



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΝΑΥΤΙΚΗΣ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΑΣ

Ανάπτυξη Διάταξης Μέτρησης Ροπής σε Στρεφόμενες Ηλεκτρικές Μηχανές

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΥ ΜΑΥΡΑΚΗ

Επιβλέπων :
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.



Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2015.

(Υπογραφή)

.....
Ιωάννης Προυσαλίδης
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Χρήστος Παπαδόπουλος
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....
Αντώνιος Κλαδάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2015

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό οφείλω να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν για την πραγματοποίηση της παρούσας εργασίας. Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Αν. Καθηγητή Ιωάννη Προυσαλίδη που με εμπιστεύτηκε με την ανάθεση του θέματος αυτού και την ευκαιρία να το εκπονήσω σε πραγματικές πειραματικές εφαρμογές. Ήταν πάντα διαθέσιμος να προσφέρει τις γνώσεις και την εμπειρία του πάνω στις ηλεκτρικές μηχανές καθώς και να διευκολύνει τη διεξαγωγή της εργασίας με οποιονδήποτε δυνατό τρόπο. Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον Επ. Καθηγητή Χρήστο Παπαδόπουλο για την προσφορά των γνώσεων του κατά την επιλογή του κατάλληλου ροπομέτρου, τη διευκόλυνση που προσέφερε κατά την αγορά του εξοπλισμού και τη βοήθειά του κατά την επεξεργασία των μετρήσεων. Ευχαριστίες οφείλονται επίσης στον Καθηγητή κ. Αντώνιο Κλαδά για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή καθώς και για την παραχώρηση του εξοπλισμού και της διάταξης της δοκιμής στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Οφείλω επίσης να ευχαριστήσω στους υποψήφιους Διδάκτορες της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών κ.κ. Δημοσθένη Σπαθή και Ελευθέριο Κουκουλόπουλο για τη βοήθεια τους κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων καθώς και τις διευκολύνσεις που προσέφεραν ώστε να πραγματοποιηθούν μετρήσεις σε εργαστήρια εκτός της σχολής Ναυπηγών Μ. Μ.

Σε ό,τι αφορά τη διεξαγωγή των μετρήσεων, θα ήθελα να ευχαριστήσω των υποψήφιο διδάκτορα κ. Χρήστο Κρασόπουλο καθώς και τον κ. Παναγιώτη Ζάννη για τη βοήθειά τους κατά τη δοκιμή στο εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών. Επίσης οφείλω να ευχαριστήσω τον Αν. Καθηγητή του Τμήματος Ναυπηγικής και υπεύθυνου του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας του ΤΕΙ Αθηνών, Δρ. Γεώργιο Λιβανό, για την παραχώρηση του εξοπλισμού και βοήθεια του κατά τη διεξαγωγή των μετρήσεων στο ΤΕΙ Αθηνών.

Εκτός ακαδημαϊκής κοινότητας, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Παναγιώτη Λεοντή που με έφερε σε επαφή με τη μέτρηση ροπής σε πραγματικές συνθήκες καθώς και όλο το προσωπικό της Intership Maritime Inc. για τη στήριξή τους σε αυτή την προσπάθεια.

Τέλος, δεν μπορώ να παραλείψω τους σημαντικότερους ανθρώπους στη ζωή μου, τους γονείς μου και τον αδερφό μου. Οφείλω λοιπόν να ευχαριστήσω θερμά τον πατέρα μου, Γιάννη, τη μητέρα μου, Θεμελία και τον αδερφό μου, Νικόλα για την υπομονή που επέδειξαν και τη βοήθεια που προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Οι ηλεκτρομηχανές παίζουν ένα σημαντικό ρόλο στη σύγχρονη εποχή ως μέσα μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίστροφο, κερδίζοντας όλο και περισσότερο έδαφος στη Ναυτιλία ως κύρια μέσα πρόωσης καθώς και σε άλλου τομείς του τομέα των μεταφορών. Η γνώση της ροπής στην έξοδό τους συνεπώς, είναι πολύ σημαντική για την πλήρη κατανόηση των δυνατοτήτων τους, της παραγόμενης ισχύος τους καθώς και της παρακολούθησης της λειτουργίας τους κατά τη διάρκεια της ζωής τους.

Στην παρούσα εργασία, γίνεται αρχικά μια σύντομη αναφορά στους διάφορους τύπους ηλεκτρομηχανών. Ακολούθως αναφέρονται διάφορες μέθοδοι μέτρησης ροπής καθώς και αναλυτικά η θεωρία των μεθόδων μέτρησης ροπής με χρήση επιμηκυνσιόμετρων τύπου ηλεκτρικής αντίστασης (Resistive Strain Gauges). Τα δύο παραπάνω τμήματα αποτελούν το θεωρητικό κομμάτι της εργασίας αυτής.

Έπειτα, και σε συμφωνία πάντα με τον σκοπό που έχει τεθεί, γίνεται ο σχεδιασμός της πειραματικής διαδικασίας. Αυτό περιλαμβάνει, αναλυτική κατηγοριοποίηση των σημείων που είναι προς εξέταση, ορισμό των προτεινόμενων διατάξεων για την εξέταση των επιθυμητών σημείων και τέλος επιλογή του εξοπλισμού που είναι απαραίτητος για αυτές τις εφαρμογές.

Η εργασία συνεχίζει με την εκτέλεση των πειραμάτων. Την ορθή εφαρμογή του εξοπλισμού που επιλέχθηκε, δηλαδή, την περιγραφή της διαδικασίας, τη λήψη και παρουσίαση των μετρήσεων καθώς και μια σύντομη επεξεργασία των αποτελεσμάτων ακολουθούμενη από μια σύντομη περιγραφή των ξεχωριστών συμπερασμάτων για κάθε μέτρηση ξεχωριστά.

Τέλος, τα μεμονωμένα συμπεράσματα συγκεντρώνονται ώστε να γίνει η λήψη του τελικού συμπεράσματος και να κριθεί η εργασία ως προς την εκπλήρωση του σκοπού που τέθηκε στην αρχή της καθώς και της καταλληλότητας του ροπομέτρου για εφαρμογές σε ηλεκτρομηχανές.

Λέξεις κλειδιά: Μέτρηση Ροπής, Ηλεκτρομηχανή, Επιμηκυνσιόμετρο, Τηλεμετρία, Γέφυρα Wheatstone,

Abstract

Electrical engines play an important role in our age as a means of conversion of electrical energy into mechanical energy and vice versa, gaining ground in shipping as a primary means of propulsion as well as in other means of transportation. The knowledge of their torque output of an engine therefore, is very important for a full understanding of their abilities, their power output, and the monitoring of their operation during their lifetime.

This thesis starts by a brief reference to the various types of electrical engines. The various torque measuring methods follow as well as the theory of torque measurement methods using Resistive Strain Gauges. These two parts are the theoretical part of this work.

After that, and always in agreement with the objective that has been set in the beginning of the thesis, is described the design of the test procedure. This includes a detailed classification of points to be examined, the definition of the essential equipment for the conduct of the experiments as well as the selection of equipment necessary for these applications.

The thesis continues with the description of the experiments. The correct application of the equipment chosen, the description of the process, acquisition and presentation of data and a brief analysis of the data received followed by a brief description of the individual findings for each measurement separately.

Finally, the individual conclusions are gathered so as to conclude towards the final conclusion and to proceed to work towards the fulfillment of the objective set at the beginning, as well as the suitability of torque meter for applications in electrical engines.

Keywords: *Torque Measurement, Electrical Engine, Strain Gauge, Strain Gage, Telemetry, Wheatstone Bridge,*

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract	3
Περιεχόμενα	4
1. Εισαγωγή	6
1.2 Σκοπός- Αντικείμενο Διπλωματικής	7
2. Θεωρητικό Υπόβαθρο-Ηλεκτρομηχανών	8
2.1 Εισαγωγή.....	8
2.2 Κατασκευαστική δομή ηλεκτρικής μηχανής.	8
2.3 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας κατά τη λειτουργία κινητήρα	8
2.4 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας κατά την λειτουργία γεννήτριας.....	9
2.5 Κατάταξη στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών	9
2.5.1 Σύγχρονες μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος	9
2.5.2 Ασύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος	10
2.5.2 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος	12
3. Θεωρητικό Υπόβαθρο- Μέτρηση Ροπής	19
3.1 Εισαγωγή- Γενικά για τη Ροπή	19
3.2 Ιστορικές μέθοδοι μέτρησης ροπής	19
3.3 Μέτρηση Ροπής με χρήση Strain Gauges τύπου ηλεκτρικής αντίστασης.....	23
3.3.1 Νόμος του Hooke για υπολογισμό τάσης με μέτρηση ορθών παραμορφώσεων	23
3.3.2 Κύκλος του Mohr	24
3.3.4 Το σύστημα μέτρησης	25
3.3.5 Η γέφυρα Wheatstone	26
3.3.6 Διατάξεις S.G. για μέτρηση διαφόρων καταπονήσεων	29
3.3.6 Σφάλματα κατά τις μετρήσεις με S.G.	34
4. Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας	38
4.1 Εισαγωγή.....	38
4.2 Διαφορές μεταξύ Ηλεκτρομηχανών και Μηχανών Εσωτερικής Καύσης με κριτήριο τη ροπή και προτεινόμενες δοκιμές	38
4.3 Ορισμός των πειραμάτων και επιλογή των διατάξεων.....	39
4.4 Επιλογή της Τηλεμετρίας	39
4.4.1 Έρευνα της Τηλεμετρίας	40
4.4.2 Binsfeld Engineering TorqueTrak 10k Torque Telemetry System	43
5. Περιγραφή Πειραμάτων και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων	47
5.1 Εισαγωγή ως προς την εκτέλεση και επεξεργασία των πειραμάτων	47
5.2 Δοκιμή στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της ΣΗΜΜΥ στις 19/10/2015	49
5.2.1 Εισαγωγή	49
5.2.2 Περιγραφή της διάταξης	49
5.2.2 Διαδικασία των μετρήσεων	51
5.2.3 Αποτελέσματα δοκιμών.....	52
5.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα.....	59
5.2.4 Συμπεράσματα	61
5.3 Δοκιμή στο Τμήμα Ναυπηγικής του ΤΕΙ Αθηνών στις 21/10/2015	62
5.3.1 Εισαγωγή	62
5.3.2 Περιγραφή της διάταξης	62
5.3.3 Αποτελέσματα δοκιμών.....	64
5.3.4 Συμπεράσματα	66

5.4 Δοκιμή στο Εργαστήριο Τριβολογίας της Σχολής Ναυπηγών ΜΜ 29/10/2015	67
5.4.1 Εισαγωγή	67
5.4.2 Περιγραφή της διάταξης	67
5.4.3 Διαδικασία των μετρήσεων- Αποτελέσματα	68
5.4.3 Συμπεράσματα	72
6. Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	74
6.1 Συμπεράσματα - Πρακτικές παρατηρήσεις κατά τη μέτρηση ροπής σε ηλεκτρομηχανές.....	74
6.1.1 Εισαγωγή	74
6.1.2 Μικρό μέγεθος άξονα.....	74
6.1.3 Σφηνάυλακας επί άξονα.....	76
6.1.4 Μη-ορθή ευθυγράμμιση Strain Gauge.....	76
6.1.5 Παρατηρήσεις ως προς τη δειγματοληψία	77
6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	77
7. Βιβλιογραφία	79
Παράρτημα Α- Σύγκριση σημείων ενδιαφέροντος ροπομέτρων	80
Παράρτημα Β- Specifications του TorqueTrak 10k	81
Παράρτημα Γ- Ορθή Διαδικασία κόλλησης Strain Gauges	85
Παράρτημα Δ- Data Acquisition.....	89
Παράρτημα Ε- Ορθή Διαδικασία Εγκατάστασης Εξοπλισμού	92

1. Εισαγωγή

Με την ολοένα αυξανόμενη χρήση των ηλεκτρομηχανών ως κύριο μέσο παραγωγής ενέργειας για την κίνηση αυτοκινήτων και πλοίων, καθώς και με την ήδη υπάρχουσα χρήση ηλεκτρομηχανών στη βιομηχανία για διάφορους σκοπούς, η ακριβής μέτρηση της ροπής εξόδου των μηχανών αυτών καθίσταται όλο και πιο επιτακτική. Εξίσου σημαντική είναι και η διαρκής παρακολούθηση των μηχανών αυτών κατά τη διάρκεια της ζωής τους, με σκοπό την συνεχή εκτίμηση της κατάστασής τους, των πτώσεων στην απόδοσή τους και των διορθωτικών μέτρων που πρέπει να επιβληθούν όπου χρειάζονται.

Η ροπή των Ηλεκτρομηχανών, συνήθως αξιολογούνταν μέσω της μέτρησης της τάσης και του ρεύματος τροφοδοσίας διορθώνοντας για τις απώλειες. Όμως, αυτό δεν είναι πάντα δυνατό και είναι πλέον απαραίτητη και η διερεύνηση και άλλων μεθόδων μέτρησης της ροπής εξόδου των ηλεκτρομηχανών. Λόγω της μέχρι τώρα τεράστιας χρήσης των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης ως κύρια μέσα παραγωγής ενέργειας για κίνηση αυτοκινήτων και πλοίων, η μέτρηση της ροπής εξόδου αυτών των κινητήρων έχει ήδη αναπτυχθεί σε σημαντικό επίπεδο. Μη-μόνιμες εφαρμογές που χρησιμοποιούνται για αυτόν το σκοπό, διακρίνονται από υψηλή ακρίβεια, ευκολία στη χρήση και φορητότητα. Κρίνεται λοιπόν άξια διερεύνησης η συμπεριφορά αυτών των «ροπομέτρων» κατά τη μέτρηση ροπής εξόδου σε ηλεκτρομηχανές με όλες τις ιδιαιτερότητες που αυτές έχουν, διαφοροποιώντας τις από τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης.

1.2 Σκοπός- Αντικείμενο Διπλωματικής

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διερεύνηση της μέτρησης ροπής με χρήση εμπορικής εφαρμογής σε στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές. Τα σημεία που είναι υπό διερεύνηση είναι:

- Άξονες με επιφανειακή ανωμαλία (σφηνάυλακας)
- Συμπεριφορά τηλεμετρίας υπό υψηλές ταχύτητες περιστροφής
- Μέτρηση ροπής σε άξονες μικρής διαμέτρου
- Σφάλματα λόγω κακής χρήσης-τοποθέτησης εξοπλισμού
- Λήψη- αποθήκευση- επεξεργασία δεδομένων

Η πορεία που ακολούθησε αυτή η Διπλωματική Εργασία ως προς τη διερεύνηση των παραπάνω σημείων, παρουσιάζεται εν συντομία παρακάτω με τη μορφή βημάτων.

1. Συγκέντρωση και ανάλυση διαφορών μεταξύ ηλεκτροκινητήρων και ΜΕΚ. Οι διαφορές αυτές είναι εύκολες ως προς την παρατήρησή τους και συγκεντρώνονται κυρίως στα μεγέθη των κινητήρων, στα μεγέθη των αξόνων, στη μορφή των αξόνων καθώς και στον τρόπο παραγωγής της ισχύος και κατ' επέκταση της ροπής
2. Σχεδίαση κατάλληλων πειραμάτων για διερεύνηση αυτών των διαφορών. Αφότου οι διαφορές αυτές έχουν καταλογοποιηθεί και αναλυθεί, τα πειράματα που θα εκτελεστούν καθώς και οι διατάξεις που θα χρησιμοποιηθούν, είναι εύκολο να επιλεγούν. Αυτό περιλαμβάνει την επιλογή κατάλληλης μεθόδου μέτρησης ροπής, κατάλληλου ροπομέτρου και κατάλληλης διάταξης συλλογής δεδομένων
3. Η εκτέλεση των παραπάνω πειραμάτων, που περιλαμβάνει την ορθή εφαρμογή του εξοπλισμού που επιλέχθηκε, την καλή κατανόηση της θεωρίας που να εξασφαλίζει τη παραπάνω ορθή εφαρμογή και τη σωστή λήψη και αποθήκευση των μετρήσεων, την αποφυγή δηλαδή παρεμβολών, ηλεκτρομαγνητικού θορύβου, κτλ.
4. Το τέταρτο και τελικό βήμα περιλαμβάνει την ορθή επεξεργασία των μετρήσεων με βάση τη θεωρία καθώς και τις ξεχωριστές συνθήκες κατά την εκτέλεση των πειραμάτων. Ακολούθως, βγαίνουν τα κατάλληλα συμπεράσματα ως προς τα πειράματα και τη συμφωνία της θεωρίας με τη μέτρηση.

Μετά από την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, κρίθηκε η όλη διάταξη ως προς την καταλληλότητά της για την εφαρμογή της σε μετρήσεις ροπής ηλεκτρικών μηχανών.

2. Θεωρητικό Υπόβαθρο

Ηλεκτρομηχανών

2.1 Εισαγωγή

Μια στρεφόμενη ηλεκτρική μηχανή είναι μία διάταξη η οποία έχει σκοπό την μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική ή το αντίστροφο. Μία ηλεκτρική μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας όταν απορροφά ηλεκτρική ενέργεια και τη μετατρέπει σε μηχανική, ενώ όταν στρέφεται από άλλη μηχανή (κινητήρα Diesel, αεριοστρόβιλο, υδροστρόβιλο, ατμοστρόβιλο κοκ) ώστε να παράγει ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργεί ως γεννήτρια. Κάθε ηλεκτρική μηχανή που λειτουργεί ως γεννήτρια απορροφώντας μηχανική ενέργεια και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια, μπορεί να λειτουργήσει και σαν κινητήρας εάν τροφοδοτηθεί με ηλεκτρική ενέργεια, παράγοντας μηχανική ενέργεια.

2.2 Κατασκευαστική δομή ηλεκτρικής μηχανής.

Σε μια ηλεκτρική μηχανή διακρίνουμε τα εξής τρία βασικά μέρη:

- i. Το στρεφόμενο μέρος που ονομάζεται δρομέας ή ρότορας
- ii. Το ακίνητο μέρος που ονομάζεται στάτης ή στάτορας
- iii. Τον ενδιάμεσο χώρο αέρα μεταξύ στάτη και δρομέα που ονομάζεται διάκενο.

Για την επίτευξη της κίνησης, το ένα Η/Μ πεδίο οφείλεται σε πηγή (τύλιγμα ή μόνιμο μαγνήτη) εγκατεστημένη στο δρομέα, ενώ το άλλο Η/Μ πεδίο οφείλεται σε πηγή που είναι στο στάτη. Το Η/Μ πεδίο, που προηγείται και προκαλεί την κίνηση (αίτιο), καλείται «Η/Μ διέγερσης» ή «Η/Μ πεδίου» ή απλούστερα «διέγερση» ή «πεδίο». Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο Η/Μ πεδίο που υστερεί ακολουθώντας τη διέγερση (αιτιατό) καλείται «επαγόμενο πεδίο» ή «πεδίο τυμπάνου» ή απλούστερα «επαγωγίμο» ή «τύμπανο». Ο τρόπος περιέλιξης και τοποθέτησης των τυλιγμάτων καθορίζει το είδος και το πλήθος των μαγνητικών πόλων της μηχανής. Σε ορισμένες διαμορφώσεις μηχανής, οι μαγνητικοί πόλοι είναι αρκετά εμφανείς και καλούνται έκτυποι, ενώ σε άλλες διαμορφώσεις δεν είναι, οπότε και ο στάτης ή ο δρομέας καλείται «κυλινδρικός».

2.3 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας κατά τη λειτουργία κινητήρα

Η Αρχή Ηλεκτρομηχανικής Μετατροπής Ενέργειας κατά τη λειτουργία κινητήρα οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης / προσανατολισμού δύο Η/Μ πεδίων που βρίσκονται σε γωνία μεταξύ τους. Για να συντηρηθεί η κίνηση, πρέπει τα δύο πεδία να μην ευθυγραμμίζονται ποτέ, αυτό επιτυγχάνεται με την αλλαγή προσανατολισμού του Η/Μ πεδίου κατά την μηχανική περιστροφή του δρομέα, για εναλλασσόμενο ρεύμα, η ηλεκτρική συχνότητα του ρεύματος είναι συνήθως ίση με τη συχνότητα περιστροφής του δρομέα.

2.4 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας κατά την λειτουργία γεννήτριας.

Κατά τη λειτουργία γεννήτριας, η ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας, βασίζεται στη δύναμη Laplace που ασκείται σε στρεφόμενο αγωγό (που στρέφεται από εξωτερικό φορέα, την κινητήρια μηχανή) εντός ενός χρονο-μεταβλητού Η/Μ πεδίου. Στα άκρα του αγωγού αναπτύσσεται τάση και εάν συνδεθεί καταναλωτής σε αυτά, τότε κυκλοφορεί ηλεκτρικό ρεύμα.

2.5 Κατάταξη στρεφόμενων ηλεκτρικών μηχανών

Οι στρεφόμενες ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες:

- i. Σύγχρονες μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος
- ii. Ασύγχρονες μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος
- iii. Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

2.5.1 Σύγχρονες μηχανές Εναλλασσόμενου Ρεύματος

Η αρχή λειτουργίας της σύγχρονης μηχανής οφείλεται στην προσπάθεια ευθυγράμμισης δύο ηλεκτρομαγνητικών πεδίων, ανεξάρτητων μεταξύ τους, του τυλίγματος διέγερσης, που βρίσκεται συνήθως στο δρομέα και του αντίστοιχου τυλίγματος του επαγωγίμου, που βρίσκεται συνήθως στο στάτη. Το τυλίγμα διέγερσης διαρρέεται συνήθως από Συνεχές Ρεύμα, αλλά λόγω της κίνησης του δρομέα, το προκύπτον Η/Μ πεδίο είναι στρεφόμενο. Στον στάτη βρίσκονται τρία τυλίγματα κατανεμημένα στο χώρο κατά 120° που διαρρέονται από Εναλλασσόμενα Ρεύματα συγκεκριμένης συχνότητας. Η σχέση που συνδέει τις συχνότητες (περιστροφή δρομέα, κίνησης Η/Μ πεδίων, Εναλλασσόμενων Ρευμάτων, κτλ.) είναι:

$$f = \frac{p}{2} \frac{n}{60}$$

Οι χαρακτηριστικές εξισώσεις λειτουργίας μιας σύγχρονης μηχανής ΕΡ είναι για την περίπτωση γεννήτριας και κινητήρα αντίστοιχα:

$$\begin{aligned}\tilde{E}_G &= \tilde{V} + (R_G + jX_G)\tilde{I}_G \\ \tilde{E}_M &= \tilde{V} - (R_M + jX_M)\tilde{I}_M\end{aligned}$$

Με:

\tilde{E} : η ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) της σύγχρονης μηχανής

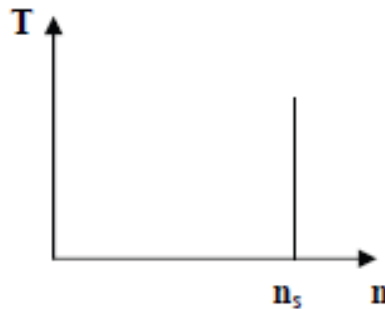
\tilde{V} : η τάση ακροδεκτών της σύγχρονης μηχανής

R_M : η ωμική αντίσταση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης μηχανής

X_M : η επαγωγική αντίδραση τυλίγματος τυμπάνου της σύγχρονης μηχανής

\tilde{I} : το ρεύμα φάσης τυμπάνου της σύγχρονης μηχανής

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη «ροπής - στροφών», που φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, συμπεραίνουμε πως ροπή αναπτύσσεται στο σύγχρονο κινητήρα μόνον σε μία τιμή μηχανικής ταχύτητας περιστροφής, αυτή της «σύγχρονης ταχύτητας», n_s



Εικόνα 2.1- Χαρακτηριστική ροπής/στροφών Σύγχρονης Μηχανής

Αυτό δημιουργεί το εύλογο ερώτημα για τον τρόπο έναρξης λειτουργίας ενός σύγχρονου κινητήρα. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση βοηθητικού κινητήρα ή βοηθητικού κλωβού, που περιστρέφουν το δρομέα έως την επίτευξη της ονομαστικής ταχύτητας περιστροφής κ έπειτα αποσυμπλέκεται.

2.5.2 Ασύγχρονες μηχανές εναλλασσόμενου ρεύματος

Η λειτουργία των ασύγχρονων μηχανών οφείλεται στο φαινόμενο της επαγωγής και μοιάζει με τους μετασχηματιστές. Ως πρωτεύον τύλιγμα (διέγερση) δρα το τύλιγμα του στάτη, ενώ ως δευτερεύον τύλιγμα (επαγωγίμο- τύμπανο) δρα το τύλιγμα του δρομέα, το οποίο είναι βραχυκυκλωμένο. Το ρεύμα του δρομέα κυκλοφορεί λόγω επαγωγής λόγω των ρευμάτων του στάτη, χωρίς ο δρομέας να συνδέεται αγώγιμα με εξωτερικό κύκλωμα. Για να συντηρηθεί η κίνηση, χρειάζεται ο στάτης και ο δρομέας να έχουν στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Για το στάτη, αυτό γίνεται όπως και στη σύγχρονη μηχανή (με τρία τυλίγματα καταναμημένα στο χώρο σε 120° , αλλά και με την τροφοδοσία των τυλιγμάτων με συμμετρικό τριφασικό σύστημα ρευμάτων που καθυστερούν χρονικά μεταξύ τους επίσης κατά 120°). Στο δρομέα ο νόμος της επαγωγής επάγει αυτόματα τριφασικό συμμετρικό σύστημα ρευμάτων.

Αντίθετα από τη σύγχρονη μηχανή, ο δρομέας στην ασύγχρονη μηχανή δεν στρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα αλλά η ταχύτητά του κυμαίνεται σε ένα εύρος τιμών μικρότερων από την σύγχρονη ταχύτητα, με την σχέση μεταξύ των δύο ταχυτήτων να καλείται ολίσθηση και δίνεται από τον τύπο:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} 100\%$$

Με

n_s : τη σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής
 n : την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Στο στάτη, τα ρεύματα μεταβάλλονται με (σύγχρονη) συχνότητα f_s που δίνεται από τη σχέση

$$f_s = \frac{\pi n_s}{2 60}$$

Οι σχέσεις τάσεων είναι για το στάτη και το ρότορα αντίστοιχα για τον ασύγχρονο κινητήρα:

$$\begin{aligned}\tilde{V} &= \tilde{I}_s(R_s + jX_s) + \tilde{V}_{AB} \\ \tilde{V}_{AB} &= \tilde{I}_r \left(\frac{R_r}{s} + jX_s \right)\end{aligned}$$

Η σχέση ρευμάτων είναι:

$$\tilde{I}_s = \frac{\tilde{V}_{AB}}{jX_m} + \frac{\tilde{V}_{AB}}{R_m} + \tilde{I}_r$$

Η ωφέλιμη ισχύς στον άξονα καλείται εσωτερική ισχύς, P_{ε_s} , και βρίσκεται ως:

$$P_{\varepsilon_s} = 3|\tilde{I}_r|^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right)$$

Και μετά από διόρθωση των μηχανικών απωλειών λόγω τριβών και ανεμισμού κατά την περιστροφή του δρομέα, προκύπτει η ωφέλιμη ροπή, T_{em} ως:

$$T_{em} = \frac{P_{\varepsilon_s}}{\omega_m} = \frac{P_{\varepsilon_s}}{2\pi n} = \frac{3|\tilde{I}_r|^2 R_r \left(\frac{1-s}{s} \right)}{2\pi(1-s)n_s} = \frac{3|\tilde{I}_r|^2 \left(\frac{R_r}{s} \right)}{2\pi n_s}$$

Ενώ η απορροφώμενη (ή φαινόμενη) ισχύς εισόδου, δίνεται ως:

$$\tilde{S}_{\varepsilon_{i\sigma}} = \sqrt{3}\tilde{V}\tilde{I}_s^* = P_{\varepsilon_{i\sigma}} + jQ_{\varepsilon_{i\sigma}}$$

Και ο βαθμός απόδοσης:

$$\eta = \frac{P_{\varepsilon_s}}{P_{\varepsilon_{i\sigma}}}$$

Η διαφορά μεταξύ τη ενεργούς ισχύος εισόδου του κινητήρα και της ωφέλιμης ισχύος στο άξονα, είναι οι απώλειες στα τυλίγματα στάτη και δρομέα, οι απώλειες σιδήρου, ανεμισμού κτλ. σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_{\varepsilon_{\sigma}} = P_{\varepsilon_{i\sigma}} - [\text{απώλειες τυλίγματος στάτη}] - [\text{απώλειες τυλίγματος δρομέα}] - [\text{απώλειες σιδήρου}] - [\text{απώλειες τριβών και ανεμισμού}]$$

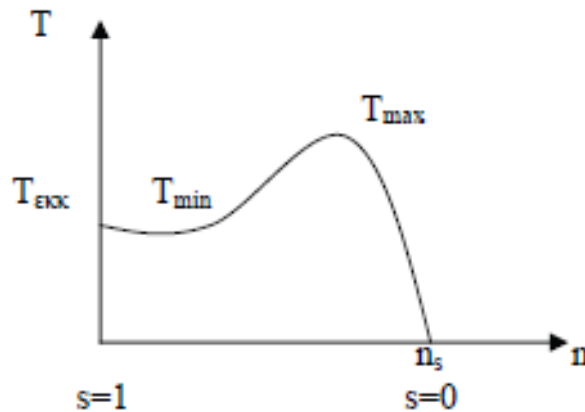
ή

$$P_{\varepsilon_s} = P_{\varepsilon_{i\sigma}} - [3|\tilde{I}_r|^2 R_r] - [3|\tilde{I}_s|^2 R_s] - \left[3 \frac{|\tilde{V}_{AB}|^2}{R_m} \right] - P_{\mu\eta\chi}$$

Και απαλείφοντας το ρεύμα του δρομέα στην παραπάνω εξίσωση, προκύπτει η σχέση της ροπής με την ολίσθηση και την ταχύτητα περιστροφής:

$$T_{em} = \frac{3R_s}{2\pi s n_s} \left| \frac{\tilde{V} \frac{(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m})^{-1}}{(\frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m})^{-1} + (R_s + jX_s)}}{(\frac{1}{R_s + jX_s} + \frac{1}{R_m} + \frac{1}{jX_m})^{-1} + (\frac{R_r}{s} + jX_r)} \right|^2$$

Με τη γραφική της παράσταση να φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Εικόνα 2.2- Χαρακτηριστική ροπής/στροφών Ασύγχρονης Μηχανής

2.5.2 Μηχανές Συνεχούς Ρεύματος

Στις μηχανές αυτού του τύπου, ο στάτης έχει έκτυπους πόλους, ενώ το τύλιγμά του διαρρέεται από Συνεχές Ρεύμα και αποτελεί τη διέγερση της μηχανής. Το τύλιγμα τυμπάνου βρίσκεται στο δρομέα και είναι σε σταθερή γωνία ως προς αυτό του στάτη. Την ακινητοποίηση του Η/Μ πεδίου αναλαμβάνει ο συλλέκτης που είναι ένας δακτύλιος από αγωγίμο υλικό, χωρισμένος σε μεμονωμένους τομείς που κατά την περιστροφή του δρομέα, εφάπτονται στις ακίνητες ψήκτρες. Ο συλλέκτης ουσιαστικά φροντίζει ώστε οι αγωγοί του δρομέα να συνιστούν ένα μακροσκοπικά σταθερό πηνίο λειτουργώντας σαν μηχανικός ανορθωτής.

Θεμελιώδεις σχέσεις Μηχανών Συνεχούς Ρεύματος

Αναπτυσσόμενη λόγω επαγωγής ΗΕΔ E_a

$$E_a = k \cdot \Phi \cdot n$$

Με Φ τη μαγνητική ροή στο κενό και n την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα

Αναπτυσσόμενη ροπή T στον άξονα της μηχανής

$$T = \frac{P}{\omega_m} = \frac{E_a \cdot I_a}{2\pi n}$$

Και συναρτήση της παραπάνω σχέσης, είναι:

$$T = \frac{k \cdot \Phi \cdot n \cdot I_a}{2\pi n} = k_1 \cdot \Phi \cdot I_a$$

Με I_a το ρεύμα του τυμπάνου.

Η μαγνητική ροή στο διάκενο, Φ , σχετίζεται με το ρεύμα διέγερσης I_f με μια μη γραμμική σχέση που όμως σε κάποια περιοχή τιμών είναι προσεγγιστικά γραμμική. Εάν η λειτουργία της μηχανής γίνεται σε αυτή τη γραμμική περιοχή, τότε στις παραπάνω εξισώσεις μπορεί να τίθεται αντί της ροής Φ , το ρεύμα I_f τροποποιώντας κατάλληλα τις σταθερές k , k_1 , δηλαδή:

$$E_a = k_2 \cdot I_f \cdot n$$

$$T = k_3 \cdot I_f \cdot I_a$$

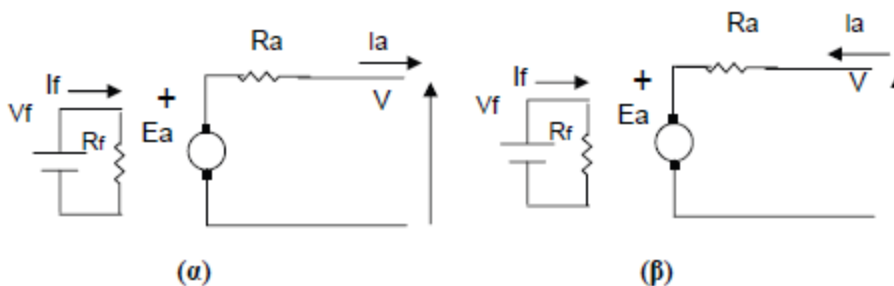
Τα τυλίγματα διαρρέονται από συνεχές ρεύμα και με την πάροδο του χρόνου έχουν αναπτυχθεί διάφορες συνδεσμολογίες των δύο τυλιγμάτων συσχετισμού του ρεύματος τυμπάνου με το ρεύμα διέγερσης:

- Ξένης (ανεξάρτητης) διέγερσης
- Διέγερσης σειράς
- Παράλληλης διέγερσης (διακλάδωσης)
- Σύνθετης διέγερσης, που αποτελεί κράμα των διεγέρσεων σειράς και διακλάδωσης

Ακολουθούν οι περιγραφικές εξισώσεις ως προς το είδος διέγερσης

Ξένη διέγερση

Στην περίπτωση αυτή, τα ρεύματα των τυλιγμάτων είναι εντελώς ανεξάρτητα μεταξύ τους και απαιτείται μια πηγή για τροφοδοσία με ΣΡ του τυλίγματος διέγερσης.



