



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία

**Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας
αεροσκαφών**



Φοιτητής: ΜΗΛΙΩΝΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΜ: 48345025

Επιβλέπων Καθηγητής

ΤΣΕΚΟΥΡΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, (ΙΟΥΛΙΟΣ) 2023



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS ENGINEERING**

Diploma Thesis

Operation principles & simulation for aircraft electrical power systems



Student: MILIONIS DIMITRIOS

Registration Number: 48345025

Supervisor

TSEKOURAS J. GEORGIOS

ASSISTANT PROFESSOR

ATHENS-EGALEO, (JULY) 2023

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Τσεκούρας Γεώργιος Ι. Επίκουρος Καθηγητής	Μανουσάκης Νικόλαος Επίκουρος Καθηγητής	Κονταξής Παναγιώτης Λέκτορας Εφαρμογών

Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ Μηλιώνης Δημήτριος, Σεπτέμβριος, 2022

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Μηλιώνης Δημήτριος του Φιλίππου, με αριθμό μητρώου 48345025 φοιτητής του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

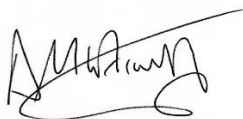
δηλώνω υπεύθυνα ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της 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 διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος καθηγητή.»

Ο Δηλών
Μηλιώνης Δημήτριος



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής στο τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Γ. Τσεκούρα, ο οποίος από την πρώτη στιγμή στάθηκε δίπλα μου στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ο κ. Τσεκούρας αποτέλεσε για μένα ένα λαμπρό παράδειγμα καθηγητή από ένα σύνολο εξαιρετων καθηγητών που είχα την τιμή να γνωρίσω όλα αυτά τα χρόνια που φοίτησα στη σχολή. Πέρα από την ακαδημαϊκή γνώση που έλαβα από αυτόν έμαθα πως με κόπο, επιμονή και υπομονή τίποτα δεν είναι ακατόρθωτο, όσο δύσκολο και να φαίνεται αρχικά.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και προπαντός τους γονείς μου που όλα αυτά τα χρόνια στάθηκαν δίπλα μου και μου προσέφεραν ότι ήταν δυνατόν από μεριάς τους ώστε να καταφέρω να σπουδάσω. Επιπλέον θέλω να τους ευχαριστήσω μέσα από την καρδιά μου που εκτός των άλλων με μεγάλωσαν με αρχές, οι οποίες με βοήθησαν να γίνω καλύτερος άνθρωπος.

Επίσης θέλω να εκφράσω τις ευχαριστίες μου σε όλους εκείνους του ανθρώπους που βρέθηκαν στη ζωή μου κατά την διάρκεια φοίτησής μου στη σχολή και με στήριξαν στις δυσκολίες που αντιμετώπισα.

Τέλος θα κλείσω με ένα απόσπασμα από το αγαπημένο μου ποίημα του Κ. Καβάφη «Ιθάκη», το οποίο εκφράζει τη συνολική στάση ζωής που ακολουθώ όλα αυτά τα χρόνια.

***«Σα βγεις στον πηγαιμό για την Ιθάκη,
να εύχεσαι να 'ναι μακρύς ο δρόμος,
γεμάτος περιπέτειες, γεμάτος γνώσεις»***

Περίληψη

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναλύεται η δομή καθώς και η αρχή λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας που είναι εγκατεστημένο σε ένα αεροσκάφος. Αρχικά παρουσιάζονται οι διάφοροι μέθοδοι με τους οποίους, ένα αεροσκάφος παράγει την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται ώστε να λειτουργήσουν τα πολυάριθμα συστήματα του. Στην συνέχεια αναλύεται η αρχή λειτουργίας των συσκευών καθώς και των εξαρτημάτων, τα οποία διαμεσολαβούν στο μετασχηματισμό, τη μετατροπή, τη διανομή και την κατανάλωση της παραγόμενης αυτής ηλεκτρικής ενέργειας. Ακολούθως παρουσιάζεται η δομή του ηλεκτρικού συστήματος ενός πραγματικού μεταγωγικού αεροπλάνου μεγάλου μεγέθους. Στο συγκεκριμένο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πραγματοποιείται ενεργειακός ισολογισμός, στον οποίο καταγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος για τρεις διαφορετικές καταστάσεις λειτουργίας του αεροπλάνου (τροχοδρόμηση, απογείωση/προσγείωση, κανονική πτήση). Για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων αυτών έγινε χρήση κώδικα, ο οποίος γράφτηκε στο προγραμματιστικό πακέτο Matlab. Τέλος με χρήση των αποτελεσμάτων του ενεργειακού ισολογισμού υλοποιήθηκε το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του αεροπλάνου στο Simulink του προγραμματιστικού πακέτου Matlab. Με την υλοποίηση της προσομοίωσης αυτής συλλέγονται πληροφορίες για την συμπεριφορά του ηλεκτρικού συστήματος του αεροπλάνου σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις.

Λέξεις – κλειδιά

σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, αεροπλάνο, παραγωγή, μετατροπή, διανομή, κατανάλωση, ηλεκτρικές μηχανές, συσσωρευτής, αισθητήρας, ενεργειακός ισολογισμός, Simulink, κώδικας Matlab.

Abstract

In the context of this thesis, it is analyzed the structure of the electrical system and also the operation principles of the electrical power system is based on the aircraft. At first, different methods of producing electricity that an aircraft has used, are presented with the purpose of making its multiple systems operational. Next, there is a full analyzation to the working principles of the devices as well as the components that mediate to the transformation, the conversion, the distribution and the consumption of the produced electrical energy of an aircraft. Subsequently, it is presented the formation of the electrical system of a real cargo airplane with big dimensions. In this particular electrical power system an energy balance calculation is defined based on the amount of energy that the airplane's system is in need for three operating conditions (ground run, take off/landing, normal flight). The results of the energy balance calculation are defined with the use of a code that is written to a programming platform named Matlab. Finally, with the use of the calculated results of the energy balance, the power supply system of the airplane was implemented to Simulink of the Matlab. With the implementation of this Simulation a lot of information is collected to describe the exact behavior of the electrical system of an airplane to various functions conditions.

Keywords

Electrical power system, aircraft, manufacturing, conversion, distribution, consumption, electrical machines, battery, sensor, energy balance, Simulink, code, Matlab

Περιεχόμενα

Κατάλογος Πινάκων.....	12
Κατάλογος Εικόνων	12
Αλφαβητικό Ευρετήριο.....	23
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	
Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	25
Σκοπός και στόχοι.....	25
Μεθοδολογία	26
Δομή.....	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ιστορική αναδρομή πτητικών μέσων	
1.1 Η επιθυμία του ανθρώπου να πετάξει.....	28
1.2 Η ιστορία των ελικοπτέρων.....	31
1.3 Χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε πτητικά μέσα.....	36
1.4 Σύγχρονες τάσεις	38
1.5 Συμπεράσματα.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πτητικά μέσα	
2.1 Εισαγωγή.....	41
2.2 Τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.....	41
2.3 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτρια	45
2.3.1 Νόμος Biot-Savart.....	45
2.3.2 Νόμος Ampere	48
2.3.3 Νόμος του Gauss-Μαγνητική ροή	49
2.3.4 Ανάπτυξη τάσης στα άκρα αγωγού από επαγωγή.....	50
2.3.5 Κανόνας του Lenz	52
2.3.6 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας.....	53
2.3.7 Βασική κατασκευαστική δομή στρεφόμενης μηχανής	58
2.3.8 Είδη γεννητριών	60
2.4 Παραγωγή A.C	61
2.4.1 Σύγχρονη γεννήτρια	62
2.4.1.1 Αρχή λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας.....	62
2.4.1.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας.....	66
2.4.1.3 Ισχύς και ροπή σύγχρονης γεννήτριας	68
2.4.1.4 Λειτουργία χωρίς φορτίο.....	71
2.4.1.5 Λειτουργία υπό φορτίο	72
2.4.1.6 Τάση βραχυκύκλωσης.....	76
2.4.1.7 Παραλληλισμός σύγχρονων γεννητριών	78
2.4.1.8 Σύγχρονες Γεννήτριες σε Αεροπλάνα	79
2.5 Παραγωγή DC	82
2.5.1 Γεννήτρια DC	82
2.5.1.1 Αρχή λειτουργίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος.....	82
2.5.1.2 Γεννήτριες ΣΡ ξένης διέγερσης.....	85
2.5.1.3 Γεννήτριες ΣΡ παράλληλης διέγερσης	88
2.5.1.4 Γεννήτριες ΣΡ διέγερσης σειράς	90
2.5.1.5 Γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής συνθέτης διέγερσης	92
2.5.1.6 Γεννήτριες ΣΡ διαφορικής συνθέτης διέγερσης.....	94

2.5.1.7	Γεννήτριες ΣΡ σε Αεροπλάνα	95
2.5.2	Συσσωρευτές	100
2.5.2.1	Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών	100
2.5.2.2	Συσσωρευτές Μολύβδου (lead - acid)	103
2.5.2.3	Συσσωρευτές Νικελίου - καδμίου (Ni-cd)	105
2.5.2.4	Συσσωρευτές λιθίου	106
2.5.2.5	Συσσωρευτές νικελίου – μετάλλου (Ni-MH).....	108
2.5.2.6	Συσσωρευτές σε Αεροπλάνα.....	108
2.6	Εξωτερικές και βοηθητικές πηγές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.....	111
2.7	Συμπεράσματα	114

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Μετασχηματισμός και μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας στα πτητικά μέσα

3.1	Εισαγωγή.....	115
3.2	Μετασχηματιστής	115
3.2.1	Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή	115
3.2.2	Κατασκευαστικά μέρη Μ/Σ	122
3.2.3	Πραγματικός Μ/Σ.....	125
3.2.4	Αυτομετασχηματιστής	130
3.2.5	Μ/Σ μετρήσεων	132
3.2.6	Τριφασικός Μ/Σ	134
3.2.7	Παραλληλισμός μετασχηματιστών	138
3.2.8	Μετασχηματιστές σε Αεροπλάνα	139
3.3	Ανορθωτικές διατάξεις (AC to DC).....	141
3.3.1	Μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις	141
3.3.1.1	Αρχή λειτουργίας διόδου	142
3.3.1.2	Ημιανορθωτής.....	147
3.3.1.3	Ανορθωτής πλήρους κύματος	152
3.3.1.4	Μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας	156
3.3.1.5	Τριφασικός ανορθωτής	157
3.3.2	Ελεγχόμενες από την φάση ανορθωτικές διατάξεις.....	163
3.3.3	Εφαρμογές σε Αεροπλάνα	164
3.4	Αντιστροφείς DC-AC διακοπτικού τύπου (inverter)	166
3.4.1	Μονοφασικός αντιστροφέας συνδεσμολογίας γέφυρας.....	166
3.4.2	Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM).....	171
3.4.3	Τριφασικοί αντιστροφείς.....	174
3.4.4	Εφαρμογές σε Αεροπλάνα	176
3.5	Συμπεράσματα.....	177

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Ηλεκτρικοί κινητήρες

4.1	Δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό ευρισκόμενο σε μαγνητικό πεδίο.....	178
4.2	Είδη κινητήρων	179
4.3	Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας	180
4.3.1	Αρχή λειτουργίας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	180
4.3.2	Ισοδύναμο κύκλωμα.....	183
4.3.3	Ισχύς, ροπή και χαρακτηριστικές καμπύλες ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα.....	187
4.4	Μονοφασικός κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα – Αρχή λειτουργίας .	193
4.5	Σύγχρονοι κινητήρες	195
4.5.1	Αρχή λειτουργίας σύγχρονων κινητήρων	195
4.5.2	Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα	196
4.5.3	Ισχύς, ροπή και χαρακτηριστικές καμπύλες σύγχρονου κινητήρα	197
4.6	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος	201

4.6.1	Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης και παράλληλης διέγερσης	203
4.6.2	Κινητήρας διέγερσης σειράς	208
4.6.3	Κινητήρας συνθέτης διέγερσης.....	210
4.7	Χρήση κινητήρων σε πτητικά μέσα	213
4.8	Συμπεράσματα.....	215

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Ηλεκτρικά δίκτυα πτητικών μέσων

5.1	Εισαγωγή.....	216
5.2	Χαρακτηριστικά αγωγών που χρησιμοποιούνται στα πτητικά μέσα	216
5.3	Ωμική αντίσταση αγωγού	222
5.4	Αυτεπαγωγή αγωγού	225
5.5	Στοιχεία Προστασίας ηλεκτρικών κυκλωμάτων	227
5.6	Συνδέσεις αγωγών	234
5.7	Στοιχεία ελέγχου ηλεκτρικών κυκλωμάτων	239
5.8	Τυπική δομή συστήματος διανομής σε πτητικά μέσα	245
5.9	Συμπεράσματα.....	252

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Φωτισμός

6.1	Εισαγωγή	253
6.2	Η έννοια του φωτός	253
6.3	Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.....	258
6.4	Λαμπτήρας πυράκτωσης	258
6.5	Λαμπτήρας εκκένωσης	260
6.6	Δίοδος LED	261
6.7	Εσωτερικός φωτισμός.....	262
6.8	Εξωτερικός φωτισμός.....	265
6.9	Συμπεράσματα.....	269

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : Ηλεκτρικά Όργανα & Αισθητήρες

7.1	Εισαγωγή.....	270
7.2	Μεγέθη και μονάδες.....	270
7.3	Όργανο κινητού πηνίου.....	272
7.4	Μέτρηση θερμοκρασίας.....	278
7.4.1	Θερμοζευγη (thermocouples).....	279
7.4.2	Αισθητήρια αγωγών (RTD)	283
7.5	Μέτρηση ταχύτητας – στροφών	285
7.5.1	Ταχογεννήτρια.....	285
7.5.2	Αισθητήρια μαγνητικού πεδίου – φαινόμενο Hall.....	287
7.6	Μέτρηση πίεσης	290
7.7	Μέτρηση ποσότητας καυσίμου	291
7.8	Συγχρονομετάδοση	294
7.9	Συμπεράσματα.....	295

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : Λοιπά συστήματα

8.1	Εισαγωγή.....	296
8.2	Συστήματα προσγείωσης.....	296
8.3	Συστήματα πυροπροστασίας.....	298
8.4	Συστήματα αντιπαγοποίησης - αποπαγοποίησης	301
8.5	Συστήματα κλιματισμού.....	303
8.6	Συστήματα εκκίνησης – έναυσης κινητήρων	304

8.7	Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης καιρού.....	306
8.8	Συμπεράσματα.....	309
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο : Προσομοίωση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αεροπλάνου		
9.1	Εισαγωγή.....	310
9.2	Διαμόρφωση δικτύου.....	310
9.3	Ενεργειακός ισολογισμός του συστήματος.....	313
9.4	Υλοποίηση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αεροπλάνου μέσω προγραμματιστικού πακέτου MATLAB.....	327
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο : Τελικά Συμπεράσματα και Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα		
10.1	Γενικά συμπεράσματα.....	349
10.2	Περιοχές για περαιτέρω έρευνα.....	350
	Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές.....	352
	Παράρτημα Α.....	355

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1 : Ηλεκτροχημική σειρά δυναμικών διαφόρων ηλεκτροδίων [15]	101
Πίνακας 7.1 : Θεμελιώδη μεγέθη στο SI [29]	271
Πίνακας 7.2 : Παράγωγα μεγέθη στο SI [29]	271
Πίνακας 7.3 : Χαρακτηριστικά πιο διαδεδομένων θερμοζευγών [29]	280
Πίνακας 9.1 : Αντιστοιχία ενεργοποιημένων γεννητριών με τους ζυγούς εναλλασσόμενου ρεύματος	313
Πίνακας 9.2 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής LH AC BUS	316
Πίνακας 9.3 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής ESS AC BUS	317
Πίνακας 9.4 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής MAIN AC BUS	319
Πίνακας 9.5 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής RH AC BUS	320
Πίνακας 9.6 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής ESS DC BUS	321
Πίνακας 9.7 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής MAIN DC BUS	323
Πίνακας 9.8 : Πιθανοί συνδυασμοί ζυγών, οι οποίοι μπορούν τα τροφοδοτηθούν από μια γεννήτρια	325
Πίνακας 9.9 : Ενεργειακός ισολογισμός 1 ^ο συνδυασμού	326
Πίνακας 9.10 : Ενεργειακός ισολογισμός 2 ^ο συνδυασμού	326
Πίνακας 9.11 : Ενεργειακός ισολογισμός 3 ^ο συνδυασμού	326
Πίνακας 9.12 : Ενεργειακός ισολογισμός 4 ^ο συνδυασμού	326
Πίνακας 9.13 : Ποσοστό φόρτισης γεννήτριας 40kVA σε κατάσταση μη κανονικής λειτουργίας	327
Πίνακας 9.14 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K1 ρελέ ισχύος	332
Πίνακας 9.15 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K2 ρελέ ισχύος	332
Πίνακας 9.16 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K3 ρελέ ισχύος	332
Πίνακας 9.17: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K4 ρελέ ισχύος	333
Πίνακας 9.18 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K5 ρελέ ισχύος	333
Πίνακας 9.19 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K6 ρελέ ισχύος	333
Πίνακας 9.20 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K7 ρελέ ισχύος	334
Πίνακας 9.21 : Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K8 ρελέ ισχύος	334

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: Το αεροπλάνο που κατασκευάστηκε από τον Victor Tatin το 1874 [1]	29
Εικόνα 1.2 : Το αεροπλάνο των αδερφών Wright κατά την διάρκεια της πτήσης των 59 δευτερολέπτων [1]	29
Εικόνα 1.3 : Ο Traian Vuia με το μονοκινητήριο αεροπλάνο του στις 18 Μαρτίου 1908 [1]	30
Εικόνα 1.4 : Ο Aurel Vlaicu με το Vlaicu 2 το 1911 [1]	31

Εικόνα 1.5 : Coanda – 1910 [1].....	31
Εικόνα 1.6 : Το σχέδιο του ελικοπτερου του Leonardo Da Vinci [1].....	32
Εικόνα 1.7 : Ο Paul Cornu με το πρώτο επανδρωμένο ελικόπτερο [1]	33
Εικόνα 1.8 : Ελικόπτερο R-5 κατασκευασμένο από τον Igor Sikorsky [1]	35
Εικόνα 1.9 : Χρονοδιάγραμμα μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [23]	37
Εικόνα 1.10 : Αρχιτεκτονική κινητήρα παλαιότερης γενιάς αεροσκάφους (αριστερό σύστημα) και νεότερης γενιάς αεροσκάφους (δεξιό σύστημα) [23]	39
Εικόνα 1.11 : Σχηματικό διάγραμμα δομής ηλεκτρικού συστήματος αεροσκάφους Boeing 787 που ακολουθεί την αρχιτεκτονική «περισσότερο ηλεκτρικό» [23].....	40
Εικόνα 2.1 : Ανάπτυξη μαγνητικής επαγωγής \vec{B} κινουμένου φορτίου q σύμφωνα με τον νόμο Biot Savart [31]	45
Εικόνα 2.2 : Μαγνητικό πεδίο $d\vec{B}$, το οποίο δημιουργείται από στοιχειώδες τμήμα $d\vec{s}$ αγωγού, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I [31].....	46
Εικόνα 2.3 : Υλικό σώμα, στο οποίο διέρχεται πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} [31].....	47
Εικόνα 2.4 : Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε κυκλικές διαδρομές σύμφωνα με τον νόμο του Ampere [36].....	48
Εικόνα 2.5 : Μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} διέρχεται μέσα από επιφάνεια S [31]	49
Εικόνα 2.6 : Κίνηση ευθύγραμμου αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου [31].....	50
Εικόνα 2.7 : Κανόνας τριών δακτύλων δεξιού χεριού [31].....	51
Εικόνα 2.8 : Κατεύθυνση επαγόμενου ρεύματος βάση τον κανόνα του Lenz [2]	53
Εικόνα 2.9 : Λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτριας και ως κινητήρα [6]	53
Εικόνα 2.10 : Στάδια μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ηλεκτρική μηχανή [6].....	54
Εικόνα 2.11 : Διάγραμμα ηλεκτρικής ενέργεια σε πραγματική ηλεκτρική μηχανή (λειτουργία κινητήρα) [31]	54
Εικόνα 2.12 : Ενέργεια και συνενέργεια πηνίου (χαρακτηριστική έντασης I -πεπλεγμένης ροής λ) [31]	57
Εικόνα 2.13 : Πυρήνας στάτη [34].....	59
Εικόνα 2.14 : Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής μηχανής [34]	60
Εικόνα 2.15 : Χαρακτηριστική μαγνήτισης σύγχρονης γεννήτριας [4]	64
Εικόνα 2.16 : Κύματα ΜΕΔ για συμφασικό ρεύμα τυμπάνου – τάση διεγέρσεως [34].....	65
Εικόνα 2.17 : Κύματα ΜΕΔ για διαφορά φάσεως φ μεταξύ ρεύματος τυμπάνου – τάσης διεγέρσεως [34]	65
Εικόνα 2.18 : Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού τυμπάνου σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα [4].....	67
Εικόνα 2.19 : Ισοδύναμο κύκλωμα τριών φάσεων σύγχρονης γεννήτριας [4]	68
Εικόνα 2.20 : Ροή ισχύος σύγχρονης γεννήτριας [4]	69

Εικόνα 2.21 : Διανυσματικό διάγραμμα τάσης – έντασης σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα με $R_e \neq 0$ (απλοποιημένο) [4]	70
Εικόνα 2.22 : Χαρακτηριστική γωνίας – ροπής σύγχρονων μηχανών [34]	71
Εικόνα 2.23 : Χαρακτηριστική καμπύλη $E_f - I_f$ ανοικτού κυκλώματος [7]	72
Εικόνα 2.24 : Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας υπό φορτίο [13]	73
Εικόνα 2.25 : Διανυσματικό διάγραμμα για $\Sigma.I = 1$ [34]	73
Εικόνα 2.26 : Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας με χωρητική φόρτιση.....	75
Εικόνα 2.27 : Διάγραμμα καμπυλών διεγέρσεως [34]	75
Εικόνα 2.28 : Διάγραμμα V-A σύγχρονης γεννήτριας με σταθερό ρεύμα διέγερσης [34]	76
Εικόνα 2.29 : Διάταξη πειράματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης γεννήτριας [7]	77
Εικόνα 2.30 : Κοινό διάγραμμα ανοικτού κυκλώματος – βραχυκύκλωσης [7]	77
Εικόνα 2.31 : Διάγραμμα τυπικού παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών [4].....	79
Εικόνα 2.32 : Σχηματικό διάγραμμα brushless γεννήτριας [22]	80
Εικόνα 2.33 : Brushless γεννήτρια 20 kVA ελικοπτέρου	81
Εικόνα 2.34 : Brushless γεννήτρια 40kVA αεροπλάνου.....	81
Εικόνα 2.35 : Στοιχειώδης μηχανή παραγωγής τάσης από επαγωγή [4]	83
Εικόνα 2.36 : Κυματομορφή τάσης εξόδου στοιχειώδους γεννήτριας [4].....	84
Εικόνα 2.37 : Στοιχειώδης γεννήτρια με συλλέκτη [4]	84
Εικόνα 2.38 : Κυματομορφή ανορθωμένης τάσης μέσω συλλέκτη [3]	85
Εικόνα 2.39 : Εξωτερική τάση γεννήτριας συνεχούς ρεύματος με πολλά ελίγματα [34].....	85
Εικόνα 2.40 : Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ ξένης διέγερσης [4].....	86
Εικόνα 2.41 : Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ α)διαθέτει β)δε διαθέτει τύλιγμα αντιστάθμισης [4]	87
Εικόνα 2.42 : Χαρακτηριστική φορτίου με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης I_F [4]	88
Εικόνα 2.43 : Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ παράλληλης διέγερσης [4]	89
Εικόνα 2.44 : Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ παράλληλης διέγερσης [4]	90
Εικόνα 2.45 : Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ διέγερσης σειράς [4]	91
Εικόνα 2.46 : Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ διέγερσης σειράς [4].....	92
Εικόνα 2.47 : Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης (μεταπαράλληλη σύνδεση) [4]	92
Εικόνα 2.48 : Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης [4].....	94
Εικόνα 2.49 : Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4].....	94
Εικόνα 2.50 : Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4]	95
Εικόνα 2.51 : Απλοποιημένη μορφή ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) σε γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διέγερσης [22].....	96
Εικόνα 2.52 : Αυτοματοποιημένος ρυθμιστής τάσης (vibrator-type voltage regulator) [22]	97

Εικόνα 2.53 : Ρυθμιστής τάσης τύπου άνθρακα [22].....	97
Εικόνα 2.54 : Κύκλωμα παραλληλισμού γεννητριών ΣΡ (equalizing circuit) [22]	98
Εικόνα 2.55 : Γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διέγερσης 28V - 300A.....	99
Εικόνα 2.56 : Ρυθμιστής τάσης τύπου άνθρακα.....	99
Εικόνα 2.57 : Σχηματική απεικόνιση στοιχείου συσσωρευτή [14].....	103
Εικόνα 2.58 : Διάγραμμα σχέσης ενέργειας – βάρους & ισχύος – βάρους για διάφορα είδη συσσωρευτών [37].....	107
Εικόνα 2.59 : Συσσωρευτής οξέων μολύβδου τοποθετημένος επί του αεροπλάνου	110
Εικόνα 2.60 : Εσωτερικές διασυνδέσεις στοιχείων συσσωρευτή νικελίου – καδμίου.....	110
Εικόνα 2.61 : Στοιχείο συσσωρευτή νικελίου – καδμίου.....	111
Εικόνα 2.62 : Ταχυσύνδεσμος εξωτερικής πηγής DC τάσης – αεροπλάνου [26].....	112
Εικόνα 2.63 : Ενδεικτικό διάγραμμα λειτουργίας συνδέσμου DC τάσης-κύκλωμα αεροπλάνου [26]	112
Εικόνα 2.64 : Ενδεικτικό κύκλωμα αεροπλάνου για διασύνδεση με AC εξωτερική πηγή [26]	113
Εικόνα 2.65 : Τυπικό σχεδιάγραμμα AC ταχυσύνδεσμου - 6 pins [41].....	114
Εικόνα 3.1 : Απλοποιημένος μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων [31]	116
Εικόνα 3.2 : Απλοποιημένος μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων αφαιρούμενων πεπλεγμένων ροών πρωτεύοντος – δευτερεύοντος [31].....	121
Εικόνα 3.3 : Ροή ενέργειας στον μετασχηματιστή [33].	122
Εικόνα 3.4 : Τομή μονοφασικού μετασχηματιστή τύπου α) πυρήνα β) μανδύα κελύφους [33]. ...	123
Εικόνα 3.5 : Τομή τριφασικού μετασχηματιστή τύπου α) πυρήνα β) μανδύα κελύφους πέντε κορμών γ) μανδύα κελύφους τριών κορμών [33].	124
Εικόνα 3.6 : Τομή κορμού μετασχηματιστή με τυλίγματα κυλινδρικού τύπου (α & β) και δισκοειδούς τύπου (γ) [33].....	125
Εικόνα 3.7 : α) Πραγματικός μονοφασικός μετασχηματιστής με προστιθέμενες μαγνητικές ροές, β) ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα [33]	126
Εικόνα 3.8 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πρωτεύοντος τυλίγματος πραγματικού Μ/Σ [33]....	128
Εικόνα 3.9 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πρωτεύοντος με κλάδο μαγνήτισης πραγματικού Μ/Σ [33].	129
Εικόνα 3.10 : Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πραγματικού Μ/Σ [33].	130
Εικόνα 3.11 : Συνδεσμολογία αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού [4].	130
Εικόνα 3.12 : Συνδεσμολογία Μ/Σ τάσης με βολτόμετρο [33].....	133
Εικόνα 3.13 : Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης με αμπερόμετρο [33].	134
Εικόνα 3.14 : Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης χωρίς τη διακοπή του κυκλώματος [4] ..	134
Εικόνα 3.15 : Συνδεσμολογία τριγώνου [33].	135
Εικόνα 3.16 : Συνδεσμολογία τριγώνου [33]	136

Εικόνα 3.17 : Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα [33].	137
Εικόνα 3.18 : Μετασχηματιστές έντασης σε αεροπλάνο.	140
Εικόνα 3.19 : Μετασχηματιστής αεροπλάνου 400Hz πολλών λήξεων.	141
Εικόνα 3.20 : Σύνδεση των ατόμων πυριτίου [18].	142
Εικόνα 3.21 : Άτομα κρυστάλλου πυριτίου α) δημιουργία οπής β) δέσμευση οπής από ηλεκτρόνιο [18]	143
Εικόνα 3.22 : Εμπλουτισμός ημιαγωγού α) αύξηση ελεύθερων ηλεκτρονίων β) αύξηση των αριθμών των οπών [18]	144
Εικόνα 3.23 : Επαφή pn α) δημιουργία ιόντων β) περιοχή απογύμνωσης [18].	145
Εικόνα 3.24 : Πόλωση διόδου α) ορθή πόλωση β) ανάστροφη πόλωση [18].	145
Εικόνα 3.25 : Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου [18].	146
Εικόνα 3.26 : Σχηματικό διάγραμμα διόδου [18].	146
Εικόνα 3.27 : α) είσοδος ημιανορθωτή β) κύκλωμα γ) έξοδος ημιανορθωτή [18].	147
Εικόνα 3.28 : Κύκλωμα ημιανορθωτή με επαγωγική συμπεριφορά [37].	149
Εικόνα 3.29 : Χαρακτηριστική τάσης και ρεύματος ημιανορθωτή με επαγωγική συμπεριφορά [37].	150
Εικόνα 3.30 : Χαρακτηριστική τάσεων – εντάσεων κυκλώματος ημιανορθωτή με φορτίο επαγωγικής συμπεριφοράς [37].	151
Εικόνα 3.31 : Κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος [37].	152
Εικόνα 3.32 : Χαρακτηριστικές εισόδου - εξόδου ανορθωτή πλήρους κύματος ωμικού φορτίου [37]	153
Εικόνα 3.33 : Αναπαράσταση των συνιστωσών της τάσης εξόδου v_o στο πεδίο της συχνότητας [37]	155
Εικόνα 3.34 : Αναπαράσταση των συνιστωσών του ρεύματος εξόδου i_o στο πεδίο της συχνότητας [37].	155
Εικόνα 3.35 : Ανορθωτής συνδεσμολογίας γέφυρας [37].	157
Εικόνα 3.36 : Πολυφασική ανόρθωση κοινού σημείου [37].	157
Εικόνα 3.37 : Χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου πολυφασικού ανορθωτή κοινού σημείου που παρουσιάζει καθαρά dc ρεύμα εξόδου ($\omega L \gg R$) [37]	158
Εικόνα 3.38 : Τριφασικός ανορθωτής κοινού σημείου [37]	159
Εικόνα 3.39 : Πλάτη αρμονικών συνιστωσών τάσης εξόδου τριφασικού ανορθωτή κοινού σημείου εκφρασμένο στο φάσμα συχνοτήτων [37]	160
Εικόνα 3.40 : Τριφασική γέφυρα ανόρθωσης [37].	160
Εικόνα 3.41 : Χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου τριφασικής γέφυρας ανόρθωσης [37]	161
Εικόνα 3.42 : Φασματικές συνιστώσες τάσης εξόδου τριφασικού ανορθωτή γέφυρας [37].	162
Εικόνα 3.43 : Ελεγχόμενη ημιανόρθωση με ωμικό φορτίο [19].	163

Εικόνα 3.44 : Ελεγχόμενος ημιανορθωτής με επαγωγικό φορτίο [19]	164
Εικόνα 3.45 : Κύκλωμα TRU [14]	165
Εικόνα 3.46 : TRU (3Φ είσοδος 115/200 Volts - 400Hz / Έξοδος 28Volts DC)	165
Εικόνα 3.47 : Μονοφασικός αντιστροφέας τύπου γέφυρας [37]	166
Εικόνα 3.48 : Κυματομορφές μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας α) τάση εξόδου τριών επιπέδων β) παλμοί κυκλώματος οδήγησης των IGBTs γ) ρεύμα εξόδου ωμικού φορτίου δ) ρεύμα εξόδου για ωμικό – επαγωγικό φορτίο ε) ρεύμα εξόδου για ωμικό – χωρητικό φορτίο [37]	167
Εικόνα 3.49 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή διακοπών S1 και S4 [37].....	168
Εικόνα 3.50 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή διακοπών S2 και S3 [37].....	168
Εικόνα 3.51 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S4 και D2 [37].....	169
Εικόνα 3.52 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S1 και D3 [37].....	169
Εικόνα 3.53 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S3 και D1 [37].....	170
Εικόνα 3.54 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S2 και D4 [37]	170
Εικόνα 3.55 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή D1 και D4 [37].....	170
Εικόνα 3.56 : Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή D1 και D4 [37].....	171
Εικόνα 3.57 : Κυματομορφές τεχνικής PWM [37]	172
Εικόνα 3.58 : Κύκλωμα συγκριτών τεχνικής PWM [37].....	172
Εικόνα 3.59 : Κυματομορφή τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας [37]	173
Εικόνα 3.60 : Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφέα [37]	174
Εικόνα 3.61 : Χαρακτηρίστηκες τριφασικού αντιστροφέα για συμμετρικό ωμικοεπαγωγικό φορτίο [37]	175
Εικόνα 3.62 : Μονοφασικό inverter 115Volts – 400Hz.....	176
Εικόνα 4.1 : Στοιχειώδης δύναμη που ασκείται σε στοιχειώδη μέρος του αγωγού όταν αυτός διαρρέεται από στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο [31]	178
Εικόνα 4.2 : Ασκούμενη δύναμη Laplace που ασκείται σε ευθύγραμμο αγωγό ευρισκόμενου σε μαγνητικό πεδίο [31]	179
Εικόνα 4.3 : Τυλίγματα σε συνδεσμολογία τριγώνου ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [3].....	180
Εικόνα 4.4 : Δρομέας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [39].....	181
Εικόνα 4.5 : Κυματομορφές τριφασικής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του επαγωγικού κινητήρα [3].....	181
Εικόνα 4.6 : Εναλλαγή πολικότητας μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του επαγωγικού κινητήρα [3].....	182
Εικόνα 4.7 : Δρομέας κλωβού ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4].....	183
Εικόνα 4.8 : Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη μιας φάσης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [10]	184
Εικόνα 4.9 : Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4]	186

