



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Μηχανολογικών Κατασκευών & Αυτομάτου Ελέγχου
Εργαστήριο Στοιχείων Μηχανών

Σχεδιασμός και κατασκευή πρωτότυπης πειραματικής
διάταξης αποτίμησης της δυναμικής συμπεριφοράς
συμπλεκτών υγρής τριβής και έλεγχος καλής λειτουργίας

Διπλωματική εργασία
του

Γεώργιου Ευπολιά

Επιβλέπων: Βασίλειος Σπιτάς, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2022

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π και επιβλέποντα της παρούσας διπλωματικής εργασίας κ. Βασίλειο Σπιτά για την πολύτιμη βοήθειά του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, καθώς επίσης και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Χριστόφορ Προβατίδη Καθηγητή Ε.Μ.Π. και κ. Ιωάννη Αντωνιάδη Καθηγητή Ε.Μ.Π. Στο σημείο αυτό θέλω να ευχαριστήσω τον φίλο και υποψήφιο διδάκτορα Ε.Μ.Π. κ. Νικόλαο Ρόγκα για την καθοδήγηση και την βοήθεια στην παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και τον κ. Γεώργιο Δρακόπουλο Ηλεκτρολόγο Μηχανικό.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στον πειραματικό έλεγχο συμπλεκτών υγρής τριβής κατά τη φάση της σύμπλεξης και κατά τη φάση της ανοικτής λειτουργίας. Σκοπός είναι η προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας ενός συμπλέκτη που βρίσκεται σε μια μοτοσυκλέτα και καταπονείται τόσο υπό κανονικές όσο και υπό πιο απαιτητικές συνθήκες. Για τον σκοπό αυτό σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πρωτότυπη πειραματική διάταξη χαμηλού κόστους για τον έλεγχο της δυναμικής συμπεριφοράς των συμπλεκτών. Ο σχεδιασμός της διάταξης βασίστηκε στο πρότυπο SAE 2 ενώ είναι επίσης δυνατή και η διεξαγωγή διαφορετικών πειραματικών πρωτοκόλλων. Τα βασικά μέρη που απαρτίζουν τη διάταξη είναι η βάση στήριξης, ένας ηλεκτρικός κινητήρας ισχύος 1.5 kW που προσομοιώνει τη ΜΕΚ, ο πολύδισκος συμπλέκτης υγρής τριβής, το σύστημα πνευματικού κυλίνδρου-εμβόλου επενέργειας και οι αισθητήρες λήψης μετρήσεων. Τα μεγέθη ενδιαφέροντος είναι η ροπή και η γωνιακή ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και του φορτίου και η θερμοκρασία του ρευστού. Τα πειράματα που διεξήχθησαν και προτείνονται για αυτή τη διάταξη αφορούν τον έλεγχο φθοράς των δίσκων τριβής, την ικανότητα μεταφορά ροπής των δίσκων ανάλογα με το πλήθος, τη δύναμη επενέργειας και τον τύπο λαδιού, την αύξηση θερμοκρασίας του λαδιού σε συχνή χρήση του συμπλέκτη καθώς επίσης την κυκλοφορία του λαδιού.

Abstract

This diploma thesis concerns the experimental control of wet friction clutches during the engagement phase and during the open operation phase. The purpose is to simulate the operating conditions of a clutch found on a motorcycle and stressed under both normal and more demanding conditions. For this purpose, a prototype low-cost experimental setup was designed and built to test the dynamic behavior of clutches. The design of the device was based on the SAE 2 standard while it is also possible to carry out different experimental protocols. The main parts that make up the assembly are the support base, a 1.5 kW electric motor that simulates the MEK, the multi-disc wet friction clutch, the pneumatic cylinder-piston actuation system and the measurement sensors. The quantities of interest are the torque and angular velocity of the motor and load and the temperature of the fluid. The experiments carried out and proposed for this arrangement, concern the wear control of the friction discs, the torque transfer capacity of the discs depending on the number, the acting force and the type of oil, the increase in the temperature of the oil in frequent use of the clutch as well as the circulation of the oil.

Αφιερώνεται,

Στην οικογένειά μου

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	3
Abstract	4
1. Εισαγωγή – Πειραματικές διατάξεις.....	8
1.1 Ορισμός.....	8
1.2 Χρήση	8
1.3 Σημασία.....	8
1.4 Φιλοσοφία λειτουργίας	9
1.5 Μέρη και κατασκευή πειραματικών διατάξεων.....	9
1.6 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	10
2. Πολύδισκος συμπλέκτης υγρής τριβής.....	12
2.1 Εισαγωγή.....	12
2.2 Τα 3 στάδια σύμπλεξης συμπλέκτη υγρής τριβής	13
2.3 Υπολογισμός σταθεράς τριβής – ορισμοί	13
3. Υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις για τη δοκιμή λιπαντικών και υλικών τριβής σε συμπλέκτης υγρής τριβής.....	15
3.1 Πειραματική διάταξη SAE #2.....	15
3.1.1 Εισαγωγή.....	15
3.1.2 Εξαρτήματα.....	15
3.1.3 Τρόπος λειτουργίας	17
3.2 Παραλλαγές πειραμάτων της SAE No. 2.....	18
3.2.1 Μέθοδος DEXRON-III	18
3.2.2 Μέθοδος Mercon.....	18
3.2.3 Μέθοδος Jaso.....	19
3.2.4 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμών.....	19
3.2.5 LFVA	20
3.2.6 Πειραματική διάταξη κατά τον S. Forslund test rig [7].....	21
3.2.7 Διάταξη μέτρησης αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε μονό δίσκο τριβής	24
3.2.8 Παρατηρήσεις.....	25
4. Πειραματική διάταξη αποτίμησης της δυναμικής συμπεριφοράς συμπλεκτών υγρής τριβής και έλεγχος καλής λειτουργίας.....	27
4.1 Εισαγωγή.....	27
4.2 Αρχικός σχεδιασμός.....	27
4.3 Τελικός σχεδιασμός	29
4.3.1 Γενικά	29
4.3.2 Ανάλυση εξαρτημάτων	30
4.3.3 Συμπλέκτης	32
4.3.4 Μετρητικά όργανα.....	35
4.3.5 Παράμετροι σύνδεσης οργάνων στη DAQ	35
4.3.6 Προτεινόμενα πειράματα	36
5. Πειραματικές μετρήσεις.....	37
5.1 Κατηγορία Α.....	38
5.1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	40
5.2 Κατηγορία Β.....	41
5.2.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	44
5.3 Κατηγορία Γ.....	44
5.3.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	47
5.4 Κατηγορία Δ.....	48
5.4.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	52
5.5 Κατηγορία Ε.....	52
5.5.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	53
5.6 Κατηγορία ΣΤ.....	53

5.6.1	Ερμηνεία αποτελεσμάτων	54
6.	Οδηγίες συναρμολόγησης.....	56
6.1	Οδηγίες αφαίρεσης λαδιού από το κέλυφος του συμπλέκτη	60
7.	Κανονισμοί ασφαλείας.....	62
8.	Συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα	63
8.1	Συμπεράσματα	63
8.2	Προτάσεις βελτίωσης.....	63
9.	Βιβλιογραφία	65

1. Εισαγωγή – Πειραματικές διατάξεις

1.1 Ορισμός

Μία πειραματική διάταξη δοκιμών ορίζεται ως μια ειδική κατασκευή, έρευνας και ανάπτυξης που έχει σχεδιαστεί για τη μελέτη, βελτίωση και εξέλιξη μιας συγκεκριμένης εφαρμογής. Είναι ένα πρωτότυπο σύστημα που έχει κατασκευαστεί για εργαστηριακές δοκιμές και αποτελείται από μια σειρά εξαρτημάτων και οργάνων που σκοπό έχουν να προσομοιώσουν τη βασική λειτουργικότητα και τα περιθώρια εξέλιξης μιας νέας ή υπάρχουσας ιδέας ή τεχνολογίας, για περαιτέρω βελτίωσής της. Κατά την κατασκευή και τη δοκιμή πειραματικών διατάξεων, δίνεται έμφαση στην απόκτηση αξιόπιστων δεδομένων σε ιδανικές συνθήκες και στη συνέχεια στην όσο το δυνατόν καλύτερη προσαρμογή τους σε συνθήκες λειτουργίας εκτός εργαστηρίου.

1.2 Χρήση

Υπάρχουν πολλοί λόγοι για τους οποίους η κατασκευή πειραματικών διατάξεων είναι ωφέλιμη ή και απαραίτητη, όταν πρόκειται να βελτιωθεί κάποιο προϊόν ή να ανακαλυφθεί κάτι νέο. Βασικά χαρακτηριστικά που τις κάνουν απαραίτητες αναφέρονται παρακάτω:

- Κατανόηση των πλεονεκτημάτων μιας νέας διαδικασίας, ιδέας ή τεχνολογίας και δημιουργία μιας βάσης δεδομένων αναφοράς για την υποστήριξη περαιτέρω ανάπτυξης.
- Επίδειξη λειτουργικής απόδοσης της ιδέας στους ενδιαφερόμενους πριν από την επένδυση περισσότερων πόρων σε περαιτέρω ερευνητική προσπάθεια και εμπορική υλοποίηση.
- Ανάλυση και χαρακτηρισμός δυναμικών δεδομένων σε εργαστηριακό περιβάλλον όπου μπορούν να ελεγχθούν πλήρως οι συνθήκες και οι διάφορες εισοδοί όπως.
- Επικύρωση της καταλληλότητας της νέας τεχνολογίας με την έγκαιρη ανατροφοδότηση των χρηστών.

1.3 Σημασία

Στα πρώτα στάδια της έρευνας και ανάπτυξης, είναι σημαντικό να λαμβάνονται αξιόπιστα δεδομένα χωρίς να επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες όπως αλλαγές στη θερμοκρασία ή τον ανθρώπινο παράγοντα. Από την αρχή, η εστίαση θα πρέπει να είναι στην αξιόπιστη απόκτηση δεδομένων όσο γίνεται πιο κοντά σε ιδανικές θεωρητικές τιμές. Κατασκευάζοντας πειραματικές διατάξεις για την απόδειξη της νέας τεχνολογίας σε ιδανικό περιβάλλον εργαστηρίου, είναι δυνατό να παραμεριστούν πολλοί περιορισμοί που θα μπορούσαν να εμποδίσουν και να περιπλέξουν τη συλλογή αξιόπιστων δεδομένων και να καθυστερήσουν άσκοπα την πρόοδο. Μερικοί από αυτούς που μπορούν σε πολλές περιπτώσεις να θέσουν φρένο στην ανάπτυξη μιας νέας εφαρμογής είναι:

- Μέγεθος, βάρος ή σχήμα
- Περιορισμοί μαζικής παραγωγής
- Περιορισμοί υλικού
- Περιορισμοί ελέγχου
- Απαιτήσεις ισχύος
- Συνθήκες πραγματικού κόσμου
- Νομοθεσία

Μη λαμβάνοντας υπόψιν τους παραπάνω παράγοντες, σημαίνει ότι μια πειραματική διάταξη μπορεί να κατασκευασθεί σχετικά γρήγορα χωρίς πολλά εμπόδια και χωρίς να ληφθούν υπόψιν όλες οι συνθήκες

υπό τις οποίες θα λειτουργεί το τελικό προϊόν. Αφού γίνει η πρώτη κατασκευή και οριστούν οι πρώτοι περιορισμοί και είσοδοι στο πείραμα, μπορεί πολύ εύκολα να αλλάξουν οι παράμετροι για να υπάρξει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Τέλος, σε μια πειραματική διάταξη δοκιμών, τα μετρητικά όργανα και οι ανοχές κατασκευής και συναρμολόγησης είναι συνήθως μεγαλύτερης ακριβείας από ότι ένα προϊόν, εφαρμογή ή τεχνολογία μαζικής παραγωγής. Συνεπώς είναι ο μόνος τρόπος για να γίνουν οι σωστοί υπολογισμοί ώστε να εξαχθούν οι τελικοί περιορισμοί, δυνατότητες, κόστη, λειτουργίες και απαιτήσεις του τελικού αποτελέσματος.

1.4 Φιλοσοφία λειτουργίας

Οι εφαρμογές των πειραματικών διατάξεων είναι τόσο ευρείες, που η φιλοσοφία λειτουργίας τους μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τον επιστημονικό κλάδο που ερευνούν. Συνήθως κατασκευάζονται με σκοπό να ερευνηθούν τμήματα ή κομμάτια μιας μεγαλύτερης κατασκευής, τα οποία είναι πιο εύκολο να παραμετροποιηθούν και στη συνέχεια να αναχθούν σε μεγαλύτερη κλίμακα. Μπορούν να περιλαμβάνουν οποιονδήποτε αριθμό συσκευών εξόδου και εξαρτημάτων που εκτελούν προγραμματισμένες και ελεγχόμενες ενέργειες, οι οποίες καταγράφονται και μετρούνται από μια σειρά μετρητικών οργάνων και αισθητήρων, που μπορεί να βρίσκονται ενσωματωμένα στη διάταξη ή να είναι εξωτερικά. Τέλος η ενέργεια που προσφέρεται ως είσοδος στο σύστημα είναι πλήρως ελεγχόμενη και μετρείται κι αυτή με αντίστοιχες συσκευές ελέγχου για την καλύτερη εποπτεία των αποτελεσμάτων.

1.5 Μέρη και κατασκευή πειραματικών διατάξεων

Δεδομένης της ποικιλομορφίας των πειραματικών διατάξεων, δεν είναι δυνατό να δοθεί μια οριστική απάντηση στον τρόπο κατασκευής τους, ωστόσο αποτελούνται κυρίως από κοινά εξαρτήματα και μηχανήματα που υπάρχουν στην αγορά, για την ευκολότερη κατασκευή τους αλλά δεν αποκλείεται και το γεγονός μερικές φορές σε ορισμένες περιπτώσεις να απαιτούνται ειδικά κατασκευασμένα εξαρτήματα για την εκάστοτε περίπτωση. Στη γενική περίπτωση μια πειραματική διάταξη συνήθως αποτελείται από τα παρακάτω εξαρτήματα – μέρη:

- **Επεξεργαστές**
Για την μέτρηση των εισόδων – εξόδων και έλεγχο αυτών, καθώς επίσης και για τον χειρισμό των κινούμενων μερών της διάταξης, είναι απαραίτητοι οι επεξεργαστές και οι μικροϋπολογιστές. Παραδείγματα τέτοιων μονάδων είναι τα Arduino, Raspberry Pi ή Red Pitaya. Μερικές φορές συναντώνται και κεντρικές μονάδες καταγραφής σήματος (DAQ -Data Acquisition Systems).
- **Χειροκίνητα εξαρτήματα**
Μερικές φορές συναντώνται εξαρτήματα τα οποία δεν ελέγχονται από κάποιον επεξεργαστή, αλλά από τον άνθρωπο. Αυτό μπορεί να συμβεί είτε για μείωση του κόστους κατασκευής ή για τη μείωση της πολυπλοκότητας του χειρισμού της.
- **Συσκευές ελέγχου εισόδου**
Κατά κύριο λόγο χρησιμοποιούνται αισθητήρες που βρίσκονται στην αγορά, μονάδες και πλακέτες τυπωμένου κυκλώματος για την παροχή των δεδομένων εξόδου που παράγονται από τη διάταξη δοκιμών. Παραδείγματα αισθητήρων που χρησιμοποιούνται σε πειραματικές διατάξεις περιλαμβάνουν αισθητήρες αερίου, αισθητήρες μέτρησης πίεσης, ταχύτητας, δύναμης, ροπής, θερμοστοιχεία, υπέρυθρες, θερμίστορ, αισθητήρες φωτός, μικρόφωνα, γυροσκοπία, πυξίδες, επιταχυνσιόμετρα, αισθητήρες ροής αέρα.

- **Συσκευές εξόδου**
Μια πειραματική διάταξη μπορεί να περιλαμβάνει ηλεκτρομηχανικά εξαρτήματα που λειτουργούν αυτόματα σύμφωνα με τις εισόδους στο σύστημα που μετριοούνται από τα αισθητήρια όργανα ή εκτελούν συγκεκριμένες ενέργειες που παρακολουθούνται από αισθητήρες στο σύστημα. Μερικοί από τους τύπους συσκευών εξόδου που απαντώνται συνήθως περιλαμβάνουν αντλίες, βηματικούς κινητήρες, βαλβίδες, πιεζοηλεκτρικά, ηλεκτρομαγνητικές βαλβίδες και ρελέ.
- **Μηχανικά εξαρτήματα**
Ο μηχανικός σχεδιασμός μιας πειραματικής διάταξης περιλαμβάνει, από τον σχεδιασμό της βάσης της διάταξης στην οποία συνδέονται όλα τα άλλα εξαρτήματα, μέχρι τα εξαρτήματα στερέωσης και σύνδεσης που ενώνουν όλα τα μηχανικά μέρη μεταξύ τους. Τα διάφορα μέρη πρέπει επίσης να σχεδιαστούν λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις πιθανές ροές υγρών, τις αναπτυσσόμενες πιέσεις και θερμοκρασίες και συνεπώς να διαθέτουν τις κατάλληλες ανοχές και προδιαγραφές για την ομαλή λειτουργία της κατασκευής.
- **Firmware**
Το firmware τρέχει στην κύρια συσκευή λήψης και επεξεργασίας των διάφορων σημάτων είτε είναι από τα μετρητικά όργανα είτε από τα εξαρτήματα χειρισμού, συνήθως γραμμένο σε C++, που μεταγλωττίζεται σε δυαδικό και φορτώνεται στη συσκευή κατά τον προγραμματισμό. Το firmware ελέγχει τις βασικές λειτουργίες σε χαμηλό επίπεδο που λαμβάνουν χώρα. Είναι υπεύθυνο για λειτουργίες όπως η ανάγνωση των τιμών των αισθητήριων οργάνων και η λήψη ενεργειών με βάση ορισμένες προ-προγραμματισμένες συνθήκες.
- **Λογισμικό και γραφικό περιβάλλον**
Συχνά για τον καλύτερο και ευκολότερο έλεγχο της λειτουργίας μιας πειραματικής διάταξης, ή για την αυτόματη έκδοση των αποτελεσμάτων σε μορφές αρχείων όπως CSV, είναι αναγκαίο να σχεδιαστεί ειδικό λογισμικό μαζί με το γραφικό του περιβάλλον, το οποίο θα τρέχει σε κάποιον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Το λογισμικό μπορεί να κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας πακέτα λογισμικού του εμπορίου, όπως το Lab View ή για πιο εξεζητημένες περιπτώσεις το λογισμικό μπορεί να γραφτεί κατά παραγγελία, συνήθως σε C++ ή C#. Ορισμένες από τις πρόσθετες λειτουργίες που μπορεί να παρέχει το λογισμικό, περιλαμβάνουν γραφήματα που εμφανίζουν τα δεδομένα των αισθητήρων, έτσι ώστε να είναι πιο άμεση και ευκολότερη η συσχέτιση όλων των αποτελεσμάτων και άρα να γίνεται ξεκάθαρο στον χρήστη τι αλλαγές πρέπει να γίνουν.
- **Εξωτερικά εξαρτήματα**
Πολλές φορές, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είτε για λόγους οικονομίας είτε περιπλοκότητας, μερικά εξαρτήματα μπορεί να μην συμπεριλαμβάνονται στην πειραματική διάταξη και να προσαρμόζονται εξωτερικά.

1.6 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

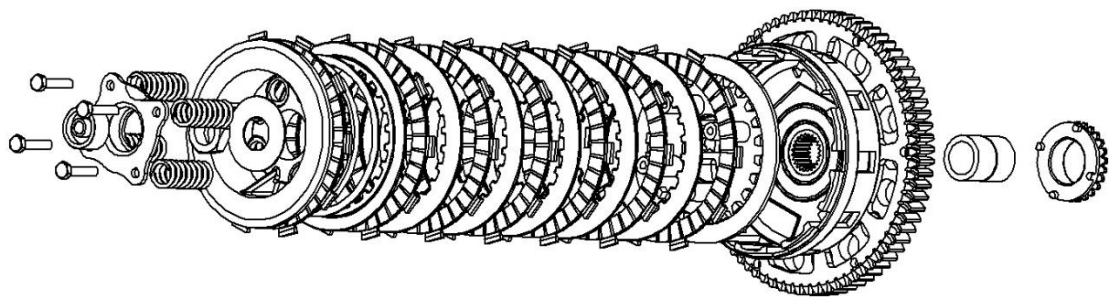
Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η επίδειξη λειτουργίας ενός συμπλέκτη μοτοσυκλέτας για εκπαιδευτικούς σκοπούς καθώς και η κατανόηση πλεονεκτημάτων και διαφορών που έχει η λειτουργία του αναλόγως των ιδιοτήτων του χρησιμοποιούμενου λιπαντικού. Για την κατασκευή ως επεξεργαστής σημάτων χρησιμοποιήθηκε μια συσκευή DAQ, ως χειροκίνητο εξάρτημα

επιλέχθηκε η βαλβίδα ελέγχου του πνευματικού εμβόλου με σκοπό τη μείωση της πολυπλοκότητας και του κόστους, ως συσκευές ελέγχου εισόδου χρησιμοποιούνται το μανόμετρο από το κομπρεσέρ αέρα, τον ογκομετρικό σωλήνα για την πλήρωση του κελύφους με λιπαντικό, το ροπόμετρο στον άξονα του συμπλέκτη, τον επαγωγικό αισθητήρα για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής, το θερμόμετρο του λαδιού και το inverter του ηλεκτροκινητήρα ενώ ως συσκευές εξόδου χρησιμοποιήθηκε η ασφάλεια του κινητήρα και ο διακόπτης πίεσης του κομπρεσέρ. Στα μηχανικά εξαρτήματα περιλαμβάνονται ο συμπλέκτης και τα κόπλερ των αξόνων, στο firmware και το γραφικό περιβάλλον βρίσκονται το LabView που καθιστά δυνατό τη λήψη και καταγραφή των μετρήσεων σε εύκολη και κατανοητή μορφή ενώ ως εξωτερικό εξάρτημα είναι το κομπρεσέρ.

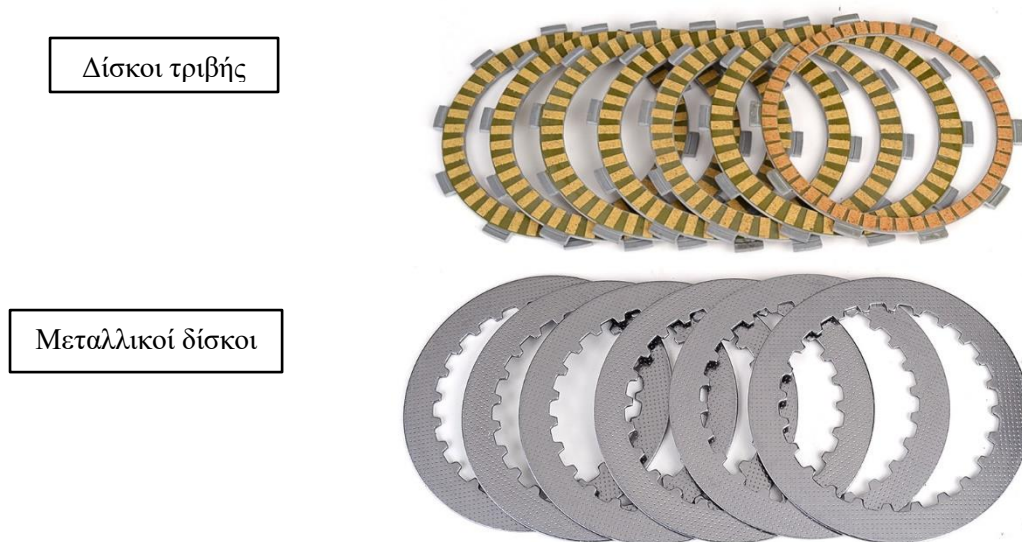
2. Πολύδισκος συμπλέκτης υγρής τριβής

2.1 Εισαγωγή

Ένας πολύδισκος συμπλέκτης αποτελείται από αρκετούς δακτυλιοειδείς δίσκους, οι οποίοι συνδέονται με πολύσφηνο εναλλάξ στο εσωτερικό και το εξωτερικό περίβλημα. Ένα διάγραμμα ανάλυσης ενός συμπλέκτη πολλαπλών δίσκων φαίνεται στο Σχήμα 1. Το υλικό τριβής είναι κολλημένο και στις δύο πλευρές κάθε δίσκου και αυτοί οι δίσκοι ονομάζονται πλάκες τριβής ή δίσκοι τριβής. Μια φωτογραφία των δίσκων ενός συμπλέκτη φαίνεται στην Εικόνα 1. Κάθε δίσκος έχει την ίδια διαμόρφωση εσωτερικά και εξωτερικά όπως και το περίβλημα του συμπλέκτη στο οποίο εδράζονται. Σε αυτό το παράδειγμα, οι χαλύβδινοι δίσκοι συνεργάζονται με το εσωτερικό περίβλημα και οι δίσκοι τριβής με το εξωτερικό περίβλημα. Η επαφή σε υγρό συμπλέκτη συμβαίνει πάντα μεταξύ υλικού τριβής και χάλυβα.



Σχήμα 2.1, Ο πολύδισκος συμπλέκτης της διάταξης



Δίσκοι τριβής

Μεταλλικοί δίσκοι

Εικόνα 2.1, Δίσκοι τριβής και μεταλλικοί

Τα δύο σετ δίσκων, αυτά με το υλικό τριβής και αυτά χωρίς, συγκρατούνται μεταξύ τους από έναν αριθμό ελατηρίων, επιτρέποντάς τους να περιστρέφονται ανεξάρτητα όταν αποδεσμεύονται. Για να εμπλακεί ο συμπλέκτης, ασκείται δύναμη μεταξύ των δίσκων πιέζοντάς τους όλους μαζί, ώστε να μηδενιστεί τυχόν διαφορά ταχύτητας. Οι πολύδισκοι συμπλέκτες χρησιμοποιούνται για την

πραγματοποίηση των αλλαγών ταχυτήτων στα κιβώτια ταχυτήτων κυρίως μοτοσυκλετών όπου είναι επιθυμητό να υπάρχουν γρήγορες αλλαγές ταχυτήτων για καλύτερη επιτάχυνση του οχήματος. Επομένως, ο χρόνος εμπλοκής ενός συνόλου δίσκων συμπλέκτη είναι σύντομος, συνήθως κάτω από ένα δευτερόλεπτο, κατά τη διάρκεια του οποίου μεταφέρεται μεγάλη ποσότητα ροπής μέχρι και οι δύο επιφάνειες να περιστρέφονται με την ίδια ταχύτητα. Ο λόγος που χρησιμοποιείται ένα σύνολο δίσκων και όχι μόνο δύο συμβαίνει επειδή αυτό δίνει μεγάλη επιφάνεια και επομένως μπορεί να μεταδώσει μεγαλύτερη δύναμη ροπής.

Ένας συμπλέκτης υγρής τριβής επιλέγεται έναντι ενός ξηρής τριβής συνήθως για εφαρμογές σε επιβατικά οχήματα. Αυτό συμβαίνει γιατί λόγω της λίπανσης, έχει λιγότερο ρυθμό φθοράς και επίσης πιο ομαλή σύμπλεξη και άρα αίσθηση στον αναβάτη. Οι συμπλέκτες ξηρής τριβής επιλέγονται για μεγαλύτερη μεταφορά ροπής και για μικρότερο χρόνο σύμπλεξης και άρα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγωνιστικές εφαρμογές.

2.2 Τα 3 στάδια σύμπλεξης συμπλέκτη υγρής τριβής

Κατά την υδροδυναμική συμπίεση, όπου ο δίσκος τριβής πλησιάζει τον μεταλλικό αναγκάζοντας το λάδι να ρέει πάνω και μέσα από το υλικό τριβής, δημιουργώντας έτσι μια υδροδυναμική πίεση συμπίεσης η οποία δέχεται το συνολικό ασκούμενο φορτίο και αποτρέπει την επαφή των δίσκων. Αυτό σημαίνει ότι δημιουργείται πλήρες φιλμ λίπανσης. Η σταθερά τριβής σε συνάρτηση με τον χρόνο αυξάνεται ραγδαία κατά τη φάση όπου υπάρχει το λιπαντικό φιλμ και κατά συνέπεια αυξάνεται η τριβή και η διατμητική τάση.