Εικόνα 2.3- Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής ξένης διέγερσης σε λειτουργία (α) γεννήτριας (β) κινητήρα

Οι περιγραφικές εξισώσεις είναι για τη γεννήτρια

$$E_a = V + R_a \cdot I_a$$

$$I_f = \frac{V_f}{R_f}$$

Και για τον κινητήρα

$$E_a = V - R_a \cdot I_a$$

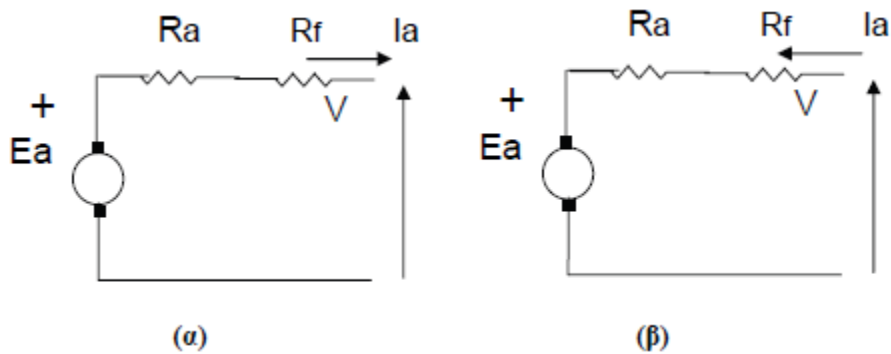
$$I_f = \frac{V_f}{R_f}$$

Ενώ η εξίσωση της ροπής, ανεξαρτήτως λειτουργίας ως γεννήτρια ή κινητήρας, είναι:

$$T = k_1 \cdot \Phi(I_f) \cdot I_a$$

Διέγερση Σειράς

Κατά τη συνδεσμολογία αυτή, το τύλιγμα διέγερσης και το τύλιγμα τυμπάνου διαρρέονται από το ίδιο ρεύμα



Εικόνα 2.4- Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής διέγερσης σειράς σε λειτουργία (α) γεννήτριας (β) κινητήρα

Οι περιγραφικές εξισώσεις είναι για τη γεννήτρια

$$E_a = V + R_a \cdot I_a$$

Και για τον κινητήρα

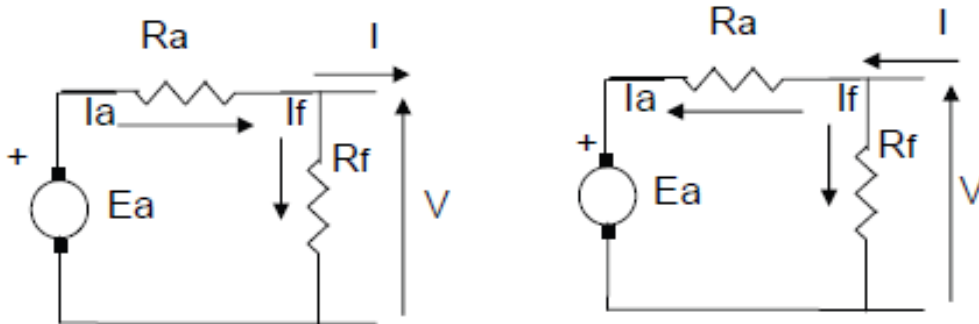
$$E_a = V - R_a \cdot I_a$$

Ενώ η εξίσωση της ροπής, ανεξαρτήτως λειτουργίας ως γεννήτρια ή κινητήρας, είναι:

$$T = k_1 \cdot \Phi(I_a) \cdot I_a$$

Παράλληλη διέγερση (ή διακλάδωσης)

Στην συνδεσμολογία παράλληλης διέγερσης, το τύλιγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το τύμπανο



Εικόνα 2.5- Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής παράλληλης διέγερσης σε λειτουργία
(α) γεννήτριας (β) κινητήρα

Οι περιγραφικές εξισώσεις είναι για τη γεννήτρια

$$\begin{aligned} E_a &= V + R_a \cdot I_a \\ I_a &= I + I_f \\ I_f &= \frac{V}{R_f} \end{aligned}$$

Και για τον κινητήρα

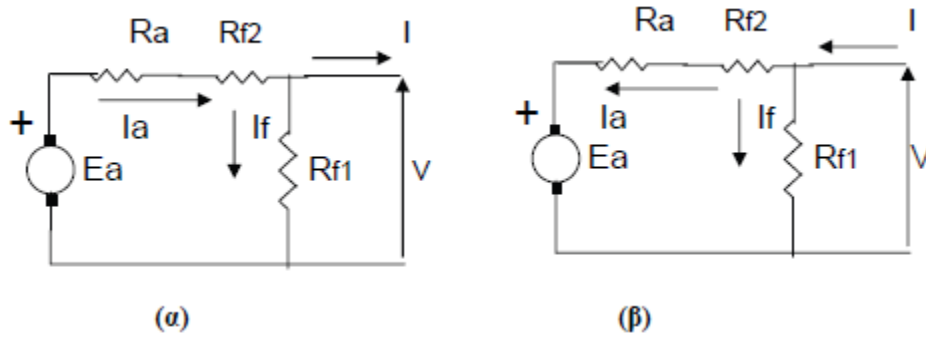
$$\begin{aligned} E_a &= V - R_a \cdot I_a \\ I_a &= I - I_f \\ I_f &= \frac{V}{R_f} \end{aligned}$$

Ενώ η εξίσωση της ροπής, ανεξαρτήτως λειτουργίας ως γεννήτρια ή κινητήρας, είναι:

$$T = k_1 \cdot \Phi(I_f) \cdot I_a$$

Σύνθετη Διέγερση

Στη συνδεσμολογία σύνθετης διέγερσης συναντώνται δύο τυλίγματα διέγερσης, ένα που συνδέεται σε σειρά με το τύμπανο και διαρρέεται από κοινό ρεύμα με αυτό και ένα που συνδέεται παράλληλα σε αυτό.



Εικόνα 2.6- Ισοδύναμο κύκλωμα μηχανής σύνθετης διέγερσης σε λειτουργία
(α) γεννήτριας (β) κινητήρα

Οι περιγραφικές εξισώσεις είναι για τη γεννήτρια

$$E_a = (R_f + R_a) \cdot I_a + V$$

$$I_a = I + I_f$$

$$I_f = \frac{V}{R_f}$$

Και για τον κινητήρα

$$E_a = V - (R_f + R_a) \cdot I_a$$

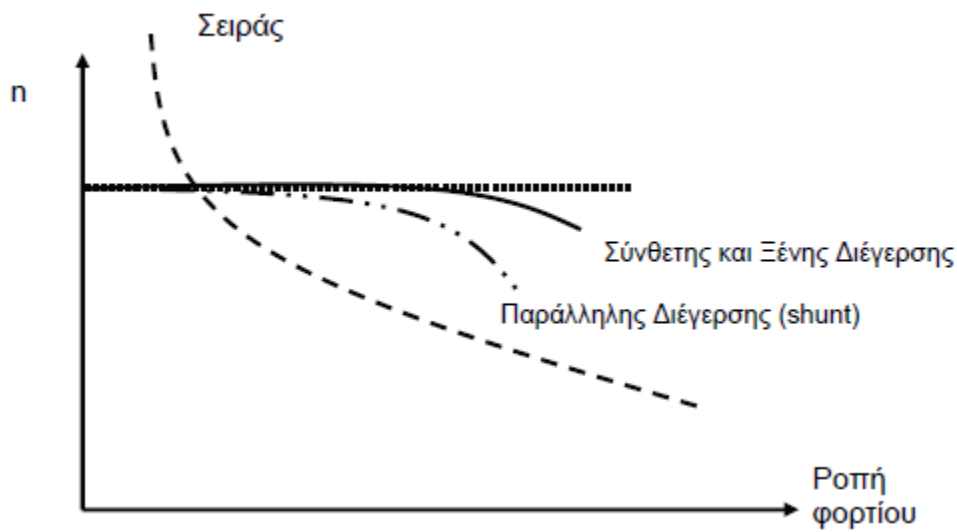
$$I_a = I - I_f$$

$$I_f = \frac{V_f}{R_f}$$

Ενώ η εξίσωση της ροπής, ανεξαρτήτως λειτουργίας ως γεννήτρια ή κινητήρα, είναι:

$$T = k_1 \cdot \Phi(I_f, I_a) \cdot I_a$$

Στην εικόνα 2.7 παρατίθενται οι χαρακτηριστικές καμπύλες λειτουργίας των κινητήρων Συνεχούς Ρεύματος ως συνάρτηση της ταχύτητας περιστροφής με τη ροπή για τις διάφορες συνδεσμολογίες. Στις περισσότερες περιπτώσεις η ταχύτητα περιστροφής της μηχανής είναι επιθυμητό να διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα της επιβαλλόμενης ροπής από το φορτίο. Με αυτό τον τρόπο συμπεριφέρονται οι μηχανές ξένης, σύνθετης διέγερσης και σε μικρότερο βαθμό οι παράλληλης διέγερσης. Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα των κινητήρων σειράς είναι η υψηλή ροπή στις χαμηλές ταχύτητες και η σχετικά σταθερή αλλά μικρή στις υψηλές ταχύτητες, πράγμα που χρησιμεύει ιδιαίτερα στην έλξη των τραινών.



Εικόνα 2.7- Χαρακτηριστική ροπής/στροφών Μηχανής Συνεχούς Ρεύματος

Απώλειες ισχύος στις γεννήτριες Συνεχούς Ρεύματος

Παρακάτω δίνεται η γενική έκφραση της ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας

$$P_{\text{εξόδου}} = P_{\text{εισόδου}} - [\text{μηχανικές απώλειες}] - [\text{απώλειες στις ψήκτρες}] - [\text{απώλειες τυλίγματος στάτη}] - [\text{απώλειες τυλίγματος δρομέα}]$$

Σημειώνεται πως οι μηχανικές απώλειες περιλαμβάνουν απώλειες λόγω ανεμισμού, τριβής κτλ.

Και ανάλογα τη συνδεσμολογία είναι:

Ξένης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = V \cdot I = E_a \cdot I_a - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a - \frac{V_f^2}{R_f}$$

Διέγερσης σειράς

$$P_{\text{εξόδου}} = V \cdot I = E_a \cdot I_a - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_a + R_f)$$

Παράλληλης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = V \cdot I = E_a \cdot I_a - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a - \frac{V^2}{R_f}$$

Σύνθετης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = V \cdot I = E_a \cdot I_a - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_a + R_{f2}) - \frac{V_f^2}{R_{f1}}$$

Απώλειες ισχύος στους κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

Σε αντιστοιχία με τις απώλειες στις γεννήτριες, παρακάτω δίνεται η γενική έκφραση των απωλειών στους κινητήρες Συνεχούς Ρεύματος

$$P_{\text{εξόδου}} = P_{\text{εισόδου}} - [\text{απώλειες στις ψήκτρες}] - [\text{απώλειες τυλίγματος στάτη}] - [\text{απώλειες τυλίγματος δρομέα}] - [\text{μηχανικές απώλειες}]$$

Και ανάλογα τη συνδεσμολογία είναι:

Ξένης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = E_a \cdot I_a - P_{\text{μηχ}} = V \cdot I - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a - \frac{V_f^2}{R_f} - P_{\text{μηχ}}$$

Διέγερσης σειράς

$$P_{\text{εξόδου}} = E_a \cdot I_a - P_{\text{μηχ}} = V \cdot I - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_a + R_f) - P_{\text{μηχ}}$$

Παράλληλης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = E_a \cdot I_a - P_{\text{μηχ}} = V \cdot I - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot R_a - \frac{V^2}{R} - P_{\text{μηχ}}$$

Σύνθετης διέγερσης

$$P_{\text{εξόδου}} = E_a \cdot I_a - P_{\text{μηχ}} = V \cdot I - \Delta V_{\psi} \cdot I_a - I_a^2 \cdot (R_a + R_{f2}) - \frac{V^2}{R_{f1}} - P_{\text{μηχ}}$$

Και σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις ο βαθμός απόδοσης προκύπτει ως

$$\eta = \frac{P_{\text{εξόδου}}}{P_{\text{εισόδου}}} = \frac{P_{\text{εξόδου}}}{P_{\text{εξόδου}} + \text{απώλειες}}$$

3. Θεωρητικό Υπόβαθρο- Μέτρηση Ροπής

3.1 Εισαγωγή- Γενικά για τη Ροπή

Η ροπή ενός κινητήρα αντιπροσωπεύει την ικανότητά του να υπερνικήσει μια αντίσταση και να περιστραφεί παράγοντας ωφέλιμο έργο. Το φορτίο αυτό μπορεί να είναι η περιστροφή μιας προπέλας, η κίνηση μιας αντλίας ή η περιστροφή μιας ηλεκτρογεννήτριας. Η ύπαρξη ροπής προϋποθέτει συνεπώς μια πηγή και μία καταβόθρα ενέργειας. Μετρώντας τη ροπή ενός στρεφόμενου άξονα μιας μηχανής, λαμβάνονται χρήσιμες πληροφορίες για την κατάστασή της. Συγκεκριμένα, με ακριβή μέτρηση της ροπής που δρα σε έναν άξονα μιας μηχανής καθώς και της ταχύτητας περιστροφής του (RPM), προκύπτει η ισχύς που αποδίδει η μηχανή αυτή, κατά τον τύπο:

$$P = T \cdot \omega = T \cdot 2\pi f = T \cdot \frac{2\pi RPM}{60}$$

Με

P: την ισχύ

T: τη ροπή

Αν είναι γνωστά τα στοιχεία λειτουργίας ενός κινητήρα (είτε όγκος εμβολισμού, μέση πραγματική πίεση, κτλ για MEK είτε ΗΕΔ, ρεύμα, κτλ. για ηλεκτροκινητήρα) είναι δυνατόν να γίνει θεωρητικός υπολογισμός της ονομαστικής ροπής εξόδου για τη συγκεκριμένη κατάσταση λειτουργίας. Με μέτρηση της πραγματικής ροπής εξόδου και σύγκριση των δύο τιμών, προκύπτουν οι πραγματικές εσωτερικές απώλειες του εν λόγω κινητήρα (τριβών, τυλιγμάτων, σιδήρου, ανεμισμού, κτλ.). Αν γίνονται τακτικές μετρήσεις κατά τη διάρκεια της ζωής ενός κινητήρα, με την πτώση της τιμής της πραγματικής ροπής, δύναται να αξιολογηθεί η εσωτερική φθορά του κινητήρα (αποθέσεις καυσίμου σε κυλίνδρους, αύξηση αντίστασης τυλιγμάτων κτλ.)

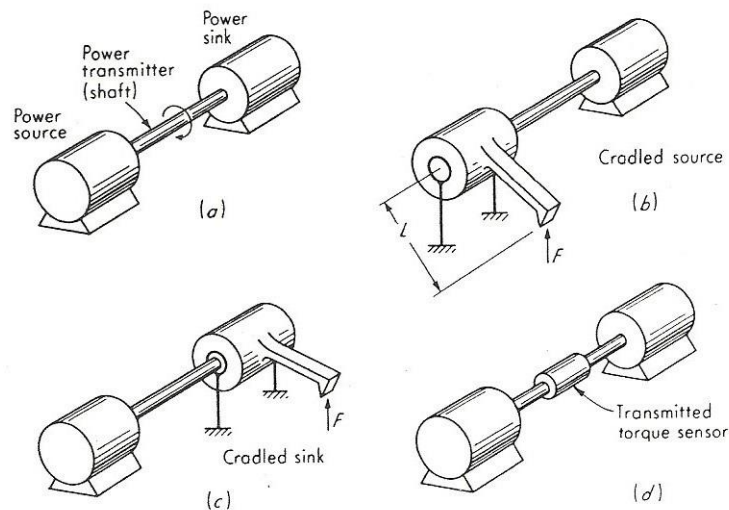
3.2 Ιστορικές μέθοδοι μέτρησης ροπής

Αρκετά μέσα έχουν εφευρεθεί για να βοηθήσουν τους μηχανικούς βελτιώσουν τα σχέδιά τους. Το δυναμόμετρο εφευρέθηκε για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών μιας εγκατάστασης παραγωγής ενέργειας και σύγκρισης τους με θεωρητικές τιμές τους. Αυτό επιτρέπει στους μηχανικούς να βελτιστοποιούν τις εγκαταστάσεις αυτές με τη διαρκή σύγκριση μετρούμενων/πειραματικών τιμών με τις θεωρητικά προβλεφθείσες. Μία από αυτές τις ανάγκες είναι η ακριβής μέτρηση της ροπής και η σύγκρισή της με τη θεωρητική τιμή η οποία υπολογίζεται ως συνάρτηση της ισχύος εισόδου (ορυκτό καύσιμο η ηλεκτρικό ρεύμα) αφαιρώντας τις απώλειες της εκάστοτε εγκατάστασης. Η ανάγκη αυτή οδήγησε στην εφεύρεση ενός συγκεκριμένου τύπου δυναμόμετρου, σχεδιασμένο να επιτρέψει σε έναν μηχανικό τη μέτρηση αυτή.

Η ροπή χωρίζεται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, τη στατική ροπή, που οφείλεται σε σταθερή ή περίπου σταθερή λειτουργία ενός κινητήρα και τη δυναμική που παρατηρείται κατά την μεταβολή της κινητικής κατάστασης ενός κινητήρα (επιτάχυνση ή επιβράδυνση). Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό, μία ροπή θεωρείται στατική κατά την απουσία γωνιακής επιτάχυνσης.

Σε ό,τι αφορά τη μέτρηση της ροπής, υπάρχουν δύο μεθοδολογίες μέτρησης, η μέτρηση αντίδρασης και η απευθείας ή εν σειρά μέτρηση. Η απευθείας ή εν σειρά μέτρηση βασίζεται στην εισχώρηση ενός αισθητήρα ροπής απευθείας στο μέσο μεταφοράς της ροπής. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγονται σφάλματα στις μετρήσεις λόγω «παρασιτικών» ροπών (π.χ. έδρανα) καθώς και λόγω μεγάλων αξόνων ή άλλων μέσων μεταφοράς ροπής με μεγάλη ροπή αδράνειας που δυσχεραίνουν τη μέτρηση δυναμικών ροπών. Η μέτρηση της ροπής με αντίδραση βασίζεται στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, δηλαδή αντί της μέτρησης της ροπής μιας μηχανής που στρέφεται, γίνεται μέτρηση της ροπής που απαιτείται για να μην στραφεί η μηχανή (π.χ. πέδη).

Η απλούστερη μέθοδος μέτρησης ροπής είναι η στήριξη είτε της πηγής είτε του φορτίου σε έδρανα που δύνανται να περιστραφούν με ταυτόχρονη, σημειακή έδραση στο έδαφος.

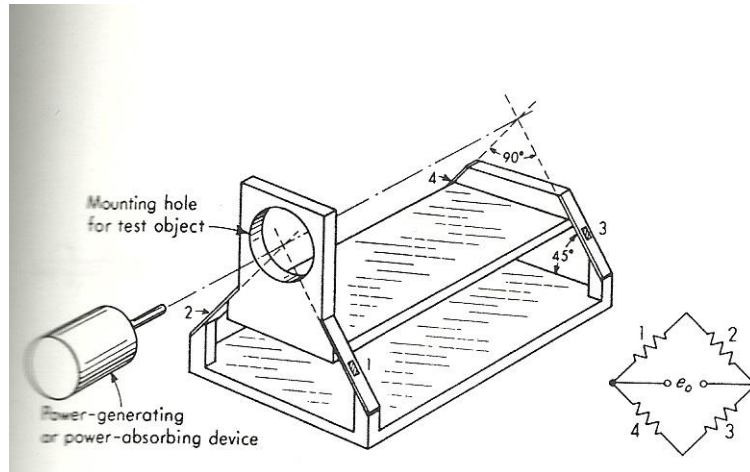


Εικόνα 3.1- Μέτρηση ροπής με σημειακή έδραση

Μετρώντας τη σημειακή δύναμη και με γνώση του μοχλοβραχίονα, ο υπολογισμός της ροπής είναι απλός:

$$T = F \cdot L$$

Εξέλιξη αυτής της μεθόδου για μέτρηση ροπής, είναι η χρήση εκκρεμών ή πλατφόρμων, πάνω στις οποίες τοποθετούνται γνωστά βάρη, ώστε να μετρηθεί η δύναμη F



Εικόνα 3.1- Μέτρηση ροπής με χρήση πλατφόρμας

Ένας άξονας όμως που μεταφέρει ροπή μεταξύ πηγής και φορτίου, παραμορφώνεται στρεπτικά. Οι παραμορφώσεις του άξονα κατά τη λειτουργία του συμβαίνουν στην ελαστική περιοχή, ειδάλως ο άξονας θα παραμορφωνόταν πλαστικά και πιθανώς θα αστοχούσε με μοιραία αποτελέσματα για την εφαρμογή. Όπως είναι γνωστό από την Επιστήμη Υλικών, τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα σε αυτή την περίπτωση, είναι γραμμικά της μορφής $y = ax$ ή από το νόμο του Hooke $\sigma = E \cdot \epsilon$ και για την περίπτωση της στρέψης

$$\tau = \gamma G$$

Με γ την στρεπτική επιμήκυνση και G το μέτρο διάτμησης της δοκού, ή:

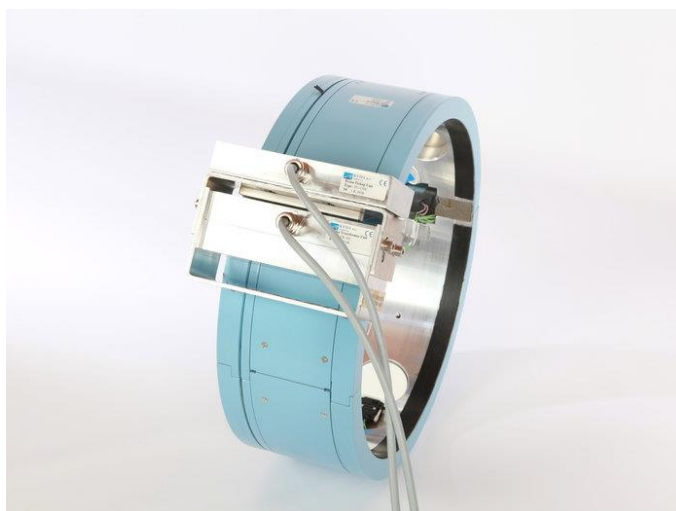
$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

Η ιδιότητα αυτή έδωσε την ιδέα στους μηχανικούς της μέτρησης της επιμήκυνσης ώστε να υπολογιστεί εύκολα η ροπή.

Με αυτή τη σκέψη σαν οδηγό, αναπτύχθηκαν διάφορες μεθοδολογίες για τη μέτρηση της παραπάνω επιμήκυνσης

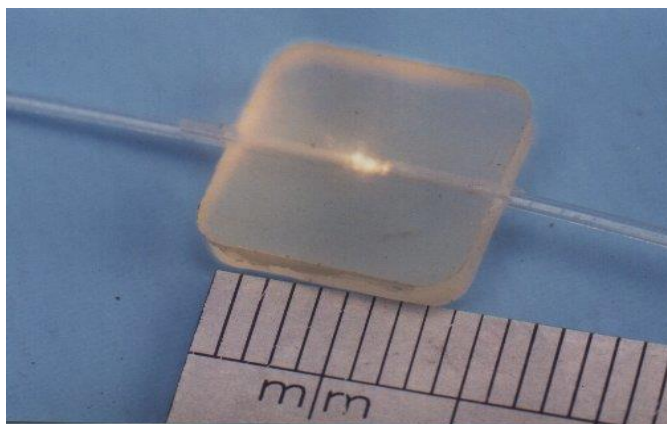
Ίσως η πιο ευρέως διαδεδομένη μεθοδολογία που εκμεταλλεύεται αυτές τις ιδιότητες των υλικών, είναι η μέτρηση με επιμηκυνσιόμετρα (Strain Gauges) τα οποία μετατρέπουν την επιμήκυνση του υλικού σε ηλεκτρική τάση μέσω της αλλαγής των αντιστάσεων ενός κυκλώματος γέφυρας (γέφυρα Wheatstone), φαινόμενο το οποίο είναι επίσης γραμμικό. Καθώς, αυτή είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία, θα αναλυθεί σε βάθος σε επόμενο κεφάλαιο.

Μια άλλη εφαρμογή της μέτρησης με Strain Gauges, είναι τα Slip Rings. Πρόκειται για μονιμότερες εφαρμογές που κάνουν χρήση της αρχής της γέφυρας Wheatstone. Συγκεκριμένα, κολλάται η γέφυρα, κατά τα γνωστά, επί του άξονα. Δακτύλιος που παράγει τη διέγερση και λαμβάνει το σήμα, εφαρμόζεται επί του άξονα κοντά ή πάνω από το Strain Gauge και περιστρέφεται με αυτόν. Δεύτερος, σταθερός δακτύλιος εφαρμόζεται περιμετρικά του πρώτου και η μετάδοση του σήματος καθώς και η λήψη της ενέργειας για παραγωγή της διέγερσης γίνεται με λεπτά, μεταλλικά σύρματα που παραμένουν σε επαφή κατά την περιστροφή του άξονα. Μια μονάδα προσαρμοσμένη στον σταθερό δακτύλιο, αναλαμβάνει να επεξεργαστεί και να διανεμίει τα διάφορα σήματα σε H/Y.



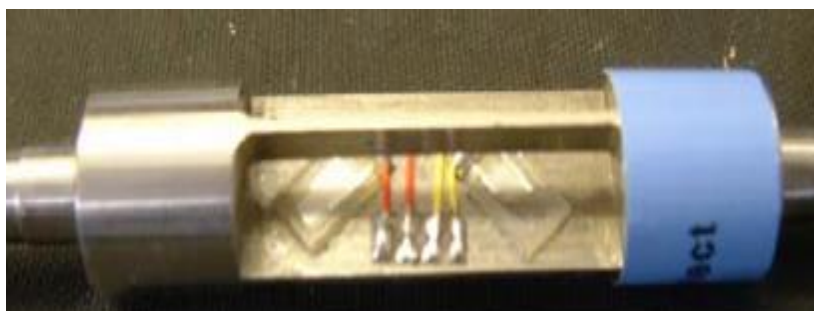
Εικόνα 3.3- Slip Ring

Ευρέως διαδεδομένα, σε βιομηχανικές εφαρμογές αλλά και στη ναυτιλία, λόγω της δυνατότητας μέτρησης ταυτόχρονα ροπής και ώσης, είναι τα οπτικά επιμηκυνσιόμετρα. Η αρχή που ακολουθείται είναι η ίδια με παραπάνω, αλλά αντί της αλλαγής αντιστάσεων λόγω επιμήκυνσής τους και συνεπαγόμενη αλλαγή τάσης ενός κυκλώματος γέφυρας, γίνεται χρήση ενός οπτικού αισθητήρα αποτελούμενο από δύο μέρη, ενός πομπού δέσμης φωτός και ενός φωτοευαίσθητου δέκτη. Με την απόκλιση της δέσμης φωτός από την μηδενική της θέση, προκύπτει για εγκάρσια απόκλιση η διαμητική παραμόρφωση και για διαμήκη απόκλιση, η αξονική παραμόρφωση. Οπότε αντίστοιχα υπολογίζονται η ροπή και η ώση. Ίσως το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι η ευαισθησία της σε φαινόμενα κάμψης που αποπροσανατολίζουν τον αισθητήρα. Μια λύση αυτού του προβλήματος, είναι η τοποθέτηση πολλών αισθητήρων, ανά δύο σε αντιδιαμετρικές θέσεις και η λήψη διαρκώς του μέσου όρου των τιμών τους.



Εικόνα 3.4- Οπτικό Strain Gauge

Μια μεθοδολογία που κερδίζει διαρκώς έδαφος αλλά βρίσκεται ακόμα σε ερευνητικό στάδιο με περιορισμένες εμπορικές εφαρμογές, είναι η μέτρηση της ροπής με τη μέτρηση των επιφανειακών ακουστικών κυμάτων (SAW) του άξονα. Η μέθοδος αυτή μοιάζει αρκετά με εκείνη της εφαρμογής/κόλληση Strain Gauges επί του άξονα και μετατροπής της επιμήκυνσης σε ηλεκτρική τάση. Αντίστοιχα και στη μέθοδο της μέτρησης επιφανειακών ακουστικών κυμάτων, πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας εφαρμόζεται σε άξονα κατά τη διεύθυνση της μέτρησης και μετατρέπει τους επιφανειακούς κυματισμούς Rayleigh σε ηλεκτρική τάση σήματος. Η μέθοδος αυτή, είναι υψηλότερης ακρίβειας από την παραδοσιακή μέθοδο της γέφυρας Wheatstone και αναμένεται να κερδίσει σημαντικό έδαφος στο μέλλον.



Εικόνα 3.5- Πιεζοηλεκτρικά Strain Gauges για μετρήσεις ροπής μέσω SAW

3.3 Μέτρηση Ροπής με χρήση Strain Gauges τύπου ηλεκτρικής αντίστασης

3.3.1 Νόμος του Hooke για υπολογισμό τάσης με μέτρηση ορθών παραμορφώσεων

Στην ελαστική περιοχή παραμόρφωσης των υλικών, ο νόμος του Hooke είναι η βάση για τον υπολογισμό της τάσης με μέτρηση της ορθής παραμόρφωσης. Στην απλούστερη του μορφή, ο νόμος του Hooke είναι:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E$$

Με

σ : την ασκούμενη τάση σε ορισμένη διατομή του υλικού σε N/m

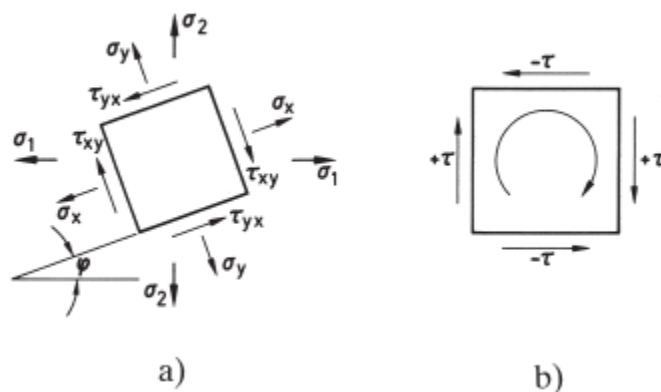
E : το μέτρο ελαστικότητας που αποτελεί και ιδιότητα του κάθε υλικού σε N/m

ε : την ορθή παραμόρφωση που ορίζεται ως $\Delta l/l$

3.3.2 Κύκλος του Mohr

Ορίζοντας τους κύριους άξονες 1,2 ως τους άξονες στους οποίους οι κύριες ορθές τάσεις σ_1 και σ_2 λαμβάνουν τη μέγιστη και την ελάχιστη τιμή τους αντίστοιχα και οι στρεπτικές τάσεις τα μηδενίζονται, για σύστημα αξόνων x,y περιστραμμένο από το 1,2 κατά γωνία φ , ορίζονται οι μετασχηματισμοί

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\varphi \\ \sigma_y &= \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \cos 2\varphi \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cdot \sin 2\varphi\end{aligned}$$



Εικόνα 3.6- Ορθές και Διατμητικές τάσεις σε τμήμα επιφανείας

3.3.3 Μέτρηση επιφανειακών επιμηκύνσεων με επιμηκυνσιόμετρα

Ως επιμηκυνσιόμετρο μπορεί να θεωρηθεί οποιαδήποτε συσκευή μετράει επιμηκύνσεις . Το ευρύτερα χρησιμοποιούμενο επιμηκυνσιόμετρο είναι το μεταλλικού τύπου Strain Gauge, που αποτελείται, στη σύγχρονη μορφή του από μία εύκαμπτη, μονωτική επιφάνεια επάνω στην οποία τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα μεταλλικής διάταξης που αποτελεί την ηλεκτρική αντίσταση. Εν συνεχεία το Strain Gauge επικολλάται στην επιφάνεια του τεμαχίου προς μέτρηση. Η βασική αρχή λειτουργίας του είναι πως σε κάθε ηλεκτρικό αγωγό, με την άσκηση σε αυτόν μηχανικών τάσεων, αλλάζει και η ηλεκτρική του αντίσταση. Η αλλαγή αυτή οφείλεται εν μέρει στην παραμόρφωση του αγωγού και εν μέρει στην αλλαγή της ειδικής του αντίστασης λόγω αλλαγών της δομής του υλικού. Η αλλαγή αυτή περιγράφεται από την σχέση:

$$\frac{dR}{R_0} = \varepsilon(1 + 2\nu) + \frac{dQ}{Q}$$

Με

R: την ηλεκτρική αντίσταση (Ohm)

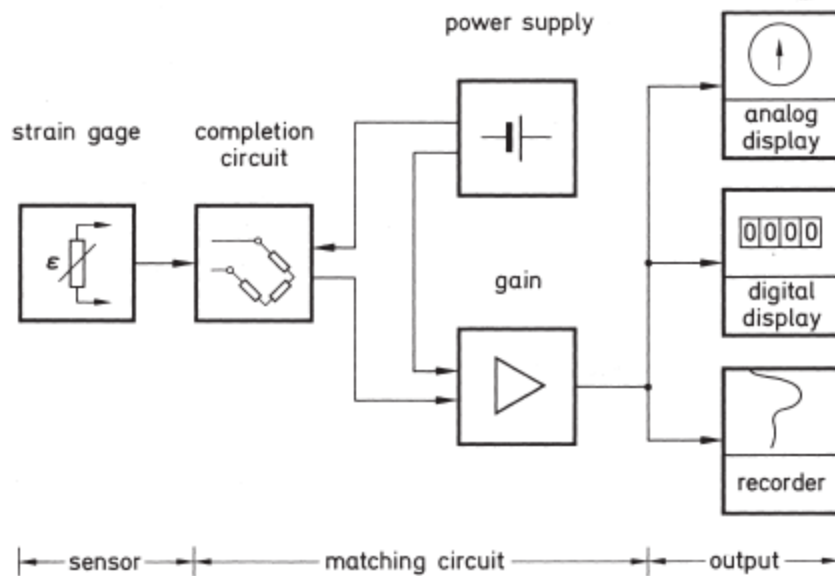
ε : την παραμόρφωση

ν : τον λόγο του Poisson

Q: η ειδική αντίσταση (Ohm·m)

3.3.4 Το σύστημα μέτρησης

Οι παραμορφώσεις που μετρώνται με χρήση Strain Gauges είναι κατά κανόνα πολύ μικρές με συνέπεια, καθώς και οι μεταβολή της αντίστασης είναι μικρή, να μην είναι δυνατό να μετρηθούν με συνηθισμένα Ωμόμετρα. Πρέπει συνεπώς το S.G. να τοποθετηθεί εντός ενός μετρητικού συστήματος με τη μέγιστη δυνατότητα μέτρησης της αλλαγής της αντίστασης. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από τρία βασικά μέρη: τον αισθητήρα, τη μετρητική διάταξη και την έξοδο.



