



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ενότητα: Άσκηση 4 “Συμπεριφορά σύγχρονου κινητήρα υπό φορτίο”

Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος, Παναγής Βοβός

Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά **ΠΠ**
μαθήματα

Περιεχόμενα

1. Σκοπός	3
2. Μηχανισμός ροπής – γωνίας ισχύος σε σύγχρονη μηχανή	3
3. Επίδραση μιας γραμμής μεταφοράς στην συμπεριφορά ενός σύγχρονου κινητήρα.....	5
4. Χρησιμοποιούμενα όργανα	7
5. Πειραματικό μέρος.....	7
6. Σημειώματα.....	9
6.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου	9
6.2 Σημείωμα Αναφοράς.....	9
6.3 Σημείωμα Αδειοδότησης.....	9
6.4 Διατήρηση Σημειωμάτων	10
7. Χρηματοδότηση	10

1. Σκοπός

Στην εργαστηριακή αυτή άσκηση μελετάται η συμπεριφορά ενός σύγχρονου κινητήρα που λειτουργεί υπό φορτίο. Πιο συγκεκριμένα παρατηρείται η μεταβολή της γωνίας ισχύος καθώς μεταβάλλεται το φορτίο, καθορίζεται το όριο φόρτισης του κινητήρα και διερευνάται η επίδραση ρεύματος πεδίου στην ικανότητα φόρτισης του κινητήρα.

2. Μηχανισμός ροπής – γωνίας ισχύος σε σύγχρονη μηχανή

Μια σύγχρονη μηχανή προτού συνδεθεί σε ένα μεγάλο δίκτυο πρέπει προηγουμένως να “συγχρονισθεί”. Τη στιγμή, δηλαδή, που θα κλείσει ο διακόπτης για να συνδεθεί η μηχανή στο δίκτυο πρέπει οι τάσεις μηχανής και δικτύου να ικανοποιούν τις εξής συνθήκες:

1. Να έχουν την ίδια συχνότητα
2. Η φασική ακολουθία να είναι η ίδια
3. Τα μέτρα τους να είναι τα ίδια
4. Να έχουν την ίδια φάση

Όταν η σύγχρονη μηχανή συγχρονισθεί με ένα μεγάλο δίκτυο και συνδεθεί σ' αυτό, μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν γεννήτρια είτε σαν κινητήρας. Αν εφαρμόσουμε μια μηχανική ροπή που τείνει να επιταχύνει τη μηχανή, τότε έχουμε λειτουργία σα γεννήτρια. Αν, αντίθετα, εφαρμόσουμε μια ροπή επιβράδυνσης, τότε εξαναγκάζουμε τη μηχανή να λειτουργήσει σαν κινητήρας. Ανεξάρτητα από τον τρόπο λειτουργίας της μηχανής, πάντως, μετά τη σύνδεσή της στο δίκτυο αναπτύσσονται σε εσωτερικό της ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που τείνουν να κρατήσουν σταθερή την ταχύτητά της. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω ενός αυτόματου μηχανισμού που εξασφαλίζει ισοζύγιο μεταξύ των ροπών εισόδου τ_{in} και εξόδου τ_{out} της μηχανής. Αν αμελήσουμε τις απώλειες, το ισοζύγιο αυτό εκφράζεται από τη σχέση:

$$\tau_{in} = \tau_{out} = \frac{P}{\omega_{mech}} \quad (4.1)$$

όπου P είναι η πραγματική ισχύς που η μηχανή αποδίδει (όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια) ή δέχεται (όταν λειτουργεί σαν κινητήρας).

Και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας της μηχανής, η ισχύς P δίδεται από τη σχέση:

$$P = \frac{E_1 E_0}{X} \sin \theta \quad (4.2)$$

όπου

E_1 : η τάση του ζυγού στον οποίο συνδέεται η μηχανή

E_0 : η τάση που επάγεται στο στάτη λόγω της ροής του πεδίου

X : η σύγχρονη αντίδραση της μηχανής

θ : η γωνία ισχύος του δρομέα· η γωνία, δηλαδή, προπορείας ή βραδυπορείας που εμφανίζει ο δρομέας ως προς το ηλεκτρικό δίκτυο, όπως με ένα στροβοσκόπιο μπορούμε εύκολα να δούμε.