Εικόνα 4.10 : Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4]	186
Εικόνα 4.11 : Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης επαγωγικού κινητήρα [4].....	186
Εικόνα 4.12 : Διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα [4].....	187
Εικόνα 4.13 : Μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό του επαγωγικού κινητήρα που λειτουργούν με α) χωρίς φορτίο β) μεγάλο φορτίο [4].....	190
Εικόνα 4.14 : Γραφικές παραστάσεις επαγωγικού κινητήρα α) ρεύμα συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα β) συνολικό μαγνητικό πεδίο συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα [4]	192
Εικόνα 4.15 : Γραφικές παραστάσεις επαγωγικού κινητήρα α) συντελεστής ισχύος συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα β) ροπή συνάρτηση της ταχύτητας του δρομέα [4]	192
Εικόνα 4.16 : Διάγραμμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα α) μηδενική ροπή λόγω ευθυγραμμισμένων πεδίων β) ανάπτυξη ροπής λόγω αρχικής κίνησης δρομέα [3]	193
Εικόνα 4.17 : Κυματομορφές ροών μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα [3].....	194
Εικόνα 4.18 : Σχηματική απεικόνιση ροών μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα [3].....	194
Εικόνα 4.19 : Σχηματικό διάγραμμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με βοηθητικό τύλιγμα [3].....	195
Εικόνα 4.20 : Σύγχρονος κινητήρας [4]	196
Εικόνα 4.21 : Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα [4]	196
Εικόνα 4.22 : Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα [4]	197
Εικόνα 4.23 : Στιγμιότυπο εσωτερικού μέρους σύγχρονου κινητήρα [3].....	198
Εικόνα 4.24 : Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα όταν η αντίσταση οπλισμού θεωρείται αμελητέα [3]	198
Εικόνα 4.25 : Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα κυλινδρικού δρομέα με μεταβολή στο φορτίο [3].....	200
Εικόνα 4.26 : Διανυσματικό διάγραμμα συγχρόνου κινητήρα με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης [4].	201
Εικόνα 4.27 : Καμπύλες V σύγχρονου κινητήρα [4]	201
Εικόνα 4.28 : α) Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ, β) απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ [4]	202
Εικόνα 4.29 : Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ξένης διέγερσης [4]	203
Εικόνα 4.30 : Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης [4]	203
Εικόνα 4.31 : Χαρακτηριστική στροφών – ροπής κινητήρα ΣΡ ξένης και παράλληλης	205
Εικόνα 4.32 : Γραφική παράσταση ταχύτητας - ροπής με τη μεταβολή της αντίστασης διέγερσης[4]	206
Εικόνα 4.33 : Χαρακτηριστική ροπής στροφών με την μεταβολή της τάσης οπλισμού [4].....	207
Εικόνα 4.34 : Χαρακτηριστική στροφών – ροπής με τη χρήση μεταβλητής αντίστασης στο κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου [4]	207

Εικόνα 4.35: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σειράς [4]	209
Εικόνα 4.36 : Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών κινητήρα διέγερσης σειράς [4]	209
Εικόνα 4.37 : Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρων σύνθετης διέγερσης α) μεταπαράλληλη συνδεσμολογία β)προπαράλληλη συνδεσμολογία [4]	211
Εικόνα 4.38 : Χαρακτηριστική ροπής - στροφών κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης σε σύγκριση με τους κινητήρες διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης [4].....	212
Εικόνα 4.39 : Χαρακτηριστική ροπής – στροφών κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4] .	213
Εικόνα 4.40 : Σχέδιο κινητήρα με δύο τυλίγματα διέγερσης για αλλαγή φοράς περιστροφής (split field motor) [26]	214
Εικόνα 4.41 : Γραμμικός κινητήρας ενεργοποίησης (linear actuator)	214
Εικόνα 4.42 : Τριφασική αντλία υδραυλικού συστήματος	215
Εικόνα 5.1: Κυκλικό χλίστο της ίντσας και τετραγωνικό χλίστο της ίντσας [22].....	217
Εικόνα 5.2 : Μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης σε αγωγούς [22]	217
Εικόνα 5.3 : Πίνακας επιλογής μεγέθους αγωγού για συγκεκριμένο μήκος και συγκεκριμένη ένταση ρεύματος υπό συνθήκες συνεχούς λειτουργίας αγωγού 1) μέσα σε περίβλημα 2) στον αέρα [22].....	218
Εικόνα 5.4 : Πίνακας επιλογής μεγέθους αγωγού για συγκεκριμένο μήκος και συγκεκριμένη ένταση ρεύματος για λειτουργία μικρότερη των δύο λεπτών [22]	219
Εικόνα 5.5 : Χαρακτηριστικά αγωγών χαλκού ως προς την ένταση του ρεύματος για λειτουργία εντός περιβλήματος και ελεύθερου αέρα [22].....	219
Εικόνα 5.6 : Χαρακτηριστικά αγωγών αλουμινίου [22]	220
Εικόνα 5.7 : Επεξήγηση σήμανσης αγωγού αεροπλάνου	220
Εικόνα 5.8 : Συντομογραφίες συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη σήμανση των αγωγών	221
Εικόνα 5.9 : Αγωγοί με σήμανση	222
Εικόνα 5.10 : Αγωγός κυκλικής διατομής που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα [24]	222
Εικόνα 5.11 : Γραμμική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από την θερμοκρασία [24].....	224
Εικόνα 5.12 : Υπολογισμός αυτεπαγωγής αγωγού [31].....	225
Εικόνα 5.13 : Τυπική απεικόνιση βραχυκυκλώματος [22]	227
Εικόνα 5.14 : Θήκη τοποθέτησης ασφάλειας τήξεως [14].....	228
Εικόνα 5.15 : Διαφορά είδη ασφαλειών τήξεως [22].....	228
Εικόνα 5.16 : Σχηματική απεικόνιση περιοριστή ρεύματος [14].....	229
Εικόνα 5.17 : Αντίσταση περιορισμού ρεύματος.....	229
Εικόνα 5.18 : Χαρακτηριστικές χρόνου ενεργοποίησης της αυτόματης ασφάλειας σε σχέση με την ένταση του ρεύματος [26].....	230
Εικόνα 5.19 : Σχηματικό διάγραμμα αυτόματης ασφάλειας α) κλειστό κύκλωμα, β) ενεργοποιημένη από διέλευση μεγάλης έντασης ρεύματος [26].....	231

Εικόνα 5.20 : Διάφορα είδη αυτόματης ασφάλειας	231
Εικόνα 5.21 : Σχηματικό διάγραμμα reverse current cut – out relay [26].....	232
Εικόνα 5.22 : Σχηματικό διάγραμμα overvoltage relay σε σύστημα συνεχούς ρεύματος [26]	233
Εικόνα 5.23 : Σχηματικό μονοφασικό διάγραμμα προστασίας διαφορικού ρεύματος [26].....	234
Εικόνα 5.24 : Πρεσαριστοί ακροδέκτες [26].....	235
Εικόνα 5.25 : Διάφορα είδη splice tube	236
Εικόνα 5.26 : Σύνδεση αγωγών με splice tube	236
Εικόνα 5.27 : Διάφορα είδη terminal strips.....	237
Εικόνα 5.28 : Διασύνδεση αγωγών σε terminal strip	237
Εικόνα 5.29 : Κατασκευαστικά μέρη αεροπορικής φίσσας [26]	238
Εικόνα 5.30 : Αρίθμηση επαφών σε φίσσες διαφορετικού μεγέθους [26].....	238
Εικόνα 5.31 : Διάφορα είδη ηλεκτρικών φισσών.....	239
Εικόνα 5.32 : Σχηματικό διάγραμμα α) μονοπολικού διακόπτη, b) διπολικού διακόπτη, c) μεταγωγικού διακόπτη, d) διπολικού μεταγωγικού διακόπτη [26].....	240
Εικόνα 5.33 : Μηχανική σύνδεση διακοπών [26]	240
Εικόνα 5.34 : Σχηματικό διάγραμμα push switch [26]	241
Εικόνα 5.35 : Διακόπτες μπουτόν σε χειριστήριο	241
Εικόνα 5.36 : Περιστροφικός διακόπτης.....	242
Εικόνα 5.37 : Σχηματικό διάγραμμα μικροδιακόπτη [26]	242
Εικόνα 5.38 : Μαγνητικός διακόπτης [26].....	243
Εικόνα 5.39 : Δομή θερμικού διακόπτη [26]	244
Εικόνα 5.40 : Δομή πρεσοδιακόπτη [26]	244
Εικόνα 5.41 : Σχηματικό διάγραμμα ρελέ [14]	245
Εικόνα 5.42 : Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα μικρού αεροπλάνου [22]	246
Εικόνα 5.43 : Ηλεκτρικό κύκλωμα μονοκινητήριου αεροπλάνου [22]	247
Εικόνα 5.44 : Τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής δικινητήριου αεροπλάνου [22]	248
Εικόνα 5.45 : Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διαχωριζόμενους ζυγούς [22].....	249
Εικόνα 5.46 : Ενεργοποίηση του συστήματος διαχωρισμού μπαρών σε περίπτωση βλάβης [22] .	250
Εικόνα 5.47 : Δομή παράλληλου ηλεκτρικού συστήματος [22]	251
Εικόνα 5.48 : Δομή διαχωρισμένου παράλληλου συστήματος [22]	251
Εικόνα 5.49 : Ολοκληρωμένη τυπική δομή ηλεκτρικού συστήματος μεγάλου αεροπλάνου [22]..	252
Εικόνα 6.1 : Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [27].....	254
Εικόνα 6.2 : Φασματική κατανομή θερμικής ακτινοβολίας για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας [28].....	255
Εικόνα 6.3 : Σχηματική απεικόνιση φωτοηλεκτρικού φαινομένου [28].....	256
Εικόνα 6.4 : Διάγραμμα ακτινοβολούμενης ενέργειας συνάρτηση του μήκους κύματος για	

διαφορετικές θερμοκρασίες [27]	259
Εικόνα 6.5 : Σχηματικό διάγραμμα λαμπτήρα πυράκτωσης [27]	260
Εικόνα 6.6 : Μηχανισμός εκκένωσης λαμπτήρα φθορισμού [27]	261
Εικόνα 6.7 : Διάφορα είδη LED που διατίθενται στην αγορά [40].....	262
Εικόνα 6.8 : Σχηματικό διάγραμμα εσωτερικού φωτισμού οργάνου [26].....	263
Εικόνα 6.9 : Ειδικές βάσεις λαμπτήρων για εξωτερικό φωτισμό οργάνων [26].....	264
Εικόνα 6.10 : Εσωτερικός φωτισμός επιφανειών.....	264
Εικόνα 6.11 : Φωτά πλοήγησης (navigation lights) σε αεροπλάνο [22]	266
Εικόνα 6.12 : Δομή περιστρεφόμενου φωτιστικού αντισύγκρουσης [26]	267
Εικόνα 6.13 : Φως προσγείωσης σε αεροπλάνο (Landing light).	268
Εικόνα 6.14 : Φώτα τροχοδρόμησης σε αεροπλάνο (Taxi light).	268
Εικόνα 7.1 : Αγωγήμο πλαίσιο οργάνου κινητού πηνίου [29]	272
Εικόνα 7.2 : Δομή ενός οργάνου κινητού πηνίου [29].....	273
Εικόνα 7.3 : Όργανο κινητού πηνίου σε συνδεσμολογία αμπερομέτρου [29].....	275
Εικόνα 7.4 : Δομή αντίστασης κλίμακας που χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα [26]	276
Εικόνα 7.5 : Διάταξη μέτρησης εναλλασσόμενου ρεύματος με όργανο κινητού πηνίου [26].....	276
Εικόνα 7.6 : Συνδεσμολογία βολτομέτρου με χρήση οργάνου κινητού πηνίου [29].....	277
Εικόνα 7.7 : Όργανο κινητού πηνίου σε χρήση βολτομέτρου	278
Εικόνα 7.8 : α) διάταξη θερμοζεύγους β) μέτρηση θερμοηλεκτρικής τάσης [29].....	280
Εικόνα 7.9 : Σχηματική απεικόνιση 1 ^{ου} νόμου [29]	281
Εικόνα 7.10 : Σχηματική απεικόνιση 2 ^{ου} νόμου [29]	281
Εικόνα 7.11 : Σχηματική απεικόνιση 3 ^{ου} νόμου [29]	281
Εικόνα 7.12 : Σχηματική απεικόνιση 4 ^{ου} νόμου [29]	282
Εικόνα 7.13 : Σχηματική απεικόνιση 5 ^{ου} νόμου [29]	282
Εικόνα 7.14 : Συστοιχία θερμοζευγών περιμετρικά του κινητήρα αεροπλάνου.....	283
Εικόνα 7.15 : Τυπική διάταξη γέφυρας Wheatstone με αισθητήρα RTD [22]	284
Εικόνα 7.16 : Αισθητήρας θερμοκρασίας μεταβλητής αντίστασης (RTD)	284
Εικόνα 7.17 : Σχηματικό διάγραμμα διάταξης ταχογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος με όργανο μέτρησης [22]	286
Εικόνα 7.18 : Ταχογεννήτρια	286
Εικόνα 7.19 : Διάταξη πλακιδίου Hall [29].....	287
Εικόνα 7.20 : Διάταξη πλακιδίου Hall για μέτρηση ταχύτητας σώματος κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό [29].....	289
Εικόνα 7.21 : Πύκνωση μαγνητικών γραμμών σε διάταξη μέτρησης ταχύτητας σιδηρομαγνητικού υλικού [29]	289
Εικόνα 7.22 : Μεταβιβαστής πίεσης	290

Εικόνα 7.23 : Διάταξη πηνίων ενός γραμμικά μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή [29].....	291
Εικόνα 7.24 : Μορφή πυκνωτή μέτρησης ποσότητας καυσίμου [30].....	292
Εικόνα 7.25 : Τοποθέτηση πυκνωτών εντός της δεξαμενής καυσίμου [30]	293
Εικόνα 7.26 : Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συγχρονομετάδοσης με χρήση συνεχούς τάσης [22].....	294
Εικόνα 7.27 : Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συγχρονομετάδοσης με χρήση εναλλασσόμενης τάσης [22].....	295
Εικόνα 8.1 : Τυπικό διάγραμμα ένδειξης θέσης συστήματος προσγείωσης [22]	297
Εικόνα 8.2 : Τυπικό διάγραμμα ανίχνευσης φωτιάς [26].....	299
Εικόνα 8.3 : Τυπικό σχεδιάγραμμα λειτουργίας ανιχνευτή καπνού [26].....	300
Εικόνα 8.4 : Χειρολαβή έλξης ενεργοποίησης πυρόσβεσης	301
Εικόνα 8.5 : Πυροσβεστήρας ελικοπτέρου	301
Εικόνα 8.6 : Περιοχές χρήσης ηλεκτρικής αποπαγοποίηση – αντιπαγοποίηση [26].....	303
Εικόνα 8.7 : Τυπική δομή ενός συστήματος κλιματισμού [26]	304
Εικόνα 8.8 : Τυπικό ηλεκτρικό διάγραμμα ηλεκτρικής εκκίνησης [26]	305
Εικόνα 8.9 : Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα σπινθηριστών [26].....	306
Εικόνα 8.10 : Εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το ραντάρ [22].....	307
Εικόνα 8.11 : Σύστημα συντεταγμένων σε οθόνη CRT [22]	308
Εικόνα 9.1 : Δομή ηλεκτρικού δικτύου αεροσκάφους προς μελέτη	311
Εικόνα 9.2 : Μονογραμμικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος.	312
Εικόνα 9.3 : Δομή πηγής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB	329
Εικόνα 9.4 : Απεικόνιση του υποσυστήματος GENERATOR στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB	329
Εικόνα 9.5 : Εσωτερικό κύκλωμα προσομοίωσης του ρελέ ισχύος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.....	330
Εικόνα 9.6 : Παράθυρο ελέγχου των διακοπών στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.....	331
Εικόνα 9.7 : Απεικόνιση του υποσυστήματος Κ (ρελέ ισχύος) στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.....	331
Εικόνα 9.8 : Λογικό κύκλωμα ελέγχου ρελέ ισχύος K1-K8 στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.	336
Εικόνα 9.9 : Απεικόνιση του υποσυστήματος ελέγχου των ρελέ ισχύος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.....	336
Εικόνα 9.10 : Κύκλωμα ηλεκτρικού συστήματος αεροπλάνου στο προγραμματιστικό πακέτο του MATLAB.....	337
Εικόνα 9.11 : Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό LH AC	341

Εικόνα 9.12 : Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό LH AC	341
Εικόνα 9.13 : Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό ESS AC.....	342
Εικόνα 9.14 : Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό ESS AC.....	342
Εικόνα 9.15 : Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό MAIN AC.....	343
Εικόνα 9.16 : Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό MAIN AC	343
Εικόνα 9.17 : Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό RH AC.....	344
Εικόνα 9.18 : Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό RH AC	344
Εικόνα 9.19 : Πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας Νο4 μετά από την απώλεια της γεννήτριας Νο3	345
Εικόνα 9.20 : Γραφική παράσταση πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας Νο4 μετά την διόρθωση της επαγόμενης τάσης E_f' (πολικό)	346
Εικόνα 9.21 : Γραφική παράσταση ρεύματος I_α στη γεννήτρια Νο4 μετά την διόρθωση της επαγόμενης τάσης E_f' (πολικό)	347

Αλφαβητικό Ευρετήριο

- CSD** : Constant Speed Drive (Οδηγός Σταθερής Ταχύτητας)
- VSCF** : Variable Speed Constant Frequency (Μεταβλητή ταχύτητα Σταθερή Συχνότητα)
- IDEA** : Integrated Digital Electrical Airplane (Ολοκληρωμένο Ψηφιακό Ηλεκτρικό Αεροπλάνο)
- NASA** : National Aeronautics and Space Administration (Οργανισμός Εξερεύνησης του Διαστήματος)
- DC** : Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)
- AC** : Alternating Current (Εναλλασσόμενο Ρεύμα)
- GCU** : Generator Control Unit (Μονάδα ελέγχου Γεννήτριας)
- TRU** : Transformer Rectifier Unit (Μονάδα Μετασχηματιστή – Ανορθωτή)
- APU** : Auxiliary Power Unit (Βοηθητική Μονάδα Ισχύος)
- RMS** : Root Mean Square (Μέση Τετραγωνική τιμή Ρίζας)
- VSI** : Voltage Source Inverter (Μετατροπέας Πηγής Τάσης)
- CSI** : Current Source Inverter (Μετατροπέας Πηγής Έντασης)
- PWM** : Pulse Width Modulation (Διαμόρφωση Εύρους Παλμών)
- EWIS** : Electrical Wiring Interconnection System (Ηλεκτρικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Αγωγών)
- FAA** : Federal Aviation Administration (Ομοσπονδιακή Διοίκηση Αεροπορίας)
- AWG** : American Wire Gauge (Αμερικάνικο Σύστημα Μέτρησης Αγωγών)
- DPCT** : Differential Protection Current Transformer (Μετασχηματιστής Προστασίας Διαφορικού Ρεύματος)
- SSL** : solid – state lighting (Φωτισμός Στέρεας Κατάστασης)
- USCS** : United Stage Customary System (Συνήθεις μονάδες των Ηνωμένων Πολιτειών)
- SI** : System International (Διεθνές Σύστημα Μονάδων)
- RTD** : Resistance Temperature Detector (Ανιχνευτής Θερμοκρασίας Αντίστασης)
- LVDT** : Linear Variable Differential Transformer (Γραμμικός Μεταβλητός Διαφορικός Μετασχηματιστής)
- CRT** : Cathode Ray Tube (Οθόνη Καθοδικού Σωλήνα)
- OCC** : Open Circuit Characteristic (Χαρακτηριστική ανοιχτού κυκλώματος)
- SCC** : Short Circuit Characteristic (Χαρακτηριστική Βραχυκυκλώματος)
- GCU** : Generator Control Unit (Μονάδα Ελέγχου Γεννήτριας)
-
- ΜΕΔ** : Μαγνητεγερτική Δύναμη
- ΗΕΔ** : Ηλεκτεγερτική Δύναμη
- Μ/Σ** : Μετασχηματιστής
- ΗΠΑ** : Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής
- ΑΗΕΔ** : Αντιηλεκτεγερτική Δύναμη

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Στην αεροπορική βιομηχανία εδώ και αρκετές δεκαετίες παρουσιάζονται πρωτοπόρες και καινοτόμες ιδέες. Τα τελευταία χρόνια η κλιματική αλλαγή που παρατηρείται οδήγησε τον άνθρωπο στην ανάπτυξη εφαρμογών, οι οποίες θα ήταν φιλικότερες προς τον ίδιο, αλλά και προς το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό αποτέλεσε μια πρόκληση για την αεροπορική τεχνολογία, η οποία θα έπρεπε να συμβαδίσει με τα νέα δεδομένα της εποχής. Για τον λόγο αυτό έχει κριθεί απαραίτητο από τις κατασκευάστριες εταιρίες η βελτιστοποίηση των διαφόρων συστημάτων των πτητικών μέσων, ώστε να εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ασφάλεια για τους επιβάτες με γνώμονα τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Για την επίτευξη αυτού του στόχου η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε περισσότερα συστήματα ενός αεροσκάφους ήταν μονόδρομος. Αυτό συμβαίνει, διότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι ικανή να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας παρουσιάζοντας μεγάλο βαθμό απόδοσης. Σε αυτό συνέβαλλαν οι ηλεκτρικές μηχανές, καθώς και η ραγδαία ανάπτυξη των ηλεκτρονικών τα τελευταία χρόνια. Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη μεγαλύτερων και πολυπλοκότερων ηλεκτρικών κυκλωμάτων σε ένα αεροσκάφος. Συνεπώς η εξάρτηση ενός αεροσκάφους από την ηλεκτρική ενέργεια με το πέρασμα των ετών γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη.

Σκοπός και στόχοι

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάλυση της αρχής λειτουργίας των διαφόρων ηλεκτρικών εξαρτημάτων, καθώς και η παρουσίαση της δομής ενός ηλεκτρικού δικτύου που χρησιμοποιείται σε ένα αεροσκάφος

Αρχικά συλλέγονται όλες οι πληροφορίες από τους φυσικούς νόμους και φαινόμενα, τα οποία εκμεταλλεύονται τα διάφορα ηλεκτρικά εξαρτήματα για τη λειτουργία τους. Στη συνέχεια μέσω μαθηματικών υπολογισμών καταγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις ενός τέτοιου συστήματος κατά τη λειτουργία του. Στόχος αυτής της διπλωματικής εργασίας αφενός είναι η κατανόηση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του αεροπλάνου και αφετέρου η συλλογή πληροφοριών για τις ενεργειακές ανάγκες του, όπου η σωστή ανάλυση των αποτελεσμάτων συμβάλλει σε μελλοντικές αναβαθμίσεις και τροποποιήσεις.

Μεθοδολογία

Αρχικά κατά την εκτέλεση των υπολογισμών γίνεται καταγραφή όλων των καταναλώσεων του αεροσκάφους που έχει επιλεγεί για τη μελέτη, όπως αυτά καταγράφονται στο εγχειρίδιο της κατασκευάστριας εταιρείας. Στη συνέχεια με χρήση του προγραμματιστικού πακέτου Matlab καταστρώνονται οι κατάλληλοι κώδικες, ώστε να πραγματοποιηθούν οι περαιτέρω υπολογισμοί που είναι απαραίτητοι για την ολοκλήρωση του ενεργειακού ισολογισμού.

Με την ανάλυση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τον ενεργειακό ισολογισμό εξάγονται συμπεράσματα για τις ενεργειακές ανάγκες του αεροπλάνου. Επιπλέον ελέγχεται η φόρτιση των γεννητριών του συστήματος και ταυτόχρονα γίνεται έλεγχος της φόρτισης τους σε διάφορες λειτουργικές καταστάσεις του αεροπλάνου.

Τέλος το βασικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας του αεροπλάνου σχεδιάζεται στο Simulink του προγραμματιστικού πακέτου Matlab. Σε αυτήν την προσομοίωση μεταβάλλονται διάφορες παράμετροι του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας του αεροσκάφους όπως είναι η μεταβολή του φορτίου των ζυγών, καθώς και ο αριθμός των γεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία. Με τον τρόπο αυτό αντλούνται πληροφορίες για τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο.

Δομή

Η δομή της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

Στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή στις πρώτες προσπάθειες που κατέβαλε ο άνθρωπος, ώστε να κατακτήσει τον αιθέρες. Επιπλέον γίνεται μια σύντομη περιγραφή της ιστορικής εξέλιξης των ηλεκτρικών συστημάτων ενός αεροσκάφους, καθώς και των μελλοντικών τάσεων που πρόκειται να ακολουθηθούν.

Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται ανάλυση των φυσικών φαινομένων, τα οποία συντελούν στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στη συνέχεια γίνεται ανάλυση της αρχής λειτουργίας του συσσωρευτή και των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται στα αεροσκάφη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο 3^ο κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών και ηλεκτρονικών διατάξεων, τα οποία χρησιμοποιούνται στον μετασχηματισμό και τη μετατροπή των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού ρεύματος (DC↔AC).

Στο 4^ο κεφάλαιο περιγράφεται η αρχή λειτουργίας των ηλεκτρικών μηχανών που χρησιμοποιούνται ως κινητήρες τόσο στο συνεχές, όσο και στο εναλλασσόμενο ρεύμα και βρίσκουν εφαρμογή στα αεροσκάφη

Στο 5^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των χαρακτηριστικών του ηλεκτρικού δικτύου που χρησιμοποιείται σε ένα αεροσκάφος, καθώς και των διάφορων εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση της ασφαλούς και σωστής λειτουργίας του.

Στο 6^ο κεφάλαιο περιγράφονται οι τρόποι παραγωγής τεχνητού φωτός και παρατίθενται τα σημεία του αεροπλάνου, στα οποία είναι αναγκαία η χρήση του.

Στο 7^ο κεφάλαιο αναλύονται τα φυσικά φαινόμενα, τα οποία αξιοποιούνται από τους αισθητήρες για τη λήψη μετρήσεων στις διάφορες εφαρμογές του αεροπλάνου, καθώς και τα μέσα που χρησιμοποιούνται για την απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

Στο 8^ο κεφάλαιο συμπεριλαμβάνονται και αναλύονται τα δευτερεύοντα συστήματα ενός αεροσκάφους, τα οποία χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια.

Στο 9^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται ενεργειακός ισολογισμός σε ένα μεγάλο μεταγωγικό αεροσκάφος και στη συνέχεια με εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται προσομοίωση της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας στο Simulink του προγραμματιστικού πακέτου Matlab.

Στο 10^ο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα της παρούσας διπλωματικής εργασίας και αναφέρονται πιθανές μελλοντικές βελτιώσεις και κατευθύνσεις, οι οποίες μπορούν να πραγματοποιηθούν ως συνέχεια της τρέχουσας εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : Ιστορική αναδρομή πτητικών μέσων

1.1 Η επιθυμία του ανθρώπου να πετάξει

Η επιθυμία του ανθρώπου να κατακτήσει τους αιθέρες υπήρχε στη σκέψη του εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Από τις πρώτες καταγραφές αυτής της σκέψης ήταν στην ελληνική μυθολογία με τον γνωστό μύθο του Δαίδαλου και του Ίκαρου, ο οποίος χρονολογείται στην περίοδο του Μινωικού πολιτισμού (3000π.Χ έως 1450π.Χ).

Σύμφωνα με τον Ρωμαίο συγγραφέα Αύλο Γέλλιο, ο αρχαίος Έλληνας Αρχύτας σχεδίασε και κατασκεύασε μια μηχανή, η οποία διέθετε κάποιου είδους προπέλα και πιθανόν με χρήση ατμού κατάφερε να πετάξει σε μια απόσταση διακοσίων μέτρων. Η μηχανή αυτή ονομάστηκε «περιστέρι» και πιθανόν η πτήση του να έγινε πάνω σε κάποιο είδος σύρματος ή άξονα περιστροφής.

Τον 9^ο αιώνα μ.Χ. σύμφωνα με τον Άγγλο John Harding το ανεμόπτερο του Abbas Ibn Firnas αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια πτήσης ενός αντικειμένου που ήταν βαρύτερο από τον αέρα.

Το 1010 ο μοναχός Eilmer στο Malmesbury της Αγγλίας κατασκεύασε ένα ανεμόπτερο, το οποίο πέταξε από τον πύργο της πόλης. Ο Eilmer ισχυρίστηκε ότι το ανεμόπτερό του πραγματοποιείσαι μια πτήση διακοσίων μέτρων, προτού πέσει στο έδαφος. Στην πτώση αυτή ο Eilmer έσπασε και τα δυο του πόδια και του απαγορεύτηκε η δοκιμή παρόμοιων πειραμάτων.

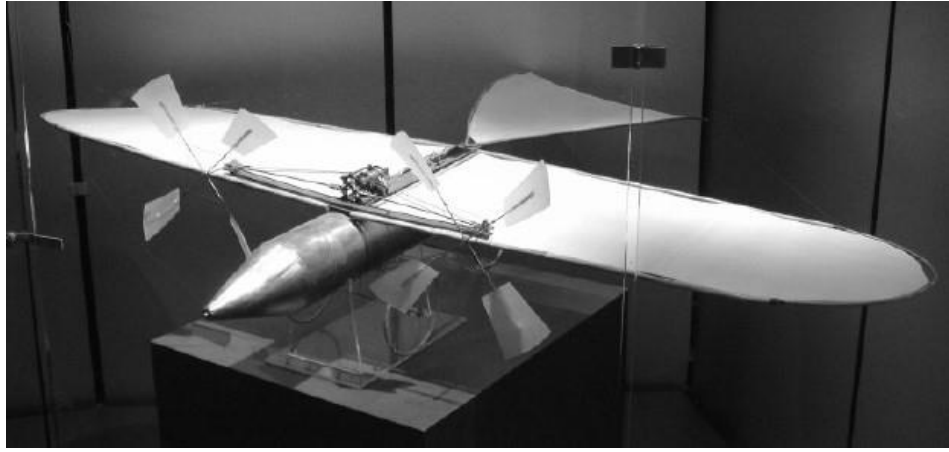
Στις 15 Οκτωβρίου 1783 στο Παρίσι της Γαλλίας ο Pilatre de Rozier ήταν ο πρώτος άνθρωπος που πέταξε με αερόστατο, το οποίο είχαν κατασκευάσει οι αδερφοί Joseph-Michel και Jacques-Etienne Montgolfier. Το αερόστατο αυτό κάλυψε την απόσταση των 9km σε 25 λεπτά.

Το 1848 στην Αγγλία ο John Stringfellow κατασκεύασε το πρώτο μη επανδρωμένο μονοκινητήριο αεροπλάνο, το οποίο λειτουργούσε με τη δύναμη του ατμού.

Το 1853 ο George Cayley ήταν ο πρώτος, ο οποίος παρουσίασε ένα καλά τεκμηριωμένο σχέδιο ανεμόπτερου. Στα σχέδια αυτά έκανε λόγο για πρώτη φορά στις τέσσερις βασικές δυνάμεις της αεροδυναμικής: το βάρος (weight), την άνωση (lift), την ώση (thrust) και την οπισθέλκουσα (drag).

Τον Ιούνιο του 1856 ο Πορτογάλος πιλότος Matias Perez εξαφανίστηκε, καθώς προσπαθούσε να πετάξει ένα αεροστατικό αεροπλάνο από την παράλια Marte στην Κούβα.

Το πρώτο αεροπλάνο, το οποίο κατάφερε να απογειωθεί χρησιμοποιώντας τη δύναμη που παρήγαγε, κατασκευάστηκε από τον Γάλλο Victor Tatin το 1874.



Εικόνα 1.1: Το αεροπλάνο που κατασκευάστηκε από τον Victor Tatin το 1874 [1].

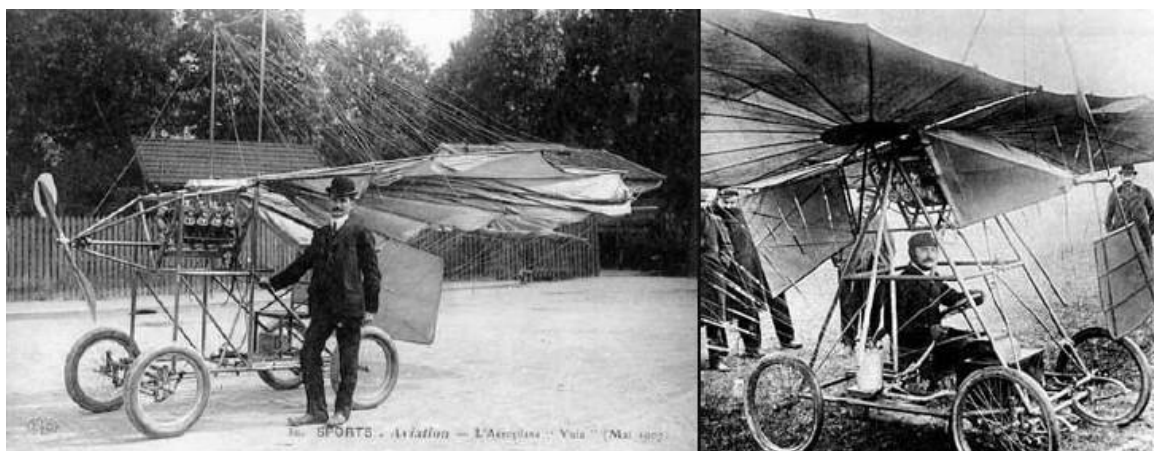
Το 1903 στην Αμερική οι αδερφοί Wright σχεδίασαν και κατασκεύασαν το πρώτο δίπλανο αεροπλάνο, το οποίο παρέμεινε στον αέρα για 59 δευτερόλεπτα και διένυσε μια απόσταση των 260 μέτρων. Πριν την πτήση αυτή πραγματοποιήθηκαν τρεις ακόμα προσπάθειες στις οποίες το δίπλανο διένυσε 36, 53 και 61 μέτρα αντίστοιχα. Για την απογείωση του χρησιμοποιήθηκαν ράγες, στις οποίες το αεροπλάνο έφτασε την επιθυμητή ταχύτητα απογείωσης.