Εικόνα 3.7- Σχηματική απεικόνιση πλήρους μετρητικού συστήματος

Ο αισθητήρας είναι το S.G. που μετατρέπει τις παραμορφώσεις σε αλλαγή της αντίστασης. Η μετρητική διάταξη αποτελείται συνήθως από το ολοκληρωμένο κύκλωμα που περιλαμβάνει και τον αισθητήρα, συνήθως με τη μορφή γέφυρας Wheatstone (Βλ. παρακάτω), την πηγή της Ηλεκτρεγερτικής διέγερσης που έχει σαν σκοπό την διέγερση της γέφυρας Wheatstone ώστε να μπορεί να παραληφθεί χρήσιμο σήμα από τον αισθητήρα και τέλος, αν το σήμα είναι αρκετά αδύναμο και δεν μπορεί να ανιχνευθεί κατά την έξοδο, χρησιμοποιείται ενισχυτής του σήματος. Η έξοδος είναι το τελευταίο τμήμα του συστήματος μέτρησης και αποτελείται ουσιαστικά από την απεικόνιση του σήματος, την αποθήκευσή του ή την μετατροπή του σε άλλου τύπου σήματος ώστε να οδηγηθεί σε άλλο σύστημα.

3.3.5 Η γέφυρα Wheatstone

1.3.5.1 Εισαγωγή

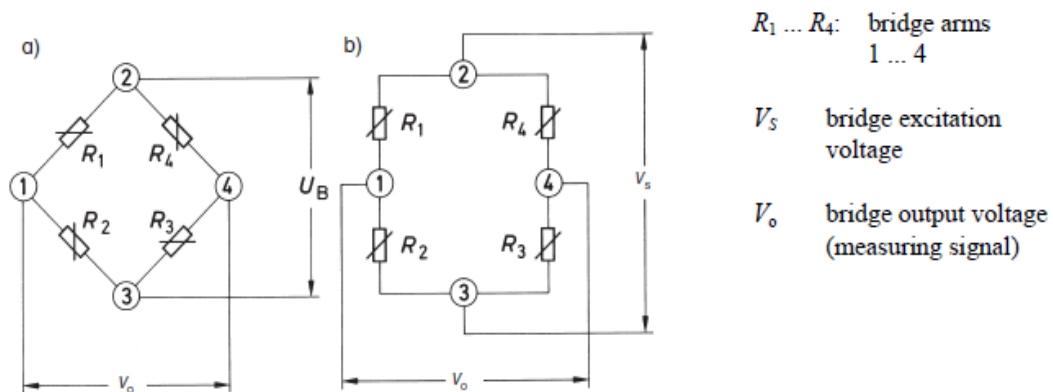
Η γέφυρα Wheatstone, είναι ένα κύκλωμα που προτάθηκε το 1843 από τον Άγγλο Sir Charles Wheatstone, ως ακριβής τρόπος μέτρησης ηλεκτρικών αντιστάσεων. Η γέφυρα Wheatstone χρησιμοποιείται με πολλούς τρόπους για τη μέτρηση της ηλεκτρικής αντίστασης. Συγκεκριμένα:

- Για να βρεθεί μια άγνωστη αντίσταση με σύγκρισή της με μια γνωστή αντίσταση
- Για να βρεθούν οι σχετικές αλλαγές στην αντίσταση

Η δεύτερη είναι και η χρήση της που αξιοποιείται στα S.G. όπου οι αλλαγές είναι της τάξης των 10^{-2} με 10^{-4} Ω/Ω.

3.3.5.2 Η αρχή λειτουργίας και το διάγραμμα κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone

Η τάση εισόδου V_S ασκείται σε στα σημεία 2 και 3 του παρακάτω σχήματος και διαιρείται στους δύο κλάδους της γέφυρας που ορίζονται από τις αντιστάσεις R_1 - R_2 και R_3 - R_4 σαν λόγος των αντιστοίχων αντιστάσεων των δύο κλάδων, κάθε κλάδος δηλαδή δρα σαν διαιρέτης τάσης.



Εικόνα 3.8- Σχηματική απεικόνιση γέφυρας Wheatstone, a) τυπική b) πραγματική

Η εξίσωση που περιγράφει τη γέφυρα, είναι:

$$V_0 = V_S \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (1)$$

Και σε περίπτωση ισορροπίας της γέφυρας ισχύει:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Σε περίπτωση μεταβολής της αντίστασης κατά ΔR , παρατηρείται απόκλιση από την ισορροπία και η σχέση (1) γίνεται

$$V_0 = V_S \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4} \right)$$

Στην περίπτωση μέτρησης επιμηκύνσεων, πρέπει να ισχύει τουλάχιστον:

$$R_1 = R_2 \text{ \& } R_3 = R_4$$

Και η σχέση γίνεται:

$$V_0 = V_S \left(\frac{(R_1 + \Delta R_1) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4) - (R_3 + \Delta R_3) \cdot (2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2)}{(2R_1 + \Delta R_1 + \Delta R_2) \cdot (2R_3 + \Delta R_3 + \Delta R_4)} \right)$$

Αν αναπτύξουμε την παραπάνω σχέση είναι:

$$V_0 = V_S \frac{R_1(\Delta R_3 + \Delta R_4) - R_3(\Delta R_1 + \Delta R_2) + 2R_3\Delta R_1 - 2R_1\Delta R_4}{4R_1R_3 + 2R_1\Delta R_3 + 2R_1\Delta R_4 + 2R_3\Delta R_1 + 2R_3\Delta R_2}$$

Οι όροι του παρονομαστή που περιέχουν ΔR είναι πολύ μικροί σε σχέση με τον όρο $4R_1R_3$ και μπορούν να παραλειφθούν από την εξίσωση χωρίς σημαντική αλλαγή στην ακρίβειά της. Οπότε απαλείφοντάς τους, αναπτύσσοντας το κλάσμα και απλοποιώντας, τελικά λαμβάνεται:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{\Delta R_3}{4R_3} + \frac{\Delta R_4}{4R_3} - \frac{\Delta R_1}{4R_1} + \frac{\Delta R_2}{4R_3} + \frac{\Delta R_1}{2R_3} - \frac{\Delta R_4}{2R_3}$$

Και αν ισχύει $R_1=R_2=R_3=R_4$ η εξίσωση απλοποιείται περαιτέρω σε:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right)$$

Που αποτελεί και τη θεμελιώδη εξίσωση της γέφυρας Wheatstone.

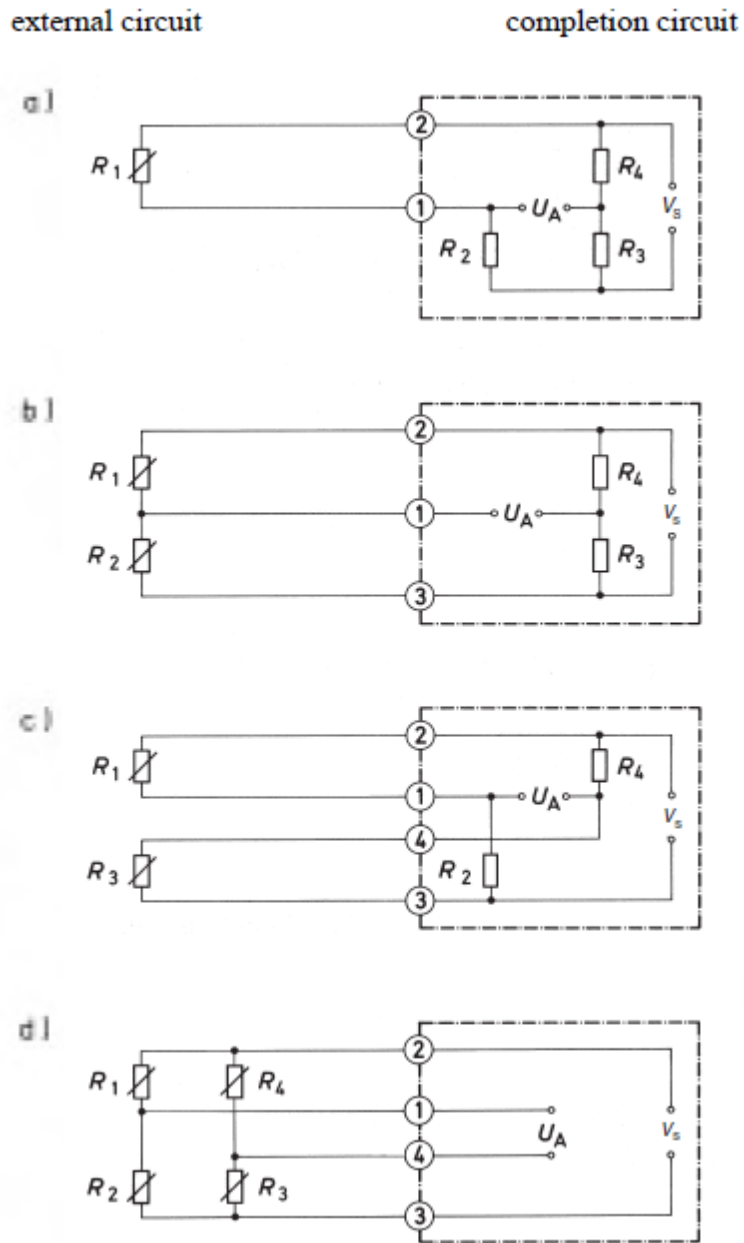
Αντικαθιστώντας με: $\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon$, όπου k αποτελεί σταθερά της εξίσωσης μεταφοράς της επιμήκυνσης σε ηλεκτρική αντίσταση και ε την επιμήκυνση, η εξίσωση γίνεται:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Είναι εμφανές πως το πρόσημο της τάσης σήματος μπορεί να είναι είτε θετικό είτε αρνητικό ανάλογα της επιμηκύνσεις των κλάδων της γέφυρας, συγκεκριμένα:

- Αν $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ ή/και $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$, θετικό πρόσημο
- Αν $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ ή/και $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$, αρνητικό πρόσημο.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται οι διάφοροι τύποι γέφυρας Wheatstone που χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις



Εικόνα 3.9- Διάφοροι τύποι γεφυρών Wheatstone

- a) $\frac{1}{4}$ γέφυρα
- b) Μισή γέφυρα
- c) Διπλή $\frac{1}{4}$ ή διαγώνια γέφυρα
- d) Πλήρης γέφυρα

Τέλος, κρίνεται άξιο αναφοράς πως στο κύκλωμα της γέφυρας Wheatstone παρατηρείται μια γραμμική απόκλιση η οποία οφείλεται στην παραπάνω παραδοχή για να προκύψει η προσεγγιστική σχέση, απόκλιση που αυξάνεται αντιστρόφως ανάλογα του αριθμού των ενεργών κλάδων του κυκλώματός της. Η απόκλιση αυτή, ειδικά στην περίπτωση της $\frac{1}{4}$ -γέφυρας, δεν είναι μειονέκτημα καθώς εμφανίζεται μια σχεδόν ίσης τιμής αλλά αντίθετου πρόσημου απόκλιση που οφείλεται στο ίδιο το S.G., έτσι ώστε αυτές οι δύο αποκλίσεις να αλληλοαναιρούνται.

3.3.6 Διατάξεις S.G. για μέτρηση διαφορών καταπονήσεων

Η αρχή της μέτρησης επιμηκύνσεων με S.G. είναι η τοποθέτηση των S.G. με τέτοιο τρόπο ώστε ο «κύριος άξονας ευαισθησίας τους», να είναι ευθυγραμμισμένος με τον κύριο άξονα των επιμηκύνσεων.

Πριν ξεκινήσει η περιγραφή των διαφορών διατάξεων S.G. για τη μέτρηση καταπονήσεων διαφορών τύπων, κρίνεται σκόπιμη μια απαρίθμηση των συμβόλων και των μεγεθών που θα συναντηθούν κατά το κεφάλαιο.

- SG1, SG2...SG4 Strain Gauges που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυκλώματος γέφυρας
- E μέτρο ελαστικότητας (N/m)
- F δύναμη (N)
- G μέτρο διάτμησης (N/m)
- K S.G. που χρησιμοποιείται σαν αντιστάθμιση θερμικών αποκλίσεων σε ένα κύκλωμα, compensating Strain Gauge.
- R₁, R₂... R₄ αντιστάσεις που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή κυκλώματος γέφυρας (Ω)
- R_C συμπληρωματικές αντιστάσεις του κυκλώματος γέφυρας
- ε_l μετρούμενη επιμήκυνση
- ε_b επιμήκυνση λόγω κάμψης
- ε_n επιμήκυνση λόγω εφελκυσμού/θλίψης
- ν λόγος του Poisson
- σ τάση (N/m)
- σ_b καμπτική τάση (N/m)
- σ_u τάση στην άνω πλευρά του μετρούμενου δοκιμίου (N/m)
- σ_l τάση στην κάτω πλευρά του μετρούμενου δοκιμίου (N/m)
- σ_i τάση στην διαμήκη κατεύθυνση του μετρούμενου αντικειμένου (N/m)
- σ_n ορθή τάση (εφελκυσμός/θλίψη) (N/m)
- ω γωνιακή συχνότητα (rad/s)

3.3.6.1 Μέτρηση εφελκυσμού-θλίψης

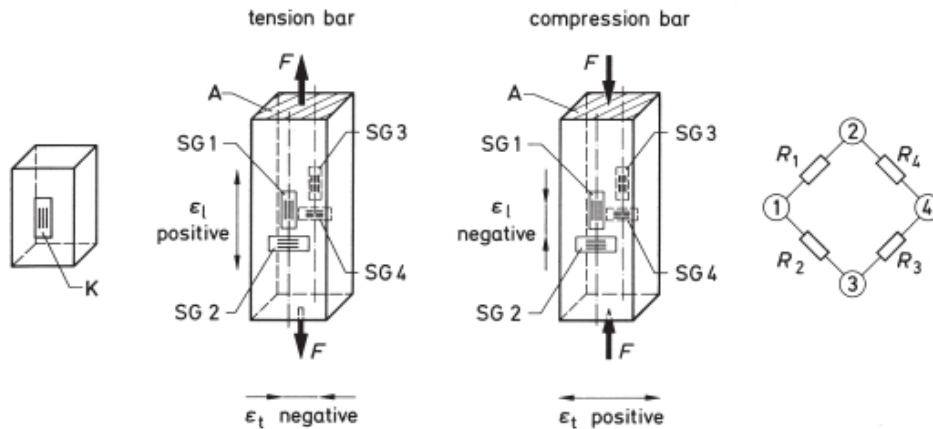
Στις ορθές παραμορφώσεις, για την επιμήκυνση κατά τον άξονα άσκησης των τάσεων, ο νόμος του Hooke δίνει για την διαμήκη επιμήκυνση ε_l:

$$\varepsilon_l = \frac{\sigma}{E} = \frac{F}{A \cdot E}$$

Ενώ από το φαινόμενο Poisson, για την εγκάρσια επιμήκυνση ε_t ισχύει:

$$\varepsilon_t = -\nu \cdot \varepsilon_l = -\nu \frac{F}{A \cdot E}$$

η διάταξη των S.G. γίνεται έτσι ώστε από τους τέσσερις κλάδους της γέφυρας W, οι δύο να είναι ευαίσθητοι στις διαμήκεις επιμηκύνσεις και οι άλλοι δύο στις εγκάρσιες, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10



Εικόνα 3.10- Χωροταξική τοποθέτηση Strain Gauges για μέτρηση αξονικών καταπονήσεων

Ο πίνακας 3.1 επεξηγεί συνοπτικά το μέγεθος της μετρούμενης επιμήκυνσης συναρτήσει του αριθμού και του τύπου των S.G. που χρησιμοποιούνται στη γέφυρα Wheatstone.

Περίπτωση	Κλάδος γέφυρας	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	Αποτέλεσμα
1	Εξίσωση γέφυρας	$\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4 = \epsilon_i$				
2	1/4-γέφυρα	SG1	R _C	R _C	R _C	$\epsilon_i = \epsilon_1$
3	1/4 γέφυρα με S.G. αντιστάθμισης θερμικών απωλειών	SG1	K	R _C	R _C	$\epsilon_i = \epsilon_1$
4	Μισή γέφυρα	SG1	SG2	R _C	R _C	$\epsilon_i = \epsilon_1 + \epsilon_q = (1 + \nu) \cdot \epsilon_1$
5	Διαγώνια γέφυρα	SG1	R _C	SG3	R _C	$\epsilon_i = 2 \cdot \epsilon_1$
6	Διαγώνια γέφυρα με S.G. αντιστάθμισης θερμικών απωλειών	SG1	K	SG3	K	$\epsilon_i = 2 \cdot \epsilon_1$
7	Πλήρης γέφυρα	SG1	SG2	SG3	SG4	$\epsilon_i = 2(\epsilon_1 + \epsilon_q) = 2(1 + \nu) \cdot \epsilon_1$

Πίνακας 3.1

Εδώ πρέπει να σημειωθούν τα ακόλουθα για ορισμένες από τις περιπτώσεις:

2. & 4. Το αποτέλεσμα μιας τέτοιας γέφυρας, είναι ευαίσθητο σε φαινόμενα κάμψης, τα οποία, ανάλογα με το σημείο που εμφανίζονται, μπορεί να επηρεάσουν το αποτέλεσμα είτε εμφανίζοντας το ενισχυμένο είτε μειωμένο. Σαν παράδειγμα αναφέρεται μια πιθανή περίπτωση λυγισμού στην οποία το S.G. είναι τοποθετημένο σε σημείο που «αντιλαμβάνεται» την θλίψη λόγω της κάθετης δύναμης καθώς και την τοπική θλίψη λόγω της κάμψης λυγισμού. Μετράται δηλαδή μια συνισταμένη των θλίψεων. Επίσης η διάταξη αυτή είναι ευαίσθητη σε σφάλματα θερμικών μεταβολών.

5. Με μια διάταξη τέτοιου τύπου, οι καμπτικές φορτίσεις δεν αποτελούν πρόβλημα λόγω της κατοπτρικής διάταξης των S.G. σε αντιδιαμετρικά επίπεδα της δοκού ή του άξονα, παρόλα αυτά, η διάταξη αυτή είναι ευαίσθητη σε σφάλματα θερμικών μεταβολών.

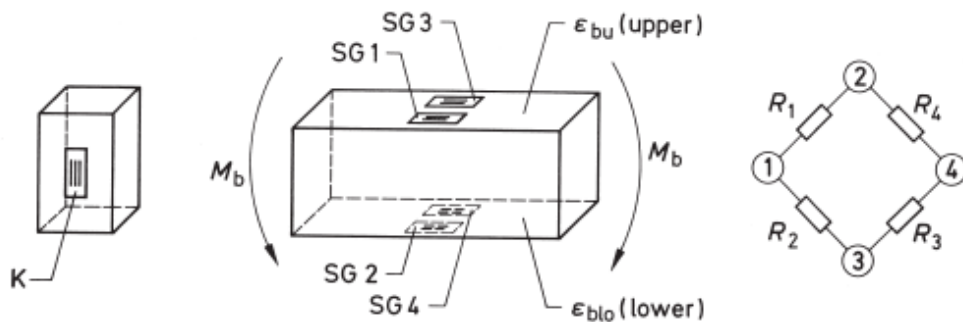
7. Αυτού του τύπου η διάταξη είναι η βέλτιστη ως προς την απάλειψη σφαλμάτων εξαιτίας καμπτικών φαινομένων λόγω της κατοπτρικής διάταξης των S.G.. Τα σφάλματα θερμικών μεταβολών είναι επίσης ελάχιστα σε μια τέτοιου τύπου διάταξη. Η διάταξη αυτού του τύπου είναι ίσως η βέλτιστη για μέτρηση αξονικού φορτίου (π.χ. περιπτώσεις Ωσης πλοίων). Οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση είναι

$$\sigma = \frac{E \cdot \varepsilon_i}{2(1 + \nu)}$$

$$\&, \quad F = A \frac{E \cdot \varepsilon_i}{2(1 + \nu)}$$

3.3.6.2 Μέτρηση κάμψης

Στις επιφάνειες των καμπτόμενων τεμαχίων, εμφανίζονται τοπικά φαινόμενα εφελκυσμού σε μία πλευρά και θλίψης στην αντιδιαμετρική της ίσων και αντίθετων επιμηκύνσεων. Με την τοποθέτηση S.G. όπως στο παρακάτω σχήμα και την εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της γέφυρας Wheatstone, είναι δυνατή η αποτελεσματική μέτρηση κάμψης.



Εικόνα 3.11- Χωροταξική τοποθέτηση Strain Gauges για μέτρηση καμπτικών καταπονήσεων

Περίπτωση	Κλάδος γέφυρας	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	Αποτέλεσμα
1	Εξίσωση γέφυρας	$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4 = \varepsilon_i$				
2	¼-γέφυρα	SG1	R _C	R _C	R _C	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$
		SG2	R _C	R _C	R _C	$\varepsilon_i = \varepsilon_{blo}$
3	¼ γέφυρα με S.G. αντιστάθμισης θερμικών απωλειών	SG1	K	R _C	R _C	$\varepsilon_i = \varepsilon_{bu}$
		SG2	K	R _C	R _C	$\varepsilon_i = \varepsilon_{blo}$
4	Μισή γέφυρα	SG1	SG2	R _C	R _C	$\varepsilon_i = 2 \cdot \varepsilon_b$
5	Διαγώνια γέφυρα	SG1	R _C	SG3	R _C	$\varepsilon_i = 2 \cdot \varepsilon_{bu}$
		SG2	R _C	SG4	R _C	$\varepsilon_i = 2 \cdot \varepsilon_{blo}$
6	Διαγώνια γέφυρα με S.G. αντιστάθμισης θερμικών απωλειών	SG1	K	SG3	K	$\varepsilon_i = 2 \cdot \varepsilon_{bu}$
		SG2	K	SG4	K	$\varepsilon_i = 2 \cdot \varepsilon_{blo}$
7	Πλήρης γέφυρα	SG1	SG2	SG3	SG4	$\varepsilon_i = 4 \cdot \varepsilon_b$

Πίνακας 3.2

Σαν παρατηρήσεις, ισχύει γενικά ό,τι και για την περίπτωση μέτρησης εφελκυσμού και θλίψης. Ειδικά στην περίπτωση πλήρους γέφυρας (περίπτωση 7) οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση είναι για την τάση και τη ροπή κάμψης αντίστοιχα:

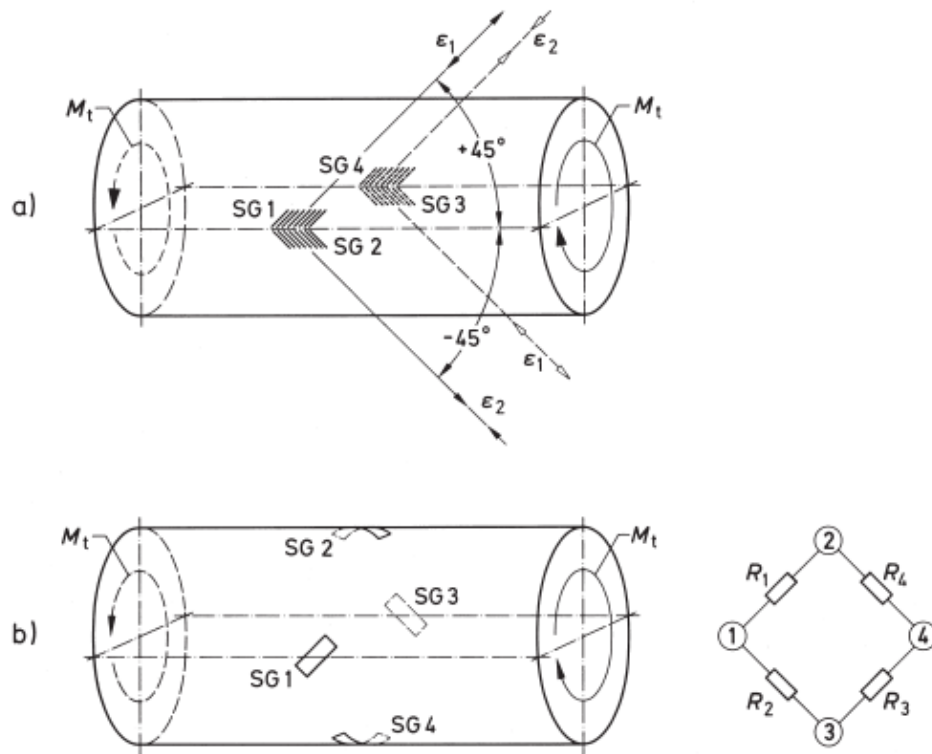
$$\sigma_b = \frac{E}{4} \varepsilon_b$$

$$M_b = \sigma_b \cdot S$$

Με S τη ροπή επιφανείας της διατομής (σε m³).

3.3.6.3 Μέτρηση στρέψης

Η μέτρηση της στρέψης μπορεί να γίνεται είτε για λόγους ελέγχου αντοχής ενός τεμαχίου σε στρεπτικές καταπονήσεις, είτε για λόγους μέτρησης της πραγματικής ωφέλιμης ροπής εξόδου μίας στρεφόμενης μηχανής. Σε αντίθεση με τις δύο παραπάνω περιπτώσεις, σε ένα τεμάχιο υπό στρέψη, οι κύριες τάσεις λαμβάνουν χώρα σε γωνία ±45° από τους κύριους άξονες. Οι κατάλληλες διατάξεις S.G. για μέτρηση τέτοιων καταπονήσεων είναι αυτές της πλήρους και της μισής γέφυρας. Οι διατάξεις των S.G. φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Γίνεται χρήση απλών S.G. καθώς και ειδικών X-rosette S.G..



Εικόνα 3.12- Χωροταξική τοποθέτηση Strain Gauges για μέτρηση στρεπτικών καταπονήσεων

Μεταξύ των δύο, η πλήρης γέφυρα, θεωρείται ως η καλύτερη διάταξη για απόλυτη φαινομένων σύνθετων καταπονήσεων (για παράδειγμα σε έναν άξονα προωστήριας εγκατάστασης πλοίου μπορεί να έχουμε ταυτόχρονα φαινόμενα κάμψης, θλίψης και στρέψης).

Η τάση λόγω στρέψης, τ , υπολογίζεται ως εξής, για διάταξη πλήρους γέφυρας:

$$\tau = \frac{1}{2} \varepsilon_i G$$

Με $\varepsilon_i = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4$ κατά τα γνωστά

Η ροπή στρέψης είναι:

$$T = \frac{\tau \cdot S_p}{r_0}$$

Ή για πλήρη γέφυρα:

$$T = \frac{\varepsilon_i \cdot G \cdot S_p}{2 \cdot r_0}$$

Με S_p την πολική ροπή επιφανείας της διατομής.

Τέλος, η ισχύς P που μεταφέρεται από στρεφόμενο άξονα, υπολογίζεται ως:

$$P = \omega \cdot T$$

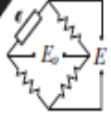




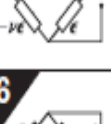

3.3.6 Σφάλματα κατά τις μετρήσεις με S.G.

Παρόλο που οι μετρήσεις με χρήση S.G. είναι από τις πιο αξιόπιστες σε ότι αφορά την ακρίβειά τους, σε σημείο που η μετρούμενη τιμή φτάνει να διαφέρει από την πραγματική σε ποσοστό μικρότερο του 1%, δεν γίνεται να μην αναφερθούν πιθανά σφάλματα κατά τις μετρήσεις αυτές, οι αιτίες τους και δυνατές δράσεις για να μετριαστεί κατά το δυνατόν το μέγεθος αυτών των σφαλμάτων. Τα σφάλματα αυτά οφείλονται είτε σε παραδοχές της θεωρίας της γέφυρας Wheatstone, είτε σε κακή τοποθέτηση των S.G., των καλωδίων, κτλ. είτε στην ελαττωματική μεταφορά του σήματος από τα S.G. στη μετρητική διάταξη.

Σφάλματα λόγω μη-γραμμικότητας της γέφυρας Wheatstone

Αυτού του είδους το σφάλμα συναντάται κατά κανόνα όταν γίνεται χρήση κυκλώματος της γέφυρας Wheatstone που δεν βρίσκεται σε ισορροπία. Μία γέφυρα Wheatstone λέγεται ότι ισορροπεί όταν όλες οι αντιστάσεις των κλάδων της είναι ίσες. Κατά τη στιγμή της μέτρησης επιμήκυνσης με S.G., κάτι τέτοιο δεν ισχύει λόγω των μεταβολών των αντιστάσεων, που είναι άλλωστε και το ζητούμενο. Το μέγεθος της μη-ισορροπίας εξαρτάται από το μέγεθος της επιμήκυνσης που υπόκεινται τα S.G., ένας γενικός κανόνας είναι πως για επιμήκυνση 1.000με το σφάλμα είναι 0,1%, για 10.000με το σφάλμα είναι 1% και για 100.000με είναι 10%. Στην παρακάτω εικόνα φαίνονται οι «μη-γραμμικότητες» για διάφορες διατάξεις της γέφυρας Wheatstone καθώς και οι συνιστώμενες διορθώσεις. Εδώ κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί, όπως άλλωστε φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα, πως σε μετρήσεις ροπής, τέτοια σφάλματα έχουν από μηδενική έως ελάχιστη βαρύτητα διότι όλες οι αντιστάσεις είναι ίσες και μεταβάλλονται με όμοιο τρόπο, δηλαδή ισχύει:

$$\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$$

Bridge/Strain Arrangement (Note 1)	Description	Bridge Output, E_o/E mV/V (Notes 2, 3)	Nonlinearity, η Where $E_o/E = K\epsilon \times 10^{-3} (1-\eta)$ (Notes 2, 3)	Corrections (Note 3, 4)
1 	Single active gage in uniaxial tension or compression.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
2 	Two active gages in uniaxial stress field – one aligned with maximum principal strain, one “Poisson” gage.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{4 + 2F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{4}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{2(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
3 	Two active gages with equal and opposite strains – typical of bending-beam arrangement.	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon}{2} \times 10^{-3}$	$K = \frac{F}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2}$
4 	Two active gages with equal strains of same sign – used on opposite sides of column with low temperature gradient (bending cancellation, for instance).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4 - F\epsilon_i \times 10^{-6}}$
5 	Four active gages in uniaxial stress field two aligned with maximum principal strain, two “Poisson” gages (column).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}$ $\eta = \frac{F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}{2 + F\epsilon(1-\nu) \times 10^{-6}}$	$\epsilon = \frac{2\epsilon_i}{4(1+\nu) - F\epsilon_i(1-\nu) \times 10^{-6}}$
6 	Four active gages in uniaxial stress field – two aligned with maximum principal strain, two “Poisson” gages (beam).	$\frac{E_o}{E} = \frac{F\epsilon(1+\nu) \times 10^{-3}}{2}$	$K = \frac{F(1+\nu)}{2}; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{2(1+\nu)}$
7 	Four active gages with pairs subjected to equal and opposite strains (beam in bending or shaft in torsion).	$\frac{E_o}{E} = F\epsilon \times 10^{-3}$	$K = F; \eta = 0$	$\epsilon = \frac{\epsilon_i}{4}$

- Notes: 1. $(R_1/R_2)_{nom} = 1; (R_3/R_4)_{nom} = 1$ when two or less active arms are used.
2. Constant voltage power supply is assumed.
3. ϵ and ϵ_i (strains) are expressed in microstrain units ($\text{in/in} \times 10^6$) where ϵ_i is the strain indicated by your instrument and ϵ is the actual strain under a single active gage.
4. Expressions in this column correct for Wheatstone bridge nonlinearity (if present) and for the number of active gages in the circuit.

Εικόνα 3.13- Κατηγοριοποίηση μη-γραμμικοτήτων γέφυρας Wheatstone

Σφάλματα λόγω εγκάρσιας ευαισθησίας των S.G.

Η εγκάρσια ευαισθησία των S.G. αναφέρεται στην τάση του να αντιδρά και σε επιμηκύνσεις που είναι κάθετες στον κύριο «αισθητήριο» άξονα του S.G.. Αυτού του είδους η ευαισθησία είναι κατά κανόνα μικρή, της τάξης των μερικών εκατοστών της ευαισθησίας κατά τον κύριο άξονα μέτρησης. Γενικά ισχύει πως όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος πάχους προς μήκος του S.G. τόσο μεγαλύτερα είναι και τα φαινόμενα αυτά, συνεπώς ένα πρώτο μέτρο αντιμετώπισής τους είναι η κατάλληλη επιλογή των S.G. για την κάθε εφαρμογή. Επίσης, πρέπει να γίνεται προσεκτική εκτίμηση της αναμενόμενης φόρτισης. Αν για παράδειγμα, αναμένεται διαξονική φόρτιση, αυτού του είδους τα σφάλματα μπορεί να είναι σημαντικά, αλλά για μονοαξονικές εφαρμογές είναι μηδενικά διότι ο κατασκευαστής των S.G. έχει λάβει υπόψη του παραμορφώσεις και πιθανά σφάλματα λόγω του φαινομένου Poisson και τα έχει καταγράψει στα χαρακτηριστικά του κάθε S.G..

Σφάλματα λόγω κακής ευθυγράμμισης των S.G.

