



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΤΙΤΛΟ :

**Βελτιστοποίηση συνθηκών λειτουργίας
πετρελαιοκίνητων μηχανών εσωτερικής καύσης μέσω
βαθμονόμησης αυτόματου ρυθμιστή στροφών**

ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ :

ΣΑΡΜΠΑΝΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

A.M. 46144176

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : ΔΡ. ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ

ΒΑΝΔΡΕΑΣ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

BACHELOR'S THESIS :

**Optimization of the operation of diesel internal
combustion engines, through the calibration of the
governor**

RESPONSIBLE STUDENT :

SARMPANIS NIKOLAOS

R.N. : 46144176

**SUPERVISING PROFESSOR : DR. THEODORAKAKOS
ANDREAS**



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή

Η διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

A/α	ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ	ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ	ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ
1	Κ. Σ. ΝΙΚΑΣ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
2	Π. ΨΥΛΛΑΚΗ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	
3	Α. ΘΕΟΔΩΡΑΚΑΚΟΣ	ΑΝΑΠΛ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ	

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ/ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο/η κάτωθι υπογεγραμμένος Σαρμπάνης Νικόλαος Του Σταύρου, με αριθμό μητρώου 46144176 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής Μηχανικών του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών, δηλώνω υπεύθυνα ότι: «Είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής/διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

**Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτηση μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντα καθηγητή*

Ο/Η Δηλών/ούς
Σαρμπάνης Νικόλαος

*** Ονοματεπώνυμο /Ιδιότητα**
(Υπογραφή)

Ψηφιακή Υπογραφή Επιβλέποντα



*** Σε εξαιρετικές περιπτώσεις και μετά από αιτιολόγηση και έγκριση του επιβλέποντα, προβλέπεται χρονικός περιορισμός πρόσβασης (embargo) 6-12 μήνες. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπογράψει ψηφιακά ο/η επιβλέπων/ουσα καθηγητής/τρια, για να γνωστοποιεί ότι είναι ενημερωμένος/η και συναινεί. Οι λόγοι χρονικού αποκλεισμού πρόσβασης περιγράφονται αναλυτικά στις πολιτικές του Ι.Α. (σελ. 6):**

[https://www.uniwa.gr/wp-](https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf)

[content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf](https://www.uniwa.gr/wp-content/uploads/2021/01/%CE%A0%CE%BF%CE%BB%CE%B9%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%B5%CC%81%CF%82_%CE%99%CE%B4%CF%81%CF%85%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%BF%CF%85%CC%81_%CE%91%CF%80%CE%BF%CE%B8%CE%B5%CF%84%CE%B7%CF%81%CE%B9%CC%81%CE%BF%CF%85_final.pdf)).

ΑΦΙΕΡΩΣΕΙΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται στους γονείς μου Σταύρο Σαρμπάνη και Ανδριανή Σταθάκη, όπως και στον αδερφό μου Αντώνη Σαρμπάνη, οι οποίοι στέκονται δίπλα μου και μου συμπαραστέκονται σε όλα τα χρόνια της ζωής μου. Στον καθηγητή Δρ. Θεοδωρακάκο Ανδρέα για την βοήθεια στην εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας. Επίσης στους φίλους και συνεργάτες Ιωάννη Δέδε, Ιωάννη Ψυχογιό, Αλέξανδρο Πάλλη , Ξενοφών Σταυρίδη και Λάμπρο Σαρμπάνη. Ακόμα ευχαριστώ τον Παναγιώτη Παυλάκη, την Αικατερίνη Λιβανίου, τον Σιγλίδη Νικόλαο, Σταμάτη Κατσαφάδο, Γεώργιο Χανιωτάκη και Μιχάλη Ρινακάκη.

Περίληψη

Η συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται στον αυτόματο ρυθμιστή στροφών, στην λειτουργία του και σε ορισμένες παραμέτρους από τις οποίες μπορεί να αλλάξει η λειτουργία και η συμπεριφορά της μηχανής της οποίας ελέγχει. Η συγκεκριμένη συσκευή έχει πληθώρα εφαρμογών στη βιομηχανία (ατμοστροβίλους, ηλεκτρογεννήτριες, υδροστροβίλους κλπ). Θα γίνει μελέτη εις βάθος ορισμένων βασικών παραμέτρων που έχουν άμεση επίδραση στην συσκευή την οποία ελέγχουν (Βύθιση , εξισορρόπηση, ευαισθησία κλπ). Με την βοήθεια γραφημάτων, εγχειρίδια κατασκευαστών και ρεαλιστικές συνθήκες λειτουργίας ενός ρυθμιστή στροφών θα εμβαθύνουμε στην λειτουργία του και στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας μιας μηχανής.

Λέξεις-κλειδιά : αυτόματος, ρυθμιστής, στροφών, βύθιση
,εξισορρόπηση, κινητήρας, έλεγχος, φορτίο

ABSTRACT

This particular essay refers to the governor, its operation and to some particular parameters which they can change the dynamic reaction of the engine that controls. This device has plenty of appliances in the industry (Steam turbines, Diesel Generators, water turbines etc.). It will be an in depth investigation of some basic parameters which affect the reaction of the device that we want to control (Speed Droop, Compensation, Sensitivity etc.). With the help of diagrams, manuals and real working conditions of a governor we will emphasize on its operation and on the optimization of operation of a diesel engine.

Key words : governor, droop, compensation, engine, control, load

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	15
1.1	Εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	15
1.2	Σκοπός	16
1.3	Μεθοδολογία	17
1.4	Καινοτομία	17
1.5	Δομή	17
2	Γενική περιγραφή	19
2.1	Ορισμός	19
2.2	Η χρησιμότητα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών.....	19
2.3	Ιστορική αναδρομή	20
2.4	Βασική αρχή λειτουργίας αυτόματου ρυθμιστή στροφών (governor).....	27
2.4.1	Παράδειγμα ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών στην καθημερινότητα μας 27	
3	Είδη και εφαρμογές αυτόματων ρυθμιστών στροφών	30
3.1	Είδη αυτόματων ρυθμιστών στροφών.....	31
3.1.1	Μηχανικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών	32
3.1.2	Ηλεκτρομηχανικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών.....	32
3.1.3	Ηλεκτρονικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών	32
3.2	Σύντομη αναφορά στους ενεργοποιητές (Actuators) και στην διαφοροποίηση τους από τους αυτόματους ρυθμιστές στροφών.....	33
3.2.1	Actuators	33
3.2.2	Η διαφοροποίηση μεταξύ ενεργοποιητή και αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Actuator – Governor)	33
3.3	Εφαρμογές.....	34
3.3.1	Ρυθμιστές στροφών σε ηλεκτρομηχανές.....	34
3.3.2	Ηλεκτρογεννήτριες	35
3.3.3	Εφαρμογή αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε μηχανή εσωτερικής καύσης πρόωσης με προπέλα (Propulsion)	44
4	Αρχές λειτουργίας αυτόματων ρυθμιστών στροφών - Δυναμικά χαρακτηριστικά και έλεγχος μηχανών εσωτερικής καύσης - PID (Propotional – Integral – Derivative)	46
4.1	Ορισμός	46
4.1.1	Αναλογικός έλεγχος (Proportional Control)	46
4.1.2	Ακέραιος έλεγχος (Integral - Reset control)	46

4.1.3	Δευτερογενής έλεγχος (Derivative control - Preact και rate time)	46
4.2	Προσέγγιση των PID με χρήση μαθηματικών και γραφικών μοντέλων	47
4.2.1	Χρήση των PID ελεγκτών	47
4.2.2	Έλεγχος ανατροφοδότησης – Κλειστός βρόγχος	47
4.2.3	Ο PID ελεγκτής ως αλγόριθμος	49
4.2.4	PID ελεγκτής σύμφωνα με τα πρότυπα ISA	49
4.2.5	PID ελεγκτής με ανεξάρτητες μεταβλητές	49
4.3	Ρύθμιση των PID – από την θεωρία στην πράξη	50
4.3.1	Αρμονικοί παλμοί Ziegler – Nichols (Ziegler – Nichols harmonic oscillations)	51
4.3.2	Ziegler – Nichols μέθοδος βασισμένη σε απόκριση βήματος επεξεργασίας (process step response).....	52
4.3.3	Cohen and Coons μέθοδος βηματικής απόκρισης (step – response method)	53
4.3.4	Μέθοδος Dahlins (Dahlins method)	54
5	Η έννοια του όρου βύθισης στροφών (Speed Droop) και η βαρύτητα του στον χώρο των ελεγκτών μηχανών εσωτερικής καύσης	60
5.1	Droop – Το φαινόμενο βύθισης στις μηχανές εσωτερικής καύσης.....	60
5.1.1	Προσωρινή βύθιση : Αφότου υπάρξει μεταβολή του φορτίου σε μια μηχανή, το governor θα επαναφέρει τις ονομαστικές στροφές οι οποίες μεταβλήθηκαν λόγω αλλαγής του φορτίου.	60
5.1.2	Ισόχρονη λειτουργία (Isochronous operation)	60
5.1.3	Καμπύλη βύθισης – Droop Curve.....	60
5.1.4	Ανάλυση του φαινομένου βύθισης (Droop)	61
6	Ανάλυση λειτουργίας αυτόματου μηχανικού ρυθμιστή στροφών	64
6.1	Αντλία λαδιού (Oil Pump).....	66
6.2	Έμβολα συσσώρευσης(Accumulator pistons).....	67
6.3	Έμβολο ενέργειας (Power Piston)	67
6.4	Σύστημα βαλβίδας οδήγησης λαδιού (Pilot Valve Plunger)	68
6.5	Αντίβαρα (Ballhead System).....	69
6.6	Σύστημα εξισορρόπησης (Compensation System)	72
7	Τοποθέτηση/σύνδεση αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης.....	74
7.1	Μετάδοση κίνησης των αρθρώσεων και των μοχλών σύνδεσης μεταξύ αυτόματου ρυθμιστή στροφών – μηχανής εσωτερικής καύσης	76
8	Εφαρμογές και τρόποι αντιμετώπισης των παραγόμενων ρύπων σε πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης	81
8.1	Στοιχειομετρική καύση πετρελαίου	81
8.2	Χαρακτηριστικό περιορισμού καυσίμου κατά την εκκίνηση της πετρελαιομηχανής (Start fuel limit feature).....	82
8.2.1	Αρχή λειτουργίας fuel limit	82

8.3	UG - 25.....	83
8.4	3161.....	85
8.5	Περιορισμοί καυσαερίων σε υπερτροφοδοτούμενες πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης και έλεγχος λειτουργίας της υπερτροφοδότησης.....	88
8.5.1	Jet system	88
8.5.2	Scavenging Air Fuel Limit.....	89
9	Μαθηματική προσέγγιση λειτουργίας μηχανικού governor	90
9.1	Αυτόματος ρυθμιστής στροφών (Governor).....	90
9.2	Η μηχανή εσωτερική καύσης (Prime Mover).....	91
9.3	Υπερπληρωτής (Turbocharger)	91
10	Overspeed/Υπερτάχυνση.....	93
10.1	Πηνίο απενεργοποίησης της μηχανής (Shutdown Solenoid)	93
10.2	Αρχή λειτουργίας Πηνίου απενεργοποίησης της μηχανής (Shutdown Solenoid) ..	94
11	Παρελκόμενα εξαρτήματα ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών για βελτιστοποίηση της λειτουργίας του	94
11.1	Εναλλάκτης θερμότητας (Cooler).....	94
11.2	Ενισχυτής εκκίνησης (Booster cylinder).....	94
11.2.1	Ρύθμιση ενισχυτή εκκίνησης (booster cylinder).....	95
12	Επισκευή αυτόματου ρυθμιστή στροφών - Φθορά εξαρτημάτων ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών και αντικατάσταση τους	96
12.1	Φθορές στα αντίβαρα (flyweights)	96
12.2	Φθορές στα accumulator pistons.....	97
12.3	Φθορές στον πρωτεύον άξονα κίνησης (driveshaft)	98
12.4	Φθορές στην βαλβίδα ευαισθησίας (needle Valve)	99
12.5	Φθορές στον ωστικό τριβέα (Thrust Bearing).....	100
12.6	Φθορές στην πιλοτική βαλβίδα (pilot valve plunger)	100
12.7	Φθορές σε περιφερειακά εξαρτήματα του μηχανικού αυτόματου ρυθμιστή στροφών.....	101
13	Ρύθμιση και βαθμονόμηση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών.....	103
13.1	Έλεγχος και προετοιμασία της διαδικασίας βαθμονόμησης του αυτόματου ρυθμιστή στροφών.....	103
13.2	Διαδικασία ρύθμισης αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε δοκιμαστήριο (Testbench/Load Simulator).....	106
14	Συμπεράσματα.....	108
15	Βιβλιογραφία.....	109

Πίνακας περιεχομένων εικόνων

Σχήμα 1-1 Γράφημα με τις ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο. (Πηγή : OurWorldInData.org/energy).....	15
Σχήμα 2-1 Απεικόνιση αυτόματου ρυθμιστή στροφών συνδεδεμένο με βαλβίδα παροχής καυσίμου (Throttle Valve). (Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor) ...	21
Σχήμα 2-2 Τριάντα χρόνια μετά δημιούργησαν τον πρώτο μηχανικό ρυθμιστή στροφών για εφαρμογές σε υδραυλικές τουρμπίνες (Πηγή : https://www.pinterest.de/pin/632263235165448842/).....	22
Σχήμα 2-3 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Eurora (με μπλε χρώμα), τοποθετημένος σε πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης.....	24
Σχήμα 2-4 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Yanmar NZ 61 τοποθετημένος σε ηλεκτρογεννήτρια	25
Σχήμα 2-5 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών κινέζικης προέλευσης, αντίγραφο μοντέλου της Woodward.....	26
Σχήμα 2-6 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της εταιρείας Zexel	27
Σχήμα 2-7 Οδηγός κρατάει σταθερή την ταχύτητα του οχήματος με περιορισμό την ταχύτητα. (Πηγή : Woodward governors basic seminar section two)	28
Σχήμα 2-8 Οδηγός σε μεταβολή του φορτίου λόγω κλίσης. (Πηγή : Woodward governors basic seminar section two).....	29
Σχήμα 3-1 Σχεδιάγραμμα ενός συστήματος αυτοματισμού κλειστού βρόγχου. (Πηγή : Woodward – PID Control)	30
Σχήμα 3-2 Κλειστός βρόγχος σε ρεαλιστικές συνθήκες και σε υπαρκτό μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή στροφών Woodward UG - 8. (Πηγή : UG Dial Governor)	31
Σχήμα 3-3 Ταμπελάκι τεχνικών χαρακτηριστικών ηλεκτροκινητήρα αυτόματου ρυθμιστή στροφών	38
Σχήμα 3-4 Συνδεσμολογία ελεγκτή APM (Advanced Permanent Magnet). (Πηγή : APM controller).....	39
Σχήμα 3-5 Φωτό πάνελ ηλεκτρομηχανών ενώ είναι σε παράλληλη λειτουργία και οι 3 ταυτόχρονα. Διακρίνεται ο διαμοιρασμός του φορτίου με τα Kw να είναι ίδια και στις 3 ηλεκτρογεννήτριες (Ο όρος D/G σημαίνει Diesel Generator).	40
Σχήμα 3-6 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο 1 μηχανής.....	41
Σχήμα 3-7 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο2 ηλεκτρομηχανής.	42
Σχήμα 3-8 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο3 ηλεκτρομηχανής.	43
Σχήμα 3-9 Ενδείξεις οργάνων σε εγκατάσταση πλοίου με τέσσερις κύριες τετράχρονες μηχανές εσωτερικής καύσης.....	45
Σχήμα 4-1 Σχεδιάγραμμα κλειστού βρόγχου. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό ανατροφοδότησης μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής όπως ηλεκτρικός, με χρήση υπολογιστή, μηχανικός ή πνευματικός (με χρήση αέρα). (Πηγή : An introduction to open-loop control)	48
Σχήμα 4-2 Παρουσίαση ενός on/off συστήματος με τον x άξονα να είναι ο χρόνος. (Πηγή : An introduction to open-loop control).....	48
Σχήμα 4-3 Ziegler - Nichols μέθοδος βηματικής απόκρισης. (Πηγή : Tuning rules for PID controllers).	52

Σχήμα 4-4 Παράδειγμα διαγραμμάτων χρησιμοποιώντας PID ελεγκτές. (Πηγή : Tuning rules for PID controllers).	55
Σχήμα 4-5 Μετρήσεις ποιότητας ελέγχου. Πρόκειται για μία ιδανική καμπύλη PID. (Πηγή : Tuning rules for PID controllers).	56
Σχήμα 4-6 Απεικόνιση μίας αληθοφανής κατάστασης μεταβολής φορτίου και ταχύτητας περιστροφής. (Πηγή : Digital Control Basics).	57
Σχήμα 4-7 Σχεδιάγραμμα κλειστού βρόγχου το οποίο εσωτερικά περιλαμβάνει μέρος των PID στο κομμάτι του ελέγχου. (Πηγή : PID Control).	58
Σχήμα 4-8 Γράφημα από το πρόγραμμα 2301 E της εταιρείας Woodward).	58
Σχήμα 4-9 Ενδεικτικά διαγράμματα και Καμπύλες βύθισης.(Πηγή : Woodward. "Speed Droop and Power Generation")	61
Σχήμα 4-10 Nameplate ηλεκτρομηχανής Hyundai-Man B&W με τις ονομαστικές στροφές της να είναι όπως αναγράφεται στις 720 rpm.	62
Σχήμα 6-1 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών "WOODWARD UG-8" τοποθετημένος σε πετρελαιοκινητήρα μηχανή εσωτερικής καύσης.	65
Σχήμα 6-2 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών woodward UG-8 αποσυναρμολογημένος υπό μορφή exploded view. Διακρίνονται τα εξαρτήματα ομαδοποιημένα μεταξύ τους με σκοπό να γίνει ενδελεχής έλεγχος για φθορές.	66
Σχήμα 6-3 έμβολα συσώρευσης. (Πηγή : UG dial governor)	67
Σχήμα 6-4 Σύστημα αντιβάρων. (Πηγή : UG dial governor).	69
Σχήμα 6-5 Πνευματική συσκευή διαχείρισης των επιθυμητών στροφών περιστροφής του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Στο πάνω σχεδιάγραμμα με τις διακεκομμένες γραμμές). Πηγή : UG - 8 Speed Adjusting Devices)	70
Σχήμα 6-6 Κάλυμμα (cover) από αυτόματο ρυθμιστή στροφών UG οπύ περιέχει ηλεκτροκινητήρα (δεξιά) συγχρονισμού - ρύθμιση των επιθυμητών στροφών (synchronizer motor) και πηνίο απενεργοποίησης του πετρελαιοκινητήρα (αριστερά) . (Πηγή : UG Dial Governor).	71
Σχήμα 6-7 Συναρμολόγηση συστήματος εξισσορόπισης. (Πηγή :UG dial governor).	72
Σχήμα 7-1 Ένδειξη των αντλιών πετρελαίου στη μηδενική θέση.	74
Σχήμα 7-2 Ένδειξη ότι η σύνδεση μεταξύ τερματικού άξονα-αντλίες πετρελαίου έχει γίνει σωστά (Σε ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και χωρίς κάποιο φορτίο πέρα τα μαζικά φορτία του κινητήρα).	76
Σχήμα 7-3 Περιορισμός της εξόδου του αυτόματου ρυθμιστή στροφών μέ το ποτενσιόμετρο (Knob) του περιορισμού φορτίου (Load limit).	78
Σχήμα 7-4 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών UG - 8 τοποθετημένος σε πετρελαιοκινητήρα (πάνω αριστερά). Κάτω δεξιά είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (720 rpm).....	79
Σχήμα 8-1 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Woodward UG-25 + τοποθετημένος σε ηλεκτρομηχανή.	83
Σχήμα 8-2 Εικόνα από το μενού του προγράμματος διασύνδεσης «Service Tool».	84
Σχήμα 8-3 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών τοποθετημένος σε ηλεκτρομηχανή Wartsila. ...	85
Σχήμα 8-4 Πάνω δεξιά το πηνίο του start fuel Limit και παρακάτω τα υπόλοιπα μέρη που απαρτίζουν τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών 3161. (Πηγή : 3161 Solenoid Start fuel limiter).	86
Σχήμα 8-5 . Μέγιστη θέση λειτουργίας τερματικού άξονα συναρτήσε της παροχής τάσης πηνίου περιοριστή (Πηγή : 3161 Solenoid Start fuel limiter).	88
Σχήμα 12-1 Πλήρης αποσυναρμολόγηση και εκτενής έλεγχος αυτόματου ρυθμιστή στροφών της εταιρείας Woodward μοντέλο PGA – EG - 200.	96
Σχήμα 12-2 Φθορές στα αντίβαρα (flyweights).	97
Σχήμα 12-3 Φθορές στα accumulator pistons	98
Σχήμα 12-4 Φθορές στον πρωτεύον άξονα κίνησης (driveshaft).	99

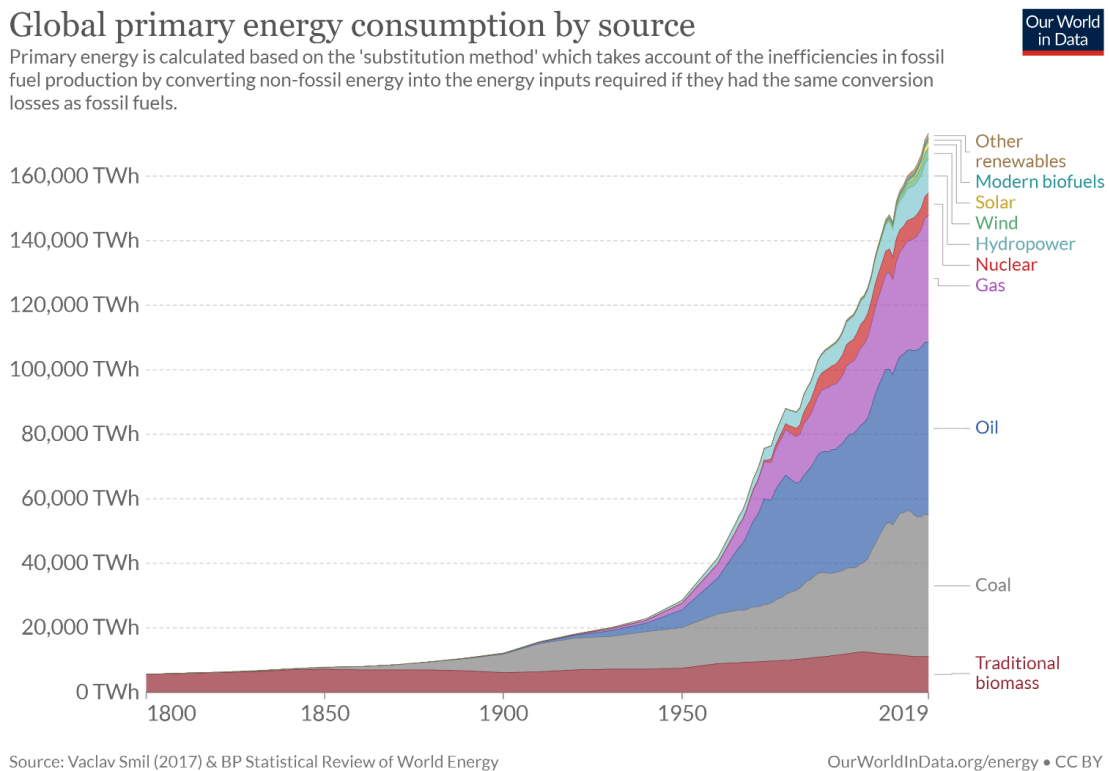
Σχήμα 12-5 Φθορές στην βαλβίδα ευαισθησίας (αριστερά η φθαρμένη - δεξιά η καινούρια)	99
Σχήμα 12-6 Φθορές στον ωστικό τριβέα (Thrust Bearing). Αριστερά ο φθαρμένος τριβέας, δεξιά ο καινούριος.	100
Σχήμα 12-7 Κωνικός οδοντωτός τροχός (bevel gear) ο οποίος συνδέεται με τον πρωτεύον άξονα και τον αντίστοιχο κωνικό οδοντωτό τροχό της μηχανής.	101
Σχήμα 12-8 Τερματικός σύνδεσμος (terminal bracket) με εκτεταμένη φθορά στην κεντρική οπή.	102
Σχήμα 13-1 Προσομοιωτής φορτίου - δοκιμαστήριο (Test bench) αυτόματου ρυθμιστή στροφών.	105
Σχήμα 13-2 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών UG - 10D. Το ταμπελάκι των χαρακτηριστικών του δηλώνει πως λειτουργεί στο φάσμα με ταχύτητα περιστροφής από 566 έως 1189 στροφές / λεπτό. Σε αυτό το φάσμα λειτουργίας πρέπει να ρυθμιστεί όταν πραγματοποιηθεί η ρύθμιση του.	107

1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στο αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Το αντικείμενο της εργασίας είναι άμεσα συνδεδεμένο με την ενέργεια και τις ενεργειακές ανάγκες που απαιτούνται από τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους.

Καθώς οι ενεργειακές απαιτήσεις στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου αυξάνονται, όλο και περισσότερες εναλλακτικές μέθοδοι αναζητούνται για τη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Επίσης, η βελτιστοποίηση των ήδη υπαρχών μεθόδων καθίσταται αναγκαία καθώς παραμένουν οι πιο αξιόπιστες. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η ενεργειακή ανάγκη ανά τα χρόνια



Σχήμα 1-1 Γράφημα με τις ενεργειακές ανάγκες σε παγκόσμιο επίπεδο. (Πηγή : OurWorldInData.org/energy)

Κάθε συσκευή παραγωγής ενέργειας, πρέπει να ελέγχεται από κάποιον μηχανισμό είτε από κάποιο σύνολο μηχανημάτων, προκειμένου να παράγει ενέργεια, αναλόγως

την ζήτηση και βάσει των ανάλογων προδιαγραφών του κατασκευαστή. Ένας από τους μηχανισμούς ελέγχου είναι ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών.

Παρόλο που η συσκευή αυτή συναντάται σε πληθώρα βιομηχανικών εφαρμογών, θα εμβαθύνουμε κυρίως σε εφαρμογές πετρελαιοκινητήρων. Οι πετρελαιοκινητήρες αν και δεν είναι κάτι καινούριο ως τεχνολογία χρησιμοποιούνται ευρέως σε μέσα μεταφοράς, παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος και άλλα. Στις περισσότερες από αυτές τις εφαρμογές οι συγκεκριμένες μηχανές εσωτερικής καύσης λειτουργούν σε ποικίλες στροφές, φορτία και υπό μεταβαλλόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες.

Η μη σταθερή λειτουργία και οι συνεχής μεταβολές φορτίου προκαλούν εκτεταμένες φθορές σε εξαρτήματα της μηχανής, αυξημένη κατανάλωση και ρύπους. Προκειμένου να αποφευχθούν οι συνέπειες όλων αυτών των φαινομένων όπως η μειωμένη οικονομία καυσίμων, οι έντονες δονήσεις και η καταστροφή του πετρελαιοκινητήρα, καθίσταται αναγκαία η χρήση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Επίσης να σημειωθεί πως οι περισσότερες πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης βιομηχανικού τύπου, είναι υπερτροφοδοτούμενοι , με αποτέλεσμα να υπάρχει περιπλοκότητα στην λειτουργία του εκάστοτε κινητήρα. Υπάρχουν και άλλα φαινόμενα όπως το “turbo lag” που ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών καλείται να αντιμετωπίσει.

Εδώ και πολλά χρόνια ο αυτόματος έλεγχος της ταχύτητας στις πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης γίνεται μέσω συμβατικών υδραυλικών και μηχανικών αυτόματων ρυθμιστών στροφών. Ακόμα και σήμερα σε καινούριες εγκαταστάσεις γίνεται η χρήση συμβατικών αυτόματων ρυθμιστών στροφών καθώς έχουν αποδειχθεί αρκετά αξιόπιστες και ακριβείς στην λειτουργία τους.

Διαφορετικά χρησιμοποιούνται παραπλήσιες συσκευές συμβατές με του παλαιότερου τύπου, οι οποίες παρέχουν περισσότερη ακρίβεια και φιλικότερο περιβάλλον προς τον χρήστη.

1.2 Σκοπός

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του αυτόματου ρυθμιστή στροφών, σε θεωρητικό και σε πρακτικό επίπεδο, ώστε να γίνει αντιληπτός ο ρόλος του , η λειτουργία του και οι δυνατότητες που έχει ώστε να βελτιστοποιήσει την λειτουργία μιας Μηχανής Εσωτερικής Καύσης. Ο επονομαζόμενος Governor ο οποίος λαμβάνει πρωταγωνιστικό ρόλο στη ρύθμιση στροφών τόσο για την εκκίνηση μιας πετρελαιομηχανής όσο και για την διάρκεια λειτουργίας της. Κύριο μέλημα του, είναι να φέρνει σε ισορροπία τόσο την ροή και ρύθμιση του καυσίμου προς τις αντλίες πετρελαίου όσο και να μεριμνάει για το σταθερό ρυθμό καύσης του, προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία βλάβης τόσο στον κινητήρα της εκάστοτε

μηχανής όσο και στην αποφυγή οποιουδήποτε ατυχήματος που μπορεί και να περιλαμβάνει ακόμη και μια ανθρώπινη ζωή. Προκειμένου λοιπόν να διασφαλιστεί τόσο το φορτίο καυσίμου, όσο κι το ίδιο το πλοίο από τυχόν λάθη και ατυχήματα που σχετίζονται κατά κύριο λόγο με τον κινητήρα της μηχανής επινοήθηκε ο ρυθμιστής στροφών (Governor), για τον οποίο θα γίνει εκτενέστερη αναφορά τόσο για τον σκοπό της χρησιμότητάς του, την βασική του λειτουργία, καθώς και το πόσο σημαντικό ρόλο λαμβάνει στην εν λόγω ρύθμιση στρόφων που σχετίζονται κατά κύριο λόγο με πετρελαιοκινητήρες.

1.3 Μεθοδολογία

Η προσέγγιση της εργασίας ξεκινάει αναλύοντας την αρχή λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή στροφών, την ανάλυση διαφόρων χαρακτηριστικών του, τις εφαρμογές που χρησιμοποιείται και πως συνδυάζοντας μελέτες, μαθηματικά μοντέλα και πραγματικές εφαρμογές, μπορεί να δημιουργήσει βέλτιστες συνθήκες λειτουργίας σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης.