Η επόμενη φάση ονομάζεται φάση σύνθλιψης του λιπαντικού φιλμ όπου λάδι εξέρχεται μέσα από τους πόρους του υλικού τριβής. Τώρα εξίσου το λιπαντικό φιλμ και οι τυχόν τραχύτητες του υλικού τριβής λαμβάνουν το φορτίο της πίεσης. Στην αρχή της φάσης σύνθλιψης η ταχύτητα ολίσθησης είναι υψηλή. Υπάρχει ακόμα λάδι στο πορώδες υλικό του δίσκου τριβής αλλά το φιλμ είναι πολύ λεπτό. Σύμφωνα με τους νόμους της υδροδυναμικής, αυτό οδηγεί στην εμφάνιση διατμητικής τάσης και ως αποτέλεσμα υψηλά επίπεδα ιξώδους τριβής. Όταν μειωθεί η ταχύτητα θα μειωθούν και οι υδροδυναμικές δυνάμεις το οποίο συμβαίνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τέλος σε αυτή τη φάση παρατηρείται και φυσική επαφή μεταξύ των ανωμαλιών στο υλικό τριβής και τον μεταλλικό δίσκο. Ενώ η τριβή μειώνεται οι υδροδυναμικές δυνάμεις κυριαρχούν.

Τέλος στη φάση της σύμπλεξης/επικόλλησης, όλο το φορτίο στηρίζεται στη φυσική επαφή και τα υδροδυναμικά φαινόμενα είναι σχεδόν ανύπαρκτα. Αυτή είναι μια κατάσταση οριακής λίπανσης. Στο τέλος της επικολητικής φάσης η τριβή αυξάνεται αισθητά. Η στιγμή αυτή είναι όταν η ταχύτητα ολίσθησης πλησιάζει το 0 και η τριβή την τιμή της στατικής. Στη φάση αυτή της πλήρους επαφής και σύμπλεξης κυριότερο ρόλο παίζουν οι ιδιότητες του υλικού ενώ οι ιδιότητες του λιπαντικού δεν επηρεάζουν.

2.3 Υπολογισμός σταθεράς τριβής – ορισμοί

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΣΤΑΤΙΚΗΣ ΤΡΙΒΗΣ – Η σταθερά στατικής τριβής είναι δύσκολο να μετρηθεί λόγω του πολύ μικρού χρονικού διαστήματος που πρέπει η μετρητική συσκευή να καταγράψει το σήμα της αποσύμπλεξης δύο επιφανειών υπό φορτίο. Ιστορικά η σταθερά στατικής τριβής μετρούσαν από έναν παλμογράφο δέσμης φωτός, όμοιο με ένα γαλβανόμετρο, το οποίο όμως είχε την τάση να υπερδιαστασιολογεί τις μετρήσεις όταν οι δύο επιφάνειες διαχωρίζονταν υπό φορτίο. Αφού δεν είναι

δυνατή η απευθείας μέτρηση της σταθεράς στατικής τριβής τη στιγμή του διαχωρισμού, η ροπή μετράται αφού οι δύο επιφάνειες έχουν σταθερή ταχύτητα και κατά συνέπεια σταθερή ροπή.

ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΥΝΑΜΙΚΗΣ-ΜΕΣΗΣ ΤΡΙΒΗΣ – Οι δύο τρόποι με τους οποίους υπολογίζεται ο συντελεστής μέσης ή δυναμικής τριβής είναι ή στο μέσον του χρονικού διαστήματος ακινητοποίησης της αδράνειας ή τη στιγμή που η ταχύτητα περιστροφής είναι 1800 rpm όπως υποδεικνύεται από τους κανονισμούς της SAE No.2 που λειτουργεί στις 3600 rpm .

ΟΡΙΑΚΟΣ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΤΡΙΒΗΣ – Συμβολίζεται συνήθως με μ_0 και είναι η σταθερά τριβής στο τέλος της σύμπλεξης λίγο πριν ακινητοποιηθεί το σύστημα. Στον όρο αυτό αποδίδεται η αίσθηση της σύμπλεξης σε ένα κιβώτιο και πόσο ομαλό είναι.

$\mu_0/\mu_{\text{δυναμικο}}$ – Αυτός ο όρος είναι ένας τρόπος με τον οποίο οι κατασκευαστές μπορούν να δουν κατά πόσο ένας συμπλέκτης κλειδώνει από τις χαμηλές ταχύτητες ολίσθησης και για αυτό να έχει απότομη αίσθηση στον χρήστη. Συνήθως είναι προτιμότερο ο λόγος αυτός να διατηρείται κάτω από 1.0 για να έχει τη σωστή αίσθηση.

Όλες οι διατάξεις που περιγράφηκαν για τη δοκιμή συμπλεκτών υγρής τριβής, διαθέτουν μερικά κοινά χαρακτηριστικά και εξαρτήματα. Αποτελούνται από έναν ηλεκτροκινητήρα, μερικές έχουν και κιβώτιο ταχυτήτων για μείωση της ταχύτητας περιστροφής, ένα έμβολο για την σύμπλεξη των δίσκων του συμπλέκτη το οποίο συνήθως είναι υδραυλικό και κοίλο και βρίσκεται στην ίδια ευθεία μετάδοσης της κίνησης, το σύστημα του συμπλέκτη με το κέλυφός του, μια αδρανειακή μάζα η οποία βρίσκεται συνήθως στο άξονα περιστροφής του κινητήρα και τέλος από ένα σύστημα πάκτωσης όπου εκεί υπάρχουν και τα διάφορα μετρητικά όργανα. Επιπλέον κάθε σύστημα έχει και τρόπο μέτρησης της θερμοκρασίας είτε με υπέρυθρες είτε με αισθητήρια όργανα προσαρμοσμένα στους σταθερούς δίσκους του συμπλέκτη. Τέλος εννοείται υπάρχουν διάφοροι σύνδεσμοι για τη μεταφορά της περιστροφής και της ισχύος μέσω των αξόνων, ενώ παρατηρούνται μικροδιαφορές στη σειρά των παραπάνω διατάξεων ανάλογα με τις μετρήσεις που είναι στοχευμένες να λαμβάνουν.

Τα όρια μεταξύ των τριών αυτών φάσεων είναι δυσδιάκριτα. Έχουν παρατηρηθεί επιπλέον φαινόμενα κατά τη διαδικασία σύμπλεξης ενός υγρού συμπλέκτη όπως μικρο-σπηλαιώσεις και φυσαλίδες αέρα στο σημείο επαφής. Υγρό εγκλωβισμένο σε πολύ λεπτά φιλμ οδηγεί σε ακραία αύξηση του ιξώδους το οποίο ίσως μπορεί να επεξηγήσει την υψηλή ιξώδη τριβή.

3. Υπάρχουσες πειραματικές διατάξεις για τη δοκιμή λιπαντικών και υλικών τριβής σε συμπλέκτες υγρής τριβής

3.1 Πειραματική διάταξη SAE #2

3.1.1 Εισαγωγή

Στην αυτοκινητοβιομηχανία η μεταφερόμενη ροπή από τον κινητήρα στους τροχούς εξαρτάται σημαντικά από το όριο ροπής του συμπλέκτη και την τιμή της τριβής ολίσθησης του. Για μια δεδομένη τιμή πίεσης, η αποτελεσματικότητα του συστήματος συμπλέκτη είναι συνάρτηση του συντελεστή τριβής του δίσκου τριβής και της επιφάνειας του συνεργαζόμενου δίσκου και επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά του λιπαντικού του κιβωτίου. Για δεδομένο υλικό τριβής/επιφάνεια επαφής, τα χαρακτηριστικά τριβής του υγρού επηρεάζουν άμεσα την μέγιστη ροπή που μπορεί να μεταφέρει το σύστημα του συμπλέκτη.

Η ικανότητα μεταφοράς ροπής του συστήματος του συμπλέκτη παίζει σημαντικό ρόλο και στην μακροχρόνια αντοχή του κιβωτίου ταχυτήτων. Εάν ένας συμπλέκτης δεν έχει τα απαραίτητα χαρακτηριστικά για να μεταδώσει την απαιτούμενη ροπή και δεν είναι στιβαρός, θα υπάρξει εκτενής ολίσθηση με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας που θα καταλήξει να μειώνει τη ζωή του λιπαντικού και του κιβωτίου.

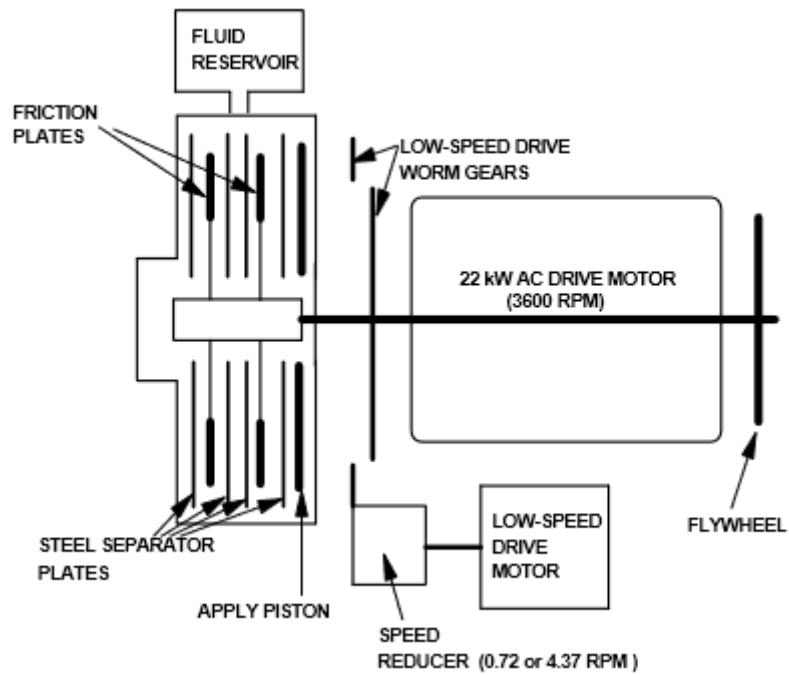
Η πιο διαδεδομένη πειραματική διάταξη για συμπλέκτες υγρής τριβής, για την έρευνα και ανάπτυξη πάνω σε θέματα υλικών τριβής και λιπαντικών, είναι η μηχανή SAE #2. Η μηχανή αυτή αρχικά σχεδιάστηκε για την μεγιστοποίηση της απόδοσης των αυτόματων κιβωτίων και χρησιμοποιείται για περισσότερα από 50 χρόνια, ενώ πλέον έχουν σχεδιαστεί και πολλές παραλλαγές της. Η κύρια φιλοσοφία λειτουργίας της, αποτελείται από μια αδράνεια την οποία περιστρέφεται και στη συνέχεια ακινητοποιείται μέσω ενός συμπλέκτη που είναι πακτωμένος.

3.1.2 Εξαρτήματα

Η μηχανή SAE #2 αποτελείται από έναν κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος 22.37 kW, οποίος είναι ικανός να φτάνει την ταχύτητα των 3600 rpm και ο οποίος έχει άξονα εξόδου και μπροστά και πίσω από το κέλυφός του. Στην πίσω πλευρά του είναι τοποθετημένη η αδράνεια που χρησιμεύει ως βολάν για την διατήρηση της ταχύτητας περιστροφής αφού απενεργοποιηθεί η τροφοδοσία του. Από την άλλη πλευρά ο κινητήρας είναι εφοδιασμένος με ένα γρανάζι ατέρμονα κοχλία για δοκιμές χαμηλής ταχύτητας που θα αναλυθούν παρακάτω. Στο τέλος του άξονα βρίσκεται το κέλυφος του συμπλέκτη όπου εμπεριέχει το πιστόνι που επενεργεί το συμπλέκτη, διάφορα μετρητικά όργανα καθώς και το δοχείο λαδιού. Στις εικόνες που ακολουθούν παρουσιάζονται η γενική εικόνα και τα κύρια μέρη της διάταξης SAE No.2.

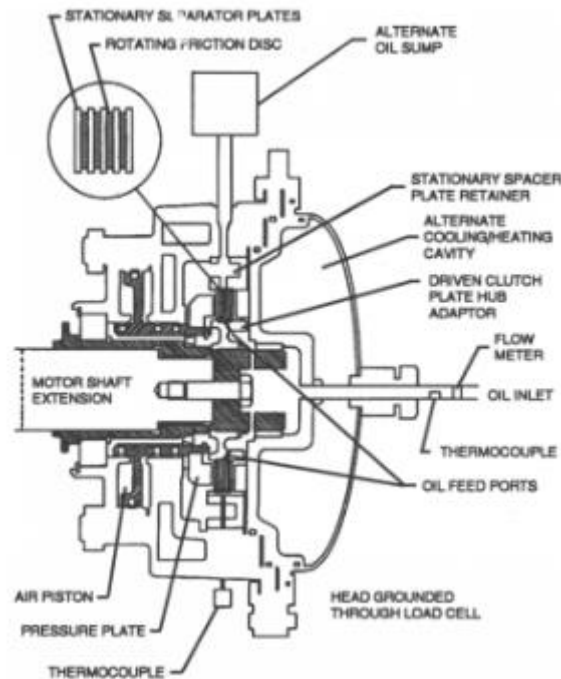


Εικόνα 3.1, Φωτογραφία της διάταξης SAE No. 2 [6]



Σχήμα 3.1, Σχηματική απεικόνιση των εξαρτημάτων της διάταξης SAE No. 2 [3]

Το κέλυφος του συμπλέκτη, είναι πακτωμένο και δεν μπορεί να περιστραφεί επειδή το κρατάει σταθερό ένα δυναμόμετρο το οποίο ταυτόχρονα μετράει και τη δύναμη που αναπτύσσεται. Επίσης αντί για σταθερή ποσότητα λαδιού, υπάρχει η δυνατότητα κατά τις δοκιμές με τη μηχανή SAE No. 2 να επιτυγχάνεται ανακυκλοφορία λαδιού, η οποία χρησιμεύει και στην ψύξη των δίσκων του συμπλέκτη. Αξίζει να σημειωθεί ότι η κυκλοφορία γίνεται μέσω του κοίλου άξονα του κινητήρα και εισέρχεται ακτινικά στους δίσκους του συμπλέκτη.



Σχήμα 3.2, Αξονική τομή του κελύφους του συμπλέκτη [2]

Παράμετροι που συνήθως μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια διαφόρων δοκιμών με τη μηχανή SAE No.2 είναι:

- Η ποσότητα λαδιού μέσα στο κέλυφος
- Το είδος λαδιού
- Η παροχή λαδιού στην περίπτωση συνεχούς κυκλοφορίας
- Το πλήθος των δίσκων
- Η μορφολογία των δίσκων και ο σχεδιασμός διαφορετικών αυλακώσεων
- Οι διαστάσεις των δίσκων

3.1.3 Τρόπος λειτουργίας

Ο ηλεκτροκινητήρας ενεργοποιείται και επιταχύνεται μέχρι να φτάσει τις 3600 rpm. Μετά από συγκεκριμένο χρονικό διάστημα ο ηλεκτροκινητήρας απενεργοποιείται και την ίδια στιγμή εμπλέκεται ο συμπλέκτης με την άσκηση της κατάλληλης πίεσης με αποτέλεσμα τον σταματημό της περιστρεφόμενης αδράνειας. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας υπάρχουν μετρητικά όργανα που καταγράφουν την ταχύτητα περιστροφής, την αναπτυσσόμενη ροπή τριβής, την πίεση και το χρόνο που χρειάζεται για την ακινητοποίηση της αδράνειας.

Μπορεί επιπλέον να προστεθεί στη διάταξη κατάλληλο σύστημα ώστε ο κινητήρας να στρέφεται σε πολύ χαμηλές στροφές της τάξεως των 0.72 rpm ώστε να είναι πιο εύκολο να υπολογιστεί η ροπή της τριβής ολίσθησης.

Ένα ολόκληρο τεστ μπορεί να διαρκέσει από 50 μέχρι 100 ώρες.

3.2 Παραλλαγές πειραμάτων της SAE No. 2

Με σκοπό να διερευνηθεί η απόδοση των συμπλεκτών υπό διαφορετικές συνθήκες και από εταιρίες και οργανισμούς σε παγκόσμια κλίμακα, έχουν αναπτυχθεί και διαφορετικές μέθοδοι και διατάξεις δοκιμών μερικές των οποίων είναι:

1. Τεστ δίσκων τριβής της General Motors | Προδιαγραφή DEXRON-III.
2. Τεστ αντοχής τριβής της Ford | Προδιαγραφή MERCON.
3. Τεστ τριβής από την Ένωση Ιαπωνικών Κατασκευαστών Αυτοκινήτων | Προδιαγραφή JASO Method 348-95.

3.2.1 Μέθοδος DEXRON-III

Τα τεστ τριβής αποτελούνται από δύο πλήρη τεστ του κιβωτίου ταχυτήτων με εναλλαγές όλων των ταχυτήτων: το Vehicle Performance Test (Shift Feel Test), το οποίο είναι ένα σχετικά σύντομο τεστ πλήρους κλίμακας, και το Cycling Test το οποίο είναι ένα τεστ του κιβωτίου με την μετάδοση κίνησης να γίνεται από έναν κινητήρα πάνω σε δυναμόμετρο το οποίο κρατάει πάνω από 220 ώρες. Πρόσφατα προστέθηκε και το Electronically Controlled Capacity Clutch Vehicle Test το οποίο αξιολογεί τα χαρακτηριστικά του λιπαντικού τριβής σε έναν μεταλλάκτη ροπής αυτομάτου κιβωτίου ταχυτήτων.

Συνθήκες διεξαγωγής του DEXRON-III Plate Test

Ενέργεια (J)	15700
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	3600
Διάρκεια κύκλου δοκιμής (s)	20
Συνολική διάρκεια τεστ (h)	100 (18000 κύκλοι)
Θερμοκρασία λιπαντικού (°C)	140
Ασκούμενη πίεση συμπλέκτη (kPa)	345
Τμήματα κύκλου δοκιμών	
Περίοδος προετοιμασίας	15s: Motor On, Pressure Off
Περίοδος συμπίεσης	2s: Motor Off, Pressure On
Περίοδος σταθεροποίησης	3s: Motor Off, Pressure Off

Απαιτήσεις του DEXRON-III Plate Test

Ροπή στο μέσον του πειράματος (Nm)	150-180
Μέγιστη ροπή (Nm)	>150
Διακυμάνσεις ροπής (Nm)	<30
Χρόνος ακινητοποίησης (s)	0.45-0.55

3.2.2 Μέθοδος Mercon

Η διαδικασία MERCON χρησιμοποιεί χαρακτηριστικά από την DEXRON-III για την δοκιμή της ποιότητας αλλαγής ταχυτήτων και τη διάρκεια ζωής των εξαρτημάτων, και το τεστ SAE 2 για τη μέτρηση των χαρακτηριστικών της τριβής σε ελεγχόμενες συνθήκες.

Συνθήκες διεξαγωγής του Mercon Friction Test

Ενέργεια (J)	20740
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	3600
Διάρκεια κύκλου δοκιμής (s)	20
Συνολική διάρκεια τεστ (h)	83.3 (15000 κύκλοι)
Θερμοκρασία λιπαντικού (°C)	115
Ασκούμενη πίεση συμπλέκτη (kPa)	275
Τμήματα κύκλου δοκιμών	
Περίοδος προετοιμασίας	10s: Motor On, Clutch Released
Περίοδος συμπίεσης	5s: Motor Off, Clutch Applied
Περίοδος σταθεροποίησης	5s: Motor Off, Clutch Released

Στη δοκιμή MERCON υπάρχει και η μέτρηση της ροπής της τριβής ολίσθησης, χρησιμοποιώντας έναν άλλον κινητήρα ικανό να στρέφεται με 4.37 rpm και μετρώντας εκεί τη ροπή.

Απαιτήσεις του MERCON Friction Test

Ροπή στο μέσον του πειράματος (Nm)	127-157
Ροπή χαμηλών ταχυτήτων (Nm)	132-166
Ροπή στατικής τριβής (Nm)	98-137
Χρόνος ακινητοποίησης (s)	0.75-1.00

3.2.3 Μέθοδος Jaso

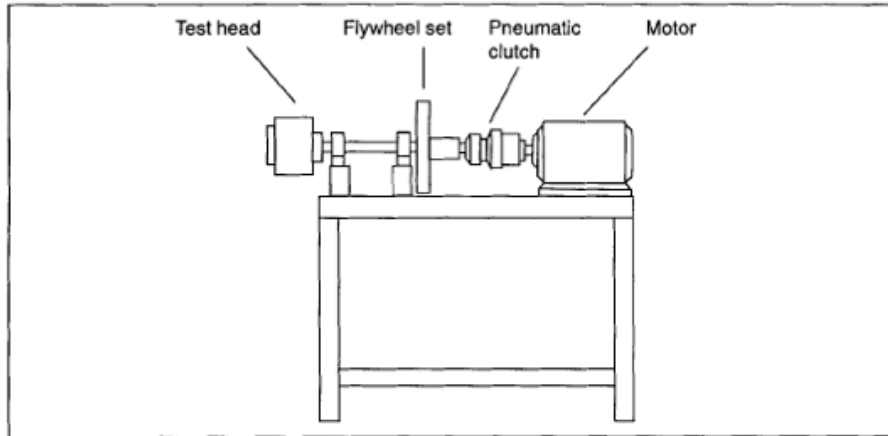
Η μέθοδος που χρησιμοποιείται από τις ιαπωνικές αυτοκινητοβιομηχανίες για την αξιολόγηση και δοκιμή των συστημάτων συμπλεκτών είναι η JASO και ασχολείται κυρίως με τις ιδιότητες του υγρού του συμπλέκτη. Για αυτό το λόγο οι κύκλοι του πειράματος είναι μόλις 5000, ώστε να μην αλλοιώνεται το υλικό τριβής και κατ' επέκταση οι ιδιότητες του λιπαντικού.

Συνθήκες διεξαγωγής του JASO Test

Ενέργεια (J)	24350
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	3600
Διάρκεια κύκλου δοκιμής (s)	30
Συνολική διάρκεια τεστ (h)	41.7 (5000 κύκλοι)
Θερμοκρασία λιπαντικού (°C)	100
Τμήματα κύκλου δοκιμών	
Περίοδος προετοιμασίας	15s: Motor On, Pressure Off
Περίοδος συμπίεσης	2s: Motor Off, Pressure On
Περίοδος σταθεροποίησης	13s: Motor Off, Pressure Off

3.2.4 Απλοποιημένη μέθοδος υπολογισμών

Η διάταξη αυτή μοιάζει πολύ με τη SAE-2 καθώς επίσης και με τη διάταξη που κατασκευάστηκε. Αποτελείται από ηλεκτρικό κινητήρα 3 φάσεων 2.2 kW 1430 RPM. Διαθέτει πνευματικό επενεργητή για την εμπλοκή και απεμπλοκή του συμπλέκτη και μια αδρανειακή μάζα που έχει και το ρόλο του βολάν για τη διατήρηση της περιστροφικής ταχύτητας.



Σχήμα 3.3, Απλοποιημένη διάταξη δοκιμών 9

Οι παράμετροι που μετρώνται κατά τις δοκιμές σε αυτή τη διάταξη είναι:

- Ροπή κατά την εμπλοκή του συμπλέκτη. Είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της δύναμη και της τριβής μεταξύ της επιφάνειας τριβής και των μεταλλικών δίσκων κατά τη διάρκεια της ολίσθησης, και στο τέλος αυτής. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε ήταν ένα **load cell**.

$$\mu = T/(FR)$$

όπου: μ = συντελεστής τριβής

T = μεταφερόμενη ροπή (Nm)

F = ασκούμενη δύναμη (N)

R = κύρια ακτίνα υπολογισμών (m)

- Θερμοκρασία λαδιού. Η θερμοκρασία μετράται για να μελετηθεί η επίδραση που έχουν τα συστήματα υγρής τριβής στη θερμοκρασία του υγρού. Η αύξηση στη θερμοκρασία του λαδιού εξαρτάται από την κινητική ενέργεια, την ασκούμενη πίεση, το υλικό τριβής, τον τύπο του λαδιού και τον αριθμό των εμπλοκών του συμπλέκτη. Για τις μετρήσεις χρησιμοποιείται ένα θερμοστοιχείο.
- Χρόνος ακινητοποίησης. Ο λόγος για τον οποίο μετράται ο χρόνος ακινητοποίησης της αδράνειας είναι για την μελέτη της συσχέτισης της μέσης τριβής ανά επιφάνεια επαφής σε συστήματα υγρής τριβής.

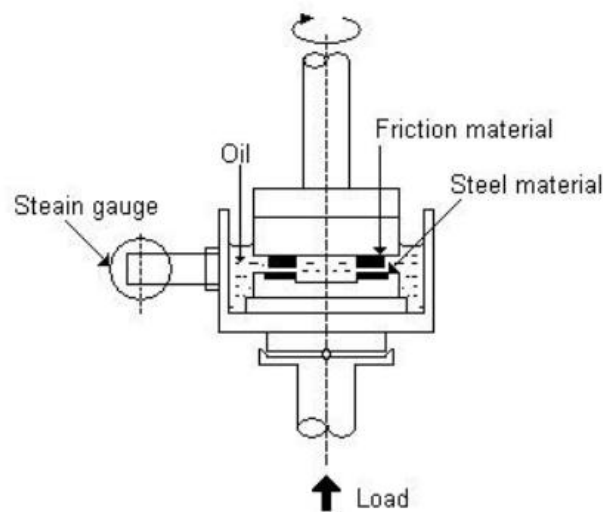
3.2.5 LFVA

Η διάταξη LVFA (Low Velocity Friction Apparatus) έχει κατασκευαστεί από την GM για τη μέτρηση της καμπύλης μ/V – σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής και ταχύτητας. Η διάταξη είναι κατακόρυφη και αποτελείται από μία μεταλλική και μία επιφάνεια τριβής, οι οποίες βρίσκονται σε επαφή και ολισθαίνουν μέσα σε λάδι ενώ τους ασκείται σταθερή δύναμη. Η δύναμη ασκείται με τη μορφή βάρους και η κίνηση δίνεται από ένα βολάν.



Εικόνα 3.2, Φωτογραφία της μεθόδου LFVA [4]

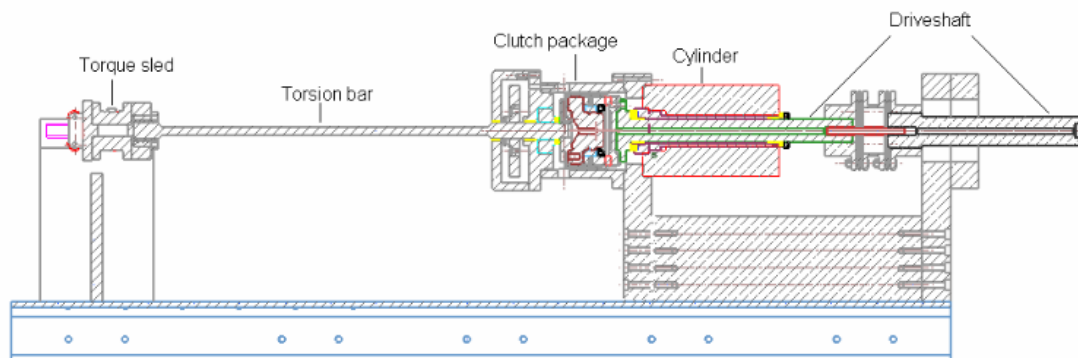
Το μειονέκτημα της LVFA είναι ότι πρόκειται για δοκιμή κλίμακας, αφού χρησιμοποιείται μόνο ένας δίσκος τριβής και ένας μεταλλικός, που σημαίνει ότι είναι δυνατόν να χαθούν μερικά φαινόμενα που αναπτύσσονται σε έναν πολύδισκο συμπλέκτη υγρής τριβής σε κάποιο όχημα. Το εύρος φορτίου περιορίζεται από το νεκρό βάρος που τοποθετείται. Το εύρος ταχύτητας είναι πολύ μεγάλο αλλά δεν γίνεται να μελετηθεί συγκεκριμένη ολίσθηση με την αδράνεια. Τέλος διαθέτει και έναν αισθητήρα δύναμης για την μέτρηση της ασκούμενης πίεσης στους δίσκους.



Σχήμα 3.4, Σχηματική απεικόνιση της μεθόδου LFVA [4]

3.2.6 Πειραματική διάταξη κατά τον S. Forslund test rig [7]

Η διάταξη που φαίνεται από κάτω έχει κατασκευαστεί έτσι με σκοπό το χαμηλό κόστος, την καλή ανεξαρτησία από μεταβολές της θερμοκρασίας και της πίεσης και την καλή παρακολούθηση του φαινομένου “shudder” στον συμπλέκτη κατά την σύμπλεξη.



