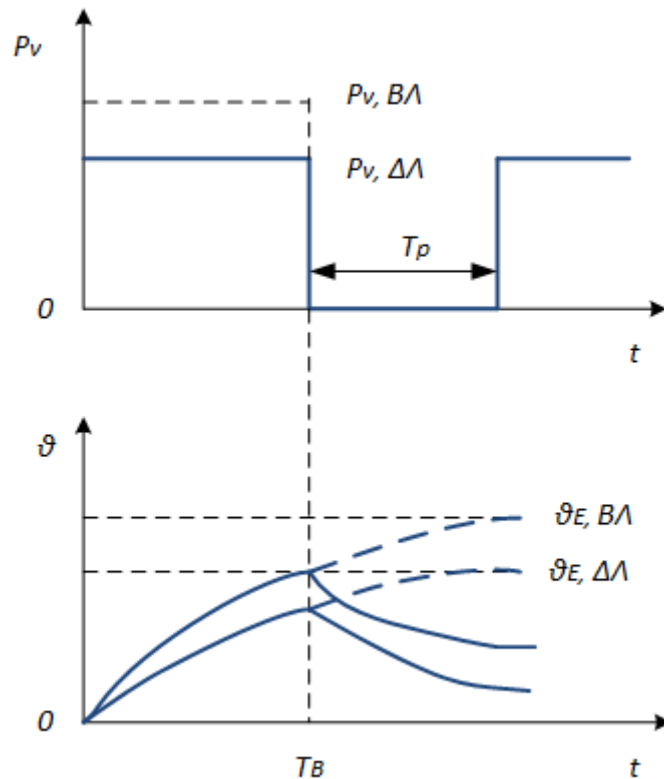
- **Συντελεστής αυξήσεως απωλειών ( $q_w$ )**: δηλώνει κατά πόσο οι απώλειες της μηχανής στη βραχεία ή περιοδική λειτουργία μπορούν να αυξηθούν σε σχέση με τις απώλειες στη διαρκή λειτουργία, χωρίς να υπερβούμε την επιτρεπτά θέρμανση.
- **Συντελεστής υπερφόρτισης ( $Q_m$ )**: δηλώνει πόσο μπορεί να αυξηθεί το φορτίο στη βραχεία ή περιοδική λειτουργία πάνω από το ονομαστικό χωρίς να υπερβούμε την επιτρεπτά θέρμανση

□ Ισχύει η σχέση:

$$Q_m = \sqrt{q_w \left(1 + \frac{K_1}{K_2}\right) - \frac{K_1}{K_2}} \quad \text{όπου} \quad \frac{K_1}{K_2} = \frac{\text{απώλειες εν κενώ}}{\text{απώλειες υπό φορτίο}}$$



# Θέρμανση κατά τη βραχεία λειτουργία (1/2)



□ Η βραχεία λειτουργία ορίζεται από τη σχέση του χρόνου  $T_B$  ως προς τη θερμική σταθερά  $T_W$ .

$$T_B < 2T_W$$

$$T_p > 3T_{WSt}$$

όπου  $T_{WSt}$  είναι η θερμική σταθερά.



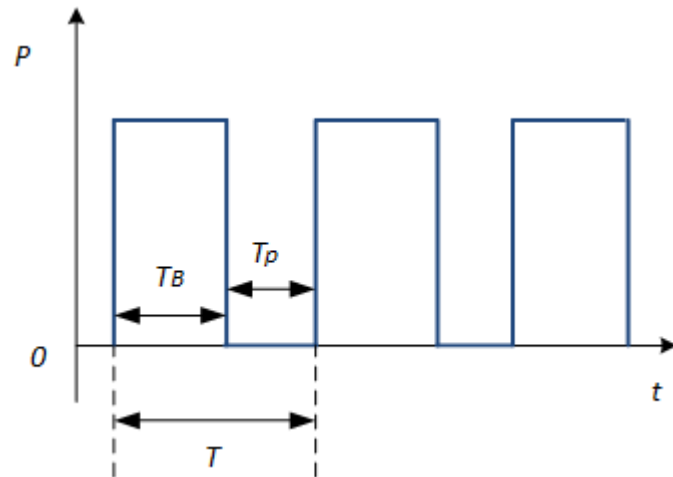
## Θέρμανση κατά τη βραχεία λειτουργία (2/2)