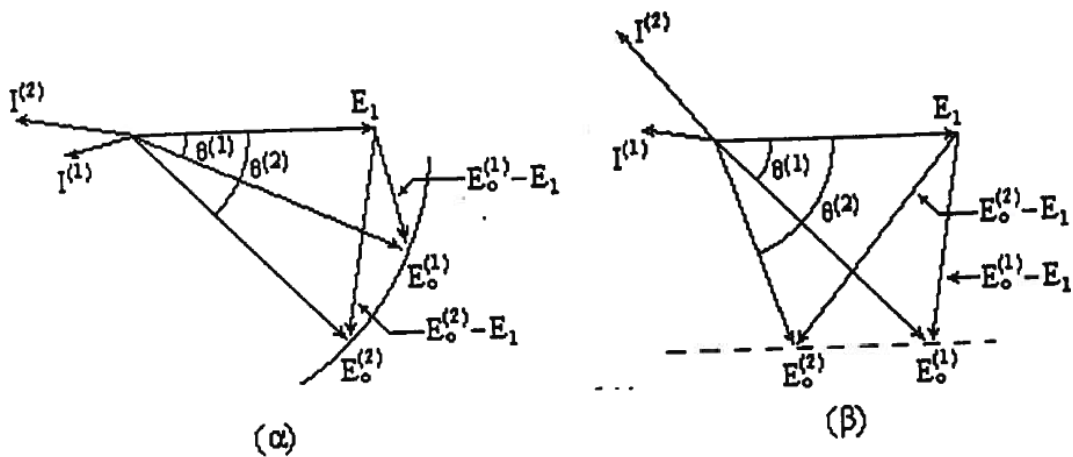
Να σημειωθεί ότι θετικό P , που υποδηλώνει λειτουργία γεννήτριας, λαμβάνεται για $\theta > 0$, δηλαδή όταν η E_0 προηγείται της E_1 , ενώ αρνητικό P , που αντιστοιχεί σε λειτουργία κινητήρα, λαμβάνεται για $\theta < 0$, δηλαδή όταν η E_0 έπεται της E_1 .

Αν για οποιονδήποτε λόγο το ισοζύγιο ροπών, που εξασφαλίζει σταθερή ταχύτητα της μηχανής, διαταραχθεί (λόγω μεταβολής της ροπής εισόδου τ_{in} για λειτουργία γεννήτριας, ή λόγω μεταβολής της ροπής εξόδου τ_{out} για λειτουργία κινητήρα), τότε η γωνία ισχύος θ του δρομέα μεταβάλλεται προς τη σωστή κατεύθυνση προκαλώντας αντίστοιχη μεταβολή στην πραγματική ισχύ P ώστε το διαταραχθέν ισοζύγιο ροπών να αποκατασταθεί. Η νέα τιμή της γωνίας θ αντιστοιχεί ακριβώς στην ισχύ που απαιτείται ώστε να ισχύει και πάλι η σχέση (4.1).

Αν η ισχύς που απαιτείται για να αποκατασταθεί το διαταραχθέν ισοζύγιο ροπής εισόδου-εξόδου είναι μεγαλύτερη από τη μέγιστη ισχύ $\frac{E_1 E_0}{X}$ που μπορεί η μηχανή να διακινήσει και η οποία λαμβάνεται για $\theta = 90^\circ$, τότε η μηχανή “πηδά πόλους” και οδηγείται σε **αποσυγχρονισμό**.

Κατά τη λειτουργία της μηχανής ως κινητήρα και με σταθερό το ρεύμα διέγερσης (οπότε η E_0 παραμένει σταθερή), αύξηση του μηχανικού φορτίου προκαλεί αύξηση της γωνίας θ . Αυτό συμβαίνει διότι η αυξημένη ροπή φορτίου τείνει να επιβραδύνει τη μηχανή γεγονός του προκαλεί καθυστέρηση του άξονα των πόλων του δρομέα ως προς το στρεφόμενο πεδίο του στάτη, δηλαδή μια φασική μετατόπιση της E_0 ως προς την E_1 . Αυτή η μετατόπιση του άξονα των πόλων είναι δυνατόν να παρατηρηθεί με ένα στροβοσκόπιο. Για μηχανή χωρίς έκτυπους πόλους και μηδενική αντίσταση τυμπάνου, το διανυσματικό διάγραμμα που ισχύει για την περίπτωση αυτή φαίνεται στο **Σχ. 4.1(α)**. Το διάνυσμα E_0 τερματίζει πάντοτε σε περιφέρεια σταθερής ακτίνας επειδή το μέτρο του είναι σταθερό.