Κατά την εφαρμογή του S.G. στην επιφάνεια του μετρούμενου τεμαχίου, υπάρχει πάντα το ενδεχόμενο απόκλισης της ευθυγράμμισής του από τον άξονα εφαρμογής της κύριας τάσης. Το σφάλμα που προκαλείται από αυτή την αιτία, εξαρτάται από τρεις παράγοντες (εξαιρώντας σφάλματα λόγω εγκάρσιας ευαισθησίας που αποτελούν ξεχωριστή κατηγορία σφαλμάτων):

- i. Τον λόγο των αλγεβρικών τιμών της μέγιστης και της ελάχιστης κυρίας επιμήκυνσης ϵ_p/ϵ_q
- ii. Τη γωνία φ μεταξύ του άξονα της κύριας επιμήκυνσης και του άξονα που είναι επιθυμητό να γίνει η μέτρηση
- iii. Τη γωνία β που αποτελεί την απόκλιση μεταξύ του άξονα που είναι επιθυμητή να γίνει η μέτρηση και του άξονα όπου πραγματικά προσανατολίζεται το S.G.

Είναι φανερό πως σε μια καλοσχεδιασμένη μέτρηση, οι περιπτώσεις ii. και iii. ταυτίζονται.

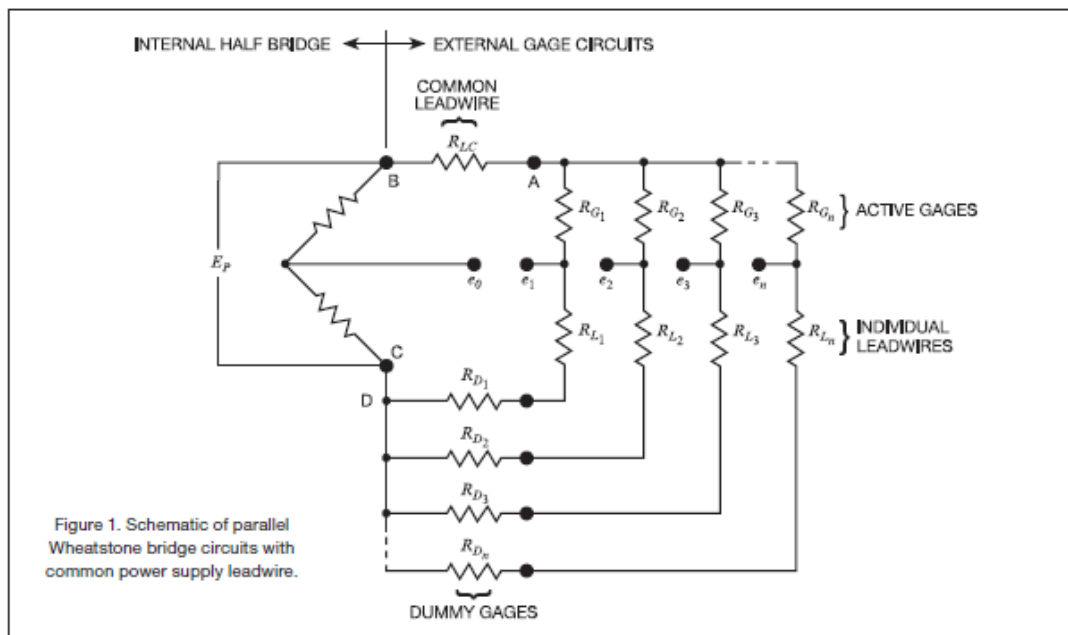
Απόκλιση κατά συνολική γωνία $\alpha = \varphi + \beta$ προκαλεί σφάλμα ίσο με

$$n = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\%$$

Αν λοιπόν κατά την εφαρμογή τεσσάρων S.G. για δημιουργία γέφυρας Wheatstone, το ένα από αυτά προσανατολιστεί με 5° απόκλιση, το σφάλμα του συγκεκριμένου S.G. είναι της τάξης του 1,6%, ενώ συνολικά της γέφυρας είναι $1,6 \cdot 1/4 = 0,4\%$.

Σφάλματα λόγω κοινών καλωδίων σε παράλληλα κυκλώματα Strain Gauge

Πολλές φορές είναι ανάγκη να μετρηθούν περισσότερες από μία μηχανισιακές καταστάσεις ενός τεμαχίου, ταυτόχρονα ή με εναλλασσόμενη μέτρηση. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η βέλτιστη λύση είναι η κατασκευή ξεχωριστού κυκλώματος γέφυρας για κάθε μεμονωμένη μέτρηση. Παρόλα αυτά, πολλές φορές κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό λόγω περιορισμού χώρου ή εξοπλισμού, οπότε μπορεί να επιλεγεί η κατασκευή μίας γέφυρας με περισσότερους των τεσσάρων κλάδων, ικανή να παράξει σήμα σε διαφορετικές διεγέρσεις.



Εικόνα 3.14- Παράδειγμα κοινών καλωδίων σε παράλληλα κυκλώματα

Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να δοθεί μεγάλη προσοχή στη βαθμονόμησή τους ώστε να αποφευχθούν κατά το δυνατόν σφάλματα λόγω αρχικής απόκλισης από την ισορροπία, διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ καλωδίων, ορθής μεταφοράς σήματος και λανθανουσών μετρήσεων.

4. Σχεδιασμός Πειραματικής Διαδικασίας

4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει η περιγραφή της διαδικασίας που ακολουθήθηκε για τον έλεγχο της εφαρμογής της μέτρησης ροπής. Θα αναλυθούν οι σημαντικότερες διαφορές μεταξύ ηλεκτροκινητήρων και μηχανών εσωτερικής καύσης, θα απαριθμηθούν οι προτεινόμενες δοκιμές ώστε να γίνει ο έλεγχος αυτών των διαφορών σε πειραματικές συνθήκες και θα γίνει αναφορά στον εξοπλισμό που θα χρησιμοποιηθεί για την εκτέλεση των δοκιμών καθώς και των κριτηρίων που οδήγησαν στην επιλογή του συγκεκριμένου εξοπλισμού.

4.2 Διαφορές μεταξύ Ηλεκτρομηχανών και Μηχανών Εσωτερικής Καύσης με κριτήριο τη ροπή και προτεινόμενες δοκιμές

Η παραγωγή της ισχύος και κατ' επέκταση της ροπής, γίνεται με διαφορετικό τρόπο στους δύο τύπους μηχανών. Συγκεκριμένα, στους ηλεκτροκινητήρες η ισχύς παράγεται με συνεχή, ή σχεδόν συνεχή ρυθμό, με συνέπεια οι αλλαγές στις επιμηκύνσεις του άξονα να είναι μόνιμες για σταθερές κινητικές καταστάσεις της μηχανής. Αντίθετα στις μηχανές εσωτερικής καύσης, η παραγωγή της ισχύος γίνεται με παλμούς με κάθε παλμό να αντιστοιχεί σε κάθε έκρηξη εντός του εκάστοτε κυλίνδρου. Οι επιμηκύνσεις του άξονα λοιπόν, είναι μεταβαλλόμενες και έχουν πιο κυματοειδή μορφή κατά τη γραφική τους απεικόνιση. Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπόψη, συμπεραίνεται πως ένα ροπόμετρο με ικανοποιητική ευαισθησία στη μέτρηση των παλμών ροπής, είναι ικανοποιητικό και στη μέτρηση ροπής σε ηλεκτρομηχανές.

Μία άλλη διαφορά, είναι οι σχετικά μικρότεροι άξονες που χρησιμοποιούν οι ηλεκτρομηχανές. Επίσης, οι άξονες έχουν σημαντικές διακυμάνσεις ως προς τη διάμετρο, από πολύ μικρές (της τάξης των 10 mm) έως πολύ μεγάλες, πχ άξονες πλοίων. Άρα κρίνεται χρήσιμη μια δοκιμή και εκτίμηση της επιλεχθείσας εφαρμογής σε κάποιον άξονα μικρής διαμέτρου κινητήρα μικρής ισχύος.

Οι ηλεκτροκινητήρες διακρίνονται επίσης για το μικρό μήκος των αξόνων τους και η σύμπλεξη με το εκάστοτε φορτίο, γίνεται με χρήση κομπλέρ. Αυτή η έλλειψη χώρου δημιουργεί διάφορων τύπων προβλήματα ως προς τη στερέωση της συσκευής μέτρησης επί του άξονα καθώς και την ορθή εφαρμογή των Strain Gauges.

Τέλος, προκειμένου να επιτυγχάνεται η εύκολη και γρήγορη σύμπλεξη/αποσύμπλεξη με το κομπλέρ, οι περισσότεροι άξονες διαθέτουν μικρή εσοχή (σφηνάυλακα) επί του άξονα ώστε να εφαρμόζει σφήνα, ασφαρίζοντας τη συναρμογή. Κατά συνέπεια, μια δοκιμή επί τέτοιου τύπου άξονα θα πρέπει να εξεταστεί, ακολουθούμενη από την κατάλληλη μεθοδολογία ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

4.3 Ορισμός των πειραμάτων και επιλογή των διατάξεων.

Με βάση τα παραπάνω, επιλέχθηκε να γίνουν τρεις δοκιμές. Πιο συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε μία δοκιμή στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών με στόχους:

- i. Τη μελέτη της εφαρμογής σε άξονα με σφηνάλακα
- ii. Την αντιμετώπιση πρακτικών δυσκολιών τοποθέτησης της εφαρμογής σε άξονες μικρού μήκους
- iii. Τη σύγκριση θεωρητικής τιμής της ισχύος με την αποδιδόμενη επί του άξονα και συνεπαγόμενη εκτίμηση των απωλειών
- iv. Τη συνολική αξιοπιστία του συστήματος

Η δεύτερη δοκιμή πραγματοποιήθηκε στο Τμήμα Ναυπηγικής ΤΕΙ Αθηνών με βασικό σκοπό την εκτίμηση των αποκλίσεων των μετρήσεων εάν γίνει σχετική περιστροφή του άξονα εφαρμογής του Strain Gauge ως προς την ιδανική του τοποθέτηση. Ο τόπος της δοκιμής επιλέχθηκε διότι το τμήμα Ναυπηγικής του ΤΕΙ διαθέτει ιδιόκτητο ροτόμετρο και σε συνδυασμό με το ροτόμετρο της σχολής Ναυπηγών, έδινε τη δυνατότητα ταυτόχρονης λήψης μετρήσεων για ορθή και περιστρεμμένη κατάσταση του Strain Gauge.

Η τρίτη δοκιμή έγινε στο Εργαστήριο Τριβολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών με βασικό σκοπό τη μέτρηση και αξιολόγηση της επαγόμενης μέτρησης σε άξονα μικρής διαμέτρου και σε κινητήρα μικρής ισχύος και μικρού φορτίου.

4.4 Επιλογή της Τηλεμετρίας

Η επιλογή του κατάλληλου εξοπλισμού για την υπό ανάπτυξη εφαρμογή, είναι σημαντική για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία και ακριβής μέτρηση. Η βέλτιστη λύση περιλαμβάνει τη μέτρηση με χρήση S.G. ως κύκλωμα σήματος και τη χρήση ενός πομπού επί του άξονα όπου θα μεταδίδει τα δεδομένα που συλλέγονται σε δέκτη μέσω τηλεμετρίας. Με αυτή τη σκέψη, αξιολογήθηκε μια σειρά προϊόντων με αυτά τα χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά που θα έπρεπε να προσφέρει το προϊόν που θα χρησιμοποιούνταν, παρουσιάζονται με συντομία παρακάτω:

- Φορητότητα.
- Ευκολία/απλότητα στην εφαρμογή και χρήση.
- Χρήση της μεθόδου των Strain Gauges τύπου ηλεκτρικής αντίστασης για λήψη μετρήσεων.
- Δυνατότητα μέτρησης κάθε μεγέθους άξονα.
- Υψηλή ακρίβεια.
- Ικανότητα να αντέχει σε μεγάλες ταχύτητες περιστροφής
- Αντοχή στις παρεμβολές από άλλες ηλεκτρονικές συσκευές
- Δυνατότητα ζωντανής (live) λήψης και αποθήκευσης των δεδομένων σε H/Y.
- Βέλτιστη σχέση τιμής με όλα τα παραπάνω

4.4.1 Έρευνα της Τηλεμετρίας

Αξιολογήθηκε σειρά εμπορικών εφαρμογών

- i. Χρησιμοποιώντας το βιβλίο οδηγιών χρήσης της κάθε μίας,
- ii. Επικοινωνώντας με τον εμπορικό αντιπρόσωπο όπου υπήρχε
- iii. Αναλύοντας, εν συντομία, τις προτιμήσεις της ακαδημαϊκής κοινότητας και των εμπορικών χρηστών για αντίστοιχες εφαρμογές.

Με βάση τα παραπάνω, οι εταιρίες και τα προϊόντα που αξιολογήθηκαν παρουσιάζονται εν συντομία παρακάτω:

1. Datum Electronics- Series 430 Compact
2. Manner -Sensortelemmetrie
3. Binsfeld Engineering Inc.- Torque Trak 10k
4. ATI/Omega

Με χρήση των περιορισμών που τέθηκαν, οι επιλογές δύνανται να περιοριστούν σε πρώτο στάδιο. Το προϊόν της ATI/Omega απορρίφθηκε λόγω μη εύρεσης εμπορικού αντιπροσώπου και κατά συνέπεια πιθανών δυσκολιών στην εισαγωγή (επιπρόσθετα έξοδα εκτελωνισμού, μεταφοράς, κλπ.). Το προϊόν της Manner απορρίφθηκε διότι παρόλο που είναι υψηλότερης ακριβείας από τα υπόλοιπα, είναι και το πιο δύσχρηστο ως προς τη φορητότητα και την εγκατάσταση.

Συνεπώς, στο επόμενο στάδιο αναλυτικότερης αξιολόγησης, προχώρησαν τα προϊόντα της Binsfeld και της Datum. Ακολούθησε επικοινωνία με τις εταιρίες που εκπροσωπούν την Binsfeld και την Datum στην Ελλάδα με στόχο τη λήψη εμπορικών προσφορών καθώς και σχετικής βιβλιογραφίας των υπό εξέταση προϊόντων. Με βάση τη βιβλιογραφία, παράχθηκε ένας πίνακας σύγκρισης των δύο προϊόντων ο οποίος παρουσιάζεται στο σχετικό παράρτημα. Εν συντομία αναφέρονται τα εξής:

- Η τιμή και των δύο προϊόντων είναι της τάξης των 5000€.
- Τα δύο προϊόντα είναι παρόμοια και αποτελούνται από έναν πομπό και μία θήκη για τη μπαταρία του πομπού που τοποθετούνται επί του άξονα και ενός δέκτη που λαμβάνει το σήμα της τηλεμετρίας.
- Το προϊόν της Binsfeld υπόσχεται συνολική ακρίβεια της τάξης του 1% ενώ αυτό της Datum παραθέτει μόνο την ακρίβεια των ηλεκτρονικών του που είναι της τάξης του 0,1%, όσο και της Binsfeld.
- Το προϊόν της Binsfeld λειτουργεί με απλές μπαταρίες των 9V ενώ αυτό της Datum λειτουργεί με δικές του μπαταρίες που απαιτούν εξειδικευμένο φορτιστή.
- Λόγω του παραπάνω, ο χρόνος συνεχόμενης λειτουργίας του Binsfeld είναι 24 ώρες ενώ του Datum είναι 72 ώρες.
- Το προϊόν της Binsfeld δεν έχει περιορισμό σε ανώτατη ή/και κατώτατη διάμετρο άξονα που έχει δυνατότητα να εφαρμοστεί, αντίθετα αυτό της Datum κινείται σε εύρος μεταξύ 30mm και 500mm.

Με βάση τα παραπάνω κρίθηκε ότι η ακρίβεια στις μετρήσεις καθώς και η φορητότητα και η τιμή είναι παρόμοιες και για τα δύο προϊόντα. Παρά το μεγαλύτερο χρόνο που δύναται να λειτουργήσει το προϊόν της Datum, η δυσκολία χειρισμού εξειδικευμένου τύπου μπαταριών ως προς την ευκολία αντικατάστασης σε περίπτωση βλάβης καθώς και η ανάγκη μεταφοράς ενός έξτρα εξαρτήματος (εξειδικευμένος φορτιστής), επιδρούν αρνητικά στην επιλογή του. Ο βασικός παράγοντας απόρριψης του προϊόντος της Datum όμως, δεν είναι άλλος από τον περιορισμό στα μεγέθη αξόνων που έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθούν. Η δυνατότητα αυτή έγκειται ο στα μέσα στερέωσης επί του άξονα που χρησιμοποιεί κάθε όργανο καθώς και το σχεδιασμό του πομπού. Η διαφορά καθώς και η αιτία του περιορισμού γίνονται εύκολα κατανοητές από της παρακάτω εικόνες



Εικόνα 4.1- Datum Electronics- Series 430 Compact



Εικόνα 4.2- Binsfeld Engineering Inc.- Torque Trak 10k

Καθώς ένα βασικό πεδίο μέτρησης είναι οι Ηλεκτρομηχανές, οι μικρής διαμέτρου άξονες, είναι κάτι που συναντάται συχνά. Όμως λόγω της φύσης και εξειδίκευσης του εργαστηρίου, ανήκει άλλωστε στη Σχολή Ναυπηγών Μηχ. Μηχ., μία από τις μελλοντικές εφαρμογές είναι και η μέτρηση ροπής σε άξονες συστημάτων ηλεκτρικής πρόωσης πλοίων, ηλεκτροκινητήρες δηλαδή που χρησιμεύουν σαν κύριο προωστήριο μέσο πλοίων. Με αυτό το ζητούμενο και λαμβάνοντας υπόψη πως ένας κύριος άξονας προωστήριας εγκατάστασης πλοίου δύναται να ξεπερνά σε διάμετρο τα 600mm, το προϊόν της Datum πρέπει να απορριφθεί.

Τέλος, εδώ αξίζει να γίνει αναφορά πως το προϊόν της Binsfeld δείχνει να είναι αυτό που προτιμάται από την ακαδημαϊκή και εμπορική κοινότητα για τις διάφορες εφαρμογές μέτρησης ροπής, οι οποίες είναι κοντινές ως προς τις εφαρμογές που σκοπεύει να κάνει το εργαστήριο. Συγκεκριμένα πολλά εκπαιδευτικά ιδρύματα (ΤΕΙ Αθήνας, ΕΜΠ, κτλ.) αλλά και πολλά ναυπηγεία ανά τον κόσμο το χρησιμοποιούν σαν μέσο μέτρησης ροπής, επιπρόσθετα του εκάστοτε μετρητικού του πλοίου, κατά την εκτέλεση θαλασσίων δοκιμών (Sea Trials).

Για να ολοκληρωθεί το σύστημα μέτρησης, κρίνεται απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί επίσης κάποια μέθοδος συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων. Αναλύθηκαν πολλές πιθανές λύσεις για αυτό το σκοπό. Συγκεκριμένα:

1. Η χρήση Κάρτας Συλλογής Δεδομένων (Data Acquisition Card)
2. Η χρήση φορητού Data Logger
3. Η χρήση παλμογράφου
4. Η χρήση πολυμέτρου με δυνατότητα αποστολής και αποθήκευσης δεδομένων σε Η/Υ

Η πλειοψηφία αυτών των μεθόδων, δοκιμάστηκαν στις πειραματικές εφαρμογές όπως περιγράφεται παρακάτω. Εδώ εν συντομία αξίζει να αναφερθούν ορισμένα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των μεθόδων αυτών

- Το Data Logger είναι η πιο εύχρηστη λύση καθώς είναι το πιο μικρό σε μέγεθος με τα λιγότερα περιφερειακά εξαρτήματα από τις υπόλοιπες
- Η Κάρτα Συλλογής Δεδομένων και το πολύμετρο απαιτούν σύνδεση με Η/Υ προκειμένου να στέλνουν ζωντανά τα δεδομένα προς αποθήκευση
- Ο παλμογράφος είναι η πιο ογκώδης λύση και πιθανώς να απαιτεί σύνδεση με Η/Υ για την αποστολή των δεδομένων
- Ως προς το ρυθμό δειγματοληψίας, κατατάσσονται από το χαμηλότερο στον υψηλότερο ως: Πολύμετρο, Data Logger, Κάρτα Συλλογής Δεδομένων, Παλμογράφος
- Ως προς την ακρίβεια, η κατάταξη είναι η ίδια με παραπάνω, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει πως η ακρίβεια του πολυμέτρου δεν είναι ικανοποιητική για την εφαρμογή (της τάξης του 0,1 mV).

Συνίσταται, με βάση τα παραπάνω, να γίνεται χρήση Data Logger για εφαρμογές εκτός εργαστηρίου, σε βιομηχανίες και κυρίως επί πλοίων όπου ο χώρος είναι περιορισμένος. Για εφαρμογές που απαιτείται υψηλή ακρίβεια συνίσταται η χρήση της κάρτας συλλογής δεδομένων ή του παλμογράφου εάν και ο χώρος που διατίθεται είναι επαρκής.

4.4.2 Binsfeld Engineering TorqueTrak 10k Torque Telemetry System

Πρόκειται για ένα σύστημα μέτρησης, ροπής, χωρίς όμως να περιορίζονται αποκλειστικά σε αυτό οι δυνατότητες του, που βασίζεται στην αρχή της τροφοδότησης μίας γέφυρας Wheatstone με σταθερή τάση διέγερσης και μέτρηση της προκαλούμενης τάσης σήματος κατά τη μεταβολή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της γέφυρας Wheatstone καθώς παραμορφώνεται στρεπτικά.

Αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τον πομπό, με εμπορική ονομασία TX10K-S και το δέκτη, RX10K όπως φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 4.3- Binsfeld Engineering Inc.- Torque Trak 10k (Πομπός)



Εικόνα 4.4- Binsfeld Engineering Inc.- Torque Trak 10k (Δέκτης)

Άλλα δευτερεύοντα μέρη που χρησιμεύουν στη λειτουργία του συστήματος, είναι το τηλεχειριστήριο του πομπού, με εμπορική ονομασία RM10K καθώς και η υποδοχή της μπαταρίας του πομπού.



Εικόνα 4.5- Binsfeld Engineering Inc.- Torque Trak 10k (Τηλεχειριστήριο)

4.4.1.1. Περιγραφή/αρχή λειτουργίας

Αφού κολληθεί η κατάλληλη για την εφαρμογή γέφυρα Wheatstone στον άξονα και γίνει η καλωδίωσή της με τον ενδεδειγμένο τρόπο, τοποθετούνται επί του άξονα ο πομπός καθώς και η υποδοχή της μπαταρίας και ασφαλίζονται με ειδική, αυτοκόλλητη ταινία, ενισχυμένη διαμήκως, ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερότητά τους και η ασφάλεια τους για μετακινήσεις λόγω φυγόκεντρων δυνάμεων κατά την περιστροφή του άξονα. Το σύστημα πομπού-μπαταρίας-γέφυρας Wheatstone λειτουργεί ως εξής. Κατά την περιστροφή του άξονα, η γέφυρα Wheatstone παραμορφώνεται (βλέπε προηγούμενο κεφάλαιο) αναλογικά με την επιμήκυνση του άξονα. Ο πομπός διεγείρει τη γέφυρα με ρεύμα ρυθμιζόμενης τάσης, συνήθως για τις περισσότερες εφαρμογές 2,5V. Ακολουθώντας, «διαβάζει» την τάση του ρεύματος σήματος της γέφυρας, το οποίο λαμβάνει τιμές $\pm 10V$ (παρόλο που τα όρια ασφαλείας των ηλεκτρονικών του πομπού είναι κατά 20% μεγαλύτερα, στα $\pm 12V$). Ο πομπός μετατρέπει την τάση σήματος σε σήμα εκπομπής το οποίο εκπέμπει συνεχόμενα. Ο δέκτης λαμβάνει το παραπάνω σήμα το οποίο μετατρέπει με τη σειρά του σε ένδειξη στην οθόνη στο εμπρός μέρος του δέκτη, σε τάση στους σχετικούς ακροδέκτες ή σε δεκαεξαδικό κώδικα στη θύρα DB9 στο πίσω μέρος του.

Η λήψη και περαιτέρω ανάλυση του σήματος δύναται να γίνει με τρεις τρόπους.

1. Με απλή ανάγνωση της οθόνης του δέκτη. Η μέθοδος αυτή είναι η ευκολότερη ως προς την εκτέλεση, μικρής ακρίβειας αλλά η πλέον κατάλληλη αν ενδιαφέρει η ανάγνωση απλών στιγμιότυπων της ένδειξης, για παράδειγμα σε άξονα πρόωσης πλοίου κατά την εκτέλεση θαλασσιών δοκιμών (Sea Trials)
2. Με χρήση ενδεδειγμένης εμπορικής συσκευής και λογισμικού. Η σύνδεση γίνεται μέσω της θύρας DB9.
3. Με σύνδεση πολυμέτρου ή παλμογράφου ή άλλης συσκευής αποθήκευσης δεδομένων (Data Acquisition Device) στους ακροδέκτες της τάσης. Με χρήση αυτής της μεθόδου επιτυγχάνεται υψηλή ακρίβεια δειγματοληψίας και καταγραφής των μετρούμενων τάσεων.

Στο Παράρτημα φαίνονται οι σχετικές σελίδες από το βιβλίο οδηγιών χρήσης του προϊόντος.

4.4.1.2 Μεταφορά μετρούμενης τάσης σε ροπή στο Binsfeld Engineering TorqueTrak 10k Torque Telemetry System

Όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 3, για μετρήσεις με Strain Gauges, η σχέση που συνδέει την τάση τροφοδοσίας με την τάση σήματος είναι:

$$\frac{V_0}{V_S} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) = \frac{GF}{4} \cdot \varepsilon_i$$

Με

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

Και

$k = GF$ (Gauge Factor)

Που αποτελεί τη σταθερά μεταφοράς της επιμήκυνσης του Gauge σε ηλεκτρική αντίσταση και δίνεται από τον κατασκευαστή.

Με αντικατάσταση του ε_i στον τύπο του κεφαλαίου 3.3.6.3:

$$T = \frac{\varepsilon_i \cdot G \cdot S_p}{2 \cdot r_0}$$

Προκύπτει:

$$T = \frac{8 \cdot V_s \cdot G \cdot S_p}{2 \cdot V_{EXC} \cdot GF \cdot d_0}$$

Και με

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Και

$$S_p = \frac{\pi (d_0^4 - d_i^4)}{32}$$

Προκύπτει τελικά:

$$T = \frac{8 \cdot V_s \cdot E \cdot \pi \cdot (d_0^4 - d_i^4)}{4 \cdot 32 \cdot V_{EXC} \cdot (1 + \nu) \cdot GF \cdot d_0}$$

Και για το συγκεκριμένο σύστημα τηλεμετρίας, η Binsfeld συστήνει να γίνεται και μια διόρθωση ως προς την ενίσχυση (Gain) του πομπού που είναι μεταβλητή από το χρήστη, έτσι ο τύπος λαμβάνει την τελική μορφή:

$$T_{FS} = \frac{V_{FS} \cdot \pi \cdot E \cdot 4 \cdot (D_0^4 - D_i^4)}{V_{EXC} \cdot GF \cdot N \cdot 16000 \cdot (1 + \nu) \cdot G_{XMT} \cdot D_0}$$

Με

Σύμβολο	Μονάδες	Σχόλια
D_i	(mm)	Εσωτερική διάμετρος άξονα
D_0	(mm)	Εξωτερική διάμετρος άξονα
E	(N/mm ²)	Μέτρο Ελαστικότητας
V_{FS}	(Volts)	Τάση σήματος πλήρους κλίμακας (συνήθως 10 Volts)
V_{EXC}	(Volts)	Τάση τροφοδοσίας γέφυρας (2,5 Volts)
GF	(-)	Gauge Factor (Σταθερά που δίνεται από τον κατασκευαστή των Gauges)
N	(-)	Αριθμός ενεργών Gauges (4 για πλήρη γέφυρα Wheatstone)
ν	(-)	Λόγος του Poisson
G_{XMT}	(-)	Τιμή της ενίσχυσης του πομπού (μεταβαλλόμενη από το χρήστη, συνήθως 4000)
T_{FS}	(N·m)	Ροπή πλήρους κλίμακας

Πίνακας 4.1

5. Περιγραφή Πειραμάτων και Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

5.1 Εισαγωγή ως προς την εκτέλεση και επεξεργασία των πειραμάτων

Σε όλες τις δοκιμές, δημιουργήθηκαν αρχεία είτε .csv (Comma Separated Values) είτε .txt χωρισμένα σε στήλες (Tab Delimited Values) τα οποία εισήχθησαν στο MS Excel του Microsoft Office ώστε να υποστούν επεξεργασία. Η πρώτη ενέργεια ήταν η προσπάθεια να μετριάσει ο Ηλεκτρομαγνητικός «θόρυβος». Αυτό επιτεύχθηκε με τη μέθοδο της Εκθετικής Εξομάλυνσης όπως περιγράφεται παρακάτω:

Έστω πραγματική τιμή A , προβλεπόμενη τιμή B και σταθερά εξομάλυνσης c . Η εξίσωση υπολογισμού της προβλεπόμενης τιμής είναι

$$B_{t+1} = cA_t + (1 - c)B_t$$

Με t το χρονικό βήμα και $0 \leq c \leq 1$.

Ακολούθως, με υπολογισμό της μέσης τάσης για το χρονικό διάστημα της μέτρησης και χρήση αυτής της τιμής υπολογίστηκε η μέση ροπή που παράγαγε ο κινητήρας στο παραπάνω χρονικό διάστημα και έγιναν οι απαραίτητες συγκρίσεις.

- Σύγκριση με θεωρητική τιμή ροπής εξόδου
- Σύγκριση μεταξύ ευθυγραμμισμένης και μη-ευθυγραμμισμένης τιμής

Η μέθοδος και σχέσεις υπολογισμού της ροπής ως προς τη μετρούμενη τάση περιγράφονται εν συντομία παρακάτω.

Υπολογισμός της ροπής πλήρους κλίμακας, της ροπής δηλαδή που αντιστοιχεί σε ένδειξη της οθόνης του TorqueTrak 10k ίσης με $\pm 10\text{VDC}$. Ο υπολογισμός γίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$T_{FS} = \frac{V_{FS} \cdot \pi \cdot E \cdot 4 \cdot (D_0^4 - D_i^4)}{V_{EXC} \cdot GF \cdot N \cdot 16000 \cdot (1 + \nu) \cdot G_{XMT} \cdot D_0}$$

Με

Σύμβολο	Μονάδες	Σχόλια
Di	(mm)	Εσωτερική διάμετρος άξονα
D0	(mm)	Εξωτερική διάμετρος άξονα
E	(N/mm ²)	Μέτρο Ελαστικότητας
VFS	(Volts)	Τάση σήματος πλήρους κλίμακας (συνήθως 10 Volts)
VEXC	(Volts)	Τάση τροφοδοσίας γέφυρας (2,5 Volts)
GF	(-)	Gauge Factor (Σταθερά που δίνεται από τον κατασκευαστή των Gauges)
N	(-)	Αριθμός ενεργών Gauges (4 για πλήρη γέφυρα Wheatstone)
ν	(-)	Λόγος του Poisson
GXMT	(-)	Τιμή της ενίσχυσης του πομπού (μεταβαλλόμενη από το χρήστη, συνήθως 4000)
TFS	(N·m)	Ροπή πλήρους κλίμακας

Πίνακας 5.1

Η τιμή αυτή υπολογίζεται μία φορά και αποτελεί την τιμή της ροπής που αντιστοιχεί σε ένδειξη ± 10 VDC για συγκεκριμένο άξονα με συγκεκριμένες ρυθμίσεις του ροπομέτρου.

Η αντιστοίχιση της ροπής με την τάση είναι γραμμική, οπότε από τον παρακάτω τύπο, με V τη μετρούμενη τιμή της τάσης σήματος προκύπτει η ροπή, T:

$$T = V \frac{T_{FS}}{V_{FS}} = \frac{V \cdot T_{FS}}{10}$$

Εδώ να σημειωθεί πως αν αντικατασταθεί το V_{FS} με το εκάστοτε μετρούμενο V, προκύπτει η τιμή της ροπής που αντιστοιχεί σε αυτή την τάση, όμως για μεγάλο όγκο δεδομένων η παραπάνω μέθοδος είναι προτιμητέα.

Τέλος έγινε αξιολόγηση των αποτελεσμάτων και διατύπωση των συμπερασμάτων ως προς τον σκοπό της κάθε ξεχωριστής δοκιμής.

5.2 Δοκιμή στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της ΣΗΜΜΥ στις 19/10/2015

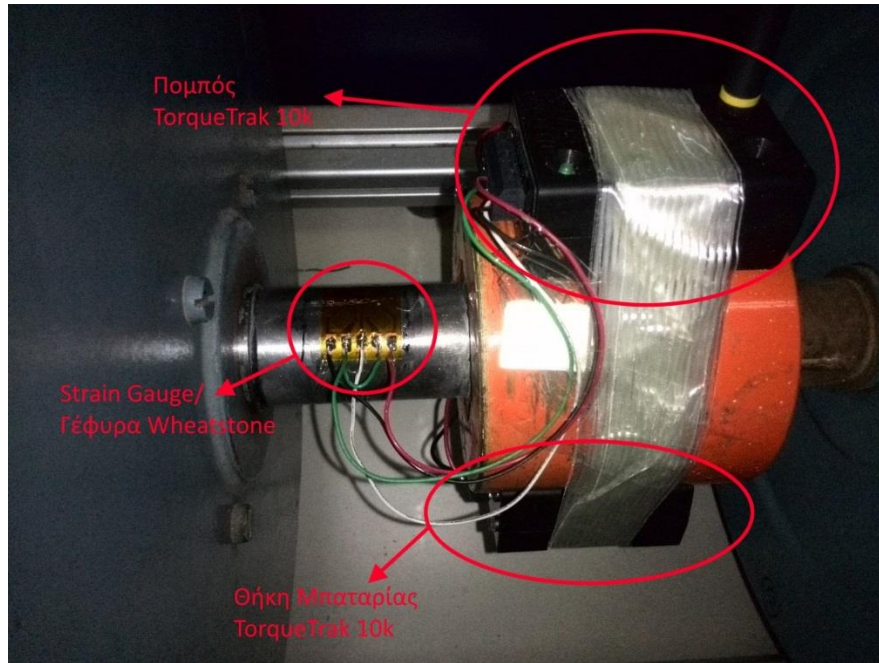
5.2.1 Εισαγωγή

Η δοκιμή που έγινε στο εργαστήριο ηλεκτρικών μηχανών της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών είχε ως βασικό σκοπό την πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς του ροπομέτρου TT10k κατά την εφαρμογή του σε άξονα Ηλεκτρομηχανής που διαθέτει σφηναύλακα. Ο σφηναύλακας αποτελεί την εσοχή του άξονα (αύλακας) στην οποία εφαρμόζει η σφήνα μεταξύ άξονα και συμπλέκτη (κομπλέρ), προκειμένου το σύστημα άξονα-σφήνας-κομπλέρ να δημιουργήσει συσσωμάτωμα κατά την περιστροφή του και να εξασφαλίσει την ένωση του άξονα με το εκάστοτε φορτίο. Η πλειοψηφία των ηλεκτρομηχανών διαθέτουν άξονα με σφηναύλακα για μεγαλύτερη ευκολία στη σύνδεση με διαφόρων τύπων κομπλέρ κατά τη λειτουργία τους, συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η πειραματική διερεύνηση αυτού του φαινομένου.