1.4 Καινοτομία

Η συμβολή της συγκεκριμένης εργασίας στην καινοτομία και στην έρευνα είναι ο συνδυασμός θεωρίας και πράξης πάνω στο αντικείμενο των κινητήρων εσωτερικής καύσης και στα δυναμικά χαρακτηριστικά των μηχανών. Ο ρόλος της καινοτομίας που συμβάλει είναι πολλαπλός, διότι σχετίζεται αρχικά με δύο βασικά εργαλεία τα οποία είναι απαραίτητα για έναν μηχανικό, διότι δημιουργούν την απαραίτητη εμπειρία ώστε να αντιμετωπίσει προβλήματα του συγκεκριμένου αντικειμένου. Προσανατολίζει τόσο την χρησιμότητα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Governor) καθώς και την ανάπτυξη των βιομηχανικών δομών που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τόσο τον κινητήρα μιας μηχανής όσο και τα καύσιμα του. Η έρευνα αυτή πριμοδοτεί την σημασία ελέγχου λειτουργίας της Μηχανής Εσωτερικής Καύσης, και κατά πόσο μπορεί να υπάρξει βελτιστοποίηση του μέσω ορθής ρύθμισης του αυτομάτου ρυθμιστή στροφών.

1.5 Δομή

Ακολουθούν εισαγωγικά κεφάλαια όπως ο ορισμός του αυτόματου ρυθμιστή στροφών όπου στο σημείο αυτό θα γίνει αναφορά στην χρησιμότητα του ρυθμιστή στροφών και πως αυτό επηρεάζει τα κινητήρια συστήματα της μηχανής. Σε επόμενα κεφάλαια θα γίνει αναλυτική αναφορά σε ιστορικές αναδρομές πάνω σε αυτή την εφεύρεση. Στη συνέχεια καθορίζονται και περιγράφονται με περισσότερες λεπτομέρειες η λειτουργία του και τα επιμέρους μέρη. Αφού έχουν εξηγηθεί τα παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες εφαρμογές και μερικά παραδείγματα της λειτουργίας του καθώς και τεχνικές λύσεις που επιλέχθηκαν για την υλοποίηση και

πραγμάτωση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Η λειτουργία του σε πραγματικές συνθήκες στην πορεία δημιουργούν παρατηρήσεις και συμπεράσματα για το πως να ρυθμιστεί και να ενεργήσει όσο το δυνατόν πιο αποδοτικά στην εκάστοτε εφαρμογή. Τέλος, στο κεφαλαίο συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της εφεύρεσης αυτής, θα γίνει αναφορά τόσο στα συμπεράσματα που διεκπεραιωθήκαν μέσω της έρευνας, καθώς και η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να αναπτυχθούν οι θεωρίες που σχετίζονται με την λειτουργία και τον έλεγχο των Μηχανών Εσωτερικής Καύσης.

2 Γενική περιγραφή

2.1 Ορισμός

Η συσκευή governor στην ελληνική γλώσσα μεταφράζεται ως αυτόματος ρυθμιστής στροφών μιας μηχανής. Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών είναι ο μηχανισμός ο οποίος ελέγχει την ταχύτητα περιστροφής μιας μηχανής εσωτερικής καύσης, με σκοπό να παραμένει όσο το δυνατόν πιο σταθερή, και χωρίς την επιρροή του φορτίου. Θεωρείται ο «κυβερνήτης» ενός κινητήρα εσωτερικής καύσης καθώς λαμβάνει ως πληροφορία τις στροφές ανά λεπτό και άλλες παραμέτρους, και αναλόγως ρυθμίζει την παροχή καυσίμου προς τον κινητήρα. Η λειτουργία αυτή γίνεται αυτόματα χωρίς την επέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα παρά μόνο όταν υπάρξει κάποια βλάβη. Πρόκειται λοιπόν για μία συσκευή αυτοματισμού η οποία με διάφορες μορφές ενέργειας (ηλεκτρική, υδραυλική, πνευματική) ελέγχει τις στροφές ενός κινητήρα.

Πολλοί ίσως αντιστοιχίσουν τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών με άλλες μονάδες όπως την ECU-εγκέφαλο ή με το «καρμπυρατέρ» ενός οχήματος. Αυτή η αντιστοιχία είναι εσφαλμένη καθώς οι δύο συσκευές που αναφέρθηκαν είναι τα μέσα με τα οποία μεταβάλλονται οι στροφές σε έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, αλλά δεν έχουν την δυνατότητα να τις μεταβάλλουν αυτόματα.

Επομένως, το governor είναι μία συσκευή περισσότερο πολύπλοκη και με περισσότερες δυνατότητες και χαρακτηριστικά, καθώς αποτελεί και το κομμάτι της «σκέψης» στην διαδικασία μεταβολής της ταχύτητας μίας ΜΕΚ. Μία σωστή αντιστοιχία με το governor θα ήταν ένας οδηγός ο οποίος αλλάζει συνεχώς την θέση της «πεταλούδας» γκαζιού καθώς οδηγεί προκειμένου να εξασφαλίσει σταθερή ταχύτητα στο όχημα του.

Πρόκειται για μία συσκευή η οποία είναι αλληλένδετη με τον άμεσο έλεγχο ενός κινητήρα. Παρόλα αυτά η ρύθμιση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών γίνεται σε συγκεκριμένο προσομοιωτή αποκόβοντας τον από τον κινητήρα. Ρυθμίσεις όπως ο χρονισμός του κινητήρα, η προπορεία και άλλα, θεωρούνται δεδομένα και ήδη ελεγμένα σύμφωνα με τις οδηγίες του κατασκευαστή.

2.2 Η χρησιμότητα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών

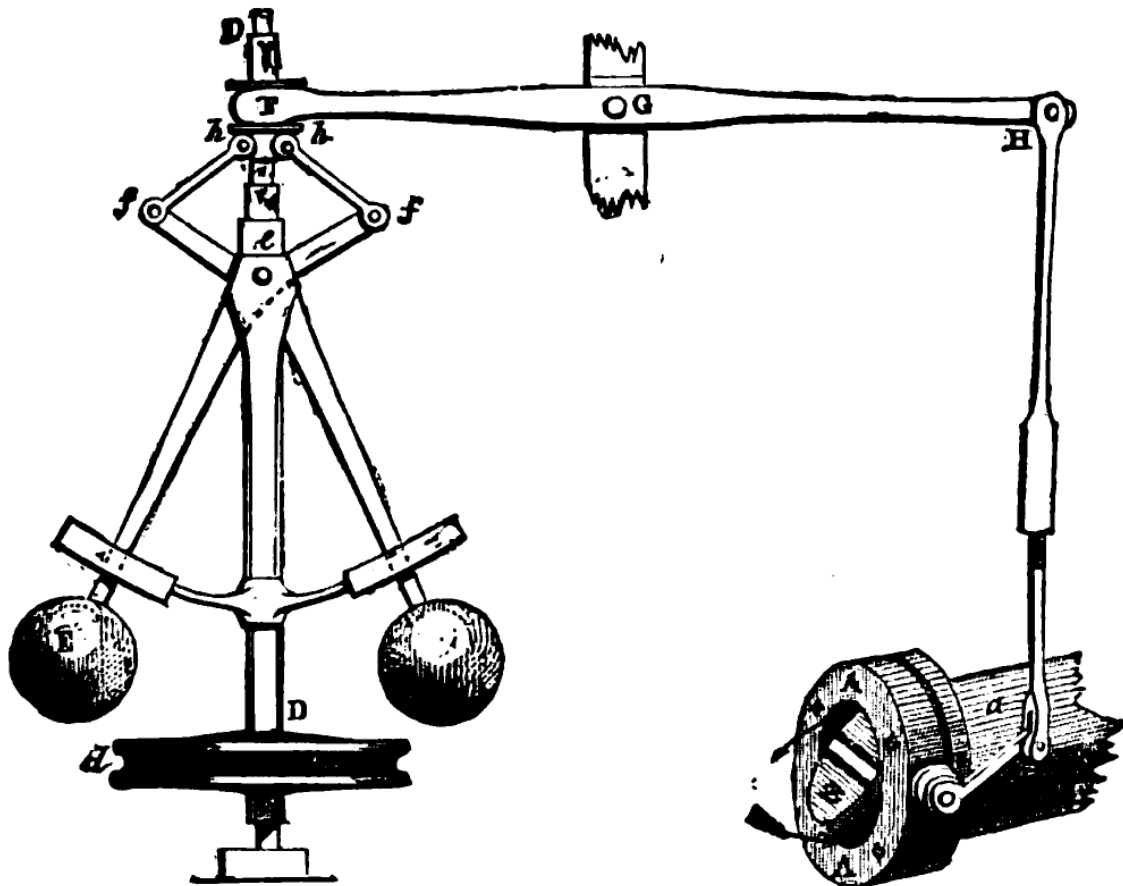
Οι πηγές ενέργειας πρέπει να ελέγχονται ώστε να είναι χρήσιμες πηγές παραγωγής έργου. Η παροχή ενέργειας ανεξαρτήτως των συνθηκών πρέπει να παρουσιάζει μια σταθερότητα ακόμα και σε καταστάσεις μεταβολής του φορτίου (είτε αυτό είναι ηλεκτρικό είτε μηχανικό). Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών ελέγχει την παροχή της ενέργειας και την μεταβάλλει συνεχώς αυτόματα όταν παρουσιάζεται μεταβολή της

ζήτησης της ενέργειας. Πολλές φορές η ζήτηση είναι αυξημένη και άλλες φορές μειωμένη. Το governor λοιπόν καθίσταται υπεύθυνο για την διαχείριση της ενέργειας, είτε σε πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης όπου αυτό είναι και το υπό μελέτη αντικείμενο, είτε σε πληθώρα άλλων εφαρμογών.

Άλλες εφαρμογές που συναντάται είναι : υδροηλεκτρικά εργοστάσια , power plants (ατμού, πυρηνικής ενέργειας), συστήματα πρόωσης (αεροπλάνα, ελικόπτερα).

2.3 Ιστορική αναδρομή

Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών παρουσιάστηκε τον 17^ο αιώνα με σκοπό την ρύθμιση της απόστασης και της πίεσης σε ανεμόμυλους και σε νερόμυλους αντίστοιχα. Το 1788 σχεδιάστηκε ο πρώτος φυγοκεντρικός ρυθμιστής στροφών από τον James Watt για την βελτιστοποίηση της λειτουργίας της ατμομηχανής Boulton & Watt. Ο σχεδιασμός του αποτελούνταν από ένα ζευγάρι από σιδερένιες μπάλες τοποθετημένες στα άκρα δύο κάθετων ατράκτων οι οποίοι ήταν τοποθετημένοι αντιδιαμετρικά πάνω σε έναν άξονα που περιστρέφεται. Στο άλλο άκρο της κάθε ατράκτου υπάρχει άρθρωση ώστε να περιστρέφονται. Αυτό το σύμπλεγμα εξαρτημάτων τοποθετείται γύρω από έναν άξονα με την δυνατότητα να μετακινείται πάνω κάτω στον άξονα αυτό ενώ παράλληλα περιστρέφεται γύρω του. Καθώς η ταχύτητα περιστροφής αυξάνεται αυξάνεται και η φυγόκεντρος δύναμη, με αποτέλεσμα τα αντίβαρα να σηκωθούν και παράλληλα να μετατοπιστεί το σύμπλεγμα όλων αυτών των εξαρτημάτων. Μπορεί να συνδεθεί μία άλλη άτρακτος η οποία έχει μία άρθρωση στο μέσο της και καθώς το συναρμολόγημα των αντιβάρων μετατοπίζεται, να αλλάζει θέση και η άτρακτος. Στο άλλο άκρο της ατράκτου τοποθετείται μία άρθρωση με έναν κάθετο άξονα ο οποίος κλείνει μια βαλβίδα (throttle valve), όταν οι πραγματικές στροφές περιστροφής ξεπεράσουν τις απαιτούμενες.

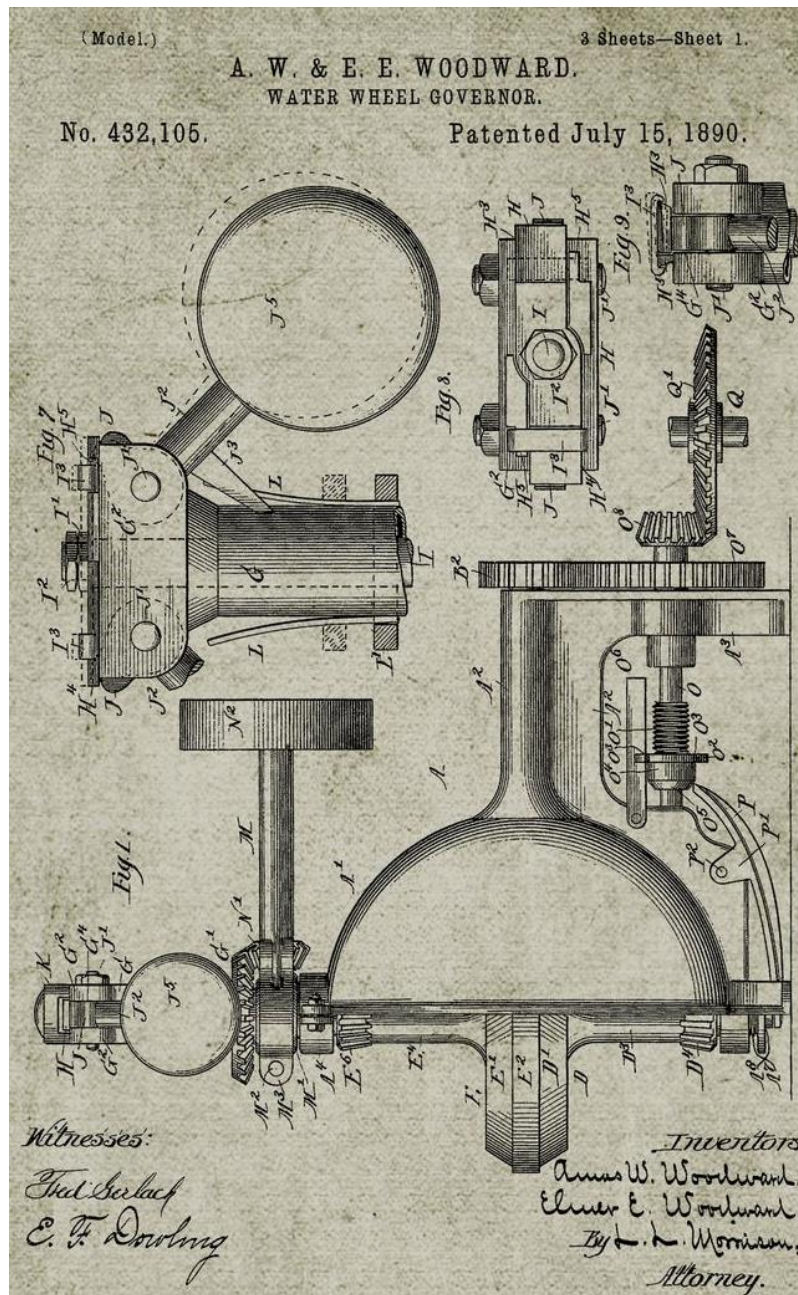


Σχήμα 2-1 Απεικόνιση αυτόματου ρυθμιστή στροφών συνδεδεμένο με βαλβίδα παροχής καυσίμου (Throttle Valve). (Πηγή : https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor)

Η ιδέα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών εξελίχθηκε όχι μόνο ως κατασκευή αλλά μελετήθηκε και από τον James Clerk Maxwell το 1868 με μαθηματικά μοντέλα στην δημοσίευση του «On Governors». Επίσης ο Willard Gibbs καθώς μελετούσε το μοντέλο του Watt παρατήρησε πως η λειτουργία του στην πράξη παρουσίαζε μειονεκτήματα όπως η αργή απόκριση και σφάλματα στην διόρθωση των στροφών τις οποίες έπρεπε να ελέγχει. Το 1900 ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά σε αυτοκίνητα, στο όχημα Wilson-Pilcher, όπου ήταν μια εναλλακτική του χειροκίνητου γκαζιού (hand throttle). Ρύθμιζε τις επιθυμητές στροφές του κινητήρα και τις κρατούσε σταθερές (παρόμοια λειτουργία με το cruise control που έχουμε σήμερα). Στην συνέχεια και άλλες εταιρείες όπως η Land Rover αξιοποίησε την εφεύρεση αυτή στα οχήματα της. Η σύλληψη της ιδέας του φυγοκεντρικού ρυθμιστή στροφών αξιοποιήθηκε και από άλλους κατασκευαστές και δεν περιορίστηκε στον χώρο της αυτοκίνησης. Μέσω βιομηχανικών εφαρμογών

ο αυτόματος ρυθμιστής αξιοποιήθηκε και εξελίχθηκε για να καλύψει πληθώρα αναγκών.

Συγκεκριμένα, η Woodward Inc. (ιδρύθηκε το 1870), το 1890 εφηύρε και κατοχύρωσε την ευρεσιτεχνία αυτόματου ρυθμιστή στροφών αρκετά γρήγορο και αποδοτικό για εκείνη την εποχή. Κατασκευάστηκε με σκοπό να ελέγχει την άντληση του νερού σε εφαρμογές ύδρευσης.



Σχήμα 2-2 Τριάντα χρόνια μετά δημιούργησαν τον πρώτο μηχανικό ρυθμιστή στροφών για εφαρμογές σε υδραυλικές τουρμπίνες (Πηγή : <https://www.pinterest.de/pin/632263235165448842/>)

Το 1933 η ίδια εταιρεία επεκτείνεται στην βιομηχανία κατασκευάζοντας governors για πετρελαιοκίνητους κινητήρες και κινητήρες αεροσκαφών.

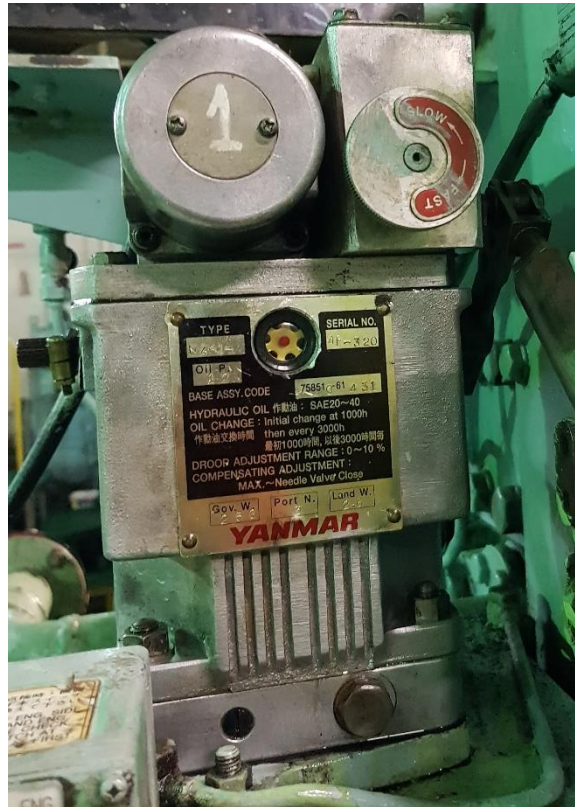
Εκείνη την εποχή πραγματοποίησε το πρώτο βήμα και εφηύρε την πρώτη προπέλα μεταβλητού βήματος (Variable pitch propeller). Η εταιρεία στην μεγάλη αυτή πορεία εξέλιξης δεν περιορίστηκε μόνο σε μηχανικούς αυτόματους ρυθμιστές στροφών αλλά εξέλιξε κυκλώματα και ηλεκτρονικούς ελεγκτές που πλέον υποκαθιστούν αντίστοιχα μηχανικά μέρη μηχανικών ρυθμιστών στροφών.

Πλέον το πεδίο της Woodward έχει επεκταθεί σε πληθώρα εφαρμογών όπως : τρένα, πλοία, εγκαταστάσεις παραγωγή ρεύματος αεροναυπηγική και πολλά άλλα, ενώ συνεχίζει να είναι πρωτοπόρα στον χώρο του controlling και των αυτοματισμών.

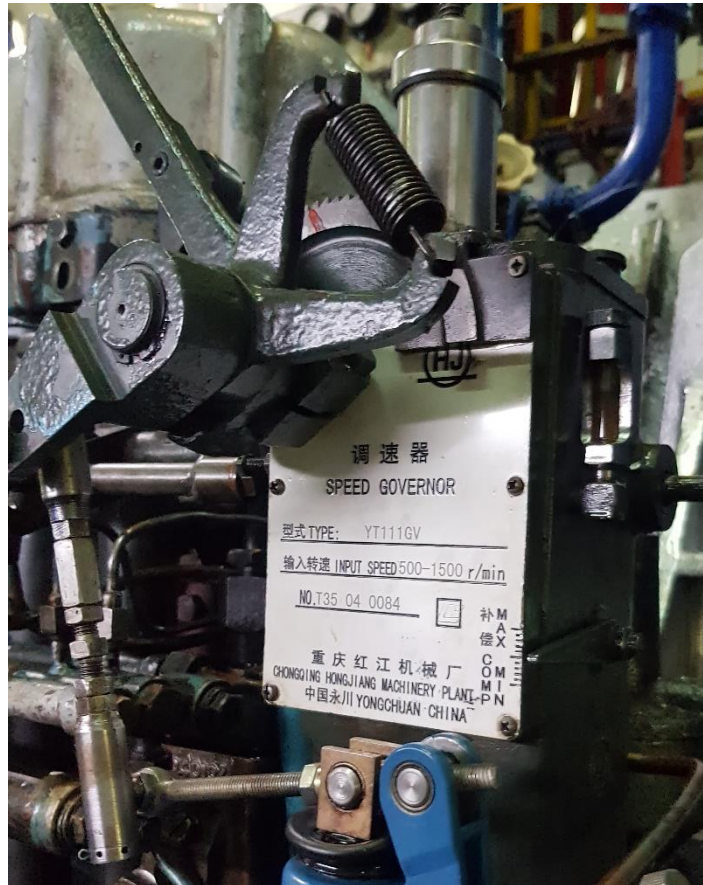
Αν και η συγκεκριμένη εταιρεία έχει ερευνήσει σε βάθος τους αυτόματους ρυθμιστές στροφών, δεν είναι η μοναδική η οποία ασχολείται με αυτό. Υπάρχουν εταιρείες όπως η Eurotra, η Yanmar και η Zexel. Ακόμα και η κινέζικη αγορά παρέχει αυτόματους ρυθμιστές στροφών. Παρόλα αυτά όλες οι εταιρείες κατασκευής αυτόματων ρυθμιστών στροφών ακολουθούν ίδια φιλοσοφία αρχής λειτουργίας, άλλοτε με περίπλοκους μηχανισμούς και λειτουργίας, και άλλοτε με απλούστερους.



Σχήμα 2-3 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Eurora (με μπλε χρώμα), τοποθετημένος σε πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης.



Σχήμα 2-4 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Yanmar NZ 61 τοποθετημένος σε ηλεκτρογεννήτρια



Σχήμα 2-5 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών κινέζικης προέλευσης, αντίγραφο μοντέλου της Woodward.



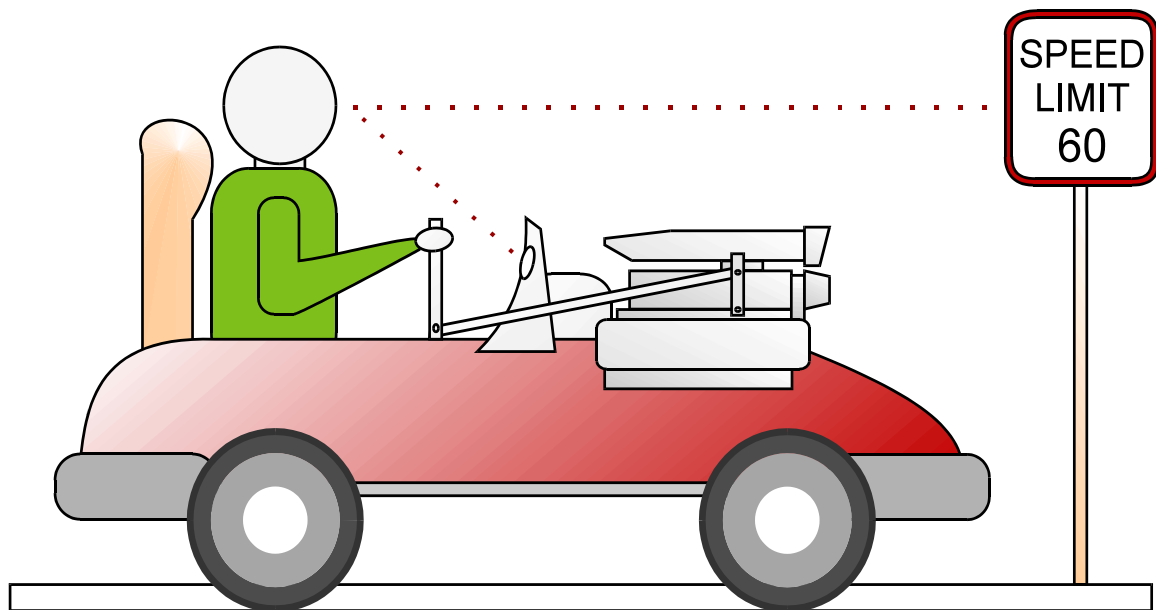
Σχήμα 2-6 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της εταιρείας Zexel

2.4 Βασική αρχή λειτουργίας αυτόματου ρυθμιστή στροφών (governor)

2.4.1 Παράδειγμα ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών στην καθημερινότητα μας

- **Λειτουργία αυτόματου ρυθμιστή στροφών με σταθερό φορτίο**

Αυτόματος ρυθμιστής στροφών θα μπορούσε να θεωρηθεί και ο οδηγός ενός αυτοκινήτου, ο οποίος πρέπει να διατηρήσει μια σταθερή ταχύτητα στον δρόμο. Καθώς αντλαμβάνεται την επιθυμητή ταχύτητα και το όριο ταχύτητας (inputs), θα δράσει αναλόγως προκειμένου να μην υπερβεί το όριο ταχύτητας και να διατηρήσει σταθερή ταχύτητα (Output). Ο τρόπος για να επιβεβαιώσει πως έχει διατηρήσει την επιθυμητή ταχύτητα είναι το ταχύμετρό του (Feedback) (Λειτουργία με σταθερό φορτίο).

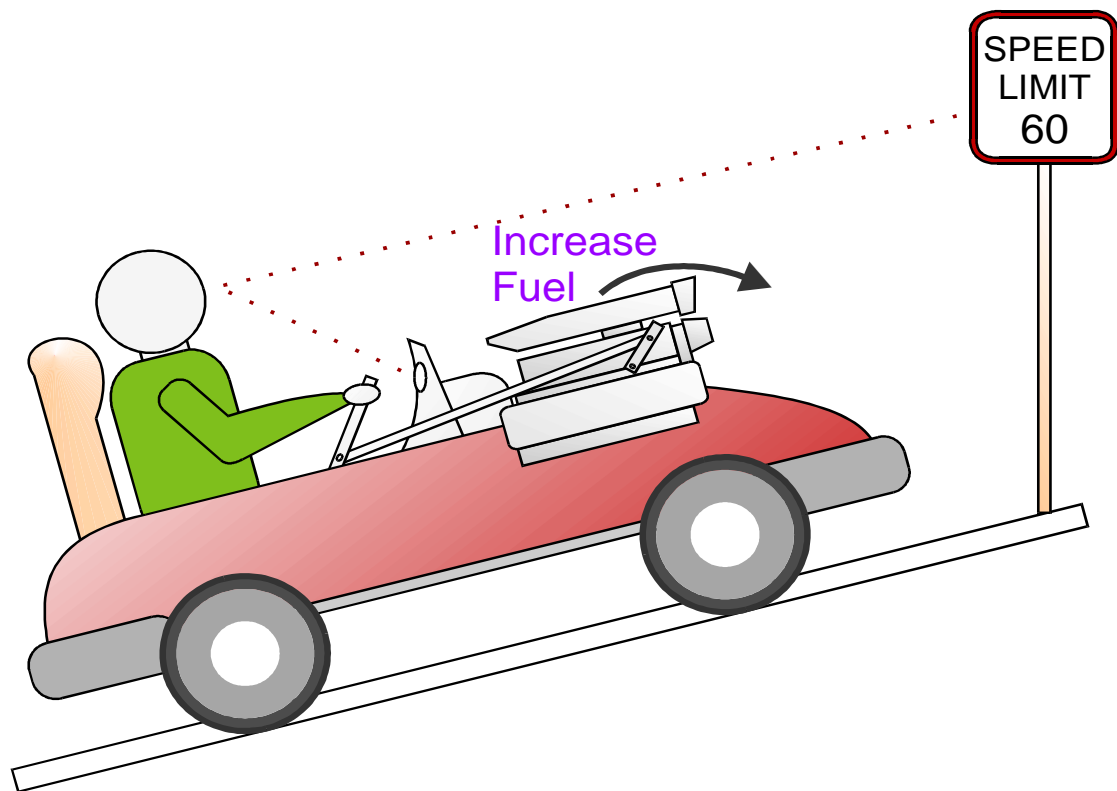


Σχήμα 2-7 Οδηγός κρατάει σταθερή την ταχύτητα του οχήματος με περιορισμό την ταχύτητα. (Πηγή : Woodward governors basic seminar section two)

- **Λειτουργία με μεταβολή φορτίου**

Ο ίδιος οδηγός/ρυθμιστής στροφών, αφού συναντήσει ένα ξαφνικό φορτίο (μια ανηφόρα), θα πρέπει να δράσει αναλόγως προκειμένου να διατηρήσει την ταχύτητα που είχε όταν ήταν στην κατάσταση της ευθείας (σταθερό φορτίο). Θα πρέπει λοιπόν να πατήσει περισσότερο το πετάλι του γκαζιού έτσι ώστε ο κινητήρας να τροφοδοτηθεί με περισσότερο καύσιμο έτσι ώστε να ανταπεξέλθει στην κλίση της ανηφόρας και η ταχύτητα του αυτοκινήτου να διατηρηθεί ίδια με πριν.

Αντίστοιχα στην περίπτωση της κατηφόρας ο οδηγός θα πρέπει να δράσει αναλόγως και να μειώσει την τροφοδοσία του κινητήρα με καύσιμο.