Εικόνα 1.2: Το αεροπλάνο των αδερφών Wright κατά τη διάρκεια της πτήσης των 59 δευτερολέπτων [1].

Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα ο Ρουμάνος πρωτοπόρος και ερευνητής Traian Vuia δραστηριοποιήθηκε στην κατασκευή ενός πρώιμου είδους αεροπλάνου. Αρχικά ως απόφοιτος μηχανικός του πανεπιστημίου της Βουδαπέστης μελέτησε και σχεδίασε την πρώτη του ιπτάμενη μηχανή στο Lugoj της Ρουμανίας, την οποία ονόμασε ιπτάμενο αυτοκίνητο. Τον Ιούνιο του 1902 πριν την ολοκλήρωση της κατασκευής ταξίδεψε στο Παρίσι με την ελπίδα να συναντήσει κάποιον, ο οποίος θα

χρηματοδοτούσε το εγχείρημα του. Εκεί γνώρισε τον αναγνωρισμένο την εποχή εκείνη Victor Tatin, ο οποίος είχε κατασκευάσει την πρώτη του ιπτάμενη μηχανή το 1874. Ο Tatin ενδιαφέρθηκε για το εγχείρημα του Traian Vuia, παρόλα αυτά αμφισβήτησε την ακαταλληλότητα του κινητήρα, καθώς και τη σταθερότητα του αεροπλάνου. Στις 16 Σεπτεμβρίου 1903 ο Traian Vuia παρουσίασε τα σχέδια του στην ακαδημία των επιστημόνων του Παρισιού, οι οποίοι τα απέρριψαν με τη δικαιολογία ότι η υλοποίηση ενός αεροπλάνου βαρύτερο από τον αέρα αποτελεί απλά ένα όνειρο. Παρόλα αυτά ο Traian Vuia απτόητος κατέθεσε τα σχέδια και κατοχύρωσε την πατέντα στις 17 Αυγούστου 1903. Η κατασκευή του μοντέλου ξεκίνησε τον χειμώνα της ίδιας χρονιάς. Τον Δεκέμβριο του 1905 ολοκληρώθηκαν οι εργασίες του πρώτου αεροπλάνου, το οποίο ονομάστηκε “Traian Vuia 1”. Το μοντέλο αυτό διέθετε έναν κινητήρα, ο οποίος λειτουργούσε με αέριο ανθρακικού οξέος. Στις 18 Μαρτίου 1906 πραγματοποιήθηκε η πρώτη προσπάθεια πτήσης του αεροπλάνου. Στην προσπάθεια αυτή το αεροπλάνο επιτάχυνε διανύοντας περίπου 50 μέτρα προτού απογειωθεί. Το αεροπλάνο πέταξε σε ύψος ενός μέτρου διανύοντας μια απόσταση δώδεκα μέτρων. Οι εφημερίδες της εποχής έκαναν λόγο για το επίτευγμα του Traian Vuia. Μετά την πρώτη πτήση πραγματοποιήθηκαν αρκετές ακόμα πτήσεις μικρής διάρκειας. Το 1907 κατασκεύασε ένα πιο εξελιγμένο μοντέλο που ονομάστηκε “Vuia 2” και έφερε έναν ισχυρότερο κινητήρα 25 ίππων. Παρόλα αυτά ο Traian Vuia ανέπτυξε και δυο πειραματικά ελικόπτερα την περίοδο 1918 – 1921.



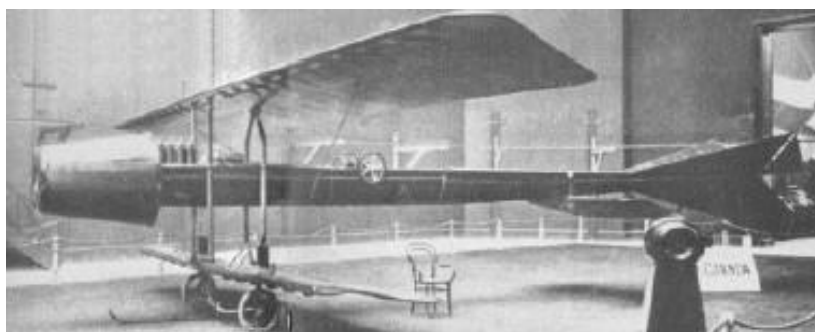
Εικόνα 1.3: Ο Traian Vuia με το μονοκινητήριο αεροπλάνο του στις 18 Μαρτίου 1908 [1].

Στις 19 Νοεμβρίου 1882 γεννήθηκε στην Geoagiu της Τρανσυλβανίας ο Aurel Vlaicu. Το 1907 έλαβε το πτυχίο του μηχανικού από το τεχνικό πανεπιστήμιο της Βουδαπέστης και το τεχνικό πανεπιστήμιο του Μονάχου. Το καλοκαίρι του 1909 κατασκεύασε το πρώτο του ανεμόπτερο. Αργότερα την ίδια χρονιά μετακόμισε στο Βουκουρέστι, όπου ασχολήθηκε με την κατασκευή αεροπλάνου, το οποίο ονομάστηκε “Vlaicu 1”. Η πρώτη του πτήση πραγματοποιήθηκε στις 17 Ιουνίου 1910. Ένα χρόνο αργότερα κατασκεύασε το νεότερο μοντέλο “Vlaicu 2”, με το οποίο κατέκτησε αρκετά χρηματικά έπαθλα. Ο Aurel Vlaicu απεβίωσε το 1913 σε πτήση με το Vlaicu 2 πάνω από τα Καρπάθια όρη.



Εικόνα 1.4: Ο Aurel Vlaicu με το Vlaicu 2 το 1911 [1].

Ο Ρουμάνος εφευρετής Henri Coanda κατασκεύασε ένα αεροπλάνο που ονομάστηκε Coanda – 1910, το οποίο αποτέλεσε την πρώτη προσπάθεια αεροθούμενου αεροσκάφους. Το πειραματικό σύστημα προώθησης του Coanda αποτελούταν από ένα φυγοκεντρικό συμπιεστή, ο οποίος διέθετε πτερύγια και λάμβανε κίνηση από έναν εμβολοφόρο κινητήρα. Το αεροπλάνο του Coanda τράβηξε την προσοχή στη δεύτερη διεθνή έκθεση αεροναυπηγικής στο Παρίσι τον Οκτώβριο του 1910, όπου χαρακτηρίστηκε ως το μοναδικό αεροσκάφος χωρίς προπέλα. Το Coanda – 1910 συνετρίβη ακριβώς μετά την παρθενική του πτήση τον Δεκέμβριο του 1910 [1 §1].

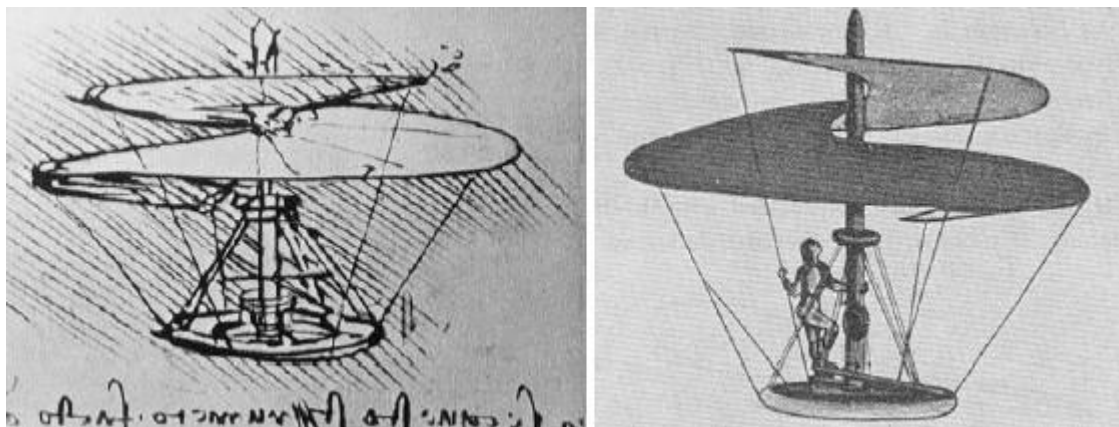


Εικόνα 1.5: Coanda – 1910 [1].

1.2 Η ιστορία των ελικοπτέρων

Η λέξη ελικόπτερο επινοήθηκε από τον Γάλλο Gustave de Ponton d'Amecourt το 1861 και προέρχεται από τις ελληνικές λέξεις έλιξ (συνεστραμμένος) και πτερόν (φερό). Οι πρώτες αναφορές για κάθετη πτήση προέρχονται από την Κίνα όπου τον 4^ο αιώνα π.Χ. τα παιδιά έπαιζαν με ιπτάμενα παιχνίδια κατασκευασμένα από μπαμπού. Ενώ τον 4^ο αιώνα μ.Χ. σε θρησκευτικά βιβλία της εποχής γίνονται αναφορές για κάθετα ιπτάμενα αεροσκάφη.

Ο Leonardo Da Vinci το 1480 σχεδίασε έναν μηχανισμό, ο οποίος μπορεί να περιγραφεί ως «ιπτάμενη βίδα». Στα σχέδια του δεν γίνεται αναφορά για τον τρόπο, με τον οποίο ο άξονας σταματά να κάνει μια ολόκληρη περιστροφή.



Εικόνα 1.6: Το σχέδιο του ελικοπτερου του Leonardo Da Vinci [1].

Τον Ιούλιο του 1754 ο Mikhail Lomonosov παρουσίασε στη Ρώσικη ακαδημία επιστήμων ένα μικρό στροφείο, το οποίο λάμβανε ενέργεια από ένα ελατήριο και χρησιμοποιούταν για να ανυψώσει όργανα μετεωρολογικού σταθμού.

Το 1783 ο Cristian de Lanoy μαζί με τον μηχανικό του Bienvenu κατασκεύασε ένα περιστρεφόμενο στροφείο, στο οποίο χρησιμοποιήθηκαν φτερά γαλοπούλας ως πτερύγιο. Η κατασκευή αυτή παρουσιάστηκε ένα χρόνο αργότερα στη Γαλλική ακαδημία επιστημών.

Το 1861 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ο όρος ελικόπτερο από τον Γάλλο εφευρέτη Gustave de Ponton d'Amecourt, ο οποίος κατασκεύασε ένα ατμοκίνητο μοντέλο. Παρά τον ενθουσιασμό που επικρατούσε το μοντέλο αυτό δεν απογειώθηκε ποτέ από το έδαφος.

Το 1878 ο Enrico Forlanini σχεδίασε ένα ατμοκίνητο μη επανδρωμένο ελικόπτερο, το οποίο απογειώθηκε κάθετα και έφτασε σε ύψος 12 μέτρων και παρέμεινε εκεί για 20 δευτερόλεπτα.

Το 1885 ο Thomas Edison έλαβε χρηματοδότηση 1000 δολάρια από τον James Gordon Bennet Jr για πειράματα κάθετης πτήσης. Το ελικόπτερο, το οποίο κατασκεύασε, δεν κατάφερε να πετάξει και καταστράφηκε κατά τη διάρκεια των δοκιμών τραυματίζοντας σοβαρά έναν εργάτη.

Ο Σλοβάκος εφευρέτης κατασκεύασε το 1901 έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, τον οποίο τοποθέτησε στο ελικόπτερό του και πραγματοποίησε κάθετη πτήση σε ύψος μισού μέτρου. Το Μάιο του 1905 το ελικόπτερο του κατάφερε να πετάξει σε ύψος τεσσάρων μέτρων και διένυσε μια απόσταση ενάμιση χιλιομέτρου.

Το 1906 οι Γάλλοι Jacques και Louis Brequet πειραματίστηκαν στην αεροδυναμική των πτερυγίων του ελικοπτερου. Τα αποτελέσματα τους εφαρμόστηκαν το 1907 στο Gyroplane 1. Τη χρονική περίοδο μεταξύ 14 Αυγούστου και 29 Σεπτεμβρίου 1907 το Gyroplane 1 πραγματοποίησε πτήση με χειριστή σε ύψος μισού μέτρου από το έδαφος και παρέμεινε στη θέση αυτή για ένα λεπτό. Το ελικόπτερο αυτό παρουσίαζε μεγάλη αστάθεια και για την πτήση του χρειαζόταν σε κάθε πλευρά κάποιον άνθρωπο για τη σταθεροποίηση του. Για τον λόγο αυτό η πτήση του Gyroplane 1 θεωρήθηκε η πρώτη επανδρωμένη πτήση με υποβοήθεια.

Την ίδια χρονιά ο Γάλλος εφευρέτης Paul Cornu κατασκεύασε ένα ελικόπτερο, το οποίο έλαβε το όνομά του και διέθετε έναν στροφέιο έξι μέτρων. Το στροφέιο αυτό λάμβανε κίνηση από έναν κινητήρα 24 ίππων, ο οποίος ονομαζόταν Antoinette. Στις 13 Νοεμβρίου 1907 πέταξε σε ύψος 30 εκατοστών και παρέμεινε εκεί για 20 δευτερόλεπτα. Αν και το ύψος της πτήσης του δεν ξεπέρασε αυτό του Gyroplane 1 θεωρήθηκε η πρώτη αληθινή επανδρωμένη πτήση, διότι δεν έλαβε εξωτερική υποβοήθηση. Το ελικόπτερο του Paul Cornu πραγματοποιείσαι μερικές ακόμα πτήσεις φτάνοντας σε ύψος δυο μέτρων. Παρόλα αυτά το ελικόπτερο παρουσίαζε αστάθεια και το εγχείρημα εγκαταλείφθηκε.



Εικόνα 1.7: Ο Paul Cornu με το πρώτο επανδρωμένο ελικόπτερο [1].

Το 1912 ο Δανός εφευρέτης Jacob Ellehammer κατασκεύασε ένα ελικόπτερο, το οποίο διέθετε δυο αντίθετα περιστρεφόμενους δίσκους, όπου στην περιφέρειά τους ήταν τοποθετημένα πτερύγια. Έπειτα από αρκετές δοκιμές σε εσωτερικό χώρο πραγματοποιείσαι μερικές ελεύθερες απογειώσεις σε εξωτερικό χώρο. Το 1916 κατά τη διάρκεια μιας απογείωσης ανατράπηκε καταστρέφοντας και τα δυο στροφεία.

Το 1920 ο Αργεντίνος Paul Pateras Pescara όπου εκείνο τον καιρό εργαζόταν στην Ευρώπη κατασκεύασε ένα ελικόπτερο, το οποίο διέθετε ένα ομοαξονικό στροφείο με δυο αντίθετα περιστρεφόμενα πτερύγια. Στο ελικόπτερο αυτό χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά ένα σύστημα ελέγχου του κυκλικού βήματος. Με τον έλεγχο αυτό το ελικόπτερο μετέβαλε τη γωνία προσβολής του πτερυγίου και συνεπώς και τη δύναμη της άνωσης ελέγχοντας με αυτό τον τρόπο το ύψος της πτήσης. Επιπλέον με τη μεταβολή του κυκλικού βήματος το ελικόπτερο μπορούσε να κινηθεί παράλληλα με το έδαφος κατά την πτήση, χωρίς να χρειάζεται άλλο έλικα ώστε να το κινήσει προς τα εμπρός. Ο Paul Pateras Pescara παρουσίασε και την τεχνική της αυτοπεριστροφής, όπου επέτρεπε στο ελικόπτερο να προσγειωθεί με ασφάλεια στο έδαφος μετά από αστοχία του κινητήρα εκμεταλλευόμενος την αεροδυναμική. Τα μεταγενέστερα μοντέλα του Pescara μπορούσαν να πετούν περισσότερο από δέκα λεπτά καταρρίπτοντας όλα τα προηγούμενα ρεκόρ σε ύψος και απόσταση.

Το 1923 ο Ισπανός Juan de la Cierva σχεδίασε τον πρώτο πρακτικό στροφείο, το οποίο αποτέλεσε και τη βάση στην εξέλιξη των σύγχρονων ελικοπτέρων. Το στροφείο αυτό διέθετε ένα είδος αρθρώσεων, όπου αποσβένανε τους κραδασμούς μεταξύ των πτερυγίων και του άξονα. Το σύστημα αυτό των αρθρώσεων βοήθησε το ελικόπτερο να παρουσιάζει σταθερότητα κατά τη μετεώριση και κατά την οριζόντια πτήση.

Ο Ολλανδός μηχανικός Albert Gillis von Baumhauer μελέτησε τα σχέδια του Cierva για το στροφείο και στις 24 Σεπτεμβρίου 1925 με τη βοήθεια του Floris Albert van Heijts πραγματοποίησε δοκιμαστική πτήση του δικού του ελικοπτέρου. Ο έλεγχος του έγινε με δυο νέες εφευρέσεις, το κυκλικό πηδάλιο (cyclic) και το πηδάλιο αλλαγής βήματος πτερυγίων (collective). Στις 31 Ιανουαρίου 1927 κατοχύρωσε την πατέντα.

Το 1930 ο Ιταλός μηχανικός Corradino D'Ascanio κατασκεύασε ένα ελικόπτερο, το οποίο ονομάστηκε D'AT3. Διέθετε δυο αντίθετα περιστρεφόμενα στροφεία, όπου το καθένα περιλάμβανε δυο πτερύγια. Ο έλεγχος του ελικοπτέρου γινόταν με βοηθητικές επιφάνειες ή από μηχανισμούς στις άκρες των πτερυγίων. Το D'AT3 είχε καταρρίψει όλα τα ρεκόρ της εποχής τόσο σε ύψος (18 μετρά), όσο και της οριζόντιας ταχύτητας καλύπτοντας μια απόσταση 1078 μέτρων σε 8 λεπτά και 40 δευτερόλεπτα.

Το 1933 κατασκευάστηκε το Brequet-Dorand Gyroplane Laboratoire. Μετά από αρκετές δοκιμές στο έδαφος πραγματοποίησε την πρώτη του πτήση στις 26 Ιουνίου 1935. Από τις πρώτες κιόλας πτήσεις κατέρριψε πολλά ρεκόρ. Στις 14 Δεκεμβρίου 1935 πραγματοποίησε την πιο κλειστή κυκλική πτήση, η οποία είχε διάμετρο 500 μετρά. Στις 26 Σεπτεμβρίου 1936 πέταξε σε ύψος 158 μέτρων από το

έδαφος. Στις 26 Νοεμβρίου 1936 πραγματοποίησε πτήση διάρκειας μιας ώρας και δυο λεπτών διανύοντας μια απόσταση άνω των 44 χιλιομέτρων.

Το 1936 κατασκευάστηκε το γερμανικό Fokke – Wulf Fw 61, το οποίο επισκίασε τις επιτυχίες του Gyroplane Laboratoire. Το 1937 το Fw 61 είχε καταρρίψει όλα τα προηγούμενα ρεκόρ. Χρησιμοποιήθηκε κατά τον Β Παγκόσμιο πόλεμο από τους Γερμανούς για παρατήρηση και μεταφορές φαρμακευτικού υλικού.

Στις Η.Π.Α ο Igor Sikorsky και ο W. Lawrence LePage ανταγωνίζονταν για την κατασκευή του πρώτου ελικοπτέρου για τις ένοπλες δυνάμεις. Τα σχέδια του LePage κατοχύρωσαν την πατέντα πριν τον πόλεμο και κατασκεύασε ένα ελικοπτερο, το οποίο ονομάστηκε XR-1. Ο Igor Sikorsky σχεδίασε και κατασκεύασε ένα απλούστερο μοντέλο ελικοπτέρου, το οποίο ονομάστηκε VS-300. Το μοντέλο του Sikorsky διέθετε ένα κύριο στροφέιο και ένα βοηθητικό στροφέιο, το οποίο τοποθετήθηκε κάθετα στην ουρά του ελικοπτέρου. Το R-4 ήταν το μεταγενέστερο ελικοπτερο που κατασκεύασε ο Sikorsky. Το μοντέλο αυτό ήταν το μοναδικό των Συμμαχικών δυνάμεων κατά την διάρκεια του Β Παγκοσμίου πολέμου που πραγματοποίησε διασώσεις σε διάφορες περιοχές που απαιτήθηκαν. Κατασκευάστηκαν τουλάχιστον 131 ελικοπτερα αυτού του τύπου, προτού κατασκευαστούν μεταγενέστερα μοντέλα, όπως ήταν το R-5 και το R-6. Μέχρι το τέλος του πολέμου είχαν κατασκευαστεί περισσότερα από 400 ελικοπτερα.



Εικόνα 1.8: Ελικοπτερο R-5 κατασκευασμένο από τον Igor Sikorsky [1].

Την ίδια περίοδο η εταιρία Bell προσέλαβε τον Arthur Young, ώστε να αναπτύξουν το δικό τους ελικοπτερο. Το μοντέλο που ανέπτυξαν ονομάστηκε Bell 47 και ήταν το πρώτο πολιτικό ελικοπτερο που κατασκευάστηκε στις Η.Π.Α. Το Bell 47 έγινε το πιο διαδεδομένο μοντέλο ελικοπτέρου για περίπου 30 χρόνια.

Το 1951 ο Charles Kaman τροποποίησε το μοντέλο K-225, στο οποίο τοποθέτησε για πρώτη φορά ένα αεροκινητήρα. Αυτό το είδος κινητήρα παρήγαγε μεγαλύτερη ισχύ και παρουσίαζε μικρότερο βάρος σε σχέση με τους εμβολοφόρους κινητήρες που χρησιμοποιούνταν μέχρι τότε. Στις 26 Μαρτίου 1954 το Navy HTK-1 τροποποιήθηκε από τον Kaman και έγινε το πρώτο ελικόπτερο, το οποίο διαθέτει ένα διπλό αεροκινητήρα [1 §3].

1.3 Χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας σε πτητικά μέσα

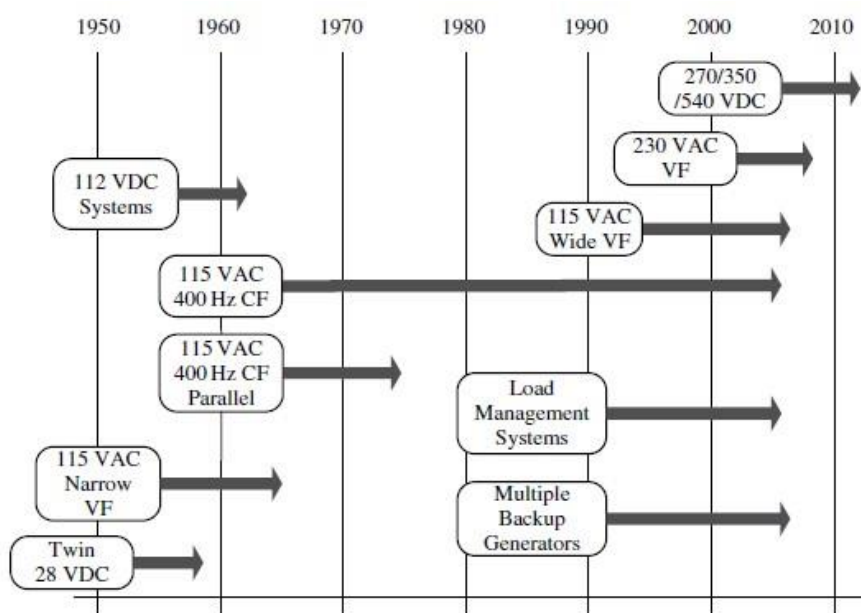
Ο όρος αεροηλεκτρονική (avionics) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά στα τέλη του 1940, περιγράφοντας με αυτό τον τρόπο τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα που έφερε το αεροπλάνο. Τα αεροπλάνα της εποχής εκείνης διέθεταν περισσότερα μηχανικά εξαρτήματα, ενώ τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα ήταν περιορισμένα και έβρισκαν εφαρμογή σε συστήματα ραντάρ, συστήματα επικοινωνίας και πλοήγησης. Ο όρος αεροηλεκτρονική δεν χρησιμοποιούνταν ευρέως μέχρι τα τέλη του 1960. Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στα αεροπλάνα ολοκληρωμένα υπολογιστικά συστήματα, τα οποία βρήκαν εφαρμογή στην αποκωδικοποίηση των πληροφοριών που λαμβάνονταν από διάφορους αισθητήρες. Η συνεχόμενη ανάπτυξη και ενσωμάτωση των ηλεκτρικών και ηλεκτρονικών συστημάτων ταυτόχρονα με την ανάπτυξη των ολοκληρωμένων κυκλωμάτων, μικροεπεξεργαστών, δεδομένων επικοινωνίας, καθώς και των οθονών έδωσαν ένα καινούργιο νόημα στην έννοια της αεροηλεκτρονικής (avionics). Τα τελευταία 40 χρόνια η κατεύθυνση που ακολουθεί η παγκόσμια αεροπορική βιομηχανία είναι η ανάπτυξη αεροσκαφών, τα οποία βασίζονται περισσότερο στα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα. Ένα μελλοντικό ενδεχόμενο όπου στο παρελθόν θα θύμιζε σενάριο από ταινία επιστημονικής φαντασίας είναι η χρήση ηλεκτρικών αεροσκαφών. Σε αυτό το μελλοντικό σενάριο όλα τα μηχανικά συστήματα, όπως είναι ο έλεγχος κινούμενων επιφανειών, πνευματικών και υδραυλικών συστημάτων θα αντικατασταθούν από αμιγώς ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα [14 §1].

Ένα τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα σε ένα αεροπλάνο τη δεκαετία του 1940 έως το 1950 διαθέτει γεννήτριες συνεχούς ρεύματος 28V, καθώς και μια ή δυο μπαταρίες. Για την τροφοδότηση οργάνων ένδειξης το αεροπλάνο διαθέτει inverter, το οποίο μετέτρεπε τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη 115V. Τα βομβαρδιστικά τύπου V κατασκευάστηκαν τη δεκαετία 1950 έως 1960 και είχαν ανάγκη για παροχή περισσότερης ισχύος, δεδομένου ότι διέθεταν σύστημα προσγείωσης, το οποίο διαθέτει ηλεκτρική ενεργοποίηση. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος 115V, οι οποίες λάμβαναν κίνηση από τους κινητήρες του αεροπλάνου. Ένα από τα αεροπλάνα που διέθεταν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος 115V μεγάλης ισχύος ήταν το Mc Donnell Douglas F-4 Phantom. Στα αεροπλάνα αυτής της γενιάς απαιτήθηκε η συχνότητα της

παραγόμενης τάσης να παρέμενε σταθερή ανεξάρτητα από την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν συστήματα γραναζιών (CSD – constant speed drive), όπου παρείχαν στη γεννήτρια σταθερό αριθμό περιστροφής, συνεπώς και σταθερή παραγόμενη συχνότητα τιμής 400Hz.

Τη δεκαετία του 1990 χρησιμοποιήθηκαν συστήματα ηλεκτρονικών σταθερής κατάστασης, τα οποία ονομάστηκαν μετατροπείς VSCF (variable speed constant frequency). Οι μετατροπείς VSCF είχαν σκοπό να λαμβάνουν την τάση 115V AC μεταβλητής συχνότητας παραγωγής των γεννητριών και να τη μετατρέπουν σε 115V AC και συχνότητα σταθερής τιμής (400Hz). Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο βασιζόταν στους μετατροπείς VSCF, χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα Mc Donnell Douglas F-18, καθώς και σε μερικά μοντέλα του Boeing 777-500.

Στα τέλη της δεκαετίας 1990 η στρατιωτική αεροπορική βιομηχανία των Η.Π.Α ανέπτυξε ένα ηλεκτρικό σύστημα, στο οποίο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν με γεννήτριες συνεχούς ρεύματος 270V. Ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας μετατρεπόταν σε 115V AC 400Hz και ένα μέρος σε 28V DC. Αυτό το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε στα μοντέλα της Lockheed Martin F-22 και F-35. Αυτή η μέθοδος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί πιο αποτελεσματική μέθοδο από τις συμβατικές, διότι οι απώλειες μετατροπής είναι μικρότερες συνδυαστικά με το μειωμένο βάρος των εξαρτημάτων. Στην εικόνα 1.9 φαίνεται το χρονοδιάγραμμα των μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα [23 §5.1].



Εικόνα 1.9: Χρονοδιάγραμμα μεθόδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [23].

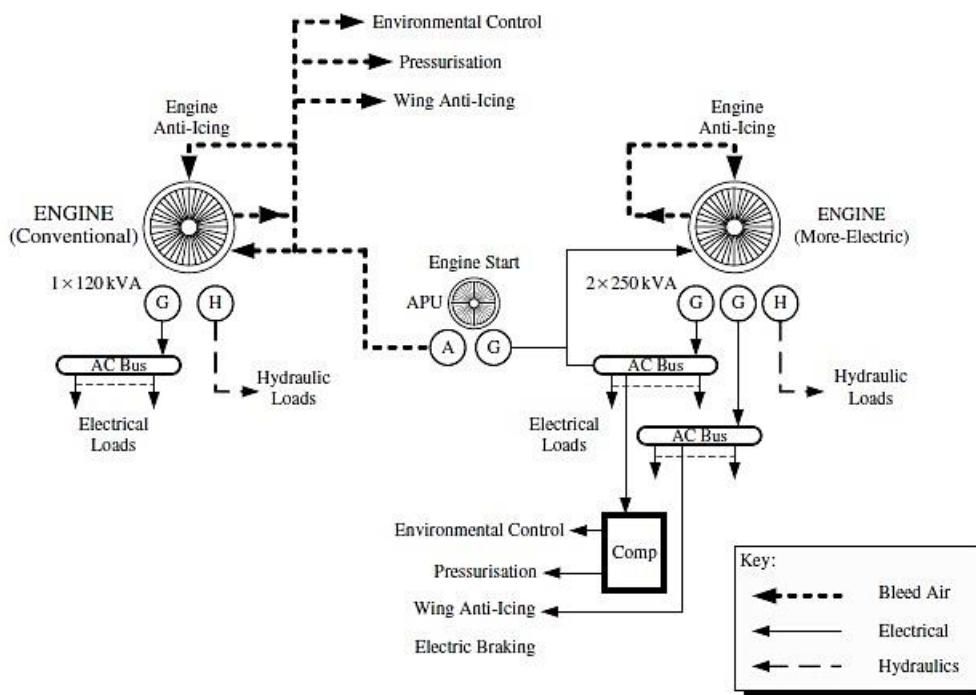
1.4 Σύγχρονες τάσεις

Εδώ και αρκετά χρόνια έχει υιοθετηθεί ο όρος «Εξ ολοκλήρου ηλεκτρικό αεροσκάφος» (all electric aircraft). Από τη δεκαετία του 1950 σε δημόσιες συζητήσεις παρουσιάζονταν τα πλεονεκτήματα που θα παρείχε η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας σε δευτερεύοντα κυκλώματα ισχύος του αεροπλάνου, όπως ήταν τα πνευματικά και τα υδραυλικά συστήματα. Οι διάλογοι αυτοί αναφέρθηκαν περιληπτικά στις δημοσιεύσεις του Mike Cronin, ο οποίος διατέλεσε αρχηγός της ομάδας ηλεκτρολόγων μηχανικών στο πρόγραμμα του Brabazon και αργότερα μετατάχθηκε στην κατασκευάστρια εταιρία αεροπορικού υλικού Lockheed, όπου και παρέμεινε μέχρι τη συνταξιοδότηση του το 1990. Αρκετές εταιρίες κατασκευής αεροσκαφών παρουσίαζαν τα πλεονεκτήματα που θα είχε ένα αεροσκάφος βασισμένο στην ηλεκτρική ενέργεια. Τη δεκαετία του 1980 η NASA χρηματοδότησε αρκετές μελέτες, οι οποίες απευθύνονταν στον όρο «Ολοκληρωμένο ψηφιακό ηλεκτρικό αεροσκάφος» (IDEA – Integrated Digital Electrical Airplane).

Λόγω αυτών των μελετών τα τελευταία χρόνια η αξιοποίηση της παραγόμενης ισχύος από τους κινητήρες των αεροπλάνων έχει αλλάξει. Η λήψη ισχύος από έναν αεροκινητήρα αεροσκάφους παλαιότερης τεχνολογίας μπορούσε να γίνει με τρεις τρόπους:

- Παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω γεννητριών, οι οποίες συνδέονται σε κιβώτιο γρاناζιών για τη λήψη των ονομαστικών στροφών λειτουργίας.
- Παραγωγή υδραυλικής ισχύος μέσω μηχανικών αντλιών, οι οποίες λαμβάνουν μηχανική ενέργεια από κιβώτιο γρاناζιών του κινητήρα.
- Παραγωγή πνευματικής ισχύος μέσω του συμπιεστή του αεροκινητήρα, η οποία χρησιμοποιείται για τη συμπίεση της καμπίνας του αεροπλάνου καθώς και για συστήματα αποπαγοποίησης και αντιπαγοποίησης.

Ένας αεροκινητήρας στην πραγματικότητα είναι μια μηχανή, η οποία έχει σχεδιαστεί να αξιοποιεί στο βέλτιστο τη ροή αέρα στο εσωτερικό του για την παραγωγή ώσης στο αεροπλάνο. Για τον λόγο αυτό κάθε ελεγχόμενη διαρροή αέρα από τον συμπιεστή για χρήση του σε διαφορά συστήματα επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του κινητήρα. Συνεπώς ήταν απαραίτητο οι κατασκευάστριες εταιρίες να επιτύχουν τη λήψη της απαραίτητης ισχύος από τον κινητήρα, ώστε να τροφοδοτηθούν βοηθητικές διεργασίες, χωρίς να υπάρχει αρνητική επίδραση της απόδοσης του κινητήρα. Έτσι ήταν απαραίτητο τα νέα μοντέλα αεροσκαφών να διαθέτουν διαφορετική αρχιτεκτονική στα συστήματα αυτά. Στην εικόνα 1.10 φαίνεται η διαφορετική αρχιτεκτονική που ακολουθείται σε ένα κινητήρα του αεροσκάφους Boeing 767 (αριστερό σύστημα) και σε ένα κινητήρα Boeing 787 (δεξιό σύστημα).