5.2.2 Περιγραφή της διάταξης

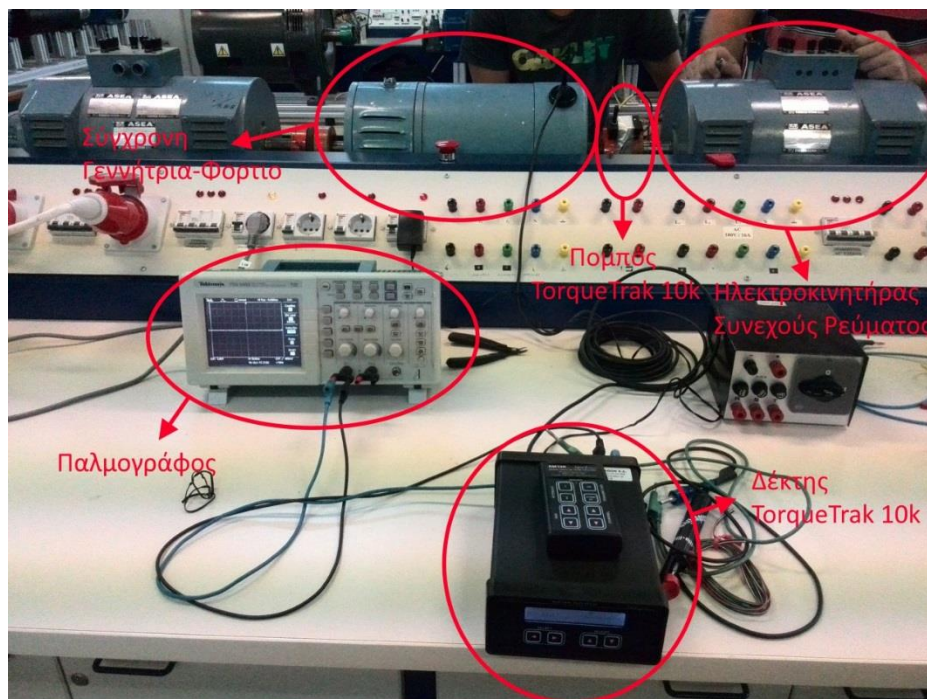
Χρησιμοποιήθηκε διάταξη που βρίσκεται στο Εργαστήριο Ηλεκτρικών Μηχανών της ΣΗΜΜΥ και αποτελείται από μία σύγχρονη μηχανή και δύο μηχανές συνεχούς ρεύματος συνδεδεμένες στα δύο άκρα της. Η διάταξη δίνει δυνατότητα χρήσης κάθε μηχανής είτε σαν γεννήτρια ή σαν κινητήρα. Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, έγινε χρήση της μίας μηχανής Συνεχούς Ρεύματος σαν κινητήρα και της Σύγχρονης μηχανής σαν γεννήτρια-φορτίο. Η δεύτερη μηχανή Συνεχούς Ρεύματος παρέμεινε ανενεργή αλλά συνδεδεμένη στη διάταξη.

Η διαδικασία εφαρμογής του Strain Gauge έγινε σύμφωνα με τη διαδικασία που συστήνει ο κατασκευαστής του ροπομέτρου και περιγράφεται αναλυτικά στο Παράρτημα, εδώ αξίζει να γίνει αναφορά μόνο στο ότι η περιοχή που επιλέχθηκε για την εφαρμογή, είναι εκείνη που βρίσκεται αντιδιαμετρικά του σφηναύλακα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθούν πιθανές επιρροές του σφηναύλακα στην κατανομή των επιφανειακών επιμηκύνσεων του άξονα και κατά συνέπεια να επηρεαστεί όσο το δυνατόν λιγότερο η μετρούμενη ροπή. Επίσης, το Strain Gauge εφαρμόστηκε, κατά το δυνατόν, στο μέρος του κινητήρα έτσι ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ακρίβεια στη μέτρηση της ροπής εξόδου, η αποφυγή δηλαδή άλλων παρεμβαλλόμενων εξαρτημάτων που θα συνιστούσαν απώλειες. Ακολούθως έγινε εφαρμογή και ασφάλιση του πομπού και της μπαταρίας του επί του κομπλέρ για λόγους οικονομίας χώρου. Ο πομπός και η μπαταρία εφαρμόστηκαν αντιδιαμετρικά για να εξαλειφθούν πιθανά φαινόμενα ταλάντωσης του άξονα. Η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5.1



Εικόνα 5.1- Διάταξη πομπού μπαταρίας

Για τη συλλογή των δεδομένων έγινε χρήση παλμογράφου σε σύνδεση με την αναλογική θύρα εξόδου του δέκτη. Ο παλμογράφος κατέγραφε την τάση εξόδου με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας (0,002 δευτερόλεπτα ανά τιμή), και μετέφερε τα δεδομένα σε Η/Υ με τον οποίο βρισκόταν σε σύνδεση μέσω καλωδίου USB. Τα δεδομένα αποθηκεύονταν σε «πακέτα» διάρκειας 5 δευτερολέπτων ανά «πακέτο». Η όλη διάταξη, πλην του Η/Υ που προστέθηκε αργότερα, φαίνεται εικόνα 5.2.



Εικόνα 5.2- Πλήρης πειραματική διάταξη

Επίσης, για την ανάγνωση των στροφών του άξονα, υπήρχε καλώδιο συνδεδεμένο με τον κινητήρα το οποίο κατέληγε σε δύο ακροδέκτες που συνδέονταν με πολύμετρο και γινόταν ανάγνωση της τάσης των ακροδεκτών. Γνωρίζοντας πως τα 20 Volt αντιστοιχούν σε 1000 RPM γινόταν η μεταφορά της τάσης σε στροφές ανά λεπτό. Τέλος, με χρήση πολυκάναλου Power Analyzer του Εργαστηρίου Ναυτικής Μηχανολογίας, γινόταν καταγραφή ταυτόχρονα του ρεύματος και τάσης τυμπάνου του κινητήρα, του ρεύματος και τάσης της γεννήτριας καθώς και υπολογισμός της ισχύος που απορροφούσε η γεννήτρια.

5.2.2 Διαδικασία των μετρήσεων

Συνολικά έγιναν μετρήσεις για πέντε καταστάσεις φορτίου που απορροφούσε η γεννήτρια καθώς και μίας πλήρους άφορτης κατάστασης. Οι συνολικά έξι καταστάσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 5.2 αριθμημένες και στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας, θα αναφέρονται με τον χαρακτηριστικό αριθμό τους.

	Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος		Σύγχρονη Γεννήτρια			Στροφές (V _{RPM})	Στροφές (RPM)
	Τάση (V _{DC})	Ρεύμα (I _{DC})	Τάση (V _{gen})	Ρεύμα (I _{gen})	Ισχύς (P _{gen})		
	[Volts]	[Amperes]	[Volts]	[Amperes]	[Watts]	[Volts]	[RPM]
0	146,3	0,75	0	0	0	14,8	740
1	145,4	2,05	78	0,5	37,5	14,7	735
2	144,3	2,8	74,7	0,957	71,3	14,5	725
3	143,9	3,54	73	1,4	102	14,4	720
4	142,8	4,25	71,6	1,84	132	14,2	710
5	142,4	4,95	70,5	2,25	159	14,1	705

Πίνακας 5.2

5.2.3 Αποτελέσματα δοκιμών

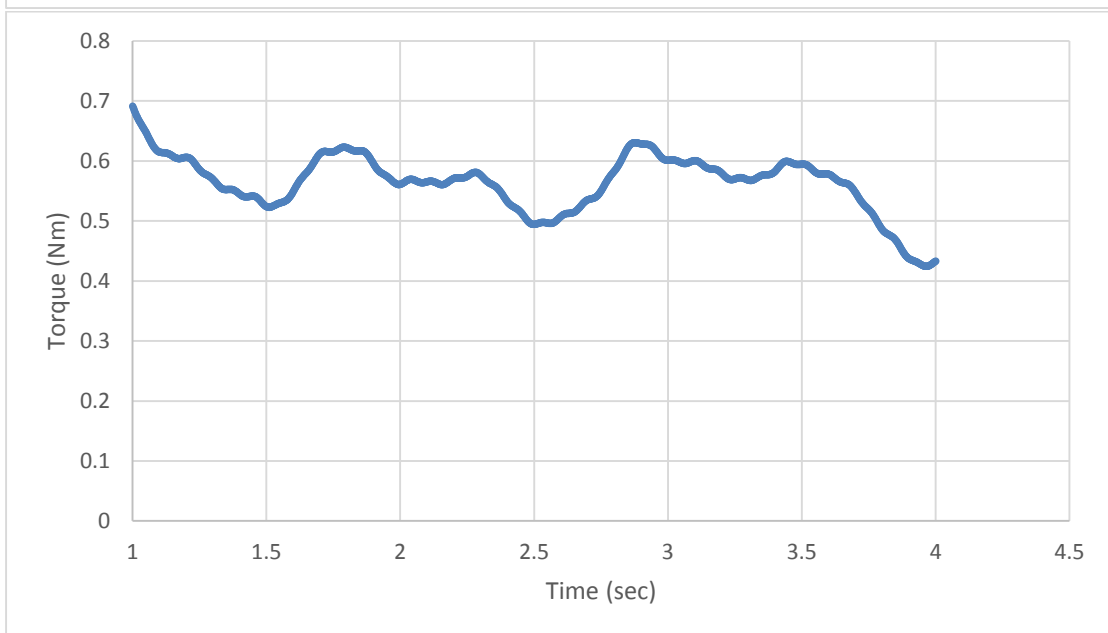
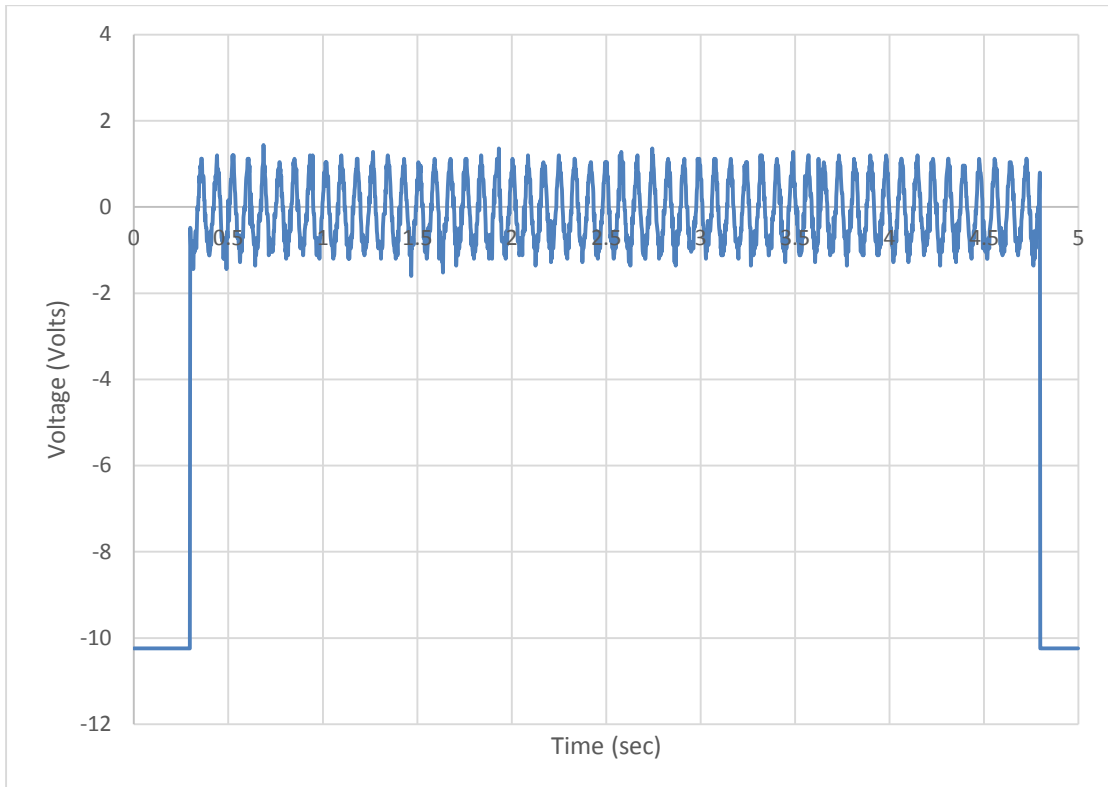
Για τον υπολογισμό της ροπής έγινε χρήση των τιμών όπως φαίνονται στον πίνακα 5.3. Η προσέγγιση σε αυτό το στάδιο, έγινε με θεώρηση ομαλού άξονα, χωρίς σφηναύλακα ώστε να ερευνηθεί το μέγεθος της απόκλισης, αν υπάρχει.

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
D_i	(mm)	0
D_0	(mm)	32
E	(N/mm ²)	206800
V_{FS}	(Volts)	10
V_{EXC}	(Volts)	2,5
GF	(-)	2
N	(-)	4
v	(-)	0,3
G_{XMT}	(-)	4000
T_{FS}	(N·m)	511.7

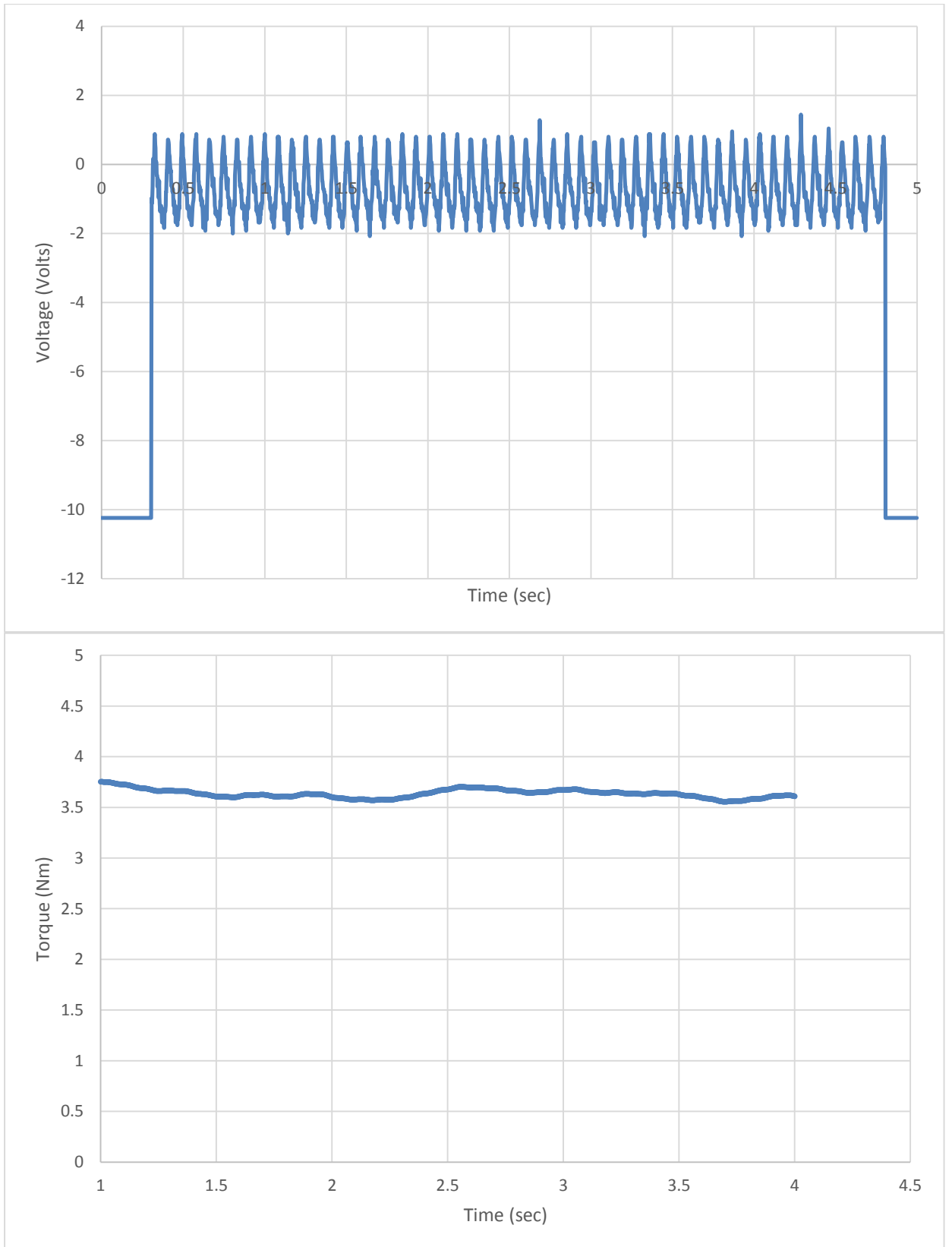
Πίνακας 5.3

Τα δεδομένα της τάσης, όπως ελήφθησαν από τον παλμογράφο, όπως γίνεται προφανές περιλαμβάνουν τιμές στα άκρα τους που πρέπει να παραληφθούν καθώς και να υποστούν εκθετική εξομάλυνση προκειμένου να εξαλειφθεί ο ηλεκτρομαγνητικός θόρυβος που επηρέαζε τις μετρήσεις του παλμογράφου. Μετά από την επεξεργασία αυτή και με εφαρμογή της μεθόδου υπολογισμού της ροπής κατά τα γνωστά, προέκυψαν τα διάφορα διαγράμματα. Παρακάτω φαίνονται τα διαγράμματα των διαφόρων περιπτώσεων.

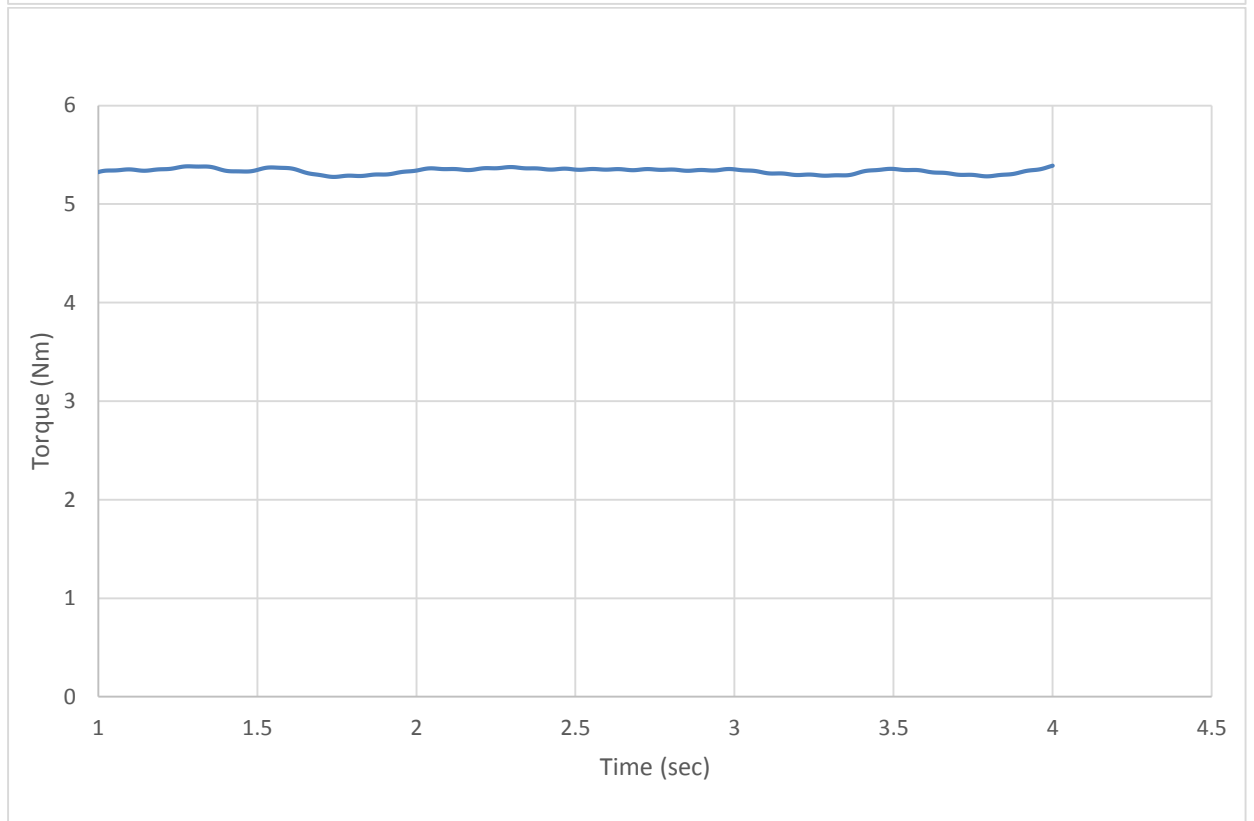
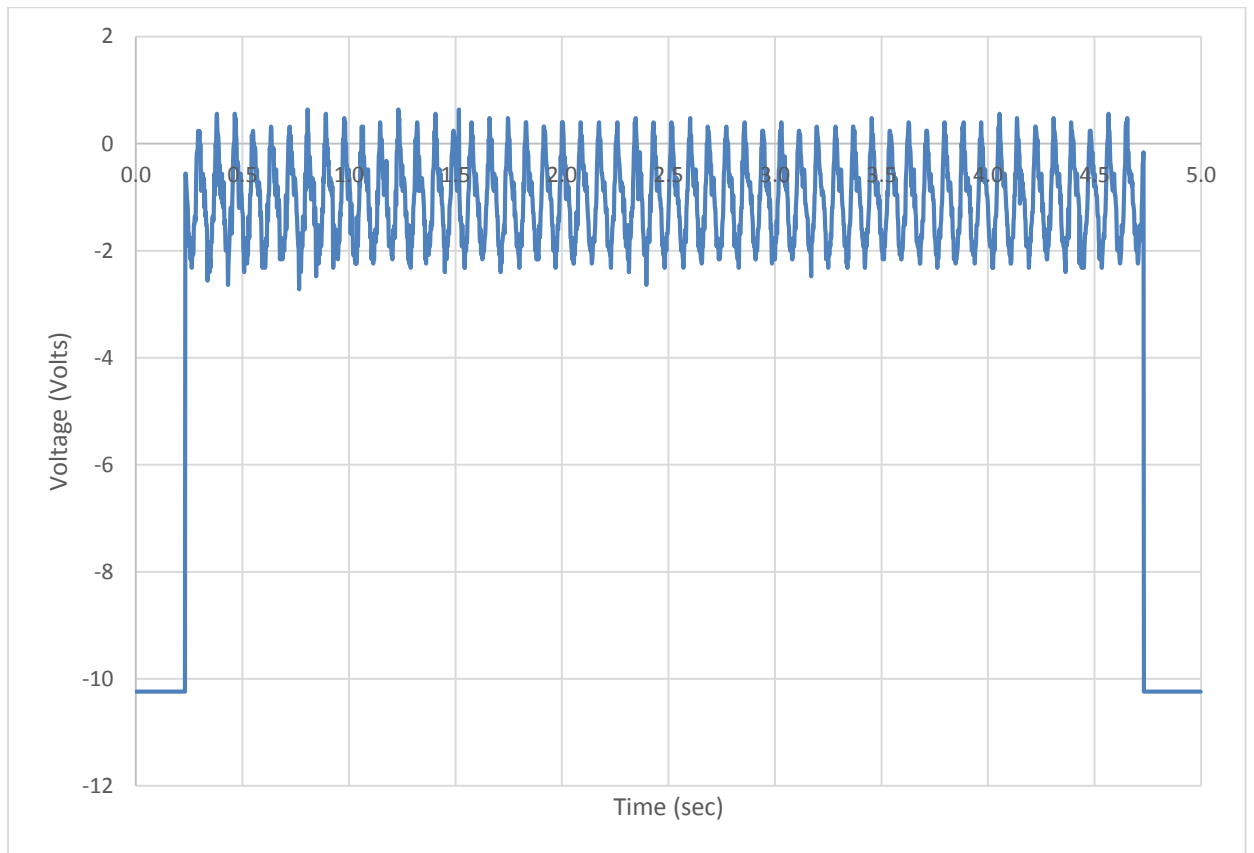
Περίπτωση 0



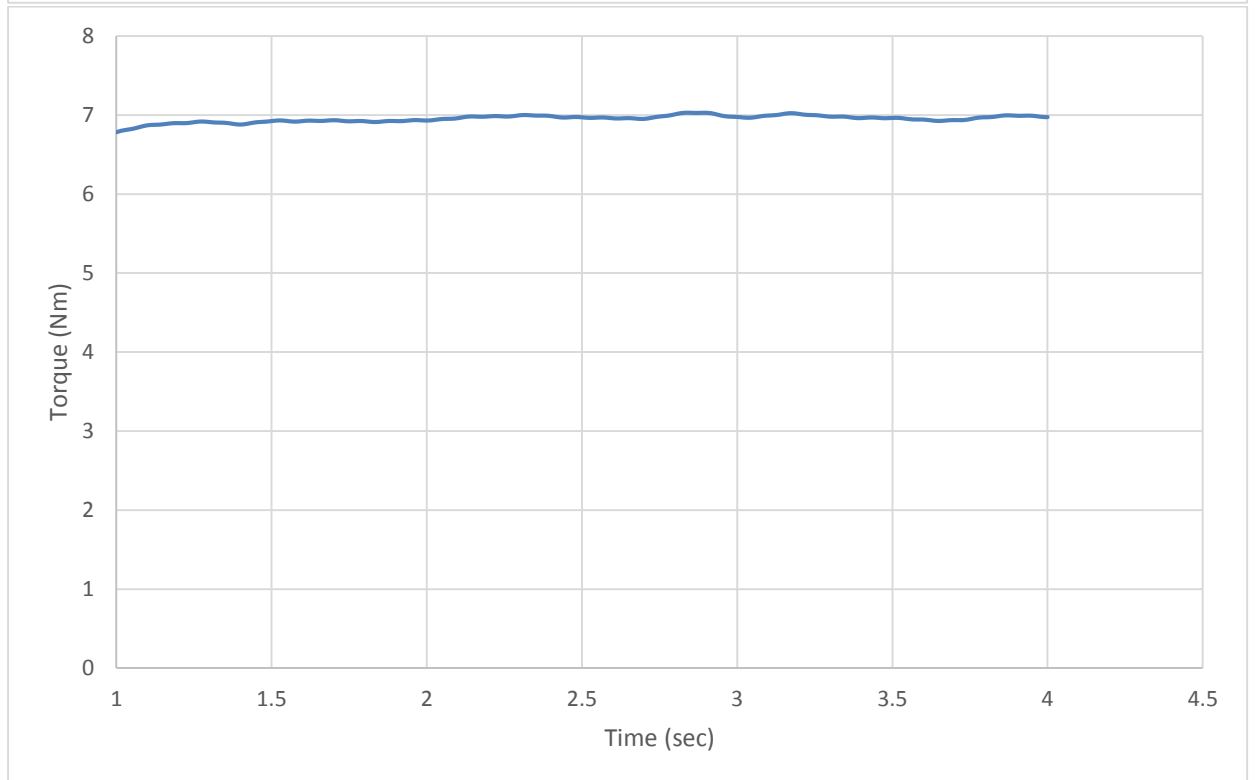
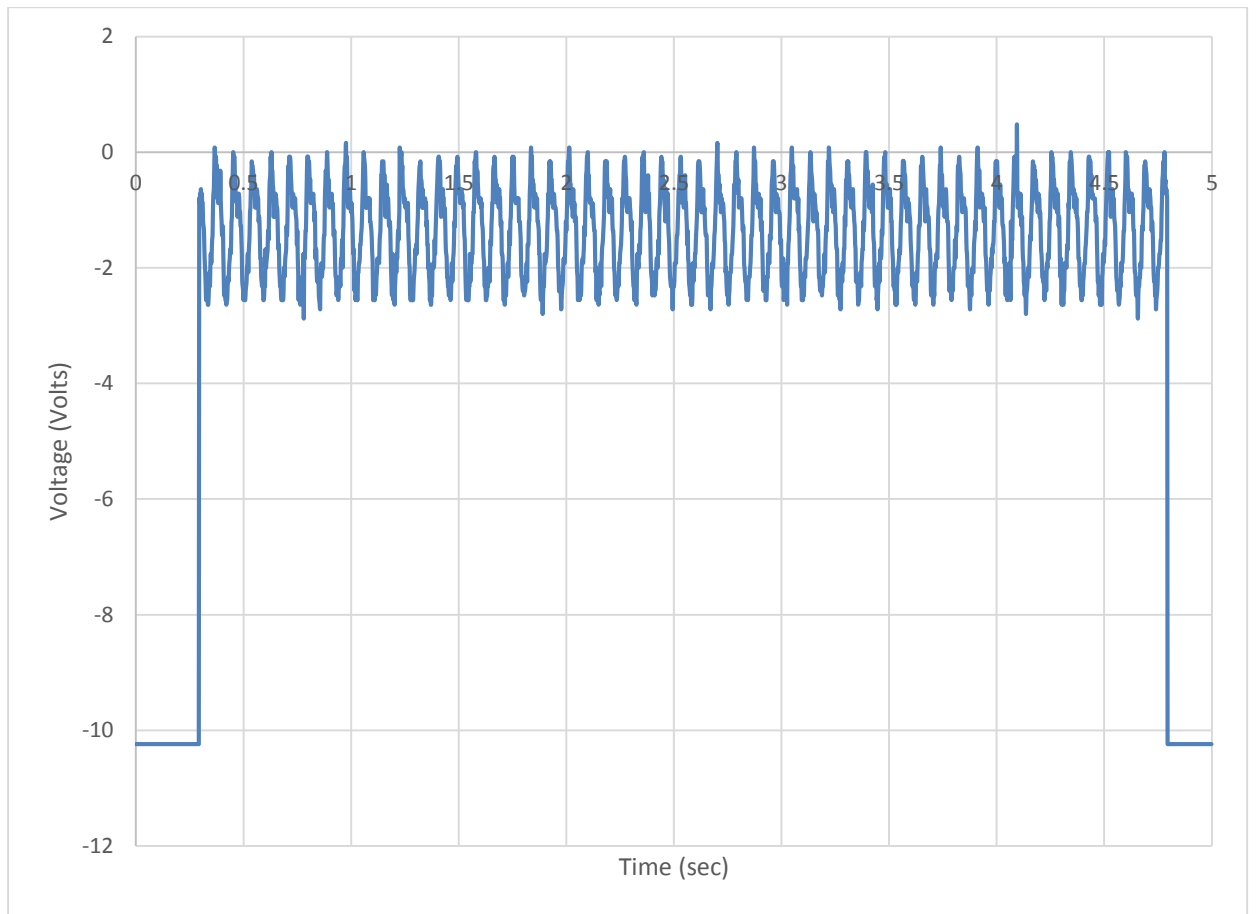
Περίπτωση 1