Σχήμα 3.5, Η διάταξη του Simon Forsslund +++ [7]

Χαρακτηριστικά

Ταχύτητα ολίσθησης	0.005-3.0	m/s
Ροή λαδιού	0.1-2.0	$lt/min/contact$
Συνολική παροχή λαδιού	0.6-12.0	lt/min
Φυσική συχνότητα	διακυμαίνεται	Hz
Ροπή	400	Nm
Ασκούμενη πίεση	0-6	Mpa

Η διάταξη αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα που περιστρέφει τον συμπλέκτη μέσω ενός κόπλερ το οποίο δεν δέχεται περιστροφικές παραμορφώσεις αλλά έχει περιθώριο παραμόρφωσης κατά την ευθυγράμμιση των αξόνων. Το κέλυφος του συμπλέκτη το οποίο είναι το σταθερό, είναι συνδεδεμένο με έναν μακρύ συμπαγή άξονα (torsion bar) το οποίο στην άλλη του άκρη είναι πακτωμένο. Οι δοκιμές που γίνονται περιλαμβάνουν και πειράματα μικρής κλίμακας με έναν δίσκο τριβής και έναν μεταλλικό δίσκο αλλά και πλήρους κλίμακας με 6 δίσκους. Μόνο που για την εκτέλεση του ενός ή του άλλου πειράματος πρέπει να κάθε φορά να αλλάζουν πολλές παράμετροι αφού υπάρχουν διαφορετικές απαιτήσεις στις πιέσεις και τις παροχές.

Μετά τον ηλεκτροκινητήρα έχει τοποθετηθεί κιβώτιο με σχέση μετάδοσης 7.24:1 και σε αυτή τη σχέση η ταχύτητα περιστροφής μπορεί να διακυμανθεί μεταξύ 1 – 560 RPM με μέγιστη δυνατή παραγόμενη ροπή 400 Nm.

Για την συμπίεση του συμπλέκτη έχει επιλεγεί υδραυλικό έμβολο ικανό για την παραγωγή 30 kN μέγιστης δύναμης ή 6 MPa πίεση με μέγιστη ταχύτητα 5 m/s.

Η θερμοκρασία του λαδιού είναι 90°C.

Για την μέτρηση της δύναμης που ασκεί το έμβολο στο συμπλέκτη χρησιμοποιείται load cell. Για την μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται αισθητήρες θερμοκρασίας στους μεταλλικούς σταθερούς δίσκους του συμπλέκτη.

Παραλλαγή της διάταξης είναι η αντικατάσταση της πάκτωσης του torsion bar με μια αδρανειακή μάζα ή με διπλή αδρανειακή μάζα.

Υλικό τριβής: επίστρωση πυροσυσσωματωμένης διασποράς κομματιών ορείχαλκου σε βαμμένη επισκληρυμένη χαλύβδινη επιφάνεια.

Εξωτ. διάμετρος: 108 mm

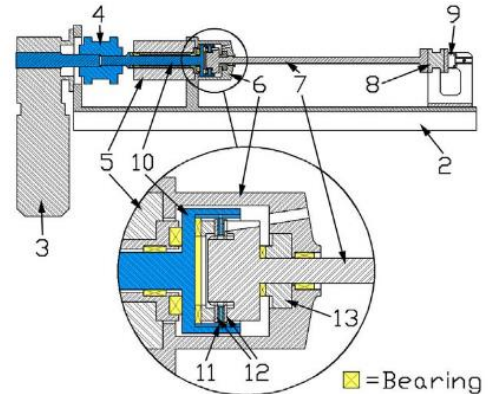
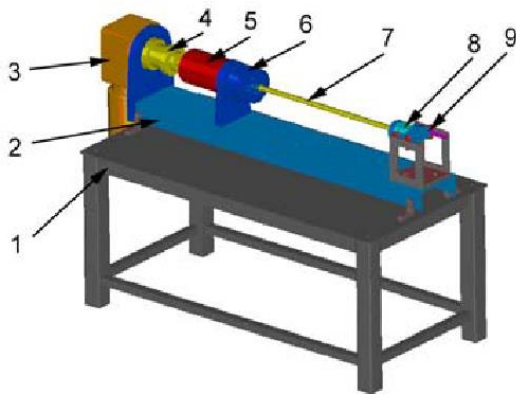
Εσωτ. διάμετρος: 76 mm

Επιφάνεια επαφής: 2250 mm²

Υπέρυθρες για μέτρηση θερμοκρασίας

Δυνατότητα μέτρησης της ιδιοσυχνότητας του συστήματος (100-500 Hz ανάλογα με το μήκος του άξονα) και της παροχής λαδιού ανάμεσα από τα αυλάκια των δίσκων τριβής.

Δύναμη συμπλέκτη: 30 kN



Σχήμα 3.6&3.7, Σχηματική απεικόνιση και αρίθμηση των εξαρτημάτων της διάταξης [7]

1. Τραπέζι αλουμινίου
2. Συμπαγής σιδερένια βάση
3. Κινητήρας με τον μειωτήρα
4. Κόπλερ
5. Υδραυλικό έμβολο με κούφιο πιστόνι
6. Κέλυφος συμπλέκτη
7. Συμπαγής άξονας μεταφοράς κίνησης
8. Μετρητής ροπής
9. Σύστημα ολίσθησης
10. Κινητήριος άξονας
11. Δίσκος τριβής
12. Μεταλλικός δίσκος
13. Δυναμοκυψέλη

Διαδικασία εκτέλεσης πειράματος

Full bridge strain gauge (force & torque transducers)

Το πείραμα ξεκινά με 1 rpm και 20 kN ασκούμενη δύναμη. Μετά από 10 sec αυξάνεται η ταχύτητα στα 100 rpm μέσα σε 20 sec και μετράται η θερμοκρασία η οποία αυξήθηκε κατά 15.5 °C. Στη συνέχεια έγινε επιπλέον πείραμα με 20 kN δύναμη και 25rpm-120mm/s σταθερά. Προέκυψε η παρακάτω σχέση μεταξύ συντελεστή τριβής και θερμοκρασίας:

$$\mu = \alpha T + \beta$$

όπου $\alpha = -0.00033$ και $\beta = 0.130$

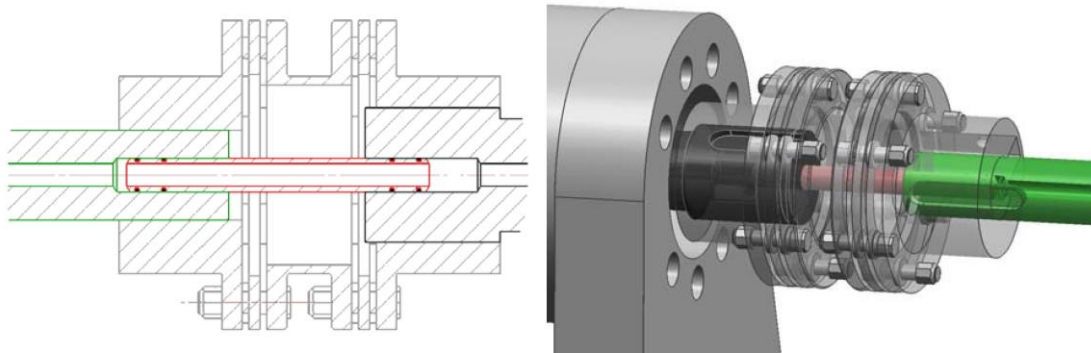
Με αντιστάθμιση θερμοκρασίας

Στις χαμηλές ταχύτητες η θερμοκρασία είναι στους 60 °C ενώ στις 450 mm/s στους 75 °C. Άρα ο νέος τύπος για τον αντισταθμισμένο συντελεστή τριβής είναι:

$$\mu_{\text{compensated}} = \mu - \alpha \Delta T$$

Ιδιότητες διαφορετικών λιπαντικών

Υγρό	Βάση	Κινηματικό ιξώδες @40°C (cSt)	Κινηματικό ιξώδες @100°C (cSt)
A	Συνθετικό	7.05	2.18
B	Ορυκτό	9.74	2.71
C	Ημι-συνθετικό	35.0	6.70
D	Ορυκτό	58.9	8.26
E	Συνθετικό	63.1	9.71



Σχήμα 3.8, Αξονική τομή και εικόνα CAD του κόπλερ του κινητήρα [7]

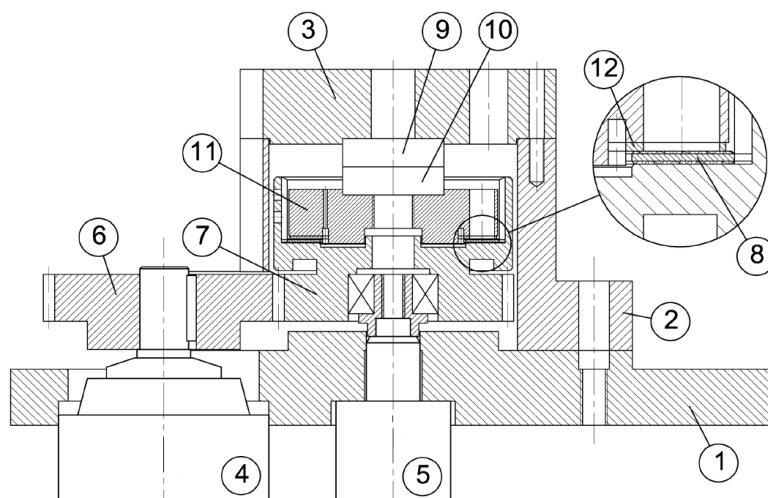
3.2.7 Διάταξη μέτρησης αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας σε μονό δίσκο τριβής

Στη διάταξη αυτό που εξετάζεται είναι η θερμοκρασία που αναπτύσσεται στους δίσκους τριβής ενός συμπλέκτη οι οποίοι βρίσκονται υπό συνεχή τριβή ολίσθησης. Η ασκούμενη δύναμη και η ταχύτητα ολίσθησης μπορούν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια του πειράματος για την καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας ενός συμβατικού συμπλέκτη που βρίσκεται σε κάποιο όχημα. Η θερμοκρασία μετριέται με θερμόμετρο υπέρυθρων.

Για τη μείωση των απαιτήσεων αντοχής σε ροπή της διάταξης, αντί να χρησιμοποιηθεί ο αριθμός των δίσκων που υπάρχουν σε έναν συμβατικό συμπλέκτη αυτοκινήτου, χρησιμοποιείται μόνο ένας δίσκος τριβής με έναν μεταλλικό δίσκο, εσωτερικής διαμέτρου 76 mm και εξωτερικής 108 mm με συνολική επιφάνεια επαφής 3940 mm².

Ο κινητήρας είναι ικανός να αναπτύξει ροπή 255 Nm μεταξύ 5 και 940 rpm.

Ο υδραυλικός κύλινδρος που λειτουργεί ως επενεργητής ασκεί δύναμη 0-20 kN.



Σχήμα 3.9, Αξονική τομή και απαρίθμηση των τμημάτων της διάταξης [5]

Θέση	Ονομασία
1	Εξωτερικό κέλυφος μπροστινό
2	Εξωτερικό κέλυφος μεσαίο
3	Εξωτερικό κέλυφος πίσω
4	Υδραυλικός κινητήρας
5	Υδραυλικός κύλινδρος
6	Γρανάζι κινητήρα
7	Γρανάζι υδραυλικού κυλίνδρου
8	Δίσκος τριβής
9	
10	
11	Σταθερό καπάκι συμπλέκτη
12	Σταθερός μεταλλικός δίσκος συμπλέκτη

3.2.8 Παρατηρήσεις

Συγκεντρωτικός πίνακας χαρακτηριστικών του SAE 2 ανάλογα με την μέθοδο

Μέθοδος	GM DEXRON-III	MERCON	JASO	Προτεινόμενη διάταξη
Υλικό τριβής	SD-1777	SD-1777	SD-1777	SD-1777
Μέγεθος δίσκου τριβής mm (εξωτ-εσωτ διάμετρος)	125.4/90.5	133.4/98.8	126.5/105.0	124.9/101.3
Αλληλουχία δίσκων (F-friction, S-steel)	S-F-S-S-F-S	S-F-S-S-F-S	S-F-S-F-S-F-S	F-S-F-S-F-S-F
Όγκος υγρού (L)	0.65	0.30	0.60	0.6
Θερμοκρασία υγρού (°C)	140	115	100	25
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	3600	3600	3600	250/500/1000
Ταχύτητα ολίσθησης (RPM)	0.72	4.37	0.72	30
Ενεργή ακτίνα (mm)	54.0	58.1	57.4	56.5
Επιφάνεια τριβής κάθε δίσκου (mm ²)	5920	6310	3910	4193
Συνολική μεικτή επιφάνεια τριβής (mm ²)	23680	25240	23460	50316
Είδος αυλάκωσης δίσκου τριβής	None	Full-waffle	None	Radial
Καθαρή επιφάνεια τριβής (mm ²)	23680	16384	23460	40812

Το υλικό τριβής SD-1777 είναι ένα σύνθετο υλικό με βάση το χαρτί και η χημική του σύσταση παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Compound	Percentage % w/w
Cellulose fibre	33
Kevlar fibre	5
Phenolic resin	34.5
Diatomaceous earth	26
Water and volatile organic compounds	1.5

Επίσης περιέχονται και ίχνη από κομμάτια γραφίτη και καουτσούκ τα οποία όμως ήταν πολύ χαμηλά σε ποσοστό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η Ευρωπαϊκή μέθοδος δοκιμών συμπλεκτών υγρής τριβής είναι η μηχανή DKA η οποία είναι πανομοιότυπη με τη διάταξη και τον τρόπο λειτουργίας της SAE #2.

4. Πειραματική διάταξη αποτίμησης της δυναμικής συμπεριφοράς συμπλεκτών υγρής τριβής και έλεγχος καλής λειτουργίας

4.1 Εισαγωγή

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός και η κατασκευή μιας πειραματικής διάταξης, όπου θα είναι δυνατόν να γίνουν πειράματα πάνω σε συμπλέκτες μοτοσυκλετών υγρής τριβής ή πιο ειδικά πάνω σε δίσκους τριβής που χρησιμοποιούνται σε συμπλέκτες. Η διάταξη αν και έχει σχεδιαστεί με γνώμονα τη δυνατότητα να είναι στεγανή από λάδι ώστε να γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας ενός συμπλέκτη υγρής τριβής, θα μπορούσε κάλλιστα να χρησιμοποιηθεί και συμπλέκτης ξηρής τριβής.

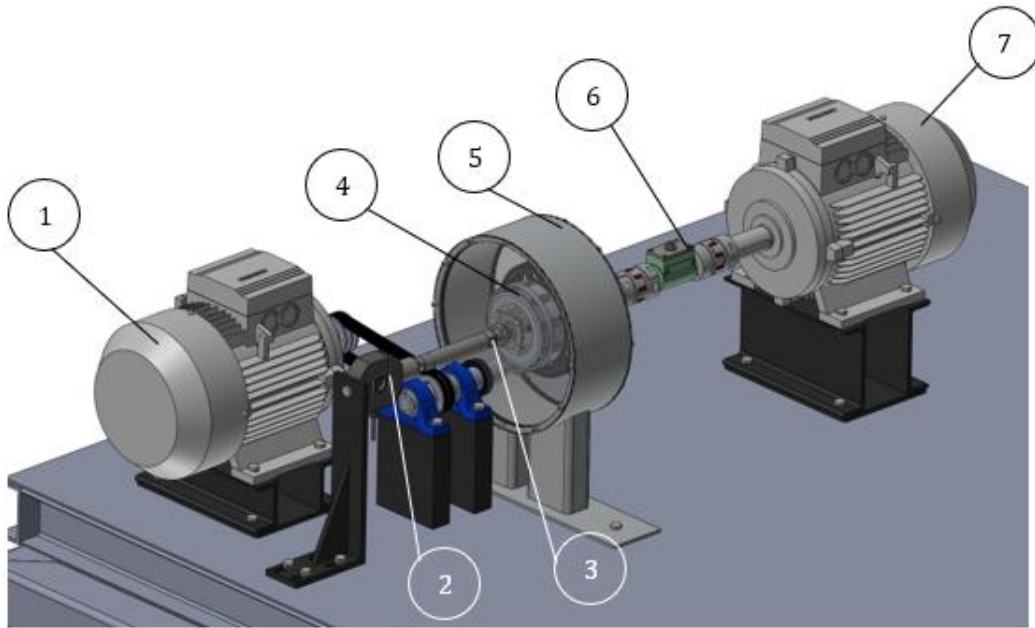
Ο σχεδιασμός της διάταξης ακολούθησε τη φιλοσοφία της πειραματικής διάταξης SAE No. 2. Δηλαδή έπρεπε να αποτελείται από έναν ηλεκτροκινητήρα που να είναι δυνατός ο έλεγχος της ταχύτητας περιστροφής του, να γυρνάει έναν άξονα που θα είναι εφοδιασμένος με μια αδράνεια, ενώ επίσης θα είναι συνδεδεμένος και ένας συμπλέκτης μέσα σε κάποιο κέλυφος, όπου και θα γίνονται οι διάφορες μετρήσεις σχετικά με τη τριβή και το εκάστοτε λάδι.

4.2 Αρχικός σχεδιασμός

Η πρώτη ιδέα ήταν να χρησιμοποιηθεί τη διάταξη του εργαστηρίου με τους δύο κινητήρες και τα inverter τους, με το σκεπτικό να χρησιμοποιείται ο ένας κινητήρας για να δίνει την περιστροφή στον συμπλέκτη και ο άλλος να επιτελεί το ρόλο του φρένου – αντίστασης ή το ρόλο της πάκτωσης όπως φαίνεται στο σχήμα 9 παρακάτω.

Όπως φαίνεται, η περιστροφή δίνεται από τον αριστερά κινητήρα (1) και μέσω τροχαλίας μεταφέρεται στο γρανάζι το οποίο συνεργάζεται με το γρανάζι του συμπλέκτη (4) και τον περιστρέφει. Ο άξονας του δεξιά κινητήρα (7) είναι συνδεδεμένος με τον άξονα του συμπλέκτη ενώ παρεμβάλλεται και ένα ροπόμετρο (6).

Η επενέργεια του συμπλέκτη γίνεται με ένα πνευματικό έμβολο (3) το οποίο είναι πακτωμένο από τη πίσω του μεριά σε ένα load cell (2). Ως συνέπεια, ο χειριστής θα μπορεί ανάλογα με την πίεση που δίνει στο έμβολο με το κομπρεσέρ αέρα, να βλέπει ακριβώς τη δύναμη που ασκεί αυτό στην πλάκα πίεσης του συμπλέκτη. Όλος ο συμπλέκτης βρίσκεται μέσα σε ένα στεγανό κέλυφος (5), μέσα στο οποίο προθέεται λάδι και το οποίο διαθέτει καπάκια από pmma, ώστε να μπορεί κανείς να δει πως λειτουργεί το σύστημα.



Σχήμα 4.1, Τρισδιάστατη απεικόνιση πρώτης ιδέας

Εξάρτημα	Ονομασία
1,7	Κινητήρας
2	Load cell
3	Πνευματικό έμβολο
4	Συμπλέκτης
5	Κέλυφος συμπλέκτη
6	Ροπόμετρο

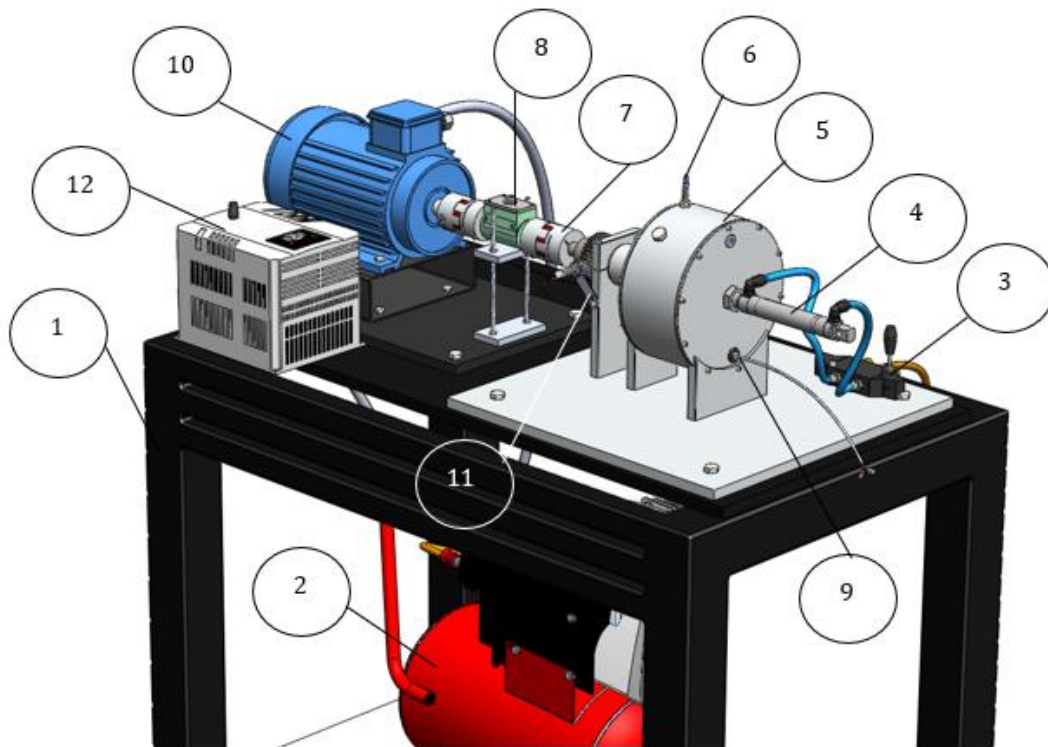
Χαρακτηριστικά κινητήρα	
Τάση (V)	400/690 Δ/Υ
Συχνότητα (Hz)	50
Ισχύς (kW)	7.50
Ταχύτητα περιστροφής (RPM)	2930
Ροπή (Nm)	24.4

Τελικά το παραπάνω σχέδιο απορρίφθηκε, επειδή στόχος ήταν μια κατασκευή χαμηλού κόστους, εύκολη στη συναρμολόγηση και σχετικά εύκολη στη μεταφορά, καθώς η παραπάνω διάταξη βρίσκεται πάνω σε ένα μεγάλο τραπέζι που δεν γίνεται να μεταφερθεί. Επίσης η συναρμολόγησή του είναι σύνθετη, καθώς πρέπει να ευθυγραμμιστούν 3 άξονες, να τοποθετηθεί το γρανάζι στη σωστή θέση που να συνεργάζεται με τον συμπλέκτη, να γίνουν αρκετές τρύπες με σπείρωμα στη χοντρή μεταλλική επιφάνεια του τραπέζιου και να κατασκευαστούν οι βάσεις για τα μοτέρ με μεγάλη ακρίβεια ώστε να επιτευχθεί η ομοαξονικότητα. Τέλος εμφανίστηκε ένα πρόβλημα κατά τη δοκιμή της λειτουργίας των κινητήρων με τα inverter τους, καθώς ο ένας από τους δύο λειτουργούσε σε πολύ χαμηλές στροφές και ήταν άγνωστο ποιο ήταν το πρόβλημα και από τη στιγμή που δεν υπήρχαν διαθέσιμα τα εγχειρίδια χρήσης θα ήταν μια δύσκολη υπόθεση να λυθεί το πρόβλημα.

4.3 Τελικός σχεδιασμός

4.3.1 Γενικά

Τα προβλήματα και τα εμπόδια που εμφανίστηκαν στην προηγούμενη περίπτωση οδήγησαν στην αναζήτηση τρόπων ώστε η τελική πειραματική διάταξη να είναι σχετικά χαμηλού κόστους, εύκολα μετακινήσιμη και με πολλές διαφορετικές δυνατότητες διαμόρφωσης για την εκτέλεση ποικίλων πειραμάτων τα οποία κάθε φορά θα εστιάζονται σε διαφορετική μέτρηση. Για τον σκοπό αυτό, καταγράφηκαν τα μετρητικά όργανα που θα χρειαστούν, τον τρόπο με τον οποίο αυτά πρέπει να προσαρμόζονται ώστε να λαμβάνονται σωστές μετρήσεις, τις απαιτήσεις στιβαρότητας, ομοαξονικότητας, στεγανότητας καθώς και συναρμολόγησης και προέκυψε στο ακόλουθο σχέδιο.



Σχήμα 4.2 , Τρισδιάστατη απεικόνιση τελικής διάταξης

Εξάρτημα	Ονομασία
1	Τραπέζι
2	Κομπρεσέρ αέρα
3	Πνευματική βαλβίδα
4	Πνευματικό έμβολο
5	Κέλυφος στο οποίο βρίσκεται ο συμπλέκτης
6	Επαγωγικός αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας περιστροφής του γραναζιού του συμπλέκτη (δίσκοι τριβής)
7	Κόπλερ σύνδεσης του ροτόμετρου
8	Ροτόμετρο
9	Θερμοζεύγος
10	Κινητήρας
11	Επαγωγικός αισθητήρας μέτρησης ταχύτητας περιστροφής του άξονα του συμπλέκτη (μεταλλικοί δίσκοι)
12	Inverter κινητήρα

4.3.2 Ανάλυση εξαρτημάτων

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 10, η διάταξη βρίσκεται εξ ολοκλήρου πάνω σε ένα τραπέζι διαστάσεων 670x1080x900 mm, γεγονός που το κάνει εύκολα μεταφέρσιμο με τη βοήθεια παλετοφόρου ή με την προσθήκη 4 τροχών στα πόδια του τραπεζιού. Διαθέτει επίσης και μια επιφάνεια στο κάτω μέρος του όπου μπορεί να τοποθετηθεί το κομπρεσέρ. Θα χρειαστεί προσοχή όμως κατά τη διάρκεια λειτουργίας του κομπρεσέρ, να είναι καλά στερεωμένο και να παρακολουθείται από τον χειριστή, καθώς λόγω δονήσεων, το κομπρεσέρ μπορεί να μετακινείται ελαφρώς.

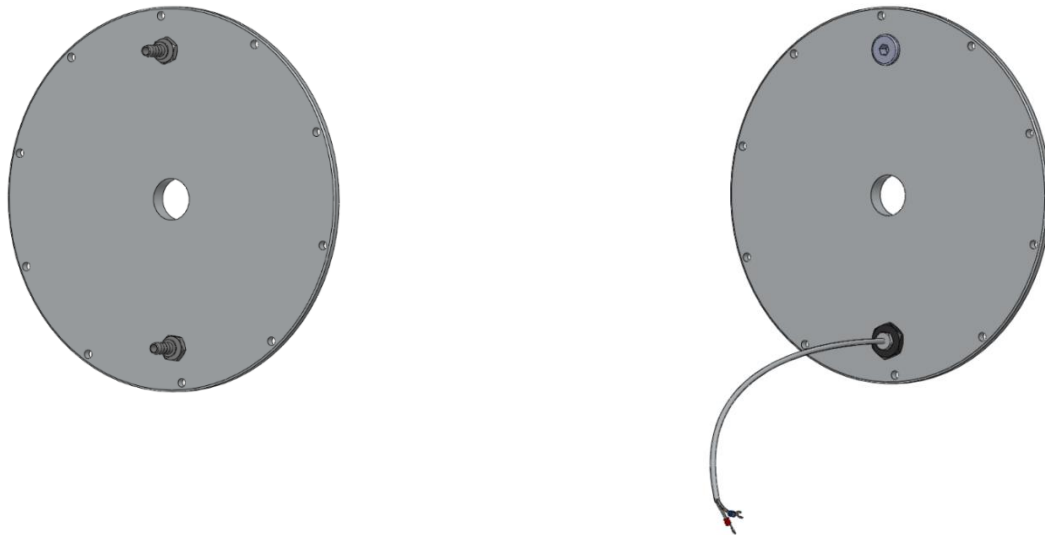
Στο πάνω μέρος υπάρχει μια μεταλλική πλάκα διαστάσεων 520x1060mm πάνω στην οποία είναι βιδωμένες οι πλάκες στις οποίες εδράζονται ο κινητήρας και το κέλυφος του συμπλέκτη. Είναι απαραίτητο κατά τη διαδικασία συναρμολόγησης της διάταξης να γίνει ακριβής ευθυγράμμιση με τη βοήθεια ενός ρολογιού γράφτη, και στη συνέχεια να γίνει η ασφάλιση των πλακών του κινητήρα και του συμπλέκτη με κοχλίες.

Η απαραίτητη πίεση που απαιτείται για τη λειτουργία του εμβόλου παρέχεται από το κομπρεσέρ 25 λίτρων που βρίσκεται στο κάτω μέρος του τραπεζιού. Πρέπει πρώτου αρχίσουν τα πειράματα, ο χειριστής να έχει ενεργοποιήσει το κομπρεσέρ και να έχει φτάσει στην επιθυμητή πίεση. Στη συνέχεια θα πρέπει να σιγουρευτεί ότι ο διακόπτης είναι στο off και να βγάλει το κομπρεσέρ από την πρίζα.