Από τη σχέση (4.2) μπορούμε να δούμε ότι για δεδομένη ισχύ P και τάση ζυγού E_1 , η γωνία θ θα αυξηθεί αν μειωθεί η E_0 , δηλαδή αν μειωθεί το ρεύμα διέγερσης. Μια σημαντική, συνεπώς, μείωση του ρεύματος διέγερσης μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση της γωνίας θ πέραν των 90° με αποτέλεσμα τον αποσυγχρονισμό του κινητήρα. Το διανυσματικό διάγραμμα που ισχύει για την περίπτωση αυτή φαίνεται στο **Σχ. 4.1(β)**. Το διάνυσμα E_0 τερματίζει πάντοτε στη διακεκομμένη γραμμή που είναι παράλληλη στο διάνυσμα E_1 επειδή στην περίπτωση αυτή το γινόμενο $E_0 \sin \theta$, που εξασφαλίζει σταθερή ισχύ P , παραμένει σταθερό.



Σχήμα 4.1 Διανυσματικά διαγράμματα σύγχρονου κινητήρα (α) λειτουργία με σταθερό ρεύμα διέγερσης (β) λειτουργία με μεταβαλλόμενο ρεύμα διέγερσης

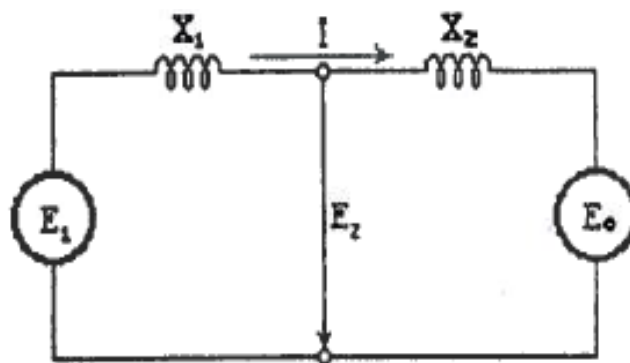
3. Επίδραση μιας γραμμής μεταφοράς στην συμπεριφορά ενός σύγχρονου κινητήρα

Στο **Σχ. 4.2** φαίνεται ένα σύστημα που αποτελείται από μια γραμμή μεταφοράς με αντίδραση X_1 στα άκρα της οποίας συνδέεται ένας σύγχρονος κινητήρας με αντίδραση X_2 και επαγόμενη τάση E_0 . Η ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί από την πηγή E_1 στον σύγχρονο κινητήρα δίδεται από τη σχέση:

$$P = \frac{E_1 E_0}{X_1 + X_2} \sin \theta \tag{4.3}$$

όπου θ η φασική γωνία μεταξύ E_1 και E_0 . Η μέγιστη ισχύς που μπορεί να μεταφερθεί προκύπτει για $\theta = 90^\circ$ και είναι:

$$P_m = \frac{E_1 E_0}{X_1 + X_2}$$



Σχήμα 4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα συνδεδεμένου στα άκρα γραμμής μεταφοράς

Η ισχύς που παρέχεται στον κινητήρα δίδεται από τη σχέση:

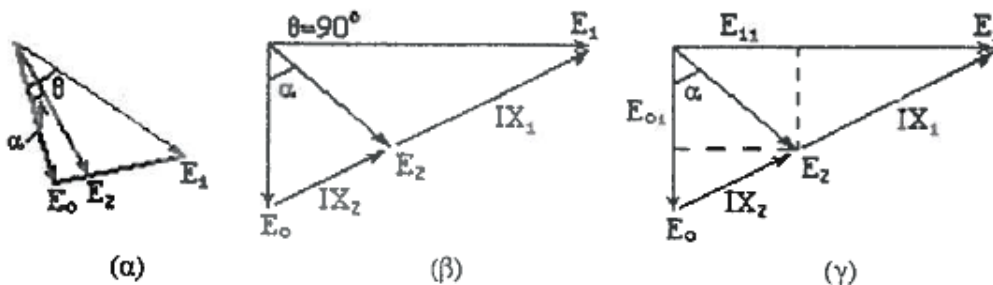
$$P = \frac{E_2 E_0}{X_2} \sin \alpha \quad (4.4)$$

Όπου α η γωνία μεταξύ της E_0 και της τερματικής τάσης E_2 .

Επειδή όπως φαίνεται στο **Σχ. 4.3(α)**, η τάση E_2 πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα στις τάσεις E_1 και E_0 , είναι προφανές ότι όταν μεταφέρεται μέγιστη ισχύς στον κινητήρα, η γωνία α είναι μικρότερη από 90° (**Σχ. 4.3(β)**). Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας οδηγείται σε αποσυγχρονισμό προτού η γωνία γίνει 90° . Θα ήταν δυνατόν να μεταφερθεί μέγιστη ισχύς στον κινητήρα υπό γωνία $\alpha = 90^\circ$ μόνον στην περίπτωση που οι τάσεις E_0 και E_2 ήταν σταθερές. Όταν, όμως, υπάρχει γραμμή μεταφοράς, η τερματική τάση E_2 δεν είναι σταθερή, αλλά εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίον ο κινητήρας απορροφά μέγιστη ισχύ προτού η γωνία α φθάσει τις 90° .