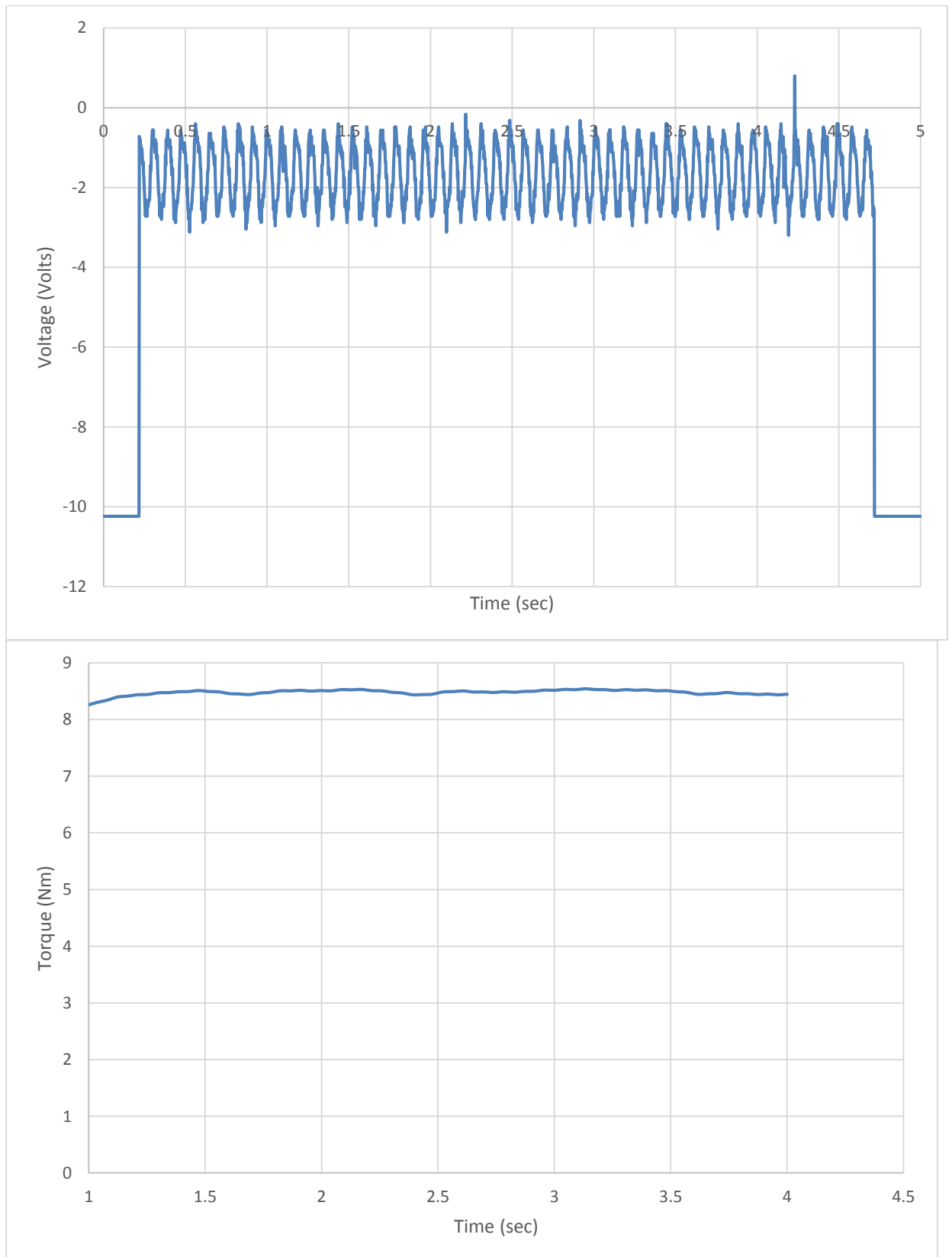
Περίπτωση 2



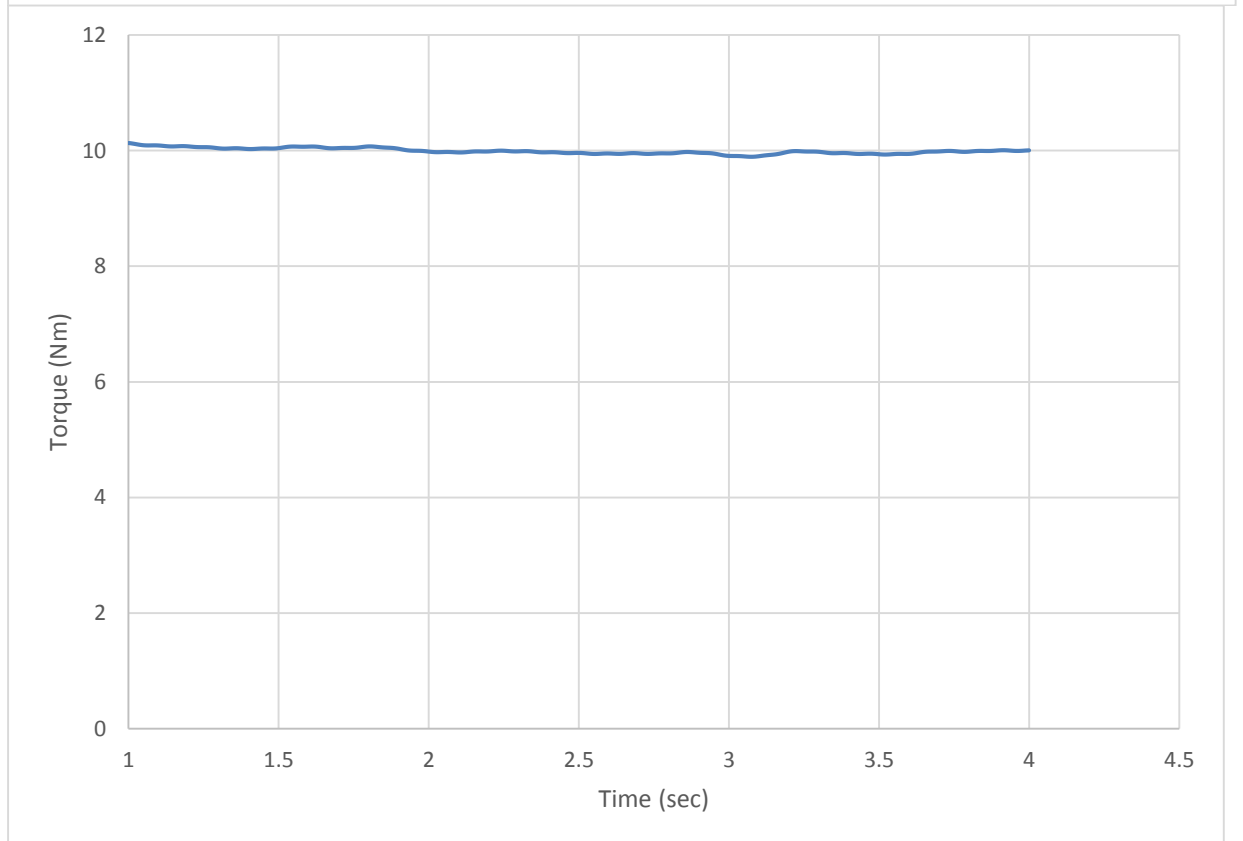
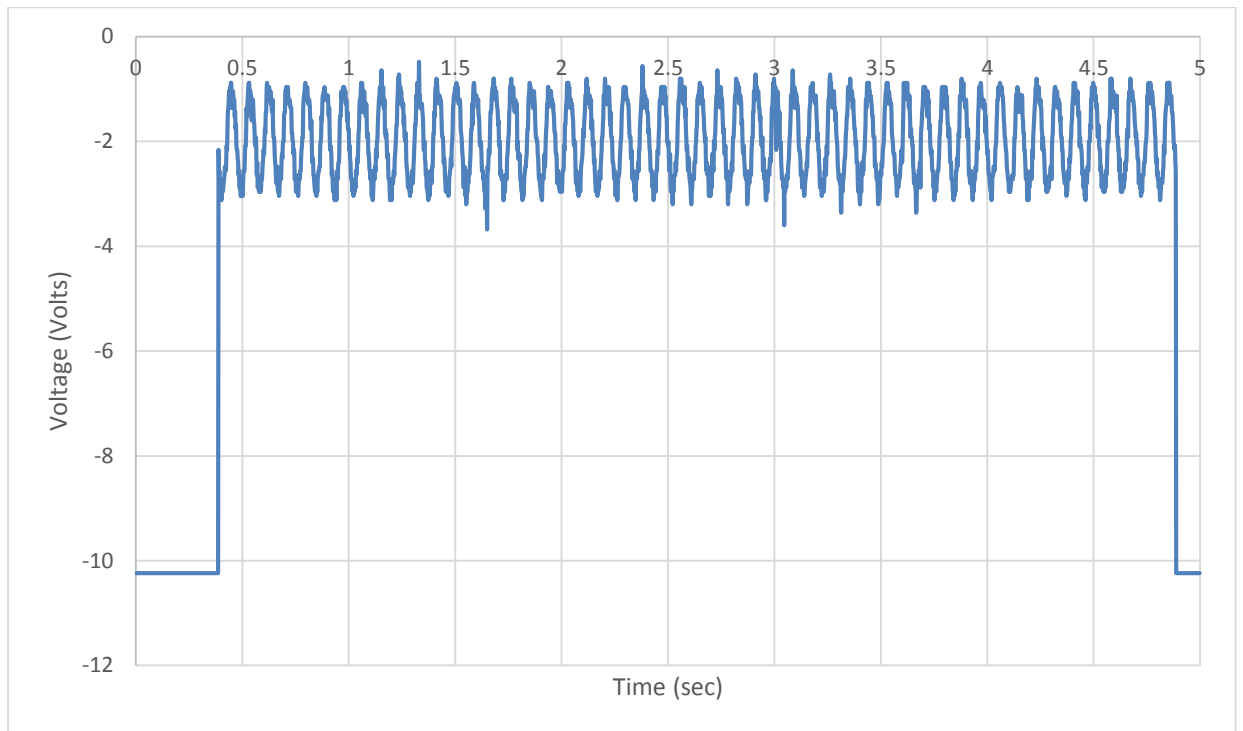
Περίπτωση 3



Περίπτωση 4



Περίπτωση 5



5.2.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται επιγραμματικά στον πίνακα 5.4

Περίπτωση	Κινητήρας Συνεχούς Ρεύματος		Σύγχρονη Γεννήτρια				Ιδανική Ροπή Εξόδου Κινητήρα	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Άξονα
	Τάση (V _{DC})	Ρεύμα (I _{DC})	Τάση (V _{gen})	Ρεύμα (I _{gen})	Ισχύς (P _{gen})	Στροφές (RPM)		
	[Volts]	[Amperes]	[Volts]	[Amperes]	[Watts]	[RPM]	[N·m]	[N·m]
0	146,3	0,75	0	0	0	740	1,41	0,56
1	145,4	2,05	78	0,5	37,5	735	3,87	3,64
2	144,3	2,8	74,7	0,957	71,3	725	5,32	5,34
3	143,9	3,54	73	1,4	102	720	6,76	6,95
4	142,8	4,25	71,6	1,84	132	710	8,16	8,48
5	142,4	4,95	70,5	2,25	159	705	9,55	9,99

Πίνακας 5.4

Και οι συγκρίσεις των τιμών στον πίνακα 5.5

Περίπτωση	Ιδανική Ροπή Εξόδου Κινητήρα	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Άξονα	Ποσοστιαία Απόκλιση
	[N·m]	[N·m]	[%]
0	1,41	0,56	60,3
1	3,87	3,64	5,9
2	5,32	5,34	-0,4
3	6,76	6,95	-2,8
4	8,16	8,48	-3,9
5	9,55	9,99	-4,6

Πίνακας 5.5

Όπως γίνεται φανερό, η μετρούμενη ροπή επί του άξονα, είναι μεγαλύτερη από την θεωρητική, ιδανική, χωρίς απώλειες ροπή, πράγμα που είναι φυσικώς αδύνατο. Αυτό δεν μπορεί παρά να οφείλεται στην παρουσία του σφηναύλακα που ταυτόχρονα διαταράσσει την κατανομή των επιμηκύνσεων και μεταβάλλει προς τα κάτω τη θεωρούμενη ροπή αδράνειας επιφανείας του άξονα. Υποθέτοντας πως ο σφηναύλακας δεν επηρεάζει σημαντικά την κατανομή των τάσεων-επιμηκύνσεων εξαιτίας του τμήματος του άξονα που επιλέχθηκε για να τοποθετηθεί το Strain Gauge και κατά συνέπεια μπορούμε να αμελήσουμε αυτά τα φαινόμενα, η ύπαρξη του σφηναύλακα επηρεάζει μόνο ως προς τον υπολογισμό της ροπής αδράνειας επιφανείας του άξονα.

Με γνωστή την ακτίνα του άξονα καθώς και τις διαστάσεις του σφηναύλακα, αρχικά υπολογίζεται η ροπή αδράνειας επιφανείας του άξονα ως εξής:

Ροπή αδράνειας κυλινδρικού άξονα, διαμέτρου D=32mm

$$I_{axis} = \pi \frac{R^4}{2}$$

Με αντικατάσταση των τιμών προκύπτει $I_{axis} = 102940,672 \text{ mm}^4$

Για την πολική ροπή επιφανείας του σφηναύλακα ισχύει:

$$I_{hole} = \oint r^2 dA$$

Με διαστάσεις σφηναύλακα

$$l=9,7 \text{ mm}$$

$$b=4,5 \text{ mm}$$

είναι

$$A=43,65 \text{ mm}^2$$

και με $r=16-2,25= 13,75 \text{ mm}$ προκύπτει

$$I_{hole}=8252,58 \text{ mm}^4$$

Οπότε είναι: $I = I_{axis} - I_{hole} = 94688,092 \text{ mm}^4$

Και ο κυλινδρικός άξονας αυτής της επιφανειακής ροπής αδρανείας, έχει ακτίνα

$$R' = \frac{2 \cdot I}{\pi} = 15,67 \text{ mm}$$

Χρησιμοποιώντας την παραπάνω σαν ακτίνα του υποθετικού άξονα, ο υπολογισμός της μέγιστης ροπής μεταβάλλεται ως εξής (Πίνακας 5.6):

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
D_i	(mm)	0
D_0	(mm)	31,34
E	(N/mm ²)	206800
V_{FS}	(Volts)	10
V_{EXC}	(Volts)	2,5
GF	(-)	2
N	(-)	4
ν	(-)	0,3
G_{XMT}	(-)	4000
T_{FS}	(N·m)	480,7

Πίνακας 5.6

Και οι ροπές για τις έξι περιπτώσεις υπολογίζονται όπως στον πίνακα 5.7

Περίπτωση	Ιδανική Ροπή Εξόδου Κινητήρα	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Άξονα (D=32mm)	Ποσοστιαία Απόκλιση ιδανικής ροπής από μετρούμενη (D=32mm)	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Ισοδύναμου Άξονα (D=31,34 mm)	Ποσοστιαία Απόκλιση ιδανικής ροπής από μετρούμενη (D=31,34mm)
	[N·m]	[N·m]	[%]	[N·m]	[%]
0	1,41	0,56	60,3	0,53	62,4
1	3,87	3,64	5,9	3,42	11,6
2	5,32	5,34	-0,4	5,01	5,8
3	6,76	6,95	-2,8	6,53	3,4
4	8,16	8,48	-3,9	7,96	2,5
5	9,55	9,99	-4,6	9,37	1,9

Πίνακας 5.7

Έπειτα, γίνεται ο υπολογισμός της μετρούμενης ισχύος και της θεωρητικής ισχύος (Πίνακας 5.8):

Περίπτωση	Ιδανική Ροπή Εξόδου Κινητήρα	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Ισοδύναμου Άξονα (D=31,34 mm)	Στροφές (RPM)	Θεωρητική ισχύς	Μετρούμενη ισχύς ισοδύναμου άξονα	Διαφορά μετρούμενης από ισοδύναμη ισχύ
	[N·m]	[N·m]	[RPM]	[W]	[W]	[W]
0	1,41	0,53	740	109,26	41,07	68,19
1	3,87	3,42	735	297,72	263,23	34,49
2	5,32	5,01	725	403,89	380,36	23,53
3	6,76	6,53	720	509,68	492,34	17,34
4	8,16	7,96	710	606,69	591,82	14,87
5	9,55	9,37	705	705,03	691,74	13,29

Πίνακας 5.8

5.2.4 Συμπεράσματα

Από τα παραπάνω φαίνεται πως η επιφανειακή ροπή αδράνειας του άξονα παίζει σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της ροπής. Πράγματι, από τον τύπο που παραθέτει η Binsfeld για τη μεταφορά της τάσης σε ροπή, ο ρόλος αυτός γίνεται εμφανής.

$$\begin{aligned}
 T_{FS} &= \frac{V_{FS} \cdot \pi \cdot E \cdot 4 \cdot (D_0^4 - D_i^4)}{V_{EXC} \cdot GF \cdot N \cdot 16000 \cdot (1 + \nu) \cdot G_{XMT} \cdot D_0} \\
 &= \frac{\pi \cdot (D_0^4 - D_i^4)}{32} \cdot \frac{V_{FS} \cdot E}{125 \cdot V_{EXC} \cdot GF \cdot N \cdot (1 + \nu) \cdot G_{XMT} \cdot D_0} \\
 &= J \cdot \frac{V_{FS} \cdot E}{125 \cdot V_{EXC} \cdot GF \cdot N \cdot (1 + \nu) \cdot G_{XMT} \cdot D_0}
 \end{aligned}$$

Μετά την εύρεση του ισοδύναμου άξονα και τον υπολογισμό της μέγιστης ροπής με βάση τον νέο άξονα, παρατηρήθηκε ικανοποιητική συσχέτιση της ροπής μεταξύ της μέτρησης από το ροπόμετρο της Binsfeld και της θεωρητικής τιμής της, με την διαφορά μεταξύ θεωρητικής και μετρούμενης ισχύος να αποτελεί τις απώλειες του συστήματος κινητήρων-γεννήτριας.

5.3 Δοκιμή στο Τμήμα Ναυπηγικής του ΤΕΙ Αθηνών στις 21/10/2015

5.3.1 Εισαγωγή

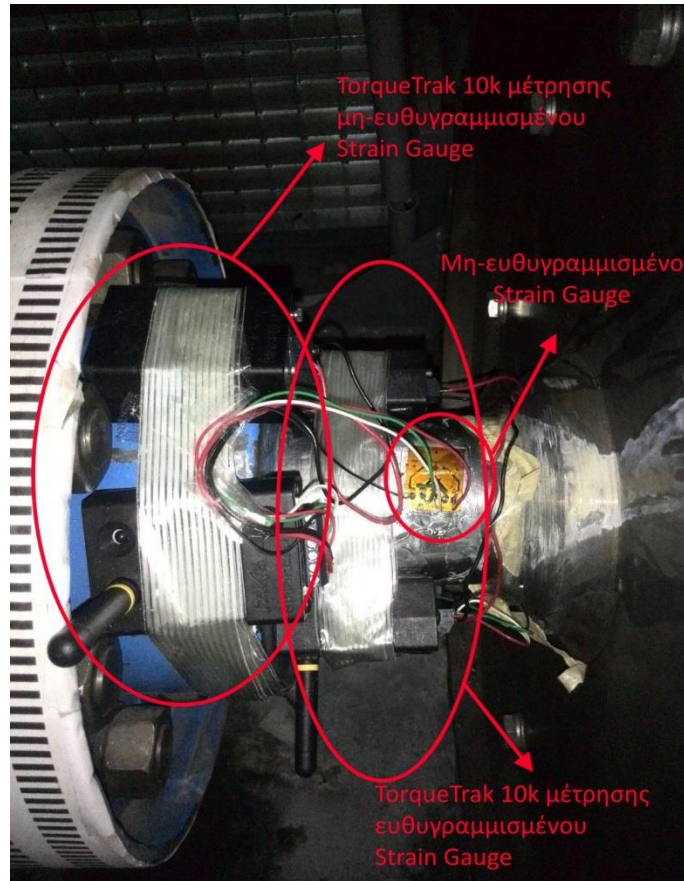
Η συγκεκριμένη δοκιμή έγινε με σκοπό τον έλεγχο της απόκλισης της μετρούμενης τάσης σε περίπτωση μη σωστής ευθυγράμμισης του Strain Gauge και σύγκριση της πιθανής απόκλισης με τη θεωρητικά προβλεπόμενη τιμή όπως περιγράφεται στο σχετικό κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.



Για τη συγκεκριμένη εφαρμογή έγινε χρήση του τετράχρονου κινητήρα Diesel του Τμήματος Ναυπηγικής του ΤΕΙ Αθηνών που αποτελεί διάταξη κινητήρα-πέδη/φορτίου και χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς καθώς και ερευνητικούς σκοπούς από το ΤΕΙ Αθηνών. Παρόλο που δεν πρόκειται για ηλεκτρομηχανή, η διάταξη κρίθηκε ως ιδανική για την εφαρμογή αυτή λόγω της προσβασιμότητάς της, του μεγάλου μεγέθους του άξονα, $D=67$ mm, ικανό να χωρέσει δύο αντιδιαμετρικά Strain Gauges και δύο σετ πομπού-μπαταρίας και τέλος λόγω της ιδιοκτησίας και χρήσης από το ΤΕΙ μετρητικού ίδιου τύπου και μοντέλου με το χρησιμοποιούμενο κατά την παρούσα Διπλωματική Εργασία.

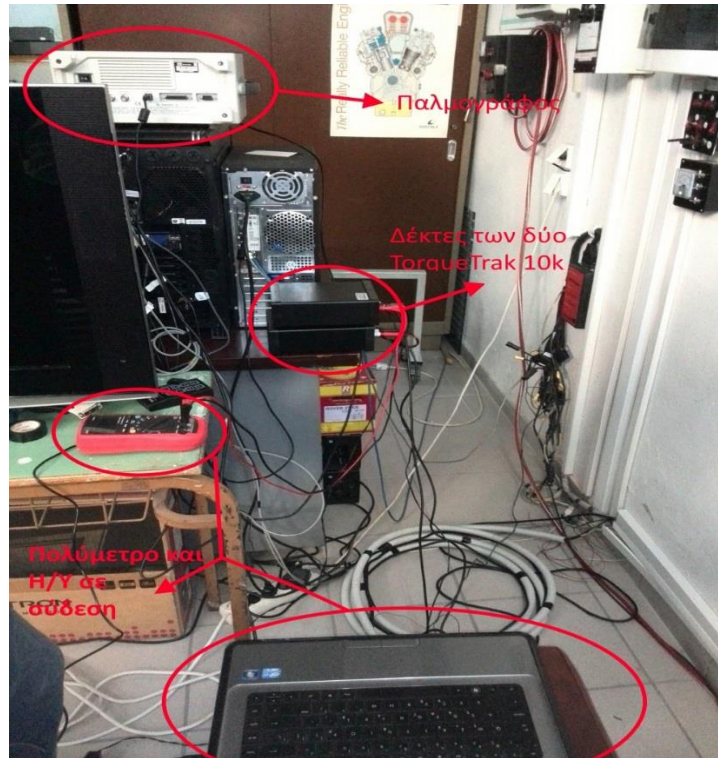
5.3.2 Περιγραφή της διάταξης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, πρόκειται περί συστήματος τετράχρονου κινητήρα Diesel συνδεδεμένου σε πέδη δινορευμάτων που δρα ως φορτίο του κινητήρα. Η ρύθμιση του φορτίου της πέδης, γίνεται από ποτενσιόμετρο στον πίνακα ελέγχου και παρακολουθείται αριθμητικά από H/Y ο οποίος λαμβάνει ως σήμα την ισχύ που καταναλώνει η πέδη και ακολούθως αποθηκεύεται. Όλα τα στοιχεία του κινητήρα (κατανάλωση καυσίμου, εισαγωγή αέρα, θερμοκρασία, στροφές κλπ.) καταγράφονται σε H/Y μέσω συστήματος καρτών συλλογής δεδομένων. Μετά την κόλληση των Strain Gauges (ευθυγραμμισμένου και με απόκλιση 12° , κατά τα γνωστά, έγινε ή σύνδεση των δύο πομπών των δύο συστημάτων TT10k κατά την εικόνα 5.3.



Εικόνα 5.3- Διάταξη πομπών επί του άξονα

Η εκπομπή των μετρούμενων σημάτων στους δύο δέκτες έγινε σε διαφορετικές συχνότητες για αποφυγή περιπλέξεως των σημάτων. Ακολούθως οι δύο δέκτες συνδέθηκαν, ο ένας σε παλμογράφο και ο άλλος σε πολύμετρο το οποίο έχει δυνατότητα αποστολής της μετρούμενης τιμής σε Η/Υ έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ταυτόχρονη μέτρηση. Η μορφή της διάταξης φαίνεται στην εικόνα 5.4.



Εικόνα 5.4- διάταξη συλλογής δεδομένων

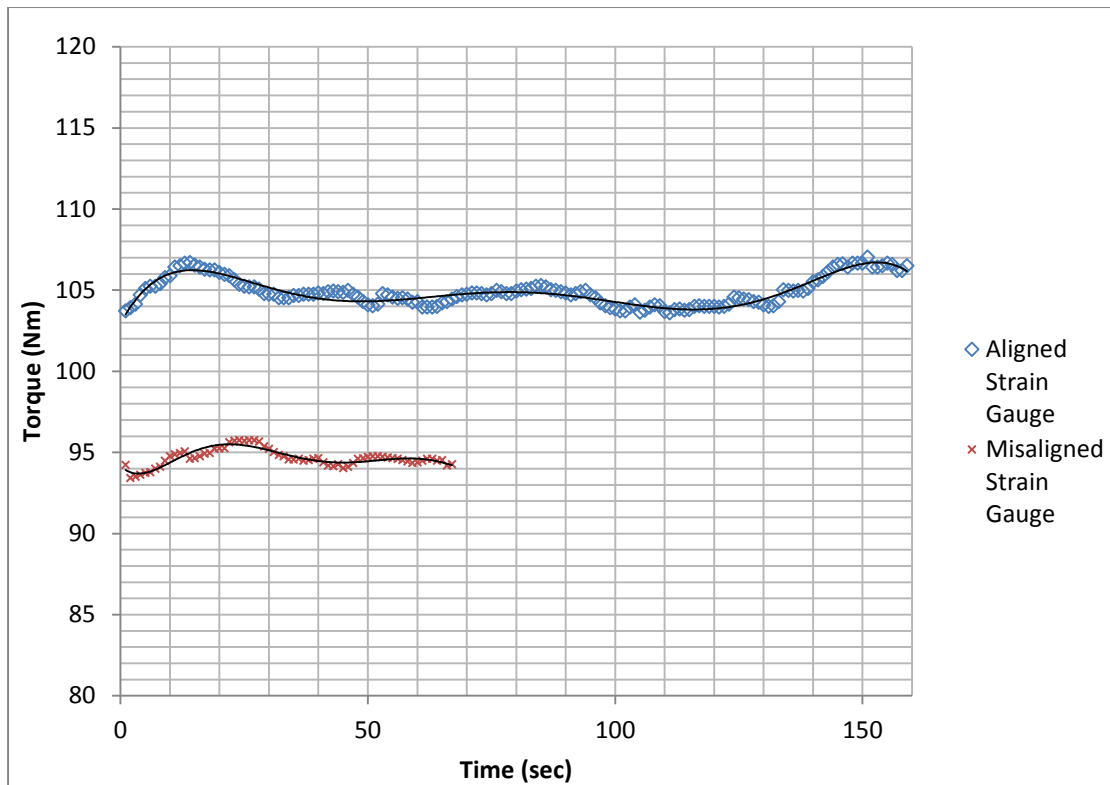
5.3.3 Αποτελέσματα δοκιμών

Για τον υπολογισμό της ροπής όπως εξηγείται παραπάνω έγινε χρήση των τιμών όπως φαίνονται στον πίνακα 5.9.

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
D_i	(mm)	0
D_0	(mm)	67
E	(N/mm ²)	180000
V_{FS}	(Volts)	10
V_{EXC}	(Volts)	2,5
GF	(-)	2
N	(-)	4
ν	(-)	0,3
G_{XMT}	(-)	4000
T_{FS}	(N·m)	4088,4

Πίνακας 5.9

Το σύνολο των στιγμιαίων τιμών της ροπής όπως μετρήθηκε από τα δύο Strain Gauges φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.



Έπειτα βρέθηκαν οι μεσοί όροι των στιγμιαίων τιμών των δύο περιπτώσεων και έγινε η σύγκριση μεταξύ τους ώστε να βρεθεί η απόκλιση μεταξύ τους, όπως φαίνεται στον πίνακα 5.10.

Μέση ροπή ευθυγραμμισμένου Gauge	(N·m)	104,91
Μέση ροπή Gauge με απόκλιση 12°	(N·m)	94,66
Απόλυτη Διαφορά	(N·m)	10,25
Ποσοστιαία διαφορά	(%)	9,78

Πίνακας 5.10

Η θεωρητικά προβλεπόμενη τιμή της απόκλισης δίνεται από τον τύπο:

$$n = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\%$$

και για $\alpha = 11^\circ$ είναι:

$$n = (\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\% = (\cos 24 - 1) \cdot 100\% = (0,9135 - 1) \cdot 100\% \\ \Rightarrow n = -8,66\%$$

5.3.4 Συμπεράσματα

Κατά τη σύγκριση θεωρητικής και πειραματικής τιμής, παρατηρήθηκε πως η θεωρία υποεκτιμά την επίδραση της απόκλισης του Strain Gauge κατά τη μέτρηση της Ροπής. Αυτό πιθανότατα συμβαίνει λόγω ορισμένων παραδοχών και απλοποιήσεων που έγιναν κατά την παραγωγή του τύπου της απόκλισης. Παρόλα αυτά, απόκλιση 9,78% για περιστροφή του Gauge κατά 12° κρίνεται ικανοποιητική, καθώς τόσο μεγάλες γωνίες περιστροφής από την ιδανική είναι αδύνατο να συμβούν σε πραγματικές συνθήκες μέτρησης, ακόμα και με οπτική ευθυγράμμιση του Strain Gauge. Επίσης, για μικρότερες γωνίες, ο θεωρητικός τύπος υπολογισμού της απόκλισης, κρίνεται ως ικανοποιητικός για τον υπολογισμό της, καθώς ακόμα και με οπτική ευθυγράμμιση, είναι δύσκολο να περιστραφεί το Strain Gauge περισσότερο των $3-5^\circ$.

5.4 Δοκιμή στο Εργαστήριο Τριβολογίας της Σχολής Ναυπηγών ΜΜ 29/10/2015

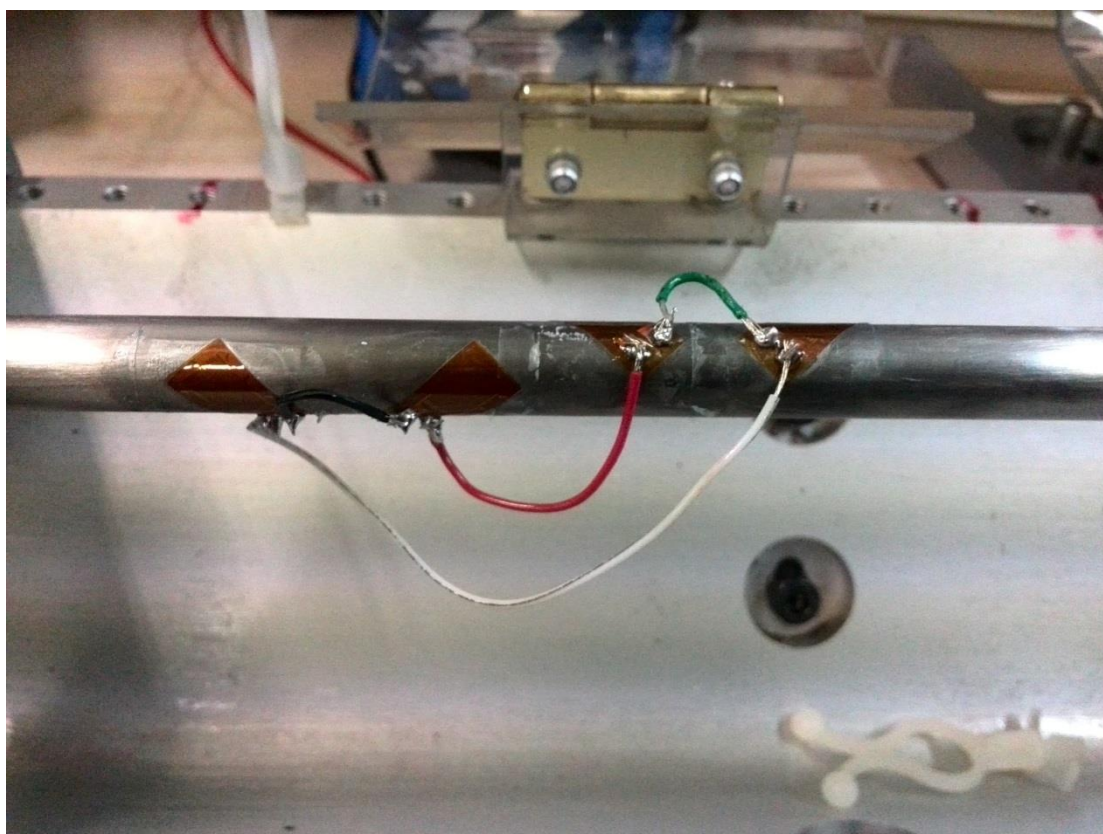
5.4.1 Εισαγωγή

Το συγκεκριμένο πείραμα έγινε με σκοπό την μελέτη της ευαισθησίας του συστήματος σε ηλεκτρομηχανές πολύ μικρής ισχύος καθώς και της πειραματικής μελέτης συμπεριφοράς του συστήματος κατά την μέτρηση μικρής ροπής σε άξονες με μικρή διάμετρο.

5.4.2 Περιγραφή της διάταξης

Η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, είναι εκείνη που βρίσκεται στο Εργαστήριο Τριβολογίας της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών με υπεύθυνο τον Επίκουρο Καθηγητή Δ. Παπαδόπουλο και αποτελείται από το σύστημα ηλεκτροκινητήρα-άξονα-εδράνων με την εμπορική ονομασία Bently Nevada Rotor Kit της εταιρίας GE Measurement. Επιλέχθηκε λόγω της μικρής διαμέτρου του άξονα, της μικρής ισχύος εξόδου του κινητήρα καθώς και της ευκολίας στην προσθαφαίρεση φορτίου.

Ο άξονας έχει διάμετρο 10mm κάνοντας αδύνατη την τοποθέτηση επί αυτού, τυπωμένης Γέφυρας Wheatstone. Επομένως, κατασκευάστηκε κύκλωμα γέφυρας Wheatstone κάνοντας χρήση τεσσάρων, διακριτών Strain Gauges. Η διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5.5.



Εικόνα 5.5- Διάταξη Strain Gauges για σχηματισμό πλήρους γέφυρας Wheatstone

Παρόλο που η διάταξη των Strain Gauges διαφέρει από αυτή που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο, λόγω της γεωμετρίας του άξονα, δηλαδή του κυλίνδρου, η θέση των Strain Gauges δεν παίζει σημαντικό ρόλο, αρκεί να είναι τοποθετημένα σχετικά κοντά ώστε να μην υπάρχει μεγάλο μήκος των καλωδίων της συνδεσμολογίας και να μην επηρεάζονται από φαινόμενα κάμψης. Το μόνο σημαντικό ως προς την τοποθέτηση, είναι η προσοχή κατά τον προσανατολισμό τους στις $\pm 45^\circ$ εναλλάξ.

Η διαδικασία κόλλησης έγινε κατά τα γνωστά από τη θεωρία και τις συστάσεις του κατασκευαστή.

Μικρό βάρος τοποθετήθηκε επί του άξονα, παίζοντας το ρόλο του φορτίου καθώς και ο πομπός με το δέκτη τοποθετήθηκαν αντιδιαμετρικά ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα ταλαντώσεων. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, εκτός από τη ροπή αδράνειας του άξονα και του κυλινδρικού βάρους που τοποθετήθηκε, πρέπει να ληφθούν υπόψη στην ανάλυση και τα βάρη του πομπού και της μπαταρίας, καθώς λόγω του μικρού μεγέθους της διάταξης, ως προς τις φυσικές διαστάσεις αλλά και ως προς την ισχύ εξόδου, δεν γίνεται να αμεληθούν.