Για τον έλεγχο του πνευματικού εμβόλου χρησιμοποιήθηκε μια χειροκίνητη πνευματική βαλβίδα ελέγχου 3 θέσεων, η οποία σταθεροποιείται στην πλάκα με 2 κοχλίες. Στην αριστερή θέση η βαλβίδα στέλνει τον αέρα στο πίσω μέρος του εμβόλου προωθώντας το, ενώ στη δεξιά στέλνει αέρα στο μπροστινό μέρος κλείνοντάς το. Το έμβολο όταν ανοίγει, σπρώχνει την πλάκα πίεση του συμπλέκτη και τον ανοίγει, ενώ όταν το έμβολο κλείνει και ο συμπλέκτης κλείνει λόγω την ελατηρίων του. Είναι εξαιρετικά σημαντικό όταν γίνεται η αποσυναρμολόγηση του εμβόλου να βρίσκεται στην κλειστή θέση, δηλαδή η βαλβίδα να είναι στη δεξιά θέση. Στη μεσαία θέση της βαλβίδας, το έμβολο μένει στη θέση που βρισκόταν. Τα χαρακτηριστικά του εμβόλου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Διάμετρος πιστονιού	25 mm
Πίεση λειτουργίας	1 – 10 bar (0.1 – 1 MPa)
Θερμοκρασία λειτουργίας	-20 – 80 °C
Θεωρητική δύναμη στα 6/8/10 bar	294.5 N/392.5 N / 490.25 N
Μετακινούμενη μάζα στα 0mm διαδρομή	71 g
Επιπλέον μάζα ανά 10mm διαδρομής	6 g
Σπείρωμα για πνευματικές συνδέσεις	G1/8

Ο συμπλέκτης βρίσκεται μέσα στο κέλυφος (5) το οποίο εδράζεται πάνω στην πλάκα στο πίσω μέρος του καπακιού του ενώ μπροστά του προσαρμόζεται το κουζινέτο που φέρει τον άξονα του συμπλέκτη και το οποίο εδράζεται σε δύο σημεία πάνω στην πλάκα. Το κέλυφος διαθέτει συνολικά 2 τρύπες με σπείρωμα, όπου στο ένα προσαρμόζεται ο επαγωγικός αισθητήρας για τη μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής και στο άλλο βίδα M12 για την πάκτωση της αδράνειάς του. Στο πίσω καπάκι τέλος υπάρχουν 2 τρύπες με σπείρωμα όπου η πρώτη χρησιμοποιείται για την πλήρωση του κελύφους με λάδι ή για τη προσαρμογή αντάπτορα για σωληνάκι ενώ η κάτω για την προσαρμογή του θερμοζεύγους ή για την προσαρμογή πάλι αντάπτορα για σωληνάκι ώστε να υπάρχει κυκλοφορία λαδιού στο σύστημα.

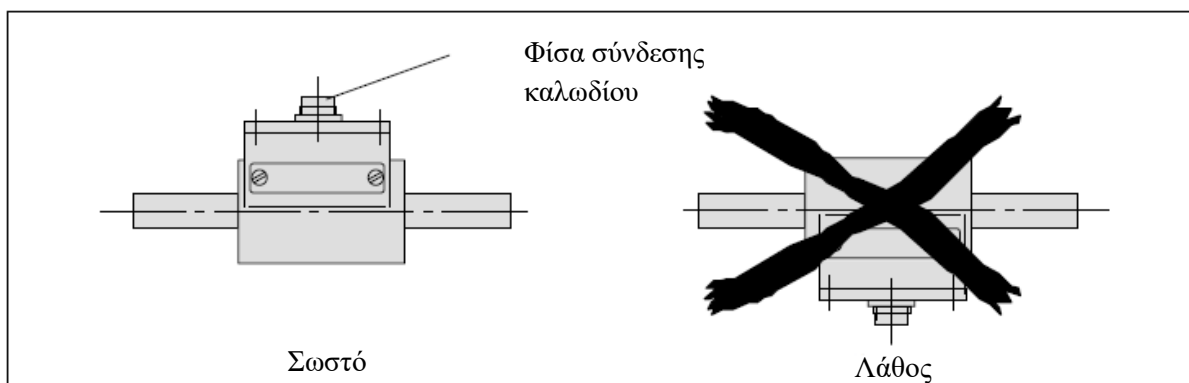


Σχήμα 4.3, Καπάκι του κελύφους με και χωρίς ανακκλοφορία λαδιού

Η περιστροφή δίνεται από τον κινητήρα αφού παρεμβληθεί το ροπόμετρο το οποίο ενώνεται με ειδικά κόπλερ τα οποία επιτρέπουν μικρή απόκλιση εκκεντρότητας. Το ροπόμετρο διαθέτει και βάση για την αποφυγή περιστροφής. Χαρακτηριστικά του ροπόμετρου παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Type		T5
Accuracy class		0.1
	Measurment unit	
Nominal (rated) torque	Nm	50
Nominal (rated) sensitivity	%	2
Sensitivity tolerance	%	< ± 0.2
Temperature effect per 10 K		
On output signal	%	< ± 0.1
On zero signal	%	< ± 0.1
Linearity deviation, including hysteresis	%	< ± 0.1
Relative standard deviation of reproducibility according to DIN 1319	%	< ± 0.05
Input resistance at reference temperature	Ω	350 ± 1.8
Output resistance at the reference temperature	Ω	350 ± 1.5
Maximum possible excitation voltage	V	20
Nominal (rated) range of the excitation voltage	V	0.5 - 12
Reference temperature	°C	23
Nominal (rated) temperature range	°C	+10...+60
Service temperature range	°C	-10...+60
Storage temperature range	°C	-50...+70
Mechanical values		

Static limit load	%	150
Static breaking load	%	300
Limit bending moment	Nm	6
Limit lengthwise force	kN	3.5
Limit transverse force	N	50
Torsion angle at nominal (rated) torque, approx.	degrees	0.85
Moment of inertia	kgm ² 10 ⁻³	0.041
Maximum permissible speed	RPM	4000
Service life of the slipping system approx.	revol.	3x10 ⁸
Vibration amplitude to ISO/R 373	&	70
Mechanical impact test, degree of protection to IEC 68-2-6-1987; Part 2-27;		
Number	n	1000
Duration	ms	3
Acceleration	m/s ²	500
Vibration stress test, degree of precision to IEC 68-2-1982; Part 2-6;		
Frequency range	Hz	5...65
Duration	h	1.5
Acceleration	m/s ²	50
Protection class, according to EN 60 529		IP50
Weight, approx.	kg	0.6



Σχήμα 4.4, Σωστή τοποθέτηση ροπόμετρου 8

4.3.3 Συμπλέκτης

Ο συμπλέκτης που χρησιμοποιείται στη διάταξη έχει αφαιρεθεί από μοτοσυκλέτα Honda cb400rr ('88 – '99). Διαθέτει 7 δίσκους τριβής και 6 μεταλλικούς, ενώ η αλληλουχία τους είναι F-S-F-S-F-S-F-S-F-S-F (Friction – Steel). Έχει 4 ελατήρια που τον κρατάνε σε επαφή τα οποία πρέπει να υπερνικήσει το πνευματικό έμβολο για να γίνει η απεμπλοκή. Το κάθε ελατήριο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Διαμέτρος σπείρας: 2.6 mm
- Εξωτερική διάμετρος: 18.8 mm
- Συνολικό αρχικό μήκος: 43.1 mm
- Αριθμός σπειρωμάτων: 9

Σύμφωνα με τα παραπάνω χαρακτηριστικά προκύπτει πως η σταθερά ελατηρίου του καθενός είναι $k=11.8 \text{ kN/m}$. Ο συμπλέκτης διαθέτει 4 ελατήρια σε παράλληλη σύνδεση οπότε η συνολική σταθερά Hooke των τεσσάρων ελατηρίων θα δίνεται από τη σχέση:

$$k_{total} = \sum_{k=1}^4 k_n = 4 \times 11.8 = 47.2 \text{ kN/m}$$

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης της Honda, για να λειτουργεί σωστά ο συμπλέκτης πρέπει τα ελατήρια να συμπιεστούν κατά 19mm. Αυτό σημαίνει ότι η αναπτυσσόμενη δύναμη συμπίεσης θα είναι

$$F_{total} = k_{total} \times 19 \times 10^{-3} = 896.8 \text{ N}$$

Συγκρίνοντας το παραπάνω νούμερο με τη μέγιστη δύναμη που μπορεί να αναπτύξει το πνευματικό έμβολο, βγαίνει το συμπέρασμα ότι η δύναμη του εμβόλου δεν είναι επαρκής για να συμπιέσει τα ελατήρια και να ανοίξει ο συμπλέκτης. Για τον λόγο αυτό, έγινε αλλαγή των ελατηρίων με άλλα μικρότερης διαμέτρου σπείρας και μικρότερου συνολικού μήκους, κρατώντας τα υπόλοιπα μεγέθη ίδια, ώστε να επιτευχθεί μικρότερη τιμή στη σταθερά του κάθε ελατηρίου. Τα χαρακτηριστικά των νέων ελατηρίων παρουσιάζονται παρακάτω:

- Διαμέτρος σπείρας: 2 mm
- Εξωτερική διάμετρος: 17 mm
- Συνολικό αρχικό μήκος: 34 mm
- Αριθμός σπειρών: 6

Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτει πως η σταθερά των νέων ελατηρίων είναι $k=7.8 \text{ kN/m}$. Αφού ο συμπλέκτης αποτελείται από 4 ελατήρια σε παράλληλη σύνδεση η συνολική σταθερά ελατηρίου του συστήματος είναι:

$$k_{total} = \sum_{k=1}^4 k_n = 4 \times 7.8 = 31.2 \text{ kN/m}$$

Στη συνέχεια αφού βιδωθούν οι βίδες τα ελατήρια συμπιέζονται κατά 10 mm. Συνεπώς η δύναμη συμπίεσης των ελατηρίων και η δύναμη που πρέπει να ασκήσει το έμβολο για να ανοίξει ο συμπλέκτης είναι:

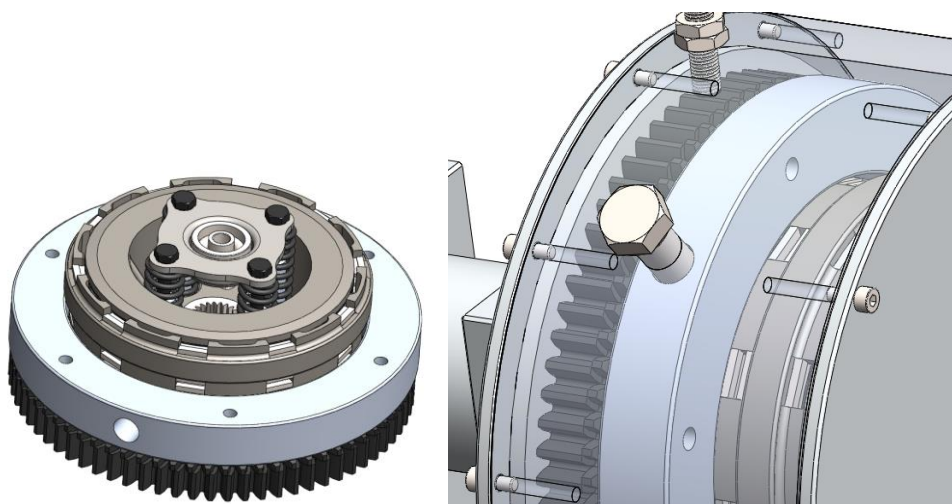
$$F_{total} = k_{total} \times 10 \times 10^{-3} = 312 \text{ N}$$

Τιμή η οποία μπορεί να αναπτύξει το πνευματικό έμβολο της διάταξης.



Εικόνα 4.1, Φωτορεαλιστική εικόνα του συμπλέκτη

Στη συνέχεια, προσαρμόζεται με βίδες πάνω στο γρανάζι του συμπλέκτη μια αδράνεια, έτσι ώστε ο συμπλέκτης να μπορεί να γυρίζει στιγμιαία με σταθερή ταχύτητα αφού απενεργοποιηθεί ο κινητήρας, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.2, Φωτορεαλιστική εικόνα του συμπλέκτη μαζί με την αδράνεια όπου φαίνεται η τοποθέτηση του εγκάρσιου ασφαλιστικού κοχλία του κελύφους και λειτουργεί ως πάκτωση

Όπως φαίνεται και στην εικόνα, η αδράνεια του συμπλέκτη έχει μια τρύπα στην ακτινική της κατεύθυνση, όπου και εισχωρεί η βίδα M12 που περνάει από το κέλυφος ώστε να αποτρέπει το γρανάζι του συμπλέκτη που είναι συνδεδεμένο με τους δίσκους τριβείς να περιστρέφεται. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η πάκτωση του συμπλέκτη για τη διενέργεια πειραμάτων.

4.3.4 Μετρητικά όργανα

Η πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε διαθέτει 5 όργανα μέτρησης, τα οποία υπηρετούν το καθένα και διαφορετικό σκοπό. Αρχικά υπάρχει το μανόμετρο που βρίσκεται στην έξοδο του κομπρεσέρ το οποίο μετράει την πίεση του αέρα που βρίσκεται μέσα στη δεξαμενή των 25 λίτρων. Κατά τη χρήση του εμβόλου είναι λογικό η πίεση αυτή να πέφτει. Πρέπει ο χειριστής να κοιτάει ανά τακτά χρονικά διαστήματα την ένδειξη του μανόμετρου, και σε περίπτωση που η τιμή έχει πέσει χαμηλά, πρέπει να σταματάει το πείραμα και να μπαίνει σε λειτουργία το κομπρεσέρ μέχρι να ανεβεί ξανά η πίεση του αέρα στα επιθυμητά επίπεδα.

Πάνω στο κέλυφος του συμπλέκτη, υπάρχει ένας επαγωγικός αισθητήρας που μετράει τον αριθμό των οδόντων του γραναζιού του συμπλέκτη σε συνάρτηση με τον χρόνο, υπολογίζοντας με αυτόν τον τρόπο την ταχύτητα περιστροφής του συμπλέκτη. Στη συνέχεια υπάρχει και ένας δεύτερος επαγωγικός αισθητήρας, προσαρμοσμένος με ειδικά κατασκευασμένη βάση ώστε να μετράει την ταχύτητα περιστροφής του γραναζιού που είναι ενωμένο με τον άξονα του συμπλέκτη, η οποία είναι ίδια με την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα.

Στο πίσω καπάκι του κελύφους του συμπλέκτη υπάρχει ένα θερμοζεύγος τύπου K, το οποίο κατά τη λειτουργία της διάταξης χωρίς ανακυκλοφορία λαδιού, μετράει την θερμοκρασία του λαδιού.

Τέλος, όπως έχει αναφερθεί υπάρχει το ροπόμετρο που ενώνει τον άξονα του συμπλέκτη με τον κινητήρα το οποίο μετράει την μεταφερόμενη ροπή μεταξύ των δύο.

Όλα τα μετρητικά όργανα ενώνονται με καλώδια στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας και λήψης σήματος DAQ. Εκεί με το κατάλληλο λογισμικό λαμβάνονται τα αντίστοιχα διαγράμματα και βγαίνουν τα κατάλληλα συμπεράσματα.

Είναι σημαντικό πριν ενωθούν τα μετρητικά όργανα στη DAQ, να έχουν μελετηθεί λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά κάθε οργάνου αναφορικά με την τάση λειτουργίας και την τάση εξόδου, ώστε οι μετρήσεις να είναι σωστές και να μην υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της κάρτας μετρήσεων.

4.3.5 Παράμετροι σύνδεσης οργάνων στη DAQ

Το καλώδιο με το οποίο συνδέεται το ροπόμετρο στη DAQ αποτελείται από 7 καλώδια τα οποία είναι αναγκαίο να συνδεθούν στις σωστές θέσεις για τη λήψη αξιόπιστων μετρήσεων. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται το κάθε χρώμα που αντιστοιχεί:

Χρώμα	Λειτουργία
Πράσινο	Signal +
Κίτρινο	Ground
Γκρι	Τροφοδοσία +
Ροζ	Signal -
Άσπρο	
Καφέ	Sensor line +
Μπλε	Sensor line -

Στη συνέχεια αφού συνδεθεί στις κατάλληλες κλέμες, το σήμα το ροπόμετρου ενισχύεται κατά 100.

Οι δύο επαγωγικοί αισθητήρες που μετράνε την ταχύτητα περιστροφής του άξονα και του συμπλέκτη, πρέπει πριν συνδεθούν στην κάρτα, να υποστούν διαίρεση τάσης καθώς η έξοδός τους είναι υψηλότερη

από την τάση που δέχεται η κάρτα. Στην παρούσα περίπτωση χρησιμοποιήθηκε ζεύγος αντιστάσεων 56 Ω και 100 Ω.

4.3.6 Προτεινόμενα πειράματα

Η διάταξη αν και είναι απλή, μικρής κλίμακας και χαμηλού κόστους, έχει σχεδιαστεί με τρόπο τέτοιο ώστε να μπορούν να γίνουν πολλά διαφορετικά πειράματα εστιάζοντας κάθε φορά σε διαφορετικό χαρακτηριστικό, ενώ ταυτόχρονα είναι δυνατόν να αλλάζουν και οι παράμετροι υπό τους οποίους γίνεται το πείραμα.

Αρχικά τα πειράματα χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες: αυτά που έχουν την αδράνεια και άρα τους δίσκους τριβής ακίνητους, και αυτά που ο συμπλέκτης είναι ελεύθερος. Όταν ο συμπλέκτης είναι ελεύθερος προσομοιώνεται η λειτουργία μιας μοτοσυκλέτας όταν είναι σε κίνηση και παρατηρείται άνοιγμα και κλείσιμο του συμπλέκτη. Όταν είναι πακτωμένος, το πείραμα προσομοιώνει το ξεκίνημα της μοτοσυκλέτας από μηδενική ταχύτητα.

Στην πρώτη περίπτωση που ο συμπλέκτης είναι ελεύθερος προτείνονται δύο πειράματα:

- i. Η ταχύτητα του κινητήρα παραμένει σταθερή διαδοχικά στις τιμές 250 RPM, 500 RPM και 1000 RPM και ανοιγοκλείνει ο συμπλέκτης με συχνότητα 0.2 Hz κάθε φορά, μετρώντας αλλαγές στις ταχύτητες περιστροφής του άξονα και του γραναζιού του και τυχόν αύξηση στη θερμοκρασία του λαδιού.
- ii. Ο κινητήρας επιταχύνεται διαδοχικά στις 250 RPM, 500 RPM και 1000 RPM με ανοιχτό συμπλέκτη και μένει σε σταθερή ταχύτητα, ενώ η αδράνεια είναι σταθερή. Ταυτόχρονα απενεργοποιείται ο κινητήρας και ο συμπλέκτης και η αδράνεια αφήνεται να κινηθεί, μετρώντας τη μεταφερόμενη ροπή και τις καμπύλες ταχυτήτων.

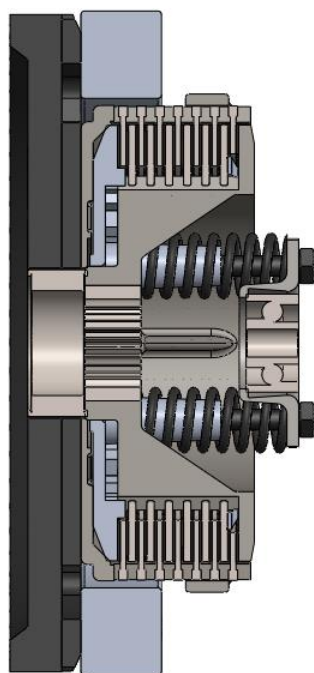
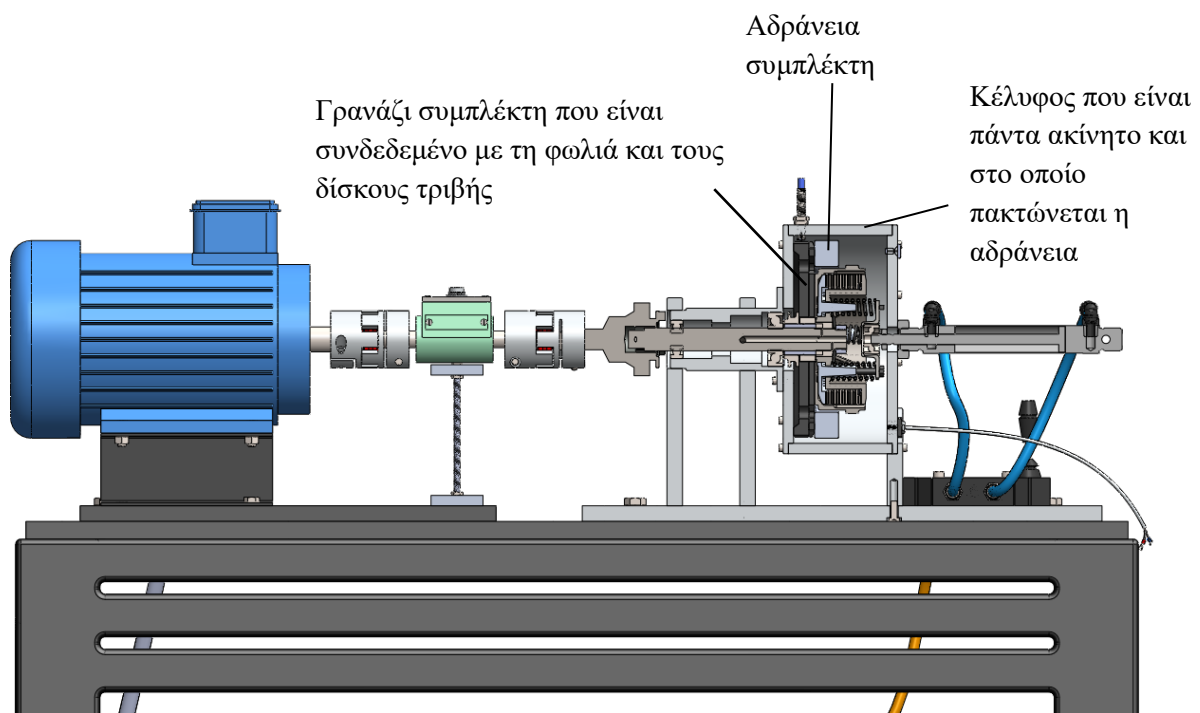
Στη δεύτερη περίπτωση όπου υπάρχει πάκτωση στην αδράνεια του συμπλέκτη προτείνονται τα εξής πειράματα:

- i. Σταθερή μικρή ταχύτητα από τον κινητήρα στις 20 RPM με τον συμπλέκτη ανοιχτό και απότομο στιγμιαίο κλείσιμο με συχνότητα 1 Hz. Μέτρηση της απότομης αύξησης ροπής και σύγκριση με όλες τις φορές που θα επαναληφθεί. Αναμενόμενη αύξηση και θερμοκρασίας.
- ii. Ο συμπλέκτης επιταχύνεται ανοιχτός μέχρι τις 250 RPM, 500 RPM και 1000 RPM και στη συνέχεια κλείνει με αργό ρυθμό. Καταγραφή καμπύλης ροπής σε σχέση με καμπύλη ταχύτητας.
- iii. Ο συμπλέκτης είναι ακίνητος και κλειστός. Αύξηση της ταχύτητας μέχρι τα 0.72 RPM και απεμπλοκή του με αργό ρυθμό. Εύρεση σημείου απεμπλοκής του και υπολογισμός συντελεστή τριβής.
- iv. Επιτάχυνση του συμπλέκτη ενώ είναι ανοιχτός σε υψηλή ταχύτητα 1200 RPM. Απενεργοποίηση κινητήρα και ταυτόχρονο κλείσιμο συμπλέκτη. Καταγραφή καμπυλών ροπής και ταχύτητας.

Σε όλα τα παραπάνω πειράματα μπορούν να αλλάζουν και οι σταθεροί παράμετροι όπως το είδος, το ιξώδες, ο βαθμός πλήρωσης του κελύφους με λάδι, η ύπαρξη ανακυκλοφορίας λαδιού, η θερμοκρασία λαδιού καθώς επίσης, το μήκος σύσφιξης των ελατηρίων του συμπλέκτη το οποίο επηρεάζει τη δύναμη επαφής των δίσκων μεταξύ τους και η πίεση του πνευματικού εμβόλου.

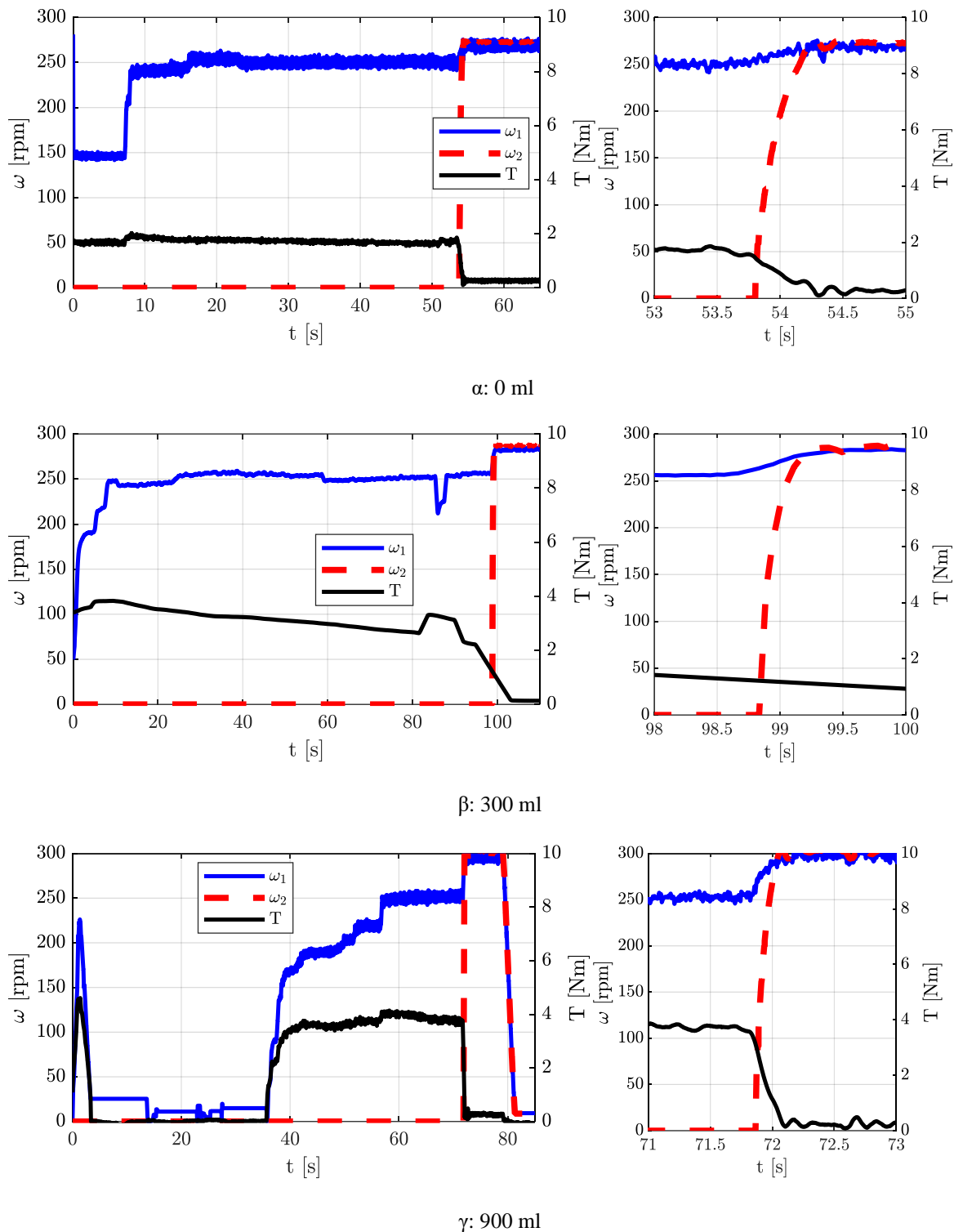
5. Πειραματικές μετρήσεις

Πραγματοποιήθηκαν 6 κατηγορίες πειραμάτων όπου στην κάθε μία υπήρχαν διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας υπό διαφορετικές παραμέτρους. Τα μετρούμενα μεγέθη ήταν η μεταφερόμενη ροπή που στα διαγράμματα συμβολίζεται με μαύρο χρώμα, η ταχύτητα του άξονα που συμβολίζεται με μπλε χρώμα και η ταχύτητα της φωλιάς του συμπλέκτη που συμβολίζεται με κόκκινο χρώμα. Σε όλες τις κατηγορίες έγιναν 3 πειράματα σε διαφορετικές πληρώσεις λαδιού 0ml/300ml/900ml, ενώ έγιναν για διαδοχικά πειράματα σε διαφορετικές ταχύτητες 250RPM/500RPM/1000RPM.