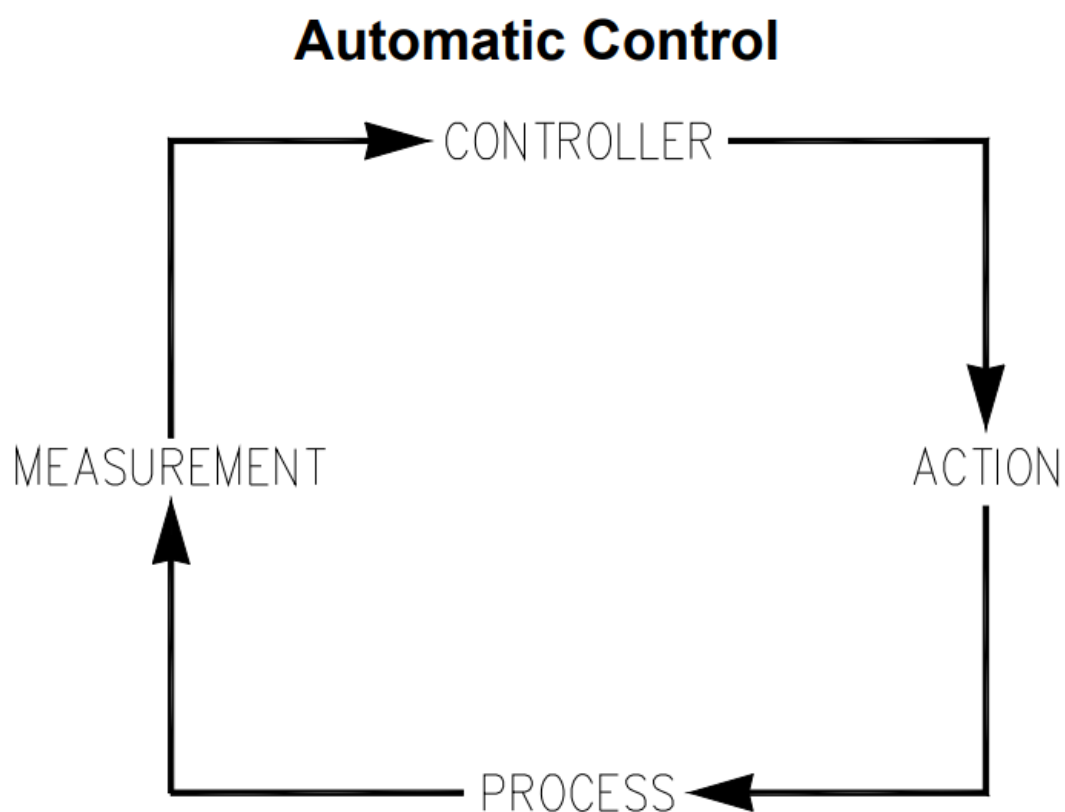


Σχήμα 2-8 Οδηγός σε μεταβολή του φορτίου λόγω κλίσης. (Πηγή : Woodward governors basic seminar section two)

Επίσης, ο οδηγός πρέπει να λαμβάνει υπόψιν τα όρια ταχύτητας τα οποία πρέπει να τηρούνται βάσει του κώδικα οδικής κυκλοφορίας. Αντιστοίχως, και ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών παρέχει κάποιους περιορισμούς (limits) προκειμένου να δουλεύει ο εκάστοτε κινητήρας σε ένα ασφαλές εύρος λειτουργίας.

3 Είδη και εφαρμογές αυτόματων ρυθμιστών στροφών

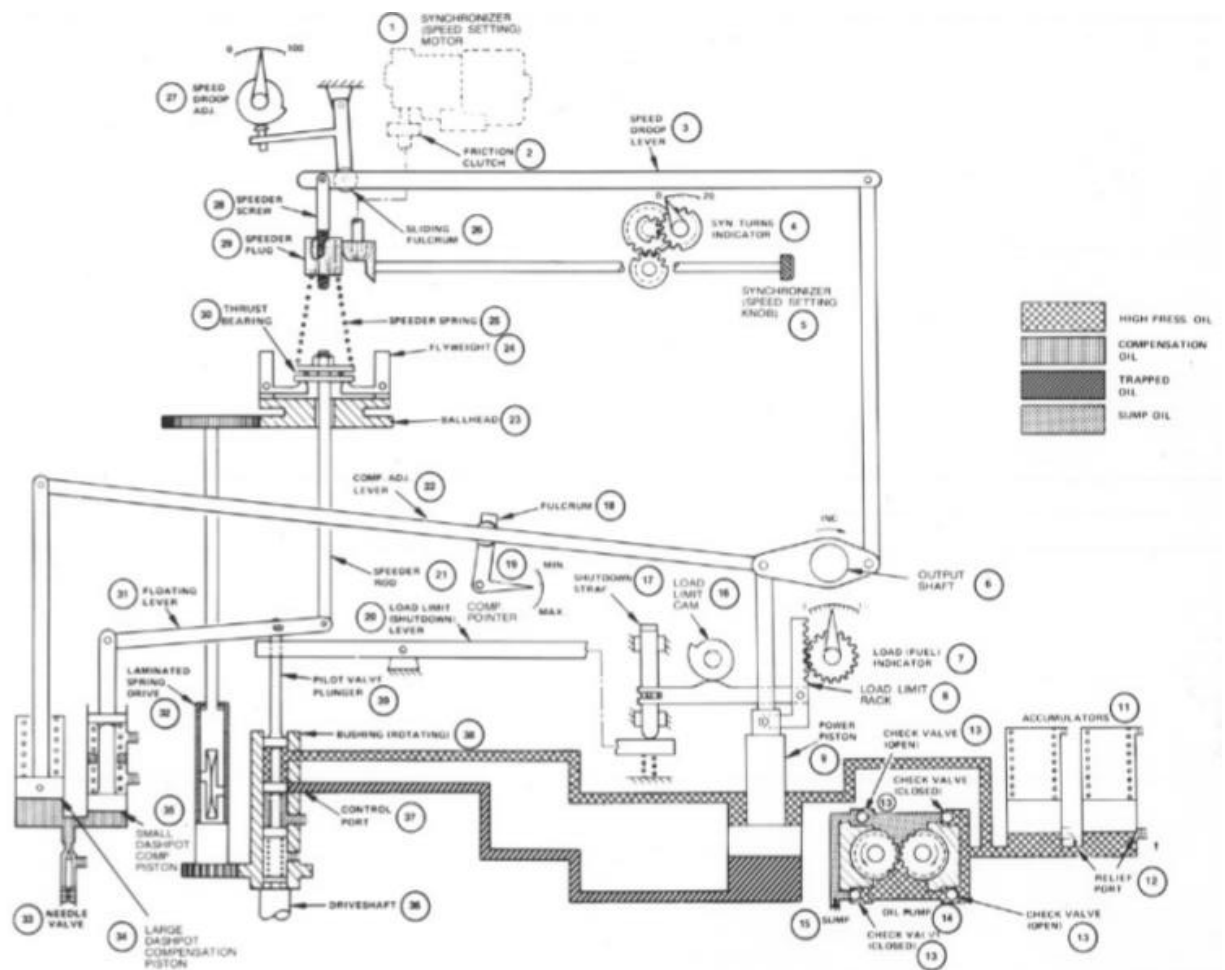
Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών είναι ουσιαστικά ένας αυτοματισμός, είτε μηχανικός είτε ηλεκτρικός (αναλόγως την εφαρμογή), καθώς προκειμένου να είναι επαρκής η κατάσταση λειτουργίας του απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη ανάδρασης (feedback). Επομένως πρέπει να λειτουργεί σε μια κατάσταση «κλειστού βρόγχου» (close loop), με συνεχή ανάδραση και ανατροφοδότηση πληροφοριών. Ως βασικός στόχος ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών, είναι η διατήρηση της εξόδου (Output) ενέργειας στο επιθυμητό επίπεδο, λαμβάνοντας ορισμένες εισόδους (inputs), όπως η ταχύτητα και το φορτίο, με συνεχή ανατροφοδότηση του συστήματος.



Σχήμα 3-1 Σχεδιάγραμμα ενός συστήματος αυτοματισμού κλειστού βρόγχου. (Πηγή : Woodward – PID Control)

Στο παραπάνω σχεδιάγραμμα είναι τρία αντικείμενα που λαμβάνουν χώρα:

- Η μέτρηση
- Η απόφαση , και
- Η δράση



Σχήμα 3-2 Κλειστός βρόγχος σε ρεαλιστικές συνθήκες και σε υπαρκτό μοντέλο αυτόματου ρυθμιστή στροφών Woodward UG - 8. (Πηγή : UG Dial Governor)

Παραπάνω στην εικόνα παρατηρούμε την ύπαρξη κλειστού βρόγχου στην έξοδο του governor, καθώς όλοι οι σύνδεσμοι ενώνονται μεταξύ τους και υπάρχει συνεχώς μία ανάδραση ώστε να επανέρχεται συνεχώς σε μία ισορροπία το σύστημα.

3.1 Είδη αυτόματων ρυθμιστών στροφών

Υπάρχουν αυτόματοι ρυθμιστές στροφών που λειτουργούν :

- Με αμιγώς μηχανικό τρόπο (βλ. Woodward UG-8)
- Με μηχανικό/ ηλεκτρονικό τρόπο (βλ. Woodward UG-25)
- Με αμιγώς ηλεκτρονική λειτουργία (βλ. Woodward 723)

Σε κάθε μηχανή εσωτερικής καύσης υπάρχουν οι ανάλογες απαιτήσεις και συμβιβασμοί, επομένως επιλέγονται και οι ανάλογοι αυτόματοι ρυθμιστές στροφών για την εκάστοτε εφαρμογή.

3.1.1 Μηχανικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών

Είναι η πρώτη και πιο πρώιμη μορφή αυτόματων ρυθμιστών στροφών και έχουν σαν βασική αρχή λειτουργίας την φυγόκεντρο δύναμη και την υδραυλική πίεση.

Απαρτίζονται από πλήθος μεταλλικών εξαρτημάτων τα οποία έχουν κατασκευαστεί με απόλυτη μηχανουργική ακρίβεια.

Μεγάλο προτέρημα τους είναι η αξιοπιστία. Επίσης αντέχουν σε αντίξοες συνθήκες όπως υγρασία και συνεχείς δονήσεις.

Ως μειονεκτήματα έχουν την πολυπλοκότητα και το σχετικά ακριβό κόστος κατασκευής. Ακόμα το κόστος συντήρησης είναι σχετικά υψηλό καθώς απαρτίζονται από πληθώρα εξαρτημάτων.

3.1.2 Ηλεκτρομηχανικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών

Είναι πιο σύγχρονη τεχνολογία από τους μηχανικούς. Συνήθως το μέρος του ελέγχου των στροφών γίνεται ηλεκτρονικά ενώ το μέρος της ενέργειας γίνεται μηχανικά/υδραυλικά.

Μηχανικά έχουν σχετικά απλή αρχιτεκτονική καθώς μεγάλο μέρος των εξαρτημάτων του ελέγχου (controlling) έχουν αντικατασταθεί με ηλεκτρονικές πλακέτες και βηματικούς κινητήρες (step motors).

Πλεονέκτημα τους είναι η απλότητα του σχεδιασμού, όπως επίσης και η δυνατότητα άμεσης ρύθμισης του και αλλαγή των παραμέτρων του.

Μειονεκτήματα τους είναι η ευαισθησία των ηλεκτρονικών μερών του και η έκθεση των ηλεκτρονικών και ηλεκτρολογικών μερών του σε υγρασία και δονήσεις.

3.1.3 Ηλεκτρονικοί αυτόματοι ρυθμιστές στροφών

Λειτουργούν αμιγώς ηλεκτρονικά. Ο έλεγχος αλλά και η ενέργεια γίνεται με ηλεκτρονικά συστήματα. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ένας μηχανικός ενεργοποιητής για την εκτέλεση των εντολών, αλλά η παραμετροποίηση των δυναμικών χαρακτηριστικών του και των γενικότερων ρυθμίσεων του γίνονται ηλεκτρονικά με την χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή. Οι δυνατότητα παραμετροποίησης είναι κατά πολύ μεγαλύτερη και το πλήθος των παραμέτρων επίσης ευρύτερο.

Πλεονέκτημα τους είναι η εύκολη ρύθμιση τους με την παροχή ενός λογισμικού.

Μειονέκτημα τους είναι η μειωμένη ανοχή στο χρόνο, στην υγρασία και στις δονήσεις. Για αυτό τον λόγο δεν είναι εκτεθειμένα σε μέρη κοντά στους κινητήρες που ελέγχουν αλλά σε κουτιά στεγασμένα όπου πολλές φορές είναι εντός του δωματίου ελέγχου (control room) της εγκατάστασης.

3.2 Σύντομη αναφορά στους ενεργοποιητές (Actuators) και στην διαφοροποίηση τους από τους αυτόματους ρυθμιστές στροφών

3.2.1 Actuators

Ως Actuator (ενεργοποιητή) θεωρούμε τον μηχανισμό ο οποίος δέχεται ορισμένες εντολές και τις εκτελεί, καθώς είναι ο μηχανισμός ο οποίος ενεργοποιεί, με διάφορες μορφές δύναμης (υδραυλική, ηλεκτρική, πνευματική), την «σκέψη» μιας ηλεκτρονικής μονάδας.

Ο ρόλος του Actuator είναι να μπορέσει να εκτελεί τις εντολές που δέχεται, από μία άλλη μονάδα η οποία καθίσταται υπεύθυνη για την διαχείριση και την ρύθμιση των στροφών.

Η λήψη δεδομένων όπως η στροφές αλλά και το φορτίο, όπως και άλλες παράμετροι (πίεση σάρωσης μηχανής, speed reference, alarms κ.α.), γίνονται μέσω αισθητήριων συστημάτων όπου καταλήγουν σε μία κεντρική πλακέτα όπου κάνει όλη την επεξεργασία. Αυτή η μονάδα δέχεται κάποιες εισόδους, είτε ψηφιακές είτε αναλογικές, τις επεξεργάζεται και στη συνέχεια παράγει κάποιες εξόδους. Μία από αυτές είναι ένα σήμα, κάποιες φορές αναλογικό, άλλες φορές ψηφιακό, προς το actuator.

Το σήμα το οποίο δέχεται ο ενεργοποιητής συνήθως είναι αναλογικό. Πολλές φορές δέχεται σήμα milliamper (mA), είτε συνεχούς τάσης.

3.2.2 Η διαφοροποίηση μεταξύ ενεργοποιητή και αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Actuator – Governor)

Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών έχει την δυνατότητα να αντιληφθεί την μεταβολή των στροφών, είτε μέσω της φυγόκεντρου δύναμης και των αντιβάρων, είτε με ηλεκτρονικές πλακέτες, και συνεπώς να δράσει αναλόγως για να επαναφέρει τις επιθυμητές στροφές όπου και έχει ρυθμιστεί.

Χωρίς το χαρακτηριστικό της «σκέψης» αυτής, χωρίς δηλαδή να υπάρχει η δυνατότητα αντίληψης των στροφών από το governor, στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για έναν αυτόματο ρυθμιστή στροφών αλλά για ένα Actuator.

Όσο μεγάλο και αν είναι το μέγεθος της δύναμης που μπορεί να παρέχει ένας ενεργοποιητής, δίχως την σύνδεση και την παροχή εντολών από ένα governor, είναι μη διαχειρίσιμο όπως επίσης και η μηχανή εσωτερικής καύσης στην οποία είναι συνδεδεμένος.

Επομένως ο αν θέλαμε να δώσουμε έναν ορισμό στον ενεργοποιητή (Actuator) θα λέγαμε πως είναι μία υδραυλική-μηχανική συσκευή η οποία μετατρέπει ένα ηλεκτρικό ή πνευματικό σήμα, σε μηχανική θέση.

Η Woodward , η οποία κατέχει και το μεγαλύτερο φάσμα μοντέλων ενεργοποιητών , συνήθως χρησιμοποιεί milliamperes της τάξης 20-160 mA προκειμένου να πραγματοποιήσει μία διαδρομή από 0 έως 45 μοίρες αναλόγως τον ενεργοποιητή. Αντίστοιχα το φάσμα λειτουργίας πνευματικού συστήματος μπορεί να ποικίλει, παρόλα αυτά η διαδρομή που εκτελείται είναι πάλι από 0 έως 45 μοίρες

3.3 Εφαρμογές

Μία πολύ συνηθισμένη εφαρμογή αυτόματου ρυθμιστή στροφών είναι η εφαρμογή σε πετρελαιοκίνητες ηλεκτρογεννήτριες. Η παραγωγή ρεύματος κρίνεται αναγκαία ειδικά σε μία εποχή όπου χρησιμοποιείται πληθώρα ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συσκευών στην καθημερινότητα του ανθρώπου. Για αυτό τον λόγο η εφαρμογή αυτή εμφανίζεται σε πλοία, σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας (power plants), σε ηλεκτροπρόωση , ακόμα και σε τρένα. Η επόμενη επίσης σημαντική εφαρμογή είναι η εφαρμογή σε συστήματα μηχανικής πρόωσης. Οι εφαρμογές αυτές συναντώνται σε πλοία και σε αεροπλάνα και γενικότερα σε εφαρμογές που υπάρχει πρόωση σε ρευστά.

3.3.1 Ρυθμιστές στροφών σε ηλεκτρομηχανές

Μία πολύ διαδεδομένη χρήση, κυρίως μηχανικών ρυθμιστών στροφών, είναι η εφαρμογή τους σε ηλεκτρογεννήτριες.

Μία ηλεκτρομηχανή , απαρτίζεται από 2 κύρια μέρη :

- Τον κινητήρα/πετρελαιοκινητήρα
- Την γεννήτρια

Το governor είναι τοποθετημένο στον κινητήρα και έχει ως σκοπό να αυξομειώνει την παροχή πετρελαίου, αναλόγως την ζήτηση του φορτίου από την γεννήτρια, κρατώντας παράλληλα σταθερές στροφές.

Εδώ πρέπει να επισημάνουμε πως οι στροφές της ηλεκτρομηχανής έχουν άμεση σχέση με την παραγόμενη συχνότητα της γεννήτριας.

Επομένως , ο τύπος ο οποίος μας δίνει την συσχέτιση συχνότητας με στροφές του κινητήρα είναι ο εξής :

$$f_c = \frac{n_m P}{60} \quad (3-1)$$

Όπου,

- f_c η συχνότητα του ρεύματος
- n_m η ταχύτητα περιστροφής του πεδίου σε rpm
- P το πλήθος των μαγνητικών πόλων.

Οι ηλεκτρογεννήτριες πρέπει να παράγουν ρεύμα, το οποίο όμως πρέπει να έχει σταθερή συχνότητα, ειδάλλως υπάρχει πιθανότητα πολλές συσκευές που τροφοδοτούνται από ρεύμα να καταστραφούν.

Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών, αποτελεί κυρίαρχο ρόλο στη σταθερότητα της μηχανής, συνεπώς και της γεννήτριας και συνεπώς και της συχνότητας λειτουργίας της.

3.3.2 Ηλεκτρογεννήτριες

Στις ηλεκτρογεννήτριες εκμεταλλευόμαστε την κινητική ενέργεια μιας ΜΕΚ, προκειμένου να κινήσουμε μια γεννήτρια, με όσο το δυνατόν σταθερότερες στροφές.

Η ηλεκτρογεννήτρια αποτελείται από 2 βασικά μέρη :

1) τον κινητήρα

2)την γεννήτρια

Σε μια γεννήτρια ένας μηχανικός/ηλεκτρολόγος μελετάει 3 βασικές παραμέτρους :

1. Phase sequence
2. Voltage
3. Frequency

Η παράμετρος της συχνότητας (Frequency) είναι αυτή την οποία μπορεί το Governor να μεταβάλλει κατά την διάρκεια λειτουργίας της ηλεκτρογεννήτριας μεταβάλλοντας της στροφές της ΜΕΚ.

Συνεπώς η συχνότητα και ταχύτητα είναι και ένα από τα βασικά αντικείμενα μελέτη μας.

Οι περισσότερες ηλεκτρογεννήτριες λειτουργούν είτε στα 50 είτε στα 60 Hz. Σε μεγάλες εγκαταστάσεις με αρκετή ισχύ συναντάται η συχνότητα των 60 Hz.

Στο παράδειγμα που αναφερθήκαμε προηγουμένως η γεννήτρια η οποία συνδεόταν με την συγκεκριμένη ΜΕΚ λειτουργούσε στα 60 Hz. Το εύρος λειτουργίας της γεννήτριας είναι 58-62 Hz υπό φορτίο. Οποιαδήποτε άλλη συχνότητα θεωρείται απαγορευτική καθώς είναι πολύ πιθανό να προκληθούν βλάβες σε ηλεκτρικές συσκευές που τροφοδοτούνται από αυτή την γεννήτρια.

- **Παράδειγμα**

Αν χρησιμοποιήσουμε την σχέση 1.1 οι 684 rpm μεταφράζονται ως 57 Hz. Η συγκεκριμένη συχνότητα θεωρείται χαμηλή για την γεννήτρια υπό κατάσταση φορτίου.

Άρα συμπεραίνουμε πως το ποσοστό βύθισης 5% θεωρείται μεγάλο για την συγκεκριμένη εφαρμογή.

Μια πιο ήπια βύθιση της τάξης του 3% των ονομαστικών θεωρείται ιδανική καθώς με 3% βύθιση οι στροφές θα μειωθούν στιγμιαία στις 698.4 rpm.

Χρησιμοποιώντας την σχέση 1.1

$$f_c = \frac{n_m P}{60} = \frac{698.4 \times 5}{60} = 58.2 \text{ Hz} \quad (3-2)$$

Επομένως παρατηρούμε πως η συγκεκριμένη συχνότητα είναι εντός του φάσματος λειτουργίας της γεννήτριας.

Σημείωση : Το συμπέρασμα που προέκυψε είναι τελείως θεωρητικό λαμβάνοντας υπόψιν ελάχιστες παραμέτρους για να δείξουμε το πόσο σημαντική είναι η σχέση στροφών-συχνότητα σε μια ΜΕΚ και πως αυτή η σχέση επιδρά στην παραγωγή ρεύματος της γεννήτριας. Εν συνεχεία θα παρουσιαστούν και άλλες παράμετροι εξίσου ίδιας σημασίας.

3.3.2.1 Παράλληλη λειτουργία ηλεκτρογεννητριών (Parallel operation)

Πολλές εγκαταστάσεις, αν όχι οι περισσότερες, χρησιμοποιούν πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης σε παραλληλισμό μεταξύ τους για να υπάρξει πλήρη κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου.

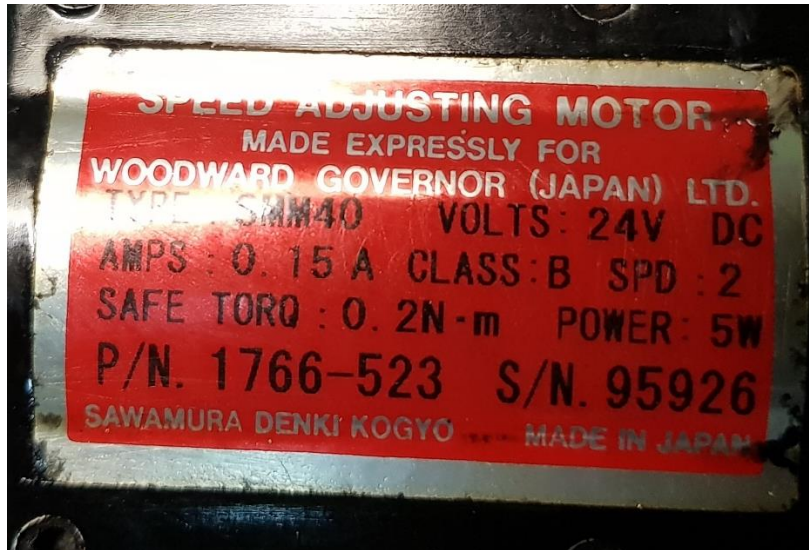
Συγκεκριμένα οι εγκαταστάσεις του δικτύου ηλεκτροδότησης όπως και η εγκατάσταση παροχής ρεύματος σε πλοία χρησιμοποιούν πολλές γεννήτριες μαζί σε παράλληλη λειτουργία.

Οι εγκαταστάσεις αυτές χρησιμοποιούν το φαινόμενο της βύθισης (Droop) που είδαμε προηγουμένως, όχι μόνο για την ομαλότερη λειτουργία, αλλά και για τον ισομοιρασμό των φορτίων.

Επίσης τα governors όσων μηχανών δουλεύουν παράλληλα δεν αρκεί να έχουν απλά ένα ποσοστό βύθισης, αλλά να έχουν το ίδιο ή όσο γίνεται πιο όμοιο ποσοστό βύθισης.

Όλη η λειτουργία των γεννητριών γίνεται κυρίως απομακρυσμένα (remote) εντός του δωματίου ελέγχου των μηχανών (Engine Control Room ECR). Εκεί ο πίνακας ελέγχου δίνει εντολή η συχνότητα των γεννητριών να είναι σταθερά στα 60 Hz (Η στα 50 Hz αναλόγως την εγκατάσταση). Όταν υπάρξει μεταβολή του φορτίου, και συνεπώς μία ελαφριά μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής, άρα και στην συχνότητα, ο αυτοματισμός της εγκατάστασης αντιλαμβάνεται αυτή την μεταβολή και δίνει την ανάλογη εντολή στον αυτόματο ρυθμιστή στροφών της κάθε μηχανής.

Η λειτουργία αυτή γίνεται χάρη σε έναν ηλεκτροκινητήρα ο οποίος βρίσκεται στον εκάστοτε governor και γυρνώντας αριστερόστροφα ή δεξιόστροφα, ανεβάζοντας είτε κατεβάζοντας το speeder piston, το οποίο συμπιέζει είτε αποσυμπιέζει το speeder spring. Συνήθως προκειμένου να λειτουργήσει δέχεται τάση 24 V DC και αναλόγως την εντολή (Increase- Decrease) δέχεται τάση με ανάποδη είτε ορθή πολικότητα. Ένας ατέρμων κοχλίας στην έξοδο του κινητήρα αναλαμβάνει την μείωση των στροφών και μειώνει τις στροφές αναλόγως με το part number το οποίο αναγράφεται στην ετικέτα του κατασκευαστή.

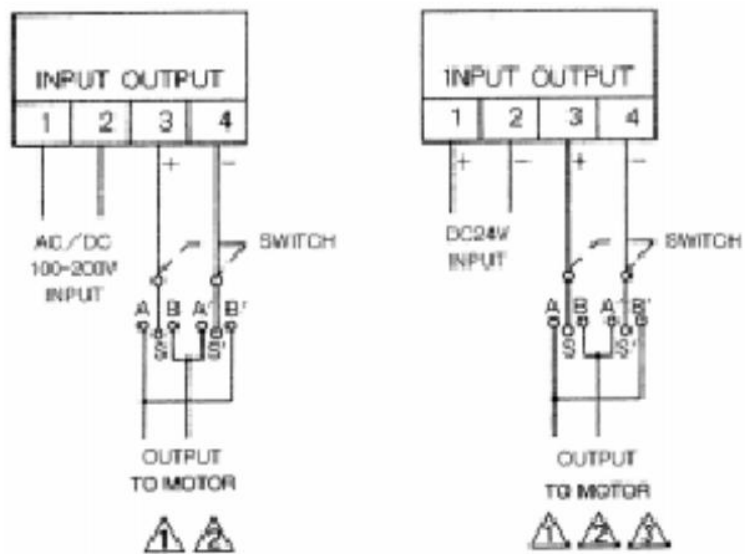


Σχήμα 3-3 Ταμπελάκι τεχνικών χαρακτηριστικών ηλεκτροκινητήρα αυτόματου ρυθμιστή στροφών

Στο πλαίσιο όπου βλέπουμε παραπάνω αναγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του, ο προσδιοριστικός αριθμός εξαρτήματος (part number) και ο σειριακός αριθμός (serial number).

- **APM Motor Controller**

Το κύκλωμα APM (Advanced Permanent Magnet) motor controller είναι ένα κύκλωμα της εταιρείας woodward. Αποτελεί ένα από τα παρελκόμενα εξαρτήματα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Η λειτουργία του είναι να μετασχηματίζει την τάση από 220 V AC σε 24 V DC ώστε να δοθεί αυτή η τάση ως παροχή στον ηλεκτροκινητήρα του governor, ο οποίος εκτελεί την εντολή αύξησης ή μείωσης των επιθυμητών στροφών του. Εκτός από αυτές τις δυνατότητες παρέχει κ ένα trim ποτενσιόμετρο ώστε να γίνει μία βελτιστοποίηση των στροφών περιστροφής του ηλεκτροκινητήρα με σκοπό την ίδια ταχύτητα περιστροφής και των τριών ηλεκτροκινητήρων. Το προτεινόμενο εύρος τάσης εξόδου του είναι από 10 έως 24 Vdc. Περιστρέφοντας αριστερόστροφα (Counterclockwise) το trim pot η τάση εξόδου μειώνεται, ενώ δεξιόστροφα (Clockwise) η τάση εξόδου αυξάνεται.



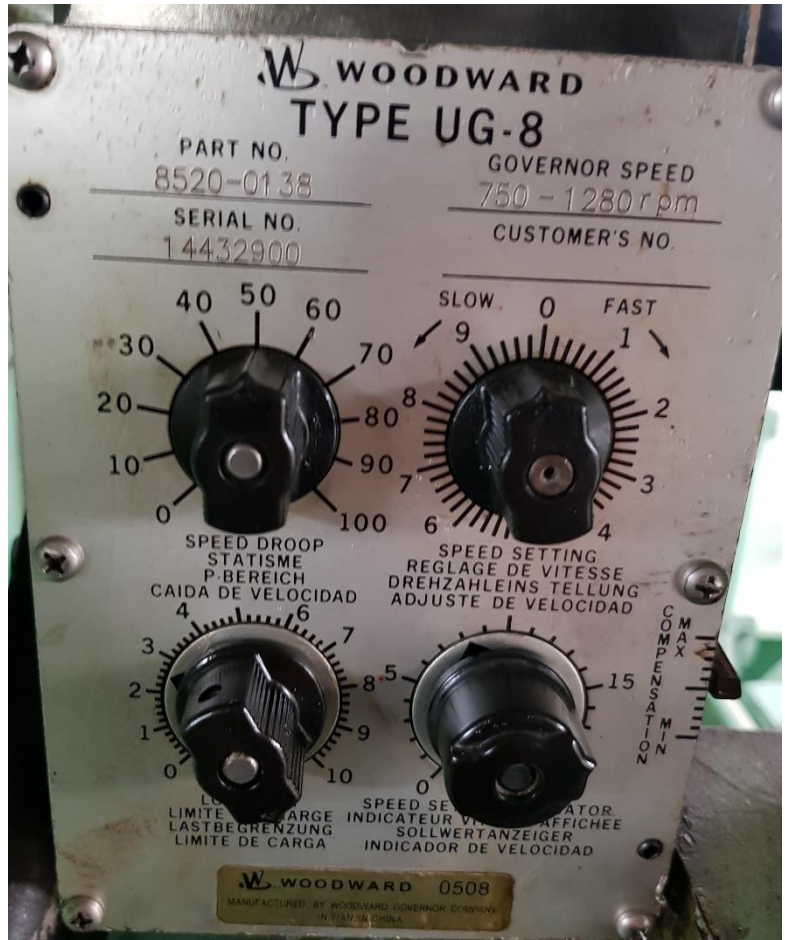
Σχήμα 3-4 Συνδεσμολογία ελεγκτή APM (Advanced Permanent Magnet). (Πηγή : APM controller)

Οι ακροδέκτες 1-2 είναι η τάση εισόδου (220 Volt AC / DC , είτε 24 Volt DC), ενώ οι ακροδέκτες 3-4 είναι η τάση εξόδου προς τον ηλεκτροκινητήρα (24 Volt DC)



Σχήμα 3-5 Φωτό πάνελ ηλεκτρομηχανών ενώ είναι σε παράλληλη λειτουργία και οι 3 ταυτόχρονα. Διακρίνεται ο διαμοιρασμός του φορτίου με τα Kw να είναι ίδια και στις 3 ηλεκτρογεννήτριες (Ο όρος D/G σημαίνει Diesel Generator).