Η συλλογή δεδομένων έγινε με πολύμετρο σε επικοινωνία με H/Y με δειγματοληψία ανά ένα δευτερόλεπτο. Οι στροφές του άξονα, που αποτελούσαν και τη μεταβλητή με την οποία ρυθμιζόταν η ροπή του άξονα, ρυθμιζόνταν μέσω ποτενσιόμετρου μέχρι την εκάστοτε επιθυμητή τιμή.

5.4.3 Διαδικασία των μετρήσεων- Αποτελέσματα

Συνολικά έγιναν μετρήσεις για έξι καταστάσεις στροφών οι οποίες παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα αριθμημένες και στη συνέχεια, για λόγους ευκολίας, θα αναφέρονται με τον χαρακτηριστικό αριθμό τους (Πίνακας 5.11).

Αριθμός Κατάστασης	RPM
1	133
2	307
3	497
4	650
5	806
6	911

Πίνακας 5.11

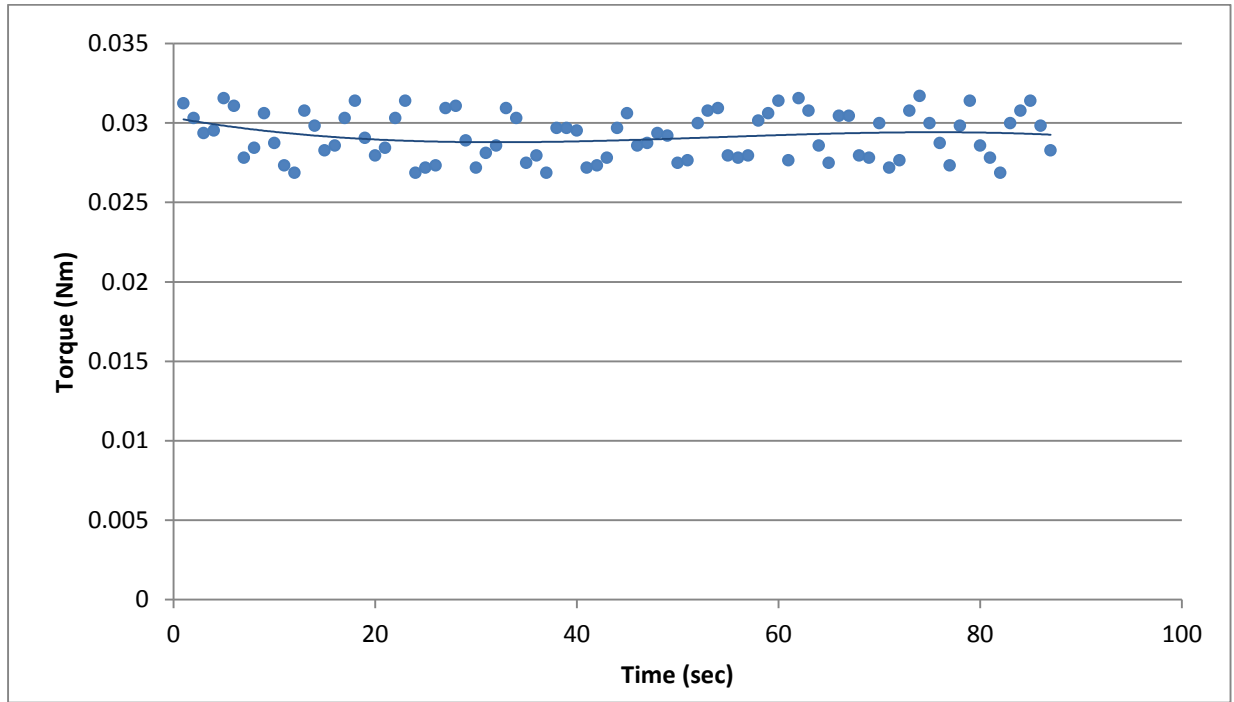
Η λήψη των δεδομένων έγινε με χρήση πολυμέτρου με δυνατότητα ζωντανής αποστολής των ενδείξεων σε συνδεδεμένο H/Y. Αρχικά ελήφθησαν τα δεδομένα της τάσης και ακολούθως έγινε ο υπολογισμός της στιγμιαίας ροπής κατά τα γνωστά. Ο υπολογισμός της μέγιστης ροπής φαίνεται στον πίνακα 5.12

Σύμβολο	Μονάδες	Τιμή
D_i	(mm)	0
D_0	(mm)	10
E	(N/mm ²)	206800
V_{FS}	(Volts)	10
V_{EXC}	(Volts)	2,5
GF	(-)	2
N	(-)	4
v	(-)	0,3
G_{XMT}	(-)	4000
T_{FS}	(N·m)	15,62

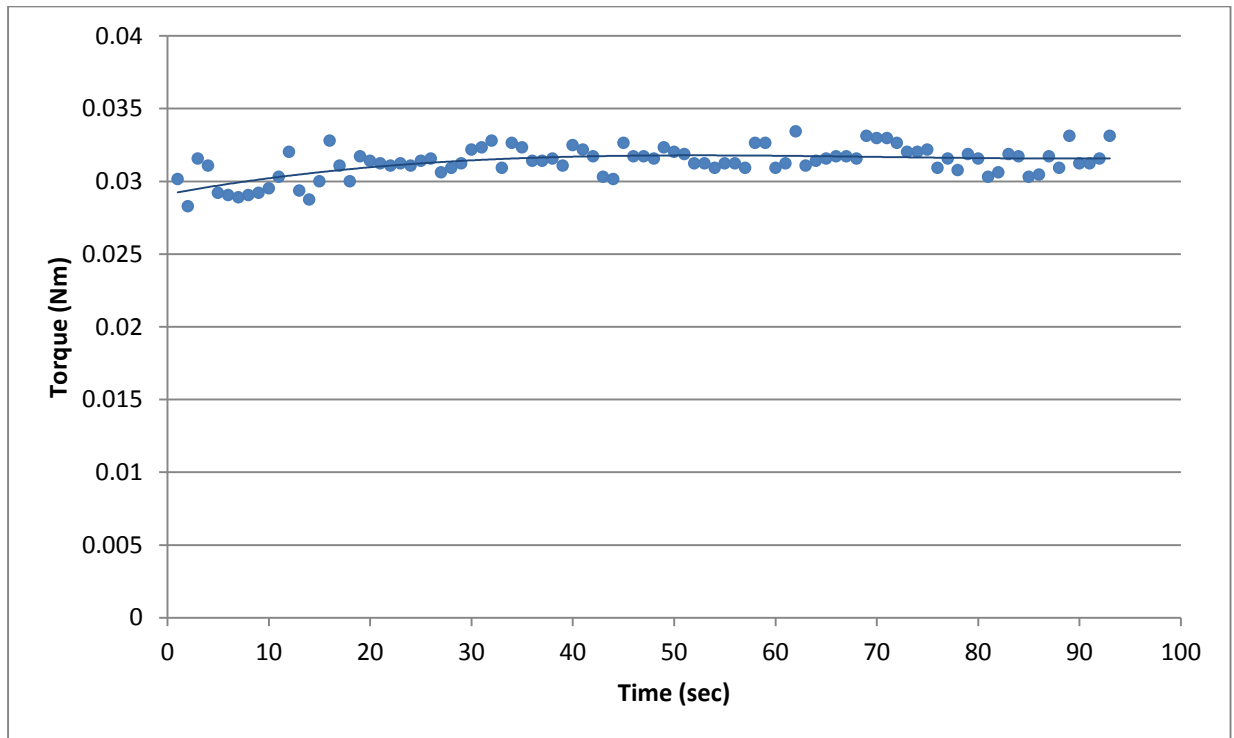
Πίνακας 5.12

Μετά τον υπολογισμό τους, η γραφική απεικόνιση των στιγμιαίων ροπών φαίνεται παρακάτω.

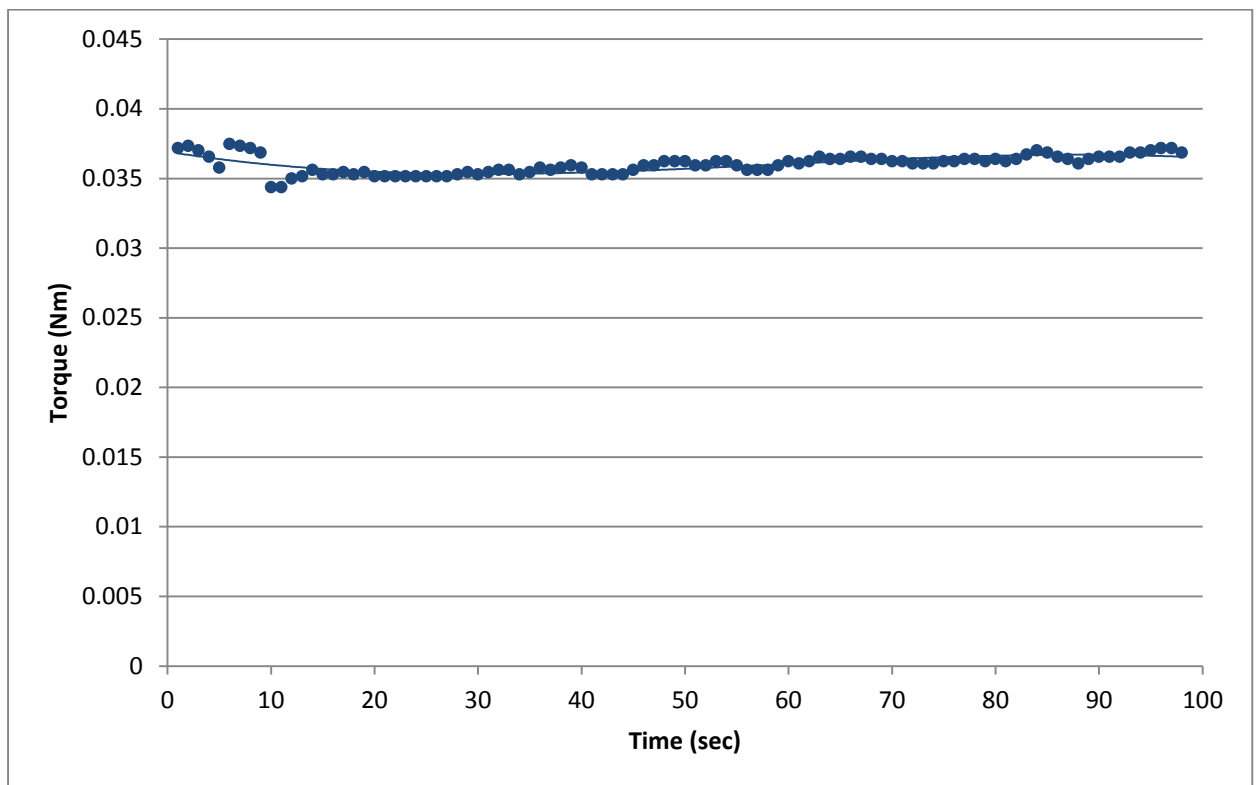
Περίπτωση 1



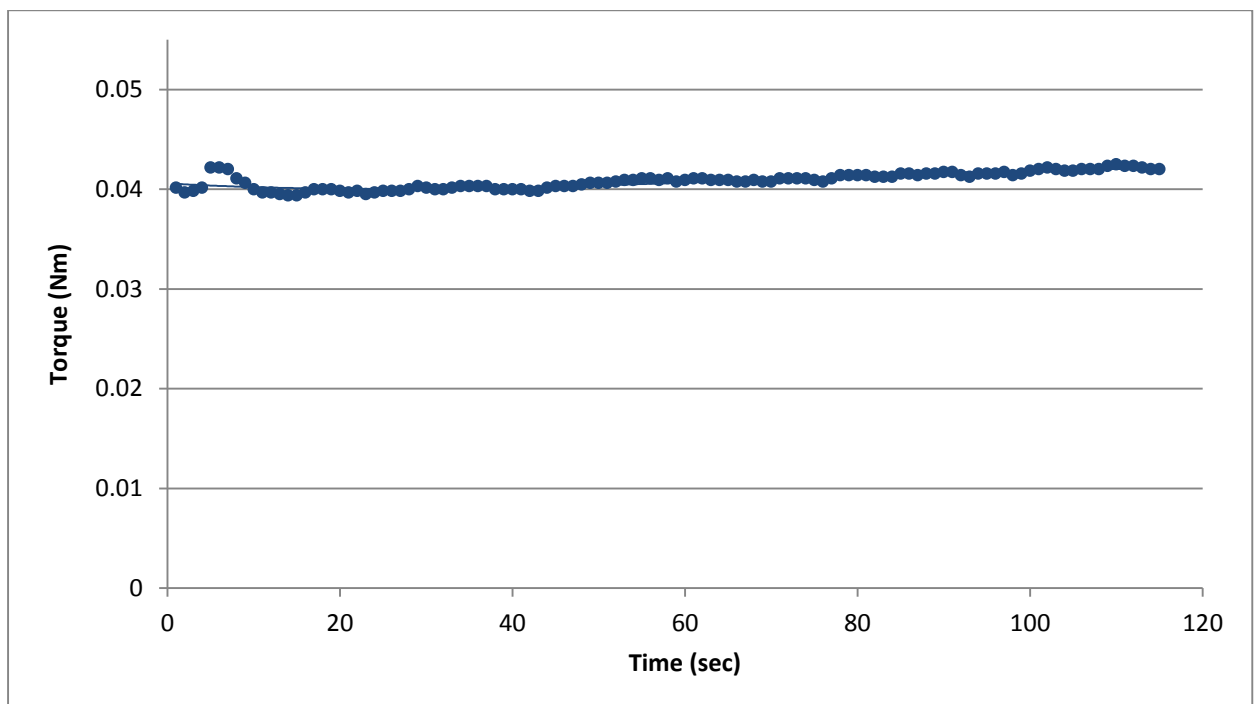
Περίπτωση 2



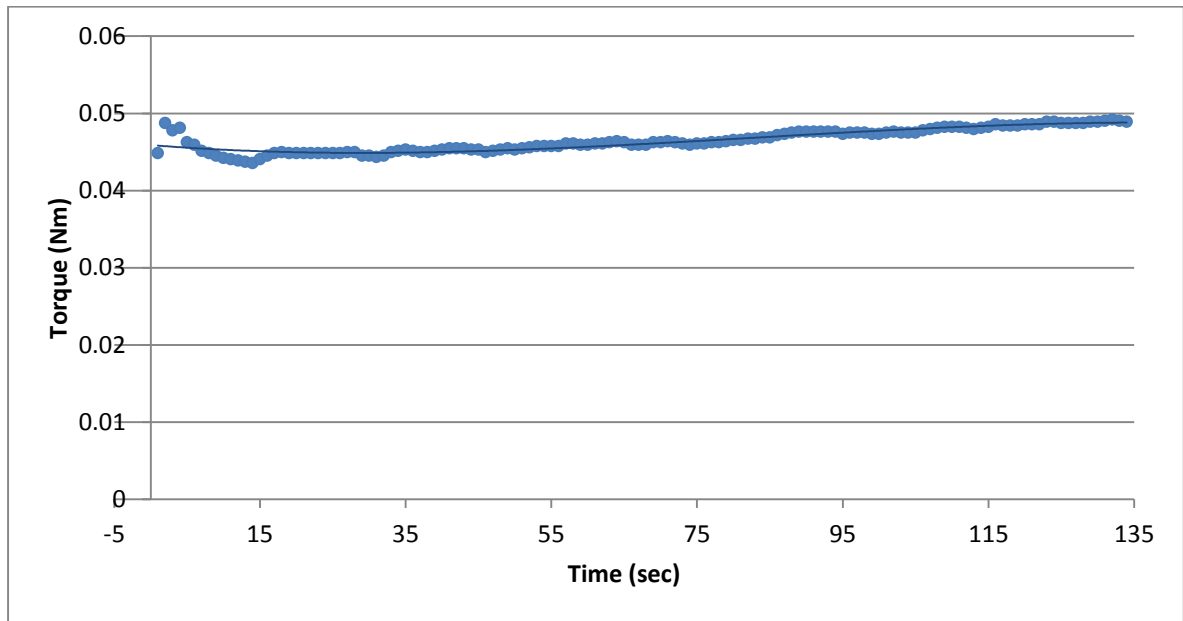
Περίπτωση 3



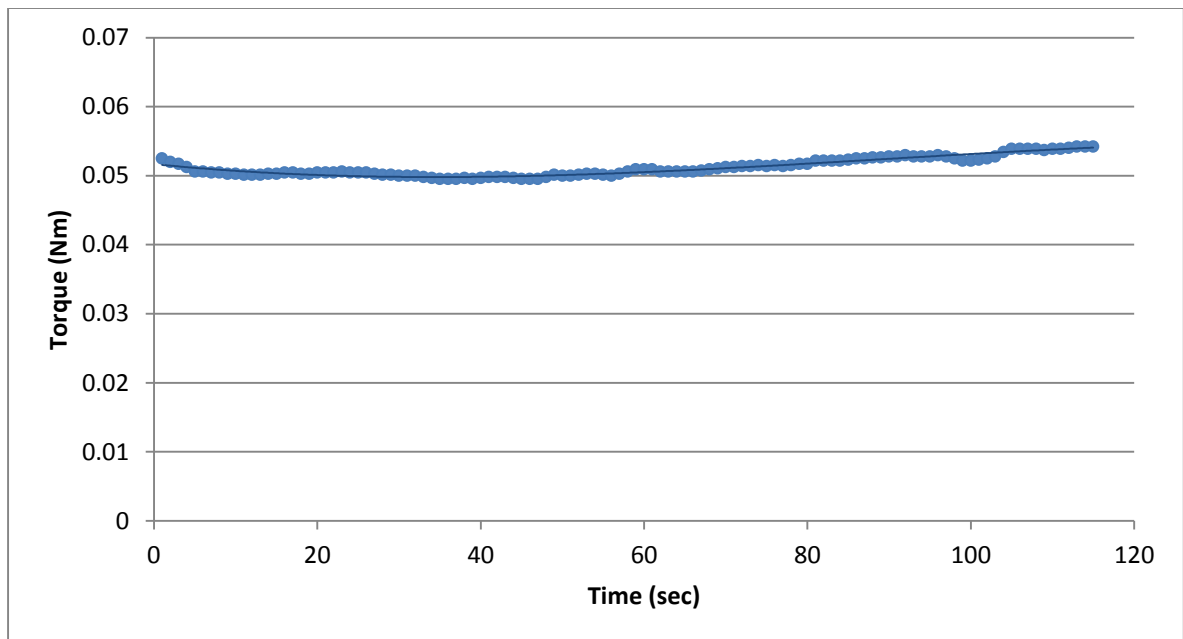
Περίπτωση 4



Περίπτωση 5



Περίπτωση 6



5.4.3 Συμπεράσματα

Οι μετρήσεις παρουσιάζονται επιγραμματικά στον πίνακα 5.13

Περίπτωση	Στροφές	Μετρούμενη Μέση Ροπή Επί του Άξονα	Ισχύς
	$[RPM]$	$[N \cdot m]$	$[Watts]$
1	133	0,029	0,407
2	307	0,031	1,007
3	497	0,036	1,875
4	650	0,041	2,780
5	806	0,046	3,922
6	911	0,051	4,888

Πίνακας 5.13

Γίνεται εμφανές πως παρά το μικρό μέγεθος του άξονα και τη μικρή συγκέντρωση ισχύος του κινητήρα, το συγκεκριμένο ροτόμετρο διαθέτει αρκετή ευαισθησία ώστε να πραγματοποιήσει μετρήσεις.

Σαν ένδειξη για την ορθότητα της τάξης μεγέθους των μετρήσεων, ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: έχοντας σταθεροποιηθεί η ταχύτητα του άξονα, ακολούθησε η παύση της παροχής ενέργειας στον κινητήρα και η χρονομέτρηση έως το μηδενισμό της ταχύτητας. Με γνώση του χρόνου αυτού, υπολογίστηκε η μέση επιβράδυνση και η ροπή αδράνειας του άξονα. Με γνώση των παραπάνω έγινε υπολογισμός της ροπής αντίστασης. Σημειώνεται πως σύγκριση των δύο τιμών εκτός ως τάξεις μεγέθους, δεν θα είχε νόημα λόγο ύπαρξης δυναμικών φαινομένων κατά την επιτάχυνση ή επιβράδυνση του άξονα.

Επί του άξονα με συνεισφορά στη ροπή αδράνειας υπήρχαν τρία σώματα:

1. Ο άξονας
2. Το ζεύγος πομπού-μπαταρίας
3. Πρόσθετο χαλύβδινο βάρος.

Ο υπολογισμός της ροπής αδράνειας φαίνεται στον πίνακα 5.14:

Σώμα	Μάζα	Απόσταση από άξονα περιστροφής	Ροπή Αδράνειας
	$[kg]$	$[m]$	$[kg \cdot m^2]$
Άξονας	0,4	0,005	0.000005
Ζεύγος πομπού-μπαταρίας	0,085	0,0175	0,0000520625
Πρόσθετο βάρος	0,8	0,0375	0,001125
Σύνολο			0,0011820625

Πίνακας 5.14

Και οι υπολογισμοί της ροπής επιβράδυνσης για τις διάφορες περιπτώσεις (Πίνακας 5.15)

Περίπτωση	Στροφές	Μέσος χρόνος για ακινησία	Ροπή επιβράδυνσης
	<i>[RPM]</i>	<i>[s]</i>	<i>[N·m]</i>
1	133	0,375	0.044
2	307	0,545	0,070
3	497	0,785	0,078
4	650	1,195	0,067
5	806	1,375	0,073
6	911	1,565	0,072

Πίνακας 5.15

Από το παραπάνω γίνεται εμφανές πως οι μετρήσεις του ροπομέτρου είναι αξιόπιστες και κατά συνέπεια, το ροπόμετρο κρίνεται επαρκές και για τέτοιες εφαρμογές

6. Συμπεράσματα-Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

6.1 Συμπεράσματα - Πρακτικές παρατηρήσεις κατά τη μέτρηση ροπής σε ηλεκτρομηχανές

6.1.1 Εισαγωγή

Τα πειράματα που διεξήχθησαν, έδειξαν πως η μέθοδος μέτρησης της ροπής με χρήση Strain Gauges τύπου ηλεκτρικής αντίστασης και το εμπορικό προϊόν της Binsfeld Engineering Inc., είναι σε γενικές γραμμές κατάλληλη για αξιόπιστες μετρήσεις ροπής σε όλους τους τύπους των Ηλεκτροκινητήρων, ανεξαρτήτως του μεγέθους του κινητήρα ή του άξονα. Η ευαισθησία του μηχανήματος είναι αρκετά υψηλή, σημειώνεται πως κατέγραφε ενδείξεις ακόμη και κατά τη χειροκίνητη περιστροφή του άξονα, κάτι που προκάλεσε μεγάλη εντύπωση.

Η ροπή είναι μέγεθος που ενδιαφέρει η μέτρησή της κυρίως σε μια ηλεκτρομηχανή κατά τη λειτουργία κινητήρα. Αυτό συμβαίνει διότι, όπως εξηγείται και σε άλλο τμήμα της εργασίας αυτής, η ροπή χαρακτηρίζει έναν κινητήρα ως προς την ικανότητά του να μεταβάλει την κινητική του κατάσταση και να περάσει από μια κινητική κατάσταση σε μία άλλη. Οι ηλεκτροκινητήρες στις διάφορες εφαρμογές διαφέρουν σε ορισμένα, συγκεκριμένα σημεία σε σχέση με τις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης τα οποία δημιουργούν ιδιαιτερότητες κατά τη μέτρηση της ροπής εξόδου τους.

6.1.2 Μικρό μέγεθος άξονα

Για παρόμοια εφαρμογή, ο ηλεκτροκινητήρας που θα χρησιμοποιηθεί, θα είναι αρκετά μικρότερου μεγέθους σε σχέση με την αντίστοιχη MEK. Αυτό οδηγεί σε σημαντικά μικρότερες διαμέτρους αξόνων. Οι μικρότεροι αυτοί άξονες, κατά την εφαρμογή της μεθόδου μέτρησης ροπής με χρήση τηλεμετρίας και Strain Gauge, εγκυμονεί κινδύνους και μεγάλη προσοχή πρέπει να δοθεί σε ορισμένα σημεία για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα.

Λαμβάνοντας υπόψη πως μια μέση, τυπωμένη γέφυρα Wheatstone έχει διαστάσεις 20x23 χιλιοστά, άξονες με διάμετρο μικρότερη των 20 χιλιοστών αποκλείουν τη χρήση τέτοιας γέφυρας. Αυτό συμβαίνει διότι η περίμετρος ενός τέτοιου άξονα είναι ίση με $\pi \cdot \frac{d}{2} = 31,42 \text{ mm}$ και προσπάθεια κόλλησης γέφυρας Wheatstone επί τέτοιου άξονα οδηγεί σε μεγάλες παραμορφώσεις της γέφυρας κατά τη διαδικασία κόλλησής της και συνεπώς σε πιθανά σφάλματα κατά την στρεπτική επιμήκυνση του άξονα. Με άλλα λόγια, είναι αρκετά πιθανό, η γέφυρα να μην μπορεί να παραλάβει σωστά, στα ευθύγραμμα τμήματα των Strain Gauges της, τις επιμηκύνσεις λόγω στρέψης του άξονα. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση ξεχωριστών, μονών Strain Gauges και τη δημιουργία πλήρους ή μισής γέφυρας με αυτά.



Εικόνα 6.1- Παράδειγμα εφαρμογής σε άξονα διαμέτρου 10mm

Ένα δεύτερο πρόβλημα που προκύπτει λόγω αξόνων μικρής διαμέτρου, είναι οι ταλαντώσεις εξαιτίας της τοποθέτησης του πομπού επί του άξονα. Ο πομπός της τηλεμετρίας είναι απολύτως απαραίτητος για τη διαδικασία της μέτρησης. Όμως, ο πομπός έχει μάζα και τοποθέτηση μάζας επί στρεφόμενου άξονα προκαλεί καμπτικές ταλαντώσεις οι οποίες είναι δυνατό, αν και όχι πολύ πιθανό, να επηρεάσουν τη μέτρηση, κυρίως όταν γίνεται χρήση μισής ή 1/4 – γέφυρας. Επίσης και ίσως το βασικότερο, είναι πιθανό να επηρεάσουν μόνιμα την ευθυγράμμιση του αξονικού συστήματος, προκαλώντας σημαντικά προβλήματα φθοράς στον κινητήρα ή στα έδρανα. Κατά τις συστάσεις της Binsfeld, για να αντιμετωπιστούν τέτοιου είδους φαινόμενα και λαμβάνοντας υπόψη πως ο πομπός χωρίς την κεραία και η θήκη της μπαταρίας έχουν το ίδιο βάρος, πρέπει να τοποθετούνται αντιδιαμετρικά του άξονα, με μόνη προσοχή στην τοποθέτηση της κεραίας του δέκτη που θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν κοντά στον πομπό.

Τέλος, εκτός από μικρή διάμετρο, οι άξονες των ηλεκτροκινητήρων έχουν κατά κανόνα και μικρό μήκος από την έξοδο του κινητήρα έως το κομπλέρ, κάνοντας την τοποθέτηση του πομπού στην αποδεκτή απόσταση από το Strain Gauge, δύσκολη. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ο πομπός μπορεί να τοποθετείται επί του κομπλέρ ή, αν κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατό, να τοποθετείται όλο το σύστημα μετά το κομπλέρ σε τμήμα του άξονα με επαρκή χώρο, λαμβάνοντας υπόψη πιθανές απώλειες στο κομπλέρ (συνήθως μηδενικές ή αμελητέες).

6.1.3 Σφηναύλακας επί άξονα

Οι περισσότερες ηλεκτρομηχανές, διαθέτουν σφηναύλακα επί του άξονα του κινητήρα για να διευκολύνουν τη σύνδεση με κομπλέρ. Ο σφηναύλακας αποτελεί εσοχή επί του άξονα με αποτέλεσμα, στη γειτονιά του, να διαταράσσει την κατανομή των επιφανειακών τάσεων και επιμηκύνσεων κάνοντας τη μέτρηση δύσκολη.



Εικόνα 6.2- Παράδειγμα Σφηναύλακα επί άξονα

Σε τέτοιες περιπτώσεις πρέπει η γέφυρα Wheatstone να τοποθετείται κατά το δυνατόν, αντιδιαμετρικά του άξονα, έτσι ώστε οι επιφανειακές τάσεις-επιμηκύνσεις να εξομαλύνονται κατά το μέγιστο δυνατόν. Απεδείχθη από την παρούσα εργασία πως αποκλίσεις κατά τη μετρούμενη και πραγματική ροπή σε αυτές τις περιπτώσεις είναι πολύ μικρές και εμπίπτουν στα πλαίσια του αποδεκτού. Σε περίπτωση διπλού αύλακα, δύο αυλάκων δηλαδή σε αντιδιαμετρικές θέσεις, συνίσταται να γίνεται χρήση απλών Strain Gauges για κατασκευή γέφυρας Wheatstone, κατά το δυνατόν στις ομαλές περιοχές του άξονα.

6.1.4 Μη-ορθή ευθυγράμμιση Strain Gauge

Παρόλο που δεν αποτελεί πρόβλημα αποκλειστικά των ηλεκτρομηχανών, οι παραπάνω δυσχέρειες μπορεί να οδηγήσουν σε μη-ορθή εφαρμογή του Strain Gauge. Κατά τις συστάσεις της Binsfeld, απόκλιση έως και τέσσερις μοίρες δεν προκαλεί σημαντικές διαφορές. Συγκεκριμένα από τη σχέση $n=(\cos 2\alpha - 1) \cdot 100\%$ για 4° απόκλιση, το σφάλμα είναι της τάξης του 0,99% και όπως απεδείχθη στη σχετική δοκιμή, απόκλιση περίπου 12° προκαλεί σφάλμα της τάξης του 10%. Αν επομένως κολληθεί το Strain Gauge κεκλιμένα σε σχέση με την ορθή για την εφαρμογή θέση και δεν είναι δυνατές διορθωτικές ενέργειες (αποκόλληση και κόλληση νέου με ορθό τρόπο), πρέπει τουλάχιστον να γίνει διόρθωση στην τιμή του με βάση τη σχετική θεωρία σφαλμάτων.

Εδώ κρίνεται σημαντικό να γίνει η διάκριση μεταξύ σχετικής περιστροφής Strain Gauge για εφαρμογή απλής φόρτισης και για εφαρμογή σε άξονα υπό σύνθετη φόρτιση, για παράδειγμα για μια εφαρμογή σε άξονα πρόωσης πλοίου. Από τη θεωρία είναι γνωστό, πως περιστροφή κατά $\pm 45^\circ$ ενός Strain Gauge προσανατολισμένου να μετράει στρέψη, αναπροσανατολίζεται στο να μετράει εφελκυσμό/θλίψη, και στο παραπάνω παράδειγμα, από ροπή, μετράει ώση. Συνεπώς, το ποσοστό σφάλματος για μία τέτοια υποθετική εφαρμογή, θα αποκλίνει σημαντικά από τη θεωρία και το υπολογισθέν κατά το πείραμα, είτε αυξανόμενα είτε μειούμενα σε σχέση με την πραγματική τιμή, ανάλογα τις σχετικές αλληλεπιδράσεις των φορτίσεων. Με γνώση αυτής της υπόθεσης, ακόμα μεγαλύτερη προσοχή πρέπει να δίνεται σε τέτοιου είδους εφαρμογές ως προς τον προσανατολισμό των Strain Gauges, σε σχέση με εφαρμογές απλών φορτίσεων.

6.1.5 Παρατηρήσεις ως προς τη δειγματοληψία

Οι ηλεκτροκινητήρες αποδίδουν τη ροπή με σταθερό ή σχεδόν σταθερό ρυθμό, σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Αυτό συμβαίνει διότι η κυκλοφορία του ρεύματος σε ρότορα και στάτη γίνεται με σταθερό ρυθμό χωρίς παλμούς με συνέπεια η ροπή να παράγεται με συνεχή, σταθερό ρυθμό. Αντίθετα στις ΜΕΚ και συγκεκριμένα στις εμβολοφόρους ΜΕΚ, η ροπή παράγεται στο θάλαμο καύσης σε διακριτά πακέτα ή παλμούς ροπής ανάλογα με το χρονισμό της καύσης στους κυλίνδρους. Αυτό οδηγεί σε δυνατότητα χαμηλότερου ρυθμού δειγματοληψίας στους ηλεκτροκινητήρες. Δηλαδή, εφόσον η ροπή αποδίδεται με σταθερό ρυθμό χωρίς διακριτούς παλμούς, δεν υπάρχει ανάγκη συχνής δειγματοληψίας, για παράδειγμα με παλμογράφο. Αντίθετα, λήψη τιμής ανά ένα δευτερόλεπτο είναι ικανοποιητική για κάθε εφαρμογή και σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερη συχνότητα, δειγματοληψία ανά 0,1 δευτερόλεπτο είναι υπεραρκετή.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Αφού αποδείχτηκε ότι η μέθοδος των επιμηκυνσιόμετρων τύπου αντιστάσεων είναι επαρκής για τη μέτρηση ροπής σε ηλεκτρομηχανές, πρέπει να διερευνηθούν πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις της μεθόδου αυτής.

Η ηλεκτροπρόωση πλοίων κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος σαν κύριο μέσο πρόωσης πλοίων. Κατά συνέπεια, εκτός από την ροπή που αποδίδει ο κινητήρας και απορροφά η προπέλα, χρειάζεται να είναι γνωστή και η ώση που αποδίδει η προπέλα στο πλοίο. Η ώση ενός πλοίου οφείλεται στη δύναμη που ασκούν τα μόρια του νερού στην προπέλα του πλοίου καθώς αυτή περιστρέφεται και τα επιταχύνει, η ώση αυτή μεταφέρεται μέσω του άξονα στο έδρανο ώσης (thrust bearing) και από εκεί μεταφέρεται στο πλοίο ως σύστημα. Κατά συνέπεια, η γνώση της ακριβούς τιμής της ώσης και της μεταβολής της ανά το χρόνο ζωής ενός πλοίου, δίνει πολλές χρήσιμες πληροφορίες για το πώς μεταβάλλεται η ρύπανση της γάστρας, την αύξηση της επιφανειακής τραχύτητας της γάστρας, καθώς και πληροφορίες για τη ρύπανση και την απόδοση της προπέλας.

Τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα, ο κύριος άξονας του πλοίου να βρίσκεται υπό σύνθετη κατάσταση μηχανισιακής φόρτισης. Συγκεκριμένα, ο άξονας βρίσκεται υπό στρέψη και θλίψη ταυτόχρονα (και πολλές φορές και υπό κάμψη). Η ανάπτυξη λοιπόν μιας εφαρμογής, ικανής να μετράει ταυτόχρονα αυτές τις δύο δυνάμεις (στρεπτικές και θλιπτικές) είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία ενός πλοίου. Οι οδοί που θα κινηθεί μια τέτοια έρευνα θα πρέπει να είναι δυο, η ανάπτυξη μιας μόνιμης εφαρμογής και η ανάπτυξη μιας φορητής εφαρμογής.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, υπήρξαν κάποιες ιδέες για το πώς κάτι τέτοιο θα μπορούσε να επιτευχθεί. Οι ιδέες αυτές, αν και σε εμβρυακή κατάσταση, περιλάμβαναν τοποθέτηση δύο ξεχωριστών γεφυρών Wheatstone επί του υπό μελέτη άξονα, χωροταξικά με

τέτοιο τρόπο ώστε η μία να είναι ευαίσθητη σε θλιπτικές αποκλειστικά επιμηκύνσεις και η δεύτερη σε στρεπτικές. Τα δύο κυκλώματα θα συνδέονταν στον πομπό του TorqueTrak 10k αφού μεταξύ τους θα παρεμβалλόταν κάποιου τύπου δίοδος που θα προωθούσε την τάση τροφοδοσίας εναλλάξ στις δύο γέφυρες και την τάση σήματος από την εκάστοτε ενεργή γέφυρα, στο σύστημα πομπού-δέκτη.

Τα προβλήματα που πρέπει να λυθούν για την ανάπτυξη ενός τέτοιου συστήματος είναι:

- Ο προγραμματισμός/χρονισμός της δίοδου
- Η αποσύμπλεξη των δεδομένων των δύο γεφυρών
- Η συχνή δειγματοληψία
- Η ορθή ανάλυση σφαλμάτων της εφαρμογής.

Τα οφέλη μιας τέτοιας εφαρμογής είναι πως γίνεται ταυτόχρονη, για την ακρίβεια πρακτικά ταυτόχρονη, μέτρηση ροπής και ώσης. Επίσης μια τέτοια εφαρμογή είναι χαμηλού σχετικά κόστους καθώς και η τεχνολογία που απαιτείται για αυτήν, είναι άμεσα διαθέσιμη.

7. Βιβλιογραφία

- [1] Προυσαλίδης Ι. (2012). Ηλεκτροτεχνικές εφαρμογές σε πλοία και πλωτές κατασκευές. Αθήνα, Εκδόσεις Συμμετρία
- [2] Βουρνάς Κ., Κονταξής Γ (2006). Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Αθήνα, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.
- [3] Doebelin E. (1990, Fourth Edition). Measurement Systems Application and Design. Ohio, McGraw-Hill International Editions.
- [4] Hoffman K. (1989). An Introduction to Measurements using Strain Gages. Alsbach, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.
- [5] Αλεξανδράκης Ν. (2011). Εργαστήριο Ναυτικής Μηχανολογίας Ι, Εργαστηριακή Άσκηση ΕΙ.3:«Μέτρηση στέψης, κάμψης και ώσης άξονα». Αθήνα, Σημειώσεις Μαθήματος ΕΜΠ.
- [6] Chih-Jer Lin, Chii Ruey Lin, Shen-Kai Yu, Guo-Xing Liu, Chih-Wei Hung & Hai-Pin Lin. (2012) Study on Wireless Torque Measurement Using SAW Sensors. Taiwan, InTech
- [7] Honeywell Inc. (-) New ways to measure torque may make your current method obsolete, <http://www.honeywell.com/sensing>.
- [8] Lonsdale A. (-). Dynamic Rotary Torque Measurement Using Surface Acoustic Waves. Wroxtton, <http://www.sensors.co.uk/>
- [9] Vishay Precision Group. (2010). Vishay Technical Notes. Vishay Precision Group, <http://www.micro-measurements.com>
- [10] Murphy R. (2008). Developing, Demonstrating, and Validating a Vehicle Test Bed to Extend the Capabilities of a Chassis Dynamometer Test System. Ohio, Diploma Thesis
- [11] Schrand D. (-). The Basics of Torque Measurement. Sensor Developments Inc., <http://www.sendev.com>
- [12] Binsfeld Engineering Inc. (2007). Binsfeld TorqueTrak 10k Torque Telemetry System Manual. Maple City, <http://www.binsfeld.com/>
- [13] Datum Electronics Ltd. (-).Series 430 Shaft Power Measurement Kit. Trinity Wharf, <http://www.datum-electronics.co.uk/>
- [14] Αβαριτσιώτης Ι. (2003). Τεχνολογία Αισθητήρων & Μικροσυστημάτων με Εργαστηριακές Ασκήσεις. Αθήνα, Έκδοση Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Παράρτημα Α- Σύγκριση σημείων ενδιαφέροντος ροπομέτρων

Company	Binsfeld Engineering Inc.	Datum Electronics
Model	TorqueTrak 10k	Series 430 Compact
Fixed Diameter	NO	NO
Max shaft Diameter	Any	500 mm
Min Shaft Diameter	Any	30 mm
Operating temperatures	-30 to 80 Celsius	0 to 70 Celsius
Weight	85 grams	Not specified but estimated to be similar to TorqueTrak10
Dimensions	25mm x 41mm x 64mm	Not specified but estimated to be similar to TorqueTrak10
Output Signal	4-20 mA	4-20 mA
Battery operated	YES	YES
Power Supply	Battery	Battery
Battery type	simple 9V	PP3 (Rechargeable, model specific)
Operating time	24h operating/240h standby	4 days operating
Error/Accuracy	better than $\pm 1.0\%$	Electronics 0.1% / Total not specified
Price (estimate)	5000 euro roughly	5000 euro roughly

Παράρτημα B- Specifications του TorqueTrak 10k

TorqueTrak 10K Specifications

TT10K-S Transmitter

Power supply voltage 7 to 18 Vdc

Power supply current1

Transmit mode 40 mA (nom), 50 mA (max)

Standby mode 4 mA (nom), 5 mA (max)

9V Ultralife lithium battery life1

Transmit mode 24 hours (typ)

Standby mode 240 hours (est)

Bridge excitation voltage 2.50 VDC ($\pm 0.1\%$, 10ppm/ $^{\circ}$ C)

Available output current 20 mA (max) to sensor

Input voltage range (\pm S to -E) 0.2 to 3.9 V

Offset error2 $\pm 0.16\%$ FS max 25 $^{\circ}$ C ambient

Offset temperature coefficient2 $\pm 0.004\%$ FS/ $^{\circ}$ C max 0-50 $^{\circ}$ C amb

Gain error2 $\pm 0.25\%$ R max 25 $^{\circ}$ C ambient

Gain temperature coefficient2 $\pm 0.005\%$ R/ $^{\circ}$ C max 0-50 $^{\circ}$ C amb

Shunt resistor (Reference 1) 437400 Ω , $\pm 0.1\%$, 25 ppm/ $^{\circ}$ C

Shunt resistor (Reference 2) 87370 Ω , $\pm 0.1\%$, 25 ppm/ $^{\circ}$ C

Simulated torque strain (350 Ω bridge, GF = 2.0)

Shunt resistor (Ref 1) 100 microstrain (μ e)

Shunt resistor (Ref 2) 500 microstrain (μ e)

Note: TX10K gain levels 500, 1000 and 2000 are calibrated using shunt resistor Reference 2.

Gain levels 4000, 8000 and 16000 are calibrated using shunt resistor Reference 1. All gain levels are calibrated with a 350 Ω bridge.

Antenna connection Reverse SMA

G-force 3000 G's (max continuous)

Operating temperature range -30 to 85 $^{\circ}$ C (-22 to 185 $^{\circ}$ F)

Size (without antenna) 1.00" x 1.63" x 2.50"

(25 mm x 41 mm x 64 mm)

Note: height increases to 2.63" (67 mm) with antenna

Weight 3 oz (85 grams)

Screw Terminal Connector

1 +B Positive Battery or DC power supply input

2 -B Negative Battery or DC power supply input

3 +E Positive Excitation or voltage output

4 +S Positive Sense or voltage input

5 -S Negative Sense or voltage input

6 -E Negative Excitation voltage output (internally connected to -B)

**Sensor Input Range
¼ Bridge, 1 Active Arm**

TX10K-S Gain Setting	Full Scale Strain ($\mu\epsilon$)	Full Scale Input (mV)	System Gain (V/V)		
			Min (0.25x)	Nom	Max (4.0x)
500	± 16000	± 20	125	500	2000
1000	± 8000	± 10	250	1000	4000
2000	± 4000	± 5	500	2000	8000
4000	± 2000	± 2.5	1000	4000	16000
8000	± 1000	± 1.25	2000	8000	32000
16000	± 500	± 0.625	4000	16000	64000

**Sensor Input Range for Torque or Bending
Full Bridge, 4 Active Arms**

TX10K-S Gain Setting	Full Scale Strain ($\mu\epsilon$)	Full Scale Input (mV)	System Gain (V/V)		
			Min (0.25x)	Nom	Max (4.0x)
500	± 4000	± 20	125	500	2000
1000	± 2000	± 10	250	1000	4000
2000	± 1000	± 5	500	2000	8000
4000	± 500	± 2.5	1000	4000	16000
8000	± 250	± 1.25	2000	8000	32000
16000	± 125	± 0.625	4000	16000	64000

**Sensor Input Range for Axial Strain
Full Bridge, 2.6 Active Arms**

TX10K-S Gain Setting	Full Scale Strain ($\mu\epsilon$)	Full Scale Input (mV)	System Gain (V/V)		
			Min (0.25x)	Nom	Max (4.0x)
500	± 6154	± 20	125	500	2000
1000	± 3077	± 10	250	1000	4000
2000	± 1538	± 5	500	2000	8000
4000	± 769	± 2.5	1000	4000	16000
8000	± 385	± 1.25	2000	8000	32000
16000	± 192	± 0.625	4000	16000	64000

RM10K Remote Control

Power supply 9 V battery (supplied)
Pulsed infrared frequency 38 KHz
Transmission distance (line-of-sight)
Normal mode 6 in (15 mm, typ)
High power mode 10 ft (3 m, typ)
Operating temperature range
(Battery-limited) -20 to 60°C (-4 to 140°F)
Size 0.88" x 2.5" x 4.4"
(22 mm x 63 mm x 112 mm)
Weight (with battery) 4 oz (113 grams, typ)

BH10K Battery Holder

Size 1.00" x 1.63" x 2.50"
(25 mm x 41 mm x 64 mm)
Weight (with battery) 3 oz (85 grams, typ)

Screw Terminal Connector

1 +B Positive Battery output
2 -B Negative Battery output

RX10K Receiver

Analog voltage output signal
Nominal range ± 10 V
Maximum range ± 12 V
Analog output connection 5-way binding posts
Analog output impedance 50 Ω
System Gain adjustment 0.25 to 4.0 x Transmitter Gain
Offset adjustment ± 10 V
Display 2-line x 20 character high contrast LCD w/backlight
Power input 10 to 18 VDC @ 300mA (max)
(110 or 220VAC adapter included)
Antenna input connection SMA
Power input connector 2.1 mm jack
(5.5 mm x 2.1 mm plug)
Operating temperature range -20 to 70°C (-4 to 158°F)
Size 2.88" x 5.75" x 8.50"
(73 mm x 146 mm x 216 mm)
Weight 2 lb (1 kg)

Digital Output (Com) Specification

The TT10K system includes a streaming digital output port on the rear panel of the RX10K Receiver. This output is RS-232 type data. A DB9 male-female cable is supplied for direct connection to a PC Com port.

Pin out for the DB9 connector on the RX10K

1
2 TXD Data output
3
4
5 GND Ground or common connection
6
7
8
9

PC COM Port Settings

Bits per second 115200
Data bits 8
Parity none
Stop bits 1

Flow control none

Sample Protocol

The output sample rate is 2400 samples per second. There are 4 bytes sent for each sample:

- 1 Start byte ASCII 'SOH' code (hex 01)
- 2 Sample data low byte
- 3 Sample data high byte
- 4 Stop byte ASCII 'CR' code (hex 0D)

The sample data is sent as a 16 bit signed integer:

$$Dout = Vin \times A_{sys} \times 1000$$

Dout = streaming digital output sample data

Vin = TX10K transmitter voltage input (gage or sensor voltage)

A_{sys} = TT10K system gain factor

TorqueTrak 10K Telemetry System

Resolution 14 bits

Sample transmission rate 2400 Hz

Signal bandwidth³ 500 Hz (-3dB)

Signal to noise ratio^{2,3} 67 dB (min)

Signal delay³ 4.2 mS (typ)

(transmitter input to voltage output)

RF transmission distance 20 ft (6 m) line-of-sight (typ)

Gain error 0.25%R (max) @ 25°C

Gain drift² 0.005%R/°C (max) 0-50°C

Zero error² 0.16%FS (max) @ 25°C

Zero drift² 0.004%FS/°C (max) 0-50°C

RF Channel Frequencies Table

RF Channel	Frequency (MHz)	RF Channel	Frequency (MHz)
1	902.62	9	914.62
2	904.12	10	916.12
3	905.62	11	917.62
4	907.12	12	919.12
5	908.62	13	920.62
6	910.12	14	922.12
7	911.62	15	923.62
8	913.12	16	925.12

Note: For best performance, use Channels 1-8 when operating at high temperatures

NOTES:

All specifications subject to change.

1 Measured with 350Ω bridge

2 TX10K-S Transmitter gain level = 4000

3 RX10K filter set at 500 Hz

Pelican™ case details:

Outer dimensions: 20" x 14" x 5" (508mm x 356mm x 127mm)

Shipping weight: 13 lbs (5.9 kg)

Παράρτημα Γ- Ορθή Διαδικασία κόλλησης Strain Gauges

Παρακάτω παρουσιάζεται βήμα-βήμα, η ορθή διαδικασία κόλλησης των Strain Gauges με βάση τις συστάσεις της Binsfeld καθώς και εμπειρικές παρατηρήσεις.

Προετοιμασία της Επιφάνειας

1. Μια επιφάνεια περί των 5 cm² πρέπει να προετοιμαστεί για την κόλληση. Αρχικά, ξύνεται οποιοδήποτε χρώμα ή άλλες επικαλύψεις και ελέγχεται ο άξονας για υπολείμματα λαδιού. Εάν είναι απαραίτητο, χρησιμοποιείται Degreaser.

2. Λειανίνεται η περιοχή με γυαλόχαρτο 220 grit. Αφού λειανθεί η επιφάνεια με το 220 grit, στη συνέχεια βρέχεται με M-Prep Conditioner A και συνεχίζεται η λείανση με γυαλόχαρτο 400 grit. Επείτα, συνεχίζεται η επεξεργασία της επιφάνειας με χρήση του M-Prep Conditioner A και σκουπίζεται η περιοχή με χαρτομάντηλο μόνο προς μία κατεύθυνση. Κάθε φορά πρέπει να χρησιμοποιείται καθαρή περιοχή του χαρτομάντηλου για την αποφυγή επιμόλυνσης.

3. Ψεκάζεται ο άξονας με το M-Prep Neutralizer 5A. Ακολουθείται η ίδια διαδικασία με το βήμα 2. Το διάλυμα δεν πρέπει να αφήνεται να στεγνώσει στην επιφάνεια, καθώς αυτό μπορεί να αφήσει μια ταινία που προκαλεί επιμόλυνση και να διακινδυνεύει την κόλληση.

Η επιφάνεια είναι τώρα έτοιμη για κόλληση.

Σήμανση του άξονα για ορθή ευθυγράμμιση

4. Το gauge πρέπει να είναι κάθετο προς τον άξονα περιστροφής. Σε γενικές γραμμές, αυτό μπορεί να επιτευχθεί με το μάτι αφού απόκλιση λιγότερο από 4° δεν θα δημιουργήσει σημαντικά σφάλματα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια, προτείνονται δύο μέθοδοι για τη σήμανση του άξονα:

α) Χρήση «γωνιάς» και ανεξίτηλου μαρκαδόρου ή γραφέα για κάθετες και παράλληλες γραμμές.



β) Κοπή μιας λωρίδας χαρτιού μιλμετρέ μεγαλύτερης από την περιφέρεια του άξονα, κόλληση του χαρτιού στον άξονα ευθυγραμμισμένα και χρήση του σαν οδηγού.

Προετοιμασία του Gauge

5. Χρησιμοποιώντας μια λαβίδα, αφαιρείται ένα Gauge από τη συσκευασία του. Χρησιμοποιώντας το πλαστικό κουτί του Gauge ως καθαρή επιφάνεια, τοποθετείται το Gauge σε αυτό. Με την πλευρά προς κόλληση από κάτω. Λαμβάνεται κομμάτι της ταινίας PCT-2M Mylar και τοποθετείται στο Gauge, στο κέντρο. Σιγά-σιγά σηκώνεται η ταινία σε μια οξεία γωνία. Έως ότου το Gauge να βρίσκεται ασφαλώς επί της ταινίας.

(Σημείωση: αντί για PCT-2M Mylar Tape, δύναται να χρησιμοποιηθεί απλό σελοτέιπ του εμπορίου)

Τοποθέτηση του Gauge

6. Χρησιμοποιώντας τα μικρά τρίγωνα που βρίσκονται στις τέσσερις πλευρές του Gauge, τοποθετείται στον άξονα, κάθετα με τον άξονα της ατράκτου, ευθυγραμμίζοντας με τα σημάδια του βήματος 4. σαν οδηγό. Αν φαίνεται να μην είναι ευθυγραμμισμένα, σηκώνοντας το ένα άκρο της ταινίας έως ότου η διάταξη να είναι ελεύθερος να ευθυγραμμιστεί εκ νέου, δύναται να επανευθυγραμμιστεί.



Τοποθέτηση του Gauge στον άξονα

7. Το Gauge θα πρέπει τώρα να τοποθετηθεί. Για άλλη μια φορά, σηκώνεται η μία άκρη της ταινίας μέχρι το Gauge είναι εντελώς ελεύθερο από την επιφάνεια με έως και 5 χιλιοστά κολλητικής ταινίας ελεύθερης στο στερεωμένο άκρο του και με την επιφάνεια συγκόλλησης του Gauge πλήρως εκτεθειμένη.

8. Απλώνεται ένα πολύ λεπτό, ομοιόμορφο στρώμα M-Bond 200 Catalyst στην επιφάνεια συγκόλλησης του Gauge. Αυτό θα επιταχύνει την κόλληση όταν εφαρμόζεται η κόλλα. Πολύ λίγος καταλύτης είναι απαραίτητος. Ο καταλύτης πρέπει να αφηθεί να στεγνώσει τουλάχιστον ένα λεπτό υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος +25° C και 30-65% σχετική υγρασία.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Τα επόμενα τρία βήματα πρέπει να ολοκληρωθούν με τη σωστή σειρά, μέσα σε 3-5 δευτερόλεπτα.

Χρειάζονται:

M-Bond Adhesive

Teflon Tape

Χαρτομάνηλα

9. Με το ήδη σηκωμένο Gauge του προηγούμενου βήματος, εφαρμόζεται μια λεπτή λωρίδα κόλλας στην άκρη του, εκεί όπου η ταινία συναντά τον άξονα. Η λωρίδα πρέπει να είναι λεπτή ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφη διασπορά.

10. Κρατώντας την ταινία τεντωμένη, αργά και σταθερά, σύρεται με ένα απλό σκούπισμα και πιέζοντας κατά μήκος της ταινίας πάνω από το Gauge, χρησιμοποιώντας την ταινία τεφλόν (για να προστασία του αντίχειρά από την κόλλα) και έναν χαρτομάνηλο (για να απορροφήσει την κόλλα που συμπιέζει έξω από κάτω από την ταινία). Ένα πολύ λεπτό, ομοιόμορφο στρώμα κόλλας είναι επιθυμητό για βέλτιστη απόδοση.

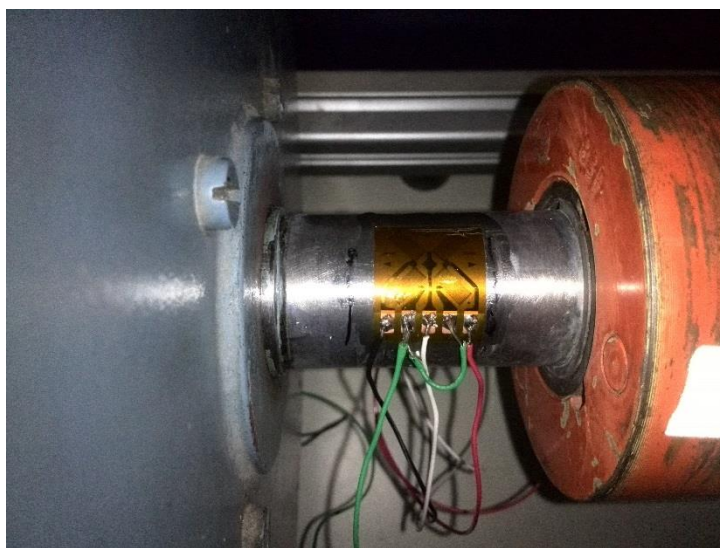
11. Αμέσως εφαρμόζεται σταθερή πίεση στο Gauge κυλώντας τον αντίχειρά πάνω από την περιοχή της κόλλησης, για περίπου ένα λεπτό σε κανονικές συνθήκες. Αύξηση θερμοκρασίας και υγρασίας μπορεί να οδηγήσουν σε ανάγκη περισσότερου χρόνου πίεσης.

12. Αφήνεται η κολλητική ταινία mylar για επιπλέον πέντε λεπτά για να μπορέσει να στεγνώσει πλήρως η κόλλα και στη συνέχεια ξεφλουδίζεται η ταινία από το Gauge.

Καλωδίωση του μετρητή

13. Τοποθετείται καλά πάνω σε κάθε rad του Gauge. Ακολούθως, γυμνώνονται κατάλληλα τα καλώδια που θα χρησιμοποιηθούν και στις δύο άκρες τους.

14. τοποθετούνται τα καλώδια στις κατάλληλες θέσης με χρήση κολλητηριού και καλά και αφήνεται να κρυσταλλώσει.



15. Τέλος, για προστασία από σκόνη και υγρασία, βάφεται η επιφάνεια, το Gauge και οι άκρες των καλωδίων με M-Coat Polyurethane και αφήνεται να στεγνώσει στον αέρα 15 λεπτά. Για περαιτέρω προστασία του Gauge, μπορεί να σκεπαστεί με φύλλα καουτσούκ και ένα κομμάτι του M-Coat FA-2 ταινία αλουμινόχαρτου (προαιρετικό) και στη συνέχεια με μονωτική ταινία.

Παράρτημά Δ- Data Acquisition

Υπάρχουν διάφορες μεθοδολογίες και συσκευές συλλογής δεδομένων (Data Acquisition) που να έχουν τη δυνατότητα να συνεργαστούν με το Binsfeld Engineering Inc. TorqueTrak 10k. Αρχικά, η Binsfeld έχει αναπτύξει σε συνεργασία με την Op-Daq, το εμπορικό προϊόν Op-Torq Field Test TT10k, ειδικά για το TorqueTrak 10k με δυνατότητα σύνδεσης με τα τρία διαφορετικά ροπόμετρα καθώς και λογισμικό με δυνατότητα μετατροπής του σήματος απευθείας σε ροπή καθώς και αποθήκευσης των δεδομένων.



Op-Torq Field Test TT10k

Παρόλα αυτά, το συγκεκριμένο σύστημα είναι αρκετά κοστοβόρο, με τιμή περί των 3000 ευρώ. Κατά συνέπεια αναζητήθηκαν και άλλες, φθηνότερες λύσεις ίσης ακρίβειας.

Κατά την εργασία αυτή συνεπώς και παράλληλα με τον κυρίως σκοπό της, έγινε δοκιμή και πολλών μεθόδων συλλογής δεδομένων, των οποίων τα αποτελέσματα παρουσιάζονται εν συντομία. Συγκεκριμένα δοκιμάστηκε η λήψη δεδομένων μέσω παλμογράφου, μέσω πολυμέτρου με δυνατότητα σύνδεσης με H/Y, μέσω Data Logger και μέσω μιας Data Acquisition Card ειδικής κατασκευής.

Παλμογράφος

Η σύνδεση των αναλογικών ακροδεκτών του συστήματος σε παλμογράφο, εκ πρώτης όψεως δείχνει να είναι η βέλτιστη επιλογή. Αυτό συμβαίνει διότι, ο παλμογράφος προσφέρει την υψηλότερη ακρίβεια από όλες τις πιθανές μεθόδους συλλογής δεδομένων. Παρόλα αυτά, ο παλμογράφος έχει κ πολύ σημαντικά μειονεκτήματα που καθιστούν τη χρήση του μη ενδεικνύομενη παρά μονάχα για υψηλής ακρίβειας, εργαστηριακές εφαρμογές. Συγκεκριμένα και κατά τη χρήση των παλμογράφων της Tektronix της σειράς TDS, παρατηρήθηκαν αρχικά δυσκολίες ως προς τη μεταφορά τους διότι παρόλη τη φορητότητά τους, είναι αρκετά ογκώδεις και επιπροσθέτως απαιτούν τη σύνδεση με H/Y προκειμένου να μεταδίδουν τα δεδομένα ώστε να γίνεται η αποθήκευσή τους. Τα αρχεία που χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση των δεδομένων είναι συνήθως Comma Separated Values (.csv).



Tektronix TDS2000

Ένα άλλο μειονέκτημα των παλμογράφων, είναι πως δεν έχουν τη δυνατότητα να μεταδίδουν/αποθηκεύουν δεδομένα επ' άπειρον παρά μονάχα σε χρονικά διαστήματα μεταβαλλόμενης διάρκειας για διάφορα μοντέλα παλμογράφων. Τέλος και λόγω της μεγάλης τους ευαισθησίας, οι παλμογράφοι μετρούν εκτός από τις μετρήσεις που ενδιαφέρουν και ένα μεγάλο ποσοστό ηλεκτρομαγνητικού θορύβου και για αυτό το λόγο απαιτείται περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που αποθηκεύονται από αυτούς (εκθετική επεξεργασία ή άλλη στατιστική μέθοδος).

Κάρτα Συλλογής Δεδομένων (Data Acquisition Card)

Σε γενικές γραμμές ισχύει ότι και για τον παλμογράφο. Πρόκειται για μία κάρτα ειδικής κατασκευής του εργαστηρίου τριβολογίας, ικανή να «διαβάσει» και να μεταδώσει αναλογικά σήματα τάσης σε Η/Υ με υψηλή δειγματοληψία. Παρόλο το μικρό της μέγεθος, έχει και αυτή ορισμένες δυσκολίες ως προς τη χρήση της. Συγκεκριμένα απαιτεί διαρκώς να είναι γειωμένη σε μια μεταλλική επιφάνεια. Επίσης απαιτείται η σύνδεσή της με Η/Υ προκειμένου να αποθηκεύονται τα δεδομένα καθώς και τον κώδικα τους προγράμματος σε Visual Basic. Που έχει αναπτυχθεί για αυτήν την κάρτα.

Πολύμετρο

Η λύση της σύνδεσης των αναλογικών ακροδεκτών σε πολύμετρο που έχει δυνατότητα εκπομπής και αποθήκευσης των δεδομένων σε Η/Υ, είναι μια λύση υψηλής ακρίβειας και χαμηλού κόστους. Συγκεκριμένα, κατά τις δοκιμές έγινε χρήση του πολυμέτρου UNI-T UT61D που παρέχει αυτή τη δυνατότητα, κόστους 80 ευρώ.



UNI-T UT61D

Η λύση αυτή είναι μια πολύ καλή επιλογή για την πλειοψηφία των εφαρμογών. Η ακρίβεια είναι της τάξης του 0,1 mV και το σύστημα με το λογισμικό είναι πολύ εύκολο προς το χειρισμό.

Στα μειονεκτήματά του συγκαταλέγονται ομοίως η ανάγκη για σύνδεση με Η/Υ, που το καθιστά σχετικά ογκώδη λύση και κυρίως ο περιορισμός στη συχνότητα της δειγματοληψίας, που περιορίζεται στο 1sec/τιμή. Με χρήση του πολυμέτρου, δεν απαιτείται ιδιαίτερη στατιστική επεξεργασία των δεδομένων παρά μονάχα σε σπάνιες περιπτώσεις.

Data Logger

Είναι συσκευές χειρός και στη λειτουργία τους είναι μεταξύ παλμογράφου και πολυμέτρου. Έχουν δυνατότητα λήψης και αποθήκευσης δεδομένων σε εσωτερική μνήμη. Είναι ίσως η βέλτιστη λύση για εφαρμογές εκτός εργαστηρίου, σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας (π.χ. σε ένα μηχανοστάσιο)



Ο ρυθμός δειγματοληψίας τους είναι ικανοποιητικός, της τάξης του 0,1 sec/ τιμή και η ακρίβειά τους της τάξης του 0,1-0,01 mV. Συνδέονται με Η/Υ μέσω καλωδίου ή σύνδεσης Bluetooth ώστε να γίνει αποθήκευση των τιμών σε Η/Υ.

Παράρτημα Ε- Ορθή Διαδικασία Εγκατάστασης Εξοπλισμού

Πεδίο Δοκιμών

Αν και οι ρυθμίσεις του TX10K-S μπορεί να αλλάξουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του συστήματος, το καλύτερο είναι να καθοριστεί η κατάλληλη ρύθμιση ενίσχυσης (Gain) του πομπού για τη δεδομένη εφαρμογή, πριν από την εγκατάσταση.

1. Συνδέστε τον αισθητήρα στον άξονα (ή άλλη επιφάνεια) όπου θα πραγματοποιηθεί η μέτρηση.
2. Αφαιρέστε το κάλυμμα της μπαταρίας. Τοποθετήστε νέα μπαταρία 9V. Ασφαλίστε το κάλυμμα με τις βίδες. Βεβαιωθείτε ότι το κάλυμμα και οι βίδες είναι ορθά ασφαλισμένα.
3. Βιδώστε τη κεραία επάνω στο TX10K-S πομπό. Ασφαλίστε TX10K-S και BH10K με την άτρακτο χρησιμοποιώντας την ειδική ταινία με τις διαμήκεις ενισχύσεις. Ευθυγραμμίστε Μην καλύπτετε τον δέκτη υπέρυθρων και το δείκτη κατάστασης (LED) με την ταινία.

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Αν ο άξονας έχει μικρή διάμετρο, (≤ 25 mm), η ισορροπία θα μπορούσε να είναι ένα ζήτημα. Σε αυτήν την περίπτωση, τοποθετήστε το TX10K-S χωρίς κεραία και το BH10K με μπαταρία, σε διάταξη 180° το ένα από το άλλο στον άξονα. Το BH10K με μπαταρία ζυγίζει σχεδόν το ίδιο με το TX10K-S χωρίς την κεραία. Το TX10K-S θα μεταδώσει μικρές αποστάσεις χωρίς την κεραία εγκατεστημένη.

4. Κόψτε κατάλληλο μήκος του καλωδίου τροφοδοσίας (κόκκινο & μαύρο συνεστραμμένο ζεύγος). Συνδέστε το κόκκινο καλώδιο στο +B του BH10K και στο +B του TX10K-S και το μαύρο στο -B του BH10K και -B του TX10K-S. Η ενδεικτική λυχνία κατάστασης πρέπει να αναβοσβήσει αρκετές φορές και στη συνέχεια να έρθει σε συνεχή αναμμένη κατάσταση.
5. Κόψτε κατάλληλο μήκος των 4 αγωγών του καλωδίου κορδέλα (καλώδια τεσσάρων χρωμάτων). Τοποθετήστε τα στο Strain Gauge σύμφωνα με τις οδηγίες της εικόνας στο τέλος του παραρτήματος και τις σχετικές συστάσεις του κατασκευαστή των Strain Gauges.
6. Συνδέστε την κεραία του δέκτη με την υποδοχή της στην πίσω πλευρά του δέκτη RX10K.
7. Εισάγετε στην υποδοχή AC / DC το καλώδιο παροχής ρεύματος στο RX10K. Συνδέστε ην πρίζα σε κατάλληλη πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος. Γυρίστε το διακόπτη του RX10K «POWER» στη θέση «ON», ενώ κρατάτε πατημένο το πλήκτρο «▲ ADJUST».

ΣΗΜΕΙΩΣΗ: Αυτό επαναφέρει τις παραμέτρους τους RX10K στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις τους.

8. Ενεργοποιήστε τα TX10K-S και RM10K (αν χρειάζεται). Βεβαιωθείτε ότι η ενδεικτική λυχνία κατάστασης είναι σχετικά σταθερή. Συγχρονίστε τα κανάλια εκπομπής μεταξύ RX10K και TX10K-S. Αν είναι δυνατόν, περιστρέψτε το TX10K-S για την επαλήθευση της ισχυρής λήψης σήματος σε όλες τις κατευθύνσεις.

9. Μεταβείτε στην κατάλληλη οθόνη του δέκτη για να ρυθμίσετε την ενίσχυση. Χρησιμοποιήστε το RM10K να διαμορφώσετε την ενίσχυση του πομπού στο κατάλληλο επίπεδο.
10. Μεταβείτε στην οθόνη autozero του δέκτη. Εφαρμόστε autozero χωρίς φορτίο στον άξονα. Πατήστε και κρατήστε πατημένο το πλήκτρο «ADJUST ▲» για 2 δευτερόλεπτα, μέχρι η οθόνη να εμφανίσει "Input Autozero: On".
11. Μεταβείτε στην οθόνη επιλογής του φίλτρου. Τοποθετήστε το φίλτρο στο επιθυμητό επίπεδο.
12. Μεταβείτε στην οθόνη επιλογής της ενίσχυσης και ρυθμίστε την ενίσχυση του δέκτη σύμφωνα με το επιθυμητό επίπεδο.
13. Συνδέστε συσκευή εγγραφής είτε στους ακροδέκτες της αναλογικής τάσης εξόδου ή στην ψηφιακή θύρα Com (DB9).
14. Το σύστημα είναι έτοιμο να καταγράψει δεδομένα.