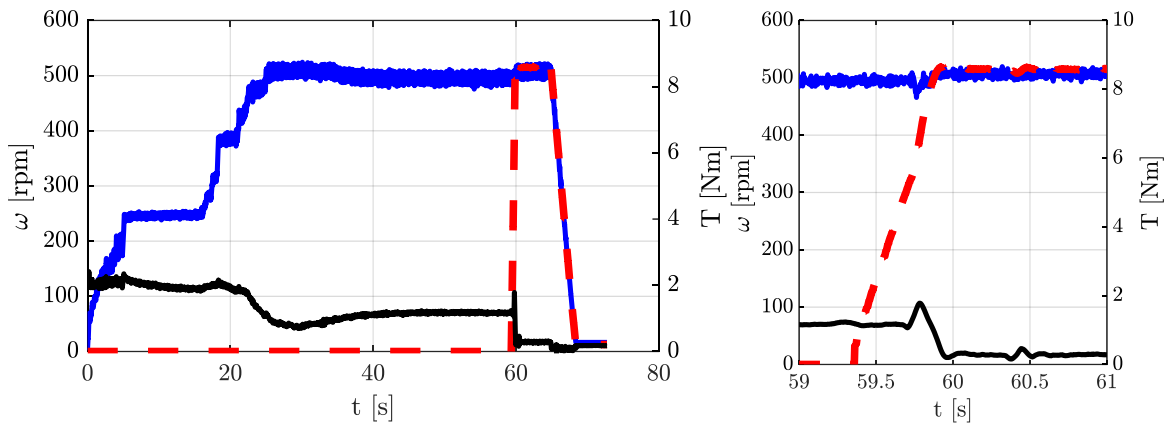


5.1 Κατηγορία A

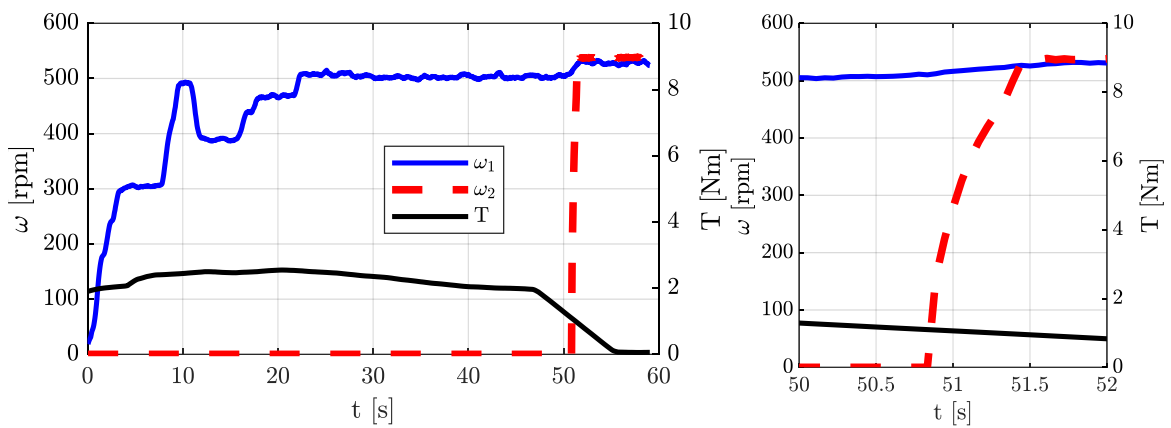
Η φωλιά του συμπλέκτη κρατιέται ακίνητη από το γρανάζι της και ο συμπλέκτης είναι ανοιχτός. Ο κινητήρας επιταχύνεται στην επιθυμητή ταχύτητα και στη συνέχεια κλείνει ο συμπλέκτης ενώ ταυτόχρονα αφήνεται να κινηθεί.



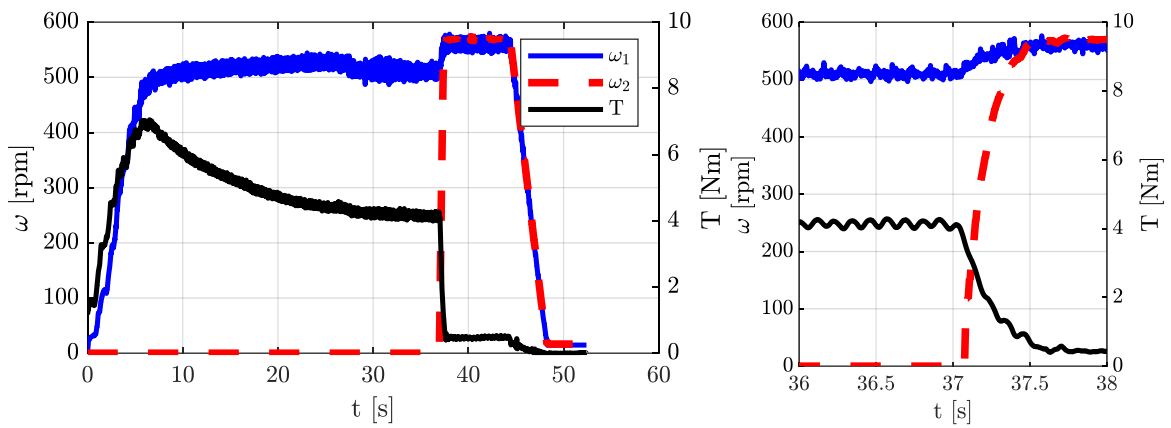
Εικόνα 5.1, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας A και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 250 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0 \text{ ml}$, $\beta: 300 \text{ ml}$, $\gamma: 900 \text{ ml}$.



α : 0 ml

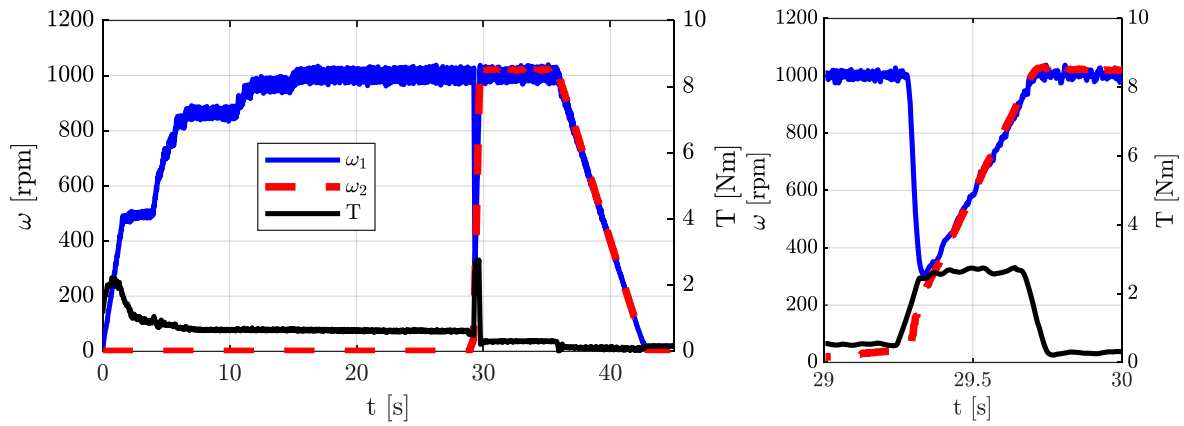


β : 300 ml

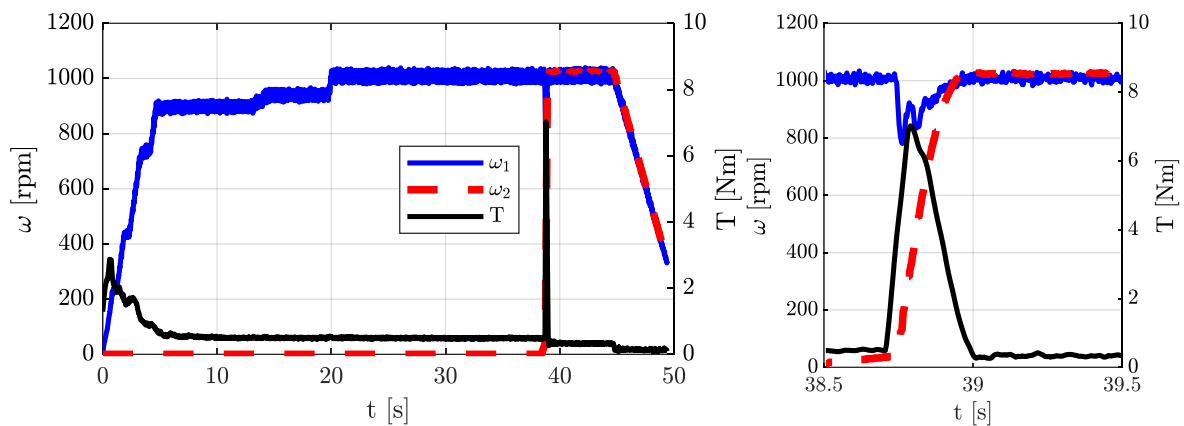


γ : 900 ml

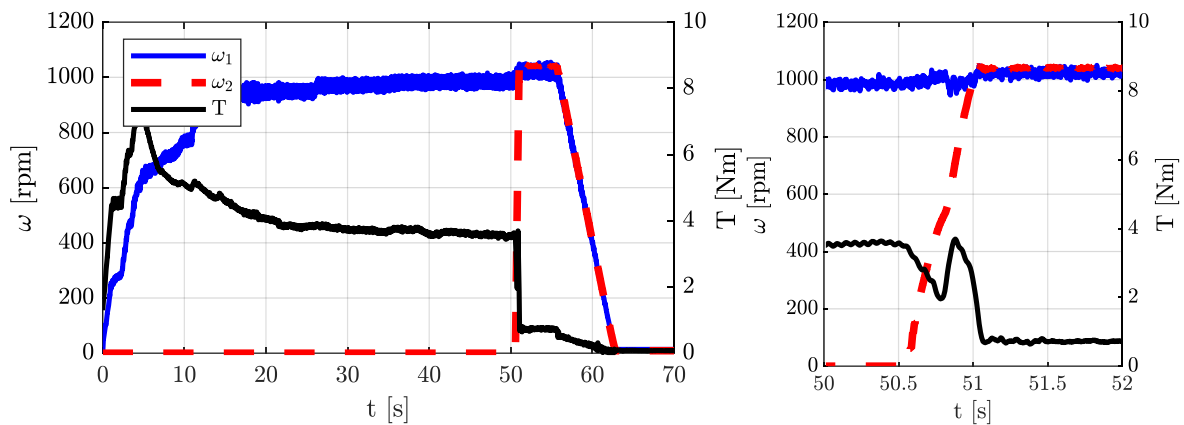
Εικόνα 5.2, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας A και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 500 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α : 0 ml, β : 300ml, γ : 900ml.



$\alpha: 0 \text{ ml}$



$\beta: 300 \text{ ml}$



$\gamma: 900 \text{ ml}$

Εικόνα 5.3, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας A και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 1000 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0 \text{ ml}$, $\beta: 300 \text{ ml}$, $\gamma: 900 \text{ ml}$.

5.1.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Παρατηρείται σε όλα τα διαγράμματα ότι πριν κλείσει ο συμπλέκτης και υπάρχει κενό μεταξύ των δίσκων, η αναπτυσσόμενη ροπή είναι υψηλότερη από αυτή μετά τη σύμπλεξη και αυτό οφείλεται στο φιλμ λαδιού που υπάρχει μεταξύ των δίσκων και από τη μία πλευρά η επιφάνεια περιστρέφεται ενώ

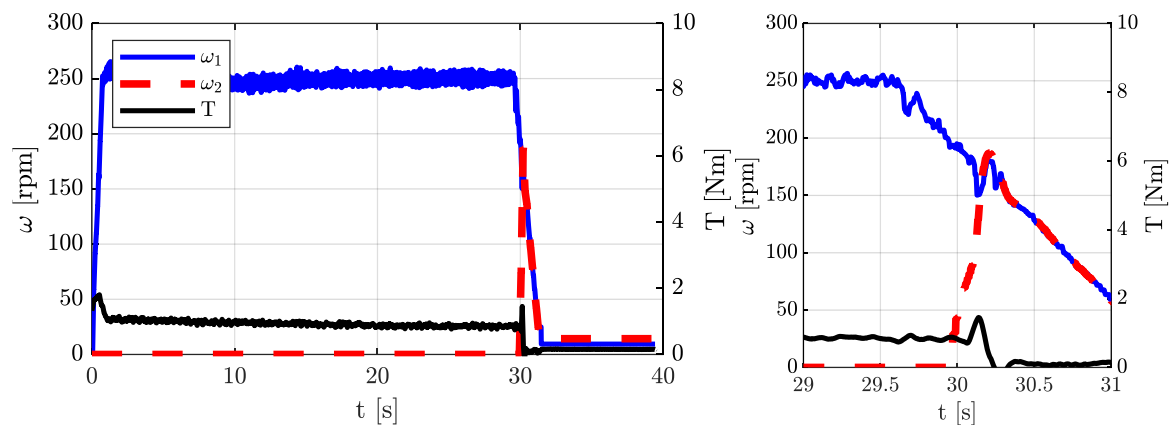
από την άλλη είναι ακίνητη. Επιπλέον συμπέρασμα σε αυτό το σημείο των διαγραμμάτων είναι πως όσο αυξάνεται η ποσότητα του λαδιού, αυξάνεται και η ροπή για τον ίδιο λόγο που περιεγράφηκε πριν.

Τη στιγμή της σύμπτωσης η ταχύτητα του άξονα πέφτει απότομα καθώς οι περιστρεφόμενοι μεταλλικοί δίσκοι έρχονται σε επαφή με τους ακίνητους δίσκους τριβής. Αυτή η απότομη μείωση της ταχύτητας είναι φανερό πως είναι πιο έντονη όσο λιγότερο λάδι υπάρχει στο κέλυφος. Η ταχύτητα του συμπλέκτη αυξάνεται ακαριαία όταν κλείνει αλλά στα διαγράμματα φαίνεται αλλαγή της κλίσης της καμπύλης και άρα αλλαγή της επιτάχυνσης κατά τη σύμπτωση.

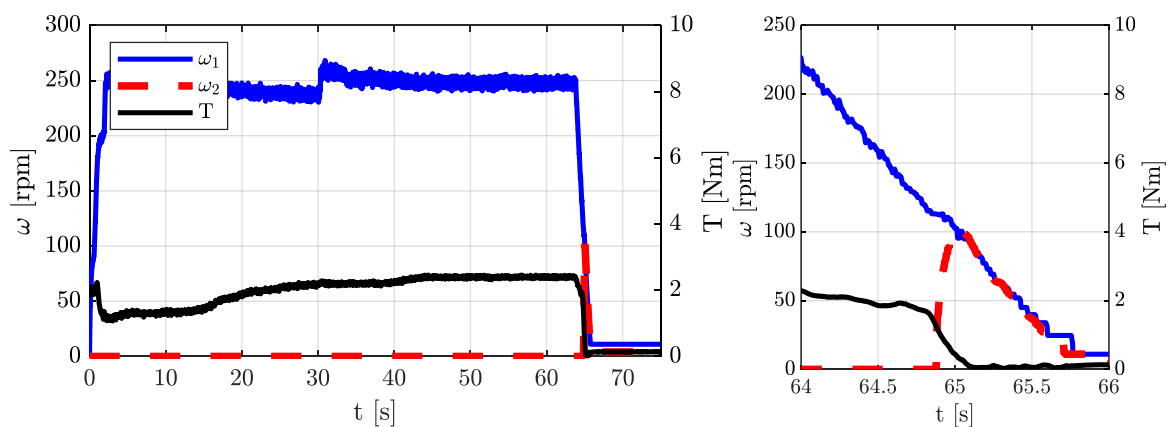
Αξίζει να σχολιασθεί το γεγονός ότι αναλόγως πόσο λάδι υπάρχει μέσα στο κέλυφος, στην αρχή του κάθε διαγράμματος η ροπή αυξάνεται περισσότερο πριν επανέλθει σε μία σταθερή τιμή. Αυτό συμβαίνει επειδή ο κινητήρας είναι ασύγχρονος και σαν είσοδο δέχεται τη συχνότητα περιστροφής. Η όποια συχνότητα όμως λόγω του slip και των απωλειών δεν ανταποκρίνεται σε σταθερά rpm. Έτσι, όταν ο συμπλέκτης είναι ανοιχτός και υπάρχει υψηλή αναπτυσσόμενη ροπή αντίστασης, αποδίδει λιγότερα RPM, από τη στιγμή που κλείνει. Αυτή η διαφορά στην ταχύτητα περιστροφής είναι πιο έντονη σε υψηλότερες ταχύτητες και σε υψηλότερο όγκο ρευστού. Τέλος σαν γενική παρατήρηση, τα φαινόμενα είναι πιο έντονα όσο αυξάνεται η ταχύτητα του κινητήρα, δηλαδή στις 1000 RPM.

5.2 Κατηγορία Β

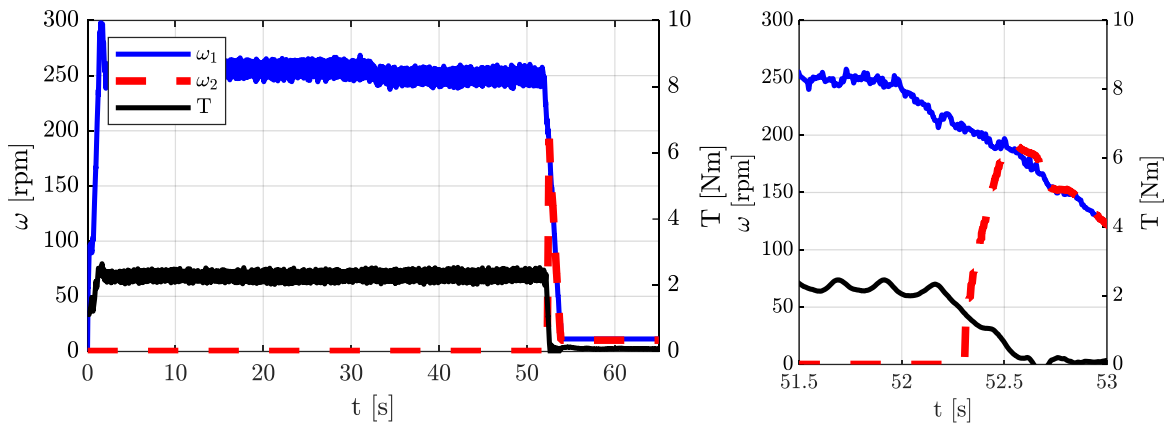
Η φωλιά του συμπλέκτη κρατιέται ακίνητη από το γρανάζι της και ο συμπλέκτης είναι ανοιχτός όπως ακριβώς και στη προηγούμενη κατηγορία πειραμάτων. Ο κινητήρας επιταχύνεται στην επιθυμητή ταχύτητα και στη συνέχεια κλείνει ενώ ταυτόχρονα κλείνει και ο συμπλέκτης ενώ αφήνεται να κινηθεί.



$\alpha: 0 \text{ ml}$

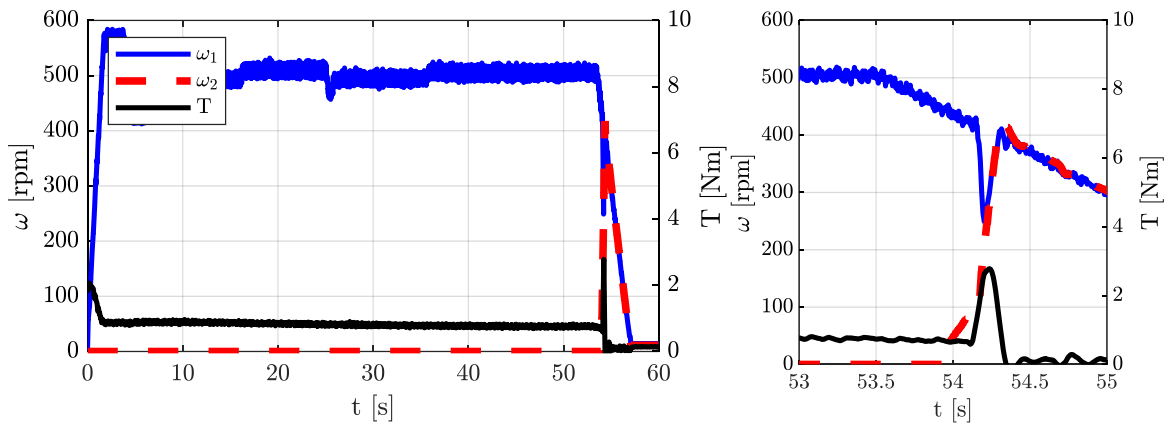


$\beta: 300 \text{ ml}$

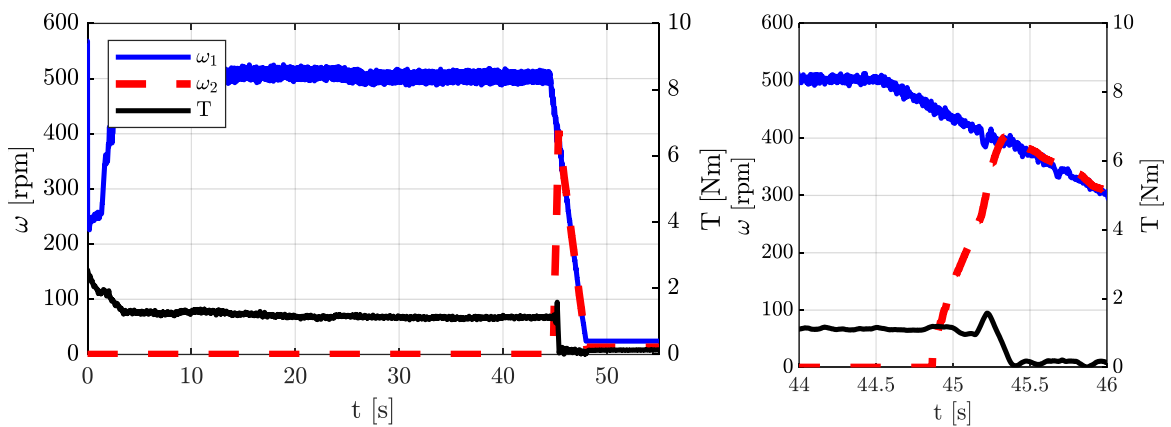


$\gamma: 900$ ml

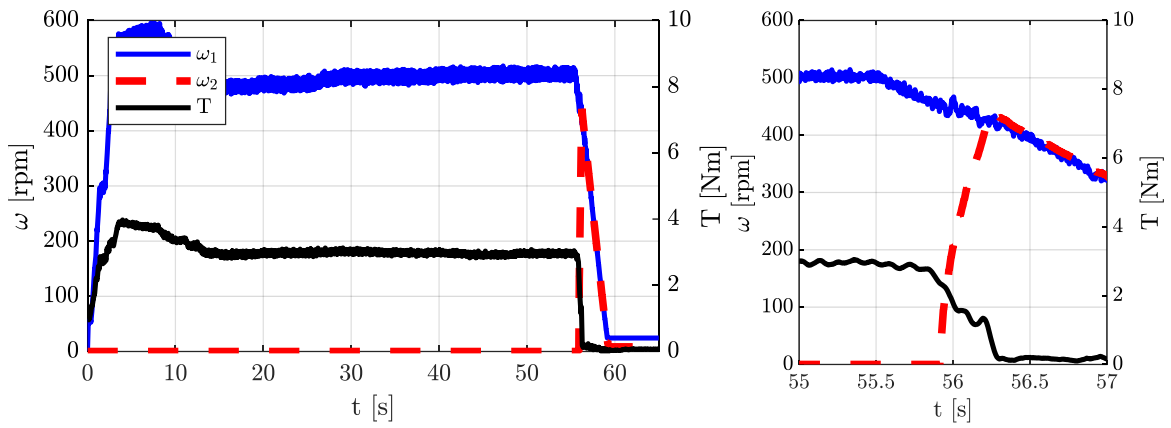
Εικόνα 5.4, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας B και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 250 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0$ ml, $\beta: 300$ ml, $\gamma: 900$ ml.



$\alpha: 0$ ml

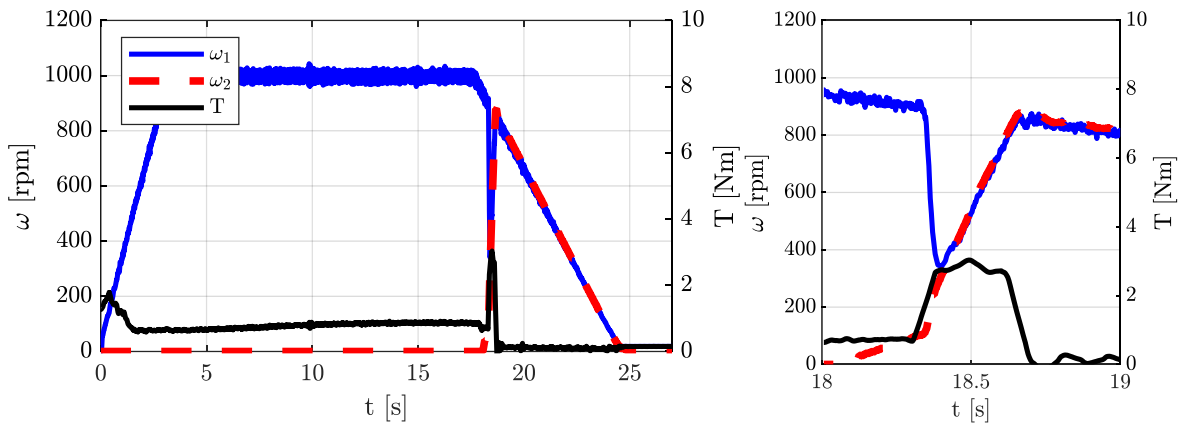


$\beta: 300$ ml

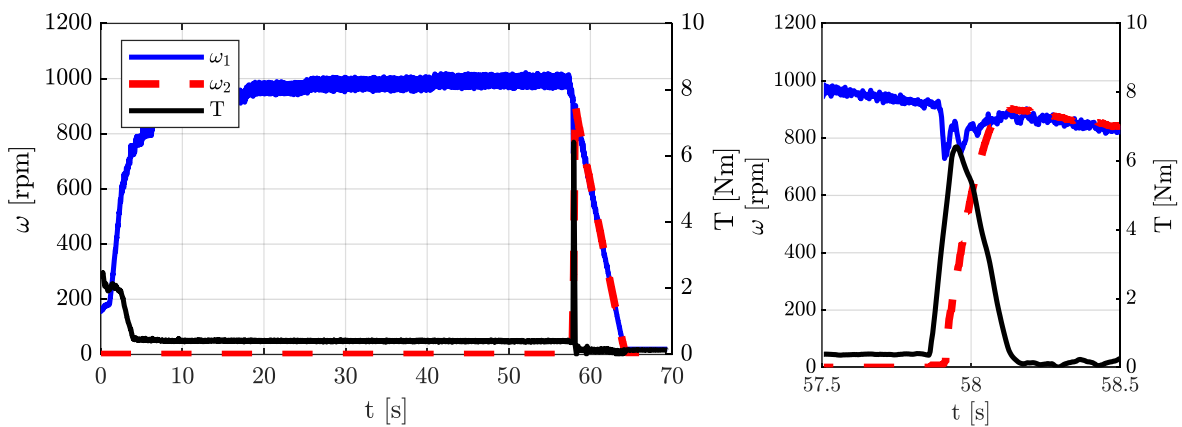


$\gamma: 900$ ml

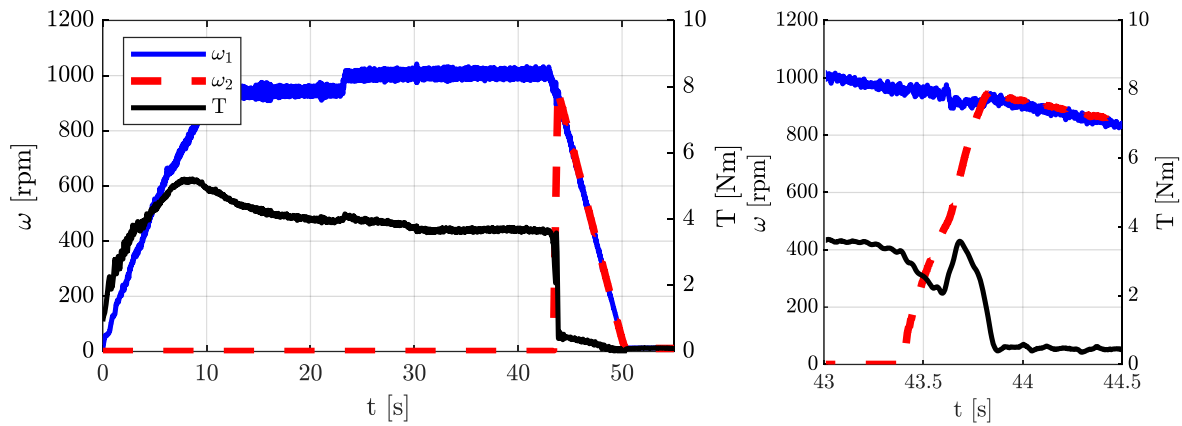
Εικόνα 5.5, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας B και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 500 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0$ ml, $\beta: 300$ ml, $\gamma: 900$ ml.