Αντιστοίχως και το governor της κάθε μηχανής παρατηρούμε παρακάτω πως είναι ρυθμισμένα με την ίδια ρύθμιση Speed Droop (Το πάνω αριστερά κουμπί είναι ρυθμισμένο στο 50 και στα 3 governors).



Σχήμα 3-6 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο 1 μηχανής



Σχήμα 3-7 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο2 ηλεκτρομηχανής.



Σχήμα 3-8 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών της Νο3 ηλεκτρομηχανής.

Όπως παρατηρείται επιθυμούμε μία μέση κατάσταση βύθισης (Droop) καθώς σε πρακτικό επίπεδο αναζητούμε μία «χρυσή τομή» ώστε η γεννήτρια να μπορεί να ανταπεξέλθει στις ξαφνικές μεταβολές φορτίου (sudden loads) χωρίς να υπάρχουν μεγάλες βυθίσεις, επομένως και πτώση της ταχύτητας περιστροφής των μηχανών εσωτερικής καύσης, αλλά και δίχως να υπάρχει ασταθή λειτουργία της μηχανής (συνεχείς μεταβολή των στροφών).

Σημείωση : καθώς η ταχύτητα περιστροφής των μηχανών μπορεί να μεταβάλλεται και να υπάρχουν βυθίσεις, είναι λογικό να υπάρχει μεταβολή και στην συχνότητα παραγωγής ρεύματος, καθώς όπως παρατηρήθηκε και από την σχέση 1.1 η ταχύτητα περιστροφής είναι ανάλογη της συχνότητας.

Επίσης προκειμένου η ένδειξη του «50» στο Droop να είναι ίδια και στην πραγματικότητα και όχι μόνο στην ένδειξη θα πρέπει να γίνει εσωτερική ρύθμιση στον αυτόματο ρυθμιστή στροφών ώστε η ένδειξη «0» να είναι όντως μηδενική. Δηλαδή στην ένδειξη μηδέν θα πρέπει η βύθιση να είναι από μηδέν έως τρεις στροφές θετική, ειδάλλως η ένδειξη της βύθισης στο πάνελ θα είναι λανθασμένη και ανόμοια μεταξύ των τριών αυτομάτων ρυθμιστών στροφών.

3.3.3 Εφαρμογή αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε μηχανή εσωτερικής καύσης πρόωσης με προπέλα (Propulsion)

Καθώς οι αυτόματοι ρυθμιστές στροφών έχουν πληθώρα εφαρμογών, σε μηχανές εσωτερικής καύσης και όχι μόνο, μια πολύ συνηθισμένη εφαρμογή σε πετρελαιοκίνητους κινητήρες είναι η χρήση τους μηχανές όπου στον άξονα εξόδου υπάρχει πρόωση (Propulsion). Πρόκειται για πετρελαιοκίνητους κινητήρες με μεγάλες κινούμενες μάζες και χαμηλές στροφές λειτουργίας (≤ 500 στροφών / λεπτό).

Οι μηχανές που συναντώνται σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις είναι είτε τετράχρονες (4T) είτε δίχρονες (2T). Συνήθως όταν ο χώρος της εγκατάστασης είναι περιορισμένος χρησιμοποιούνται 4χρονες πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ όταν δεν τίθεται ζήτημα περιορισμού του χώρου χρησιμοποιούνται 2χρονες καθώς είναι πιο αποδοτικές. Ο λόγος που υπάρχει ανάγκη χώρου στις 2χρονες μηχανές εσωτερικής καύσης, κ ειδικά τέτοιων διαστάσεων, οφείλεται στο γεγονός πως χρειάζεται έναν ειδικά διαμορφωμένο θάλαμο εξαγωγής (exhaust chamber) , προκειμένου τα καυσαέρια να έχουν τη ιδανική ταχύτητα για την σωστή εξαγωγή τους.

Επίσης όπως αντίστοιχα πολλές ηλεκτρογεννήτριες μπορούν να δουλεύουν σε παράλληλη λειτουργία, αντίστοιχα υπάρχουν πετρελαιοκινητήρες με πρόωση που δουλεύουν σε παράλληλη λειτουργία.

Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση μηχανισμού σύμπλεξης (clutch), όπου οι δύο άξονες εξόδου καταλήγουν σε έναν. Είναι πολύ όμοια με τη φιλοσοφία των ηλεκτρογεννητριών απλώς υπάρχει μηχανική σύμπλεξη των μηχανικών αντί για ηλεκτρεγερτική. Εμπεριέχονται πολλές λεπτομέρειες σε όλη αυτή την διαδικασία και ότι διορθώσεις και αντιμετώπισεις προβλημάτων, πρέπει να γίνονται από εξειδικευμένο προσωπικό.

Σε εφαρμογές σαν και αυτή υπάρχει πληθώρα αυτοματισμών για το controlling της μηχανής εσωτερικής καύσης , με κυρίαρχο ρόλο να έχει το governor.



Σχήμα 3-9 Ενδείξεις οργάνων σε εγκατάσταση πλοίου με τέσσερις κύριες τετράχρορες μηχανές εσωτερικής καύσης.

Παραπάνω εμφανίζονται το ζευγάρι μηχανών 3-4 οι οποίες καταλήγουν σε έναν κοινό άξονα χάρη στο σύστημα σύμπλεξης των εξόδων των μηχανών. Εφόσον καταλήγουν στον ίδιο άξονα θα πρέπει οι ταχύτητες περιστροφής των μηχανών να είναι ίδιες (όπως είναι και στην εικόνα τα δύο μεσαία μετρητικά όργανα) και επίσης να μπορούν να παραλάβουν το φορτίο της προπέλας ισομοιρασμένα.

4 Αρχές λειτουργίας αυτόματων ρυθμιστών στροφών - Δυναμικά χαρακτηριστικά και έλεγχος μηχανών εσωτερικής καύσης - PID (Propotional – Integral – Derivative)

4.1 Ορισμός

Ο όρος PID προκύπτει από τα αρχικά των λέξεων **Proportional (Αναλογικός), Integral** και **Derivative**. Συστήματα ελέγχου χρησιμοποιούν τα PID για να ελαχιστοποιήσουν την ανάγκη για συνεχή προσοχή και έλεγχο από κάποιον παρατηρητή. Προκειμένου να γίνουν αντιληπτοί αυτοί οι όροι ,όπως και η σημασία τους, παρακάτω θα παρουσιαστούν ορισμένα απτά παραδείγματα της καθημερινότητας, και συγκεκριμένα παραδείγματα από τον χώρο του αυτοκινήτου.

4.1.1 Αναλογικός έλεγχος (Proportional Control)

Ρύθμιση της θέσης της πεταλούδας του γκαζιού ώστε να διατηρηθεί σταθερή ταχύτητα σε επίπεδο οδόστρωμα.

Ο αναλογικός (Proportional) έλεγχος έχει ως αποτέλεσμα την σταθερή ταχύτητα με την προϋπόθεση ότι ο κινητήρας του οχήματος δεν επιδέχεται κάποιο φορτίο όπως παραδείγματος χάρη ένα ύψωμα. Αν το όχημα συναντήσει κάποιο ύψωμα είναι αναμενόμενο πως θα επιβραδύνει, όπως επίσης αν το οδόστρωμα ξαφνικά αποκτήσει κατηφορική κλίση , η ταχύτητα του θα αυξηθεί.

4.1.2 Ακέραιος έλεγχος (Integral - Reset control)

Το cruise control διατηρεί σταθερή ταχύτητα ανεξαρτήτως της κλίσης του οδοστρώματος.

Ο ακέραιος έλεγχος (Internal control), ο οποίος πολλές φορές καλείται και reset, παρέχει επιπλέον δράση στον αναλογικό (Proportional) έλεγχο. Την στιγμή που η μεταβλητή της ταχύτητας δεν συμπίπτει με την επιθυμητή , ο ακέραιος ελεγκτής επαναφέρει την ταχύτητα στο επιθυμητό σημείο.

4.1.3 Δευτερογενής έλεγχος (Derivative control - Preact και rate time)

Επιτάχυνση σε λωρίδα ταχείας κυκλοφορίας με αυξημένη κίνηση στις υπόλοιπες λωρίδες

Ο δευτερογενής έλεγχος (derivative control) συνήθως ορίζεται και ως preact ή rate. Είναι κάπως δύσκολο να δοθεί μία ακριβής αντιστοιχία του όρου αυτού, καθώς η δράση λαμβάνει χώρα μόνο όταν η διεργασία αλλάζει και είναι άμεσα συνδεδεμένη με την ταχύτητα στην οποία η διεργασία αλλάζει. Μπαίνοντας σε έναν αυτοκινητόδρομο με μεγάλη κυκλοφορία είναι δύσκολη η επίτευξη σταθερής

ταχύτητας. Χρειάζεται συνεχής διόρθωση της επιτάχυνσης προς την αύξηση αλλά και προς την μείωση.

4.2 Προσέγγιση των PID με χρήση μαθηματικών και γραφικών μοντέλων

Γενικότερα, καθώς όπως έχουμε πει, ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών θεωρείται ένας αυτοματισμός, ο όρος αυτοματισμός είναι πολύ απλά η επιθυμία να εκτελούνται στόχοι και εντολές με την μικρότερη δυνατή προσπάθεια από τον άνθρωπο.

Στην επιστήμη της μηχανολογίας παρόλα αυτά, συναντάμε και προσπαθούμε να μεταβάλλουμε πληθώρα μεταβλητών. Λόγω της πληθώρας αυτών των μεταβλητών (όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η στάθμη κάποιου ρευστού, η ταχύτητα, η τάση, το ρεύμα κλπ), η προσδοκία μας είναι κάτι παραπάνω από κάποιες απλές αποφάσεις του τύπου on/off ή ανοιχτό/κλειστό αντίστοιχα. Δουλεύοντας λοιπόν με πραγματικές τιμές μεταβλητών αυξάνονται οι δυνατότητες που έχουμε σε έναν αυτοματισμό, ανεξαρτήτως το αν δουλεύουμε σε εφαρμογές αυτοματισμού ανοιχτού βρόγχου, είτε κλειστού βρόγχου όπου και υπάρχει συνεχής ανατροφοδότηση (feedback).

Παρακάτω ακολουθούν μέθοδοι προσέγγισης από επιστήμονες, όπως και πειραματικές προσεγγίσεις ανάλυσης των δυναμικών χαρακτηριστικών των ελεγκτών PID

4.2.1 Χρήση των PID ελεγκτών

Οι PID ελεγκτές χρησιμοποιούνται παραπάνω από έναν αιώνα σε πληθώρα μεθόδων, όπως σε εφαρμογές ως συσκευές μηχανικές, πνευματικές και ηλεκτρονικές. Ο ψηφιακός ελεγκτής PID, ο οποίος χρησιμοποιεί επεξεργαστή και πληθώρα περιφερειακών ηλεκτρονικών, έχει κερδίσει μεγάλο μερίδιο στην βιομηχανική αγορά.

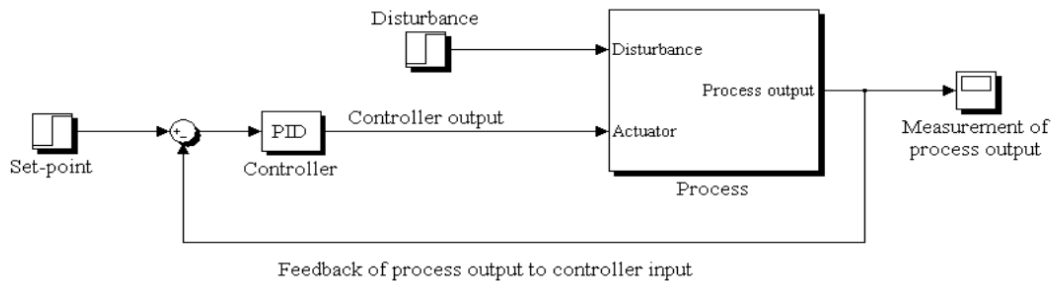
4.2.2 Έλεγχος ανατροφοδότησης – Κλειστός βρόγχος

Καθώς οι περισσότεροι βιομηχανικοί αυτοματισμοί λειτουργούν σε κατάσταση κλειστού βρόγχου θα ερευνήσουμε κυρίως τέτοιου είδους εφαρμογή.

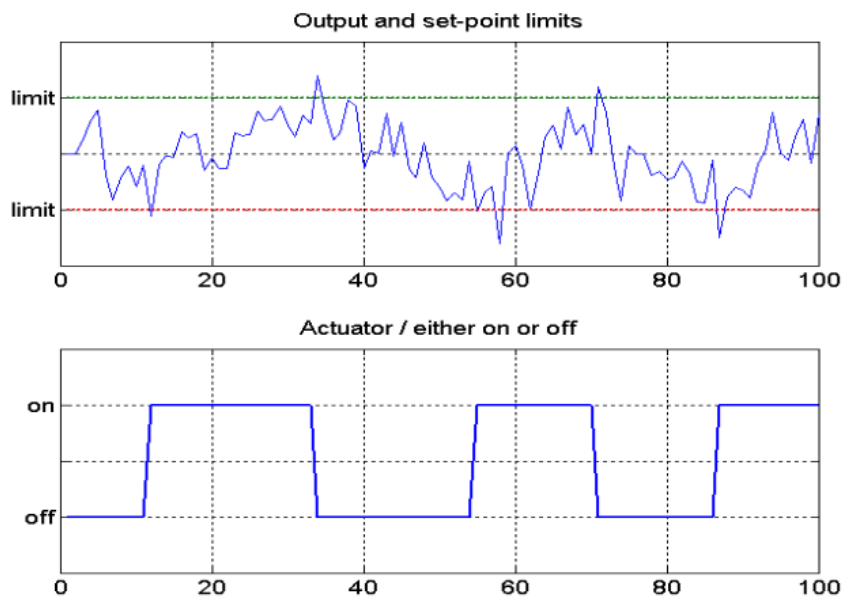
Σε έναν αυτοματισμό μιας πετρελαιοκίνητης μηχανής εσωτερικής καύσης με πληθώρα μεταβλητών όπως η θερμοκρασία, η ροή καυσίμου, η πίεση καυσίμου, η πίεση σάρωσης, η γωνιακή ταχύτητα, είναι αδύνατο ρυθμίζοντας την θέση των βαλβίδων και ενεργοποιητών (Actuators) σε σταθερές θέσεις να θεωρήσουμε πως η μηχανή θα παραμείνει σε μία κατάσταση όπου θα λειτουργεί αρμονικά.

Μεταβολές φορτίου και στροφών συνεχώς θα συμβαίνουν και η συνεχής παρακολούθηση θα είναι αναγκαία, όπως επίσης θα πρέπει να ακολουθήσει ρύθμιση

των actuators. Αυτός ο κύκλος διεργασιών, με τις σωστές δράσεις να έχουν προκύψει, είναι αυτό που συναντάται ως λειτουργία κλειστού βρόγχου. Γραφικά μπορεί να γίνει κατανοητό από το παρακάτω γράφημα :



Σχήμα 4-1 Σχεδιάγραμμα κλειστού βρόγχου. Ο ελεγκτής που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό ανατροφοδότησης μπορεί να είναι οποιασδήποτε μορφής όπως ηλεκτρικός, με χρήση υπολογιστή, μηχανικός ή πνευματικός (με χρήση αέρα). (Πηγή : *An introduction to open-loop control*)



Σχήμα 4-2 Παρουσίαση ενός on/off συστήματος με τον x άξονα να είναι ο χρόνος. (Πηγή : *An introduction to open-loop control*).

Το παραπάνω διάγραμμα είναι η πραγματική τιμή και τα όρια που έχουν δοθεί. Το κάτω διάγραμμα δείχνει την επεξεργασία της εισόδου στο actuator (εάν είναι on ή off).

4.2.3 Ο PID ελεγκτής ως αλγόριθμος

Το κύριο μέρος στον ελεγκτή των δυναμικών στοιχείων PID (ο αλγόριθμος δηλαδή), διαχειρίζεται κάποιες βασικές μεταβλητές, οι οποίες είναι : η ορισμένη ταχύτητα (η επιθυμητή) περιστροφής ενός κινητήρα , η πραγματική ταχύτητα, και / ή έξοδος του ελεγκτή. Η διαφορά μεταξύ επιθυμητής και πραγματικής ταχύτητας ορίζεται ως το σφάλμα ελέγχου. Αυτό που αναλαμβάνει ο ελεγκτής να κάνει είναι να υπολογίσει την κατάλληλη απόκριση σύμφωνα με το σφάλμα ελέγχου που προκύπτει. Ο σκοπός είναι να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα ελέγχου το γρηγορότερο δυνατόν και με όσο το δυνατόν μικρότερη προσπάθεια.

4.2.4 PID ελεγκτής σύμφωνα με τα πρότυπα ISA

Η πιο κοινή εξίσωση του PID ελεγκτή ονομάζεται ISA εξίσωση.

- Το αναλογικό gain (proportional gain) του ελεγκτή, K_c
- Ο ολοκληρωματικός χρόνος (integral time) T_I και
- Ο δευτερογενής χρόνος (derivative time), T_D

Παρακάτω δίνεται η εξίσωση με τις μεταβλητές αυτές

$$u(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_I} \int_{-\infty}^t e dt + T_D \frac{de}{dt} \right) \quad (4-1)$$

Όπου $u(t)$ είναι το σήμα ελέγχου (control signal) και $e(t)$ το σφάλμα ελέγχου (control error). Όταν χρησιμοποιείται αυτή η εξίσωση, μια μεγάλη proportional gain κάνει τον ελεγκτή αρκετά απότομο στην συμπεριφορά του, ενώ ένα μικρότερο gain κάνει τον ελεγκτή λιγότερα απότομο. Ένας μικρός χρόνος επανεκκίνησης (integral time) σημαίνει γρήγορη επαναφορά (το οποίο δημιουργεί απότομη συμπεριφορά του ελεγκτή), και όταν υπάρχει μεγάλο derivative time ο ελεγκτής δίνει μεγάλη έμφαση στο ποσοστό αλλαγής του σφάλματος ελέγχου (άρα γίνεται πάλι πιο απότομος ο ελεγκτής σε αυτή την περίπτωση).

4.2.5 PID ελεγκτής με ανεξάρτητες μεταβλητές

Μία άλλη γνωστή εξίσωση PID ελεγκτή είναι αυτή των ανεξάρτητων μεταβλητών. Η διαφορά με την ISA προτύπου είναι ότι τα τρία μέρη του ελεγκτή (Το P, το I και το D μέρος) είναι διαχωρισμένα.

- Το αναλογικό gain (proportional gain), αλλά αντί για integral time υπάρχει η
- Σταθερά ολοκλήρωσης K_t ενώ ο derivative time αντικαθίσταται από
- Την σταθερά απόκλισης (derivation constant) K_D .

$$u(t) = K_c e(t) + K_t \int_{-\infty}^t e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad (4-2)$$

Η σχέση μεταξύ των παραμέτρων είναι :

$$K_t = \frac{K_c}{T_I} \quad (4-3)$$

$$K_D = K_c T_D \quad (4-4)$$

4.3 Ρύθμιση των PID – από την θεωρία στην πράξη

Ως μηχανικοί μελετώντας τον βέλτιστο έλεγχο λειτουργίας μηχανών εσωτερικής καύσης, οφείλουμε να γνωρίζουμε την θεωρία των δυναμικών χαρακτηριστικών μιας μηχανής εσωτερικής καύσης. Επίσης, οφείλουμε ως μηχανικοί να μπορούμε να διαχειριστούμε όλα αυτά τα δυναμικά στοιχεία και να γνωρίζουμε σε ποιες από όλες αυτές τις μεταβλητές να επέμβουμε αναλόγως την περίπτωση και το πρόβλημα το οποίο αντιμετωπίζουμε. Έχοντας λοιπόν μελετήσει τις μεταβλητές των παραπάνω εξισώσεων, καλούμαστε να ρυθμίσουμε τους ελεγκτές χειροκίνητα ώστε να διαχειριστούμε κατάλληλα την εκάστοτε περίπτωση. Ξεκινώντας, χρησιμοποιούμε τον ελεγκτή αρχικά ως ελεγκτή του proportional gain, παραδείγματος χάρη να τοποθετήσουμε στο K_c μια μικρή τιμή, στο T_I μια μεγάλη τιμή και στο T_D την τιμή μηδέν.

Πίνακας 4-1 Εμπειρικοί κανόνες για την συμπεριφορά των ελεγχτών ανάλογα με τις δράσεις που γίνονται.

<u>Δράση</u>	<u>Ταχύτητα</u>	<u>Σταθερότητα</u>
Αύξηση K_c	αύξηση	μείωση
Αύξηση T_I	μείωση	αύξηση
Αύξηση T_D	αύξηση	αύξηση

4.3.1 Αρμονικοί παλμοί Ziegler – Nichols (Ziegler – Nichols harmonic oscillations)

Μία αρκετά κοινή πειραματική διαδικασία που χρησιμοποιείται συχνά, ονομάζεται Ziegler – Nichols αρμονικοί παλμοί. Η μέθοδος αυτή υπολογίζει τους όρους K_c , T_i , T_D . Είναι ευρέως διαδεδομένη μέθοδος λόγω του ότι πρόκειται για μία απλή διαδικασία, και λόγω του γεγονότος ότι μπορεί να αξιοποιηθεί σε μία ήδη υπάρχουσα επεξεργασία δεδομένων. Καθώς η διαδικασία πραγματοποιείται στην ήδη υπάρχουσα κατάσταση, όλα τα δυναμικά χαρακτηριστικά λαμβάνουν χώρα αυτόματα. Παρακάτω ακολουθούν τα βήματα της διαδικασίας Ziegler – Nichols :

- Ο ελεγκτής χρησιμοποιείται αρχικά ως ένας απλός ελεγκτής Proportional (έχοντας απενεργοποιημένα την Integral και την παράγωγο (Derivative) δράση)
- Γίνεται κατάλληλη επιλογή απολαβής (Gain) του ελεγκτή, K_c , ώστε στο σύστημα να επικρατεί μία αρμονική ταλάντωση. Ο παλμός που θα προκύψει (σε ιδανικές συνθήκες) θα είναι μία ημιτονοειδής καμπύλη με σταθερή περίοδο. Η πραγματική τιμή και το σήμα ελέγχου απεικονίζονται ως κυματομορφές με την ίδια συχνότητα, αλλά συνήθως είναι ευκολότερο να παρατηρηθούν οι παλμοί στο σήμα στην είσοδο της επεξεργασίας, καθώς το σήμα αυτό έχει μεγαλύτερο πλάτος ταλάντωσης. Αν οι παλμοί αυτοί μειωθούν σε πλάτος, αυξάνεται η μεταβλητή K_c , ενώ αν τυχόν αυξηθεί το πλάτος τους, η μεταβλητή K_c μειώνεται. Χρήζει μεγάλη προσοχή και έχει πολύ σημασία να μην γίνει υπέρβαση του πλάτους του σήματος εισόδου επεξεργασίας.
- Το μικρότερο gain ελέγχου με το οποίο επιτυγχάνεται αρμονικές ταλαντώσεις (harmonic oscillations), ονομάζεται $K_{c,max}$.
- Η περίοδος των παλμών έχει περίοδο και ορίζεται ως P_u .
- Ακολουθεί ο πίνακας με τον οποίο γίνεται η ρύθμιση του ελεγκτή.

Πίνακας 4-2 Ziegler – Nichols αρμονικοί παλμοί.

	Gain , K_c	Integral time, T_i	Derivative time, T_D
P - ελεγκτής	$0.5K_{c,max}$	∞	0
PI - ελεγκτής	$0.45K_{c,max}$	$\frac{P_u}{1.2}$	0

PID - ελεγκτής	$0.6K_{C,max}$	$\frac{P_u}{2}$	$\frac{P_u}{8}$
----------------	----------------	-----------------	-----------------

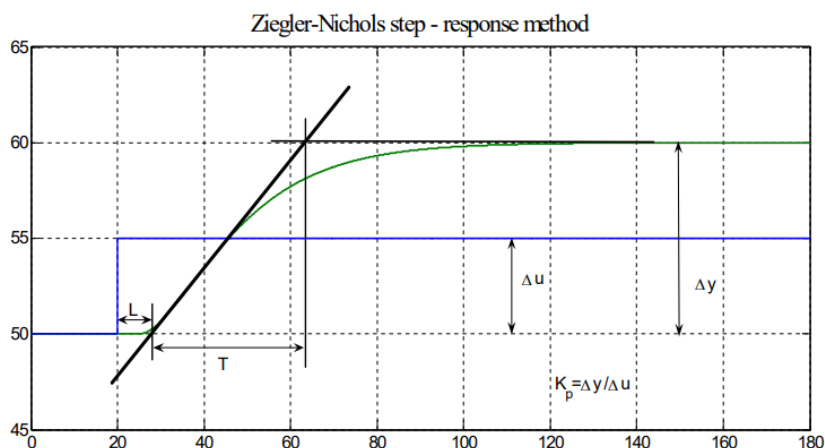
Αυτή η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί χωρίς να είναι απαραίτητη κάποια θεωρητική γνώση της διαδικασίας. Είναι αρκετά χρήσιμο σε βιομηχανικές εφαρμογές και οι τιμές που εφαρμόζονται είναι πολύ κοντά στους αρμονικούς παλμούς του πίνακα. Συχνά το αποτέλεσμα μπορεί να είναι κάπως απότομο, και έτσι μπορεί να γίνει μείωση των τριών παραμέτρων κατά 30 έως 50 %.

4.3.2 Ziegler – Nichols μέθοδος βασισμένη σε απόκριση βήματος επεξεργασίας (process step response)

Για τις ανοιχτού βρόγχου (open loop) εφαρμογές μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτή η μέθοδος μετρώντας τα βήματα απόκρισης.

Η διαδικασία είναι :

- Μέτρηση του βήματος απόκρισης. Αρχικά χρησιμοποιείται ο ελεγκτής σε χειροκίνητη λειτουργία και στη συνέχεια μετά από την επίτευξη της ιδανικής steady state κατάστασης, ο χειριστής πρέπει να πραγματοποιήσει μία ξαφνική αλλαγή στο σήμα ελέγχου (προσομοίωση ενός ξαφνικού φορτίου).
- Καταγράφοντας την πραγματική τιμή σε γράφημα , πραγματοποιείται ένα μοντέλο επεξεργασίας με τις διεργασίες gain K_p , μία χρονική σταθερά , T και μία χρονοκαθυστέρηση, L .



Σχήμα 4-3 Ziegler - Nichols μέθοδος βηματικής απόκρισης. (Πηγή : Tuning rules for PID controllers).

Απόκριση βήματος. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν ποίκιλοι τρόποι για να απεικονισθούν γραφικά οι παράμετροι. Στην πραγματικότητα τα βήματα απόκρισης σπάνια είναι καθαρά και χωρίς «θορύβους». Για αυτό το λόγο συνιστάται να επαναλαμβάνεται η διαδικασία αναγνώρισης των παραμέτρων μέσω παρόμοιων γραφικών μεθόδων. Όχι μόνο στην θετική κατεύθυνση (με $\gamma > 0$) αλλά και την θετική κατεύθυνση ($\gamma < 0$).

Πίνακας 4-3 Ziegler – Nichols μέθοδος βήματος απόκρισης.

Ελεγκτής	Gain , K_c	Integral time, T_1	Derivative time, T_D
P - ελεγκτής	$\frac{T}{K_p L}$	∞	0
PI - ελεγκτής	$\frac{0.9T}{K_p L}$	3L	0
PID - ελεγκτής	$\frac{1.2T}{K_p L}$	2L	$\frac{L}{2}$

4.3.3 Cohen and Coons μέθοδος βηματικής απόκρισης (step – response method)

Πίνακας 4-4 Οδηγίες ρύθμισης PID Cohen and Coons.

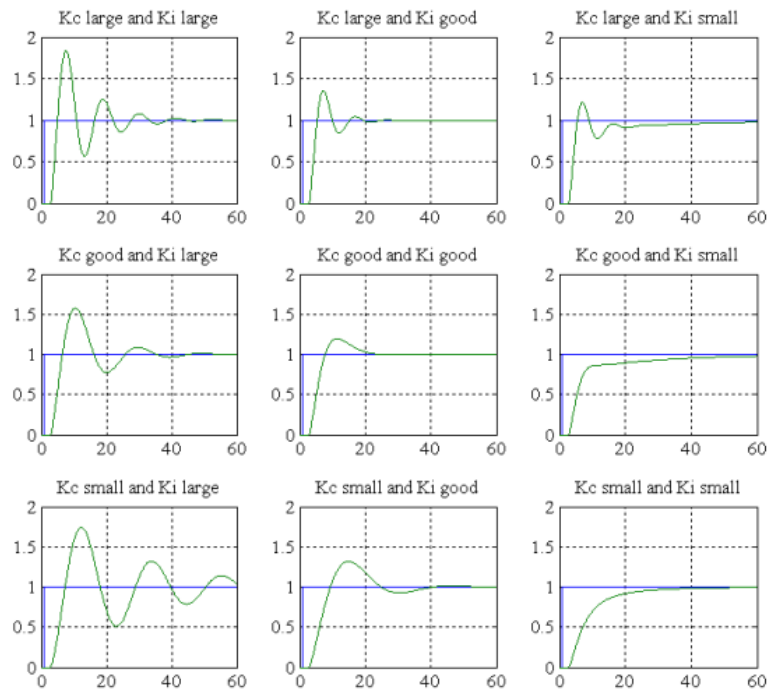
Ελεγκτής	Gain , K_c	Integral time, T_1	Derivative time, T_D
P - ελεγκτής	$\frac{1}{K_p} \left(\frac{T}{L} + 0.35 \right)$	∞	0
PI - ελεγκτής	$\frac{0.9}{K_p} \left(\frac{T}{L} + 0.092 \right)$	$\frac{(3.3T + 0.3L)}{(T + 2.2L)} L$	0

PD - ελεγκτής	$\frac{1.24}{K_p} \left(\frac{T}{L} + 0.13 \right)$	∞	$\frac{(0.27T - 0.09L)}{(T + 0.13L)} L$
PID - ελεγκτής	$\frac{1.35}{K_p} \left(\frac{T}{L} + 0.18 \right)$	$\frac{(2.5T - 0.5L)}{(T + 0.61L)} L$	$\left(\frac{0.37T}{T + 0.19L} \right)^l$

4.3.4 Μέθοδος Dahlins (Dahlins method)

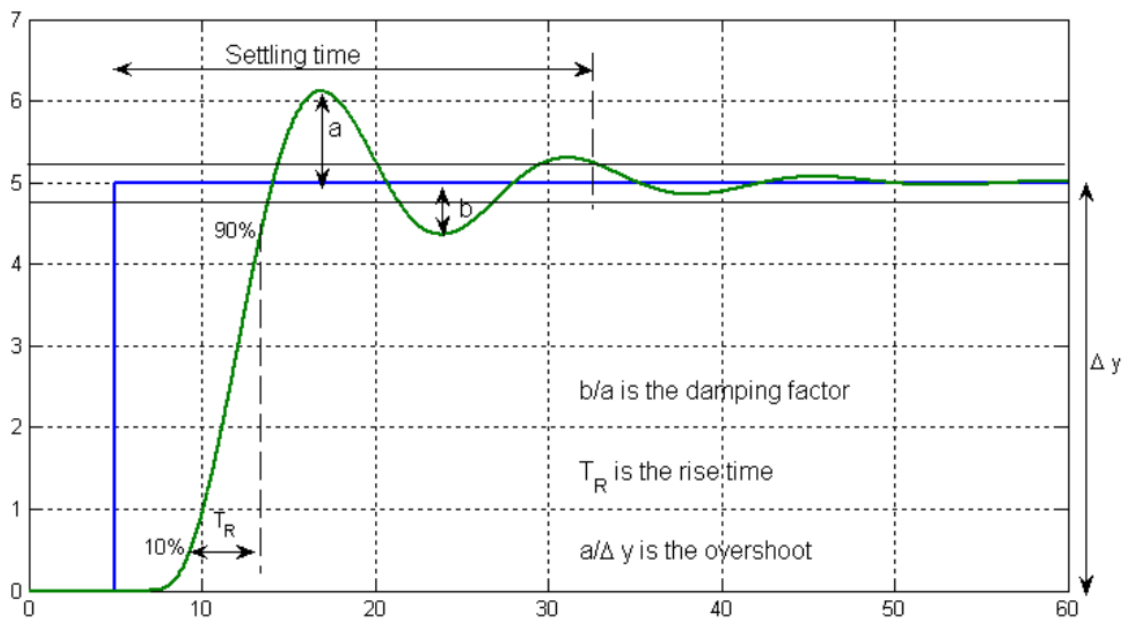
Μία πιθανή μέθοδος βελτίωσης των PI ελεγκτών η οποία βασίζεται επίσης στην βηματική απόκριση (step – response) στο figure 6. Η μέθοδος αυτή αναφέρεται και ως lamda – tuning.