Η τιμή της γωνίας α για την οποία η ισχύς που μεταφέρεται στον κινητήρα γίνεται μέγιστη, προκύπτει, όπως φαίνεται στο **Σχ. 4.3(γ)**, από τη σχέση:

$$\tan \alpha_{max} = \frac{E_{11}}{E_{01}}$$



Σχήμα 4.3 Διανυσματικό διάγραμμα τάσεων

Από το ίδιο σχήμα έχουμε ότι:

$$\frac{E_{11}}{E_{01}} = \frac{IX_2}{I(X_1+X_2)} = \frac{X_2}{X_1+X_2}$$

$$\frac{E_{01}}{E_0} = \frac{IX_2}{I(X_1+X_2)} = \frac{X_2}{X_1+X_2}$$

οπότε

$$\tan a_{max} = \frac{E_1 X_2}{X_1 + X_2} * \frac{X_1 + X_2}{E_0 X_1} = \frac{E_1}{E_0} * \frac{X_2}{X_1} \quad (4.5)$$

Στην περίπτωση, για παράδειγμα, που $X_1 = X_2$ και $E_1 = E_2$, $\tan a_{max} = 1$ και $a = 45^\circ$. Ο κινητήρας, δηλαδή, απορροφά μέγιστη ισχύ για $a = 45^\circ$.

4. Χρησιμοποιούμενα όργανα

1. Τροφοδοτικό ισχύος
2. Κινητήρας/ γεννήτρια συνεχούς ρεύματος
3. Σύγχρονος τριφασικός κινητήρας/γεννήτρια
4. Τριφασική γραμμή μεταφοράς
5. Όργανα μέτρησης AC και DC ρευμάτων και τάσεων
6. Όργανο μέτρησης τριφασικής πραγματικής και αέργου ισχύος
7. Όργανο μέτρησης γωνίας ροπής
8. Στοιχείο ωμικών αντιστάσεων
9. Ιμάντας μετάδοσης κίνησης
10. Στροβοσκόπιο

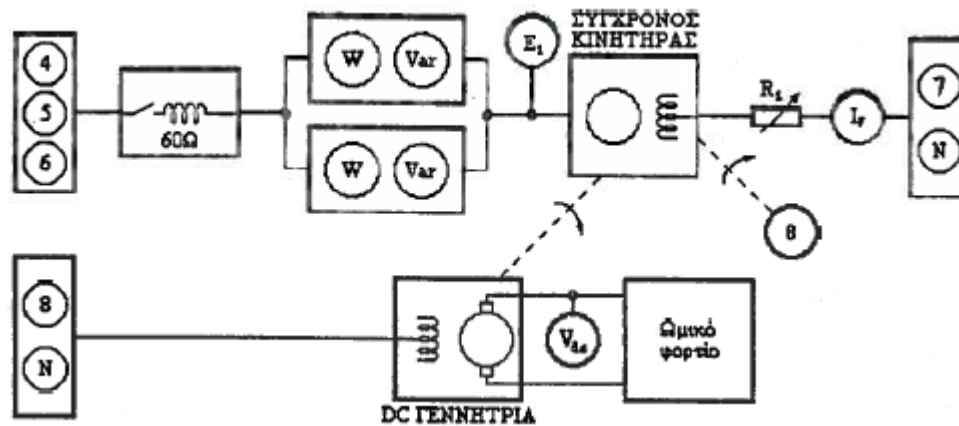
5. Πειραματικό μέρος

Π4.1 Να κατασκευάσετε το κύκλωμα του **Σχ. 4.4** συνδέοντας στον άξονα του σύγχρονου κινητήρα μια γεννήτρια συνεχούς και ένα όργανο μέτρησης ροπής. Για να υπάρχει ανεξαρτησία μετρήσεων, οι διεγέρσεις των δύο μηχανών να ληφθούν από διαφορετικά τροφοδοτικά.

Τροφοδοτείστε το στάτη του σύγχρονου κινητήρα με ισχύ και όταν ο κινητήρας αποκτήσει την τελική του ταχύτητα τροφοδοτείστε το τύλιγμα πεδίου με συνεχές ρεύμα. Ρυθμίστε το ρεύμα διέγερσης ώστε η άεργος ισχύς που απορροφά ο κινητήρας να είναι μηδέν. Υπό τις συνθήκες αυτές η επαγόμενη τάση E_0 γίνεται ίση με την εφαρμοζόμενη τάση $E_1 = 200 V$. Χρησιμοποιώντας το στροβοσκόπιο μηδενίστε τη συσκευή που μετρά τη γωνία του δρομέα.