$\alpha: 0$ ml



$\beta: 300$ ml



γ: 900 ml

Εικόνα 5.6, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Β και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 1000 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α: 0 ml, β: 300ml, γ: 900ml.

5.2.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Παρατηρώντας τα πρώτα διαγράμματα σε κάθε ταχύτητα περιστροφής όπου δεν υπάρχει λάδι στο κέλυφος, εκεί συναντάται η υψηλότερη πτώση ταχύτητας του άξονα που αρχικά κινούνταν τη στιγμή που γίνεται η σύμπλεξη με τους αρχικά ακίνητους δίσκους τριβής, ενώ μετά στο διάγραμμα συνεχίζουν την περιστροφή με την ίδια κλίση στην αύξηση της ταχύτητας.

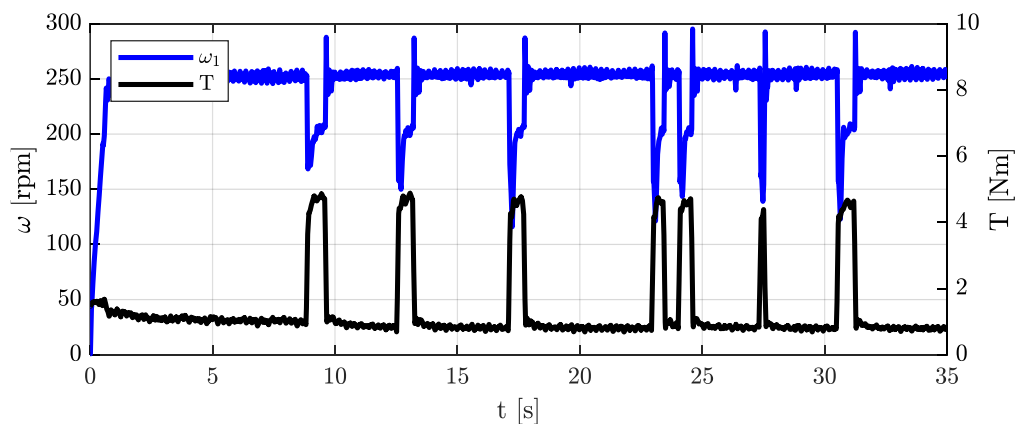
Στα 0ml επίσης συναντάται η υψηλότερη στιγμιαία αύξηση της ροπής ενώ πριν τη σύμπλεξη η ροπή ήταν η χαμηλότερη μεταξύ των 3 ποσοστών πλήρωσης λαδιού.

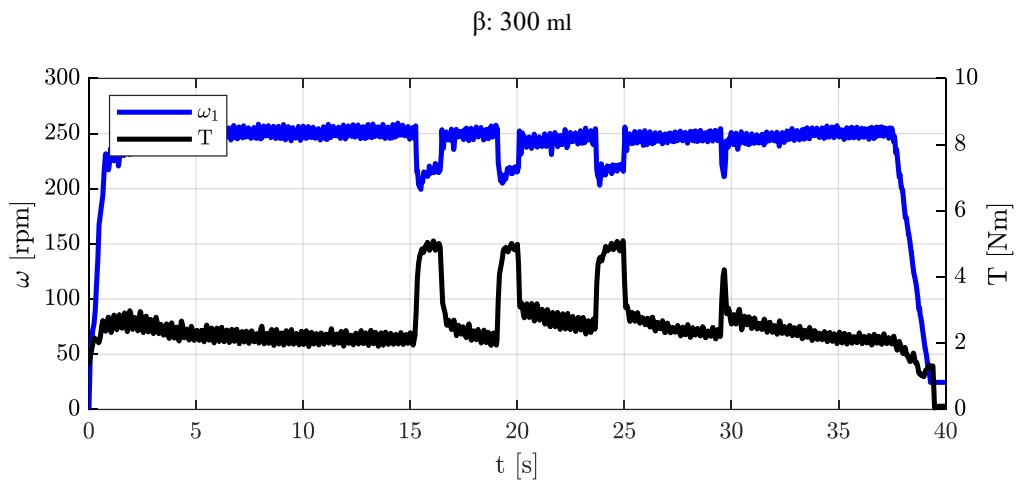
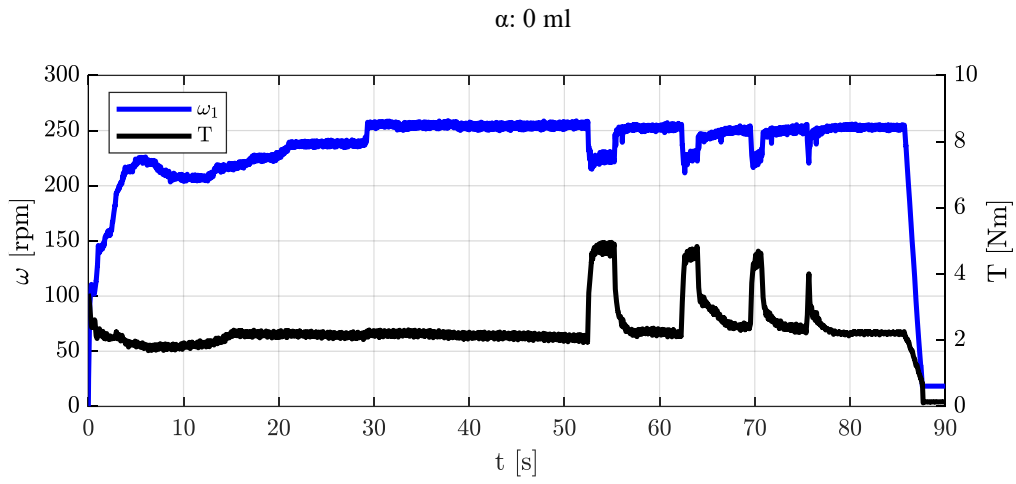
Όσο προστίθεται λάδι το ΔT μειώνεται ενώ αυξάνεται η ροπή στο στάδιο της αποσύμπλεξης.

Στα 900ml είναι φανερό ότι η ταχύτητα του άξονα φαίνεται να μην επηρεάζεται καθόλου από τη σύμπλεξη με τους ακίνητους δίσκους ενώ η μεταβολή της ροπής γίνεται με τον πιο ομαλό τρόπο.

5.3 Κατηγορία Γ

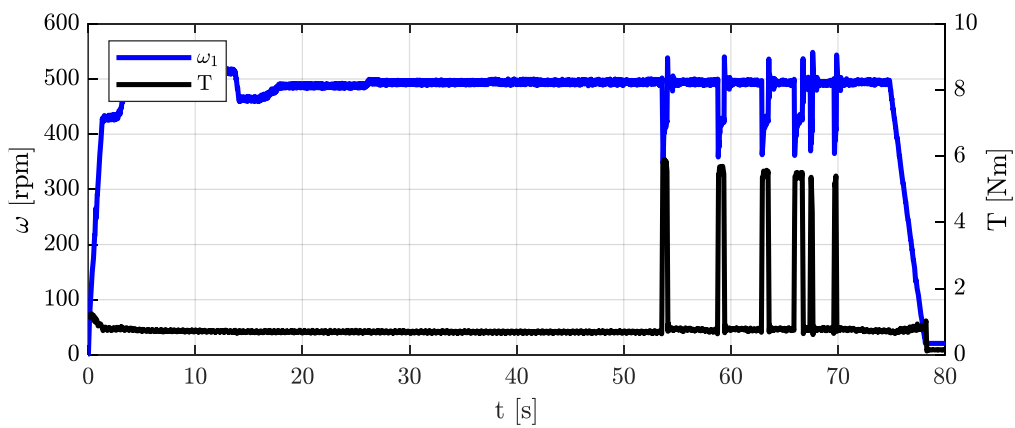
Η φωλιά του συμπλέκτη κρατιέται πακτωμένη από τον κοχλία που εδράζεται στο κέλυφος και εισχωρεί στην τρύπα της αδράνειας και ο συμπλέκτης είναι ανοιχτός. Ο κινητήρας επιταχύνεται στην επιθυμητή ταχύτητα και στη συνέχεια κλείνει και ανοίγει ο συμπλέκτης χωρίς να αφήνεται για πολύ ώρα κλειστός για προστασία του κινητήρα.



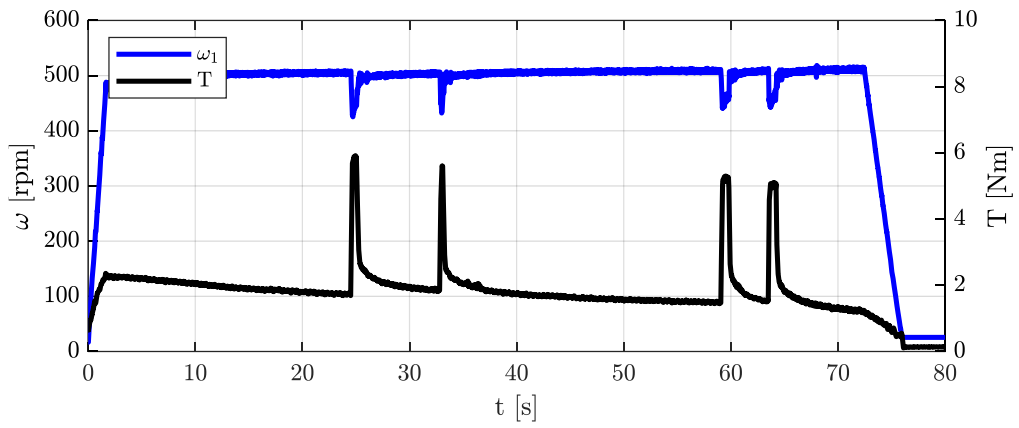


$\gamma: 900 \text{ ml}$

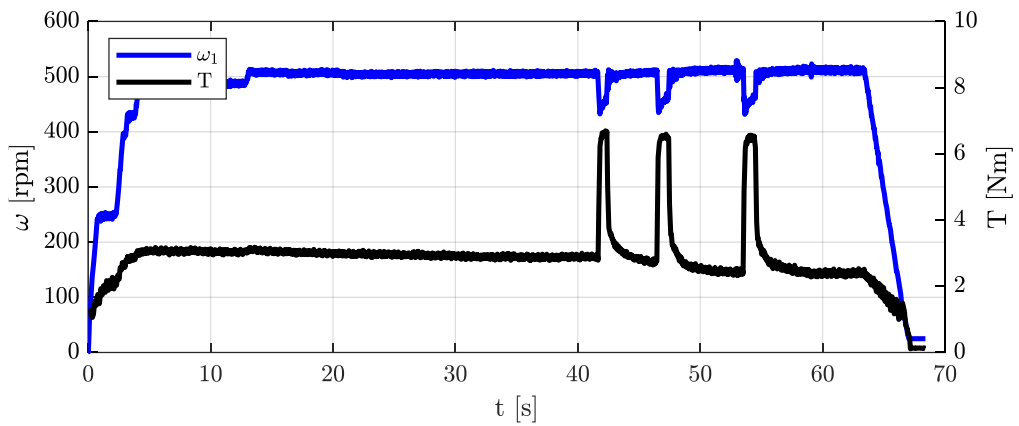
Εικόνα 5.7, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας B και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 250 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0 \text{ ml}$, $\beta: 300 \text{ ml}$, $\gamma: 900 \text{ ml}$.



$\alpha: 0 \text{ ml}$

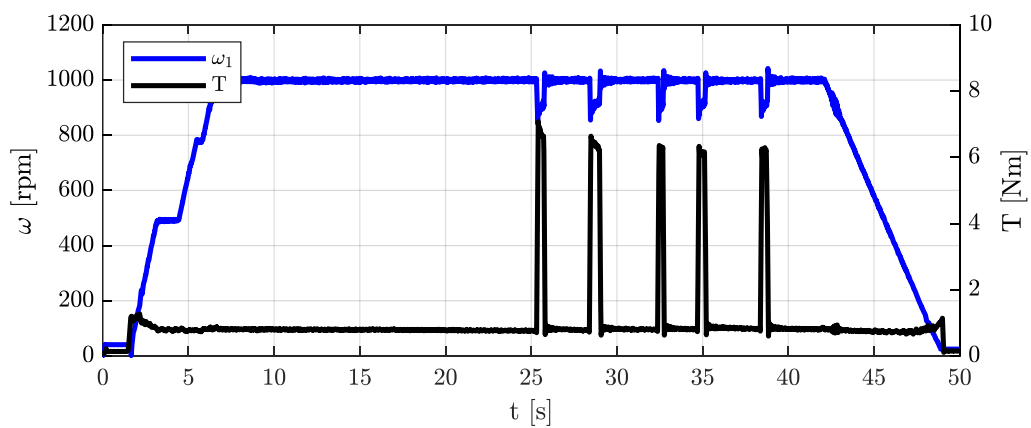


β : 300 ml

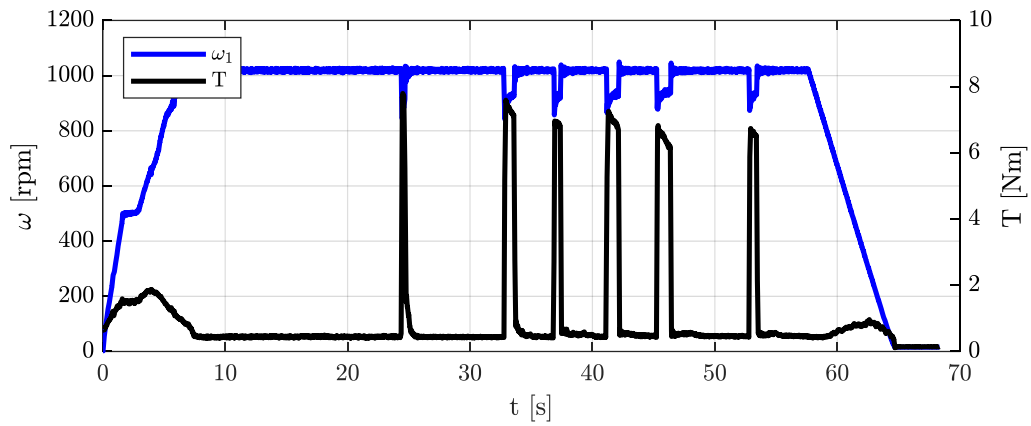


γ : 900 ml

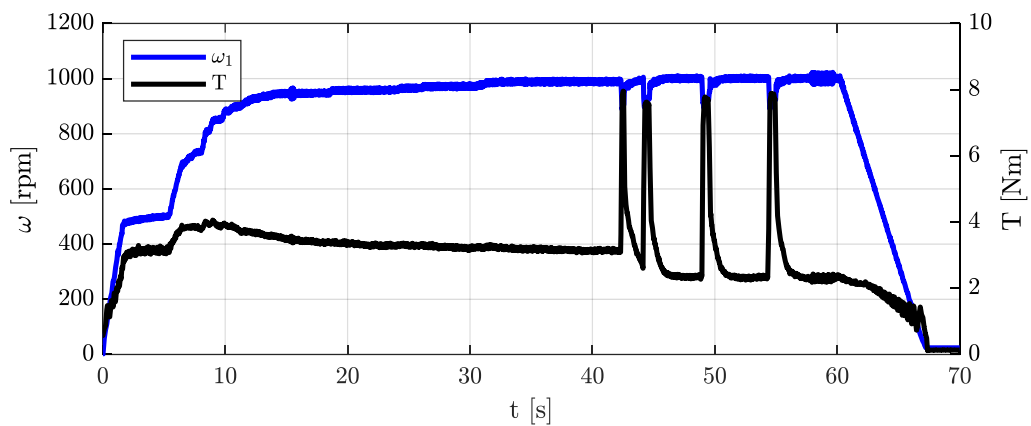
Εικόνα 5.8, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας B και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 500 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α : 0 ml, β : 300ml, γ : 900ml.



α : 0 ml



β: 300 ml



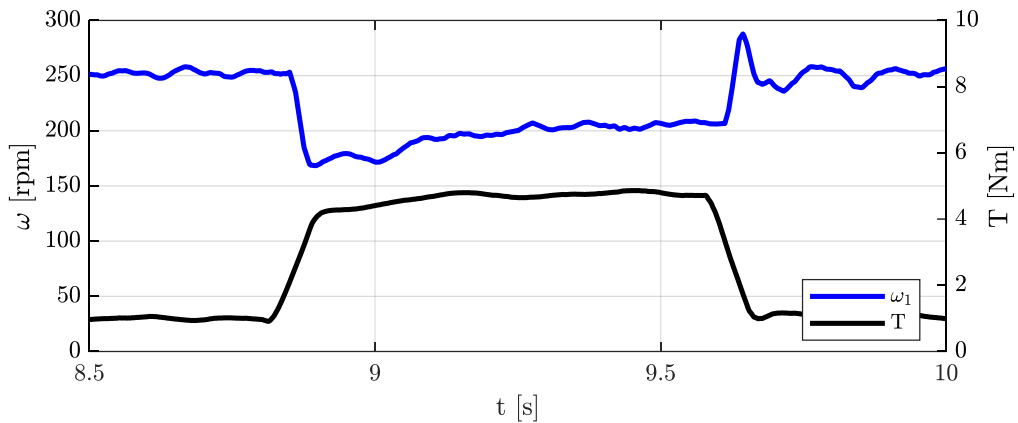
γ: 900 ml

Εικόνα 5.9, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας B και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 1000 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α:0 ml, β: 300ml, γ: 900ml.

5.3.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

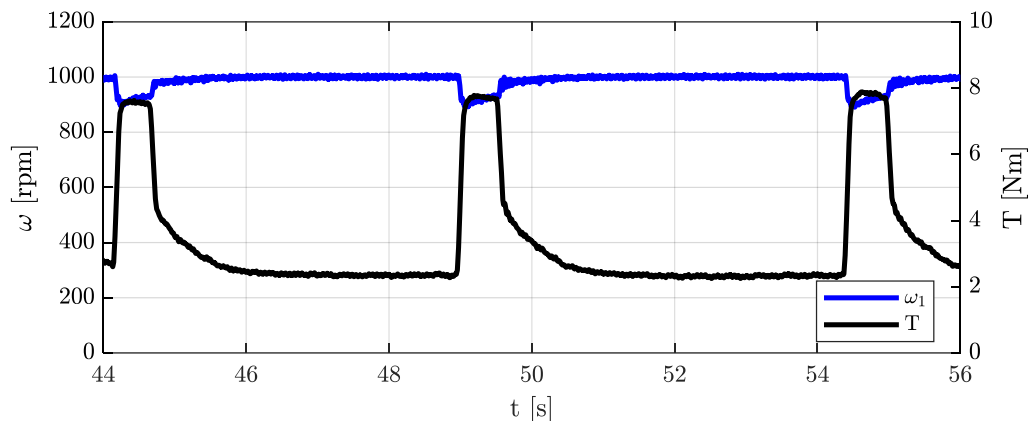
Όπως και πριν έτσι και τώρα παρατηρείται αρχικά μια αύξηση της ροπής μέχρι να αποκολληθούν οι δίσκοι και να αρχίσουν να κινούνται ανεξάρτητα ο ένας με τον άλλον, ενώ μετά από αυτό το στάδιο η ροπή πέφτει σε χαμηλότερο επίπεδο και μένει σταθερή μέχρι να γίνουν τα ανοιγοκλεισίματα του συμπλέκτη. Αύξηση η οποία μεγαλώνει όσο μεγαλώνει και η ποσότητα λαδιού στο κέλυφος.

Επόμενη παρατήρηση είναι η πτώση της ταχύτητας όταν κλείνει ο συμπλέκτης, η οποία είναι πιο έντονη όσο λιγότερο είναι το λάδι. Είναι επίσης αξιοσημείωτο οι ταλαντώσεις που κάνει η ταχύτητα οι οποίες είναι πιο έντονες στις χαμηλότερες ταχύτητες 250 RPM και 500 RPM και χωρίς την παρουσία λαδιού όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα που έχει γίνει εστίαση στο συγκεκριμένο σημείο.



Εικόνα 5.10, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Γ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 250 RPM και 0ml πλήρωση του κελύφους με λάδι. Έχει γίνει εστίαση στο σημείο που η ταχύτητα παρουσιάζεται να εκτελεί ταλάντωση

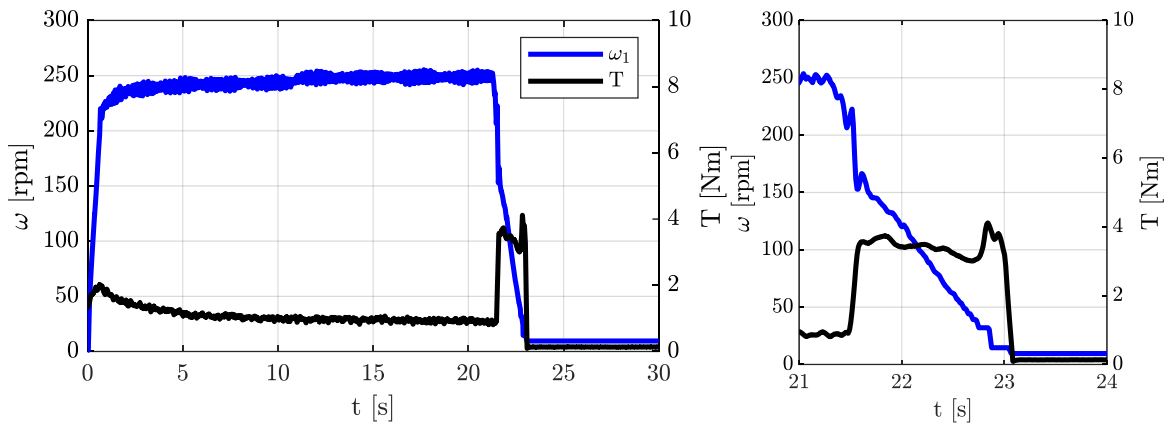
Τέλος, είναι χρήσιμο να αναφερθεί ότι η τιμή της ροπής όταν κλείνει ο συμπλέκτης επανέρχεται πιο ομαλά στα προηγούμενα επίπεδα όσο περισσότερη είναι η ποσότητα του λαδιού. Στα διαγράμματα με 0 ml η πτώση της ροπής είναι σχεδόν ευθεία ενώ με 900 ml εμφανίζεται μια καμπύλη όσο πλησιάζει τη σταθερή τιμή όπως φαίνεται και στο διάγραμμα παρακάτω που έχει γίνει εστίαση στο σημείο αυτό.



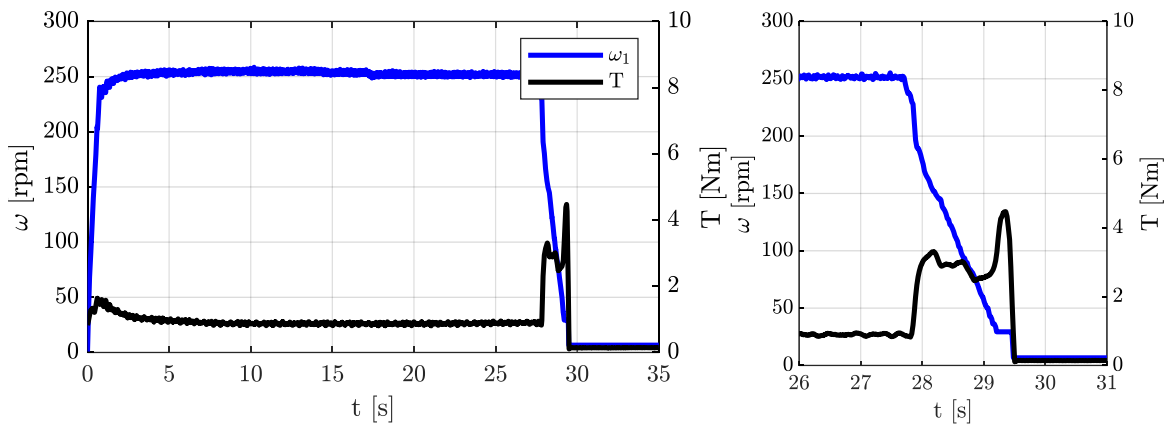
Εικόνα 5.11, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Γ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 100 RPM και 900ml πλήρωση του κελύφους με λάδι. Έχει γίνει εστίαση στο σημείο που η ροπή παρουσιάζεται να μεταβάλλεται ομαλά

5.4 Κατηγορία Δ

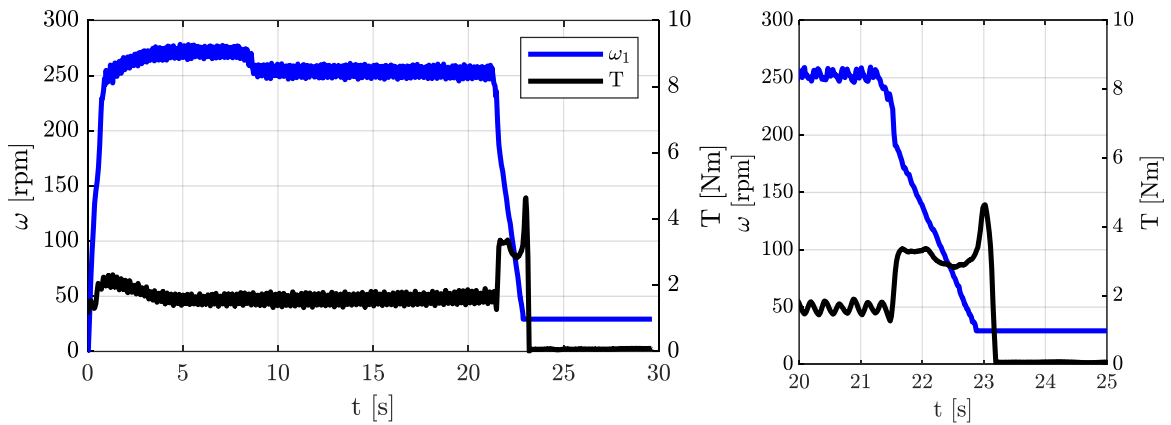
Η φωλιά του συμπλέκτη κρατιέται πακτωμένη με τον εγκάρσιο ασφαλιστικό κοχλία του κελύφους που λειτουργεί ως πάκτωση στην αδράνεια. Όταν ο κινητήρας φτάσει την επιθυμητή ταχύτητα, απενεργοποιείται αφήνοντας να περιστραφεί με την στροφορμή που έχει αποκτήσει ενώ ταυτόχρονα κλείνει ο συμπλέκτης.



α : 0 ml

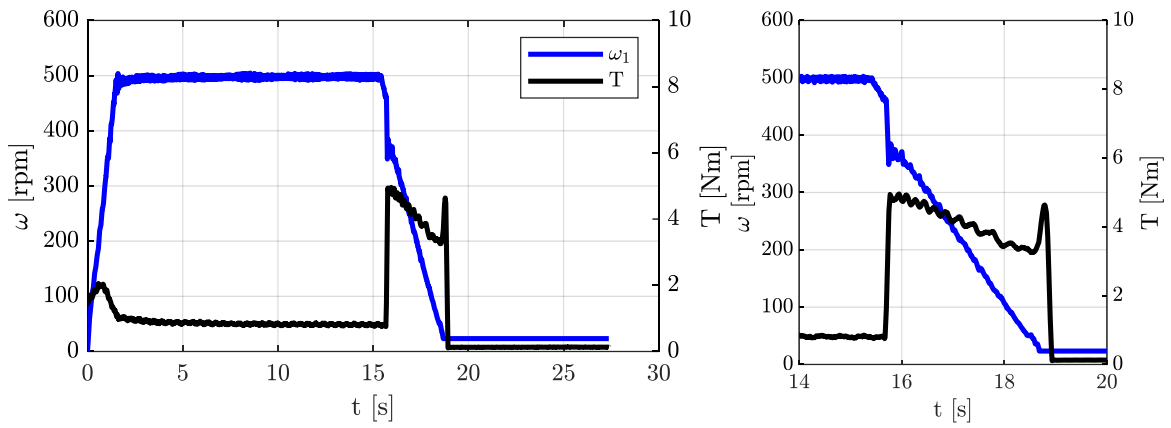


β : 300 ml

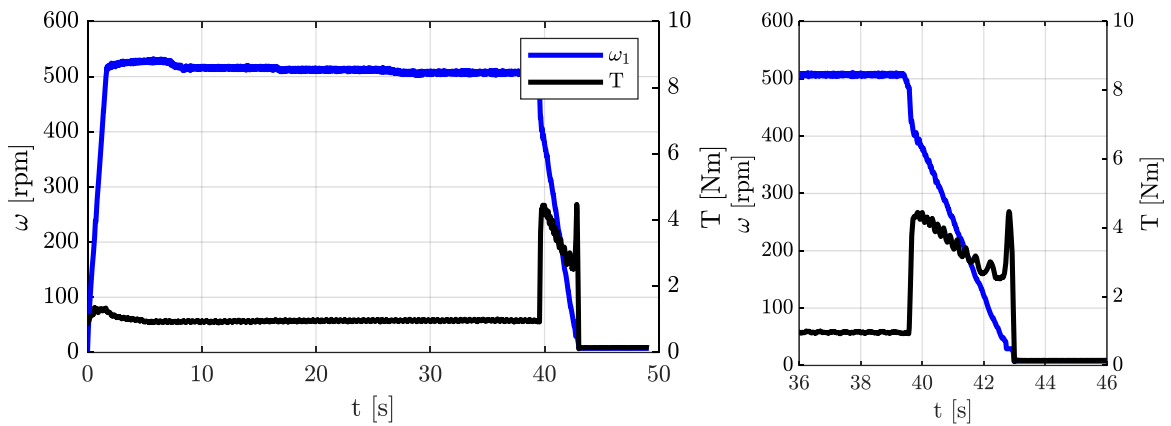


γ : 900 ml

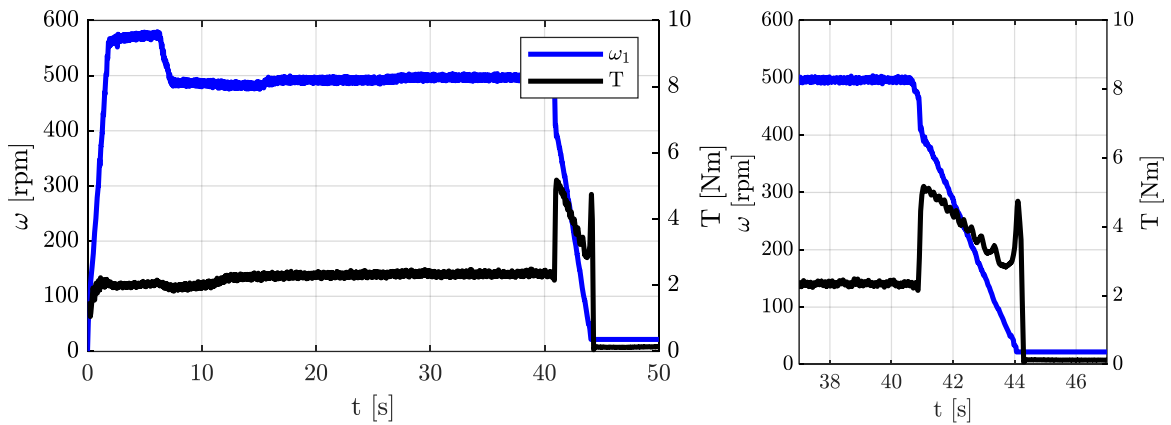
Εικόνα 5.12, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Γ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 250 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α : 0 ml, β : 300ml, γ : 900ml.