□ Ισχύει:

$$q_W = \frac{1}{1 - e^{-\frac{T_B}{T_W}}}$$

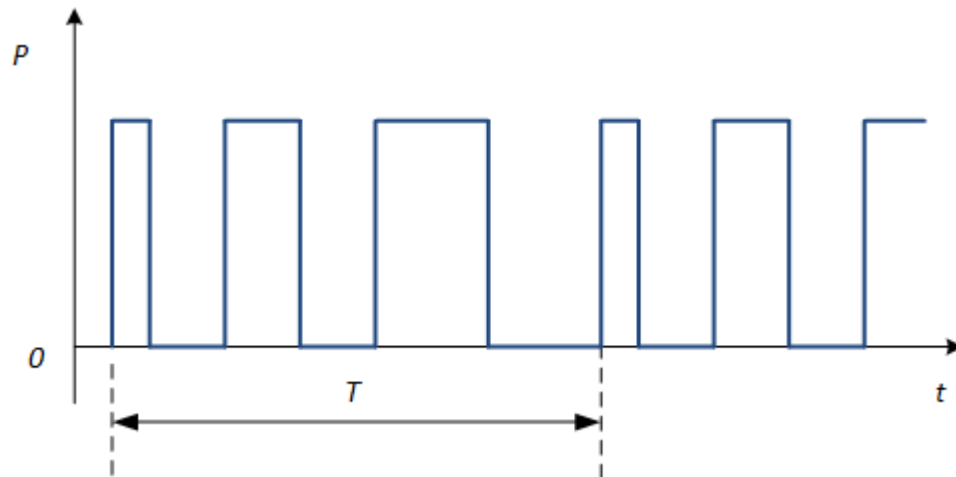


## Θέρμανση κατά την περιοδική λειτουργία (1/2)



- Η βραχεία λειτουργία ορίζεται από τη σχέση του χρόνου  $T_B$  ως προς τη θερμική σταθερά  $T_W$ :

$$T_P < 3T_W$$



## Θέρμανση κατά την περιοδική λειτουργία (2/2)

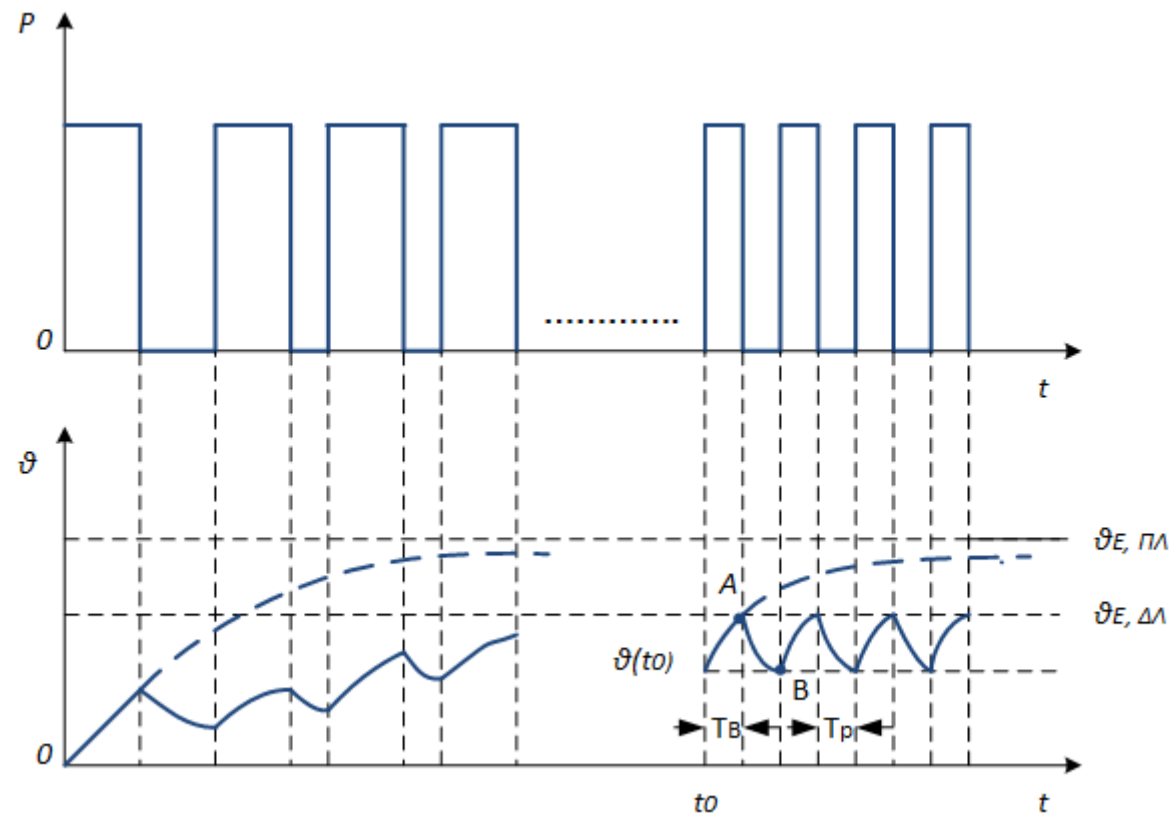
□ Ισχύει:

$$q_w = \frac{1}{1 - e^{\left(-\frac{T_B}{T_W} - \frac{T_P}{T_W St}\right)}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\frac{T_B}{T_W}}}$$