Εισάγοντας συνεχές ρεύμα στο πεδίο της γεννήτριας συνεχούς που χρησιμοποιείται σαν φορτίο του κινητήρα, φορτίστε βαθμιαία τον κινητήρα μέχρι που να αποσυγχρονισθεί. Σημειώστε σαν συνάρτηση της γωνίας θ (ανά 10°) τις τιμές E_1 ,

W_1 , VAR_1 , I_F και υπολογίστε την E_0 . Σαν W_1 και VAR_1 να λάβετε το άθροισμα των ενδείξεων των δύο οργάνων μέτρησης ισχύος.



Σχήμα 4.4

Π4.2 Λειτουργίστε το κύκλωμα του προηγούμενου πειράματος με $E_1 = E_0 = 200\text{ V}$ και ελέγχοντας το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας συνεχούς, ρυθμίστε το φορτίο έτσι ώστε η γωνία του δρομέα να είναι 20° . Μειώστε βαθμιαία την E_1 και παρατηρείστε την φασική μετατόπιση του άξονα των πόλων του σύγχρονου κινητήρα. Σε ποια γωνία και για ποια τιμή της τάσης E_1 ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται;

Π4.3 Λειτουργίστε και πάλι το κύκλωμα του Σχ. 4.4 με $E_1 = E_0 = 200\text{ V}$ και γωνία δρομέα 20° , όπως στο πείραμα Π4.2. Μειώστε βαθμιαία το ρεύμα διέγερσης του σύγχρονου κινητήρα. Σε ποια γωνία και για ποια τιμή του ρεύματος διέγερσης ο κινητήρας αποσυγχρονίζεται;

Π4.4 Αναφερόμενοι και πάλι στου κύκλωμα του Σχ. 4.4, να λειτουργήσετε τον σύγχρονο κινητήρα αρχικά χωρίς φορτίο (δηλαδή χωρίς διέγερση στη γεννήτρια συνεχούς) και εφαρμόζοντας τάση $E_1 = 150\text{ V}$ ρυθμίστε το ρεύμα διέγερσης του κινητήρα ώστε η άεργος ισχύς που απορροφά να είναι μηδέν. Υπό τις συνθήκες αυτές η επαγόμενη τάση E_0 γίνεται $E_0 = 150\text{ V}$.

Κρατώντας το ρεύμα πεδίου του κινητήρα σταθερό, θέστε $E_1 = 200\text{ V}$, μηδενίστε τη γωνία του δρομέα και φορτίζοντας βαθμιαία τον κινητήρα μέχρι που αυτός να αποσυγχρονισθεί μετρείστε σα συνάρτηση της γωνίας θ (ανά 10°) τα μεγέθη E_1 , W_1 , VAR_1 και I_F .

Π4.5 Λειτουργίστε το κύκλωμα του Σχ. 4.4 με $E_1 = E_0 = 200\text{ V}$ και αυξήστε το φορτίο του κινητήρα, ρυθμίζοντας, ρυθμίζοντας το ρεύμα διέγερσης της γεννήτριας

συνεχούς, μέχρι που αυτός να αποσυγχρονισθεί. Σημειώστε την πραγματική ισχύ W_1 και τη γωνία θ του δρομέα ακριβώς πριν τον αποσυγχρονισμό.

Π4.6 Να εισάγετε μια τριφασική γραμμή μεταφοράς αντίδρασης 120Ω , σε σειρά με το σύγχρονο κινητήρα παρεμβάλλοντας την ανάμεσα στην πηγή και στα όργανα μέτρησης ισχύος. Θέστε και πάλι $E_1 = E_0 = 200 V$ και αυξήστε το φορτίο του κινητήρα μέχρι που αυτός να αποσυγχρονισθεί. Ποια η τιμή της ισχύος W_1 και της γωνίας θ τη στιγμή του αποσυγχρονισμού;

6. Σημειώματα

6.1 Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων/Εργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση **X.YZ**.

6.2 Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιον Πατρών, Νικόλαος Βοβός, Γαβριήλ Γιαννακόπουλος «Εργαστήριο Ελέγχου και Ευστάθειας Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας. Άσκηση 4». Έκδοση: 1.0. Πάτρα 2014. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: σύνδεσμο μαθήματος.

6.3 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.

6.4 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.

7. Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη 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.