$\alpha: 0 \text{ ml}$

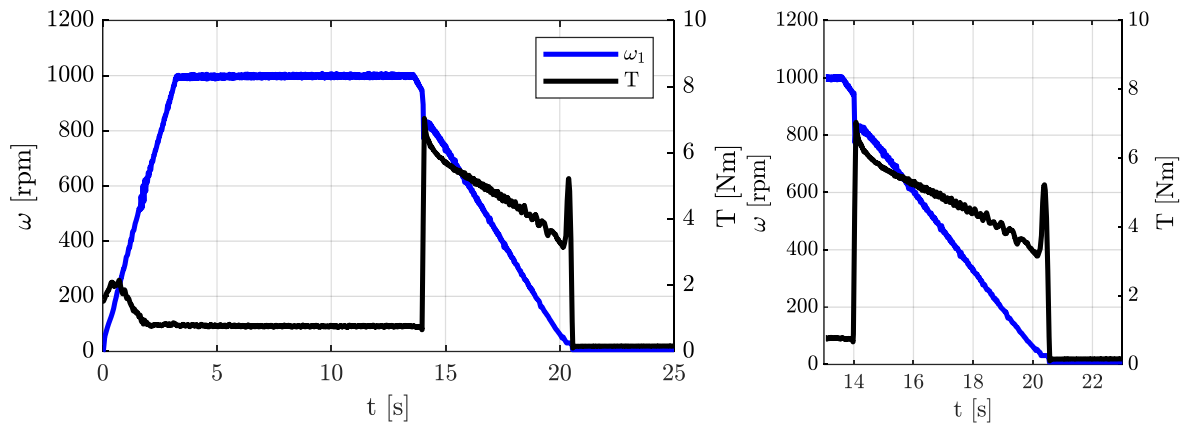


$\beta: 300 \text{ ml}$

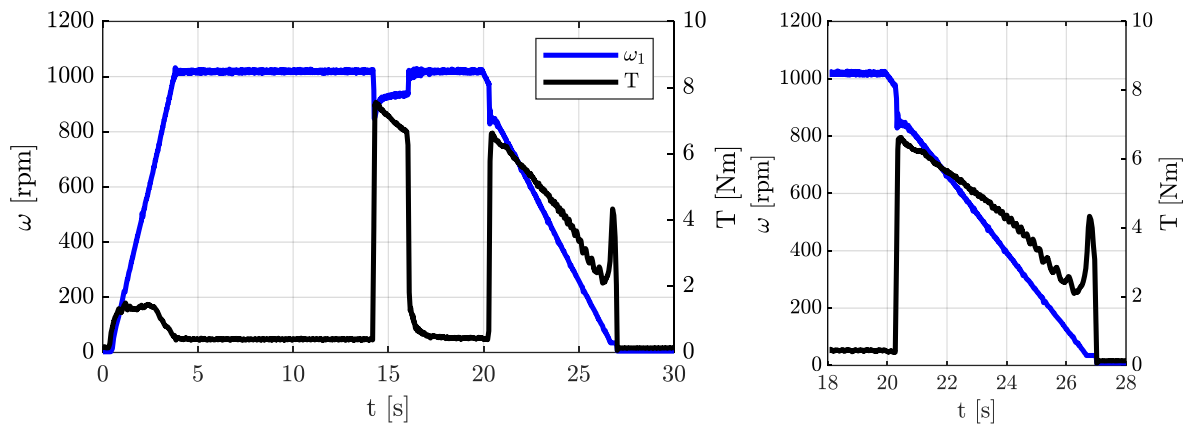


$\gamma: 900 \text{ ml}$

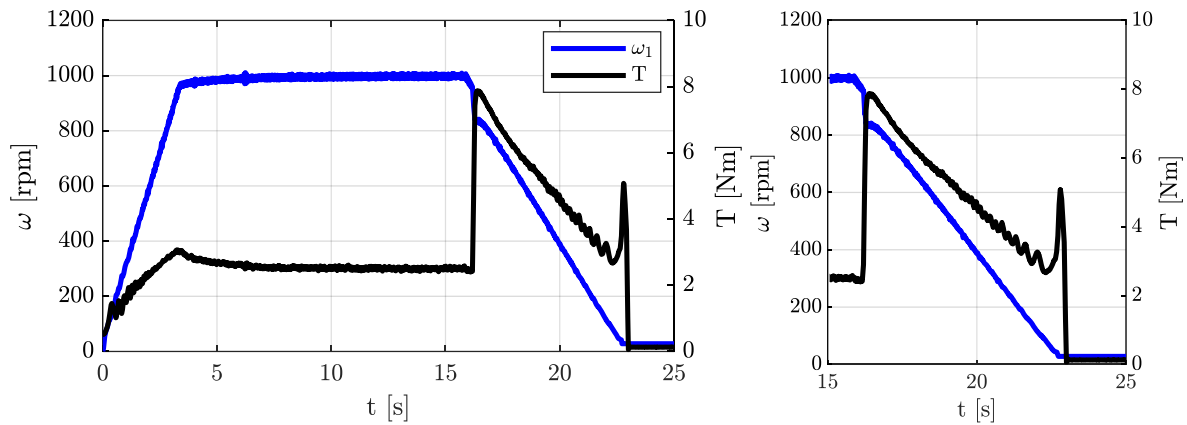
Εικόνα 5.13, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Γ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 500 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0 \text{ ml}$, $\beta: 300 \text{ ml}$, $\gamma: 900 \text{ ml}$.



$\alpha: 0 \text{ ml}$



$\beta: 300 \text{ ml}$



$\gamma: 900 \text{ ml}$

Εικόνα 5.14, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Γ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 1000 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. $\alpha: 0 \text{ ml}$, $\beta: 300 \text{ ml}$, $\gamma: 900 \text{ ml}$.

5.4.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Αρχικά, πρέπει να σημειωθεί ότι το πείραμα αρχίζει από το σημείο που έχει γίνει η εστίαση του, στο δεύτερο διάγραμμα δηλαδή. Όμως προστέθηκε ολόκληρο το διάγραμμα για να παρουσιαστεί η πλήρης λειτουργία του κινητήρα και του συμπλέκτη,

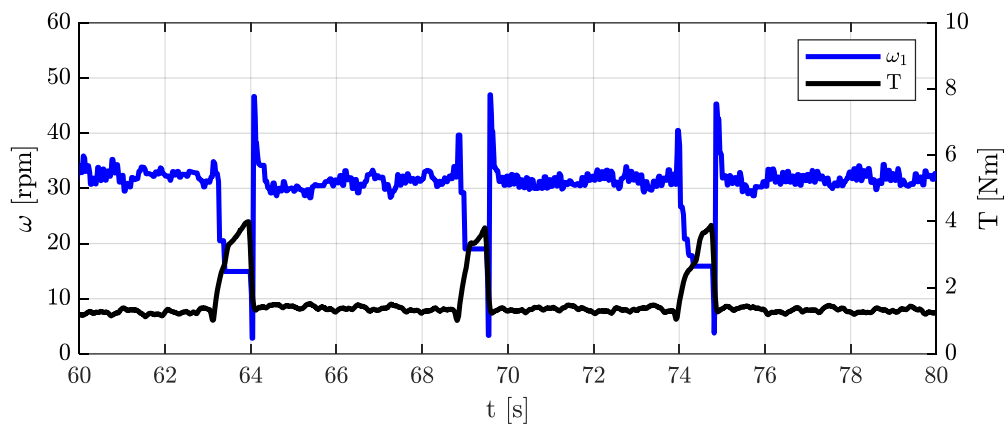
Παρατηρείται και εδώ η αύξηση της ροπής όσο μεγαλώνει η ποσότητα λαδιού του κελύφους και είναι ανοιχτός ο συμπλέκτης και υπάρχει σχετική κίνηση των δίσκων. Αύξηση η οποία είναι πιο έντονη όσο μεγαλώνει και η ταχύτητα του κινητήρα.

Τη στιγμή της σύμπλεξης παρατηρείται απότομη αύξηση της ροπής, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας και της ποσότητας ρευστού, ο οποία στη συνέχεια μειώνεται μέχρις ότου πλησιάσει ο συμπλέκτης στην ακινητοποίησή του, όπου και αυξάνεται στιγμιαία κάνοντας υπερακόντιση. Όπως ήταν αναμενόμενο η υπερακόντιση αυτή αυξάνεται με την ταχύτητα και την ποσότητα λαδιού.

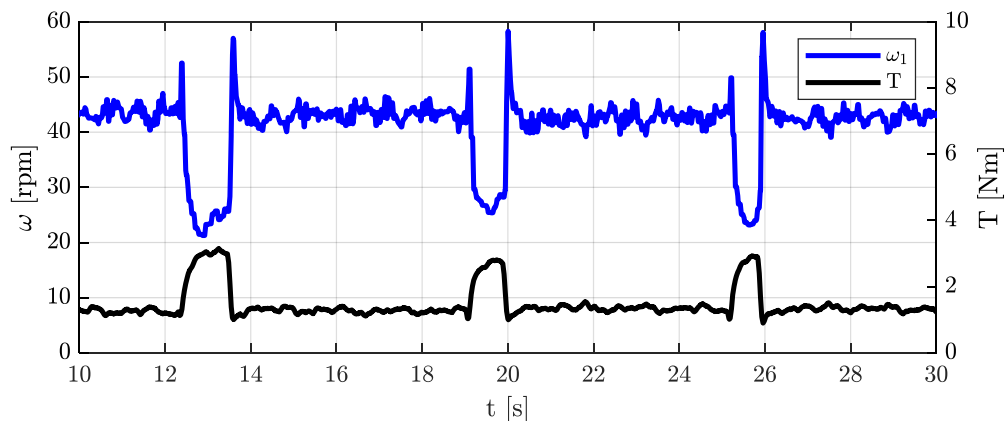
Τέλος, πρέπει να σημειωθεί ότι στην αρχή της σύμπλεξης η ταχύτητα του άξονα πέφτει ακαριαία, ενώ μετά ακολουθεί μια γραμμική πτώση μέχρι τον μηδενισμό της.

5.5 Κατηγορία Ε

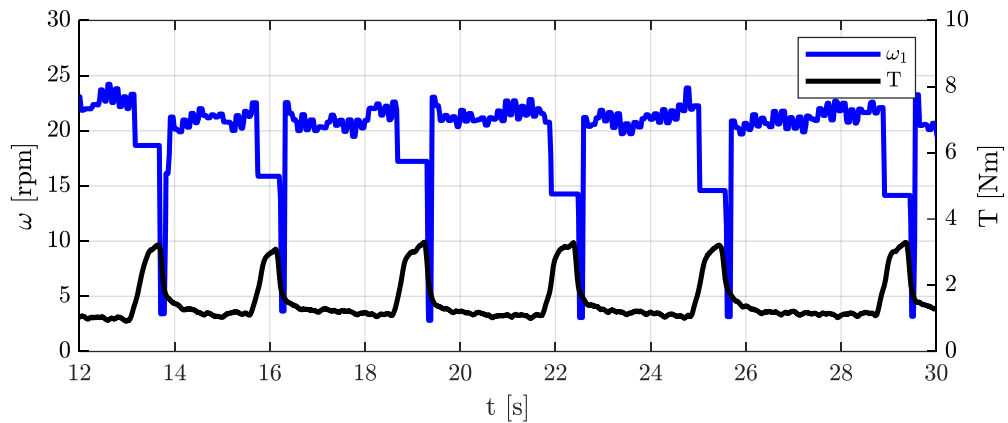
Σε αυτό το πείραμα ο συμπλέκτης ήταν πακτωμένος και ανοιχτός όπως και στο προηγούμενο αλλά η ταχύτητα περιστροφής του άξονα κρατιόνταν σε χαμηλά επίπεδα της τάξεως των 20-40 RPM, με τον σκοπό να ακινητοποιείται εντελώς κάθε φορά που έκλεινε ο συμπλέκτης.



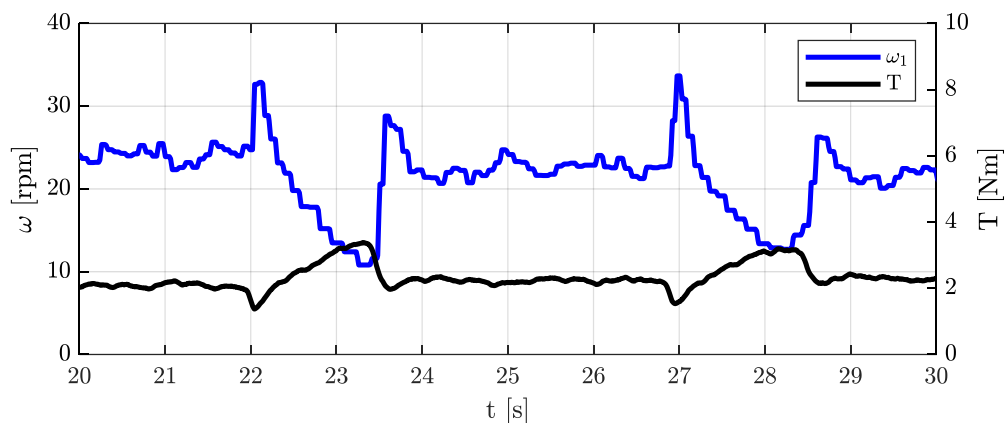
α: 30 RPM - 0 ml



β: 40 RPM - 0 ml



γ: 20 RPM - 300 ml



δ: 20 RPM - 900 ml

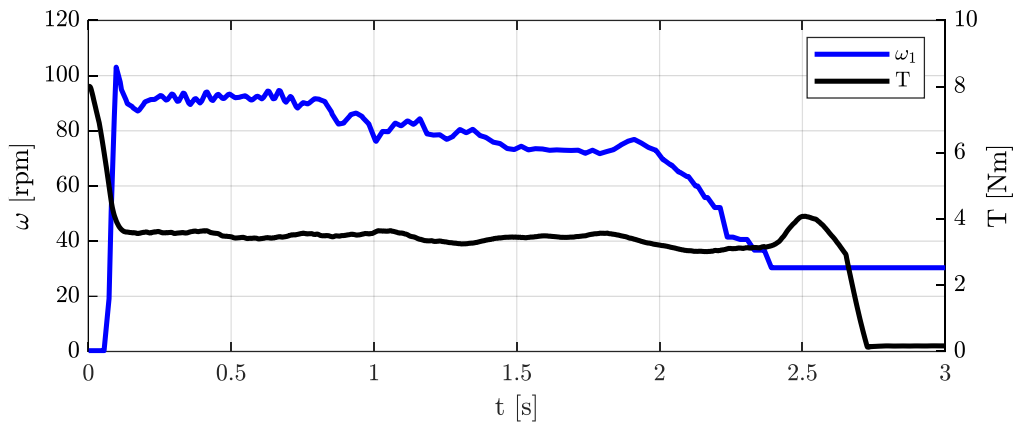
Εικόνα 5.15, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας Δ και γωνιακή ταχύτητα κινητήρα ίση με 20-40 RPM. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α: 0 ml, β: 300ml, γ: 900ml.

5.5.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

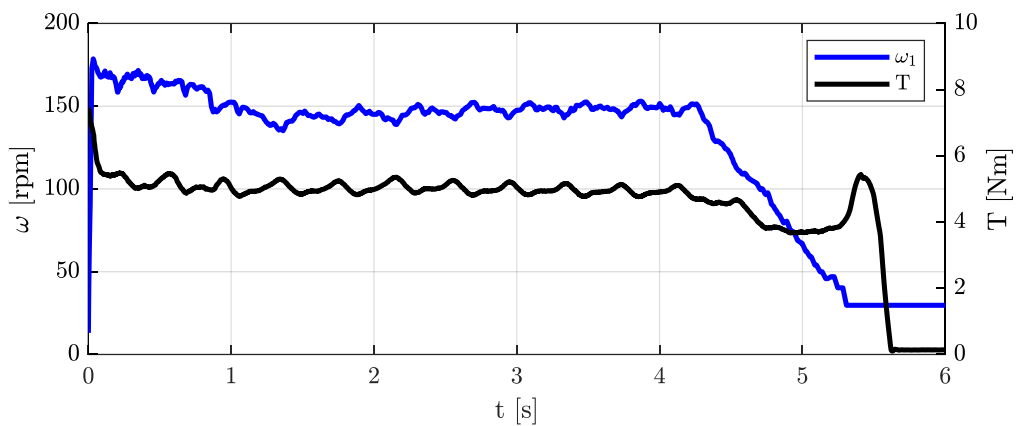
Στο πρώτο διάγραμμα όπου δεν υπάρχει καθόλου λάδι μέσα στο κέλυφος του συμπλέκτη, παρατηρείται ότι οι μεταβολές της ροπής γίνονται απότομα, σχηματίζοντας στο διάγραμμα γωνίες και όχι καμπύλες. Επίσης φαίνεται πως η ροπή αυξάνεται περισσότερο όταν η ταχύτητα πλησιάζει το 0 παρά όταν αυξάνεται η ταχύτητα. Ωστόσο συγκρίνοντας την καμπύλη γ με την καμπύλη α φαίνεται ότι χωρίς την παρουσία λαδιού η ροπή είναι μεγαλύτερη από όταν υπάρχει 300 ml λάδι. Η παρουσία λαδιού φαίνεται ότι καταφέρνει την πιο ομαλή ανάπτυξη της ροπής.

5.6 Κατηγορία ΣΤ

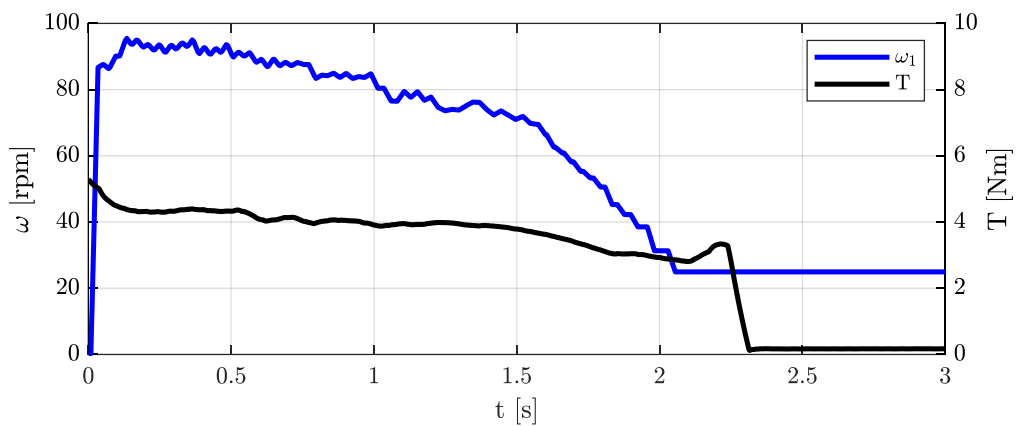
Στην περίπτωση αυτή, ο συμπλέκτης είναι πακτωμένος και κλειστός, όπως επίσης κλειστός είναι και ο κινητήρας. Ανοίγει ο κινητήρας αυξάνοντας την συχνότητά του μέχρις ότου αποκολληθούν οι δίσκοι και αρχίσει να περιστρέφεται ο άξονας του συμπλέκτη.



α : 0 ml



β : 300 ml



γ : 900 ml

Εικόνα 5.16, Δυναμική απόκριση ροπής και γωνιακής ταχύτητας συστήματος για τις συνθήκες της Κατηγορίας E. Διακρίνονται οι διαφορετικές περιπτώσεις γεμίσματος του κελύφους του συμπλέκτη με λάδι. α : 0 ml, β : 300ml, γ : 900ml.

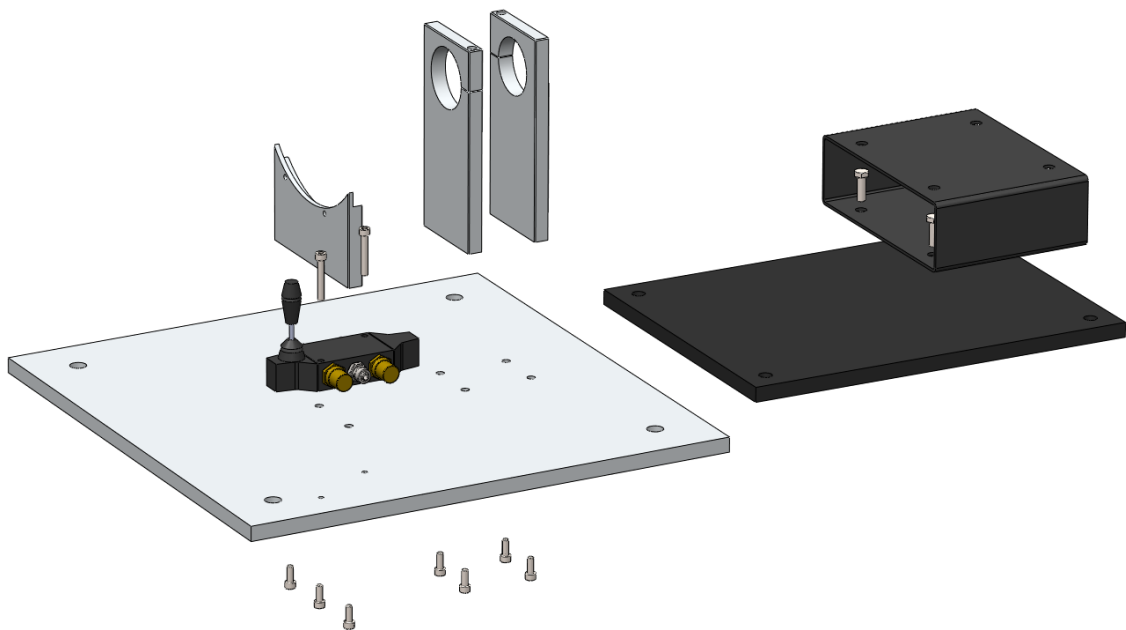
5.6.1 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Το παρόν πείραμα αποσκοπεί στη μελέτη της οριακής τιμής της στατικής τριβής των δίσκων και τη μέτρηση της τριβής ολίσθησης. Ο κινητήρας λειτουργεί υπό μεγάλο φορτίο και για το λόγο αυτό πρέπει

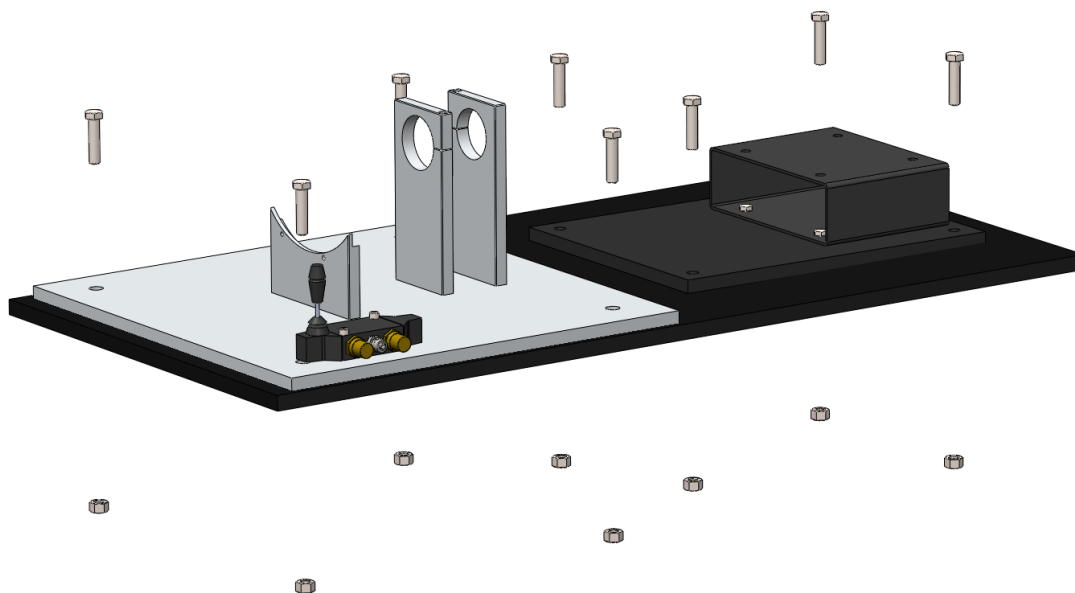
να είναι σύντομο, να μην επαναλαμβάνεται και να αφήνεται ο κινητήρας να κρυώσει επαρκώς πριν την εκτέλεση του επόμενου πειράματος.

Από τα διαγράμματα βγαίνει το συμπέρασμα, πώς όσο αυξάνεται η ποσότητα λαδιού τόσο μειώνεται και η ροπή που χρειάζεται ο κλειστός συμπλέκτης ώστε να αποκολληθούν οι δίσκοι και να αρχίσουν να περιστρέφονται ενώ γλιστράνε μεταξύ τους. Υπενθυμίζεται ότι η δύναμη που ασκείται μεταξύ των δίσκων είναι 320 N.