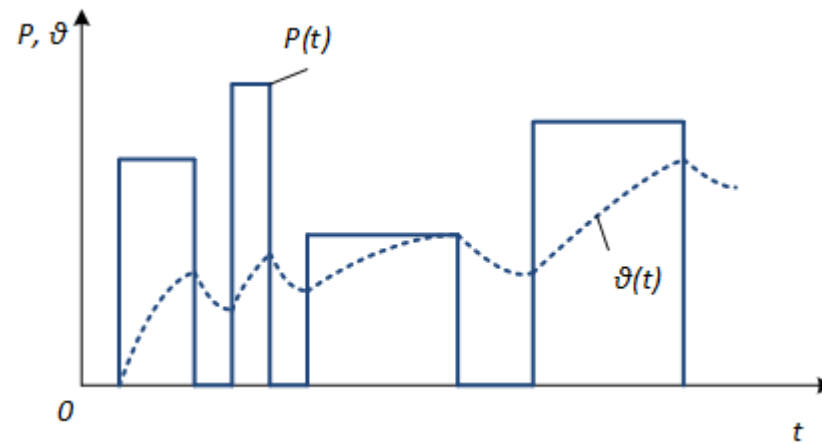




# Χρονική συνάρτηση της θερμοκρασίας κατά την περιοδική φόρτιση

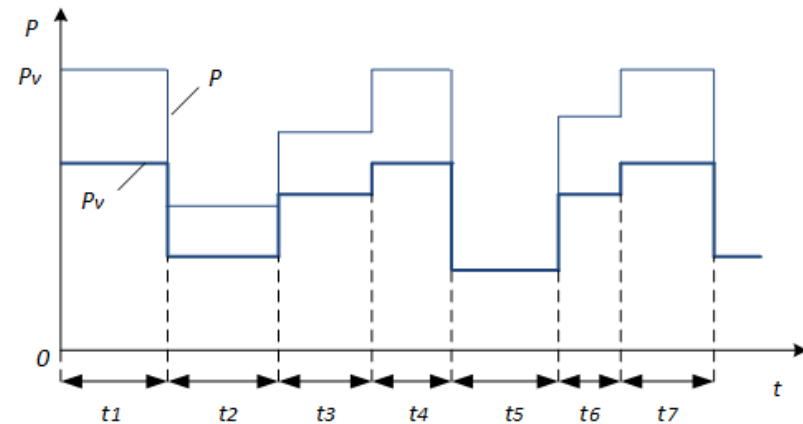
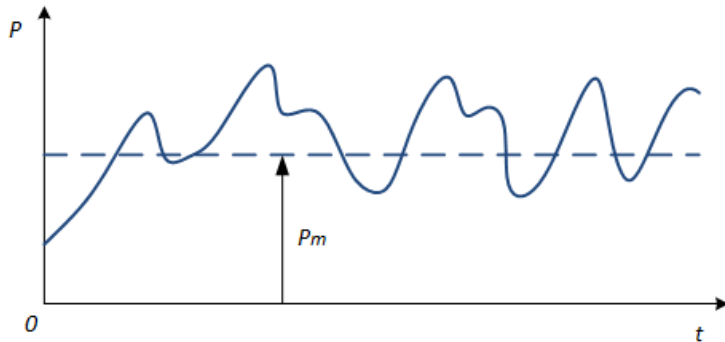


## Σχεδιασμός της $\theta(t)$ για τη μη περιοδική φόρτιση



# Μέθοδος των μέσων απωλειών

- ❑ Χωρίζουμε τη διάρκεια λειτουργίας σε μικρά χρονικά διαστήματα.
- ❑ Υπολογίζουμε τη μέση ισχύ απωλειών