- Βάσει των τιμών των μεταβλητών K_p , T και L , υπολογίζονται οι παράμετροι του ελεγκτή σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους
- Όπου το λ είναι ανάλογο του συντελεστή λάμδα (κ) και προκύπτει από την σχέση :
- Η επιλογή του συντελεστή λάμδα να είναι μικρότερος από την μονάδα ($\kappa < 1$) δίνει μία απότομη απόκριση , ενώ όταν ο συντελεστής αυτός είναι μεγαλύτερος από την μονάδα ($\kappa > 1$) προκύπτει μία πιο αργή απόκριση.



Σχήμα 4-4 Παράδειγμα διαγραμμάτων χρησιμοποιώντας PID ελεγκτές. (Πηγή : *Tuning rules for PID controllers*).

Ποιες μετρήσεις χρησιμοποιούνται ως σημείο αναφοράς ώστε να διασαφηνιστεί ότι πρόκειται για έναν ελεγκτή σωστά ρυθμισμένο;



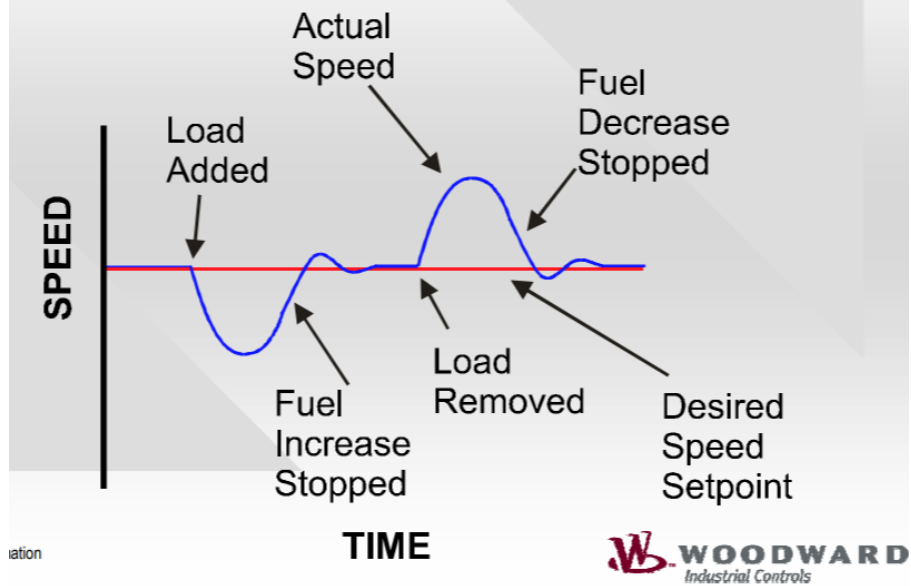
Σχήμα 4-5 Μετρήσεις ποιότητας ελέγχου. Πρόκειται για μία ιδανική καμπύλη PID.
(Πηγή : *Tuning rules for PID controllers*).

Ένα διάγραμμα ιδανικής ρύθμισης ενός συστήματος PID. Η επιθυμητή (μπλε γραμμή Σχήμα 4-5) και η πραγματική (πράσινη καμπύλη Σχήμα 4-5) τιμή είναι αυτές που παριστάνονται στο διάγραμμα. Η καμπύλη των πραγματικών στροφών είναι ρυθμισμένη βάσει της σταδιακής αλλαγής των ονομαστικών στροφών.

Όταν παρατηρούμε την έξοδο του ελεγκτή (controller output), ο γενικός κανόνας είναι πως μεγάλες και ξαφνικές μεταβολές είναι ένα μη επιθυμητό φαινόμενο, επομένως μία ήπια και προσεκτική έξοδος του ελεγκτή είναι το ιδανικό. Αυτό το φαινόμενο είναι αντιφατικό σε σχέση με τις μετρήσεις που δέχεται ως είσοδος ο ελεγκτής. Για αυτό το λόγο πρέπει να γίνουν κάποιοι συμβιβασμοί.

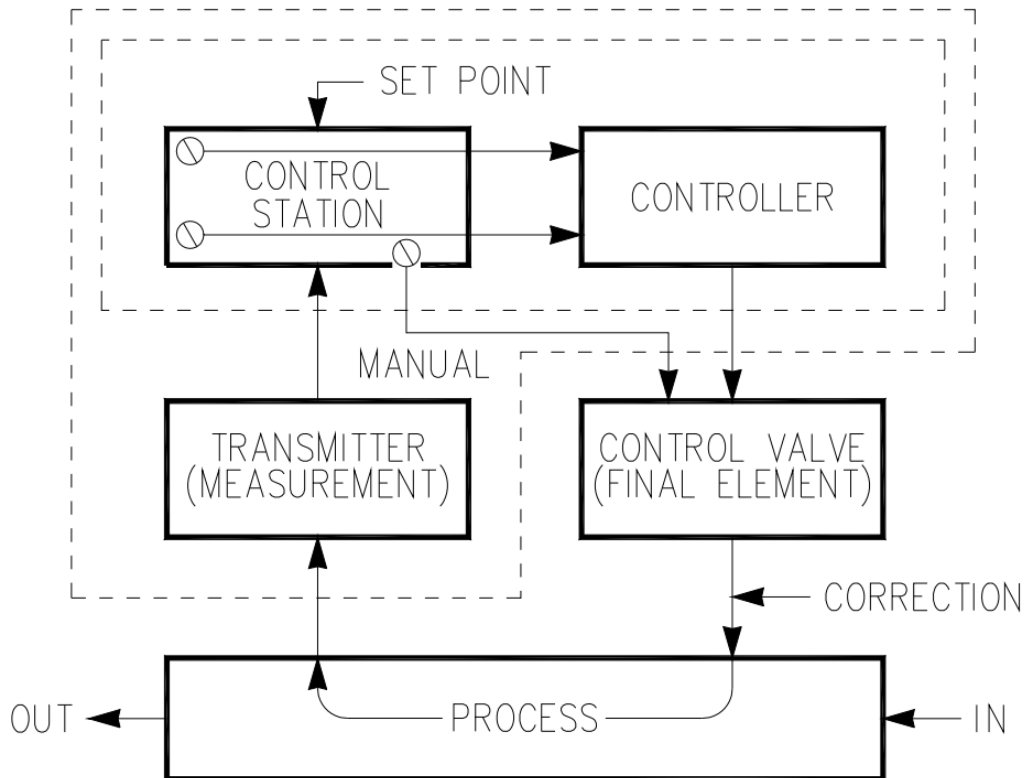
Μία άλλη προσέγγιση, σε μαθηματικό επίπεδο, είναι ο υπολογισμός του τετραγωνικού σφάλματος του **integral** (integral square error), μεταξύ της διαφοράς της επιθυμητής ταχύτητας και της πραγματικής ταχύτητας όπως επίσης ο υπολογισμός του τετραγωνικού σφάλματος του **derivative** στην έξοδο του ελεγκτή. Εφόσον γίνει η προσέγγιση των σφαλμάτων αυτών είναι εφικτό να γίνει και η ελαχιστοποίησή τους. Παρακάτω απεικονίζεται το διάγραμμα των υπολογισμών αυτών.

“Text Book” Dynamic Response



Σχήμα 4-6 Απεικόνιση μίας αληθοφανής κατάστασης μεταβολής φορτίου και ταχύτητας περιστροφής. (Πηγή : *Digital Control Basics*).

Process Control Loop



Σχήμα 4-7 Σχεδιάγραμμα κλειστού βρόγχου το οποίο εσωτερικά περιλαμβάνει μέρος των PID στο κομμάτι του ελέγχου. (Πηγή : PID Control).



Σχήμα 4-8 Γράφημα από το πρόγραμμα 2301 E της εταιρείας Woodward).

Με το παραπάνω διάγραμμα μπορούμε να παρατηρήσουμε σε πραγματικό χρόνο και σε ρεαλιστικές συνθήκες την επίδραση των PID. Το συγκεκριμένο γράφημα είναι από

μία κύρια μηχανή πλοίου με πρόωση. Η ταχύτητα που έχει οριστεί ως στόχος (Speed Setpoint) πρέπει να παραμένει σταθερή, όπως είναι ήδη δηλαδή. Στη συνέχεια η έξοδος του αυτόματου ρυθμιστή στροφών, η οποία ελέγχει την παροχή πετρελαίου της μηχανής μέσω της σύνδεσης της με τις αντλίες πετρελαίου, μεταβάλλεται συνεχώς ώστε να υπάρχει μία συνεχής ισορροπία και η ταχύτητα περιστροφής να κυμαίνεται όσο το δυνατόν πιο κοντά στην ορισμένη ταχύτητα περιστροφής (Speed Setpoint).

5 Η έννοια του όρου βύθισης στροφών (Speed Droop) και η βαρύτητα του στον χώρο των ελεγκτών μηχανών εσωτερικής καύσης

5.1 Droop – Το φαινόμενο βύθισης στις μηχανές εσωτερικής καύσης

Το φαινόμενο βύθισης της ταχύτητας είναι μια λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή στροφών η οποία μειώνει τις στροφές της μηχανής καθώς το φορτίο αυξάνεται.

Όλα τα συστήματα ελέγχου μηχανών χρησιμοποιούν την αρχή της βύθισης (droop) ώστε να υπάρχει μια ομαλή λειτουργία της μηχανής.

Οι αρκετά απλοί ρυθμιστές στροφών έχουν ενσωματωμένη την ρύθμιση της βύθισης, η οποία όμως δεν επιδέχεται ρύθμιση.

Υπάρχουν όμως και αυτόματοι ρυθμιστές στροφών με πιο περίπλοκες λειτουργίες και διατάξεις οι οποίοι λειτουργούν με προσωρινή βύθιση (temporary droop).

5.1.1 Προσωρινή βύθιση : Αφότου υπάρξει μεταβολή του φορτίου σε μια μηχανή, το governor θα επαναφέρει τις ονομαστικές στροφές οι οποίες μεταβλήθηκαν λόγω αλλαγής του φορτίου.

Αυτό το αποτέλεσμα ονομάζεται εξισορρόπηση (Compensation) , και είναι το φαινόμενο που συναντήθηκε και προηγουμένως.

5.1.2 Ισόχρονη λειτουργία (Isochronous operation)

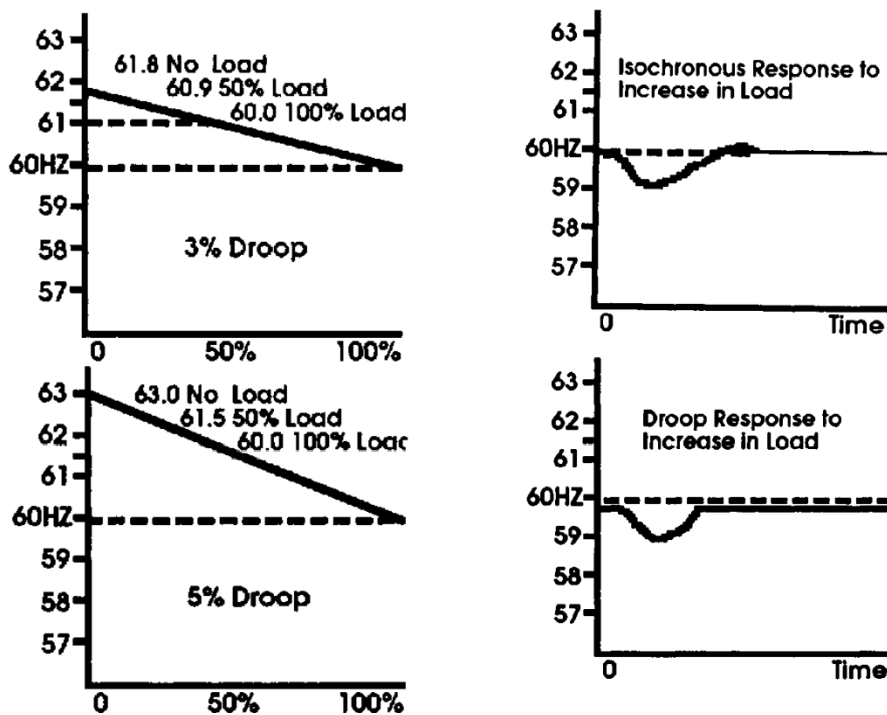
Ισόχρονη λειτουργία θεωρούμε την κατάσταση της μηχανής στην οποία δεν υπάρχει βύθιση των στροφών της μηχανής, αλλά το governor κρατάει τις στροφές σταθερές παρόλη την οποιαδήποτε αύξηση του φορτίου.

Δίχως την ύπαρξη της βύθισης , η ρύθμιση των στροφών δεν είναι εφικτή και παρατηρείται συνεχώς αστάθεια στην λειτουργία της μηχανής. Φαινόμενα όπως η αδράνεια και το power lag της μηχανής ευθύνονται για την αστάθεια μιας ΜΕΚ , την οποία την αποτρέπει το governor με την χρήση του Droop.

5.1.3 Καμπύλη βύθισης – Droop Curve

Η καμπύλη της βύθισης είναι μια ευθεία καμπύλη, με μία συγκεκριμένη ταχύτητα για κάθε φορτίο (Fuel position). Μέσα από έρευνες και δοκιμές, μία ιδανική συνθήκη βύθισης είναι το governor να χαμηλώνει τις στροφές κατά 3-5% των ονομαστικών στροφών, καθώς το φορτίο μεταβάλλεται από την κατάσταση «Δίχως φορτίο» (no load) ,στην κατάσταση «μέγιστο φορτίο» (full load).

5.1.4 Ανάλυση του φαινομένου βύθισης (Droop)



Σχήμα 4-9 Ενδεικτικά διαγράμματα και Καμπύλες βύθισης. (Πηγή : Woodward. "Speed Droop and Power Generation")

Η βύθιση είναι μία μέθοδος δημιουργίας σταθερότητας σε ένα governor. Η βύθιση επίσης μπορεί να μοιράσει και να εξισορροπήσει το φορτίο μεταξύ μηχανών οι οποίες δουλεύουν στον ίδιο άξονα ή είναι παραλληλισμένες σε ένα ηλεκτρικό σύστημα.

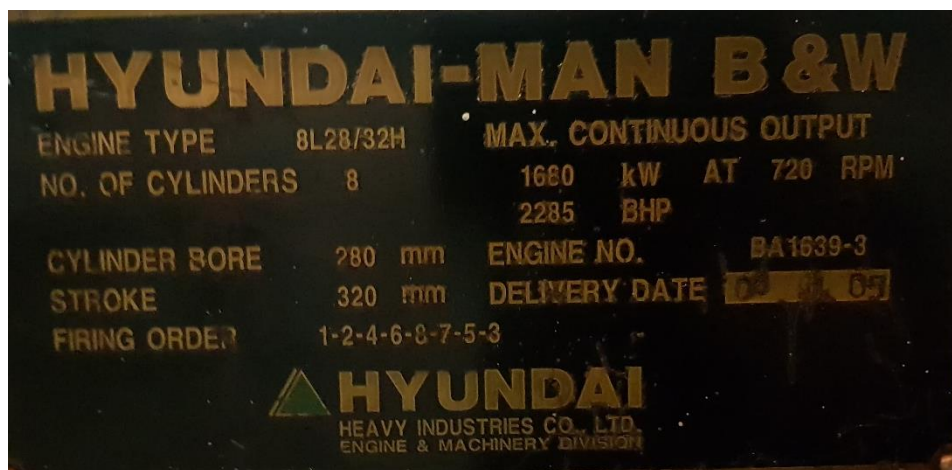
Η βύθιση όπως παρατηρείται και στα γραφήματα αυξάνεται καθώς αυξάνεται το φορτίο της ΜΕΚ (Καθώς αυξάνεται η έξοδος του governor από την ελάχιστη στην μέγιστη θέση, παρουσιάζεται μείωση της ταχύτητας. Το ποσοστό βύθισης (Droop Percentage) ενός governor σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης εκφράζεται από τον παρακάτω τύπο (Εξίσωση 4-5) :

$$\begin{aligned} \text{Ποσοστό βύθισης (Droop percentage) (\%)} &= \\ &= \frac{\text{Ταχύτητα χωρίς φορτίο} - \text{Ταχύτητα μέγιστου φορτίου}}{\text{Ταχύτητα μέγιστου φορτίου}} \times 100g \quad (4-5) \end{aligned}$$

$$\text{Π.χ. \%Droop} = \frac{1500-1400}{1400} \times 100 = 7,14 \%$$

Αν η μείωση της ταχύτητας είναι μεγαλύτερη από 100 rpm, όταν η έξοδος του governor κινείται από την ελάχιστη στην μέγιστη θέση, παρουσιάζεται βύθιση μεγαλύτερη από το 7,14 %. Αντιστοίχως όταν η βύθιση είναι μικρότερη των 100 rpm, το ποσοστό βύθισης θα είναι μικρότερο του 7,14 %.

Οι ενδείξεις της βύθισης που υπάρχουν στον αυτόματο ρυθμιστή στροφών, είναι απλώς κάποιες ενδείξεις αναφοράς και δεν αντικατοπτρίζουν την βύθιση σε ποσοστό. Επομένως σε έναν αυτόματο ρυθμιστή στροφών όπως το UG-8 η μέγιστη τιμή του Droop (100%) δεν μεταφράζεται απαραίτητα ως 100% βύθιση.



Σχήμα 4-10 Nameplate ηλεκτρομηχανής Hyundai-Man B&W με τις ονομαστικές στροφές της να είναι όπως αναγράφεται στις 720 rpm.

Παράδειγμα 1

Έστω ότι μια πετρελαιοκίνηση MEK βάσει των χαρακτηριστικών της που αναγράφονται στο nameplate της, δουλεύει στις 720 rpm.

Προκειμένου η MEK να λειτουργεί ομαλά στις ξαφνικές αλλαγές φορτίου, θα πρέπει ο ρυθμός βύθισης (Droop), να μην υπερβαίνει το 3-5% των ονομαστικών στροφών.

Το 5% των 720 grm είναι 36 grm. Επομένως η στροφές της ΜΕΚ από κατάσταση “No Load” σε κατάσταση “Full Load” θα μεταβληθούν από τις 720 στις 684 grm και στη συνέχεια θα επανέλθει στις 720 αφότου μπορέσει να ανταπεξέλθει στο φορτίο.

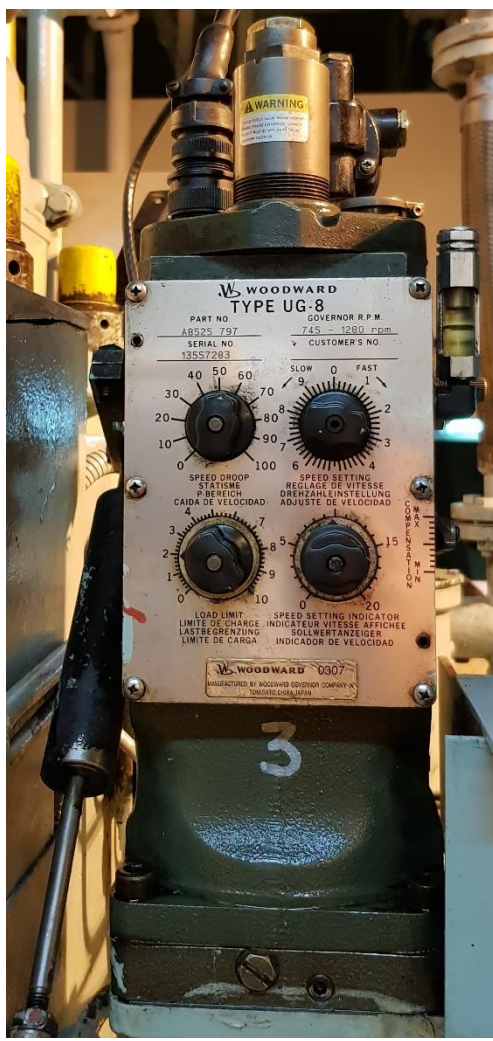
6 Ανάλυση λειτουργίας αυτόματου μηχανικού ρυθμιστή στροφών

Ένας μηχανολόγος μηχανικός του σήμερα έρχεται σε επαφή με πληθώρα ηλεκτρολογικών και ηλεκτρονικών προβλημάτων. Παρόλα αυτά καθιστάται αναγκαίο να γνωρίζει εγκαταστάσεις και κατασκευές που περιλαμβάνουν αρκετά μηχανικά και κινούμενα μέρη. Ο μηχανικός αυτόματος ρυθμιστής στροφών περιέχει πληθώρα μηχανικών εξαρτημάτων και αποτελεί ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο μελέτης για τον μηχανολόγο μηχανικό.

Αρχικά ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών συνδέεται με μία πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης σε 2 σημεία :

- Στην είσοδο του ρυθμιστή στροφών, όπου εκεί παρέχεται και η πληροφορία της ταχύτητας της μηχανής
- Η έξοδος του ρυθμιστή στροφών, όπου εφόσον έχει γίνει η διαδικασία της επεξεργασίας της ταχύτητας και του ρυθμού μεταβολής της, αυξομειώνεται η έξοδος του. Η έξοδος αυτή τις περισσότερες φορές συνδέεται με τις αντλίες καυσίμου καθώς αυτό είναι το μέσο αύξησης ή μείωσης των στροφών του πετρελαιοκινητήρα.

Το μοντέλο το οποίο μπορούμε να ερευνήσουμε έτσι ώστε να αντιληφθούμε την αρχή λειτουργίας είναι το governor της Woodward , μοντέλο UG – 8. Είναι ένας αυτόματος ρυθμιστής στροφών αρκετά διαδεδομένος με χρήση σε πληθώρα μηχανών εσωτερικής καύσης και όχι μόνο (μπορεί να συναντηθεί και σε ατμοστροβίλους), καθώς χαρακτηρίζεται από την αξιόπιστη λειτουργία του και την σταθερότητα του.



Σχήμα 6-1 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών “WOODWARD UG-8” τοποθετημένος σε πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης.

Προκειμένου να γίνει κατανοητή η αρχή λειτουργίας ενός περίπλοκου μηχανισμού όπως ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών, θα πρέπει να τον χωρίσουμε σε υποομάδες.

Επομένως θα διαχωρίσουμε σε υποομάδες τα μέρη που απαρτίζουν ένα governor UG-8. Η ονομασία UG-8 προκύπτει από τα αρχικά Universal Governor και το 8 δείχνει την δύναμη στρέψης του τερματικού άξονα εξόδου (terminal shaft).



Σχήμα 6-2 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών woodward UG-8 αποσυναρμολογημένος υπό μορφή exploded view. Διακρίνονται τα εξαρτήματα ομαδοποιημένα μεταξύ τους με σκοπό να γίνει ενδελεχής έλεγχος για φθορές.

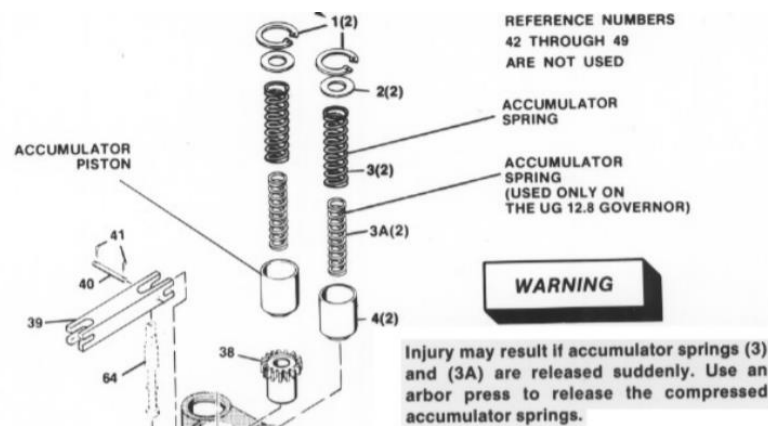
6.1 Αντλία λαδιού (Oil Pump)

Ο σκοπός της αντλίας λαδιού είναι να παρέχει υδραυλική κίνηση στο governor.

Η αντλία είναι γριναζωτή και παίρνει το λάδι από την ελαιολεκάνη του governor. Μέσω τεσσάρων βαλβίδων λαδιού (2 αναρρόφησης και 2 κατάθλιψης) το governor χρησιμοποιεί την αντλία λαδιού και για ωρολογιακή (Clockwise) και για αντιωρολογιακή (Counter Clockwise) φορά, αναλόγως την εφαρμογή. Η κίνηση της αντλίας δημιουργείται από τον άξονα εισόδου του governor (driveshaft) που συνδέεται με την μηχανή.

Στη συνέχεια, η ροή του λαδιού από την αντλία λαδιού συνεχίζεται στα έμβολα συσσώρευσης (Accumulator pistons).

6.2 Έμβολα συσσώρευσης(Accumulator pistons)



Σχήμα 6-3 έμβολα συσσώρευσης. (Πηγή : UG dial governor)

Τα έμβολα συσσώρευσης υδραυλικής ενέργειας (Accumulator pistons) αποθηκεύουν λάδι υπό πίεση για την λειτουργία του governor. Είναι ουσιαστικά μία «αποθήκη» υδραυλικής ενέργειας. Επίσης λειτουργούν και σαν βαλβίδα εκτόνωσης (relief valve) ώστε να παραμένει η υδραυλική πίεση στο σημείο το οποίο έχει ορίσει ο κατασκευαστής. Σε περίπτωση που η πίεση λαδιού υπερβεί το όριο (π.χ. στο governor Woodward UG-8 είναι 120 PSI) απελευθερώνεται πίεση στην ελαιολεκάνη του governor.

Μετά τα έμβολα συσσώρευσης υδραυλικής πίεσης το λάδι συνεχίζει την πορεία προς το power piston.

6.3 Έμβολο ενέργειας (Power Piston)

Η λειτουργία του εμβόλου ενέργειας είναι να περιστρέψει τον άξονα εξόδου του governor είτε προς την φορά αύξησης ή μείωσης του καυσίμου.

Το έμβολο ενέργειας του UG-8 , όπως και στα περισσότερα μοντέλα governor, είναι διαφορικού τύπου, δηλαδή υπάρχει υδραυλική πίεση και από τις δύο επιφάνειες του εμβόλου. Η πάνω επιφάνεια (top end) είναι αυτή που συνδέεται με την έξοδο του αυτόματου ρυθμιστή στροφών.

Το κάτω μέρος του εμβόλου έχει μεγαλύτερη επιφάνεια από το άνω μέρος. Συνεπώς, χρειάζεται λιγότερη πίεση η κάτω επιφάνεια από την άνω για να παραμείνει σταθερό το έμβολο. Αν η υδραυλική πίεση είναι ίση και στις δύο επιφάνειες , τότε το έμβολο κινείται προς τα επάνω και επομένως κινεί την έξοδο του governor προς την αύξηση του καυσίμου. Το έμβολο κινείται προς τα κάτω

μόνο αν το λάδι της κάτω επιφάνειας σταματήσει να είναι υπό πίεση και απελευθερωθεί προς το sump.

Το λάδι από και προς την κάτω επιφάνεια του power piston ελέγχεται από το σύστημα βαλβίδας οδήγησης λαδιού (pilot valve plunger).

6.4 Σύστημα βαλβίδας οδήγησης λαδιού (Pilot Valve Plunger)

Ο λόγος ύπαρξης του συστήματος βαλβίδας οδήγησης λαδιού είναι να ελέγχει την ροή του λαδιού της επιφάνειας του εμβόλου ενέργειας (power piston).

Το σύστημα αυτό αποτελείται από το περιστρεφόμενο bushing (38) και η pilot valve plunger(39). Το bushing περιστρέφεται από τον άξονα εισόδου που συνδέεται με την μηχανή (driveshaft)(36), καθώς η pilot valve plunger παραμένει ακίνητη. Καθώς περιστρέφονται μεταξύ τους αυτά τα δύο εξαρτήματα, η τριβή τους μειώνεται. Η pilot valve plunger έχει μια περιοχή ελέγχου (Control Land) όπου ελέγχει την ροή του λαδιού μέσω διόδων του bushing.

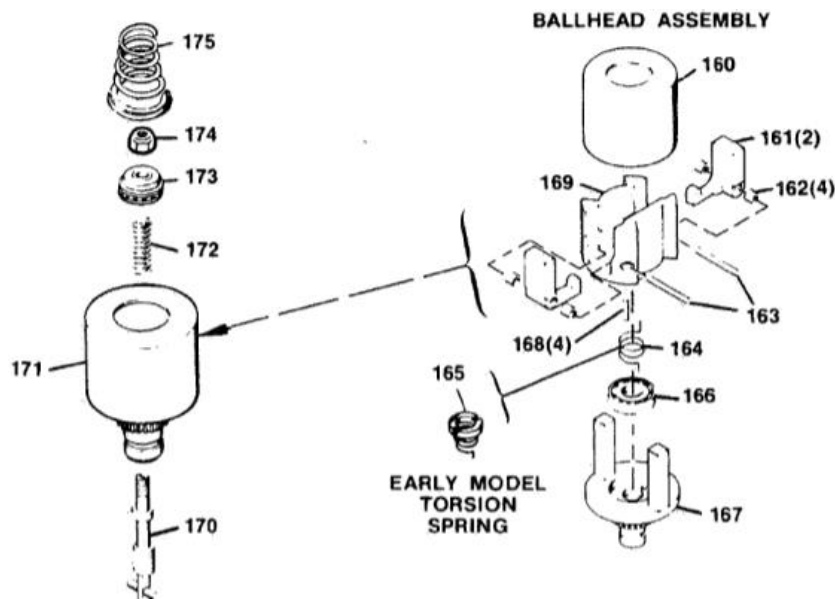
Όταν η πιλοτική βαλβίδα (Pilot valverplunger) χαμηλώσει , το υπό πίεση λάδι διοχετεύεται στην κάτω επιφάνεια του power piston, σηκώνοντας το. Αντιθέτως, όταν η pilot valve plunger μετακινείται προς τα επάνω το λάδι της κάτω επιφάνεια του power piston απελευθερώνεται προς το sump, επομένως η υψηλότερη πίεση που υπάρχει στο άνω μέρος του power piston μετατοπίζει το έμβολο προς τα κάτω.