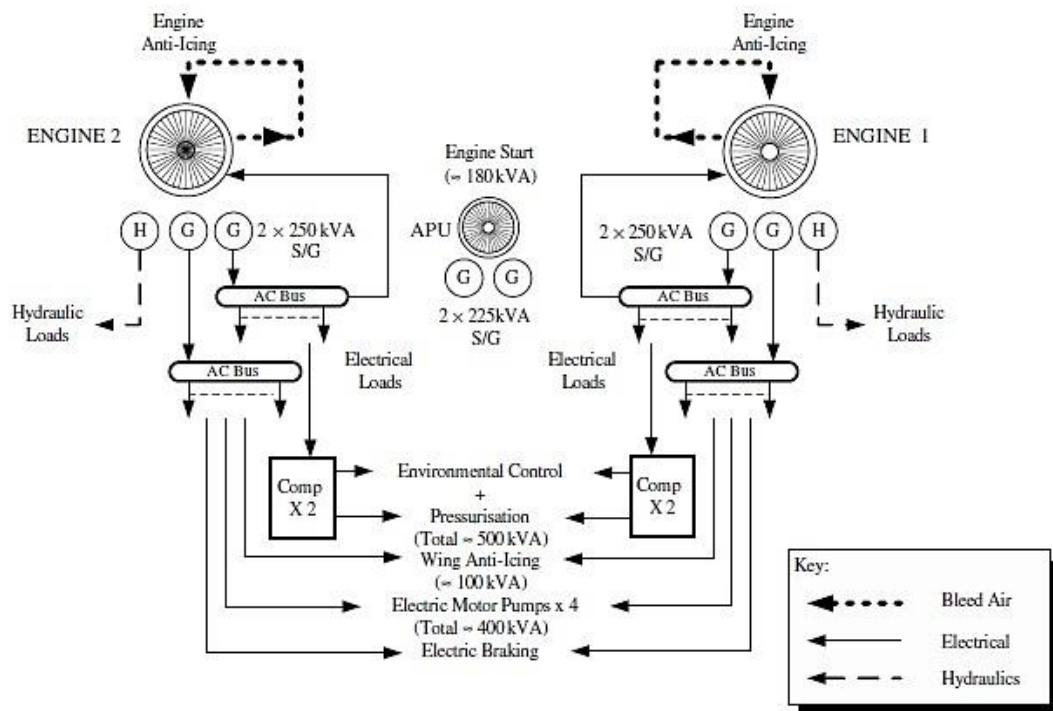
Εικόνα 1.10: Αρχιτεκτονική κινητήρα παλαιότερης γενιάς αεροσκάφους (αριστερό σύστημα) και νεότερης γενιάς αεροσκάφους (δεξιό σύστημα) [23].

Οι κύριες διαφορές που παρουσιάζει η συμβατική (conventional) διαμόρφωση από τη διαμόρφωση «περισσότερο ηλεκτρικό» (more electric) όπως φαίνεται και από την εικόνα 1.10 είναι οι εξής:

- Μείωση των ελεγχόμενων διαρροών (bleed air) από τον συμπιεστή του κινητήρα. Η μόνη διαρροή αέρα από τον συμπιεστή γίνεται για λόγους αποπαγοποίησης και αντιπαγοποίησης του ίδιου του κινητήρα. Αυτό βοηθά στην αύξηση της απόδοσης του κινητήρα.
- Αύξηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος, ώστε τα συστήματα που δεν λαμβάνουν πλέον πνευματική ισχύ να τροφοδοτούνται με ηλεκτρική.
- Η εκκίνηση του κινητήρα γίνεται με ηλεκτρικό τρόπο και δεν χρησιμοποιείται πλέον η πνευματική ισχύς.

Η ολοκληρωμένη δομή ενός συστήματος που ακολουθεί αρχιτεκτονική «περισσότερο ηλεκτρικό» φαίνεται στην εικόνα 1.11. Τα συστήματα τα οποία μετατρέπονται σε ηλεκτρικά μετά τη μείωση των ελεγχόμενων διαρροών (bleed air) του συμπιεστή είναι τα εξής:

- Το σύστημα ελέγχου συμπίεσης και περιβαλλοντικών συνθηκών του αεροπλάνου (ECS- Environmental Control System and pressure).
- Το σύστημα αντιπαγοποίησης και αποπαγοποίησης των πτερύγων.
- Το σύστημα υδραυλικών αντλιών [23 §10].



Εικόνα 1.11: Σχηματικό διάγραμμα δομής ηλεκτρικού συστήματος αεροσκάφους Boeing 787 που ακολουθεί την αρχιτεκτονική «περισσότερο ηλεκτρικό» [23].

1.5 Συμπεράσματα

Εδώ και πάρα πολλά χρόνια ο άνθρωπος επιθυμούσε την κατάκτηση του αέρα. Το εγχείρημα αυτό αποδείχτηκε δύσκολο από τις πρώτες κιόλας προσπάθειες. Αρκετές από αυτές παρέμειναν στο έδαφος και άλλες προσγειώθηκαν απότομα προξενώντας σοβαρούς τραυματισμούς. Παρόλα αυτά με το πέρασμα των χρόνων και τις επαναλαμβανόμενες προσπάθειες ο άνθρωπος κατάφερε να πραγματοποιήσει αρκετές πειραματικές πτήσεις. Η κάθε προσπάθεια που πραγματοποιήθηκε μοίρασε γνώση στους επομένους επίδοξους εφευρέτες. Αυτή η προσφορά γνώσεων από δοκιμή σε δοκιμή οδήγησαν τον άνθρωπο να κατακτήσει τους αιθέρες με διάφορα πτητικά μέσα, όπως ήταν το αεροπλάνο και το ελικόπτερο. Με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας καινούρια συστήματα εντάχθηκαν στα πτητικά μέσα που είχαν ως στόχο την αύξηση της αξιοπιστίας του συστήματος. Σε αυτόν τον στόχο συνέβαλλαν τα ηλεκτρονικά εξαρτήματα, τα οποία εντάχθηκαν αμέσως δίνοντας λύσεις εκεί που η μηχανική επίλυση ήταν ασύμφορη. Αυτό οδήγησε τους κατασκευαστές να σχεδιάζουν ολοένα και περισσότερα μοντέλα αεροσκαφών, τα οποία βασίζονταν στη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Συνεπώς η ηλεκτρική ενέργεια στα αεροπλάνα θα απασχολήσει σε μεγάλο βαθμό τους επιστήμονες τα επόμενα χρόνια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πτητικά μέσα

2.1 Εισαγωγή

Από τη στιγμή που ανακαλύφτηκε η ηλεκτρική ενέργεια, όλο και περισσότερο η ζωή του ανθρώπου εξαρτιόταν από αυτή και ολοένα κέρδιζε χώρο σε καθημερινές ανάγκες του . Με τον ίδιο τρόπο, με το πέρασμα των ετών και, καθώς η τεχνολογία των αεροσκαφών εξελισσόταν, ήταν απαραίτητο η τεχνολογία τους να μη βασίζεται μόνο σε μηχανικά μέρη, αλλά και σε ηλεκτρομηχανικά ή και ακόμα σε καθαρά ηλεκτρικά μέρη. Γι' αυτόν το λόγο, η ηλεκτρική ενέργεια είναι άκρως απαραίτητη για τη λειτουργία ενός αεροσκάφους ή ελικοπτέρου. Με την ηλεκτρική ενέργεια πραγματοποιούνται πολλές διεργασίες στο αεροσκάφος, όπως φωτισμός, έλεγχος διαφόρων συστημάτων, τηλεπικοινωνίες, κίνηση πηδαλίων και λειτουργία οργάνων. Συμπερασματικά, ένα αεροσκάφος είναι αδύνατο να πετάξει χωρίς την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

2.2 Τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Ο άνθρωπος στην καθημερινότητα του χρησιμοποιεί σε μεγάλο βαθμό την ηλεκτρική ενέργεια, χωρίς πλέον να δίνει ιδιαίτερη σημασία. Η ηλεκτρική ενέργεια βρίσκεται παντού γύρω του: από το ορατό φως, που του παρέχει ένας λαμπτήρας, την ενεργοποίηση του κινητού τηλεφώνου του έως τη διαδικασία εκκίνησης του αυτοκίνητου του. Το ερώτημα, που γεννάται, είναι τι είναι ηλεκτρική ενέργεια, πώς δημιουργείται και γιατί είναι τόσο χρήσιμη.

Μια περιγραφή, που μπορεί να δοθεί για την έννοια της, είναι ότι η ηλεκτρική ενέργεια είναι η ενέργεια που οφείλει την ύπαρξη της στην ύπαρξη και στην κίνηση ηλεκτρικού φορτίου.

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι πολύ χρήσιμη, διότι μπορεί εύκολα να μεταφερθεί και να μετατραπεί σε άλλες μορφές ενέργειας με καλό βαθμό απόδοσης, χωρίς δηλαδή να υπάρχουν μεγάλα ποσά απωλειών κατά τις διαδικασίες αυτές σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας, όπως είναι η θερμική, η κινητική και η μηχανική. Επιπλέον, είναι μια ενέργεια καθαρή στην χρήση της.

Πριν γίνει αναφορά για τους τρόπους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θα πρέπει πρώτα να γίνει λόγος για τις χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, που υπάρχουν και αποκαλούνται πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

- Ηλιακή ενέργεια : Είναι η ενέργεια, η οποία σχηματίζεται από τη σύντηξη του υδρογόνου στον ήλιο και φτάνει στη γη υπό μορφή ακτινοβολίας. Η ενέργεια αυτή υπάρχει άπλετη στη φύση. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η μέση τιμή της ηλιακής ενέργειας είναι 1373 W/m^2 στα εξωτερικά όρια της ατμόσφαιρας. Γύρω στο 72% αυτής της τιμής φτάνει άμεσα στην επιφάνεια

της γης, ενώ ένα ποσοστό της τάξης 7% φτάνει με έμμεσο τρόπο, δηλαδή μέσω διάχυσης στα στρώματα της ατμόσφαιρας. Το 18% απορροφάται από το όζον, ενώ μόλις το 3% επιστρέφει στο διάστημα μέσω της ανάκλασης στα ανώτερα στρώματα της γήινης ατμόσφαιρας. Παρά τα τεράστια ποσά ενέργειας, που φτάνουν στη γη από τον ήλιο, δεν καθίσταται προς το παρόν εφικτή η 100% αξιοποίησή της από τον άνθρωπο.

- Αιολική ενέργεια: Ουσιαστικά είναι ένα αποτέλεσμα της ηλιακής ενέργειας. Λόγω της διαφορετικής θέρμανσης του πλανήτη, αναπτύσσονται ατμοσφαιρικές πιέσεις, που διαφέρουν από τόπο σε τόπο. Το φαινόμενο αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μετακίνηση αέριων μαζών.
- Γεωθερμική ενέργεια: Το υπέδαφος της γης χωρίζεται σε επίπεδα. Το εξωτερικό τμήμα της αποτελεί τη λιθόσφαιρα, η οποία εκτείνεται από 10km κάτω από τους ωκεανούς έως 300km κάτω από ηπείρους. Η επόμενη ζώνη προς το εσωτερικό της γης ονομάζεται ασθενόσφαιρα, η οποία και αποτελείται από υλικά υγρής μορφής ως αποτέλεσμα των μεγάλων θερμοκρασιών. Η επόμενη ζώνη αποτελεί τη μεσόσφαιρα και στη συνέχεια βρίσκεται ο πυρήνας της γης, του οποίου η μορφή είναι επίσης υγρή λόγω των τεράστιων θερμοκρασιών. Η γεωθερμική ενέργεια είναι ουσιαστικά η ενέργεια εκείνη, που παρέχεται υπό μορφή θερμότητας από τη γη.
- Πυρηνική ενέργεια: Είναι η ενέργεια, η οποία εκλύεται υπό μορφή θερμότητας, όταν υπάρχει διάσπαση του πυρήνα των ατόμων συγκεκριμένων χημικών στοιχείων, όπως είναι το πλουτόνιο και το εμπλουτισμένο ουράνιο. Η συγκεκριμένη διαδικασία επιφυλάσσει τεράστιους κινδύνους ατυχήματος και μόλυνση του περιβάλλοντος με ραδιενεργά απόβλητα. Μια άλλη μορφή πυρηνικής ενέργειας, η οποία βρίσκεται σε πειραματικό στάδιο, είναι αυτή της σύντηξης του πυρήνα, η οποία ουσιαστικά αποτελεί την αντίθετη διεργασία από αυτή της σχάσης.
- Χημικά καύσιμα: Χημικές ενώσεις, όπως είναι το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο, η κηροζίνη, το οινόπνευμα και αρκετά ακόμα παράγωγα του άνθρακα, εκλύουν ενέργεια υπό μορφή θερμότητας, όταν υπάρξει κάποια χημική αντίδραση (για παράδειγμα οξείδωση).
- Ενέργεια του νερού: Η συγκεκριμένη ενέργεια μπορεί να είναι αποθηκευμένη υπό μορφή είτε δυναμικής ενέργειας σε κάποιο φυσικό ή τεχνητό φράγμα, είτε κινητικής ενέργειας, η οποία παρέχεται κατά τη ροή του νερού στους ποταμούς.

Για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται οι παραπάνω πηγές, οι οποίες με τις κατάλληλες διεργασίες και διατάξεις, μετασχηματίζουν τις διάφορες μορφές της ενέργειας. Συγκεντρωτικά, οι πιο γνωστές μέθοδοι για τη μετατροπή αυτή είναι οι παρακάτω:

- 1 Θερμική – μηχανική μέθοδος: Κατά την καύση παραγώγων του άνθρακα, όπως είναι ο λιγνίτης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο σε λέβητα, απελευθερώνεται θερμότητα, η οποία μετατρέπει το νερό σε ατμό. Στη συνέχεια, ο ατμός οδηγείται σε έναν αμοστρόβιλο, ο οποίος με τη σειρά

του μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική με τη χρήση μιας ηλεκτρογεννήτριας. Με αυτή τη μέθοδο λειτουργούν οι περισσότεροι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, ως πρωτογενής πηγή χρησιμοποιείται η γεωθερμική ενέργεια, καθώς και η πυρηνική. Γενικά, σε αυτή τη μέθοδο η αλυσίδα μετατροπής ενέργειας είναι η εξής : καύσιμο → παραγωγή θερμότητας → μετατροπή θερμικής ενέργειας σε μηχανική → μετατροπή μηχανικής σε ηλεκτρική ενέργεια.

- 2 Καθαρώς μηχανική μέθοδος: Σε αυτήν τη μέθοδο η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται κατευθείαν σε ηλεκτρική. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται με την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας μέσω των ανεμογεννητριών, καθώς και της ενέργειας του νερού μέσω υδροηλεκτρικών έργων. Η μέθοδος αυτή θεωρείται φιλική προς το περιβάλλον, διότι δεν αφήνει επιβλαβή κατάλοιπα.
- 3 Καθαρώς χημική μέθοδος: Σε αυτήν τη μέθοδο εντάσσονται οι μπαταρίες και οι κυψέλες καυσίμου, όπου μέσω χημικών διεργασιών παράγουν απευθείας ηλεκτρική ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμου είναι συσκευές, οι οποίες μετατρέπουν την εκλύομενη ενέργεια μιας χημικής αντίδρασης σε ηλεκτρική. Το καύσιμο, το οποίο χρησιμοποιείται, μπορεί να είναι το υδρογόνο ή διάφορα είδη υδρογονανθράκων.
- 4 Μαγνητοϋδροδυναμική μέθοδος: Η αρχή λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου διατυπώθηκε πρώτα από το Faraday. Παρατήρησε μέσω πειραμάτων ότι, όταν ένα ιονισμένο ρευστό ηλεκτρικά ουδέτερο ρέει μέσα από σταθερό μαγνητικό πεδίο, ασκούνται δυνάμεις στα ιονισμένα σωματίδια με αποτέλεσμα το διαχωρισμό των αρνητικών φορτίων από τα θετικά. Τα ηλεκτρόνια κινούνται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο και συλλέγονται από ηλεκτρόδια. Εάν το κύκλωμα κλείσει, τότε υπάρχει ροή ηλεκτρονίων και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- 5 Θερμοηλεκτρική μέθοδος: Η μέθοδος αυτή ανακαλύφθηκε από το Γερμανό φυσικό Thomas Johann Seebeck, ο οποίος παρατήρησε ότι, εάν τα άκρα δυο διαφορετικών μετάλλων έρθουν σε επαφή μεταξύ τους και βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, τότε στα άκρα τους αναπτύσσεται ηλεκτρεγερτική δύναμη ανάλογη της θερμοκρασίας αυτής. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε Seebeck προς τιμή του Γερμανού φυσικού και βρίσκει εφαρμογή σε πολλά αισθητήρια μέτρησης θερμοκρασίας.
- 6 Θερμιονική μέθοδος: Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αρχή της εκπομπής ηλεκτρονίων, η οποία ανακαλύφθηκε από τον Thomas Edison. Κατά τη μέθοδο αυτή, όταν πομπός θερμανθεί σε κατάλληλη θερμοκρασία, τότε εκπέμπει ηλεκτρόνια. Εάν ο πομπός συνδεθεί ηλεκτρικά με έναν δέκτη μέσω εξωτερικού κυκλώματος, τότε στο κύκλωμα ρέει ηλεκτρικό ρεύμα και στα άκρα τους

αναπτύσσεται διαφορά δυναμικού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται συνδυαστικά στους αντιδραστήρες πυρηνικών σταθμών, καθώς και σε διαστημικές αποστολές.

- 7 Φωτοηλεκτρική μέθοδος: Η μέθοδος αυτή στηρίζεται στην τεχνολογία ημιαγωγών, καλούμενοι και ως φωτοβολταϊκές κυψέλες. Είναι δίοδοι, όπου λαμβάνουν τη φωτεινή ακτινοβολία και δημιουργούν ζεύγη οπών – ελευθέρων ηλεκτρονίων. Όσο η ακτινοβολία προσπίπτει πάνω στον ημιαγωγό, η επίδραση του ενσωματωμένου πεδίου διαχωρίζει τα ζεύγη αυτά, εκτρέποντας τα ελεύθερα ηλεκτρόνια προς τον ημιαγωγό τύπου n και τις οπές προς τον ημιαγωγό τύπου p. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διαφοράς δυναμικού στα άκρα της διόδου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι παραπάνω μέθοδοι μπορούν να καταταγούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τα στάδια, που χρειάζεται, ώστε η πρωτογενής μορφή ενέργειας να μετατραπεί σε ηλεκτρική. Η πρώτη είναι η άμεση, κατά την οποία η πρωτογενής ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική. Σε αυτή την κατηγορία κατατάσσονται η καθαρώς χημική, η μαγνητοϋδροδυναμική, η θερμοηλεκτρική, η θερμοιονική και η φωτοηλεκτρική. Η δεύτερη κατηγορία είναι η έμμεση, κατά την οποία η πρωτογενής ενέργεια μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας στα ενδιάμεσα στάδια, πριν μετατραπεί σε ηλεκτρική. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν η θερμική - μηχανική και η καθαρώς μηχανική [32 §1.1 - 1.4]

Στα πτητικά μέσα χρησιμοποιούνται παραπάνω από μια μέθοδοι για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την τροφοδότηση των διαφόρων συστημάτων. Σε αεροσκάφη, τα οποία χρησιμοποιούν κινητήρες καύσης για την παροχή κύριας ισχύος, χρησιμοποιείται η θερμική – μηχανική μέθοδος. Σε αυτήν τη διαδικασία ένας ή περισσότεροι κινητήρες (εμβολοφόρος, turboprop, turbojet), κατά την καύση παραγώγων του πετρελαίου, παράγει καυσαέρια σε μεγάλη θερμοκρασία και πίεση, τα οποία στη συνέχεια μετατρέπονται μέσω εμβολών (εμβολοφόροι κινητήρες) ή βαθμίδων τουρμπίνας (turboprop, turbojet) σε μηχανική ενέργεια. Στη συνέχεια με τη βοήθεια συνδέσεων (γρανάζια) η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Επιπλέον, τα αεροσκάφη διαθέτουν συσσωρευτές αξιοποιώντας έτσι και τη χημική μέθοδο. Σε μη επανδρωμένα αεροσκάφη χρησιμοποιούνται και φωτοβολταϊκά πλαίσια, τα οποία τοποθετούνται στην άτρακτο για συλλογή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ακτινοβολίας. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε πειραματικό στάδιο, διότι χρειάζονται μεγάλες επιφάνειες ατράκτου του αεροσκάφους για την ανάπτυξη μεγάλων ποσών ενέργειας.

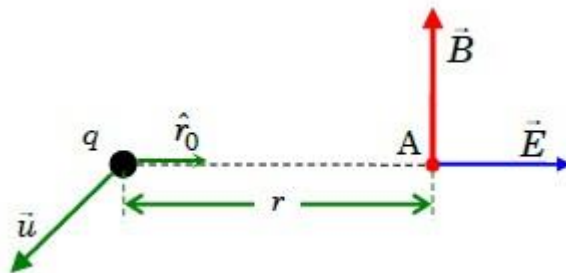
2.3 Αρχή λειτουργίας ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτριας

Η ηλεκτρική μηχανή αποτελεί το μέσο, με το οποίο θα μετατραπεί μια μορφή ενέργειας σε μια άλλη. Όπως γίνεται αντιληπτό και από τον ορισμό, η μια εκ των δύο ενεργειών είναι η ηλεκτρική. Η ηλεκτρική μηχανή, στην οποία η ενέργεια, που εισέρχεται είναι η ηλεκτρική και η εξερχόμενη είναι η μηχανική τότε, ονομάζεται κινητήρας. Η ηλεκτρική μηχανή, στην οποία η εισαγόμενη ενέργεια είναι η μηχανική και η εξερχόμενη η ηλεκτρική, ονομάζεται γεννήτρια. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και ηλεκτρικές μηχανές, οι οποίες έχουν ηλεκτρική ενέργεια τόσο ως είσοδο, αλλά και ως έξοδο. Ωστόσο, έχουν μετασχηματισμένα τα χαρακτηριστικά τους μεγέθη.

2.3.1 Νόμος των Biot – Savart

Στις αρχές του 19^{ου} αιώνα ο Δανός Φυσικός Hans Christian Oersted ανακάλυψε, ότι η βελόνα μιας πυξίδας εκτρέπεται, όταν πλησιάσει κοντά της ένας ρευματοφόρος αγωγός. Λίγα χρόνια αργότερα, οι Jean – Baptiste Biot και Felix Savart εξέτασαν τη δύναμη, που ασκεί ένας ρευματοφόρος αγωγός σε έναν μαγνήτη.

Σύμφωνα με πειραματικές διαδικασίες των Biot-Savart, ένα φορτίο q , το οποίο κινείται με ταχύτητα \vec{u} στο κενό, προκαλεί την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} σε ένα τυχαίο σημείο A, το οποίο βρίσκεται σε απόσταση r πάνω στη διεύθυνση \hat{r}_0 , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.1:



Εικόνα 2.1: Ανάπτυξη μαγνητικής επαγωγής \vec{B} κινούμενου φορτίου q σύμφωνα με το νόμο Biot-Savart [31].

Η μαγνητική επαγωγή στο τυχαίο σημείο A είναι ίση με:

$$\vec{B} = \frac{1}{c^2} \cdot \vec{u} \times \vec{E} \Rightarrow \vec{B} = \frac{1}{c^2} \cdot \vec{u} \times \left(\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q}{r^2} \cdot \hat{r}_0 \right) \Rightarrow \vec{B} = \frac{q}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^2} \cdot \vec{u} \times \frac{\hat{r}_0}{r^2} \Rightarrow$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4 \cdot \pi} \cdot q \cdot \frac{\vec{u} \times \hat{r}_0}{r^2} \quad (\text{σχέση 2.1})$$

Όπου:

\vec{E} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, που δημιουργεί το κινούμενο φορτίο q με άξονα διεύθυνσης το \hat{r}_0

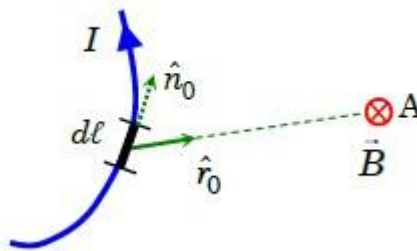
$\epsilon_0 \cong 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$ γνωστή ως διηλεκτρική σταθερά του κενού.

$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ ταχύτητα του φωτός

μ_0 η μαγνητική διαπερατότητα του κενού

$$\mu_0 = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot c^2} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{T \cdot m}{A} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m} \quad (\text{σχέση 2.2})$$

Έστω ότι το στοιχειώδες φορτίο dq κινείται με την ίδια ταχύτητα \vec{v} εντός του αγωγού, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.2:



Εικόνα 2.2: Μαγνητικό πεδίο $d\vec{B}$, το οποίο δημιουργείται από στοιχειώδες τμήμα $d\vec{s}$ αγωγού, που διαρρέεται από ρεύμα έντασης I [31].

Η στοιχειώδης μαγνητική επαγωγή $d\vec{B}$, η οποία δημιουργείται στο σημείο A , προκύπτει βάσει της σχέσης 2.1 και είναι ίση με :

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot dq \cdot \frac{\vec{v} \times \hat{r}_0}{r^2} \quad (\text{σχέση 2.3})$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι το \hat{n}_0 αποτελεί το μοναδιαίο διάνυσμα διεύθυνσης του στοιχειώδους τμήματος $d\ell$ του αγωγού και η φορά του είναι αντίστοιχη του ρεύματος I , που το διαρρέει, η σχέση 2.3 παίρνει τη μορφή :

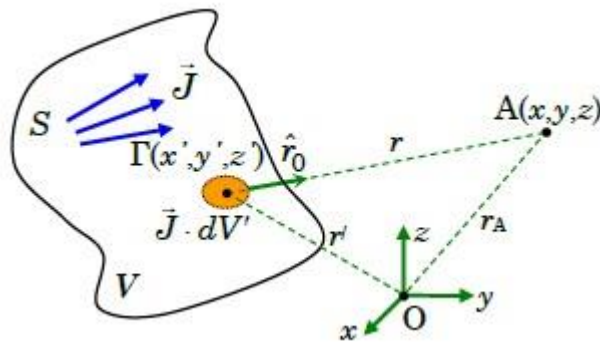
$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot dq \cdot \frac{\vec{v} \times \hat{r}_0}{r^2} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot dq \cdot \frac{d\vec{\ell}}{dt} \times \hat{r}_0 = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \frac{dq}{dt} \cdot d\vec{\ell} \times \hat{r}_0 \Rightarrow$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot d\vec{\ell} \times \hat{r}_0 = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{I}{r^2} \cdot d\ell \cdot \hat{n}_0 \times \hat{r}_0 \quad (\text{σχέση 2.4})$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η συνολική μαγνητική επαγωγή \vec{B} στο τυχαίο σημείο A, που δημιουργείται από τη συνεισφορά όλων των στοιχειωδών τμημάτων του αγωγού, τα οποία διαρρέονται από ρεύμα έντασης I , δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \int \frac{I}{r^2} \cdot d\ell \cdot \hat{n}_0 \times \hat{r}_0 \quad (\text{σχέση 2.5})$$

Επιπρόσθετα, με την επέκταση της σχέσης 2.4 σε ένα υλικό σώμα μπορεί να γίνει αντικατάσταση της έντασης του ρεύματος I με την πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} , που διέρχεται από μία στοιχειώδη επιφάνεια dS' , η οποία περικλείει τον στοιχειώδη όγκο dV' , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.3:



Εικόνα 2.3: Υλικό σώμα, στο οποίο διέρχεται πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος \vec{J} . [31]

Άρα, η σχέση 2.4 μπορεί να γραφτεί ως :

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{J \cdot dS'}{r^2} \cdot d\ell \cdot \hat{n}_0 \times \hat{r}_0 = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot dS' \cdot d\ell \cdot J \cdot \hat{n}_0 \times \hat{r}_0 \Rightarrow$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot dV' \cdot \vec{J} \times \hat{r}_0 \quad (\text{σχέση 2.6})$$

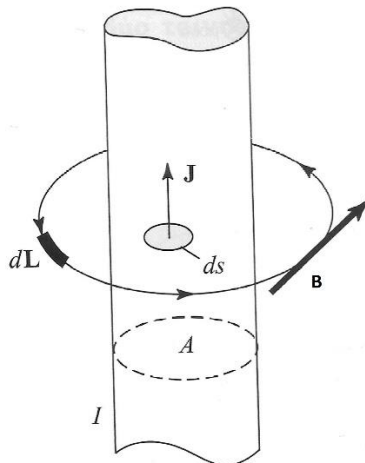
Όπου το μοναδιαίο διάνυσμα \hat{n}_0 είναι κάθετο στην επιφάνεια dS' .

Η συνολική μαγνητική επαγωγή \vec{B} σε ένα σημείο του χώρου A, η οποία προέρχεται από τη διερχόμενη πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου \vec{J} από την επιφάνεια S ενός υλικού σώματος όγκου V , υπολογίζεται με το παρακάτω ολοκλήρωμα όγκου [31 §11.3] :

$$\vec{B} = \iiint_V \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot dV' \cdot \vec{J} \times \hat{r}_0 = \frac{\mu}{4 \cdot \pi} \iiint_V \frac{\vec{J} \times \hat{r}_0}{r^2} \cdot dV' \quad (\text{σχέση 2.7})$$

2.3.2 Νόμος του Ampere

Ο Γάλλος φυσικός Andre-Marie Ampere στις αρχές του 19^{ου} αιώνα διατύπωσε τις σχέσεις, που περιγράφουν την ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε κλειστές κυκλικές διαδρομές γύρω από διατάξεις, οι οποίες διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.4: Ανάπτυξη μαγνητικού πεδίου σε κυκλικές διαδρομές σύμφωνα με τον νόμο του Ampere [36].

Μέσω πειραματικών διατάξεων συμπεράνε, ότι το μαγνητικό πεδίο, που δημιουργείται γύρω από ένα υλικό σώμα, το οποίο διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I αμετάβλητο στο χρόνο t , δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \cdot \vec{J} \quad (\text{σχέση 2.8})$$

Με τη βοήθεια του θεωρήματος του Stokes, η σχέση 2.8 μπορεί να γραφεί σε ολοκληρωτική μορφή δημιουργώντας έτσι τη σύνδεση του επικαμπύλιου ολοκληρώματος του εσωτερικού γινομένου του $\vec{B} \cdot d\vec{\ell}$ με το επιφανειακό ολοκλήρωμα του $\nabla \times \vec{B} \cdot d\vec{S}$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \iint_S \nabla \times \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S \mu \cdot \vec{J} \cdot d\vec{S} = \mu \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} \Rightarrow$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu \cdot I_{tot} \quad (\text{σχέση 2.9})$$

Για $\mu = \text{σταθερο}$

Ο James Clerk Maxwell αντιλήφθηκε, ότι η σχέση 2.9 ισχύει μόνο για μαγνητικά πεδία μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , τα οποία δημιουργούνται από ηλεκτρικό ρεύμα αμετάβλητο στο χρόνο (μαγνητοστατικό

πεδίο). Γι' αυτό το λόγο, ξαναδιατύπωσε το νόμο του Ampere, ο οποίος στη συνέχεια ονομάστηκε νόμος Ampere-Maxwell. Η σχέση, στην οποία κατέληξε, είναι η παρακάτω:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{σχέση 2.10})$$

Με την προϋπόθεση ότι: $\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$

Όπου:

\vec{H} το διάνυσμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου ($\frac{A}{m}$)

\vec{D} το διάνυσμα της διηλεκτρικής μετατόπισης ($\frac{C}{m^2}$)

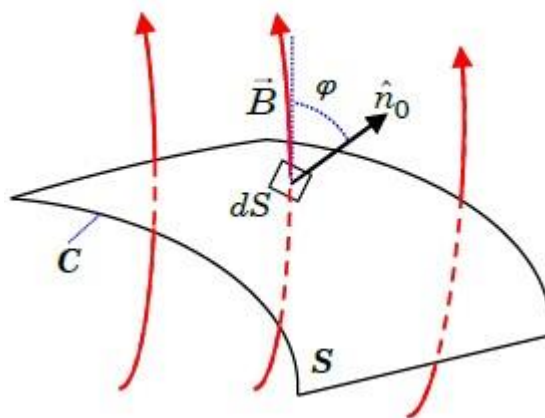
Η σχέση 2.10 είναι διατυπωμένη με τη σημειακή της μορφή. Με τη βοήθεια του θεωρήματος του Stokes μπορεί να λάβει την ολοκληρωτική της μορφή, όπως φαίνεται παρακάτω [36 §1]

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \Rightarrow \iint_S (\nabla \times \vec{H}) \cdot \vec{dS} = \iint_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot \vec{dS} \Rightarrow$$

$$\oint_S \vec{H} \cdot \vec{d\ell} = \iint_S \vec{J} \cdot \vec{dS} + \frac{\partial}{\partial t} \iint_S \vec{D} \cdot \vec{dS} \quad (\text{σχέση 2.11})$$

2.3.3 Νόμος του Gauss-Μαγνητική ροή

Ένα μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} διέρχεται από μια στοιχειώδη επιφάνεια $d\vec{S}$, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.5:



Εικόνα 2.5 : Μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} διέρχεται μέσα από επιφάνεια S [31].

Στοιχειώδης μαγνητική ροή $d\Phi$ ορίζεται ως το εσωτερικό γινόμενο της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , που διέρχεται μέσα από μια στοιχειώδη επιφάνεια dS επί το διάνυσμα $d\vec{S}$, το οποίο ισούται με το γινόμενο του κάθετου μοναδιαίου διανύσματος \hat{n}_0 με τη στοιχειώδη επιφάνεια dS .