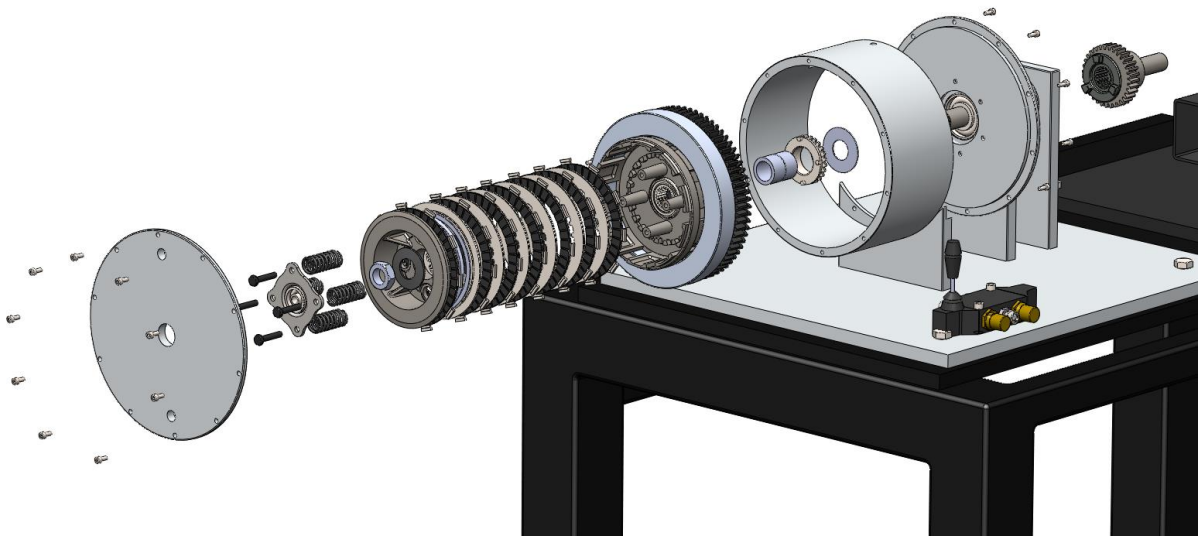
6. Οδηγίες συναρμολόγησης



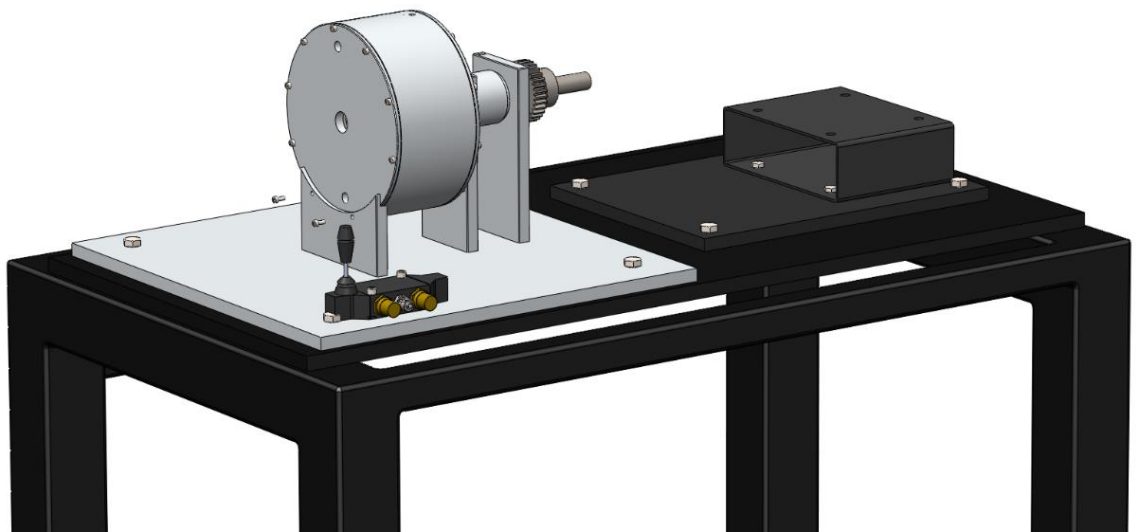
1. Τοποθέτηση και σφίξιμο κοχλιών βάσης κινητήρα στην πλάκα κινητήρα, βάσης κουζινέτου άξονα συμπλέκτη, στήριξης κελύφους και πνευματικής βαλβίδας ελέγχου εμβόλου στην πλάκα του συμπλέκτη.



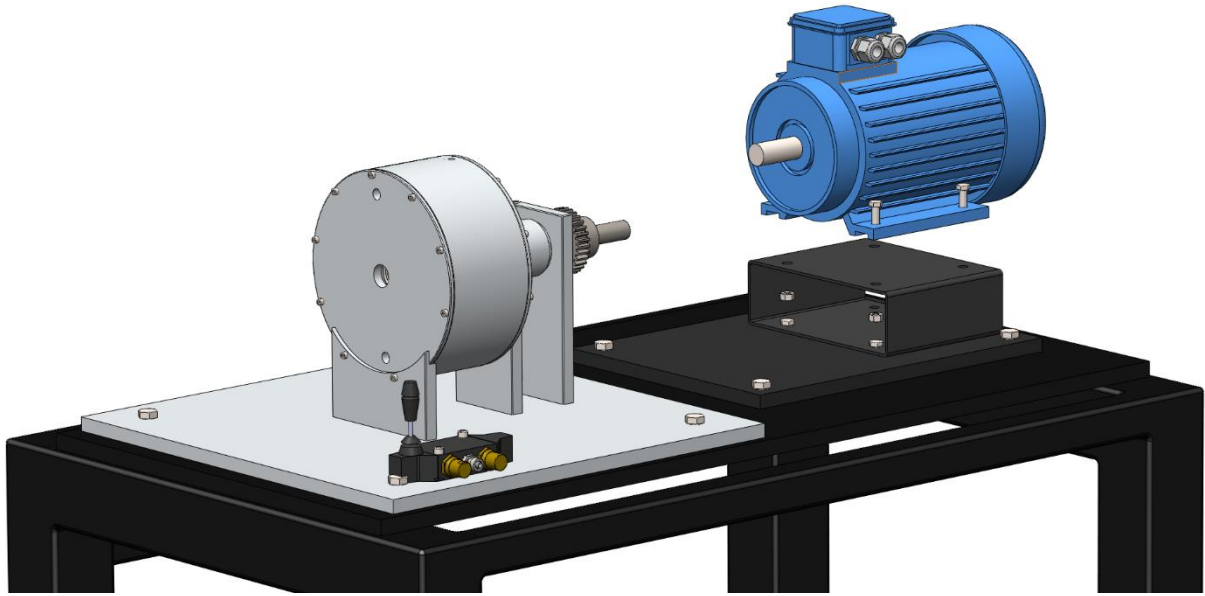
2. Τοποθέτηση και σφίξιμο κοχλιών των επιμέρους πλακών στη κύρια πλάκα.



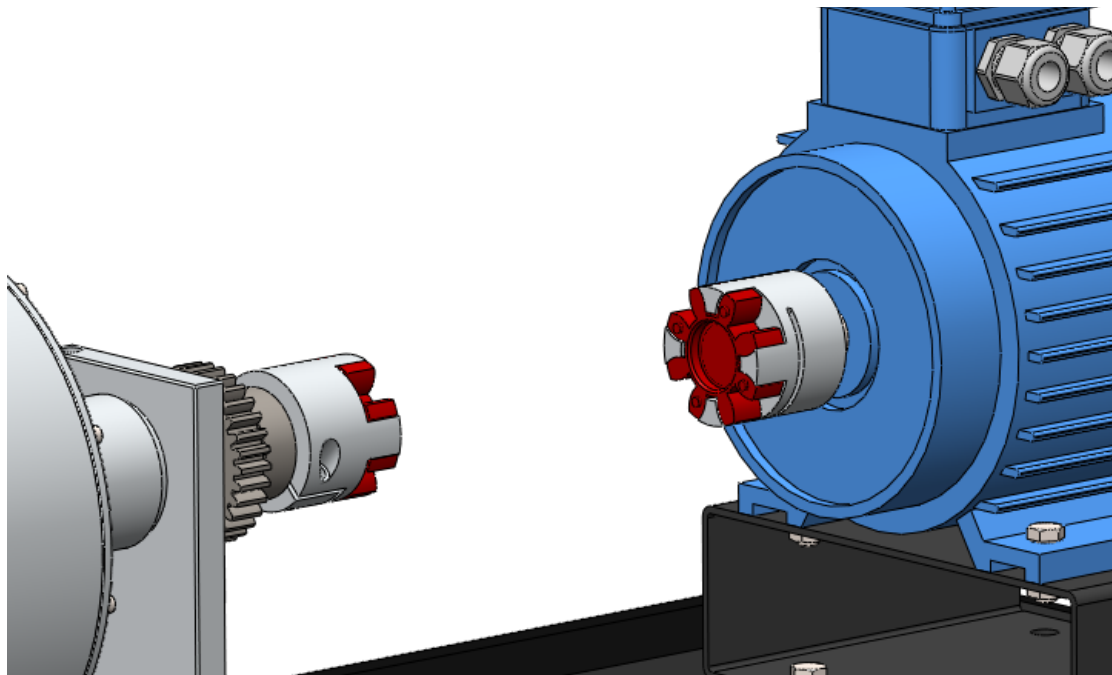
3. Τοποθέτηση κουζινέτου άξονα στην μπροστινή θέση με το κόπλερ του και το πίσω καπάκι. Στη συνέχεια βιδώνεται το κυλινδρικό κέλυφος στο πίσω καπάκι και μετά συναρμολογείται ο συμπλέκτης, με προσοχή πριν μπει το γρανάτζι με την αδράνεια να έχει προηγηθεί η ροδέλα, το μικρό γρανάτζι και ο αποστάτης άξονα όπως φαίνεται στην εικόνα. Στο τέλος μένουν οι 2 κάτω



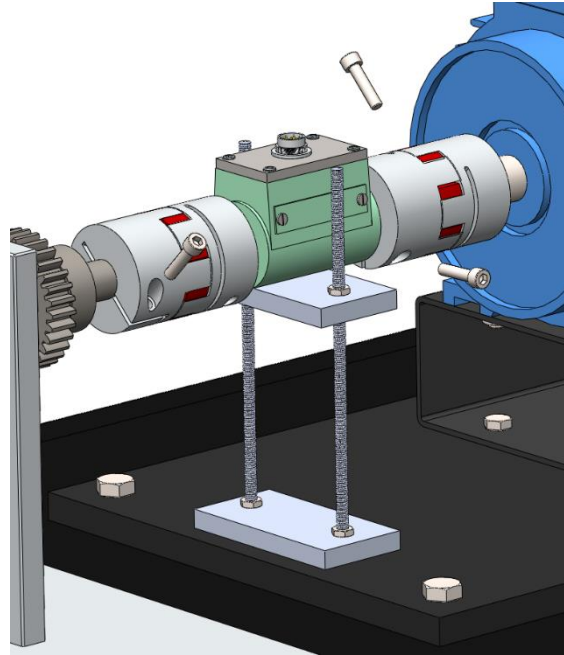
- βίδες του μπροστινού καπακιού αβίδωτες.
4. Τοποθέτηση του συναρμολογημένου κελύφους στην πίσω θέση και κλείσιμο του κελύφους με τις 2 τελευταίες βίδες.



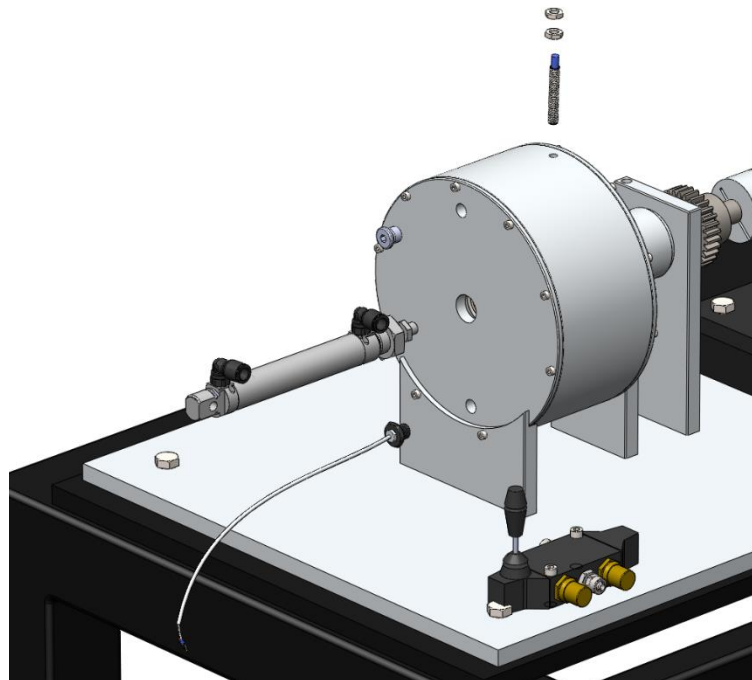
5. Τοποθέτηση κινητήρα στη βάση του χωρίς σφίξιμο κοχλιών.



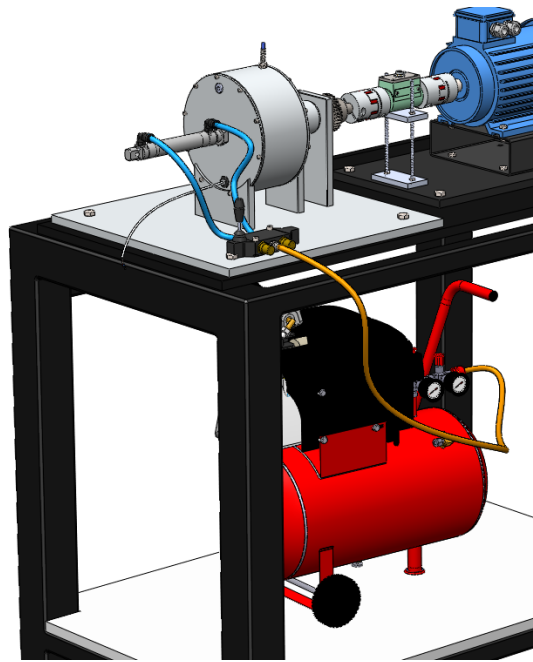
6. Τοποθέτηση κόπλερ στον άξονα του κινητήρα και του συμπλέκτη και μέγιστη απομάκρυνσή τους.



7. Τοποθέτηση ροτόμετρου μαζί με την βάση του και σύμπλεξη των κόπλερ που είχαμε πριν απομακρύνει. Σφίξιμο των περικοχλίων της βάσης του κόπλερ στο επιθυμητό ύψος, σφίξιμο των κόπλερ και μέτρηση ευθυγράμμισης με το ρολόι γράφτη. Μετά την ευθυγράμμιση, σφίξιμο των κοχλιών της βάσης του κινητήρα.



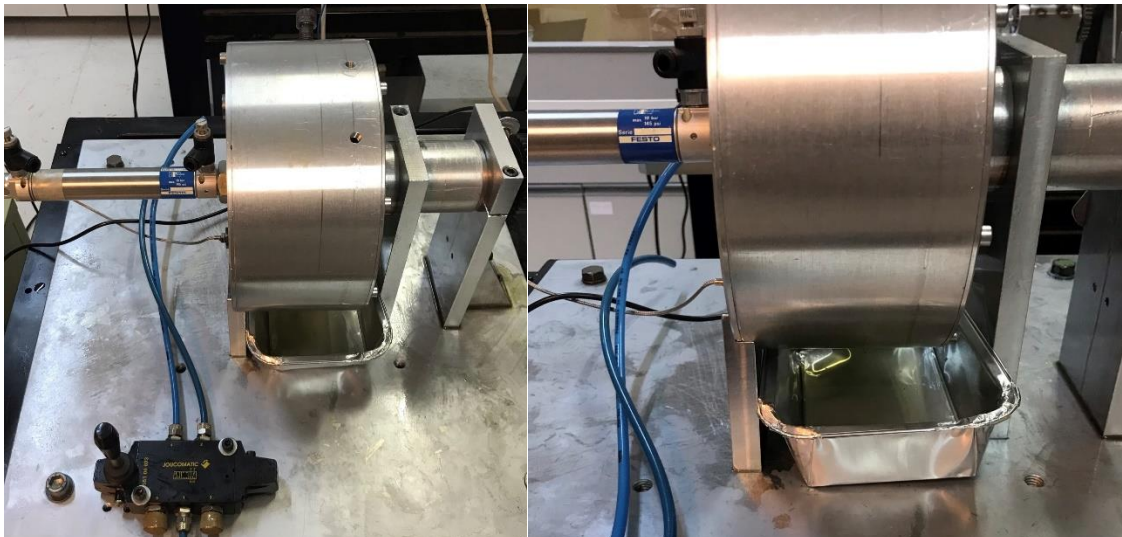
8. Τοποθέτηση τάπας πλήρωσης λαδιού, αντάπτορα θερμοζεύγους, επαγωγικού αισθητήρα σε απόσταση 1-2mm από το γρανάζι του συμπλέκτη και πνευματικού εμβόλου.



9. Τοποθέτηση κομπρεσέρ αέρα και σύνδεση του με την πνευματική βαλβίδα ελέγχου. Στη συνέχεια ένωση της βαλβίδας με το έμβολο.

6.1 Οδηγίες αφαίρεσης λαδιού από το κέλυφος του συμπλέκτη

Όταν η διάταξη δεν χρησιμοποιείται για τη διεξαγωγή πειραμάτων, είναι απαραίτητο να αδειάσει το κέλυφος από λάδι, καθώς αν αφηθεί για πολύ χρονικό διάστημα γεμάτο, θα υπάρξουν διαρροές. Για τον λόγο αυτό πρέπει να γίνει το άδειασμα του κελύφους όπως περιγράφεται και στις παρακάτω εικόνες.



1. Αφαίρεση του επαγωγικού αισθητήρα μέτρησης της ταχύτητας που βρίσκεται πάνω στο κέλυφος.
2. Αφαίρεση των δύο βιδών που συγκρατούν τον κέλυφος με την βάση και το καπάκι.
3. Αφαίρεση των υπόλοιπων τεσσάρων βιδών κατά την ανθρωρολογιακή φορά μετά τη βάση του κελύφους.

4. Χαλάρωση των βιδών σύσφιξης του κουζινέτου του άξονα στις δύο βάσεις του.
5. Τοποθέτηση του δοχείου λαδιού κάτω από το κέλυφος.
6. Περιστροφή του κελύφους κρατώντας το από τη βίδα πάκτωσης κατά την ωρολογιακή φορά μέχρι η τρύπα του επαγωγικού αισθητήρα βρεθεί στην αντιδιαμετρική της θέση.
7. Εποπτεία του δοχείου μέχρι να γεμίσει και απομάκρυνση του χρησιμοποιημένου λαδιού.

ΠΡΟΣΟΧΗ! Πάντα να επιλέγεται εξουσιοδοτημένο σημείο απόρριψης και ανακύκλωσης λαδιού και ποτέ μην απορρίπτεται χρησιμοποιημένο λάδι στο περιβάλλον.

7. Κανονισμοί ασφαλείας

Πριν την έναρξη

- Ρύθμιση του κομπρεσέρ αέρα ώστε η μέγιστη πίεση να μην υπερβαίνει ποτέ τα 10 bar.
- Τοποθέτηση διακόπτη του κομπρεσέρ στο off και σύνδεσή του στην πρίζα.
- Τοποθέτηση του μοχλού της πνευματικής βαλβίδας στη μέση και θέση κομπρεσέρ σε λειτουργία.
- Όταν φτάσει την επιθυμητή τιμή η πίεση, κλείσιμο του διακόπτη (off) και αφαίρεση του κομπρεσέρ από την πρίζα.

Κατά τη λειτουργία

- Έλεγχος ότι τα καλώδια και τα διάφορα μέρη που κρέμονται βρίσκονται σε ασφαλές σημείο και μακριά από περιστρεφόμενα μέρη.
- Πρέπει πριν μπει σε λειτουργία ο κινητήρας η συχνότητα του inverter να είναι 0 Hz και μετά μπορεί να πατηθεί το πράσινο κουμπί για την ενεργοποίησή του.
- Αύξηση της συχνότητας του κινητήρα πάντα με αργό ρυθμό αποφεύγοντας απότομες κινήσεις.
- Απαγορεύεται η αποσυναρμολόγηση μερών της διάταξης ενώ αυτή βρίσκεται σε λειτουργία.
- Όταν διεξάγεται πείραμα που ασκεί μεγάλη πίεση στον κινητήρα, όπως η λειτουργία του σε υψηλή ροπή, επιβάλλεται ο έλεγχος της θερμοκρασίας του και πρέπει να μένει να κρυώσει μετά την εκτέλεση του πειράματος και πριν την έναρξη του επόμενου.
- Σε περίπτωση που εμφανίζονται έντονοι θόρυβοι ή έντονες δονήσεις, πρέπει να σταματάει το πείραμα αμέσως.

Μετά τη λήξη

- Τοποθέτηση του μοχλού της πνευματικής βαλβίδας στη δεξιά θέση όπου το έμβολο έχει μαζέψει και ο συμπλέκτης είναι ανοιχτός.
- Αν υπάρχει αντίσταση κατά το ξεβίδωμα του εμβόλου σημαίνει ότι υπάρχει πίεση στο σύστημα και το έμβολο δεν έχει τραβηχτεί.
- Επαναφορά του ποτενσιόμετρου του inverter μέχρι να δείξει η οθόνη 0.
- Για την αποσυναρμολόγηση του εμβόλου είναι απαραίτητη η επιστροφή του μοχλό της βαλβίδας από τη δεξιά θέση στη μεσαία και αφαίρεση των σωλήνων αέρα.
- Αν τα πειράματα τελείωσαν και δεν θα γίνουν άλλα, πρέπει να γίνει εκτόνωση της πίεσης του κομπρεσέρ, κρατώντας και τα δύο σωληνάκια του εμβόλου με το χέρι στραμμένα προς τα πάνω ενώ έχουν αφαιρεθεί από το έμβολο και τοποθετώντας τον μοχλό στη δεξιά ή αριστερή θέση.

8. Συμπεράσματα – προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

8.1 Συμπεράσματα

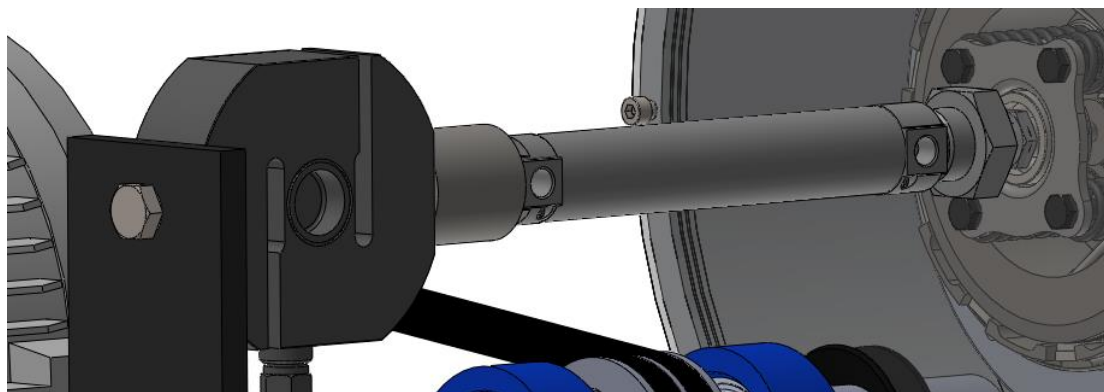
Στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη για πειράματα που αφορούν συμπλέκτες υγρής τριβής, ακολουθώντας τα πρότυπα της διάταξης SAE No2. Δόθηκε ιδιαίτερη σημασία να είναι η διάταξη μετακινήσιμη και χαμηλού κόστους, ενώ παράλληλα να έχει καθαρές και αξιόπιστες μετρήσεις όπως και φάνηκε σε παραπάνω κεφάλαιο.

Η διάταξη που κατασκευάστηκε ενδείκνυται για εκπαιδευτικούς σκοπούς, ώστε ο νέος φοιτητής/τρια να καταλάβει τη φιλοσοφία λειτουργίας ενός συμπλέκτη και τον τρόπο λειτουργίας και μεταφοράς κίνησης μιας μοτοσυκλέτας. Σχεδιάστηκε ώστε να είναι μεταφέρσιμη με τη σκέψη να έχει τη δυνατότητα να μεταφερθεί σε κάποιο αμφιθέατρο ή σε κάποιο άλλο εργαστήριο για επιδείξεις.

Σε επόμενο επίπεδο, η πειραματική διάταξη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ερευνητικούς σκοπούς, για περαιτέρω εξέλιξη των συμπλεκτών τριβής. Εάν κατασκευαστούν νέοι δίσκοι τριβής, θα είναι δυνατόν να τοποθετηθούν πάνω τους διαφορετικά υλικά τριβής που δεν κυκλοφορούν στην αγορά και να γίνουν πειράματα, ώστε να αποδειχθεί η αξιοπιστία και η καλή τους λειτουργία.

8.2 Προτάσεις βελτίωσης

Η διάταξη αν και πληροί όλες τις βασικές προϋποθέσεις, έχει χώρο για μερικές βελτιώσεις. Αρχικά θα μπορούσε το πίσω καπάκι να είναι κατασκευασμένο από χοντρό πλέξι γκλας, ώστε να μπορεί κανείς να δει τον συμπλέκτη να λειτουργεί. Επίσης θα ήταν καλύτερο να μην φέρει σπείρωμα για την προσαρμογή του εμβόλου αλλά μια μικρή τρύπα στη διάμετρο του εμβόλου ώστε να εισέρχεται μόνο αυτό στο κέλυφος ενώ από την άλλη μεριά θα είναι πακτωμένο με ένα load cell για τον ακριβή υπολογισμό της ασκούμενης δύναμης.



Εικόνα 5, Προτεινόμενη βελτιωμένη σχεδίαση

Κατά αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και κάποιο πιο δυνατό έμβολο, ώστε να μπορέσει να λειτουργήσει ο συμπλέκτης με τα κανονικά του ελατήρια. Επιπρόσθετα, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κάποιος μεγαλύτερος κινητήρας, ώστε να πλησιάσει περισσότερο η κλίμακα της διάταξης την κλίμακα ενός κινητήρα ΜΕΚ.

Μια ακόμη ιδέα, είναι να κατασκευαστεί εξ ολοκλήρου από την αρχή ειδικός συμπλέκτης, όπου θα έχει τη δυνατότητα να δέχεται διαφορετικών διαστάσεων δίσκους τριβής και μεταλλικούς δίσκους, καθώς τώρα υπάρχει περιορισμός στα εξαρτήματα της Honda cb400rr.

Όπως είχε σχεδιαστεί στην αρχική ιδέα που παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, θα ήταν πολύ χρήσιμο να μπορούσαμε εκτός από την είσοδο από τον κινητήρα, να ελέγχαμε και την έξοδο και τον βαθμό αντίστασης που θα έχει ο συμπλέκτης ως έξοδο. Μια λύση θα ήταν μια διάταξη που θα έμοιαζε την αρχική με δύο κινητήρες όπου ο ένας θα παίζει το ρόλο του ελεγχόμενου φρένου. Αυτό θέλει ιδιαίτερη προσοχή βέβαια, για την αποφυγή υπερφόρτωσης του κινητήρα και επικίνδυνη αύξηση της θερμοκρασίας του.

Τέλος σαν επιπλέον προσθήκη στη διάταξη αυτή, θα μπορούσε να μπει κάποιο φίλτρο μικροσωματιδίων, έτσι ώστε μετά από κάθε κύκλο τεστ να μετριέται η πυκνότητα σωματιδίων που έχει αποκολληθεί από τους δίσκους τριβής, και κατά τον τρόπο αυτόν να βγαίνουν συμπεράσματα για τον βαθμό φθοράς του συμπλέκτη αναλόγως την ταχύτητα περιστροφής και την ασκούμενη πίεση από το έμβολο.

9. Βιβλιογραφία

- [1] B. Mazur, "The importance of test rigs in research and development," [Online]. Available: <https://www.ignitec.com/insights/the-importance-of-test-rigs-in-research-and-development/>
- [2] *SAE Transactions* Vol. 100, Section 6: JOURNAL OF PASSENGER CARS (1991), pp. 1041-1054 (14 pages) Published by: [SAE International](#) Robert L. Fish
- [3] J.Linden, J.Doï, M. Furumoto, N.Hoshikawa et al., "A Comparison of Methods for Evaluating Automatic Transmission Fluid Effects on Friction Torque Capacity - A Study by the International Lubricant Standardization and Approval Committee (ILSAC) ATF Subcommittee," SAE Technical Paper 982672, 1998, <https://doi.org/10.4271/982672>.
- [4] "TE 92M AUTOMATED CLUTCH FRICTION TEST MACHINE," <http://www.phoenix-tribology.com/at2/leaflet/te92m>
- [5] R. Mäki, "Apparatus for measurement of friction surface temperature in a wet clutch," in *Tribology 2001 : scientific achievements, industrial applications, future challenges : plenary and session key papers from the 2nd World Tribology Congress, Vienna, Austria, 3 - 7 September, 2001*.
- [6] Charalampos Lazaridis, "Design and FEA Study of a Novel Modular Multi-functional Tribological Laboratory Test Rig," Diploma Thesis, School of Mechanical Engineering, NTUA, Athens, March 2021
- [7] Simon Foslund, "Design of Test Rig," Master Thesis, School of Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, 2007
- [8] "Mounting Instructions Torque Transduce T5," HBM Company, [Online]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/1849747/Hbm-T5.html>
- [9] W. Scott and P. Sunti wattana, "A simplified wet friction clutch test apparatus," *Tribotest*, vol. 1, no. 3, pp. 231–246, Mar. 1995, doi: 10.1002/tt.3020010304.
- [10] *Honda CBR400RR*, Haynes Service & Repair Manual, Sparkford, England 1999
- [11] "Spring Constant Calculator," <https://www.acessspring.com/espanol/spring-constant-calculator.html> (accessed Nov. 7 2022)
- [12] Γ. Μ. Εμίν, "Σχεδιασμός και προσομοίωση της δυναμικής συμπεριφοράς κιβωτίου ταχυτήτων διπλού συμπλέκτη DCT επιβατηγού οχήματος," *Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Ε.Μ.Π.*, Αθήνα, 2018
- [13] M.P. Ingram, "The mechanisms of wet clutch friction behavior," Ph.D. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Imperial College London, London, 2010