Όταν η pilot valve plunger είναι στην θέση ισορροπίας, δηλαδή στο κέντρο, η περιοχή ελέγχου (control land) καλύπτει την δίοδο του λαδιού (control port) όπως φαίνεται στο παρακάτω παράδειγμα, και δεν υπάρχει μετατόπιση του power piston.

Όλη αυτή η μετακίνηση της pilot valve plunger ελέγχεται από το σύστημα των αντιβάρων (ballhead system) (23) και από τα έμβολα εξισορρόπησης (dashpot compensation pistons (34, 35)

Σημείωση : η λειτουργία του συστήματος βαλβίδας οδήγησης λαδιού δημιουργεί το ερώτημα πως δεν υπάρχει διαρροή λαδιού εφόσον δεν υπάρχει κάποιο είδος στεγανοποίησης (o-ring ή κάποια τσιμούχα) μεταξύ αυτών των διόδων. Εδώ λοιπόν παρατηρείται το ενδιαφέρον φαινόμενο της μηχανικής στεγανοποίησης (Mechanical Seal) το οποίο θα το αναλύσουμε περαιτέρω στη συνέχεια.

6.5 Αντίβαρα (Ballhead System)



Σχήμα 6-4 Σύστημα αντιβάρων. (Πηγή : UG dial governor).

Ο λόγος ύπαρξης των αντιβάρων είναι η αντίληψη των αλλαγών της ταχύτητας του άξονα εισόδου του governor (Prime mover-Driveshaft), ώστε αυτές οι αλλαγές να τις στροφές αναφοράς/στροφές λειτουργίας του ελατηρίου ταχύτητας (Speeder Spring) και την θέση της βαλβίδας οδήγησης λαδιού (pilot valve plunger).

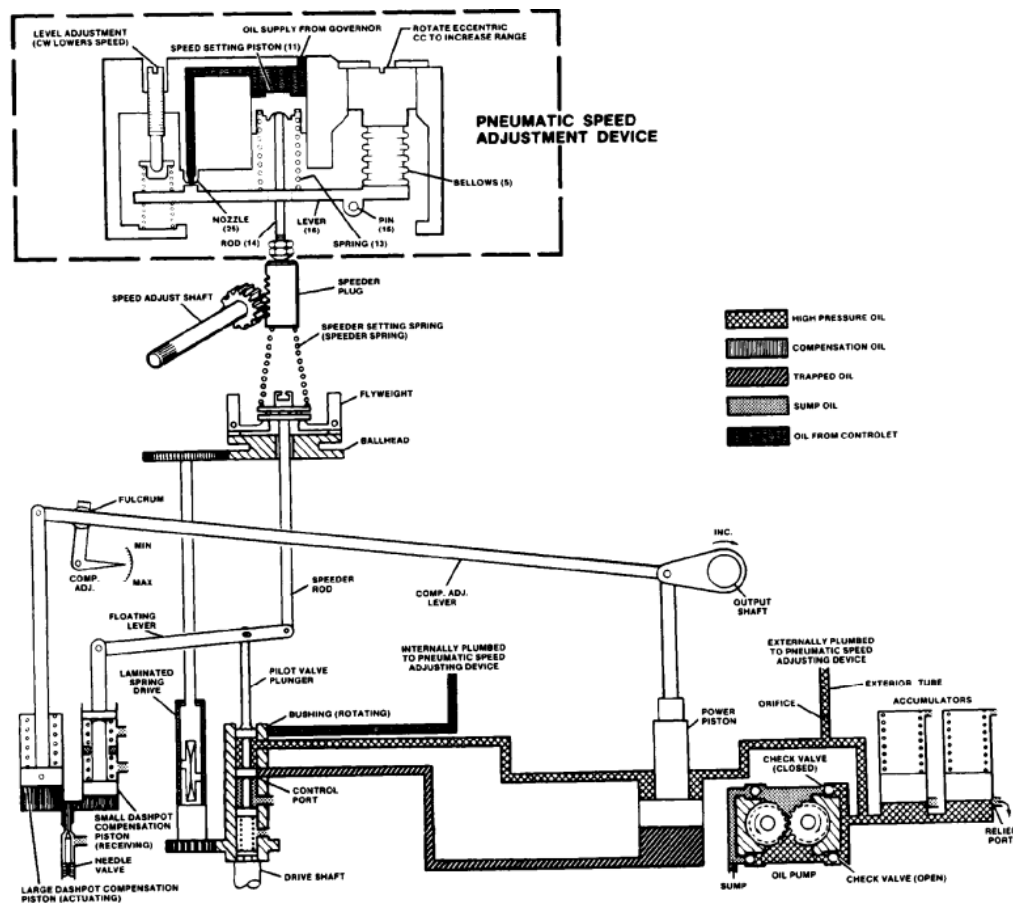
Το σύστημα των αντιβάρων αποτελείται από την φωλιά των αντιβάρων (ballhead), τα αντίβαρα (Flyweights), το ελατήριο ρύθμισης της επιθυμητής ταχύτητας (Speeder spring), το ωστικό έδρανο κύλισης (Thrust bearing) και τον κανόνα ρύθμισης των στροφών (Speed setting rod).

Καθώς ο πρωτεύον άξονας κίνησης (Driveshaft) του αυτόματου ρυθμιστή στροφών περιστρέφεται, περιστρέφεται και το σύστημα των αντιβάρων (23). Τα αντίβαρα (24)εδράζονται και κυλίσουν πάνω στο ballhead γύρω από δύο ρινοτ pins και ένα ωστικό έδρανο κύλισης (30) στις ακμές των αντιβάρων. Το ελατήριο ρύθμισης των επιθυμητών στροφών (speeder spring) (25) παραμένει στην θέση του πιέζοντας το ωστικό έδρανο κύλισης μέσω του εμβόλου ρύθμισης των στροφών (29) (Speeder piston/Speeder plug).

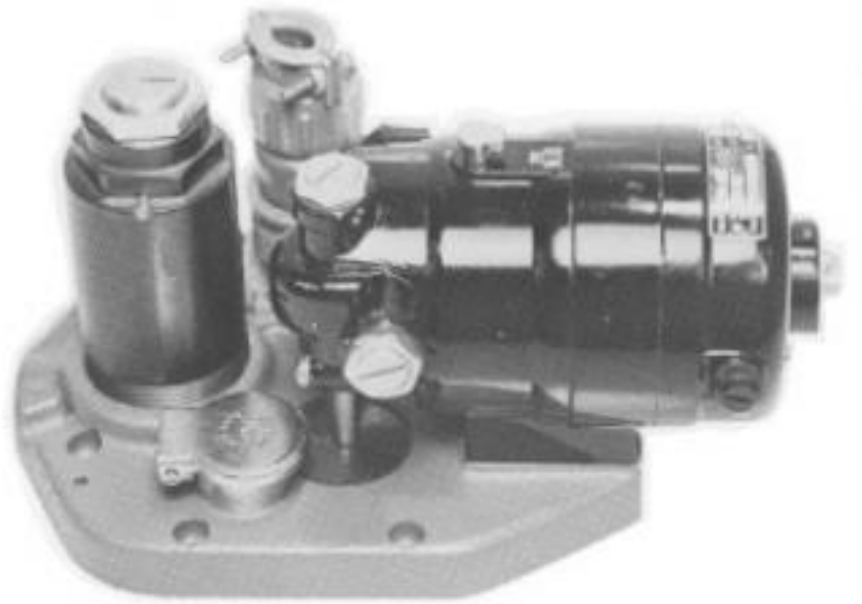
Καθώς το σύστημα των αντιβάρων (23) περιστρέφεται, τα αντίβαρα (24) τείνουν να ανοίξουν λόγω της φυγόκεντρου δύναμης. Ταυτόχρονα το ελατήριο ρύθμισης των στροφών (25) αναγκάζει το ωστικό έδρανο κύλισης (30) να κατεβάσει τις

αιχμές των αντιβάρων. Αυτή η καθοδική δύναμη αντιτίθεται στην φυγοκεντρική δύναμη. Συμπιέζοντας το ελατήριο ρύθμισης των στροφών μέσω του εμβόλου ρύθμισης των στροφών (speeder piston), αυξάνεται η προ φόρτιση του ελατηρίου αυξάνοντας έτσι την δύναμη που ασκείται στις αιχμές των αντιβάρων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των στροφών που ορίζεται να λειτουργεί το governor. Ο πρωτεύον άξονας κίνησης (driveshaft) θα πρέπει να κινείται γρηγορότερα για να παράγει φυγόκεντρο δύναμη το governor μεγαλύτερη από του speeder spring για να εξισορροπήσει ξανά το σύστημα.

Η προ φόρτιση του speeder spring ελέγχεται είτε χειροκίνητα μέσω του speed setting knob, αλλά μπορεί να ελεγχθεί και απομακρυσμένα (remotely) αν το governor είναι εξοπλισμένο με έναν ηλεκτροκινητήρα, είτε μέσω ενός πνευματικού συστήματος για την αύξηση ή μείωση των στροφών.

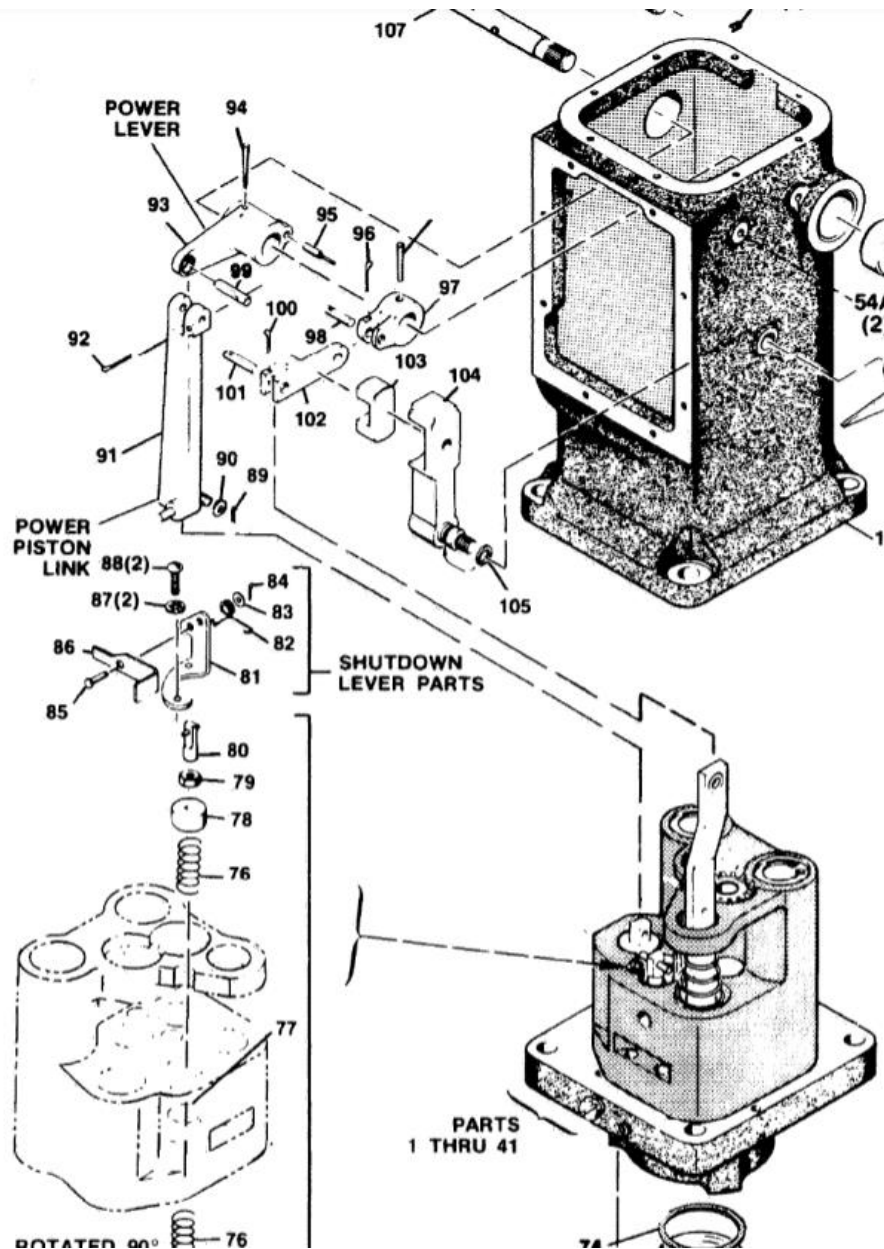


Σχήμα 6-5 Πνευματική συσκευή διαχείρισης των επιθυμητών στροφών περιστροφής του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Στο πάνω σχεδιάγραμμα με τις διακεκομμένες γραμμές). Πηγή : UG - 8 Speed Adjusting Devices)



Σχήμα 6-6 Κάλυμα (cover) από αυτόματο ρυθμιστή στροφών UG οπού περιέχει ηλεκτροκινητήρα (δεξιά) συγχρονισμού - ρύθμιση των επιθυμητών στροφών (synchronizer motor) και πηνίο απενεργοποίησης του πετρελαιοκινητήρα (αριστερά) . (Πηγή : UG Dial Governor).

6.6 Σύστημα εξισορρόπησης (Compensation System)



Σχήμα 6-7 Συναρμολόγηση συστήματος εξισορρόπησης. (Πηγή :UG dial governor).

Ο λόγος ύπαρξης του συστήματος εξισορρόπησης είναι να δώσει σταθερότητα στο governor και να υπάρξει επικρατεί σταθερός έλεγχος των στροφών. Επίσης, όταν το compensation system ρυθμιστεί σωστά, ρυθμίζει αποτελεσματικά την ποσότητα καυσίμου της μηχανής για να αυξήσει ή να μειώσει με την σειρά της την ισχύ της.

Το σύστημα εξισορρόπησης δημιουργεί μία μικρή προσωρινή αλλαγή στην ρύθμιση των στροφών (Speed Setting) μέσω του άξονα εξόδου του governor, με σκοπό να

παράγει μία εξισορροπημένη βύθιση στροφών στο governor. Μετά την αλλαγή του speed setting ακολουθείται μια αργή επιστροφή στην αρχική τιμή των στροφών. Ουσιαστικά εξισορρόπηση με άλλα λόγια είναι ένα χαρακτηριστικό προσωρινής βύθισης.

Το σύστημα εξισορρόπησης περιλαμβάνει το μεγάλο έμβολο εξισορρόπησης (34), το μικρό έμβολο εξισορρόπησης (35), έναν πλωτό μοχλοβραχίονα (31), έναν μοχλό ρύθμισης της εξισορρόπησης με μια άρθρωση (18) και μία βαλβίδα ευαισθησίας (33) (Needle Valve) (Βλ. Το παρακάτω σχεδιάγραμμα).

Το μεγάλο έμβολο εξισορρόπησης (34) είναι συνδεδεμένο με την άξονα εξόδου του governor (6) με έναν μοχλό ρύθμισης της εξισορρόπησης. Μία μεταβλητή άρθρωση (18) εδράζεται πάνω σε αυτόν τον μοχλό (22). Αλλάζοντας την θέση της άρθρωσης δίνουμε την δυνατότητα στον μοχλό εξισορρόπησης (Compensation lever) να ελέγχει την διαδρομή του μεγάλου εμβόλου εξισορρόπησης (large dashpot compensation piston) (34).

Το μικρό έμβολο εξισορρόπησης (Small dashpot compensation piston) (35) είναι συνδεδεμένο μέσω ενός πλωτού μοχλού (31) στην pilot valve plunger (39) και στο speeder rod (21).

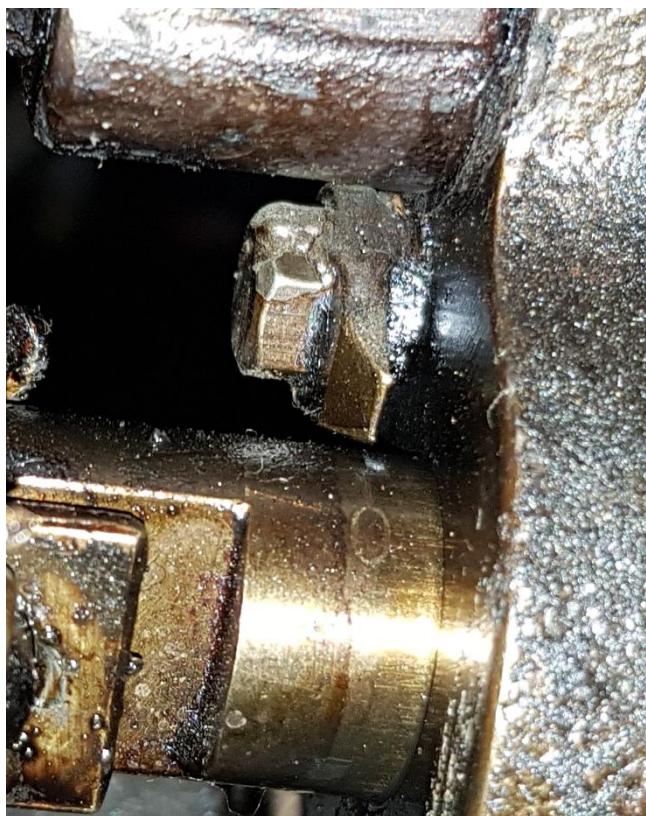
Μετακινώντας το μεγάλο έμβολο εξισορρόπησης (34) προς τα κάτω αναγκάζει το λάδι να κινηθεί κάτω από το μικρό έμβολο εξισορρόπησης (35). Το μικρό έμβολο εξισορρόπησης πραγματοποιεί ταλάντωση καθώς και από την πάνω και από την κάτω πλευρά συμπιέζεται από ελατήρια ίδιας προ φόρτισης. Όταν λοιπόν το μικρό έμβολο (small dashpot compensation piston) (35) κινηθεί προς τα πάνω, σηκώνει την pilot valve plunger (39) για να κλείσει την δίοδο ελέγχου η οποία σταματάει την ροή λαδιού στο κάτω μέρος του power piston (9).

Η βαλβίδα ευαισθησίας (33) (Needle Valve) είναι μία ρυθμιζόμενη δίοδος λαδιού η οποία ελέγχει την ροή λαδιού ανάμεσα στο μεγάλο (34) , μικρό (35) έμβολο εξισορρόπησης, και στην ελαιολεκάνη του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Oil Sump).

Ένας άλλος μηχανισμός που υποβοηθάει την εξισορρόπηση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (συνεπώς και της μηχανής εσωτερικής καύσης την οποία ελέγχει), είναι ο άξονας μετάδοσης κίνησης μεταξύ πρωτεύον άξονα κίνησης (Driveshaft) και το σύστημα αντιβάρων, και ονομάζεται laminated shaft. Πρόκειται για έναν διαιρετό άξονα οπού το κάθε άκρο του φέρει οδοντώσεις (με το ίδιο module του πρωτεύον άξονα και του συστήματος αντιβάρων) και εσωτερικά φέρει λεπτά κομμάτια από μικρές μεταλλικές λάμες, ώστε να επιδέχεται μια μορφή στρέψης την στιγμή όπου προκύπτει κάποια ξαφνική μεταβολή φορτίου (Sudden Load).

7 Τοποθέτηση/σύνδεση αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης

Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών θα πρέπει να τοποθετηθεί από εξειδικευμένο προσωπικό με την μέθοδο και το πρωτόκολλο που ορίζει ο κατασκευαστής της μηχανής και του governor. Η έξοδος του governor τις περισσότερες φορές συνδέεται με ένα throttle valve. Στην πετρελαιοκίνητες μηχανές συνδέεται με τις αντλίες πετρελαίου. Σε κάθε πετρελαιοκίνητη ΜΕΚ ο κατασκευαστής παρέχει μια διαγράμμιση των αντλιών πετρελαίου έτσι ώστε να γνωρίζουμε την θέση τους (δηλαδή την θέση του throttle valve). Για να επιτευχθεί η ορθή σύνδεση αντλίες πετρελαίου-governor ο κατασκευαστής της μηχανής προτείνει κάποια μπράτσα (brackets) τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με έναν αποσβεστήρα. Το ένα bracket συνδέεται στον κανόνα των αντλιών πετρελαίου και το άλλο στην έξοδο του governor. Η μηδενική θέση των αντλιών πρέπει να αντιστοιχείται με την μηδενική θέση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Αλλιώς, αν δεν υπάρξει σωστή διαβάθμιση μεταξύ τους, πολύ πιθανόν να προκύψει υπερτάχυνση (overspeed) ή ο αυτόματος ρυθμιστής να λειτουργεί ως περιοριστής (limiter) στις αντλίες πετρελαίου της μηχανής.



Σχήμα 7-1 Ένδειξη των αντλιών πετρελαίου στη μηδενική θέση.

Με τη σειρά του το governor πρέπει να μηδενιστεί στην έξοδο του. Σε μοντέλα όπως το UG-8 υπάρχει εμφανής ένδειξη της θέσης του άξονα εξόδου (terminal shaft) σε θέση ώστε να είναι ευανάγνωστη από τον χρήστη. Σύμφωνα με την Woodward μία επαλήθευση πως η σύνδεση μηχανή-αυτόματου ρυθμιστή στροφών έχει γίνει ορθά, είναι όταν η ένδειξη του φορτίου (load indication) του governor, σε ονομαστικές στροφές χωρίς φορτίο, παρά μόνο τα μαζικά φορτία της μηχανής, είναι κοντά στα 2/10 (20%) του εύρους του φορτίου. Επομένως ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών έχει το περιθώριο των δύο μονάδων να σβήσει την MEK άμεσα, αλλά και να καλύψει εύρος φορτίου οκτώ μονάδων από τις δέκα (Οι δύο μονάδες είναι τα μαζικά φορτία της μηχανής).

Σημείωση : Η συγκεκριμένη κατάσταση πρέπει να ισχύει όταν ο πετρελαιοκινητήρας λειτουργεί στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και δίχως κάποιο φορτίο. Οι δύο από τις δέκα γραμμές (20% φορτίου) που επιδιώκουμε είναι τα μαζικά φορτία του κινητήρα και τίποτα άλλο.



Σχήμα 7-2 Ένδειξη ότι η σύνδεση μεταξύ τερματικού άξονα-αντλίες πετρελαίου έχει γίνει σωστά (Σε ονομαστική ταχύτητα περιστροφής και χωρίς κάποιο φορτίο πέρα τα μαζικά φορτία του κινητήρα).

Στην παραπάνω φωτογραφία (Σχήμα 7-2) παρατηρείται ότι στην ονομαστική ταχύτητα περιστροφής της μηχανής εσωτερικής καύσης, όταν δεν υπάρχουν φορτία παραμόνο τα μαζικά φορτία του κινητήρα, η θέση ένδειξης του φορτίου (load indication) πρέπει να είναι στο 20%.

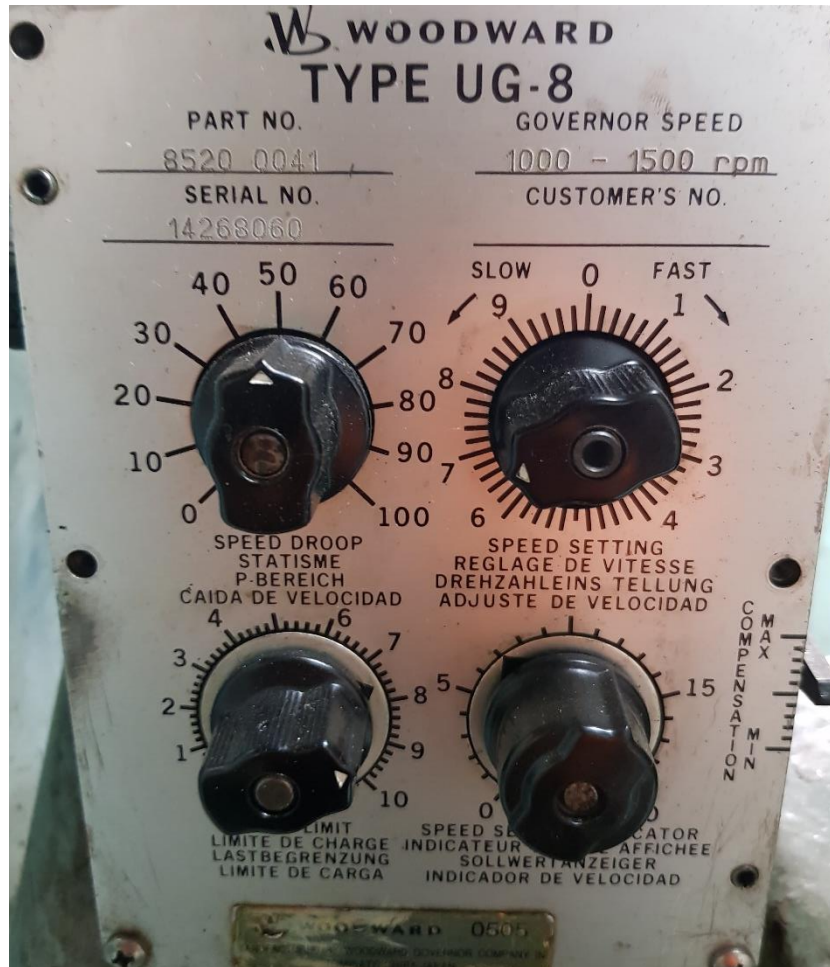
7.1 Μετάδοση κίνησης των αρθρώσεων και των μοχλών σύνδεσης μεταξύ αυτόματου ρυθμιστή στροφών – μηχανής εσωτερικής καύσης

Έχοντας ως βασική προϋπόθεση τον μηδενισμό των αντλιών πετρελαίου και αυτόματου ρυθμιστή στροφών, πρέπει επίσης να πραγματοποιηθεί σύνδεση με σωστή γωνία μετάδοσης κίνησης. Το μεγαλύτερο ποσοστό των ρυθμιστών στροφών καλύπτουν ένα εύρος κίνησης τουλάχιστον 45 μοιρών στην έξοδο τους. Στο φάσμα λειτουργίας του, το οποίο κυμαίνεται εντός αυτών των μοιρών, θα πρέπει να υπάρχει η μέγιστη δυνατή ροπή στρέψης, ώστε να είναι εφικτή η μετακίνηση του κανόνα των

αντλιών πετρελαίου σε όλο το φάσμα εξόδου (0-45 μοίρες), δίχως την εξασθένηση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Προκειμένου να επιτευχθεί αυτό η μετάδοση κίνησης προτείνεται να πραγματοποιείται γύρω από τις 90 μοίρες, όπου οι μοχλοί μετάδοσης κίνησης (brackets) είναι κάθετα και αποδίδουν τον μέγιστο δυνατό μοχλό.

Αν λοιπόν ένας αυτόματος ρυθμιστής στροφών έχει στον τερματικό του άξονα (terminal shaft) 42 μοίρες διαδρομή, θα έπρεπε το μοχλός σύνδεσης με τον αποσβεστήρα όπου συνδέεται να λειτουργεί από 69-111 μοίρες.

Αυτό προκύπτει αν θεωρήσουμε ως μια μέση κατάσταση λειτουργίας του ρυθμιστή στροφών τις 21 μοίρες (όπου είναι οι μισές μοίρες του 42). Σε εκείνο το σημείο πρέπει η σύνδεση μοχλού - αποσβεστήρα να είναι 90 μοίρες. Από τις 90 μοίρες πρέπει να υπάρχει ίσα μοιρασμένη μετατόπιση του τερματικού άξονα κατά 21 μοίρες στην μείωση και αντίστοιχα άλλες 21 μοίρες στην αύξηση της εξόδου του ρυθμιστή στροφών. Επομένως αν αφαιρεθούν 21 μοίρες από το κάθετο σημείο (90 μοίρες) προκύπτουν 69 μοίρες ελάχιστη γωνία κλίσης μπρακέτου - αποσβεστήρα και αν προστεθούν 21 μοίρες από το κάθετο σημείο προκύπτουν 111 μοίρες κλίση μεταξύ μπρακέτου - αποσβεστήρα.



Σχήμα 7-3 Περιορισμός της εξόδου του αυτόματου ρυθμιστή στροφών με το ποτενσιόμετρο (Knob) του περιορισμού φορτίου (Load limit).

Η σωστή σύνδεση μηχανής-αυτόματου ρυθμιστή στροφών δεν αρκεί. Στην παραπάνω φωτογραφία παρατηρούμε ότι υπάρχει περιορισμός στην έξοδο του governor (Το load limit ποτενσιόμετρο (κάτω αριστερά) είναι στην θέση 7,5) με αποτέλεσμα να δημιουργείται μία κατάσταση limit την στιγμή που η μηχανή έχει την ανάγκη παροχής καυσίμου παραπάνω από το 7,5.

Είναι πολύ εντυπωσιακό η εξαιρετική λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή στροφών όταν είναι σε καλή κατάσταση, χωρίς μηχανικές φθορές, και επίσης όταν είναι ορθά τοποθετημένο στην μηχανή. Υπάρχει μεγάλη ακρίβεια στις διορθώσεις του φορτίου και των στροφών. Έστω και 1 στροφή το λεπτό από τις ονομαστικές να αντληφθεί το governor πως έχει μεταβληθεί, σχεδόν ακαριαία θα επιστρέψει την μηχανή στις ονομαστικές στροφές της (βλέπε τις δύο παρακάτω εικόνες.



Σχήμα 7-4 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών UG - 8 τοποθετημένος σε πετρελαιοκινητήρα (πάνω αριστερά). Κάτω δεξιά είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (720 rpm).



Αυτόματος ρυθμιστής στροφών UG - 8 τοποθετημένος σε πετρελαιοκινητήρα (πάνω αριστερά). Κάτω δεξιά είναι η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα (721 rpm).

8 Εφαρμογές και τρόποι αντιμετώπισης των παραγόμενων ρύπων σε πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης

Βασικό μέλημα των μηχανικών σε όλες τις μηχανές εσωτερικής καύσης, είναι η μείωση των ρύπων. Με την πάροδο των χρόνων οι κανονισμοί που αφορούν τους ρύπους γίνονται όλο και αυστηρότεροι με σκοπό την ελάττωση φαινομένων όπως του φαινόμενο του θερμοκηπίου, την άνοδο της μέσης θερμοκρασίας και άλλα. Ειδικότερα σε μηχανές εσωτερικής καύσης μεγάλης κλίμακας όπως αυτές των πλοίων, τρένων και εργοστασίων η ρύποι είναι ανάλογοι του μεγέθους της εγκατάστασης.