Δηλαδή, με μαθηματική μορφή ισχύει:

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{B} \cdot dS \cdot \hat{n}_0 = B \cdot dS \cdot \cos \varphi \quad (\text{σχέση 2.12})$$

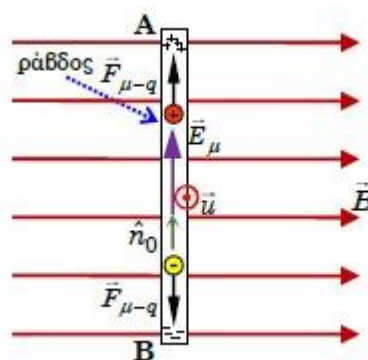
Μονάδα μέτρησης της μαγνητικής ροής είναι το Weber [Wb]

Η συνολική μαγνητική ροή Φ , που διαπερνά ολόκληρη την επιφάνεια S , είναι το άθροισμα των στοιχειωδών μαγνητικών ροών $d\Phi$ και υπολογίζεται μέσω του αντίστοιχου επιφανειακού ολοκληρώματος [31 §12.4]:

$$\Phi = \iint_S d\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \iint_S \vec{B} \cdot \hat{n}_0 \cdot dS = \iint_S \vec{B} \cdot \cos \varphi dS \quad (\text{σχέση 2.13})$$

2.3.4 Ανάπτυξη τάσης στα άκρα αγωγού από επαγωγή

Έστω ότι ένας ευθύγραμμος αγωγός μήκους ℓ βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} , όπου αρχικά παραμένει ακίνητος και δε διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Όταν, όμως, αρχίσει να κινείται κάθετα στο μαγνητικό πεδίο με ταχύτητα \vec{u} , τότε αναπτύσσεται μία δύναμη $\vec{F}_{\mu-q}$ στα ηλεκτρικά φορτία του υλικού, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.6:



Εικόνα 2.6: Κίνηση ευθύγραμμου αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου [31].

Η δύναμη, η οποία ασκείται στα ηλεκτρικά φορτία του αγωγού, δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\vec{F}_{\mu-q} = q \cdot \vec{u} \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 2.14})$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται μια πεδιακή ένταση \vec{E}_μ εντός του αγωγού λόγω της μετακίνησης των θετικών φορτίων στο σημείο A και των αρνητικών φορτίων στο σημείο B.

$$\vec{E}_\mu = \frac{\vec{F}_{\mu-q}}{q} = \vec{u} \times \vec{B} = u \cdot B \cdot \hat{n}_0 \quad (\text{σχέση 2.15})$$

Όπου το \hat{n}_0 στην εικόνα 2.6 είναι το μοναδιαίο διάνυσμα με φορά από το B στο A.

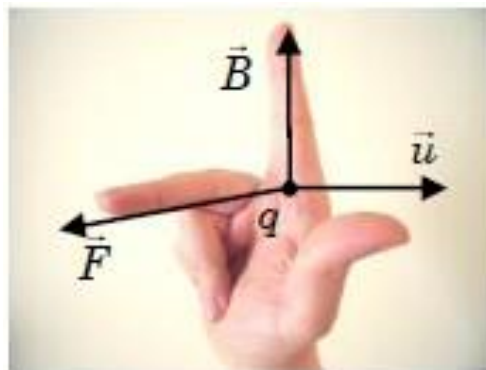
Συνεπώς, ο αγωγός συμπεριφέρεται ως μια ηλεκτρική πηγή τάσης, όπου στα άκρα του αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού, γνωστή ως ηλεκτρεγερτική δύναμη $V_{πηγης}$, όπου είναι ίση με:

$$V_{πηγης} = \int_B^A \vec{E}_\mu \cdot \vec{d\ell} = \int_B^A (u \cdot B \cdot \hat{n}_0) \cdot (\hat{n}_0 \cdot d\ell) = u \cdot B \cdot \ell \quad (\text{σχέση 2.16})$$

Στην περίπτωση, που οι αρχικές συνθήκες δεν είναι σταθερές, τότε ο γενικός τύπος της ηλεκτρεγερτικής δύναμης $V_{πηγης}$ γίνεται:

$$V_{πηγης} = \int_B^A \vec{E}_\mu \cdot \vec{d\ell} = \int_B^A \vec{E}_\mu \cdot (\hat{n}_0 \cdot d\ell) = \int_B^A \vec{u} \times \vec{B} \cdot \hat{n}_0 \cdot d\ell \quad (\text{σχέση 2.17})$$

Η πολικότητα του αγωγού καθορίζεται με τον κανόνα των τριών δακτύλων του δεξιού χεριού, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.7. Η διεύθυνση της δύναμης έχει ως αφετηρία τον αρνητικό και ως κατάληξη το θετικό πόλο της πηγής.



Εικόνα 2.7: Κανόνας τριών δακτύλων δεξιού χεριού [31].

Η ανάπτυξη της επαγόμενης πεδιακής έντασης \vec{E}_μ συνεχίζεται, όσο ο αγωγός βρίσκεται σε κίνηση και, όταν αυτός ακινητοποιηθεί, μηδενίζεται. Η συσσώρευση, όμως, θετικών φορτίων στο σημείο A και αρνητικών στο σημείο B δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο έντασης \vec{E} αντίθετης φοράς με αυτό

της \vec{E}_μ Το πεδίο αυτό αυξάνεται ως τη στιγμή, που τα μέτρα των δύο διανυσμάτων γίνουν ίσα. Δηλαδή:

$$\vec{E}_\mu + \vec{E} = 0 \quad (\text{σχέση 2.18})$$

Η εξισορρόπηση αυτή γίνεται σχεδόν ακαριαία, οπότε στη συνέχεια σταματά κάθε κίνηση φορτιού εντός του αγωγού. Η ενέργεια, η οποία αποδόθηκε λόγω της κίνησης του αγωγού, αποθηκεύεται υπό μορφή ηλεκτρικού πεδίου και θα αποδοθεί ξανά με την ακινητοποίηση του αγωγού, ώστε να μηδενιστεί η διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου A και B.

Όταν ο αγωγός έχει τη διάταξη κλειστού βρόγχου, τότε χρησιμοποιείται μια διαφορετική διατύπωση του νόμου της επαγωγής, όπου δίνεται από τη σχέση παρακάτω:

$$e_s = \oint \vec{E}_\mu \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{σχέση 2.19})$$

Η σχέση 2.19 αποτελεί το νόμο του Faraday. Η σχέση αυτή αποτελεί το θεμελιώδη νόμο στην αρχή λειτουργίας της γεννήτριας και διατυπώθηκε στις αρχές του 19^{ου} αιώνα από τον Άγγλο φυσικό Michael Faraday, ο οποίος μέσω πειραματικών διαδικασιών έδειξε, ότι ένα μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να επάγει τάση στα άκρα ενός κυκλώματος.

Όταν υπάρχει ταυτόχρονη κίνηση αγωγού εντός μαγνητικού πεδίου και μεταβαλλόμενο μαγνητικό πεδίο σε σχέση με τον χρόνο, τότε η συνολική επαγόμενη τάση στα άκρα του κλειστού κυκλώματος δίνεται από το άθροισμα των σχέσεων 2.17 και 2.19, όπως φαίνεται παρακάτω:

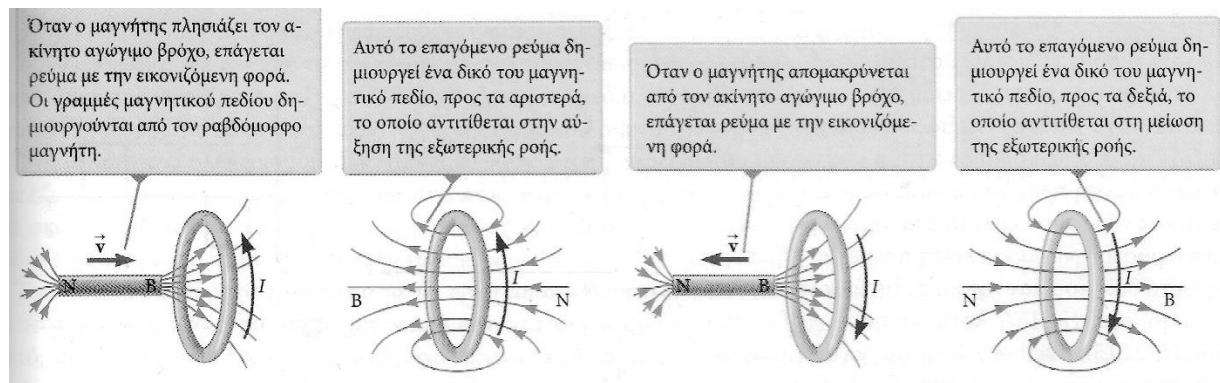
$$V = \oint_{\ell} (\vec{u} \times \vec{B}) \cdot d\vec{\ell} - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (\text{σχέση 2.20})$$

Όπου ο πρώτος όρος στο δεξί μέρος της σχέσης 2.20 δίνει την επαγόμενη ΗΕΔ λόγω κίνησης, ενώ ο δεύτερος όρος δίνει την επαγόμενη ΗΕΔ λόγω της χρονικής μεταβολής του \vec{B} [31 §13.1].

2.3.5 Κανόνας του Lenz

Το αρνητικό πρόσημο στο νόμο του Faraday (σχέση 2.19) έχει ιδιαίτερη σημασία. Σύμφωνα με τον Heinrich Friedrich Emil Lenz, η ηλεκτρεγερτική δύναμη στο κύκλωμα θέλει να αντισταθεί στη μεταβολή της μαγνητικής ροής. Όπως φαίνεται στην εικόνα 2.8, όταν αυξάνεται η διερχομένη από το βρόγχο μαγνητική ροή, το επαγόμενο ρεύμα έχει φορά τέτοια, ώστε να δημιουργεί μαγνητικό πεδίο και συγχρόνως μαγνητική ροή αντίθετης φοράς από την αρχική. Αντίθετα, εάν η μαγνητική

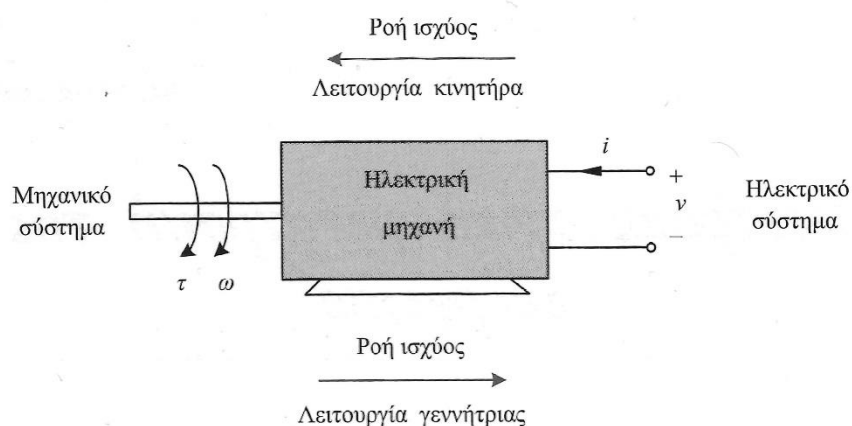
ροή, που διαπερνά το βρόγχο, μειώνεται, τότε το επαγόμενο ρεύμα έχει φορά τέτοια, ώστε να παράγει μαγνητικό πεδίο και συγχρόνως μαγνητική ροή, ώστε να αυξήσει την αρχική μαγνητική ροή.



Εικόνα 2.8: Κατεύθυνση επαγόμενου ρεύματος βάσει τον κανόνα του Lenz [2].

2.3.6 Ηλεκτρομηχανική μετατροπή ενέργειας

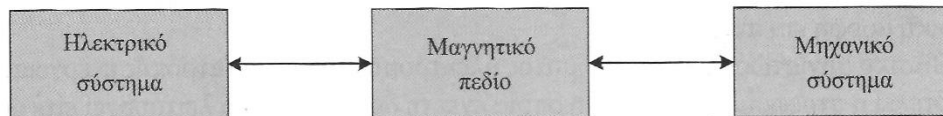
Για τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και το αντίθετο είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός μέσου μετατροπής. Η διαδικασία, που ακολουθείται για τη μετατροπή αυτή, αποκαλείται ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας και το βασικό μέσο για την επίτευξη αυτού του στόχου είναι συνήθως η στρεφομένη μηχανή, η οποία έχει τη δυνατότητα να λειτουργεί είτε ως γεννήτρια, όταν μετατρέπει τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική, είτε ως κινητήρας, όταν μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική. Παρόλα αυτά, η διαδικασία της μετατροπής της ενέργειας είναι αντιστρεπτή, δηλαδή μια γεννήτρια μπορεί να λειτουργήσει ως κινητήρας και το αντίθετο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.9.



Εικόνα 2.9: Λειτουργία ηλεκτρικής μηχανής ως γεννήτριας και ως κινητήρα [6].

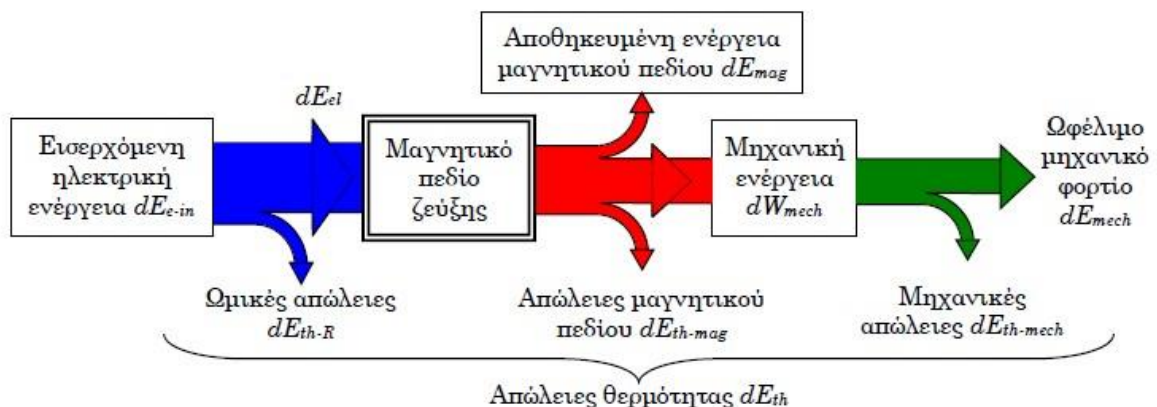
Αν και τα είδη των ηλεκτρικών μηχανών είναι πολλά και διαφέρουν ανάλογα με την εφαρμογή, για την οποία χρησιμοποιούνται, τα φαινόμενα, που αναπτύσσονται από την άλλη μεριά, είναι ακριβώς

τα ίδια σε όλα τα είδη. Σε όλες της ηλεκτρικές μηχανές υπάρχει κίνηση αγωγών εντός μαγνητικού πεδίου, οπότε μέσω του νόμου του Faraday αναπτύσσεται τάση στα άκρα τους. Επιπλέον, όταν αγωγοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα εντός μαγνητικού πεδίου τότε αναπτύσσονται μηχανικές δυνάμεις. Η μετάβαση από τη μια μορφή ενέργειας στην άλλη γίνεται με έμμεσο τρόπο στο διάκενο της μηχανής, στο οποίο αναπτύσσεται μαγνητικό πεδίο, λειτουργώντας έτσι ως ενδιάμεση αποθήκη ενέργειας.



Εικόνα 2.10: Στάδια μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε μια ηλεκτρική μηχανή [6].

Η εικόνα 2.10 αποτελεί τη θεωρητική απεικόνιση της μετατροπής της ενέργειας, διότι δεν περιλαμβάνει τις απώλειες, οι οποίες δημιουργούνται σε κάθε στάδιο. Μια πιο ρεαλιστική απεικόνιση της πραγματικής ηλεκτρικής μηχανής φαίνεται στην εικόνα 2.11.



Εικόνα 2.11: Διάγραμμα ηλεκτρικής ενέργεια σε πραγματική ηλεκτρική μηχανή (λειτουργία κινητήρα) [31].

Η στοιχειώδης ποσότητα εισερχομένης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα dE_{in} καταναλίσκεται, ώστε να αυξηθεί η αποθηκευμένη ενέργεια στο μαγνητικό πεδίο dE_{mag} , για τις θερμικές απώλειες, που υπάρχουν στο σύστημα dE_{th} , και για την παραγωγή μηχανικού έργου dW_{mech} . Με μαθηματική έκφραση ισχύει:

$$dE_{in} = dE_{mag} + dW_{mech} + dE_{th} \quad (\text{σχέση 2.21})$$

Στη σχέση 2.21, όλες η απώλειες θεωρούνται κοινές. Στην πραγματικότητα, απώλειες θερμότητας υπάρχουν σε κάθε στάδιο μετατροπής. Γι' αυτόν τον λόγο, στη συνέχεια θα γίνει διαχωρισμός.

Η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια dE_{el} , η οποία χρησιμοποιείται για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής, ισούται με τη συνολική ηλεκτρική ενέργεια dE_{in} , από την οποία έχουν αφαιρεθεί οι απώλειες θερμότητας στις ωμικές αντιστάσεις dE_{th-R} . Δηλαδή, ισχύει:

$$dE_{in} = dE_{el} + dE_{th-R} \Rightarrow$$

$$dE_{el} = dE_{in} - dE_{th-R} = E_s \cdot i \cdot dt - i^2 \cdot R \cdot dt = (E_s - i \cdot R) \cdot i \cdot dt = V_L \cdot i \cdot dt \quad (\text{σχέση 2.22})$$

Όπου:

V_L η αναπτυσσόμενη τάση άκρα του αγωγού κατά το νόμο του Faraday.

Η συνολική ενέργεια μαγνητικού πεδίου dW_m προκύπτει από το άθροισμα της στοιχειώδους αποθηκευμένης ενέργειας μαγνητικού πεδίου dE_{mag} με τις θερμικές απώλειες μαγνητικού πεδίου dE_{th-mag} .

$$dW_m = dE_{mag} + dE_{th-mag} \quad (\text{σχέση 2.23})$$

Το εσωτερικό μηχανικό έργο dW_{mech} αποτελεί τη στοιχειώδη μηχανική ενέργεια και είναι το άθροισμα του ωφέλιμου μηχανικού έργου dE_{mec} με τις μηχανικές απώλειες της συσκευής dE_{th-mec} .

$$dW_{mec} = dE_{mec} + dE_{th-mec} \quad (\text{σχέση 2.24})$$

Σύμφωνα με τις σχέσεις 2.22, 2.23 και 2.24 και τη βοήθεια του σχεδιαγράμματος στην εικόνα 2.11, η καθαρή ηλεκτρική ενέργεια dE_{el} που εισέρχεται στο σύστημα, ισούται με:

$$dE_{el} = dW_m + dW_{mec} \quad (\text{σχέση 2.25})$$

Η τάση V_L , η οποία επικρατεί στα άκρα του πηνίου (το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου), ισούται με:

$$V_L = \frac{d\lambda}{dt} \quad (\text{σχέση 2.26})$$

Όπου:

$$\text{πεπλεγμένη ροή: } \lambda = N \cdot \Phi = N \cdot \iint_S \vec{B} \cdot \vec{dS} \quad (\text{σχέση 2.27})$$

Άρα, η στοιχειώδης καθαρή ηλεκτρική ενέργεια dE_{el} (σχέση 2.22) είναι ίση με:

$$dE_{el} = \frac{d\lambda}{dt} \cdot i \cdot dt = i \cdot d\lambda \quad (\text{σχέση 2.28})$$

ενώ το στοιχειώδες εσωτερικό μηχανικό έργο dW_{mec} , που αποδίδει το μαγνητικό πεδίο της μηχανής στον οπλισμό της, ισούται με:

$$dW_{mec} = F_f \cdot dx \quad (\text{σχέση 2.29})$$

Όπου:

F_f : δύναμη, που ασκεί το μαγνητικό πεδίο στον οπλισμό.

dx : στοιχειώδης μετατόπιση του οπλισμού.

Αντικαθιστώντας τις σχέσεις 2.29 και 2.28 στη σχέση 2.25 και εκφράζοντας την εξίσωση ως προς τη στοιχειώδη συσσωρευμένη ενέργεια μαγνητικού πεδίου dW_m :

$$dW_m = dE_{el} - dW_{mec} = i \cdot d\lambda - F_f \cdot dx \quad (\text{σχέση 2.30})$$

Με βάση τον ορισμό του τέλειου διαφορικού, η σχέση 2.30 γράφεται:

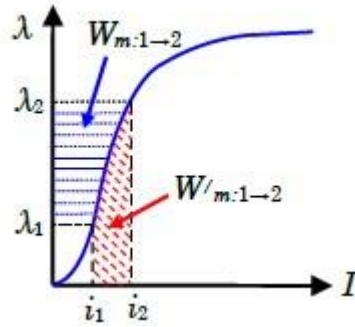
$$dW_m = \frac{\partial W_m(\lambda, x)}{\partial \lambda} \cdot d\lambda + \frac{\partial W_m(\lambda, x)}{\partial x} \cdot dx \quad (\text{σχέση 2.31})$$

Συνεπώς, εάν γίνει αντιστοιχία των μελών της σχέσης 2.31 με τη σχέση 2.30, προκύπτουν:

$$i = \frac{\partial W_m(\lambda, x)}{\partial \lambda} \quad (\text{σχέση 2.32})$$

$$F_f = -\frac{\partial W_m(\lambda, x)}{\partial x} \quad (\text{σχέση 2.33})$$

Από τις σχέσεις 2.32 και 2.33 υπολογίζονται η ένταση του ρεύματος i και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_f σε μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας. Επιπλέον, προκύπτει, ότι για σταθερή πεπλεγμένη ροή λ η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_f τείνει να μειώσει την αποθηκευμένη μαγνητική ενέργεια W_m . Παρόλο που η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι η πεπλεγμένη ροή λ , τις περισσότερες φορές είναι χρησιμότερο να γίνει έκφραση των μεγεθών σε σχέση με την ένταση του ρεύματος i . Γι' αυτόν τον λόγο θα χρησιμοποιηθεί η έννοια της συνενέργειας του πηνίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.12 παρακάτω:



Εικόνα 2.12: Ενέργεια και συνενέργεια πηνίου (χαρακτηριστική έντασης I-πεπλεγμένης ροής λ) [31].

Η συνενέργεια W'_m του πηνίου δεν έχει κάποια φυσική σημασία. Παρόλα αυτά, χρησιμοποιείται για υπολογιστικούς σκοπούς και έχει μονάδα μέτρησης ίδια με αυτή της ενέργειας. Ουσιαστικά, αποτελεί το συμπλήρωμα της ενέργειας W_m του μαγνητικού πεδίου και δίνεται από τη σχέση:

$$W'_m = i \cdot \lambda - W_m \quad (\text{σχέση 2.34})$$

Από τη σχέση 2.34 εκφράζεται η στοιχειώδης μεταβολή της συνενέργειας:

$$d W'_m = i \cdot d\lambda + \lambda \cdot di - dW_m \quad (\text{σχέση 2.35})$$

Με τον συνδυασμό των σχέσεων 2.30 και 2.35 προκύπτει:

$$d W'_m = \lambda \cdot di + F_f \cdot dx \quad (\text{σχέση 2.36})$$

Αν ληφθεί υπόψη, ότι οι ανεξάρτητες μεταβλητές στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος i και η μετατόπιση x , δηλαδή $W'_m(i, x)$, τότε η σχέση 2.36 μπορεί να εκφραστεί υπό μορφή μερικών παραγώγων και διαφορικών:

$$d W'_m = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial i} \cdot di + \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial x} \cdot dx \quad (\text{σχέση 2.37})$$

Επομένως, εάν γίνει αντιστοίχιση των όρων των σχέσεων 2.36 και 2.37, προκύπτει:

$$\lambda = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial i} \quad (\text{σχέση 2.38})$$

$$F_f = \frac{\partial W'_m(i, x)}{\partial x} \quad (\text{σχέση 2.39})$$

Από τις σχέσεις 2.38 και 2.39 υπολογίζονται η πεπλεγμένη ροή λ και η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_f σε μια συσκευή ηλεκτρομηχανικής μετατροπής της ενέργειας. Επιπλέον, προκύπτει, ότι για σταθερή ένταση ηλεκτρικού ρεύματος i η ηλεκτρομαγνητική δύναμη F_f τείνει να αυξήσει τη συνενέργεια μαγνητικού πεδίου W'_m .

Οι παραπάνω σχέσεις εκφράστηκαν λαμβάνοντας υπόψη, ότι στην ηλεκτρική μηχανή η μετατόπιση x πραγματοποιείται πάνω σε άξονα $x'x$. Δηλαδή, η κίνηση, που διαγράφει το κινητό της μέρος, είναι ευθύγραμμη (ηλεκτρονόμος - ρελέ). Όταν στη μηχανή το κινητό της μέρος εκτελεί περιστροφική κίνηση γύρω από ένα σταθερό άξονα, τότε είναι αναγκαίο οι σχέσεις να εκφραστούν με βάση τη γωνιακή θέση θ . Σύμφωνα με τα παραπάνω, το στοιχειώδες μηχανικό έργο dW_{mec} ισούται με:

$$dW_{mec} = T_f \cdot d\theta \quad (\text{σχέση 2.40})$$

Όπου:

T_f : Ηλεκτρομαγνητική ροπή.

Συνεπώς, η ενέργεια του μαγνητικού πεδίου W_m θα εκφραστεί με νέες ανεξάρτητες μεταβλητές: αυτήν της πεπλεγμένης ροής λ και της γωνίας θ δηλαδή $W_m(\lambda, \theta)$. Η ηλεκτρομαγνητική ροπή T_f υπολογίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης (παρόμοια της ανάλυσης της σχέσης 2.33) :

$$T_f = \frac{\partial W_m(\lambda, \theta)}{\partial \theta} \quad (\text{σχέση 2.41})$$

Ενώ χρησιμοποιώντας τη συνενέργεια του μαγνητικού πεδίου W'_m , ώστε η ηλεκτρομαγνητική ροπή να εκφραστεί σε συνάρτηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος i και της γωνίας θ , η ηλεκτρομαγνητική ροπή υπολογίζεται βάσει της παρακάτω σχέσης (παρόμοια της ανάλυσης της σχέσης 2.39) [31 §14.2.2]:

$$T_f = \frac{\partial W'_m(i, \theta)}{\partial \theta} \quad (\text{σχέση 2.42})$$

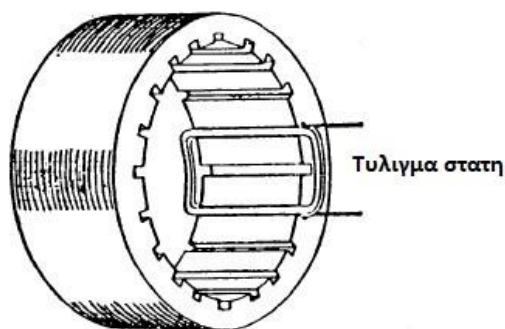
2.3.7 Βασική κατασκευαστική δομή γεννήτριας

Όπως έχει γίνει αναφορά και σε προηγούμενες ενότητες, η γεννήτρια αποτελεί τη μηχανή – συσκευή, που λαμβάνει ως ενέργεια εισόδου τη μηχανική και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική. Τη μηχανική ενέργεια εισόδου μπορεί να τη λάβει από ΜΕΚ (μηχανές εσωτερικής καύσης), από την ενέργεια του ανέμου ή ακόμα και από την ενέργεια του νερού μέσω κατάλληλων διατάξεων. Από όπου και αν

προέρχεται η μηχανική ενέργεια εισόδου, η βασική κατασκευαστική δομή της γεννήτριας παραμένει η ίδια.

Κάθε ηλεκτρική μηχανή αποτελείται από τρία βασικά μέρη: α) το ακίνητο μέρος (στάτης), β) το περιστρεφόμενο μέρος (δρομέας), γ) το διάκενο.

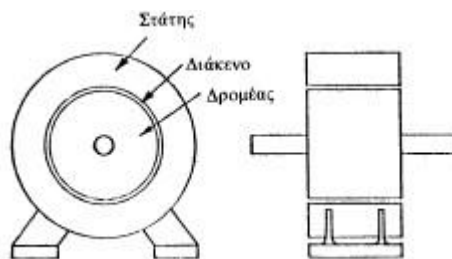
Ο στάτης της μηχανής αποτελεί το σταθερό μέρος της μηχανής. Είναι ουσιαστικά το κύριο σώμα της μηχανής, στο οποίο εδράζουν όλα τα μέρη της. Αποτελείται από το εξωτερικό κέλυφος ή αλλιώς και ζύγωμα της μηχανής, το οποίο είναι κατασκευασμένο από κράματα χυτού χάλυβα. Στο εσωτερικό του είναι τοποθετημένος ο πυρήνας του στάτη, ο οποίος είναι κατασκευασμένος από ελάσματα σιδήρου, ώστε να μειώνονται οι απώλειες μαγνητικού πεδίου, που δημιουργούνται από τα δινορεύματα. Ο πυρήνας του στάτη φέρει αυλακώσεις, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με το είδος της μηχανής και στις οποίες είναι τοποθετημένοι αγωγοί, οι οποίοι αποτελούν και το τύλιγμα του στάτη. Εξωτερικά του κελύφους του στάτη είναι τοποθετημένο ένα κυτίο, στο οποίο γίνεται η ηλεκτρική σύνδεση.



Εικόνα 2.13: Πυρήνας στάτη [34].

Ο δρομέας αποτελεί το κινητό – στρεφόμενο μέρος της μηχανής. Αποτελείται από τον άξονα, πάνω στον οποίον είναι τοποθετημένος ο πυρήνας του δρομέα. Ο πυρήνας είναι κατασκευασμένος από μονωμένα ελάσματα με αυλακώσεις, παρόμοιες με αυτές του στάτη. Εντός των αυλακώσεων είναι τοποθετημένο και σε αυτήν την περίπτωση τυλίγματα, τα οποία διαφέρουν κατασκευαστικά ανάλογα με το είδος της μηχανής.

Η μηχανική σύνδεση μεταξύ δρομέα και στάτη γίνεται με ρουλεμάν, τα οποία επιτρέπουν την ελεύθερη περιστροφή του δρομέα στο εσωτερικό μέρος του στάτη, χωρίς να έρχονται σε επαφή. Ουσιαστικά, μεταξύ στάτη και δρομέα υπάρχει ένα μικρό κενό αέρος, το οποίο ονομάζεται διάκενο της μηχανής. Το κενό αυτό είναι υπεύθυνο για τη διάδοση του μαγνητικού πεδίου μεταξύ του στάτη και του δρομέα, καθώς επίσης και για τη ροή αέρα, που είναι απαραίτητη για την ψύξη της μηχανής.



Εικόνα 2.14: Σχηματική απεικόνιση ηλεκτρικής μηχανής [34].

Τα τυλίγματα της μηχανής χαρακτηρίζονται ανάλογα με τη λειτουργία τους. Το τύλιγμα, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου της μηχανής, ονομάζεται τύλιγμα διέγερσης ή τύλιγμα πεδίου. Το τύλιγμα, που είναι υπεύθυνο για την ανάπτυξη τάσης στα άκρα του (γεννήτρια) ή ανάπτυξη ροπής (κινητήρας), ονομάζεται τύλιγμα τύμπανου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα τύμπανου διαρρέεται με ρεύμα μεγαλύτερης έντασης από αυτό του τυλίγματος διέγερσης. Γι' αυτό το λόγο, το τύλιγμα τύμπανου αποτελείται από αγωγούς μεγαλύτερης διατομής από αυτά του τυλίγματος διέγερσης. Ανάλογα με τον κατασκευαστή και το μέγεθος της μηχανής, το τύλιγμα τύμπανου μπορεί να τοποθετηθεί είτε στο στάτη είτε, στο δρομέα.

Το τύλιγμα διέγερσης είναι τοποθετημένο με τέτοιο τρόπο στις αυλακώσεις, ώστε να δημιουργούνται ζεύγη μαγνητικών πόλων. Ο αριθμός των πόλων είναι πάντα ζυγός (βόρειος - νότιος) και εξαρτάται από τη φορά του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει το τύλιγμα (κανόνας του δεξιού χεριού). Παρόλα αυτά, ο τρόπος διάταξης των πόλων στο χώρο εξαρτάται από το είδος της μηχανής.