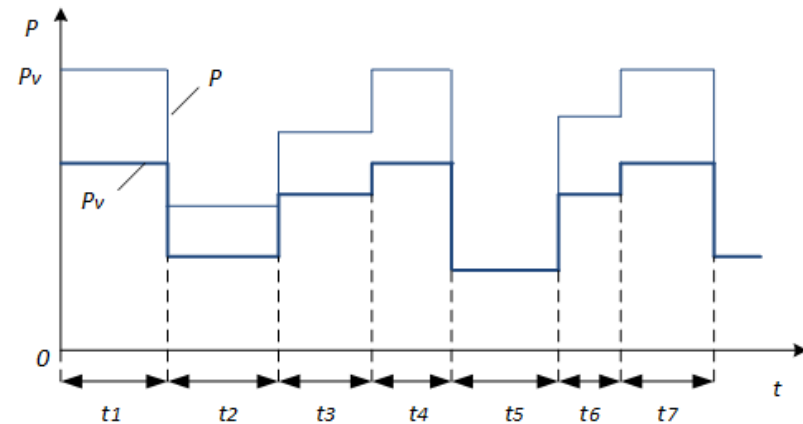
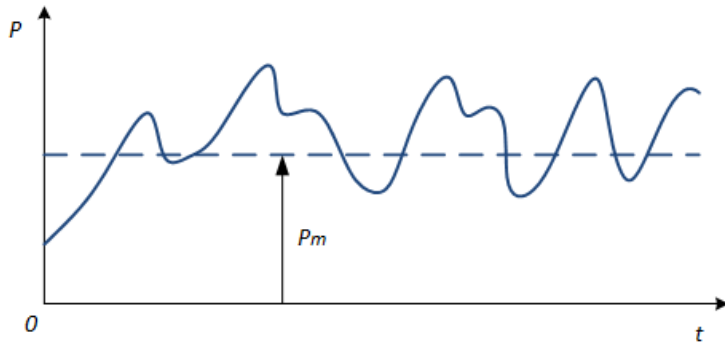
- ❑ Η μέση τιμή των απωλειών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{vm} = \frac{P_{v1}t_1 + P_{v2}t_2 + P_{v3}t_3 + \dots}{t_1 + P_{v2}t_2 + t_3 + \dots} = \frac{\Sigma P_{vi}t_i}{\Sigma t_i}$$



# Μέθοδος των μέσων απωλειών

- ❑ Χωρίζουμε τη διάρκεια λειτουργίας σε μικρά χρονικά διαστήματα.
- ❑ Υπολογίζουμε τη μέση ισχύ απωλειών



- ❑ Η μέση τιμή των απωλειών υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{vm} = \frac{P_{v1}t_1 + P_{v2}t_2 + P_{v3}t_3 + \dots}{t_1 + P_{v2}t_2 + t_3 + \dots} = \frac{\Sigma P_{vi}t_i}{\Sigma t_i}$$



## Μέθοδος του ισοτίμου ρεύματος

- Εναλλακτικά, μπορεί να υπολογιστεί το ισοτίμο ρεύμα από τη σχέση:

$$(I_{\text{ισ}})^2 = \frac{(I_1)^2 t_1 + (I_2)^2 t_2 + (I_3)^2 t_3 + \dots}{t_1 + P_{v2} t_2 + t_3 + \dots}$$



## Περιοδική λειτουργία με μεγάλη συχνότητα (1/3)

- Στη λειτουργία με μεγάλη συχνότητα, το σημαντικότερο ποσοστό της θερμότητας προέρχεται από τη μεταβατική λειτουργία.
- Ως μέγεθος αναφοράς για τους υπολογισμούς ορίζεται η συχνότητα εν κενώ  $Z_0$ , η οποία δηλώνει τον αριθμό συνδέσεων και αποσυνδέσεων σε μια ώρα για τις οποίες η μηχανή εξαντλεί τα όρια της θερμικής αντοχής της.



## Περιοδική λειτουργία με μεγάλη συχνότητα (2/3)

□ Η συχνότητα  $Z$  υπό φορτίο διαφέρει από τη  $Z_0$  εφόσον:

➤ Υπάρχει στο σύστημα επιπρόσθετη ροπή αδράνειας.

$$K_G = \frac{J_{\text{κινητήρα}}}{J_{\text{κινητήρα}} + j_{\text{φορτίου}}} = \frac{Z}{Z_0}$$

➤ Η σύνδεση και αποσύνδεση γίνονται με διαφορετικό τρόπο απ' ό,τι ορίζεται κατά τον ορισμό του  $Z_0$ .

➤ Όταν η μηχανή φορτίζεται κατά την επιτάχυνση.

$$K_m = 1 - \frac{M_L}{M_{\text{mean}}} = \frac{Z}{Z_0}$$



## Περιοδική λειτουργία με μεγάλη συχνότητα (3/3)

- Η συχνότητα  $Z$  υπό φορτίο διαφέρει από τη  $Z_0$  εφόσον:
  - Όταν η μηχανή φορτίζεται κατά τη διάρκεια επιτάχυνσης-επιβράδυνσης-αντιστροφής.

$$K_m = 1 - \left( \frac{P}{P_N} \right)^2 = \frac{Z}{Z_0}$$





# Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Πατρών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



# Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **1.00**.



# Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, Επαμεινώνδας Μητρονίκας 2014.  
Επαμεινώνδας Μητρονίκας. «Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα». Έκδοση: 1.0.  
Πάτρα 2014.

Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:  
<https://eclass.upatras.gr/courses/EE747/>.



# Βιβλιογραφία

- [1]. Αθανασίου Ν. Σαφάκα, «Ηλεκτρικά Κινητήρια Συστήματα», Εκδόσεις Πανεπιστημίου Πατρών, Πάτρα 2013.