Για αυτό τον λόγο πλήθος μοντέλων governor παρέχουν επιπλέον χαρακτηριστικά αναλόγως με την ζήτηση της εκάστοτε εγκατάστασης. Παρακάτω θα δωθούν λύσεις που έχουν προβλέψει οι κατασκευαστές μηχανών εσωτερικής καύσης και αυτόματων ρυθμιστών στροφών, ώστε να ελαττωθούν όσο το δυνατότερο οι βλαβερές ουσίες και οι ρύποι που παράγονται από την καύση πετρελαίου.

Ένας σημαντικός ρύπος, καθώς μιλάμε για πετρελαιοκίνητους κινητήρες, ο οποίος παράγεται είναι τα οξείδια του αζώτου (NOx)

8.1 Στοιχειομετρική καύση πετρελαίου

Σε όλες τις ΜΕΚ πρέπει να επιτευχθεί στοιχειομετρική καύση. Δηλαδή ο λόγος αέρα και καύσιμης ύλης πρέπει να είναι συγκεκριμένος ώστε να γίνει πλήρης καύση.

Αντίστοιχα σε έναν πετρελαιοκινητήρα υπάρχει ανάγκη για συγκεκριμένη ποσότητα αέρα και καυσίμου ώστε να υπάρξει στοιχειομετρική καύση. Σε βιομηχανικές εφαρμογές όπως οι ηλεκτρογεννήτριες συναντάται εκτεταμένα η χρήση υπερτροφοδοτούμενων (turbocharged) πετρελαιοκίνητων μηχανών εσωτερικής καύσης, κάτι το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος αέρα – καυσίμου είναι διαφορετικός σε σχέση με έναν συμβατικό πετρελαιοκινητήρα.

$$\text{Λόγος αέρα – καυσίμου (AFR)} = \frac{\text{Αέρας καύσης}}{\text{Καύσιμη ύλη}} = \frac{\text{Air}}{\text{Fuel}} \quad (8-1)$$

Επίσης ο λόγος προσδιδόμενης μάζας αέρα προς την απαιτούμενη μάζα αέρα δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$\lambda = \frac{\text{Προσδιδόμενη μάζα αέρα}}{\text{Απαιτούμενη μάζα αέρα}} = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)}{\left(\frac{A}{F}\right)_{st}} \quad (8-2)$$

Όπου

- A, ο αέρας καύσης
- F, η μάζα καυσίμου και
- ο δείκτης st συμβολίζει τις απαιτούμενες σιμές αέρα και καυσίμου

Ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών ρυθμίζει την παροχή πετρελαίου αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να περιορίσει την παροχή πετρελαίου αναλόγως με την πίεση σάρωσης (scavenging air pressure) που μετράει (Όταν ο πετρελαιοκινητήρας είναι υπερτροφοδοτούμενος). Το πλεονέκτημα των πετρελαιοκίνητων μηχανών εσωτερικής καύσης είναι πως μπορούν να λειτουργήσουν είτε με πλούσιο ($\lambda < 1$) είτε με φτωχό μείγμα ($\lambda > 1$), σε αντίθεση με τους βενζινοκινητήρες οι οποίοι πρέπει να έχουν συγκεκριμένο λόγο αέρα – καυσίμου (air to fuel ratio) , και συγκεκριμένα να είναι ίσο με 14.7:1. Σε υπερτροφοδοτούμενους πετρελαιοκινητήρες ο λόγος αέρα – καυσίμου από 16:1 έως 15:1, κάτι το οποίο σημαίνει πως λειτουργεί με περίσσεια αέρα παράγοντας καυσαέρια χαμηλότερης θερμοκρασίας, επομένως και χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας του κινητήρα.

8.2 Χαρακτηριστικό περιορισμού καυσίμου κατά την εκκίνηση της πετρελαιομηχανής (Start fuel limit feature)

8.2.1 Αρχή λειτουργίας fuel limit

Ένας αυτόματος ρυθμιστής στροφών εφόσον μπορεί να «αντιληφθεί» την ταχύτητα μίας ΜΕΚ, θα δράσει αναλόγως ώστε να φτάσει τις επιθυμητές στροφές (rated speed).

Στην κατάσταση “Start” μιας μηχανής η ταχύτητα της είναι 0. Το Governor αντιλαμβάνεται πως οι στροφές της μηχανής είναι χαμηλότερες από τις ονομαστικές και δίνει εντολή στις αντλίες πετρελαίου ώστε να ανοίξουν στο τέρμα.

Με την χρήση πηνίου ή μέσω software περιορίζουμε τα πετρέλαια στο 50% ή και λιγότερο, ώστε να είναι το μείγμα μας όσο το δυνατόν πιο κοντά στην στοιχειομετρική αναλογία.

Μία επίσης σημαντική βελτιστοποίηση είναι η χρήση “jet” στην εισαγωγή του Turbocharger σε υπερτροφοδοτούμενες μηχανές εσωτερικής καύσης, όπου σε συνδυασμό με το fuel limit του governor καταφέρνουμε να περιορίσουμε σημαντικά τους ρύπους.

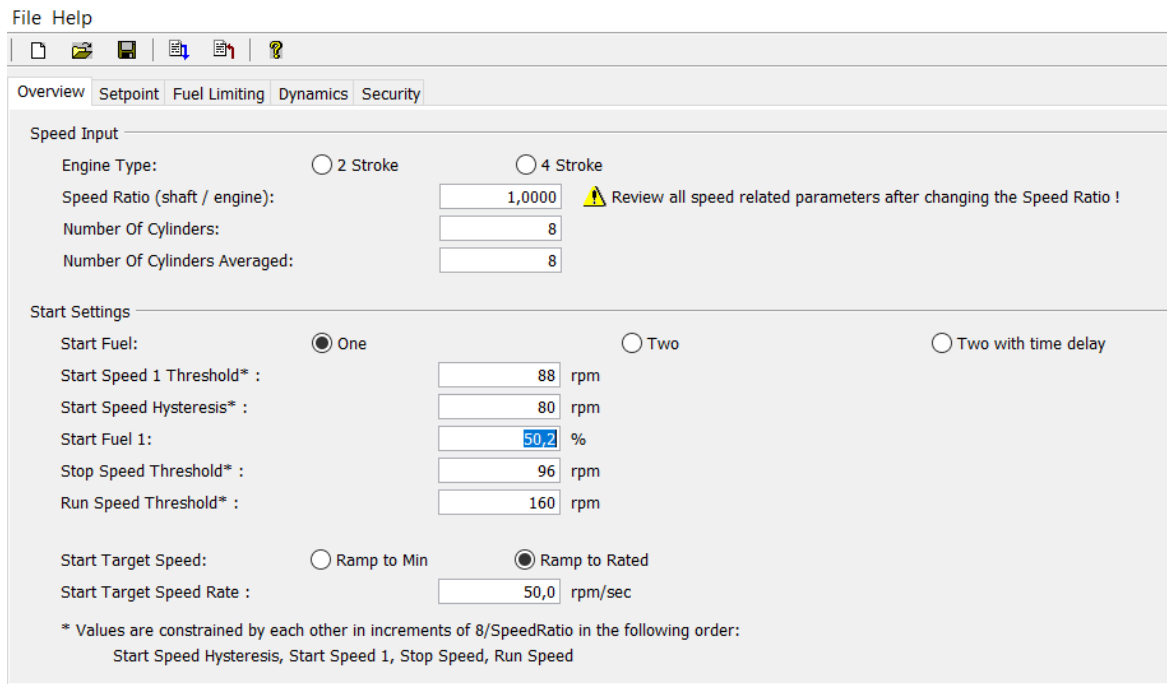
Ένα χρήσιμο εργαλείο αντιμετώπισης αυτών των ρύπων πάνω σε governor είναι το “Start Fuel Limit”. Όταν μια πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης ξεκινάει, η παροχή πετρελαίου είναι μεγαλύτερη από την παροχή αέρα στον θάλαμο εισαγωγής, καθώς η μηχανή, άρα και το governor έχουν μηδενική ταχύτητα. Το governor «αντιλαμβάνεται» την μηδενική ταχύτητα αφού τα αντίβαρα είναι συμπιεσμένα προς τα μέσα λόγω μηδενικής γωνιακής ταχύτητας και λόγω προφόρτισης του speeder spring προς τις ορισμένες ονομαστικές στροφές. Επομένως τείνει να ανοίξει την έξοδο του προς την αύξηση για να παρέχει πετρέλαιο στον κινητήρα.

Συνεπώς το μείγμα δεν είναι στοιχειομετρικό. Αντιθέτως είναι πολύ πλούσιο και μεγάλο μέρος του πετρελαίου δεν καίγεται με αποτέλεσμα να παρατηρείται ένα μαύρο νέφος από την ατελή καύση του πετρελαίου. Μοντέλα governor της εταιρείας Woodward όπως το μοντέλο UG – 25 και το μοντέλο 3161 παρέχουν το χαρακτηριστικό του Fuel Limit για περιορισμό των ρύπων.

8.3 UG - 25



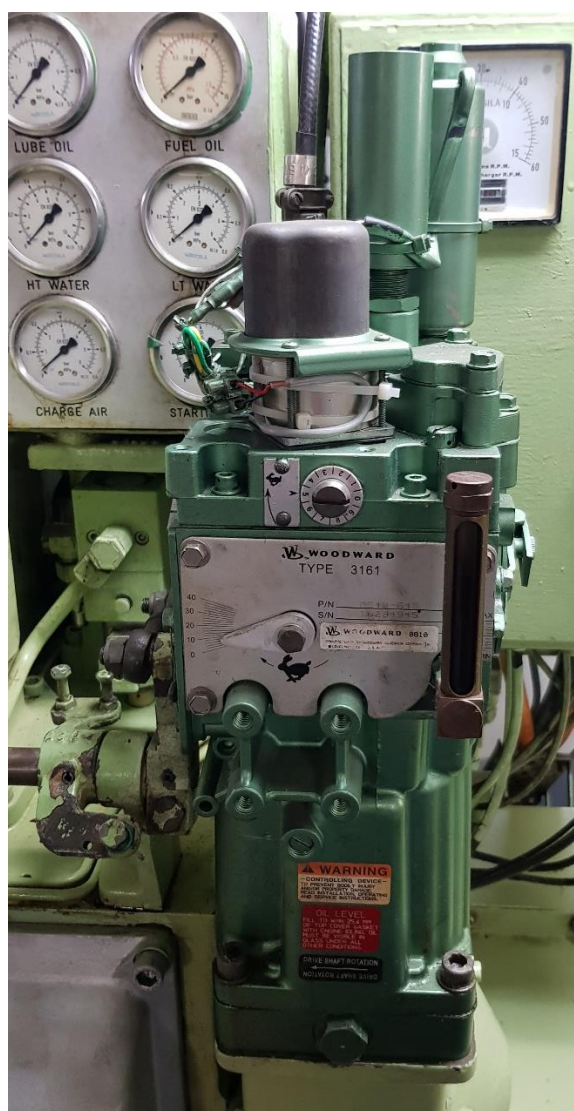
Σχήμα 8-1 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών Woodward UG-25 + τοποθετημένος σε ηλεκτρομηχανή.



Σχήμα 8-2 Εικόνα από το μενού του προγράμματος διασύνδεσης «Service Tool».

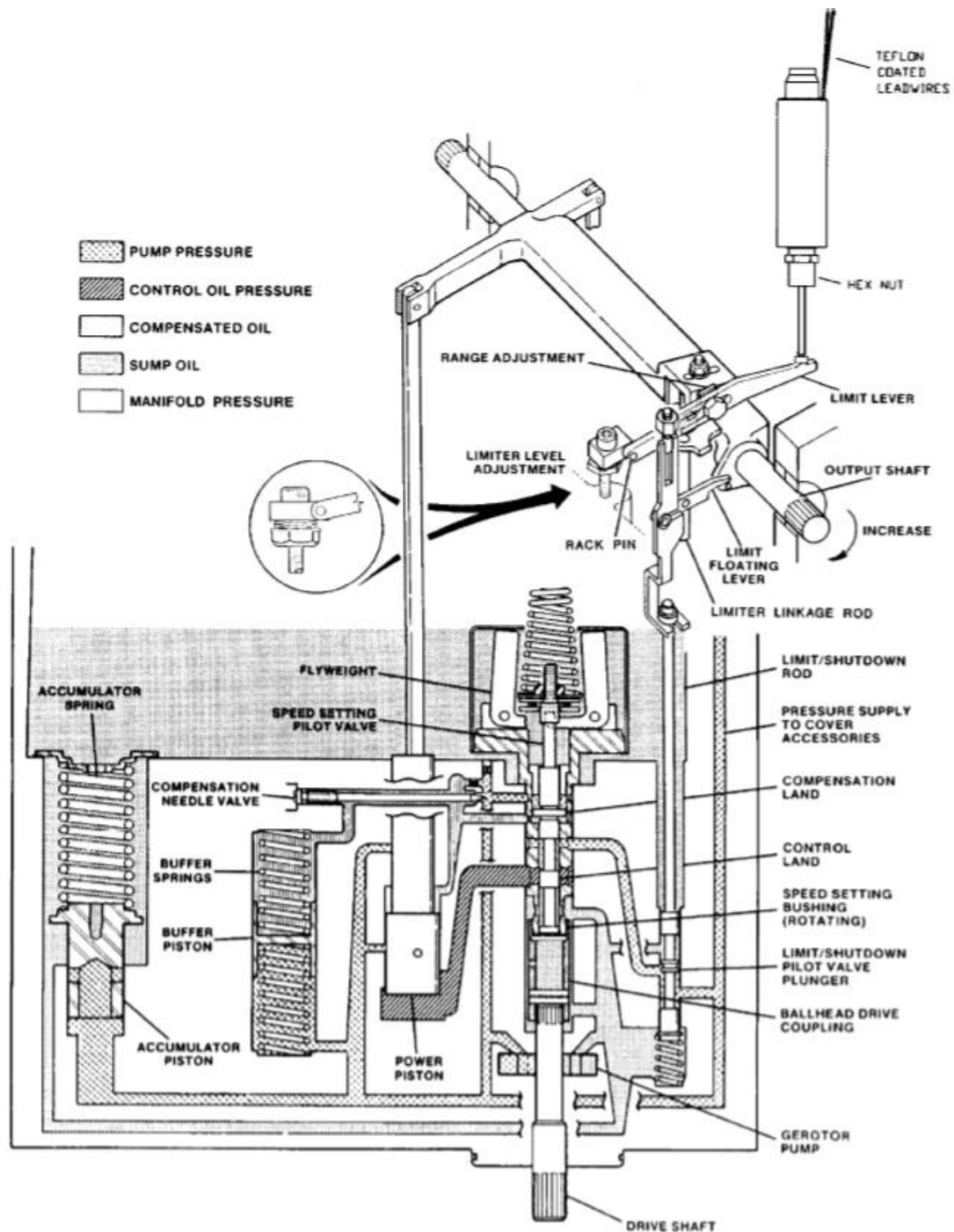
Στο παραπάνω πρόγραμμα διασύνδεσης (user interface) του αυτόματου ρυθμιστή στροφών παρατηρείται η παράμετρος περιορισμού καυσίμου κατά την εκκίνηση της μηχανής. Μία τιμή η οποία συναντάται συχνά σε βιομηχανικές εφαρμογές είναι μία τιμή της τάξης του 50 %, όπως δηλαδή συμβαίνει και στην παραπάνω εικόνα. Επίσης όπως παρατηρείται υπάρχει και η δυνατότητα να δοθούν δύο περιορισμοί, σε διαφορετικές στροφές ο καθένας, όπως επίσης να δοθούν δύο περιορισμοί με υστέρηση (delay) για την όσο το δυνατόν πιο εύρυθμη λειτουργία της μηχανής κατά το ξεκίνημα της.

8.4 3161



Σχήμα 8-3 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών τοποθετημένος σε ηλεκτρομηχανή Wartsila.

Στο μοντέλο 3161 όπου το Start Fuel Limit αποτελείται από ένα πηνίο το οποίο περιορίζει την διαθέσιμη ποσότητα πετρελαίου προς την μηχανή κατά την διάρκεια εκκίνησης της. Στην λειτουργία του, ένα ηλεκτρομαγνητικό πηνίο ενεργοποιείται και σε συνδυασμό με την βαλβίδα της απενεργοποίησης, περιορίζεται η μέγιστη τιμή παροχής του διαθέσιμου καυσίμου.



Σχήμα 8-4 Πάνω δεξιά το πηνίο του start fuel Limit και παρακάτω τα υπόλοιπα μέρη που απαρτίζουν τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών 3161. (Πηγή : 3161 Solenoid Start fuel limiter).

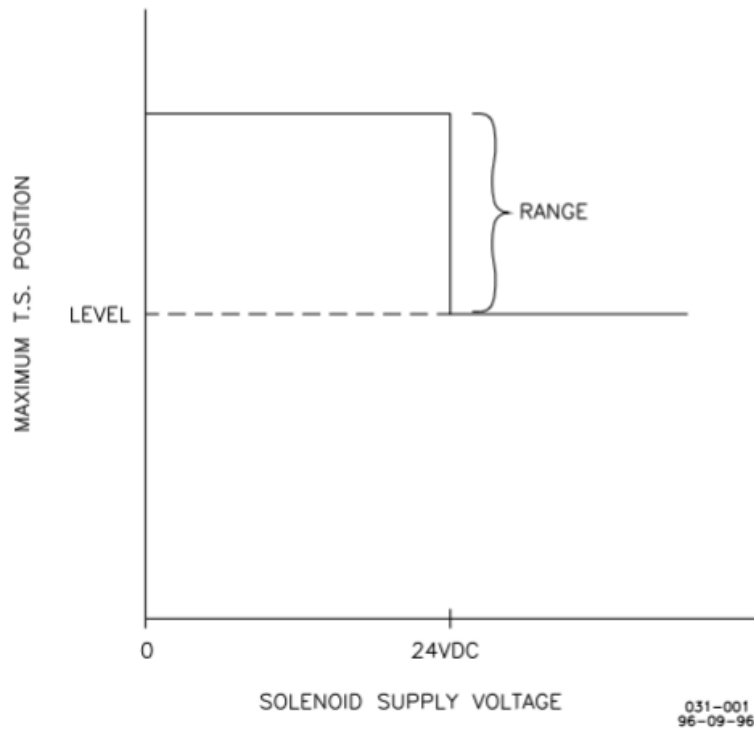
Την στιγμή που ενεργοποιείται το πηνίο πιέζει την Shutdown pilot valve plunger προς τα κάτω, με αποτέλεσμα ένας μέρος της υδραυλικής πίεσης να εξαλείφεται καθώς πηγαίνει προς το συμπ(ελαιολεκάνη) όταν τα αντίβαρα (Flyweights) είναι

συμπιεσμένα από το speeder spring. Όταν τα αντίβαρα είναι σε αυτή τη θέση σημαίνει πως η control pilot valve plunger είναι μετατοπισμένη προς τα κάτω και σημαίνει πως λάδι υπό πίεση φεύγει από την control land προς το power piston αλλά και στην Shutdown pilot valve plunger η οποία όμως είναι εν μέρη μετατοπισμένη προς τα κάτω. Επομένως υπάρχει μία μικρή διαρροή λαδιού , άρα και πτώση της υδραυλικής πίεσης, που οδηγεί στον περιορισμό της εξόδου του governor (Output Shaft). (Όταν το Speed Setting είναι μεγαλύτερο από την πραγματική ταχύτητα και ο Output shaft τείνει προς την θέση της αύξησης.)

Όταν πλέον το speed setting είναι ίδιο με την πραγματική ταχύτητα περιστροφής, τότε τα αντίβαρα θα ανοίξουν μέχρι την γωνία 90°. Εκείνη την στιγμή η φυγόκεντρος δύναμη και η προφόρτιση του ελατηρίου είναι ίσες ως δυνάμεις. Είναι ήδη υπολογισμένο όταν επικρατεί αυτή η συνθήκη η control land να είναι σφραγισμένη και να φτάσει σε μία κατάσταση ισορροπίας το governor, όπου και θα έχει μειώσει προφανώς την έξοδο ο Output shaft αφού έφτασε την επιθυμητή ταχύτητα.

Ο περιοριστής καυσίμων στην εκκίνηση της μηχανής (Start Fuel Limiter) περιορίζει την διαδρομή της ατράκτου εξόδου του αυτόματου ρυθμιστή στροφών (Terminal Shaft) όταν δεχθεί τάση 24 V DC.

Παρακάτω απεικονίζεται το γράφημα της χαρακτηριστικής του shutdown Solenoid. Επειδή είναι μονού βήματος limit, χωρίς δηλαδή να μεταβάλλεται το ποσοστό μείωσης αυτού του limit, το γράφημα αποτελείται απλά από μία ευθεία γραμμή. Όταν η τάση των 24 V DC διακοπεί σταματάει να υφίσταται το limit και ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών μπορεί να δουλέψει σε όλο το εύρος λειτουργίας του.



Σχήμα 8-5 . Μέγιστη θέση λειτουργίας τερματικού άξονα συναρτήσει της παροχής τάσης πηνίου περιοριστή (Πηγή : 3161 Solenoid Start fuel limiter).

8.5 Περιορισμοί καυσαερίων σε υπερτροφοδοτούμενες πετρελαιοκίνητες μηχανές εσωτερικής καύσης και έλεγχος λειτουργίας της υπερτροφοδότησης

Όπως έχει αναφερθεί στην εισαγωγή της εργασίας, οι περισσότεροι πετρελαιοκινητήρες χρησιμοποιούν υπερτροφοδότηση ώστε να αυξηθεί η αποδοτικότητά τους. Η εκμετάλλευση των καυσαερίων δεν προσφέρει όφελος μόνο στις επιδόσεις μίας μηχανής εσωτερικής καύσης αλλά και στην οικονομία της.

8.5.1 Jet system

Το σύστημα jet είναι ένα ακροφύσιο το οποίο τη στιγμή που γίνεται το start του υπερτροφοδοτούμενου κινητήρα, αέρας ίδιας πίεσης με τον αέρα εκκίνησης της μηχανής μπαίνει στην πτερωτή του turbocharger ώστε να προκαλέσει μία μικρή πίεση σάρωσης, χωρίς την ύπαρξη καυσαερίων.

Όπως σε πολλά συστήματα έτσι και σε αυτό υπάρχει η δυνατότητα ρύθμισης του. Η ρύθμιση του γίνεται αναλόγως το σημείο των αντλιών πετρελαίου που θέλουμε το συγκεκριμένο σύστημα να επενεργήσει.

8.5.2 Scavenging Air Fuel Limit

Σε πολλές πετρελαιοκίνητες υπερτροφοδοτούμενες ΜΕΚ , εκτός από την παράμετρο της ταχύτητας της ΜΕΚ, το governor λαμβάνει και την παράμετρο της σάρωσης του turbocharger. Με την χρήση μεμβρανών (bellows) το governor μειώνει ή αυξάνει την έξοδο του προκειμένου να επιτύχει στοιχειομετρική καύση.

Η λειτουργία scavenging air fuel limit λειτουργεί επίσης και στην εκκίνηση της ΜΕΚ καθώς το turbocharger δεν δημιουργεί σάρωση αφού δεν υπάρχει ροή καυσαερίων. Η βαθμονόμηση της λειτουργίας αυτής γίνεται εσωτερικά από το governor βάσει του πρωτόκολλου του κατασκευαστή και του Part Number του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Σε μοντέλα governor όπως το Woodward PGA-58, αναγράφεται η ελάχιστη και η μέγιστη τιμή σάρωσης (scavenging air). Με αυτές τις 2 τιμές δημιουργείται μια ευθεία καμπύλη και το governor ακολουθεί μια γραμμική πορεία εξόδου ανάλογη με αυτή της σάρωσης του turbocharger.

9 Μαθηματική προσέγγιση λειτουργίας μηχανικού governor

Πέραν του πρακτικού και του απτού μέρους της λειτουργίας ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών συνδεδεμένο σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, υπάρχει ένα ενδιαφέρον και στην θεωρητική σκοπιά όσον αφορά την λειτουργία του. Πολλοί μαθηματικοί, φυσικοί και μηχανικοί των παλαιότερων χρόνων όπως ο Gibbs και ο Kruton αφιέρωσαν χρόνο ώστε να προσεγγίσουν με επιστημονικές έρευνες την λειτουργία και την βελτιστοποίηση λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή στροφών με θεωρητικά μοντέλα.

Πλέον, έχουμε την δυνατότητα να χρησιμοποιούμε μαθηματικά μοντέλα και να χρησιμοποιούμε λογισμικά τα οποία θα εμφανίσουν τις βέλτιστες λύσεις των προβλημάτων μας

Βασισμένοι στην προσέγγιση του Kruton και διαχωρίζοντας μια υπερτροφοδοτούμενη πετρελαιοκίνητη MEK σε 4 μέρη θα εφαρμόσουμε κάποιες φυσικές αρχές όπως την εξίσωση στοιχειομετρικής καύσης, την αρχή διατήρησης της μάζας κ.α.

9.1 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών (Governor)

Ο νόμος των PID εκφράζεται από την σχέση :

$$R = kp * Ne + ki \int Ne dt + kd \frac{dNe}{dt} \quad (9-1)$$

Όπου kp , ki , kd είναι τα Proportional, Integral και Derivative Control gains, αντίστοιχα.

Εκτός από τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών μελετώνται και άλλες υπομονάδες της μηχανής, όπως η ίδια η μηχανή, το Turbocharger*, η εισαγωγή αέρα/καυσίμου και η εξαγωγή των καυσαερίων

*Καθώς συναντάται πλέον η χρήση υπερτροφοδοτούμενων πετρελαιοκίνητων μηχανών εσωτερικής καύσης πολλές μελέτες περιλαμβάνουν την τουρμπίνα (turbocharger) και ορισμένα στοιχεία της (πίεση σάρωσης, ταχύτητα καυσαερίων κλπ)

9.2 Η μηχανή εσωτερική καύσης (Prime Mover)

Η ροπή φορτίου T_l του κινητήρα είναι ανάλογη της γωνιακής ταχύτητας και στην ρύθμιση του φορτίου φ ,

$$T_l = f(\omega, \varphi) \quad (9-2)$$

Ομοίως η ροπή του κινητήρα είναι ανάλογη της θέσης των αντλιών πετρελαίου (παροχή καυσίμου) h , την γωνιακή ταχύτητα και την πίεση σάρωσης P_i ,

$$T_e = f(h, \omega, p_i) \quad (9-3)$$

Η τελική εξίσωση της μηχανής εσωτερικής καύσης δίνεται παρακάτω :

$$T_e \frac{dN_e}{dt} + k_e N_e = R + a_1 P_{in} - b_1 L \quad (9-4)$$

$$\text{Όπου } T_e = J_e \left(\frac{\delta N_e}{\delta h} \right)^{-1} \frac{\omega_0}{h_0}, \quad k_e = F_e \left(\frac{\delta T_e}{\delta h} \right)^{-1} \frac{\omega_0}{h_0},$$

$$a_1 = \frac{\delta T_e}{\delta p_i} \left(\frac{\delta T_e}{\delta h} \right)^{-1} \frac{p_i}{h_0}, \quad b_1 = \frac{\delta T_i}{\delta \varphi} \left(\frac{\delta T_e}{\delta h} \right)^{-1} \frac{\varphi_0}{h_0}$$

Προκειμένου να κάνουμε ευκολότερη και περισσότερο κατανοητή την διαδικασία ανάλυσης των δυναμικών ιδιοτήτων του κινητήρα και των εξαρτημάτων που την απαρτίζουν, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω αδιάστατες παράμετροι :

$$N_e = \frac{\Delta \omega}{\omega_0}, \quad R = \frac{\Delta h}{h_0}, \quad P_{in} = \frac{\Delta p_i}{p_{i0}}, \quad L = \frac{\Delta \varphi}{\varphi_0} \quad (9-5)$$

9.3 Υπερπληρωτής (Turbocharger)

Όπως και με τον κινητήρα προκύπτουν κάποια μεγέθη τα οποία τα χρησιμοποιούμε ως εργαλεία για την δημιουργία των εξισώσεων, έτσι και στην υπερτροφοδότηση του κινητήρα προκύπτουν οι ανάλογες εξισώσεις. Προκύπτουν κάποια μεγέθη όπως η ροπή συμπίεσης που ορίζεται και ως πίεση ενίσχυσης (boost pressure) P_i και επίσης προκύπτει και το μέγεθος της γωνιακής ταχύτητας (angular speed) ω_t . Επίσης, η ροπή

υπερτροφοδότησης (Turbine torque) εξαρτάται από την πίεση εξαγωγής exhaust manifold pressure) P_e , και η θέση των αντλιών h .

$$T_c = f(p_i, \omega_t), T_t = f(p_e, h, \omega_t) \quad (9-6)$$

Όπου T_c είναι η ροπή του συμπιεστή και T_t η ροπή της τουρμπίνας.

Χρησιμοποιώντας μία παρόμοια προσέγγιση όπως την εξίσωση της μηχανής (prime – mover), η τελική εξίσωση του υπερπληρωτή δίνεται παρακάτω :

$$T_t \frac{dN_t}{dt} + k_t N_t = P_{ex} + b_2 R - a_2 P_{in} \quad (9-7)$$

$$\text{Όπου } T_t = J_t \left(\frac{\delta T_t}{\delta p_e} \right)^{-1} \frac{\omega_{t0}}{p_{e0}}, k_t = F_t \left(\frac{\delta T_t}{\delta p_e} \right)^{-1} \frac{\omega_{t0}}{p_{e0}}$$

$$b_2 = \frac{\delta T_t}{\delta h} \left(\frac{\delta T_t}{\delta p_e} \right)^{-1} \frac{h_0}{p_{e0}}, a_2 = \frac{\delta T_t}{\delta p_i} \left(\frac{\delta T_t}{\delta p_e} \right)^{-1} \frac{p_{i0}}{p_{e0}}$$

Πολλαπλή εισαγωγή (Intake manifold)

$$m_{ie} = f(p_i, \omega), m_c = f(p_i, \omega_t), m_{sa} = f(y) \quad (9-8)$$

Η τελική εξίσωση για την πολλαπλή εισαγωγή δίνεται παρακάτω και προκύπτουν από τις προηγούμενες εξισώσεις

$$T_{in} \frac{dp_i}{dt} + k_{in} P_{in} = N_t + b_3 Y_s a_3 N_e \quad (9-9)$$

$$\text{Όπου, } T_{in} = \frac{u_i}{R_a T_i} \frac{\omega_t}{m_c} \frac{P_{i0}}{\omega_{t0}}, k_{in} = F_{in} \left(\frac{\delta m_c}{\delta \omega_t} \right)^{-1} \frac{P_{i0}}{\omega_{t0}}, a_3 = \frac{\delta m_{ie}}{\delta \omega} \left(\frac{\delta m_c}{\delta \omega_t} \right)^{-1} \frac{\omega_o}{\omega_{t0}},$$

$$b_3 = \frac{\delta m_{sa}}{\delta y} \left(\frac{\delta m_c}{\delta \omega_t} \right)^{-1} \frac{y_o}{\omega_{t0}}$$

Πολλαπλή εξαγωγή (Exhaust manifold)

Έστω ότι θεωρούμε την παρακάτω εξάρτηση

$$m_{ee} = f(p_i, \omega, p_e), m_e = f(p_e, h) \quad (9-10)$$

Η τελική εξίσωση για την πολλαπλή εξαγωγή δίνεται από την παρακάτω σχέση :

$$T_{ex} \frac{dp_e}{dt} + k_{ex} P_{ex} = N_e + a_4 P_{in} - b_4 R \quad (9-11)$$

$$\text{Όπου, } T_{ex} = \frac{u_e \rho}{n_r \omega_0} \left(\frac{\delta m_{ee}}{\delta \omega} \right)^{-1}, k_{ex} = F_{ex} \frac{P_{ee0}}{\omega_0} \left(\frac{\delta m_{ee}}{\delta \omega} \right)^{-1}, a_4 = \frac{\delta m_{ee}}{\delta P_i} \frac{P_{i0}}{\omega_0} \left(\frac{\delta m_{ee}}{\delta \omega} \right)^{-1},$$

$$b_4 = \frac{\delta m_{ee}}{\delta h} \left(\frac{\delta m_{ee}}{\delta \omega} \right)^{-1} \frac{\delta \omega}{\omega_0}$$

10 Overspeed/Υπερτάχυνση

Το φαινόμενο του Overspeed είναι μία κατάσταση στην οποία μία ΜΕΚ υπερβαίνει τις ονομαστικές στροφές της κατά 15%. Υπάρχει πληθώρα αιτιών που ένας κινητήρας μπορεί να οδηγηθεί σε overspeed.