2.3.8 Είδη γεννητριών

Μετά την είδηση των πειραμάτων του Faraday, αρκετοί εφευρέτες και επιστήμονες της εποχής προσπάθησαν να παράξουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω μηχανών, που βασίζονταν στη μαγνητική επαγωγή. Ο M. H. Pixii το 1832 στη Γαλλία κατασκεύασε την πρώτη περιστροφική ηλεκτρογεννήτρια συνεχούς ρεύματος, η οποία για την παραγωγή μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιούσε μόνιμους μαγνήτες. Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, μετά την πρωτοεμφάνιση του εναλλασσόμενου ρεύματος, ο Walter Bailey απέδειξε, ότι μπορεί να υπάρξει περιστροφή μαγνητικού πεδίου χωρίς τη χρήση περιστρεφόμενου τμήματος μηχανής. Το παραπάνω φαινόμενο το εκμεταλλεύτηκε ο Nikola Tesla το 1888 για την ανάπτυξη μηχανών εναλλασσόμενου ρεύματος (μηχανές επαγωγής). Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η κυριαρχία του εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν μονόδρομος, καθώς οι αναπτυσσόμενες AC μηχανές ήταν αποδοτικότερες από αυτές του συνεχούς. Χαρακτηριστικό αποτελεί το γεγονός, ότι πριν το 1940 ακόμα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γινόταν με χρήση εναλλασσόμενου ρεύματος. Η παραγωγή συνεχούς ρεύματος περιορίστηκε σε ειδικές εφαρμογές, όπως είναι τα αυτοκίνητα και μικρά αεροσκάφη. Σήμερα υπάρχει ανάγκη και για

παραγωγή εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος ανάλογα με τις ανάγκες. Τα κύρια είδη των γεννητριών, που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι τα παρακάτω:

- **Σύγχρονες γεννήτριες**, οι οποίες είναι ευρέως διαδεδομένες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (εργοστάσια παραγωγής, Η/Ζ, αεροσκάφη). Χαρακτηριστικό αυτών των μηχανών είναι, ότι το τύλιγμα διέγερσης τους τροφοδοτείται με συνεχή τάση.
- **Ασύγχρονες γεννήτριες**, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις (ανεμογεννήτριες). Χαρακτηριστικό των συγκεκριμένων μηχανών είναι, ότι δεν διαθέτουν τύλιγμα διέγερσης γι' αυτό τον λόγο ονομάζονται και επαγωγικές γεννήτριες.
- **Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος**, οι οποίες χρησιμοποιούνται σε ειδικές εφαρμογές (αυτοκίνητα, μικρά αεροσκάφη). Οι γεννήτριες αυτές στο εσωτερικό τους παράγουν μια μεταβαλλόμενη τάση. Η ανόρθωση τους σε συνεχές γίνεται μέσω ενός μηχανικού ανορθωτή, του συλλέκτη. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος έχουν αρκετές υποκατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του τυλίγματος διέγερσης. Οι υποκατηγορίες ονομαστικά είναι:
 - Γεννήτριες ΣΡ ξένης διέγερσης
 - Γεννήτριες ΣΡ παράλληλης διέγερσης
 - Γεννήτριες ΣΡ διέγερσης σειράς
 - Γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης
 - Γεννήτριες ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης

2.4 Παραγωγή AC

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα υπήρξε μια αμφισβήτηση για την πρωτοκαθεδρία του συνεχούς ρεύματος. Υποστηρικτές του εναλλασσόμενου ρεύματος προσπάθησαν να πείσουν την επιστημονική κοινότητα γι' αυτή τους την πεποίθηση με την τροφοδότηση των πρώτων λαμπτήρων πυράκτωσης με εναλλασσόμενο ρεύμα. Παρόλα αυτά, το συνεχές ρεύμα άντεξε αυτήν την αμφισβήτηση για κάποια χρόνια. Οι λόγοι ήταν, ότι το συνεχές ρεύμα ήταν εύκολο στην αποθήκευσή του από συσσωρευτές της εποχής και η άμεση χρησιμοποίησή του σε περίπτωση βλάβης των γεννητριών. Αυτό διήρκησε έως ότου κάνουν την εμφάνισή τους δύο εφευρέσεις, αυτή του μετασχηματιστή (1891 W. M Mordey – ανακάλυψη Μ/Σ με τη σημερινή του μορφή) και αυτή του επαγωγικού κινητήρα (1888 Nikola Tesla). Στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, το εναλλασσόμενο ρεύμα είχε κυριαρχήσει, κυρίως λόγω του εύκολου μετασχηματισμού του και της μεταφοράς του σε μακρινές αποστάσεις χωρίς μεγάλες απώλειες, καθώς επίσης και της αδυναμίας κατασκευής μηχανών συνεχούς ρεύματος μεγάλης ισχύος. Για τους παραπάνω λόγους, η ανάπτυξη γεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος ήταν αναγκαία.

2.4.1 Σύγχρονη γεννήτρια

Η σύγχρονη γεννήτρια είναι η πιο διαδεδομένη και ευρέως χρησιμοποιούμενη μηχανή για την παραγωγή εναλλασσόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Κύριο χαρακτηριστικό της είναι ότι η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας γίνεται υπό συγκεκριμένη ταχύτητα περιστροφής, τη σύγχρονη ταχύτητα, η οποία είναι ανάλογη με τη συχνότητα των επαγόμενων ρευμάτων και τάσεων του επαγωγικού τυμπάνου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου είναι τριφασικό και κατανεμημένο εντός αυλακώσεων στο στάτη της μηχανής. Το τύλιγμα διεγέρσεως είναι τοποθετημένο στο δρομέα της μηχανής και τροφοδοτείται με συνεχές ρεύμα μέσω ενός συστήματος δακτυλίων. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και σύγχρονες γεννήτριες, στις οποίες έχει αναπτυχθεί μια τεχνική, στην οποία η τροφοδότηση με συνεχή τάση του τυλίγματος διέγερσης γίνεται μέσω επαγωγής αντικαθιστώντας έτσι τις ψήκτρες (blushless). Οι σύγχρονες γεννήτριες κατασκευάζονται σε διάφορα μεγέθη ανάλογα με την εφαρμογή και την παραγόμενη ισχύ, η οποία ξεκινά από μερικά kW έως αρκετά MW σε σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

2.4.1.1 Αρχή λειτουργίας σύγχρονης γεννήτριας

Μια εξωτερική κινητήρια μηχανή περιστρέφει τον δρομέα της σύγχρονης γεννήτριας, στον οποίο είναι τοποθετημένο το τύλιγμα διέγερσης. Απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία της σύγχρονης μηχανής είναι η τροφοδότηση του τυλίγματος διέγερσης με συνεχή τάση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη ενός κύματος μαγνητεγερτικής δύναμης (ΜΕΔ), όπου η μέγιστη τιμή δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$F = \frac{4}{\pi} \cdot k_r \cdot \frac{N_r}{P} \cdot I_f \quad (\text{σχέση 2.43})$$

Όπου:

k_r : συντελεστής τυλίγματος

N_r : συνολικός αριθμός ελιγμάτων σε σειρά

P: αριθμός των πόλων

I_f : ένταση ρεύματος διέγερσης δρομέα

Η μαγνητική ροή κάθε πόλου, που οφείλεται στο ρεύμα διέγερσης, δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\Phi_f = \frac{4 \cdot \ell \cdot r}{P} \cdot B_f = \frac{4 \cdot \ell \cdot r}{P} \cdot \mu_0 \cdot \frac{F}{g} \quad (\text{σχέση 2.44})$$

Όπου:

r : μέση ακτίνα διάκενου

ℓ : αξονικό μήκος μηχανής

B_f : μέγιστη τιμή μαγνητικής επαγωγής

μ_0 : μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$)

g : μήκος διάκενου

Το κύμα ΜΕΔ περιστρέφεται με την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα, δημιουργώντας έτσι ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη τάσης από επαγωγή στο τύλιγμα του στάτη, σύμφωνα με το νόμο του Faraday. Η αναπτυσσόμενη ΗΕΔ στο τύλιγμα τυμπάνου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E_f = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot K_w \cdot N_\phi \cdot \Phi_f \quad (\text{σχέση 2.45})$$

Όπου:

f : συχνότητα επαγόμενης τάσης (Hz)

K_w : συντελεστής τυλίγματος στάτη

N_ϕ : αριθμός ελιγμάτων σε σειρά ανά φάση

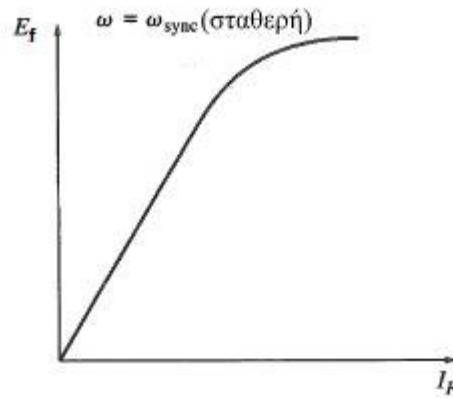
Η συχνότητα της επαγόμενης εναλλασσόμενης τάσης δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$f = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad (\text{σχέση 2.46})$$

Όπου:

n_m : ταχύτητα περιστροφής μαγνητικού πεδίου – ταχύτητα περιστροφής δρομέα στις σύγχρονες μηχανές (RPM)

Από τις σχέσεις 2.45 και 2.46 προκύπτει, ότι η παραγόμενη ΗΕΔ στο τύλιγμα τυμπάνου εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του δρομέα και τη μαγνητική ροή των πόλων. Η μαγνητική ροή, όμως, εξαρτάται από το ρεύμα διέγερσης μέσω των σχέσεων 2.44 και 2.45. Η εικόνα 2.15 δείχνει τη χαρακτηριστική της επαγόμενης ΗΕΔ σε σχέση με το ρεύμα διέγερσης.



Εικόνα 2.15: Χαρακτηριστική μαγνήτισης σύγχρονης γεννήτριας [4].

Όταν στα άκρα του τυλίγματος τυμπάνου συνδεθεί κάποιο φορτίο, τότε λόγω της επαγόμενης ΗΕΔ κυκλοφορεί ένα ρεύμα I_α . Το ρεύμα αυτό, το οποίο ρέει στο τύλιγμα τυμπάνου, είναι υπεύθυνο για την παραγωγή ενός καινούριου κύματος ΜΕΔ, όπου η μέγιστη τιμή του δίνεται από τον τύπο:

$$F_s = \frac{3}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot K_w \cdot \frac{N_\phi}{P} \cdot \sqrt{2} \cdot I_\alpha \quad (\text{σχέση 2.47})$$

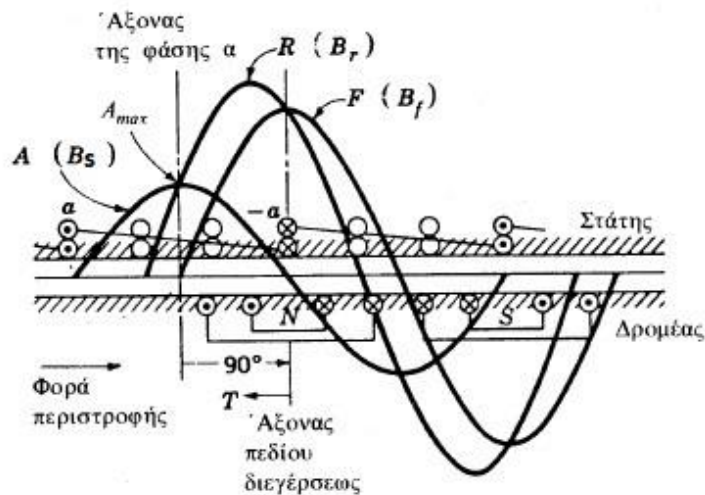
Η μαγνητική ροή, η οποία οφείλεται στο κύμα ΜΕΔ του στάτη δίνεται από τον τύπο:

$$\Phi_s = \frac{4 \cdot \ell \cdot r}{P} \cdot B_s = \frac{4 \cdot \ell \cdot r}{P} \cdot \mu_0 \cdot \frac{F_s}{g} \quad (\text{σχέση 2.48})$$

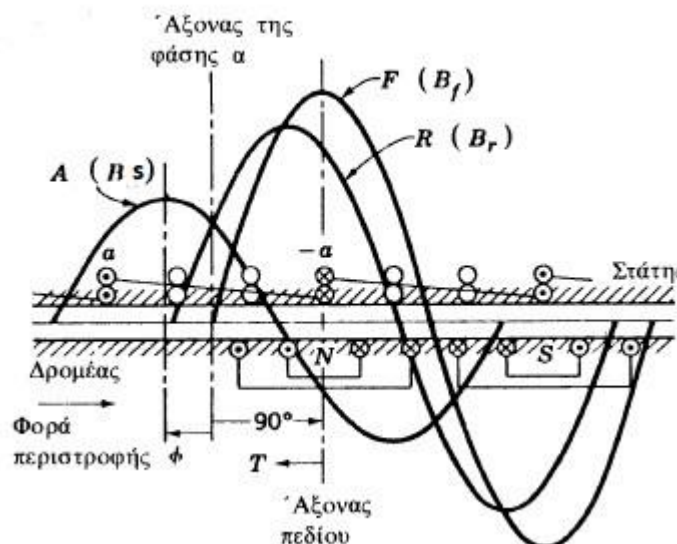
Όπου:

B_s : μέγιστη μαγνητική επαγωγή στάτη

Το νέο αυτό κύμα ΜΕΔ περιστρέφεται με τη συχνότητα του ρεύματος τυμπάνου I_α . Τα δύο αυτά κύματα ΜΕΔ (δρομέα και στάτη) έχουν μόνιμα μια διαφορά γωνίας κατά την περιστροφή τους και πάντα στη σύγχρονη γεννήτρια προπορεύεται αυτό του δρομέα. Το μέγεθος της διαφοράς αυτής εξαρτάται από τη συμπεριφορά, που παρουσιάζει το φορτίο (ωμικό, επαγωγικό, χωρητικό).



Εικόνα 2.16: Κύματα ΜΕΔ για συμφασικό ρεύμα τυμπάνου – τάση διεγέρσεως [34].



Εικόνα 2.17: Κύματα ΜΕΔ για διαφορά φάσεως φ μεταξύ ρεύματος τυμπάνου – τάσης διεγέρσεως [34].

Το κύμα ΜΕΔ του τυμπάνου, αφού κινείται στο διάκενο της μηχανής, επάγει και αυτό μια ΗΕΔ στο ίδιο το τύλιγμα του τυμπάνου και δίνεται από τον τύπο:

$$E_a = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot K_w \cdot N_\phi \cdot \Phi_s \quad (\text{σχέση 2.49})$$

Αν γίνει αντικατάσταση στη σχέση 2.49 του όρου της μαγνητικής ροής Φ_s με τη σχέση 2.48 και στη συνέχεια ο όρος του κύματος ΜΕΔ F_s με τη σχέση 2.47, η επαγόμενη ΗΕΔ E_a , που ονομάζεται ηλεκτρεγερτική δύναμη αντιδράσεως του τυμπάνου, παίρνει τη μορφή:

$$E_{\alpha} = \omega \cdot \left[\frac{24}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \left(\frac{K_w \cdot N_{\Phi}}{P} \right)^2 \right] \cdot I_{\alpha} \quad (\text{σχέση 2.50})$$

Από το νόμο του Ohm προκύπτει, ότι :

$$E_{\alpha} = X_{\varphi} \cdot I_{\alpha} \quad (\text{σχέση 2.50})$$

Όπου X_{φ} ονομάζεται μαγνητίζουσα αντίδραση ή αντίδραση τυμπάνου ή αντίδραση σπλισμού ανά φάση και ισούται:

$$X_{\varphi} = \frac{3}{2} \cdot \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot K_w \cdot \frac{N_{\Phi}}{P} \right)^2 \cdot \omega \quad (\text{σχέση 2.51})$$

Απλοποιώντας τη σχέση 2.51, η αντίδραση τυμπάνου ανά φάση μπορεί να γραφτεί και ως:

$$X_{\varphi} = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot L_{SS} \quad (\text{σχέση 2.52})$$

Όπου L_{SS} είναι η αυτεπαγωγή του πηνίου του στάτη κάθε φάσης και ισούται:

$$L_{SS} = \frac{\mu_0 \cdot \ell \cdot r}{g} \cdot \left(\frac{4}{\pi} \cdot K_w \cdot \frac{N_{\Phi}}{P} \right)^2 \quad (\text{σχέση 2.53})$$

2.4.1.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας

Σε μια σύγχρονη γεννήτρια η επαγόμενη τάση E_f , η οποία δημιουργείται από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του δρομέα, σπάνια εμφανίζεται στα άκρα της γεννήτριας. Παρόλα αυτά, εμφανίζεται μια διαφορετική τάση V_{φ} , η οποία είναι συνήθως μικρότερη σε τιμή από την E_f , όταν το τυλίγμα του τυμπάνου διαρρέεται από ρεύμα I_{α} . Η επαγόμενη τάση E_f είναι ίση με την τάση στα άκρα της γεννήτριας V_{φ} μόνο, όταν το πηνίο του επαγωγικού τυμπάνου δε διαρρέεται από ρεύμα. Οι λόγοι διαφοροποίησης των δυο αυτών τάσεων είναι οι εξής:

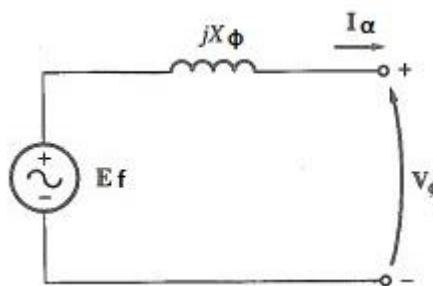
- Οι αυτεπαγωγές του πηνίου του στάτη
- Οι αντιστάσεις του πηνίου του στάτη (προέρχονται από την ειδική αντίσταση των μετάλλων)
- Παραμόρφωση του μαγνητικού πεδίου στο διάκενό της μηχανής, που προκαλείται από το ρεύμα του στάτη (αντίδραση σπλισμού)
- Το σχήμα των πόλων του δρομέα

Πιο αναλυτικά, όταν στα άκρα της γεννήτριας συνδεθεί ένα φορτίο, τότε το ρεύμα τυμπάνου I_{α} ρέει στα τυλίγματα της μηχανής. Το ρεύμα αυτό, όπως διατυπώθηκε στις σχέσεις 2.47 έως 2.49, παράγει

και αυτό ένα κύμα ΜΕΔ F_s , το οποίο αλλοιώνει το κύμα ΜΕΔ F , που δημιουργήθηκε από το ρεύμα διέγερσης. Αυτό έχει ως συνέπεια να αλλοιώνεται παράλληλα και η διαφορά δυναμικού, που επικρατεί στα άκρα του πηνίου του τυμπάνου. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση οπλισμού. Συνεπώς, η τάση V_ϕ προκύπτει από το διανυσματικό άθροισμα των ΜΕΔ του στάτη και του δρομέα και στις εικόνες 2.16 και 2.17 συμβολίζεται με B_r . Η \vec{V}_ϕ δίνεται από τον τύπο:

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_f - jX_\phi \cdot \vec{I}_\alpha \quad (\text{σχέση 2.54})$$

Το ισοδύναμο κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου μιας σύγχρονης γεννήτριας δίνεται από την παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 2.18: Ισοδύναμο κύκλωμα επαγωγικού τυμπάνου σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα [4].

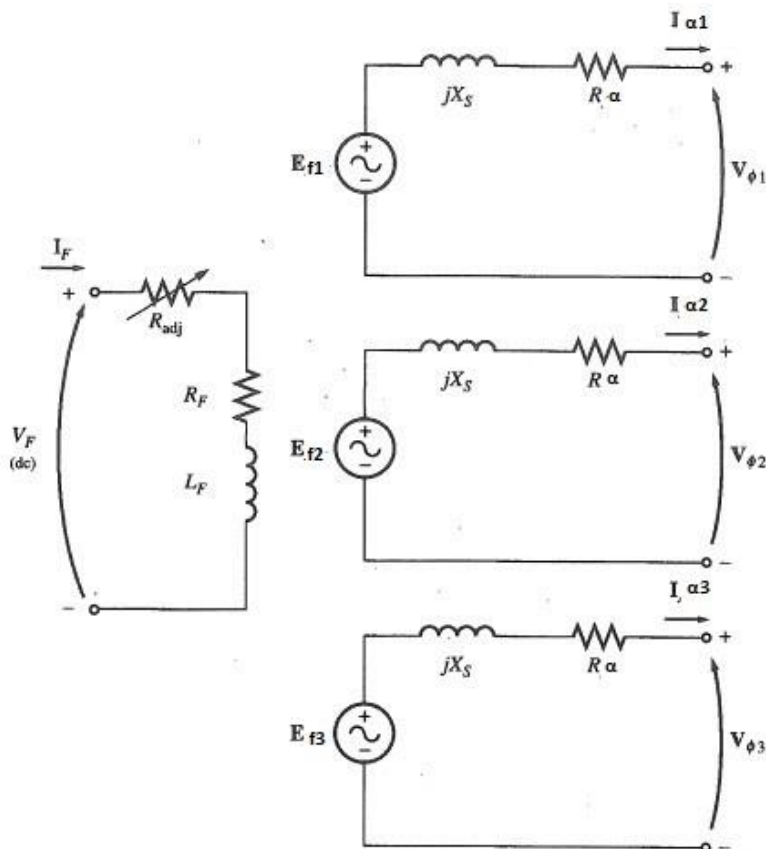
Μια σύγχρονη γεννήτρια, όμως, λόγω του πηνίου του τυμπάνου παρουσιάζει και επαγωγική αντίδραση X_a , αλλά και ωμική αντίσταση R_a λόγω της ειδικής αντίστασης του αγωγού του πηνίου. Άρα, η σχέση 2.54 ξαναδιατυπώνεται ως εξής :

$$\vec{V}_\phi = \vec{E}_f - jX_\phi \cdot \vec{I}_\alpha - jX_a \cdot \vec{I}_\alpha - R_a \cdot \vec{I}_\alpha \quad (\text{σχέση 2.55})$$

Επειδή η επαγωγική αντίδραση του πηνίου και η αντίδραση οπλισμού εκφράζονται με επαγωγές, τότε αυτές μπορούν να συνδυαστούν και να εκφραστούν ως σύγχρονη αντίδραση (synchronous reactance):

$$X_s = X_\phi + X_a \quad (\text{σχέση 2.56})$$

Τελικά, το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας, το οποίο συμπεριλαμβάνει τόσο το κύκλωμα διέγερσης, όσο και το κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου, δίνεται από την εικόνα παρακάτω:



Εικόνα 2.19: Ισοδύναμο κύκλωμα τριών φάσεων σύγχρονης γεννήτριας [4].

2.4.1.3 Ισχύς και ροπή σύγχρονης γεννήτριας

Μια σύγχρονη γεννήτρια απαιτεί το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο να περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Συνεπώς, η παρεχόμενη κινητική ενέργεια στον δρομέα της πρέπει να παραμένει σταθερή με κάθε μεταβολή του φορτίου, το οποίο είναι συνδεδεμένο στα άκρα της. Η μηχανική ισχύς εισόδου στον άξονα της γεννήτριας υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$P_{in} = \tau_{app} \cdot \omega_m \quad (\text{σχέση 2.57})$$

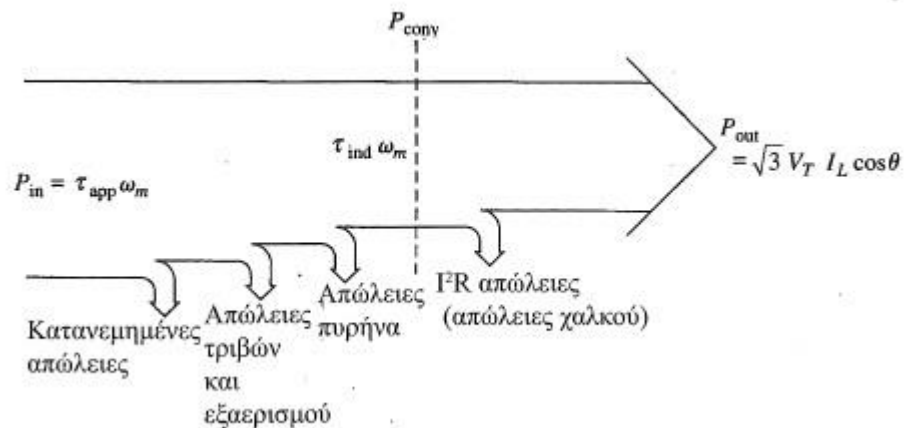
Όπου, τ_{app} η ροπή στον άξονα της γεννήτριας και ω_m η γωνιακή ταχύτητα του άξονα της γεννήτριας.

Ενώ, η ισχύς, που τελικά μετατρέπεται σε ηλεκτρική, ισούται με:

$$P_{conv} = \tau_{ind} \cdot \omega_m = E_f \cdot I_a \cdot \cos\gamma \quad (\text{σχέση 2.58})$$

Όπου, γ η γωνία μεταξύ E_f και I_a .

Το διάγραμμα ροής ισχύος της σύγχρονης γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 2.20.



Εικόνα 2.20: Ροή ισχύος σύγχρονης γεννήτριας [4].

Η παραγόμενη ενεργός ισχύς στην έξοδο της γεννήτριας προκύπτει από το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 2.19 και ισούται:

$$P_{out} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_{\alpha} \cdot \cos \theta \quad (\text{σχέση 2.59})$$

Όπου, θ η διαφορά φάσης μεταξύ V_{ϕ} και I_{α} .

Η σχέση 2.59 εκφράζει την παραγομένη ενεργό ισχύ σε φασικά μεγέθη, ενώ η παραγομένη ενεργός ισχύς σε πολικά μεγέθη δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \cos \theta \quad (\text{σχέση 2.60})$$

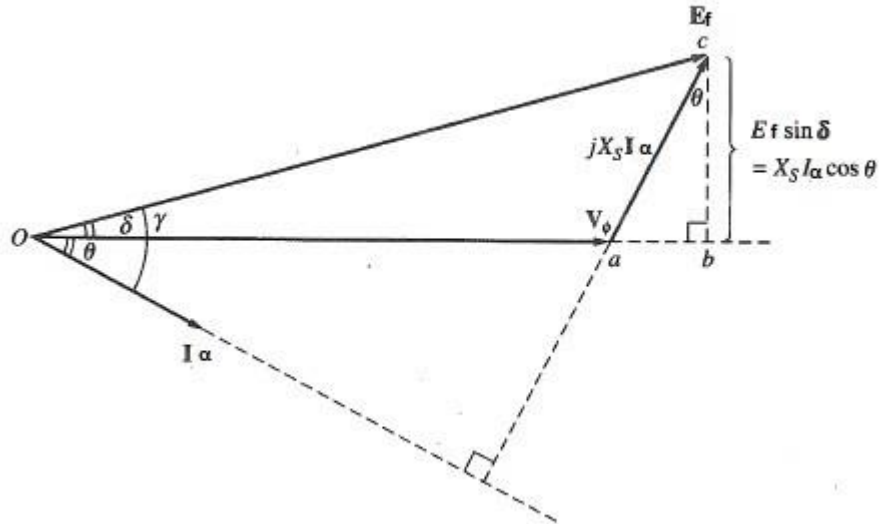
Όπου, V_T είναι η πολική τάση της μηχανής και I_L το ρεύμα του φορτίου

Ενώ, η άεργος ισχύς με φασικά και πολικά μεγέθη ισούται:

$$Q_{out} = 3 \cdot V_{\phi} \cdot I_{\alpha} \cdot \sin \theta \quad (\text{σχέση 2.61})$$

$$Q_{out} = \sqrt{3} \cdot V_T \cdot I_L \cdot \sin \theta \quad (\text{σχέση 2.62})$$

Επειδή η ωμική αντίσταση R_a είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη σύγχρονη αντίδραση X_s της γεννήτριας, μπορεί να αμεληθεί και το διανυσματικό διάγραμμα να πάρει τη μορφή, όπως φαίνεται παρακάτω:



Εικόνα 2.21: Διανυσματικό διάγραμμα τάσης – έντασης σύγχρονης γεννήτριας κυλινδρικού δρομέα με $R_e \neq 0$ (απλοποιημένο) [4].

Από το διανυσματικό διάγραμμα προκύπτει ότι:

$$I_\alpha \cdot \cos \theta = \frac{E_\alpha \cdot \sin \delta}{X_s} \quad (\text{σχέση 2.63})$$

Αν η παραπάνω σχέση αντικατασταθεί στη σχέση 2.59, τότε προκύπτει:

$$P = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_\alpha \cdot \sin \delta}{X_s} \quad (\text{σχέση 2.64})$$

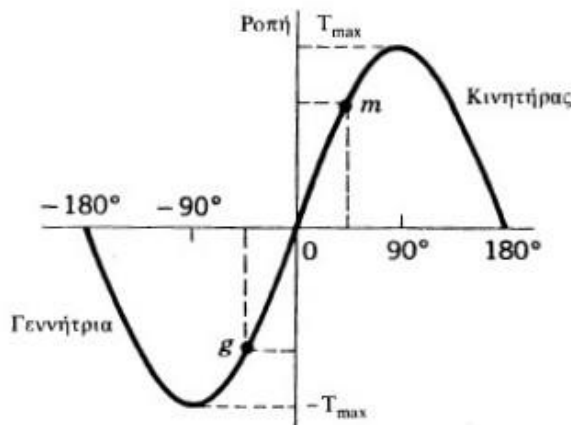
Η σχέση 2.64 είναι πολύ σημαντική για τη λειτουργία της σύγχρονης γεννήτριας, διότι μέσω αυτής υπολογίζεται η μέγιστη τιμή ισχύος, που είναι ικανή να προσφέρει. Η μέγιστη ισχύς προκύπτει, όταν η γωνία $\delta = 90^\circ$. Η μέγιστη αυτή ισχύς ονομάζεται όριο στατικής ευστάθειας της γεννήτριας και η γωνία δ ονομάζεται γωνία ροπής.

$$P_{max} = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_\alpha}{X_s} \quad (\text{σχέση 2.65})$$

Επιπλέον, άλλη μια εξίσου σημαντική σχέση μιας σύγχρονης γεννήτριας είναι η μέγιστη ροπή, η οποία μπορεί να εφαρμοστεί στη γεννήτρια και υπολογίζεται με το συνδυασμό των σχέσεων 2.58 και 2.64 για $\delta = 90^\circ$.

$$T_{ind max} = \frac{3 \cdot V_\phi \cdot E_\alpha}{X_s \cdot \omega_m} \quad (\text{σχέση 2.66})$$

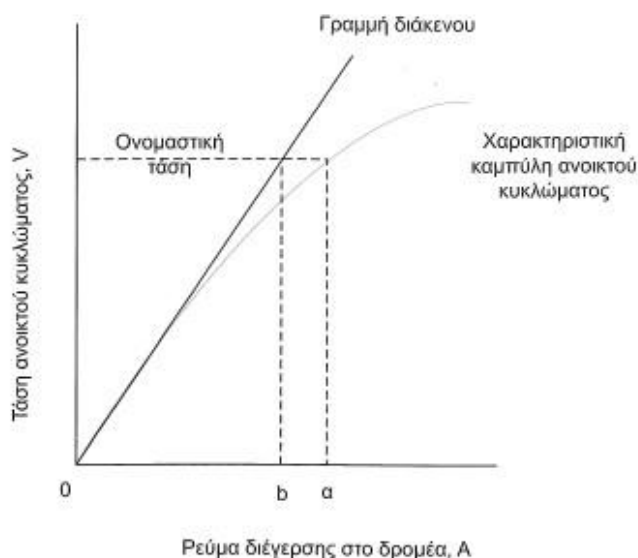
Κατά τη διάρκεια λειτουργίας μιας σύγχρονης γεννήτριας, εάν συνδεθεί φορτίο ισχύος μεγαλύτερο από τη μέγιστη ισχύ, που μπορεί να προσφέρει η γεννήτρια, τότε η μηχανή οδηγείται σε αποσυγχρονισμό. Το ίδιο συμβαίνει και, αν η κινητήρια μηχανή προσφέρει μεγαλύτερη ροπή από την αντίστοιχη μέγιστη ροπή, που μπορεί να λάβει η γεννήτρια.



Εικόνα 2.22: Χαρακτηριστική γωνίας – ροπής σύγχρονων μηχανών [34].

2.4.1.4 Λειτουργία χωρίς φορτίο

Κατά τη λειτουργία μιας σύγχρονης γεννήτριας χωρίς φορτίο μπορούν να αντληθούν πολλές χρήσιμες πληροφορίες για διάφορα χαρακτηριστικά μεγέθη. Αρχικά, με τον όρο λειτουργία χωρίς φορτίο εννοείται, ότι στα άκρα της γεννήτριας δε συνδέεται κάποια ηλεκτρική κατανάλωση και, συνεπώς, δε ρέει ρεύμα I_α στα τυλίγματα του τυμπάνου (ανοιχτοκυκλωμένο). Μια πηγή κινητικής ενέργειας συνδέεται στον άξονα της γεννήτριας, η οποία τον περιστρέφει με τις ονομαστικές του στροφές. Το κύκλωμα διέγερσης της γεννήτριας συνδέεται με μια πηγή συνεχούς τάσης, στην οποία είναι εφικτός ο έλεγχος του ρεύματος διέγερσης I_f . Το ρεύμα διέγερσης μεταβάλλεται αυξητικά, έως ότου η επαγόμενη τάση E_f να λάβει την ονομαστική της τιμή. Μέσω της διαδικασίας αυτής, δημιουργείται η χαρακτηριστική εξάρτησης της επαγόμενης τάσης E_f και του ρεύματος διέγερσης I_f , όπως φαίνεται στην εικόνα 2.23. Καθώς αυξάνεται το ρεύμα διέγερσης I_f , αυξάνεται και η E_f αρχικά γραμμικά. Αυτή η γραμμικότητα για μικρό ρεύμα διέγερσης προκύπτει, διότι η μαγνητική αντίσταση των μεταλλικών μερών της μηχανής είναι ακόμα μικρή. Καθώς το ρεύμα διέγερσης συνεχίζει και αυξάνεται, η επαγόμενη τάση δεν αυξάνεται γραμμικά. Αυτό οφείλεται στον κορεσμό, στον οποίο εισέρχονται τα μεταλλικά μέρη της μηχανής. Στο διάγραμμα της εικόνας 2.23, διακρίνονται δύο χαρακτηριστικές: αυτής της γραμμής διάκενου και αυτής του ανοιχτού κυκλώματος. Η πρώτη αναφέρεται στην ιδανική μηχανή, η οποία δεν παρουσιάζει κορεσμό, ενώ η δεύτερη σε πραγματική μηχανή, η οποία παρουσιάζει μεταβαλλόμενη μαγνητική αντίσταση λόγω κορεσμού.



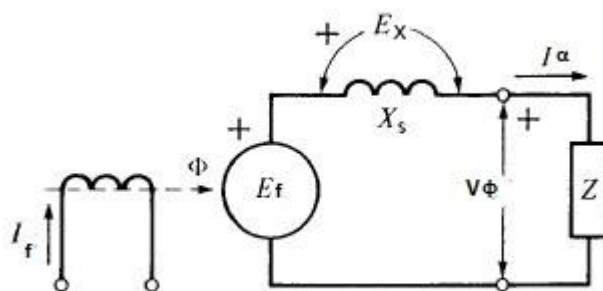
Εικόνα 2.23: Χαρακτηριστική καμπύλη $E_f - I_f$ ανοικτού κυκλώματος [7].

Στην εν κενώ λειτουργία μπορούν να προσδιοριστούν οι μηχανικές απώλειες, οι οποίες προέρχονται από τις διάφορες τριβές στα σημεία έδρασης της μηχανής και από τις τριβές, οι οποίες προέρχονται από την αντίσταση του αέρα (περυγία αερισμού). Οι μηχανικές αυτές απώλειες είναι σταθερές για περιστροφή με τον ονομαστικό αριθμό στροφών. Οι μηχανικές απώλειες υπολογίζονται, όταν η γεννήτρια περιστρέφεται με τις ονομαστικές της στροφές και με μηδενικό ρεύμα διέγερσης.