Παραδείγματος χάρη αν μία μηχανή έχει ως ονομαστικές στροφές τις 900 rpm, τότε η κατάσταση overspeed είναι στις 1035 rpm.

Η υπερτάχυνση είναι ένα φαινόμενο το οποίο πρέπει να αποφεύγεται καθώς μπορεί να προκαλέσει ανεπανόρθωτες βλάβες σε έναν κινητήρα, όπως επίσης να προκαλέσει τραυματισμούς. Οι μηχανικοί οι οποίοι σχεδιάζουν την εγκατάσταση μίας μηχανής έχουν προνοήσει συστήματα αυτοματισμών για την αποφυγή του φαινομένου αυτού. Το governor καθώς είναι ο κυριότερος αυτοματισμός ελέγχου μίας ΜΕΚ συνήθως παρέχει προστασία από υπερτάχυνση (Overspeed protection), ή αν τυχόν δεν την παρέχει, κάνει τον σκανδαλισμό (triggering) ώστε να σβήσει ο κινητήρας το συντομότερο δυνατό.

10.1 Πηνίο απενεργοποίησης της μηχανής (Shutdown Solenoid)

Ένας πολύ αποτελεσματικός τρόπος σκανδαλισμού (triggering) για τον τερματισμό λειτουργίας είναι το "Shutdown Solenoid", όπου μιλάμε για ένα ηλεκτρικό πηνίο το οποίο δέχεται τάση ώστε να «οπλίσει» την στιγμή που γίνεται το overspeed και να σβήσει την μηχανή.

10.2 Αρχή λειτουργίας Πηνίου απενεργοποίησης της μηχανής (Shutdown Solenoid)

Το πηνίο απενεργοποίησης της μηχανής (Shutdown Solenoid) είναι μία συσκευή η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανικό έργο. Αποτελείται από μία μεταλλική βαλβίδα (Steel plunger) , η οποία κινείται ελεύθερα και περικλείεται από τυλίγματα χαλκού. Όταν δοθεί ρεύμα στο πηνίο, δημιουργείται μαγνητικό πεδίο το οποίο μετακινεί την plunger. Το εκτεθειμένο άκρο της συνδέεται με υπομόχλιο το οποίο επικοινωνεί με την pilot valve plunger του governor και το υπό πίεση λάδι που έχει το governor πηγαίνει προς το oil sump και η πίεση μηδενίζεται.

11 Παρελκόμενα εξαρτήματα ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών για βελτιστοποίηση της λειτουργίας του

Ένας ρυθμιστής στροφών λειτουργεί σε δυσμενείς συνθήκες, όπως υψηλές θερμοκρασίες και κραδασμοί.

Η λειτουργία του πρέπει να είναι σταθερή και να μην επηρεάζεται από εξωτερικούς παράγοντες.

Η χρήση διαψύκτη (cooler) είναι αναγκαία σε ορισμένες εφαρμογές, όπως επίσης και η χρήση booster.

11.1 Εναλλάκτης θερμότητας (Cooler)

Πρόκειται για έναν εναλλάκτη θερμότητας ο οποίος χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπου η θερμοκρασία λειτουργίας του governor υπερβαίνει τους 200°F (93,3 °C). Σε τέτοιου μεγέθους θερμοκρασίες όταν πρόκειται για υδραυλικούς αυτόματους ρυθμιστές στροφών υπάρχει ραγδαία μεταβολή του ιξώδους και το στρώμα λαδιού το οποίο βρίσκεται μεταξύ των μετάλλων εσωτερικά του ρυθμιστή στροφών δεν επαρκεί για την σωστή λίπανση στα εσωτερικά κινούμενα μέρη. Σε τέτοιες περιπτώσεις η χρήση εναλλάκτη θερμότητας είναι αναγκαία.

11.2 Ενισχυτής εκκίνησης (Booster cylinder)

Χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση της MEK. Όταν ο πετρελαιοκινητήρας έχει μηδενικές στροφές περιστροφής ο ρυθμιστής στροφών, καθώς δεν περιστρέφεται από την μηχανή, δεν υπάρχει επαρκής υδραυλική πίεση στα accumulator pistons για να ανοίξει τις αντλίες πετρελαίου.

Ο booster cylinder έχει κοινό δίκτυο λαδιού με το governor. Αναρροφάει λαδιού από ένα σημείο του governor και καταθλίβει σε ένα άλλο.

Όταν δίνεται η εντολή start για να ξεκινήσει η μηχανή, ο αέρας εκκίνησης εκτός από την μηχανή, πηγαίνει και στο booster cylinder για να συμπιέσει την μία επιφάνεια του εμβόλου που βρίσκεται μέσα στον κύλινδρο. Με την σειρά του το έμβολο συμπιέζει τον θάλαμο που βρίσκεται το λάδι του governor παρέχοντας του έτσι επαρκή υδραυλική δύναμη.

Υπάρχει μία πληθώρα από booster cylinders αναλόγως την εφαρμογή και το μέγεθος του ρυθμιστή στροφών και της μηχανής.

11.2.1 Ρύθμιση ενισχυτή εκκίνησης (booster cylinder)

Παρόλο που η λειτουργία του είναι αρκετά απλή υπάρχουν μερικές ρυθμίσεις για να βελτιστοποιηθεί η λειτουργία του governor και συνεπώς και της μηχανής.

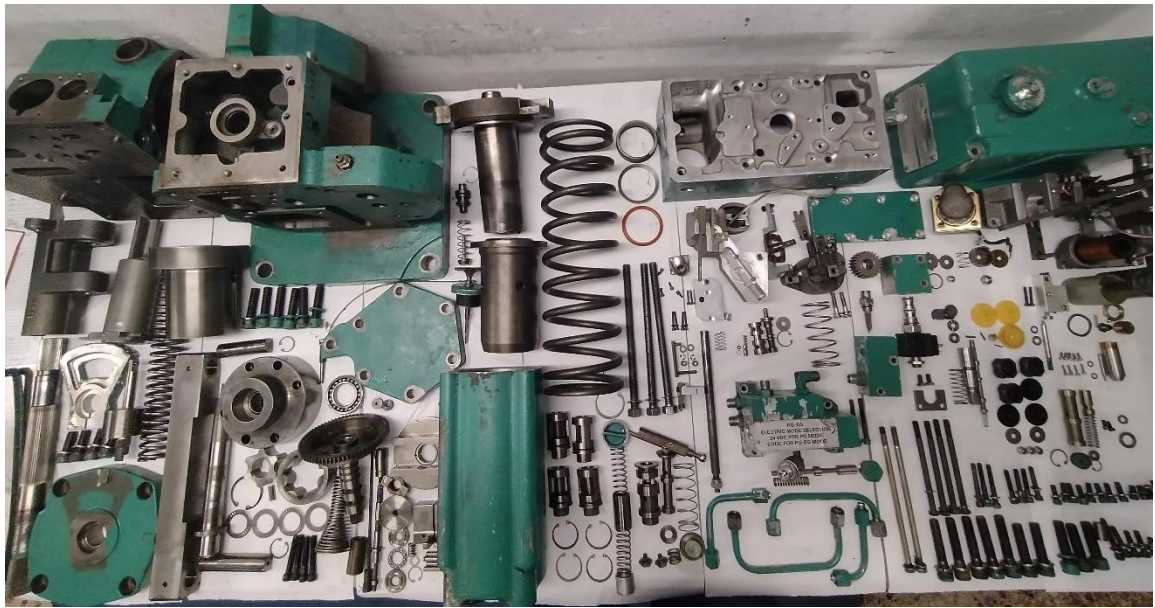
Όπως και στο governor έτσι και στο booster cylinder υπάρχουν βαλβίδες ευαισθησίας (needle valves) που καθορίζουν το ρυθμό αναρρόφησης και τον ρυθμό κατάθλιψης του λαδιού.

Αν τυχόν η ροή του λαδιού στην αναρρόφηση και στην κατάθλιψη είναι πολύ γρήγορη, ο ρυθμιστής στροφών δέχεται απότομες αλλαγές στο υδραυλικό του κύκλωμα κατά την εκκίνηση και είναι πολύ πιθανό να παρουσιαστούν εκτεταμένες φθορές στο εσωτερικό του.

Από την άλλη αν η ροή του λαδιού είναι πολύ αργή τότε το governor δεν «χτίζει» εγκαίρως υδραυλική πίεση και είναι πολύ πιθανό τη μηχανή να μην ξεκινήσει για αυτόν τον λόγο.

12 Επισκευή αυτόματου ρυθμιστή στροφών - Φθορά εξαρτημάτων ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών και αντικατάσταση τους

Καθώς ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών αποτελείται από πλήθος κινούμενων μερών, ειδικά όσοι λειτουργούν μηχανικά - υδραυλικά, είναι αναμενόμενο να παρουσιάζουν φθορά τα μέρη που τον απαρτίζουν. Όπως και η εκάστοτε μηχανή εσωτερική καύσης λοιπόν, έτσι και ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών πρέπει ανά τακτά χρονικά διαστήματα να συντηρείται, να ελέγχεται και να επισκευάζεται έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του.



Σχήμα 12-1 Πλήρης αποσυναρμολόγηση και εκτενής έλεγχος αυτόματου ρυθμιστή στροφών της εταιρείας Woodward μοντέλο PGA – EG - 200.

Κατασκευαστές όπως η Woodward, η Yanmar και η Euroρα προτείνουν να γίνεται επισκευή κάθε 20000 ώρες λειτουργίας ή ανά 5 έτη. Εάν η επισκευή παραταθεί για μεγάλο χρονικό διάστημα είναι πολύ πιθανό να δημιουργηθεί καταστροφή του governor. Επίσης ανά τακτά χρονικά διαστήματα προτείνεται να πραγματοποιείται έλεγχος της στάθμης και της ποιότητας του λαδιού του governor. Παρακάτω μπορούμε να δούμε με λεπτομέρειες κάποιες συνηθισμένες φθορές που προκύπτουν μετά από 20000 ώρες λειτουργίας ενός αυτόματου ρυθμιστή στροφών.

12.1 Φθορές στα αντίβαρα (flyweights)

Κατά την περιστροφή του ωστικού τριβέα (Thrust Bearing) και ταυτόχρονης προφόρτισης του ελατηρίου ρύθμισης στροφών (speeder spring) δημιουργείται μία κάθετη δύναμη στην ακμή του κάθε αντίβαρου όπου έρχεται σε επαφή με τον ωστικό

τριβέα. Η δύναμη αυτή έχει ως αποτέλεσμα την επιπεδότητα στο σημείο επαφής και οπτικά είναι το παρακάτω αποτέλεσμα. Δεξιά είναι ένα καινούριο ζευγάρι αντιβάρων ενώ αριστερά είναι ένα ζευγάρι αντιβάρων που χρήζει άμεση αντικατάσταση.



Σχήμα 12-2 Φθορές στα αντίβαρα (flyweights).

12.2 Φθορές στα accumulator pistons

Η φθορά στα έμβολα συσσώρευσης πίεσης μπορεί να προκαλέσει ελλιπή υδραυλική πίεση κατά την λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Σε αυτή την περίπτωση η έξοδος του δεν είναι επαρκής ώστε να γίνει άνετα δίχως καθυστέρηση η κίνηση του κανόνα των αντλιών πετρελαίου. Οπτικά η ένδειξη της φθοράς διακρίνεται στην επιφάνεια των εμβόλων όπου δημιουργούνται κάθετες γραμμές ως προς τις ραβδώσεις που δημιουργούν sealing. Όταν προκύψουν αυτές οι γραμμές και σε πλέον προχωρημένο στάδιο συνεχίζουν από την αρχή ως το τέλος του εμβόλου, σταματά να υπάρχει αποθήκευση της υδραυλικής ενέργειας εντός του θαλάμου που λειτουργεί το έμβολο. Όταν συμβεί αυτό πολλές φορές η μηχανή στην οποία βρίσκεται ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών δεν μπορεί να ξεκινήσει καθώς το governor δεν μπορεί να «χτίσει» επαρκή υδραυλική πίεση.



Σχήμα 12-3 Φθορές στα accumulator pistons

12.3 Φθορές στον πρωτεύον άξονα κίνησης (driveshaft)

Συνηθισμένη φθορά σε πληθώρα αυτόματων ρυθμιστών στροφών είναι η φθορά του πρωτεύον άξονα κίνησης. Η κυριότερη φθορά είναι αυτή που προκύπτει από την τσιμούχα διπλού χείλους, η οποία εξαιτίας της αρκετά σφιχτής συναρμογής με τον άξονα ώστε να υπάρχει στεγανότητα από τυχόν διαρροές λαδιού δημιουργείται στένωση της διαμέτρου στα δύο σημεία όπου ασκείται η εντονότερη τάση. Εξαιτίας αυτής της στένωσης ξεκινά να υπάρχει διαρροή λαδιού από και προς την μηχανή. Συνήθως μεταφέρονται αναθυμιάσεις της πετρελαιοκίνητης μηχανής εσωτερικής καύσης και υπολείμματα λαδιού της, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα το λάδι του αυτόματου ρυθμιστή στροφών να «μολύνεται» (contamination) και να προκύπτουν αστάθειες στην λειτουργία του.



Σχήμα 12-4 Φθορές στον πρωτεύον άξονα κίνησης (driveshaft).

12.4 Φθορές στην βαλβίδα ευαισθησίας (needle Valve)



Σχήμα 12-5 Φθορές στην βαλβίδα ευαισθησίας (αριστερά η φθαρμένη - δεξιά η καινούρια)

12.5 Φθορές στον ωστικό τριβέα (Thrust Bearing)

Κατά την περιστροφή του αυτόματου ρυθμιστή στροφών ο ωστικός τριβέας περιστρέφεται συνεχώς και ταυτόχρονα δέχεται πίεση από τα αντίβαρα (η κάτω πλευρά) και από το ελατήριο ρύθμισης στροφών (πάνω πλευρά). Όταν προκύπτει μεταβολή των στροφών και του φορτίου υπάρχει ολίσθηση των αντιβάρων στην κάτω επιφάνεια του ωστικού τριβέα με αποτέλεσμα στιγμιαία να υπάρχει εκτενής τριβή στην συγκεκριμένη επιφάνεια.



Σχήμα 12-6 Φθορές στον ωστικό τριβέα (Thrust Bearing). Αριστερά ο φθαρμένος τριβέας, δεξιά ο καινούριος.

12.6 Φθορές στην πιλοτική βαλβίδα (pilot valve plunger)

Η φθορά της πιλοτικής βαλβίδας δεν μπορεί να ελεγχθεί με οπτικό έλεγχο, παρά μόνο με την αφή. Καθώς η βαλβίδα αυτή λειτουργεί με μηχανική στεγανοποίηση, έχει υποστεί μηχανική και θερμική κατεργασία ώστε οι ακμές που περνάει το λάδι όταν αλλάζει η κατάσταση ελέγχου (αποστολή λαδιού υπό πίεση στο έμβολο ενέργειας ή στην ελαιολεκάνη του ρυθμιστή στροφών (αύξηση ή μείωση πετρελαίων αντίστοιχα). Η κατεργασία αυτή είναι 90° ακριβώς στις δύο ακμές τις βαλβίδας από την επιφάνεια επαφής με το σημείο ελέγχου. Με την πάροδο των χρόνων η γωνία η οποία δέχεται λάδι υπό πίεση δεν είναι πλέον 90 μοίρες επομένως δεν είναι και τόσο αιχμηρή στην αφή. Το αποτέλεσμα είναι να μην υπάρχει μηχανική στεγανοποίηση την στιγμή που ο θάλαμος ελέγχου είναι κλειστός, επομένως ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών να παρουσιάζει και αστάθεια στην λειτουργία του (ασταθή έξοδος στον τερματικό άξονα)

12.7 Φθορές σε περιφερειακά εξαρτήματα του μηχανικού αυτόματου ρυθμιστή στροφών

Όπως είναι γνωστό, ο μηχανικός αυτόματος ρυθμιστής στροφών συνδέεται με την μηχανή σε δύο βασικά σημεία.

- Στον πρωτεύον άξονα του (driveshaft), όπου λαμβάνει και την πληροφορία για την μεταβολή της ταχύτητας του κινητήρα
- Στον Τερματικό άξονα (terminal shaft), όπου αναλόγως με την ταχύτητα περιστροφής μεταβάλλεται και η θέση του έτσι ώστε να διαχειριστεί τις αντλίες πετρελαίου.

Στα παραπάνω μέρη παρατηρούνται φθορές μετά από αρκετές ώρες λειτουργίες και πρέπει να εκλαμβάνονται υπόψιν κατά την διαδικασία επισκευής του κινητήρα και του αυτόματου ρυθμιστή στροφών.



Σχήμα 12-7 Κωνικός οδοντωτός τροχός (bevel gear) ο οποίος συνδέεται με τον πρωτεύον άξονα και τον αντίστοιχο κωνικό οδοντωτό τροχό της μηχανής.

Παραπάνω παρατηρείται η εκτεταμένη φθορά του κωνικού οδοντωτού τροχού ο οποίος έχει δεχτεί δυναμική καταπόνηση και διατμητικές τάσεις από την επαφή με το ζευγάρι του. Η φθορά αυτή μπορεί να προκαλέσει ακόμα και δυσλειτουργία στον αυτόματο ρυθμιστή και ανωμαλία στην λειτουργία του πετρελαιοκινητήρα. Εφόσον θα υπάρχει εκτενές διάκενο μεταξύ των δύο οδοντωτών τροχών είναι λογικό να μην

υπάρχει ακριβής πληροφορία σχετικά με την ταχύτητα περιστροφής της μηχανής προς τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών. Επομένως και η λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή στροφών θα είναι ασταθής, χωρίς όμως να ευθύνεται αυτός για την δυσλειτουργία αυτή.



Σχήμα 12-8 Τερματικός σύνδεσμος (terminal bracket) με εκτεταμένη φθορά στην κεντρική οπή.

13 Ρύθμιση και βαθμονόμηση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών

Η βαθμονόμηση του αυτόματου ρυθμιστή στροφών , αν και το τελικό στάδιο επισκευής, είναι αν όχι το σημαντικότερο, ένα πολύ σημαντικό στάδιο όπου γίνεται έλεγχος ορθής λειτουργίας του αλλά και ρύθμιση βάσει το πρωτόκολλο του κατασκευαστή της μηχανής και του governor.

Εκτός από την ρύθμιση του governor είναι και ένας τρόπος επιβεβαίωσης πως όλη η διαδικασία της συντήρησης έχει γίνει σωστά και δεν παραλήφθηκαν ορισμένοι βασικοί έλεγχοι. Έστω και μία παράλειψη να υπάρξει, είναι βέβαιο πως θα είναι εμφανείς κατά την διαδικασία της ρύθμισης. Πρόκειται λοιπόν για την διασφάλιση και εξακρίβωση της ορθής λειτουργίας του αυτόματου ρυθμιστή στροφών, εξασφαλίζοντας την πλήρη λειτουργικότητα του σε πλήθος στροφών και φορτίου, συνεπώς και την σταθερή λειτουργία της μηχανής εσωτερικής καύσης στην οποία θα τοποθετηθεί.

Είναι ένα βήμα το οποίο απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς μπορούν να προκληθούν ανεπανόρθωτες βλάβες (overspeed, καταστροφή της μηχανής κ.α.).

Η εργασία της βαθμονόμησης μπορεί να φαντάζει δύσκολο για κάποιον μη εξοικιωμένο με τον χώρο των αυτόματων ρυθμιστών στροφών. Παρόλα αυτά η φιλοσοφία της διαδικασίας ρύθμισης του αυτόματου ρυθμιστή είναι απλή. Όπως είναι γνωστό η μηχανή εσωτερική καύσης ελέγχεται από τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών. Στην διαδικασία βαθμονόμησης οι ρόλοι εναλλάσσονται και τον ρόλο του ελέγχου (controlling) τον αναλαμβάνει ο προσομοιωτής φορτίου ενώ ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών ενεργεί σύμφωνα με τις εντολές που δίνονται από τον προσομοιωτή φορτίου.

13.1 Έλεγχος και προετοιμασία της διαδικασίας βαθμονόμησης του αυτόματου ρυθμιστή στροφών

Προτού ξεκινήσει η διαδικασία της βαθμονόμησης πρέπει να γίνεται έλεγχος του μηχανήματος όσον αφορά την ορθή λειτουργία του.

Πρέπει :

- να ελεγχθεί η ημερομηνία διακρίβωσης των μανομέτρων και των μετρητικών μηχανημάτων.
- Να ελεγχθεί η στάθμη λαδιού παροχής για τον αυτόματο ρυθμιστή στροφών.
- Έλεγχος των αισθητήρων feedback και μέτρησης στροφών ότι λειτουργούν σωστά.
- Έλεγχος ποιότητας παροχής του αέρα σε περίπτωση που χρειαστεί να ρυθμίσουμε αυτόματο ρυθμιστή στροφών με πνευματική λειτουργία.

- Τις παροχές ρεύματος του προσομοιωτή

Για την βαθμονόμηση χρησιμοποιείται μηχανήμα προσομοίωσης φορτίου (Load Simulator) με όλες τις απαραίτητες εγκαταστάσεις (μανόμετρα, παροχή λαδιού, παροχή τάσης κ.α.)

Αποτελείται από έναν ηλεκτρικό κινητήρα με τον οποίο συνδέεται ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών ώστε να λειτουργήσει. Ο ηλεκτροκινητήρας αυτός ελέγχεται από σύστημα αυτοματισμού ώστε να λειτουργεί σε σύστημα κλειστού βρόγχου (Close Loop) και να υπάρχει ανάδραση. Καθώς αυξάνονται οι στρόφες το governor μειώνει την έξοδο και αντίστοιχα όταν μειώνονται οι στρόφες αυξάνει την έξοδο του. Όπως και σε μία ΜΕΚ τα αποτελέσματα αυτά δημιουργούν αυξομείωση των στροφών της μηχανής, όπου στον προσομοιωτή φορτίου τον ρόλο της μηχανής τον έχει ο ηλεκτροκινητήρας.



Σχήμα 13-1 Προσομοιωτής φορτίου - δοκιμαστήριο (Test bench) αυτόματου ρυθμιστή στροφών.

Είναι αναγκαίο λοιπόν να υπάρχει συνεχώς ανατροφοδότηση της εξόδου του governor ώστε ο ηλεκτροκινητήρας να έχει όσο το δυνατόν γίνεται παρόμοια συμπεριφορά με αυτή της MEK.

Επίσης ο προσομοιωτής φορτίου αποτελείται και από άλλα παρελκόμενα μέρη όπως μανόμετρα, controller του ηλεκτροκινητήρα, παροχή συνεχής (DC) τάσης, ένδειξη των στροφών του ηλεκτροκινητήρα και αντλία λαδιού.

13.2 Διαδικασία ρύθμισης αυτόματου ρυθμιστή στροφών σε δοκιμαστήριο (Testbench/Load Simulator)

Μία βασική πληροφορία που χρειάζεται ένας ειδικός για την ρύθμιση governor, είναι το Part Number του. Εφόσον είναι διαθέσιμος ο αριθμός αυτός, είναι εφικτό να γίνει ρύθμιση βάσει το πρωτόκολλο που ορίζει ο κατασκευαστής για το συγκεκριμένο Part Number.

Αφού έχουμε διαθέσιμη την πληροφορία αυτή η διαδικασία της ρύθμισης μπορεί να ξεκινήσει, καθώς έτσι έχουμε διαθέσιμα όλα τα χαρακτηριστικά του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Στο κάτω μέρος του ρυθμιστή (governor) βρίσκεται η άτρακτος κίνησης του , όπου από εκεί λαμβάνει ως πληροφορία τις στροφές της μηχανής (του προσομοιωτή φορτίου στην προκειμένη περίπτωση)

Ο κάθε αυτόματος ρυθμιστής στροφών πρέπει να έχει βαθμονομημένη την εσωτερική «μηδενική βύθιση» (Zero Droop) έτσι ώστε η ένδειξη “0” στο πάνελ του governor να είναι “0” και στην πραγματικότητα. Στη συνέχεια βασισμένοι στον κωδικό και στα χαρακτηριστικά του αυτόματου ρυθμιστή στροφών γίνεται ρύθμιση με απόλυτη ακρίβεια το φάσμα λειτουργίας της ταχύτητας του ρυθμιστή.

Παραδείγματος χάρη εάν παρατηρήσουμε το ενδεικτικό ταμπελάκι του αυτόματου ρυθμιστή στροφών στο Σχήμα 13-2.



Σχήμα 13-2 Αυτόματος ρυθμιστής στροφών UG - 10D. Το ταμπελάκι των χαρακτηριστικών του δηλώνει πως λειτουργεί στο φάσμα με ταχύτητα περιστροφής από 566 έως 1189 στροφές / λεπτό. Σε αυτό το φάσμα λειτουργίας πρέπει να ρυθμιστεί όταν πραγματοποιηθεί η ρύθμιση του.

14 Συμπεράσματα

Στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γίνεται αντιληπτή η χρησιμότητα του αυτόματου ρυθμιστή στροφών, ο τρόπος λειτουργίας του καθώς και ο τρόπος με τον οποίο επενεργεί και αλληλοεπιδρά με μία πετρελαιοκίνητη μηχανή εσωτερικής καύσης . Έρευνες δεκάδων ετών από πληθώρα μηχανικών και επιστημόνων έχουν εφεύρει και βελτιστοποιήσει την λειτουργία του αυτόματου ρυθμιστή στροφών. Μαθηματικοί, ηλεκτρονικοί και μηχανικοί έχουν μελετήσει σε βάθος το πεδίο ελέγχου μηχανών εσωτερικής καύσης καθώς Επίσης, στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε η προσπάθεια σύνδεσης όλων αυτών των ερευνών που έχουν προσφέρει αξιόλογοι άνθρωποι του χώρου της επιστήμης και της μηχανολογίας, με τις απτές γνώσεις και την χειροπιαστή εμπειρία που αποκτάει ένας μηχανικός στην ενασχόληση του με τον χώρο των μηχανών εσωτερικής καύσης και στον έλεγχο αυτών. Ο συνδυασμός των θεωρητικών γνώσεων και της εμπειρίας που προκύπτουν από την τριβή με ένα αντικείμενο, είναι αυτό το στοιχείο που κάνει έναν μηχανικό καταρτισμένο σε έναν μεγάλο βαθμό. Επίσης, παρόλο που η εργασία είναι επικεντρωμένη στον χώρο των μηχανών εσωτερικής καύσης δεν σημαίνει πως οι εφαρμογές των αυτόματων ρυθμιστών έχουν περιοριστεί μόνο σε τέτοιες εφαρμογές, καθώς έγιναν ορισμένες αναφορές σε πληθώρα εφαρμογών. Η φιλοσοφία και η αρχή λειτουργίας παραμένει ίδια και στις υπόλοιπες εφαρμογές, με ορισμένες προσαρμογές να γίνονται αναλόγως τις απαιτήσεις της εκάστοτε εγκατάστασης. Ακόμα, ο αυτόματος ρυθμιστής στροφών συνδυάζει επιστημονικά πεδία της μηχανικής, της ηλεκτρολογίας, των ηλεκτρονικών, της πληροφορικής και του αυτοματισμού. Επομένως ακόμα και ένας τεχνικός στην ενασχόληση του με τους αυτόματους ρυθμιστές στροφών οφείλει να γνωρίζει όσο το δυνατόν περισσότερα για τα παραπάνω επιστημονικά πεδία ώστε να αποδώσει στις απαιτήσεις του αντικειμένου ελέγχου των μηχανών εσωτερικής καύσης. Τέλος, κάτι ακόμα που αναδεικνύεται μέσα από αυτή την εργασία είναι η ακρίβεια λειτουργίας και η αξιοπιστία μηχανολογικών κατασκευών όπως ο μηχανικός αυτόματος ρυθμιστής στροφών ο οποίος συνεχίζει να χρησιμοποιείται ακόμα και σε σύγχρονες βιομηχανικές εφαρμογές, κάτι το οποίο έχει αρκετό ενδιαφέρον για έναν μηχανολόγο μηχανικό.

15 Βιβλιογραφία

- <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>
- On Governors (From the Proceedings of the Royal Society), No.100, 1868
- Woodward UG-8 speed Adjusting Devices Pneumatic and Manifold Speed Setting for UG Type Governors Operation Manual (Product Manual 03045)
- On optimization of the pid governor for diesel engine (D.N. Malkhede , H.C. Dhariwal & M.C. Joshi (2002) On optimization of the pid governor for diesel engine, Mathematical Modelling and Analysis, 7:1, 135-150, DOI: 10.1080/13926292.2002.963718
- [https://en.wikipedia.org/wiki/Governor_\(device\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Governor_(device))
- Woodward APM Motor Control for Governor Speed-Setting Motors (Product Specification 82044 Revision NEW, 1991)
- https://en.wikipedia.org/wiki/Centrifugal_governor
- An introduction to open-loop control (Jonas Waller and Erik Englund Svenska yrkeshögskolan – University of Applied Sciences (from 1.8.2008 Novia0
- UG dial governor UG-5.7/UG-8/UG-10 Dial (Manual 03040 Revision E)
- PID Control - Application Note 83402 Written by Larry McLeister
- Woodward UG-5.7, 8, and 10 Lever Governor Installation and Operation Manual (Manual 03036 (Revision J))