Επιπλέον, με γνωστές τις μηχανικές απώλειες στην εν κενώ λειτουργία είναι εφικτό να υπολογιστούν οι απώλειες, οι οποίες προέρχονται από τη μεταβολή της μαγνητικής ροής εντός της μηχανής. Οι απώλειες αυτές εξαρτώνται άμεσα από το ρεύμα διέγερσης και καλούνται απώλειες σιδήρου. Οι απώλειες σιδήρου χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τις απώλειες δινορευμάτων και τις απώλειες υστέρησης. Οι δύο κατηγορίες απωλειών εμφανίζονται υπό μορφή θερμότητας.

2.4.1.5 Λειτουργία υπό φορτίο – καμπύλη διεγέρσεως

Η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί υπό φορτίο, όταν στα άκρα της συνδεθεί ηλεκτρικό φορτίο και στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου αρχίσει να ρέει ρεύμα I_a . Η συμπεριφορά της γεννήτριας εξαρτάται από το είδος του φορτίου, που τροφοδοτεί (ωμικό, επαγωγικό, χωρητικό). Στην εικόνα 2.14 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης για λειτουργία υπό φορτίο.

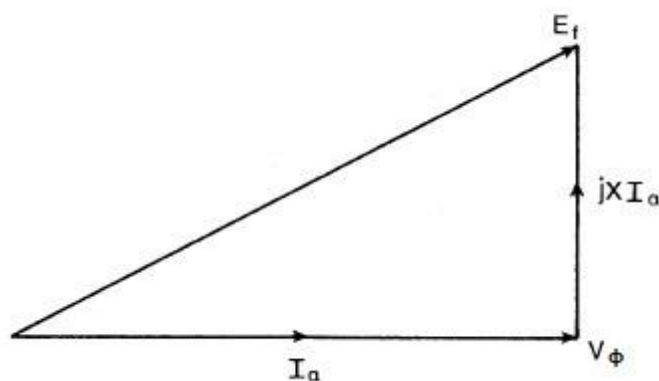


Εικόνα 2.24: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονης γεννήτριας υπό φορτίο [13].

Όταν μια γεννήτρια τροφοδοτεί ένα φορτίο, το οποίο μεταβάλλεται με σταθερό συντελεστή ισχύος, είναι αναγκαίο η τάση V_ϕ να παραμένει σταθερή. Για να επιτύχει αυτό είναι απαραίτητο να μεταβληθεί το ρεύμα διέγερσης I_f . Η καμπύλη, που περιγράφει αυτήν τη μεταβολή, ονομάζεται χαρακτηριστική διεγέρσεως.

- Μοναδιαίος συντελεστής ισχύος

Όταν το φορτίο, που θα συνδεθεί στη θέση του Z στην εικόνα 2.24, οδηγήσει το συνολικό κύκλωμα (συμπεριλαμβανομένου της X_s) σε μοναδιαίο συντελεστή ισχύος (ρεύμα τυμπάνου I_a συμφασικό με τάση V_ϕ), τότε το διανυσματικό διάγραμμα θα λάβει τη μορφή της εικόνας 2.25.



Εικόνα 2.25: Διανυσματικό διάγραμμα για $\Sigma.I = 1$ [34].

Εφαρμόζοντας το πυθαγόρειο θεώρημα στο διάγραμμα, προκύπτει:

$$E_f^2 = V_\phi^2 + (X_s \cdot I_a)^2 \quad (\text{σχέση 2.67})$$

Η τάση διεγέρσεως E_f της σύγχρονης μηχανής είναι ανάλογη του κύματος ΜΕΔ F και, συνεπώς, και του ρεύματος διέγερσης I_f , σύμφωνα με τις σχέσεις 2.43 έως 2.45. Έστω I_{f0} το ρεύμα διέγερσης

και E_{f0} η επαγόμενη τάση για τη λειτουργία εν κενώ, θα ισχύει η σχέση 2.68 εφόσον βρίσκεται στο γραμμικό τμήμα της χαρακτηριστικής $E_f - I_f$.

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \frac{E_f}{E_{f0}} \quad (\text{σχέση 2.68})$$

Στην εν κενώ λειτουργία το ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου είναι μηδενικό ($I_\alpha = 0$). Συνεπώς, η τάση E_f είναι ίση με την τάση V_ϕ στα άκρα της γεννήτριας. Άρα, η σχέση 2.68 μπορεί να γραφτεί ως:

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \frac{E_f}{V_\phi} \quad (\text{σχέση 2.69})$$

Διαιρώντας τη σχέση 2.67 με V_ϕ^2 και αντικαθιστώντας από τη σχέση 2.69, προκύπτει η καμπύλη διεγέρσεως για μοναδιαίο συντελεστή φόρτισης.

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_\alpha}{I_{\alpha0}}\right)^2} \quad (\text{σχέση 2.70})$$

όπου

$$I_{\alpha0} = \frac{V_\phi}{X_s} \quad (\text{σχέση 2.71})$$

- Επαγωγική φόρτιση

Όταν το φορτίο, που θα συνδεθεί στη θέση του Z στην εικόνα 2.24, οδηγήσει το συνολικό κύκλωμα σε επαγωγική συμπεριφορά (ρεύμα τυμπάνου I_α έπεται της τάσης V_ϕ), το διανυσματικό διάγραμμα θα λάβει τη μορφή της εικόνας 2.21. Εάν εφαρμοστεί ο κανόνας του συνημίτονου στο τρίγωνο Oac, προκύπτει:

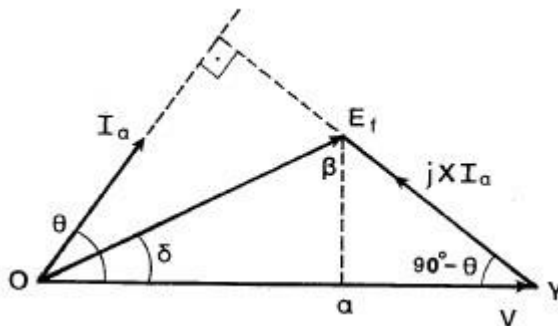
$$E_f^2 = V_\phi^2 + (X_s \cdot I_\alpha)^2 + 2 \cdot V_\phi \cdot X_s \cdot I_\alpha \cdot \sin \theta \quad (\text{σχέση 2.72})$$

Διαιρώντας τη σχέση 2.72 με το V_ϕ^2 και αντικαθιστώντας από τη σχέση 2.69, προκύπτει:

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_\alpha}{I_{\alpha0}}\right)^2 + \frac{2 \cdot I_\alpha \cdot \sin \theta}{I_{\alpha0}}} \quad (\text{σχέση 2.73})$$

- Χωρητική φόρτιση

Όταν το φορτίο, που θα συνδεθεί στη θέση του Z στην εικόνα 2.24, οδηγήσει το συνολικό κύκλωμα σε χωρητική συμπεριφορά (ρεύμα τυμπάνου I_a προπορεύεται της τάσης V_ϕ), το διανυσματικό διάγραμμα θα λάβει τη μορφή της εικόνας παρακάτω:



Εικόνα 2.26: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονης γεννήτριας με χωρητική φόρτιση [34].

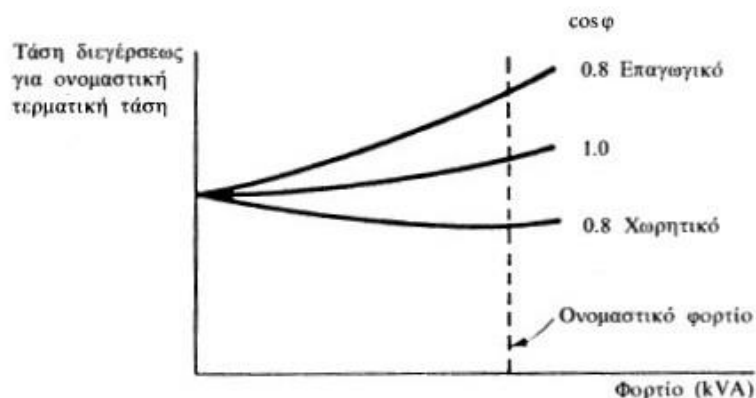
Εφαρμόζοντας τον κανόνα του συνημίτονου στο τρίγωνο Ογβ, προκύπτει:

$$E_f^2 = V_\phi^2 + (X_s \cdot I_a)^2 - 2 \cdot V_\phi \cdot X_s \cdot I_a \cdot \sin \theta \quad (\text{σχέση 2.74})$$

Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία με αυτήν της επαγωγικής φόρτισης, προκύπτει η σχέση της καμπύλης διεγέρσεως.

$$\frac{I_f}{I_{f0}} = \sqrt{1 + \left(\frac{I_a}{I_{a0}}\right)^2 - \frac{2 \cdot I_a \cdot \sin \theta}{I_{a0}}} \quad (\text{σχέση 2.75})$$

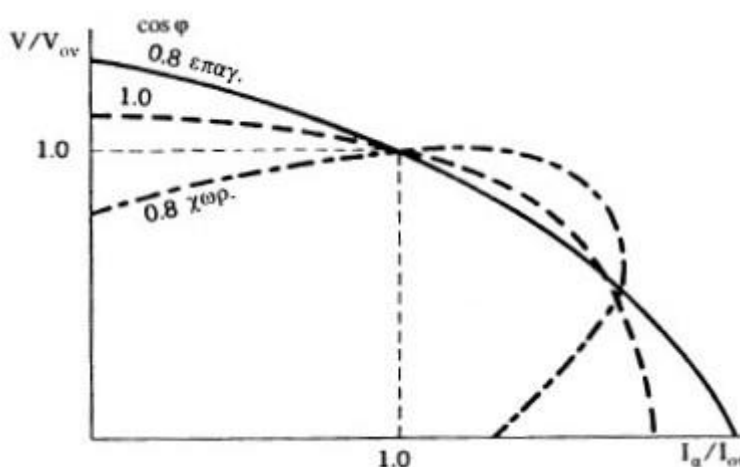
Από τις σχέσεις 2.70, 2.73 και 2.75 προκύπτει το διάγραμμα με τις καμπύλες διεγέρσεως για τα τρία είδη φόρτισης της σύγχρονης γεννήτριας.



Εικόνα 2.27: Διάγραμμα καμπυλών διεγέρσεως [34].

Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας και, καθώς το φορτίο στα άκρα της γεννήτριας μεταβάλλεται (σύνδεση - αποσύνδεση καταναλώσεων), παράλληλα μεταβάλλεται και το ρεύμα διέγερσης, ώστε η τάση V_ϕ στα άκρα της γεννήτριας να παραμένει σταθερή και ίση με την ονομαστική. Με αυτές τις συνθήκες, η σύγχρονη γεννήτρια λειτουργεί κατά μήκος των καμπυλών της εικόνας 2.27.

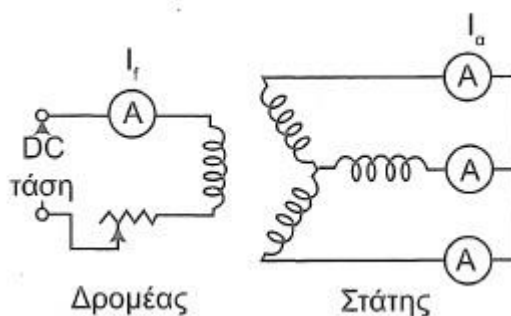
Παρόλα αυτά, μια γεννήτρια μπορεί να βρεθεί σε κατάσταση υπερφόρτισης. Για το λόγο αυτό, το ρεύμα διέγερσης παραμένει σταθερό και ίσο με το μέγιστο επιτρεπτό, ώστε να μην παραβιαστεί η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του δρομέα. Υπό αυτές τις συνθήκες, με κάθε μεταβολή του φορτίου μεταβάλλεται και η τάση στα άκρα της γεννήτριας, η οποία λειτουργεί πάνω στην καμπύλη της εικόνα 2.28.



Εικόνα 2.28: Διάγραμμα V-A σύγχρονης γεννήτριας με σταθερό ρεύμα διέγερσης [34].

2.4.1.6 Τάση βραχυκύκλωσης

Σε πειραματικό περιβάλλον, μια σύγχρονη γεννήτρια περιστρέφεται με τις ονομαστικές στροφές. Αρχικά, η γεννήτρια δεν τροφοδοτείται με συνεχή τάση στο τύλιγμα διέγερσης. Συνεπώς, το ρεύμα διέγερσης I_f είναι μηδενικό. Στη συνέχεια, βραχυκυκλώνονται τα άκρα του τυλίγματος του επαγωγικού τυμπάνου μέσω κατάλληλων διατάξεων αμπερόμετρου. Αφού το κύκλωμα διέγερσης τροφοδοτηθεί με συνεχή τάση μέσω κατάλληλων ρυθμιστικών, υπάρχει έλεγχος του ρεύματος διέγερσης, το οποίο αρχίζει να αυξάνεται από την τιμή μηδέν έως την τιμή εκείνη, που το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου I_α θα λάβει την ονομαστική του τιμή. Η διάταξη αυτή έχει τη μορφή της εικόνας 2.29.

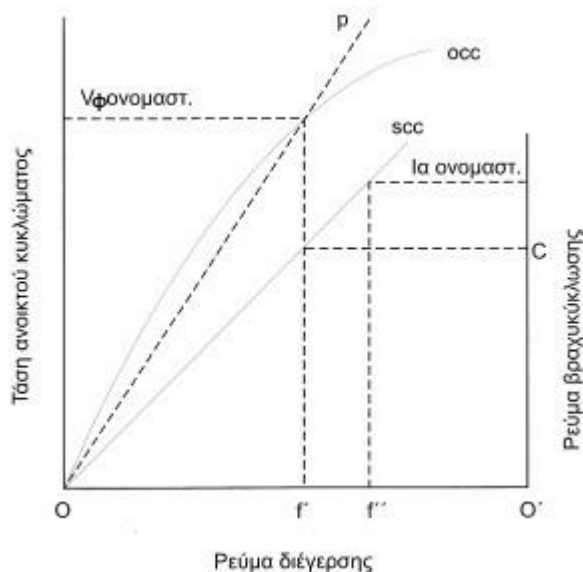


Εικόνα 2.29: Διάταξη πειράματος βραχυκύκλωσης σύγχρονης γεννήτριας [7].

Λόγω της βραχυκύκλωσης των ακροδεκτών της γεννήτριας, η τάση $V_\phi = 0$. Άρα, όλη η επαγόμενη τάση E_f αναλώνεται στα άκρα της επαγωγικής και ωμικής αντίστασης του τυλίγματος τυμπάνου.

$$E_f = I_a \cdot (r_a + jX_s) \quad (\text{σχέση 2.76})$$

Καθώς γίνεται αυτή η σταδιακή αύξηση του ρεύματος διέγερσης, οι μετρήσεις, οι οποίες λήφθηκαν, μπορούν να αποδοθούν σε ένα διάγραμμα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.30.



Εικόνα 2.30: Κοινό διάγραμμα ανοικτού κυκλώματος – βραχυκύκλωσης [7].

Επειδή η ωμική αντίσταση r_a είναι πολύ μικρότερη την αντίστασης του επαγωγικού τύμπανου X_s , μπορεί να αμεληθεί, χωρίς μεγάλες αλλαγές στα αποτελέσματα. Συνεπώς, για τον υπολογισμό της σύγχρονης αντίδρασης χρησιμοποιείται το διάγραμμα της εικόνας 2.30. Για ονομαστική τάση $V_{\phi,ον}$ από την καμπύλη ανοικτού κυκλώματος (OCC) προσδιορίζεται το απαιτούμενο ρεύμα διέγερσης $0f'$ και αντίστοιχα για αυτό το ρεύμα διέγερσης από την καμπύλη βραχυκύκλωσης (SCC) προσδιορίζεται το αντίστοιχο ρεύμα τυμπάνου I_{sc} σε κατάσταση βραχυκύκλωσης.

$$X_s = \frac{V_{\varphi,ov}}{I_{sc}} \quad (\text{σχέση 2.77})$$

Με βάση τις καμπύλες της εικόνας 2.30 μπορεί να προσδιοριστεί ο λόγος βραχυκύκλωσης, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος του ρεύματος διέγερσης για ονομαστική τάση λειτουργίας προς το ρεύμα διέγερσης για ονομαστικό ρεύμα κατά την βραχυκύκλωση.

$$SCR = \frac{Of'}{Of''} \quad (\text{σχέση 2.78})$$

Και ισχύει ότι

$$X_s = \frac{1}{SCR} \quad (\text{σχέση 2.79})$$

2.4.1.7 Παραλληλισμός σύγχρονων γεννητριών

Οι σύγχρονες γεννήτριες μπορούν να λειτουργούν μόνες τους ή σε συνδυασμό με άλλες σύγχρονες γεννήτριες. Στα περισσότερα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας είναι απαραίτητο να λειτουργούν ταυτόχρονα πολλές γεννήτριες. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό, είναι οι εξής:

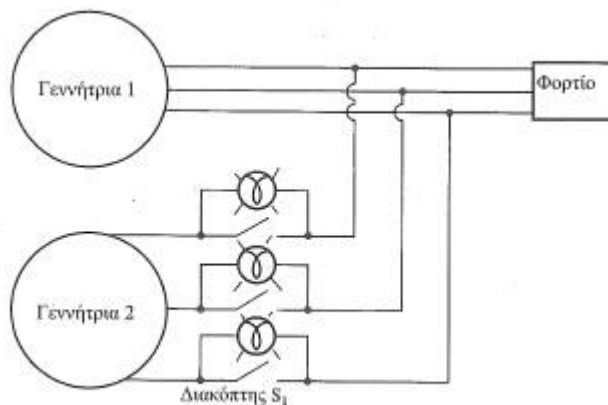
- Το μέγεθος του τροφοδοτούμενου φορτίου από πολλές γεννήτριες είναι πολύ πιο μεγάλο από το φορτίο, που μπορεί να τροφοδοτήσει μια γεννήτρια.
- Το ηλεκτρικό δίκτυο, που τροφοδοτούν πολλές γεννήτριες, έχει μεγαλύτερη αξιοπιστία από το αντίστοιχο δίκτυο, το οποίο τροφοδοτείται από μια γεννήτρια σε περίπτωση βλάβης.
- Όταν λειτουργούν πολλές γεννήτριες, η αποσύνδεση μιας εξ αυτών έχει μικρότερες επιπτώσεις στο δίκτυο, το οποίο τροφοδοτούν.
- Για να λειτουργεί μια γεννήτρια με τη μέγιστη απόδοση, είναι αναγκαίο να λειτουργεί με τα ονομαστικά της χαρακτηριστικά. Στην περίπτωση, που λειτουργεί μια γεννήτρια στο δίκτυο με τις μεταβολές του φορτίου, υπάρχει και διακύμανση της απόδοσης. Για τον λόγο αυτό, είναι χρησιμότερο να λειτουργούν πολλές γεννήτριες μαζί, όπου με την εναλλαγή του φορτίου να συνδέονται και να αποσυνδέονται από το δίκτυο, ώστε οι υπόλοιπες ενεργές να λειτουργούν στη μέγιστη απόδοση.

Για να λειτουργήσουν, όμως, παράλληλα πολλές σύγχρονες γεννήτριες στο ίδιο ηλεκτρικό δίκτυο, πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- 1) Οι ενεργές τιμές των πολικών τάσεων πρέπει να είναι ίσες σε όλες τις γεννήτριες, που συνδέονται στο δίκτυο.
- 2) Η σειρά διαδοχής των φάσεων να είναι η ίδια σε όλες τις σύγχρονες γεννήτριες.
- 3) Οι αντίστοιχες γωνίες των φάσεων κάθε γεννήτριας να είναι όμοιες μεταξύ τους.
- 4) Η συχνότητα κάθε φάσης να είναι ίδια σε όλες τις γεννήτριες, που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο.

Εάν δεν πληρούνται οι παραπάνω απαραίτητες προϋποθέσεις, δεν είναι δυνατό να λειτουργήσουν παράλληλα οι σύγχρονες γεννήτριες. Με τη μη τήρηση των προϋποθέσεων αυτών, οι επιπτώσεις στις γεννήτριες είναι καταστροφικές και άκρως επικίνδυνες.

Για να υπάρξει έλεγχος, εάν πληρούνται αυτές οι προϋποθέσεις, χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, με την πιο απλή αυτήν των λυχνιών, που συνδέονται σύμφωνα με την εικόνα 2.31.



Εικόνα 2.31: Διάγραμμα τυπικού παραλληλισμού σύγχρονων γεννητριών [4].

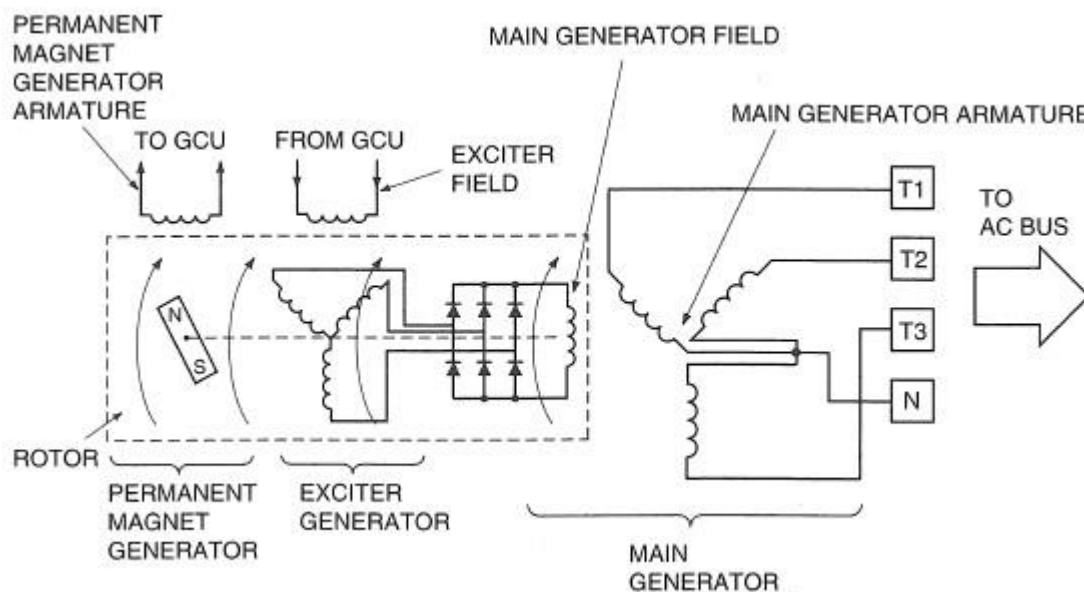
2.4.1.8 Σύγχρονες γεννήτριες σε αεροπλάνα

Η ηλεκτρική ενέργεια είναι αναγκαία για τη σωστή λειτουργία ενός αεροσκάφους. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητο να υπάρχουν μηχανήματα, τα οποία την παράγουν, καθώς ένα αεροπλάνο, όπως είναι προφανές, κατά τη διάρκεια μιας πτήσης είναι αυτόνομο και δεν υπάρχει διασύνδεση με το επίγειο ηλεκτρικό δίκτυο.

Το ρόλο της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τον αναλαμβάνουν σύγχρονες γεννήτριες σε μεγάλα αεροπλάνα. Οι γεννήτριες αυτές είναι τοποθετημένες στους κινητήρες του αεροσκάφους και λαμβάνουν κίνηση από αυτούς. Ένας κινητήρας αεροπλάνου έχει μεταβλητές στροφές ανάλογα με την κατάσταση, την οποία βρίσκεται (έδαφος – αέρα). Η σύγχρονη γεννήτρια, όμως, χρειάζεται σταθερό αριθμό στροφών, ώστε να λειτουργεί με τα ονομαστικά της χαρακτηριστικά.

Για το λόγο αυτό, οι σύγχρονες γεννήτριες δε λαμβάνουν απευθείας κίνηση από τον κινητήρα, αλλά από ένα σταθεροποιητή στροφών (Constant Speed Drive – CSD). Ο σταθεροποιητής στροφών είναι ένα είδος αυτόματου κιβωτίου ταχυτήτων, το οποίο αποτελείται από γρανάζια και είναι υπεύθυνο να λαμβάνει ένα μεταβλητό εύρος στροφών, να το υποβιβάζει και να το σταθεροποιεί στις ονομαστικές στροφές της γεννήτριας. Το ηλεκτρικό δίκτυο των αεροπλάνων είναι τυποποιημένο να λειτουργεί με 400 Hz συχνότητα και μέτρο τάσης 115/200 V AC (φασική/πολική). Για το λόγο αυτό, μέσω της σχέσης 2.46 για σταθερό αριθμό στροφών n_m (κατασκευαστικό χαρακτηριστικό κάθε κινητήρα) μπορεί να υπολογιστεί ο αριθμός των πόλων της σύγχρονης γεννήτριας.

Στα πρώτα αεροπλάνα, που κατασκευάστηκαν, η σύγχρονη γεννήτρια λάμβανε το ρεύμα διέγερσης της από μια εξωτερική διεγέρτρια (πηγή DC τάσης) μέσω δακτυλιδιών ολίσθησης (slip rings). Λόγω της μεγάλης φθοράς και της συχνής συντήρησης, που χρειάζονταν αυτές οι γεννήτριες, οι κατασκευαστές την αντικατέστησαν χρησιμοποιώντας ένα νέο είδος σύγχρονης γεννήτριας χωρίς ψήκτρες (brushless), το οποίο είναι το μόνο, που επικρατεί μέχρι σήμερα.



Εικόνα 2.32: Σχηματικό διάγραμμα brushless γεννήτριας [22].

Οι brushless γεννήτριες είναι αυτοδιεγερόμενες σύγχρονες γεννήτριες, όπως φαίνεται και στην εικόνα 2.32. Κατά την περιστροφή του δρομέα μέσω ενός μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Generator – PMG) επάγεται τάση στο τύλιγμα στάτη της γεννήτριας μόνιμου μαγνήτη (Permanent Magnet Generator Armature), το οποίο βρίσκεται στον στάτη. Η επαγόμενη αυτή τάση δημιουργεί ροή ηλεκτρικού ρεύματος λόγω κλειστού κυκλώματος. Το ρεύμα αυτό οδηγείται σε έναν ρυθμιστή (Generator Control Unit – GCU), το οποίο ρυθμίζει το ρεύμα διέγερσης σε σχέση με τις ανάγκες του φορτίου. Στη συνέχεια, το ρυθμιζόμενο αυτό ρεύμα ρέει μέσα στο τύλιγμα διέγερσης (Exciter Field)

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

και επάγει τάση ξανά στο τύλιγμα της διεγέρτριας (Exciter Generator), που βρίσκεται στο δρομέα. Το ρεύμα αυτό, που δημιουργείται, ανορθώνεται στο δρομέα μέσω γέφυρας ανόρθωσης και οδηγείται ξανά στο κύριο τύλιγμα διέγερσης (Main Generator Field). Το τύλιγμα αυτό είναι υπεύθυνο για την παραγωγή του κύριου μαγνητικού πεδίου, που επάγει την ΗΕΔ στο τύλιγμα του επαγωγικό τυμπάνου του στάτη.



Εικόνα 2.33: Brushless γεννήτρια 20 kVA ελικοπτέρου.



Εικόνα 2.34: Brushless γεννήτρια 40kVA αεροπλάνου.

2.5 Παραγωγή DC

Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, πριν την απόλυτη κυριαρχία του εναλλασσόμενου ρεύματος, την πρωτοκαθεδρία την κατείχε το συνεχές ρεύμα λόγω της εύκολης αποθήκευσης. Αν και στη συνέχεια αποδείχθηκε, ότι ήταν ασύμφορη η παραγωγή και μεταφορά του σε μεγάλες αποστάσεις, το συνεχές ρεύμα βρήκε εφαρμογές σε μικρά αυτόνομα δίκτυα, όπως για παράδειγμα αυτοκίνητα, πλοία, αεροπλάνα, καθώς επίσης και στις περισσότερες ηλεκτρονικές εφαρμογές. Για το λόγο αυτό, εξακολουθεί να παραμένει εξαιρετικά χρήσιμο στη σύγχρονη εποχή και να χρησιμοποιείται στις εφαρμογές εκείνες, που παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι του εναλλασσόμενου.

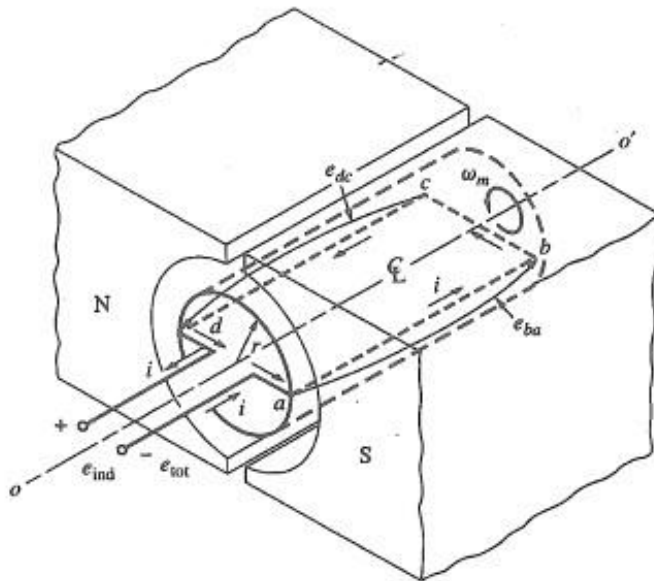
2.5.1 Γεννήτρια DC

Ένας από τους τρόπους παραγωγής συνεχούς ρεύματος είναι αυτός της μετατροπής της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική με τη χρήση ηλεκτρικών μηχανών, που λειτουργούν ως γεννήτριες. Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος μοιάζουν με τις γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος, διότι και σε αυτές εσωτερικά οι επαγόμενες τάσεις και τα ρεύματα είναι εναλλασσόμενα. Η συνεχής τάση και το ρεύμα στην έξοδό της οφείλονται σε έναν μηχανικό ανορθωτή, τον συλλέκτη. Γι' αυτό το λόγο, οι μηχανές συνεχούς ρεύματος ονομάζονται και μηχανές με συλλέκτη (commutating machinery).

2.5.1.1 Αρχή λειτουργίας γεννήτριας συνεχούς ρεύματος

Στις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος το τύλιγμα, που είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου (τύλιγμα διέγερσης), είναι πάντοτε τοποθετημένο στο στάτη της μηχανής. Το τύλιγμα, στο οποίο επάγονται τάσεις (τύλιγμα επαγωγικού τυμπάνου), είναι τοποθετημένο στο δρομέα της μηχανής. Ο στάτης είναι κατασκευασμένος πάντα με έκτυπους πόλους, ενώ ο δρομέας κατασκευάζεται κυλινδρικός με αύλακες.

Έστω μια στοιχειώδης γεννήτρια, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.35, η οποία αποτελείται από ένα ζευγάρι πόλων και ενός κινητού πλαισίου. Οι τάσεις, που επάγονται κατά την περιστροφή του πλαισίου, δίνονται από τη σχέση 2.17 για κάθε τομέα του πλαισίου ξεχωριστά.



Εικόνα 2.35: Στοιχειώδης μηχανή παραγωγής τάσης από επαγωγή [4].

Με τη βοήθεια της εικόνας 2.35 και της σχέσης 2.17 προκύπτει η επαγόμενη τάση για κάθε κομμάτι του πλαισίου.

$$\alpha\text{-b} : e_{ba} = \begin{cases} v \cdot B \cdot \ell & \text{κάτω από τον πόλο} \\ 0 & \text{έξω από τον πόλο} \end{cases}$$

$$\text{b-c} : e_{cb} = 0$$

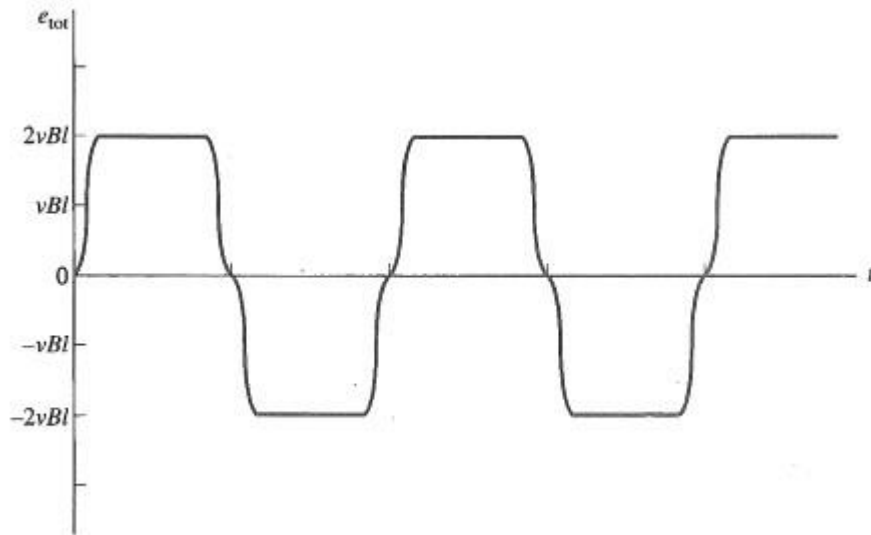
$$\text{c-d} : e_{dc} = \begin{cases} v \cdot B \cdot \ell & \text{κάτω από τον πόλο} \\ 0 & \text{έξω από τον πόλο} \end{cases}$$

$$\text{d-}\alpha : e_{ad} = 0$$

Η συνολική επαγόμενη τάση στα άκρα του πλαισίου είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων. Άρα:

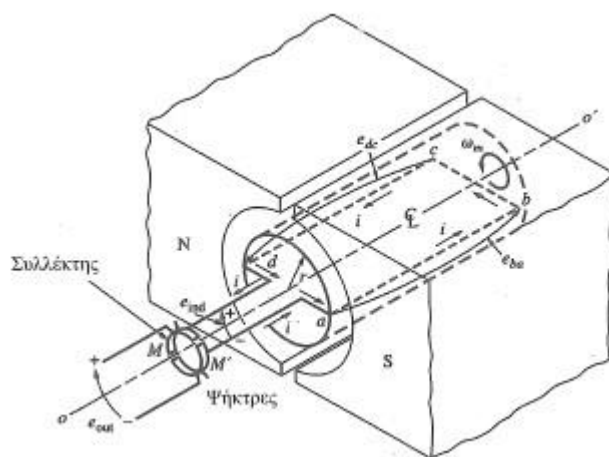
$$e_{int} = e_{ba} + e_{cd} + e_{dc} + e_{ad} = \begin{cases} 2 \cdot v \cdot B \cdot \ell \\ 0 \end{cases} \quad (\text{σχέση 2.80})$$

Με τη μετακίνηση του πλαισίου, το μέγεθος της μαγνητικής ροής αλλάζει. Συνεπώς, και η συνολική επαγόμενη τάση κατά την περιστροφή αλλάζει. Άρα, η κυματομορφή της παραγόμενης τάσης με το πέρασμα του χρόνου φαίνεται στην εικόνα 2.36.

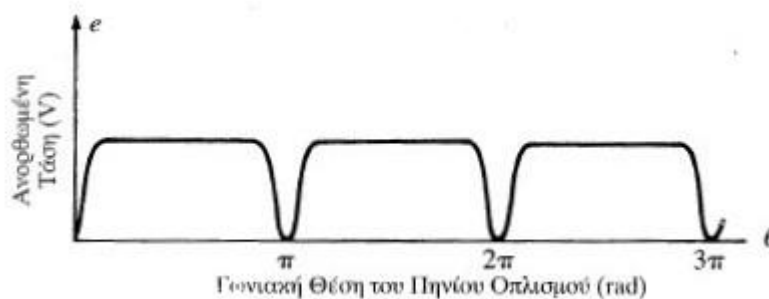


Εικόνα 2.36: Κυματομορφή τάσης εξόδου στοιχειώδους γεννήτριας [4].

Το συμπέρασμα, που βγαίνει από την εικόνα 2.36, είναι, ότι η τάση, που παράγει μια στοιχειώδης μηχανή (εσωτερική τάση μηχανής), είναι εναλλασσόμενη. Για το λόγο αυτό, ανακαλύφθηκε ένας μηχανικός ανορθωτής, ο συλλέκτης. Ο συλλέκτης αποτελεί δυο ημικυκλικά ελάσματα, τα οποία τοποθετούνται στα άκρα του πλαισίου και είναι μονωμένα μεταξύ τους, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.37. Δύο σταθεροί ακροδέκτες τοποθετούνται και ολισθαίνουν πάνω στο συλλέκτη (ψήκτρες). Με αυτόν τον τρόπο, με κάθε εναλλαγή της πολικότητας του πλαισίου οι ακροδέκτες πάντα λαμβάνουν τάση με σταθερό πρόσημο. Μέσω αυτής της διαδικασίας, η κυματομορφή της τάσης, που λαμβάνεται από τους ακροδέκτες (εξωτερική τάση μηχανής), έχει τη μορφή της εικόνας 2.38.

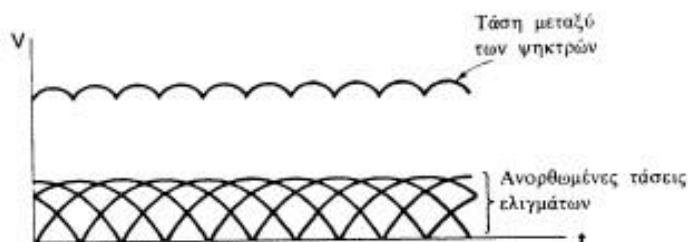


Εικόνα 2.37: Στοιχειώδης γεννήτρια με συλλέκτη [4].



Εικόνα 2.38: Κυματομορφή ανορθωμένης τάσης μέσω συλλέκτη [3].

Η τάση της εικόνας 2.38 είναι συνεχής μεταβαλλόμενη και λαμβάνει τιμές από μηδέν έως μια μέγιστη, ανάλογα με την επαγόμενη τάση του πλαισίου. Για την εξάλειψη αυτής της μεταβολής, οι πραγματικές γεννήτριες συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιούν πολλά τυλίγματα στο επαγωγικό τύμπανο και ο συλλέκτης κατασκευάζεται με περισσότερους τομείς, ώστε η εξωτερική τάση της γεννήτριας να λαμβάνει σταθερή τιμή χωρίς μεγάλες κυματώσεις (εικόνας 2.39).



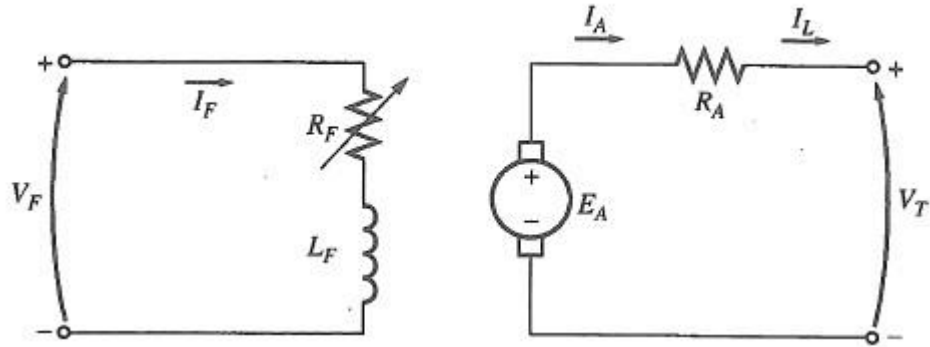
Εικόνα 2.39: Εξωτερική τάση γεννήτριας συνεχούς ρεύματος με πολλά ελίγματα [34].

Κύριο χαρακτηριστικό διάκρισης της γεννήτριας συνεχούς ρεύματος είναι ο τρόπος σύνδεσης των τυλιγμάτων διέγερσης. Για το λόγο αυτό, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος διακρίνονται σε:

- Γεννήτριες ΣΡ ξένης διέγερσης
- Γεννήτριες ΣΡ παράλληλης διέγερσης
- Γεννήτριες ΣΡ διέγερσης σειράς
- Γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης
- Γεννήτριες ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης

2.5.1.2 Γεννήτριες ΣΡ ξένης διέγερσης

Σε αυτές τις γεννήτριες, το τύλιγμα διέγερσης τροφοδοτείται από ανεξάρτητη πηγή συνεχούς ρεύματος. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτού του είδους της γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 2.40.



Εικόνα 2.40: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ ξένης διέγερσης [4].

Σύμφωνα με την εικόνα 2.40 και τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα της γεννήτριας ισούται με:

$$V_T = E_A - I_A \cdot R_A \quad (\text{σχέση 2.81})$$

όπου η επαγόμενη τάση E_A , που αναπτύσσεται στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου:

$$E_A = K' \cdot \Phi \cdot n \quad (\text{σχέση 2.82})$$

όπου K' κατασκευαστική σταθερά κάθε γεννήτριας και ισούται με:

$$K' = \frac{Z \cdot P}{60 \cdot a} \quad (\text{σχέση 2.83})$$

όπου

Z : συνολικός αριθμός των αγωγών του οπλισμού

a : ο αριθμός των κλάδων του δρομέα

P : αριθμός των πόλων

Φ : η μαγνητική ροή ανά πόλο

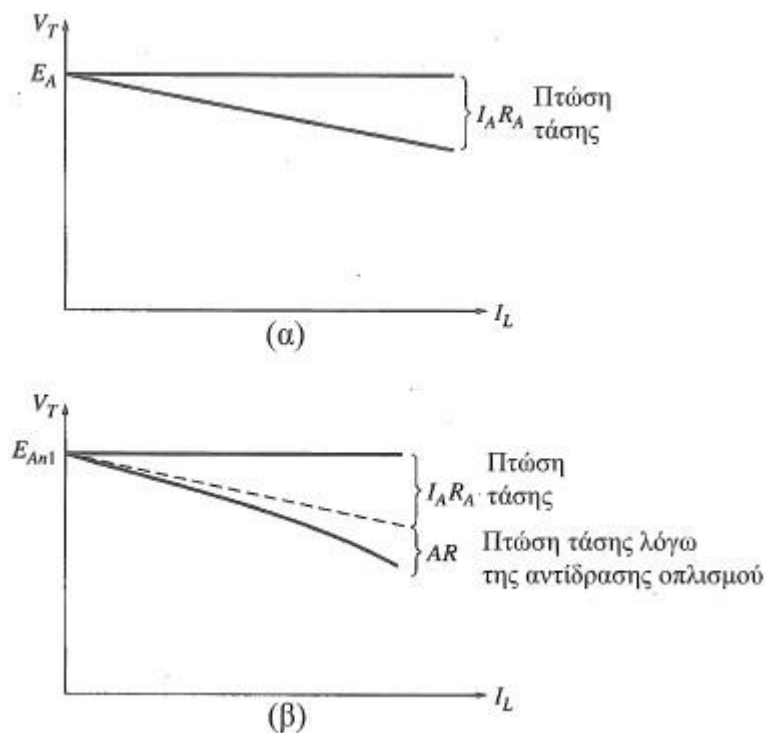
Το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου είναι ίσο με το ρεύμα του φορτίου. Συνεπώς, ισχύει:

$$I_L = I_A \quad (\text{σχέση 2.84})$$

Το ρεύμα διέγερσης σύμφωνα με το νόμο του Ohm:

$$I_F = \frac{V_F}{R_F} \quad (\text{σχέση 2.85})$$

Στις γεννήτριες αυτές, η τάση, που επικρατεί στα άκρα της γεννήτριας V_T , επηρεάζεται άμεσα από τη μεταβολή του φορτίου, διότι με την αύξηση ή τη μείωση του ρεύματος φορτίου η πτώση τάσης στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου μεταβάλλεται ($I_A \cdot R_A$). Όπως είναι γνωστό, όταν στο τυλίγμα του επαγωγικού τυμπάνου ρέει ηλεκτρικό ρεύμα, παράγεται και εκεί ένα μαγνητικό πεδίο. Αυτό το μαγνητικό πεδίο εξαρτάται από το μέγεθος του ρεύματος και έχει την ιδιότητα να παραμορφώνει το μαγνητικό πεδίο της διέγερσης στο διάκενο της μηχανής. Από τη στιγμή, που παραμορφώνεται το μαγνητικό πεδίο, τότε και η επαγόμενη τάση E_A αλλοιώνεται βάσει της σχέσης 2.82. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση σπλισμού. Για να μειωθούν αυτά τα φαινόμενα, οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν τυλίγματα αντιστάθμισης. Η χαρακτηριστική φορτίου για αυτές της μηχανές φαίνεται στην εικόνα 2.41.



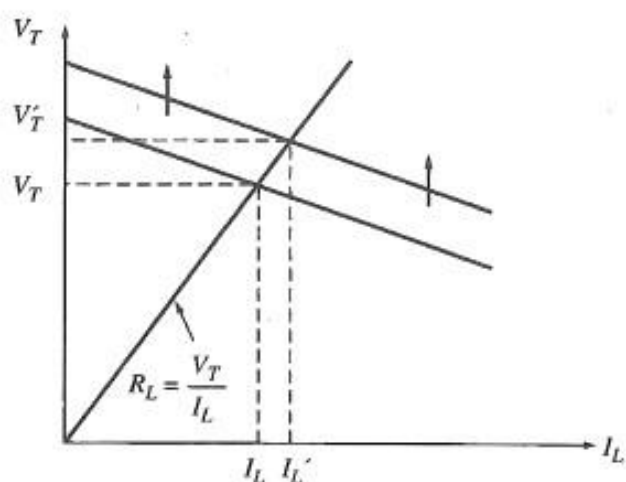
Εικόνα 2.41: Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ α)διαθέτει β)δε διαθέτει τυλίγμα αντιστάθμισης [4].

Ο έλεγχος της παραγόμενης τάσης στα άκρα της μηχανής V_T μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω της επαγόμενης τάσης E_A (σχέση 2.81). Με την αύξηση της E_A αυξάνεται και η V_T , ενώ με τη μείωση E_A υπάρχει αντίστοιχη μείωση V_T . Ο έλεγχος, όμως, της E_A γίνεται μέσω της σχέσης 2.82. Αρχικά, ο πρώτος τρόπος ελέγχου της E_A και ισοδύναμα της V_T γίνεται μέσω της μεταβολής των στροφών n της μηχανής. Με την αύξηση των στροφών υπάρχει αύξηση της E_A και ισοδύναμα αύξηση και της V_T , ενώ με αντίστοιχη μείωση των στροφών υπάρχει μείωση της E_A και της V_T . Τις περισσότερες

φορές, όμως, η κινητήρια μηχανή, που κινεί τον άξονα της γεννήτριας, προσφέρει σταθερό αριθμό στροφών. Για τον λόγο αυτό, η τιμή της τάσης εξόδου δεν ρυθμίζεται με την αυξομείωση των στροφών.

Ο δεύτερος τρόπος ρύθμισης της E_A και ταυτόχρονα της V_T γίνεται με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής της μηχανής Φ . Η μεταβολή του μαγνητικού πεδίου στο διάκενο της μηχανής γίνεται με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης I_F . Καθώς το ρεύμα διέγερσης αυξάνει, υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της μαγνητικής ροής στους πόλους της μηχανής και, συνεπώς, αύξηση και της επαγόμενης τάσης E_A . Η ίδια ακριβώς διαδικασία ακολουθείται και για τη μείωση της επαγόμενης τάσης με αντίστοιχη μείωση του ρεύματος διέγερσης.

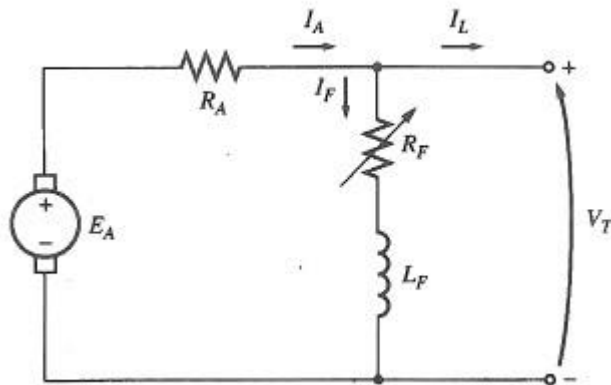
Στην εικόνα 2.42 αποτυπώνεται η χαρακτηριστική φόρτισης για διαφορετικά ρεύματα διέγερσης.



Εικόνα 2.42: Χαρακτηριστική φόρτισης με μεταβολή του ρεύματος διέγερσης I_F [4].

2.5.1.3 Γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διέγερσης

Σε αυτές τις γεννήτριες, το τυλίγμα διέγερσης συνδέεται παράλληλα με το τυλίγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Συνεπώς, η τάση, η οποία εφαρμόζεται στα άκρα του τυλίγματος διέγερσης, είναι η ίδια με αυτή, που επικρατεί στα άκρα της. Συμπερασματικά, η γεννήτρια παράλληλης διέγερσης δεν απαιτεί την ύπαρξη ξένης πηγής τροφοδοσίας. Το ισοδύναμο κύκλωμα της γεννήτριας αυτής φαίνεται στην εικόνα 2.43.



Εικόνα 2.43: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ παράλληλης διέγερσης [4].

Σύμφωνα με την εικόνα 2.43 και τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα της γεννήτριας ισούται με:

$$V_T = E_A - I_A \cdot R_A \quad (\text{σχέση 2.86})$$

Σύμφωνα με τον νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff, ισχύει ότι:

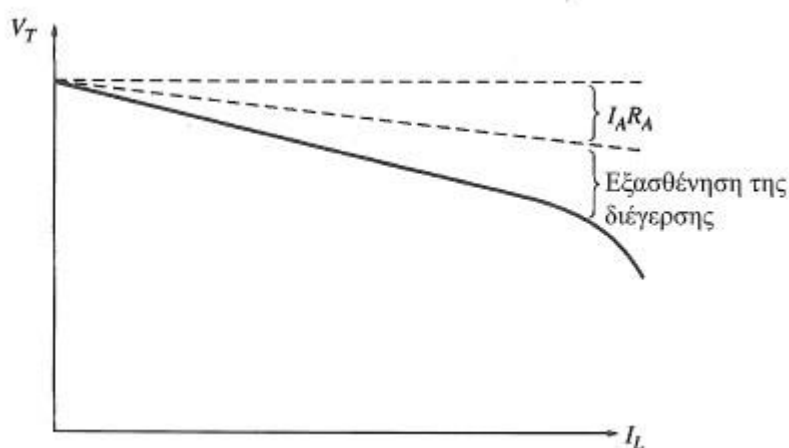
$$I_A = I_L + I_F \quad (\text{σχέση 2.87})$$

Το ρεύμα διέγερσης σύμφωνα με το νόμο του Ohm:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (\text{σχέση 2.88})$$

Το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας αυτής κατά τη λειτουργία της αυτοσυντηρείται από το ίδιο το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου. Αλλά, όπως είναι γνωστό, για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος είναι απαραίτητο να υπάρχει ήδη το μαγνητικό πεδίο, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία. Στις γεννήτριες ΣΡ παράλληλης διέγερσης αυτό επιτυγχάνεται με τη «μνήμη» των σιδηρομαγνητικών υλικών, που ονομάζεται παραμένων μαγνητισμός. Τα σιδηρούχα υλικά, εφόσον λάβουν μια αρχική μαγνήτιση, τότε τη διατηρούν, ακόμα και αν δε βρίσκονται σε μαγνητισμένο περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, σε αυτές τις μηχανές ΣΡ πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στον παραμένοντα μαγνητισμό, διότι, εάν χαθεί, η γεννήτρια δεν μπορεί να εκκινήσει τη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Ένας σημαντικός λόγος, που μπορεί να γίνει αυτό, είναι η φορά περιστροφής του δρομέα να είναι αντίθετος από τον κανονικό ή το κύκλωμα διέγερσης να έχει συνδεθεί με αντίθετη πολικότητα από το κανονικό. Και στους δύο παραπάνω λόγους, η παραγόμενη τάση E_A τείνει να μειώσει τη μαγνητική ροή των πόλων και όχι να την ενισχύσει.

Σε αυτές τις γεννήτριες, το ρεύμα διέγερσης εξαρτάται άμεσα από την τάση στα άκρα του φορτίου και, συνεπώς, και από το ρεύμα, που ρέει προς το φορτίο. Όταν ένα φορτίο, συνδεθεί στα άκρα της γεννήτριας, ένα ρεύμα I_A ρέει στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Από τη σχέση 2.86, μια πτώση τάσης αναπτύσσεται στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου λόγω της ωμικής αντίστασης, που παρουσιάζει. Η τάση V_T στα άκρα της γεννήτριας είναι κοινή και στα άκρα του τυλίγματος διέγερσης. Συνεπώς, ένα ρεύμα διέγερσης I_F είναι υπεύθυνο για τη δημιουργία του μαγνητικού πεδίου στους πόλους της μηχανής. Με την αύξηση, όμως, του φορτίου, που συνδέεται στα άκρα της μηχανής, αντίστοιχη αύξηση παρουσιάζει και το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου I_A . Από τη σχέση 2.86, με την αύξηση του I_A υπάρχει αύξηση και στην πτώση τάσης στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου και ταυτόχρονη μείωση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας. Με τη μείωση, όμως, της V_T , το ρεύμα του τυλίγματος διέγερσης παρουσιάζει πτώση. Τέλος, με τη μείωση του ρεύματος διέγερσης I_F , μειώνεται και η μαγνητική ροή των πόλων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η καμπύλη φορτίου της γεννήτριας ΣΡ παράλληλης διέγερσης φαίνεται στην εικόνα 2.44.

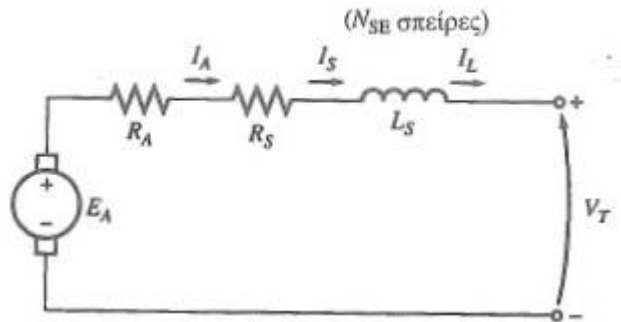


Εικόνα 2.44: Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ παράλληλης διέγερσης [4].

Η ρύθμιση της τάσης εξόδου στις γεννήτριες ΣΡ παράλληλης διέγερσης πραγματοποιείται με τους ίδιους τρόπους με αυτούς των γεννητριών ξένης διέγερσης.

2.5.1.4 Γεννήτρια ΣΡ διέγερσης σειράς

Στις γεννήτριες αυτές, το τύλιγμα της διέγερσης συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Κατασκευαστικά σε αυτές τις γεννήτριες το τύλιγμα διέγερσης αποτελείται από αγωγό μεγαλύτερης διατομής συγκριτικά με τις γεννήτριες ξένης και παράλληλης διέγερσης, διότι το ρεύμα επαγωγικού τυμπάνου είναι κοινό με το ρεύμα διέγερσης. Το ισοδύναμο κύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 2.45.



Εικόνα 2.45: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ διέγερσης σειράς [4].

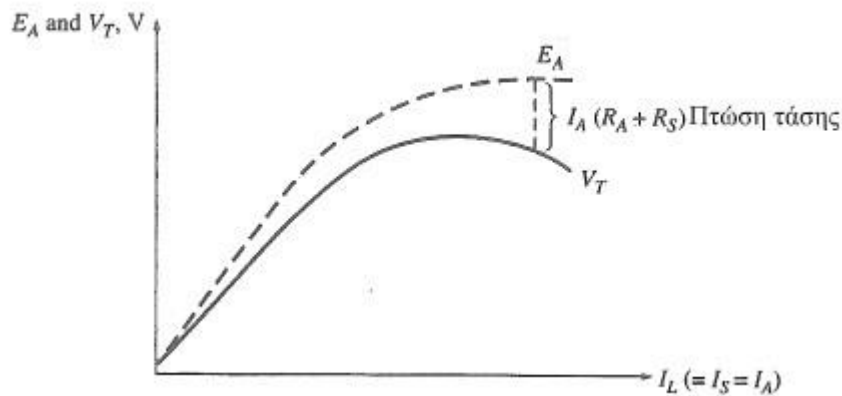
Σύμφωνα με την εικόνα 2.45 και τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα της γεννήτριας ισούται με:

$$V_T = E_A - I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (\text{σχέση 2.89})$$

Για τα ρεύματα της μηχανής ισχύει:

$$I_A = I_S = I_L \quad (\text{σχέση 2.90})$$

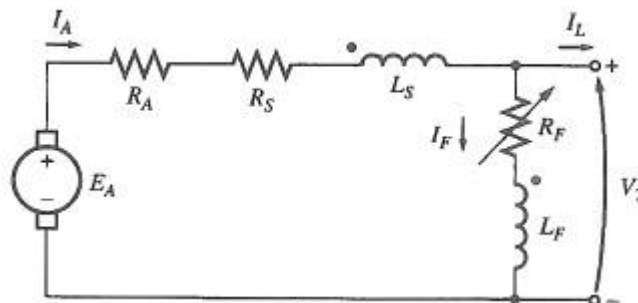
Αρχικά, αυτές οι μηχανές κατά τη λειτουργία τους χωρίς φορτίο παρουσιάζουν μηδενικό ρεύμα φορτίου και ταυτόχρονα και ρεύμα διέγερσης. Γι' αυτό το λόγο, η τάση εξόδου σε αυτή την κατάσταση λειτουργίας είναι πολύ μικρή και προέρχεται από τον παραμένοντα μαγνητισμό των σιδηρομαγνητικών υλικών της γεννήτριας. Όταν συνδεθεί ένα φορτίο στα άκρα της γεννήτριας, τότε ένα ρεύμα αρχίζει να ρέει στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου και ταυτόχρονα στο τύλιγμα διέγερσης. Με την αύξηση του φορτίου αυξάνεται με γρήγορους ρυθμούς και το ρεύμα φορτίου. Ταυτόχρονα, αυξάνεται και η επαγόμενη τάση E_A . Αυτή η αύξηση, αρχικά, πλησιάζει την γραμμικότητα έως τη στιγμή, που επέρχεται κορεσμός στη μηχανή και η πτώση τάσης στις αντιστάσεις των τυλιγμάτων τυμπάνου και διέγερσης ($I_A \cdot (R_A + R_S)$) γίνεται μεγαλύτερη από την επαγόμενη τάση E_A . Συνεπώς, η τάση V_T στα άκρα της γεννήτριας αρχίζει να μειώνεται. Σύμφωνα με τα παραπάνω, η χαρακτηριστική της γεννήτριας ΣΡ διέγερσης σειράς φαίνεται στην εικόνα 2.46. Οι γεννήτριες ΣΡ διέγερσης σειράς αποφεύγονται να χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές με μεταβολή του φορτίου λόγω της μη σταθερής τάσης εξόδου.



Εικόνα 2.46: Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ διέγερσης σειράς [4].

2.5.1.5 Γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης

Οι γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης διαθέτουν δύο τυλίγματα διέγερσης: το τύλιγμα διέγερσης σειράς και το παράλληλο τύλιγμα. Τα δύο αυτά τυλίγματα διέγερσης της γεννήτριας είναι συνδεδεμένα με τέτοιο τρόπο, ώστε το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο να προέρχεται από την άθροιση των επιμέρους μαγνητικών πεδίων των τυλιγμάτων (σειράς - παράλληλο). Το ισοδύναμο κύκλωμα της συγκεκριμένης γεννήτριας φαίνεται στην εικόνα 2.47.



Εικόνα 2.47: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης (μεταπαράλληλη σύνδεση) [4].

Σύμφωνα με την εικόνα 2.47 και τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα της γεννήτριας ισούται με:

$$V_T = E_A - I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (\text{σχέση 2.91})$$

Από τον νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff ισχύει:

$$I_A = I_F + I_L \quad (\text{σχέση 2.92})$$

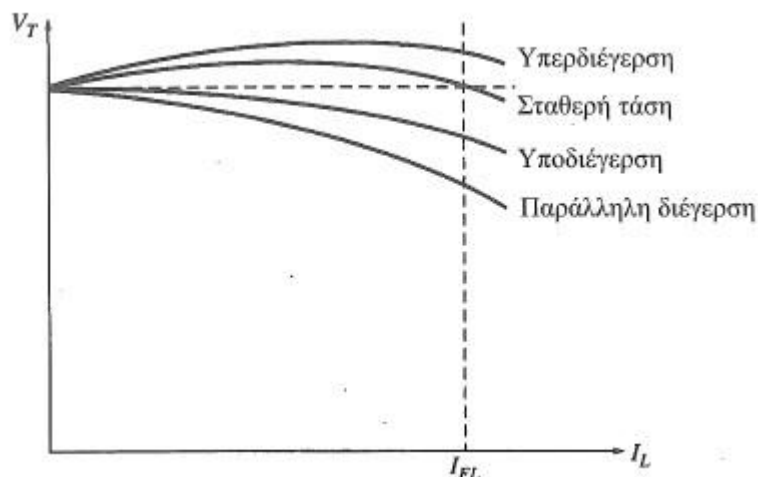
Όπου για τον παράλληλο κλάδο της μηχανής ισχύει:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (\text{σχέση 2.93})$$

Στις γεννήτριες αυτές, όταν συνδεθεί ένα φορτίο, συμβαίνουν δύο φαινόμενα. Αρχικά, με την αύξηση του φορτίου υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση του ρεύματος I_L . Από τη σχέση 2.92 προκύπτει, ότι υπάρχει αύξηση και στο ρεύμα I_A του επαγωγικού τυμπάνου. Το πρώτο φαινόμενο, που συμβαίνει στην γεννήτρια μέσω της σχέσης 2.91, είναι η αύξηση της πτώσης τάσης στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της τάσης V_T στα άκρα της γεννήτριας. Το δεύτερο φαινόμενο, που συμβαίνει, είναι, ότι με την αύξηση του ρεύματος I_A υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της μαγνητεγερτικής δύναμης του τυλίγματος διέγερσης σειράς. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της E_A και ταυτόχρονη αύξηση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας μέσω της σχέσης 2.91. Τα δύο αυτά αντίθετα φαινόμενα συνυπάρχουν και εξαρτώνται από τον αριθμό σπειρών των τυλιγμάτων διέγερσης.

- Λίγες σπείρες στο τύλιγμα σειράς: Σε αυτήν την περίπτωση, το φαινόμενο της πτώσης τάσης στα τυλίγματα της γεννήτριας κυριαρχεί. Γι' αυτό το λόγο, η τάση στα άκρα της γεννήτριας μειώνεται και η χαρακτηριστική φορτίου μοιάζει με αυτή της γεννήτριας παράλληλης διέγερσης, αλλά με μικρότερη κλίση. Ο τρόπος κατασκευής αυτής της γεννήτριας ονομάζεται *υποσύνθετη διέγερση (under - compounded)*.
- Περισσότερες σπείρες στο τύλιγμα σειράς: Σε αυτήν την περίπτωση, αρχικά, για μικρό φορτίο το φαινόμενο της αύξησης της μαγνητικής ροής υπερισχύει, οπότε παρατηρείται και αύξηση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας. Με περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η γεννήτρια οδηγείται σε κορεσμό, οπότε το φαινόμενο της πτώσης τάσης υπερισχύει. Συνεπώς, η γεννήτρια σε αυτή την περίπτωση παρουσιάζει πτώση της τάσης στα άκρα της. Αυτή η μέθοδος κατασκευής ονομάζεται *σταθερής τάσης (flat – compounded)*.
- Ακόμα περισσότερες σπείρες στο τύλιγμα σειράς: Σε αυτήν την περίπτωση, το φαινόμενο της αύξησης της μαγνητικής ροής με την αύξηση του φορτίου υπερισχύει. Συνεπώς, με την αύξηση του φορτίου παρατηρείται και αντίστοιχη αύξηση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας. Αυτή η μέθοδος κατασκευής ονομάζεται *υπερσύνθετης διέγερσης (over – compounded)*

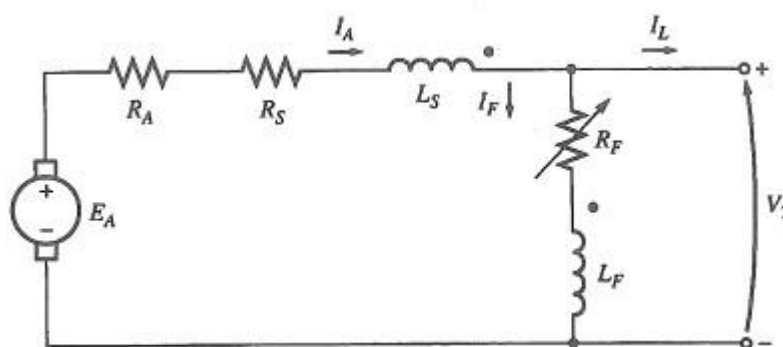
Με βάση τα παραπάνω, η χαρακτηριστική φορτίου για τα διάφορα κατασκευαστικά είδη της γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης φαίνεται στην εικόνα 2.48.



Εικόνα 2.48: Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης [4].

2.5.1.6 Γεννήτριες ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης

Και στην περίπτωση των γεννητριών ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης συνυπάρχουν δύο τυλίγματα διέγερσης: το τυλίγμα διέγερσης σειράς και το τυλίγμα παράλληλης διέγερσης. Η διαφορά σε αυτές της γεννήτριες από τις γεννήτριες ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης είναι ο τρόπος τοποθέτησης των τυλιγμάτων διέγερσης, τα οποία σε αυτήν την περίπτωση τοποθετούνται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα παραγόμενα μαγνητικά πεδία να αφαιρούνται μεταξύ τους. Το ισοδύναμο κύκλωμα αυτών των γεννητριών φαίνεται στην εικόνα 2.49.



Εικόνα 2.49: Ισοδύναμο κύκλωμα γεννήτριας ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4].

Σύμφωνα με την εικόνα 2.49 και τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα της γεννήτριας ισούται με:

$$V_T = E_A - I_A \cdot (R_A + R_S) \quad (\text{σχέση 2.94})$$

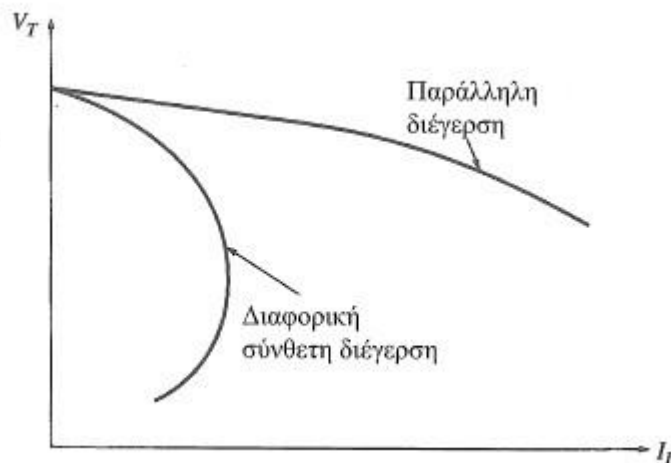
Από τον νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff ισχύει:

$$I_A = I_F + I_L \quad (\text{σχέση 2.95})$$

Όπου για τον παράλληλο κλάδο της μηχανής ισχύει:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (\text{σχέση 2.96})$$

Σε αυτές τις γεννήτριες, όταν συνδεθεί ένα φορτίο στα άκρα τους, συμβαίνουν δύο φαινόμενα παρόμοια με αυτά της γεννήτριας ΣΡ αθροιστικής σύνθετης διέγερσης. Πιο συγκεκριμένα, για το πρώτο φαινόμενο με την αύξηση του φορτίου το ρεύμα του επαγωγικού τυμπάνου I_A αυξάνεται. Μέσω της σχέσης 2.94 η τάση στα άκρα της γεννήτριας V_T μειώνεται, διότι υπάρχει αύξηση της πτώσης τάσης στα τυλίγματα του επαγωγικού τυμπάνου. Το δεύτερο φαινόμενο, που συμβαίνει, είναι με την αύξηση του ρεύματος τυμπάνου I_A υπάρχει αντίστοιχη αύξηση της μαγνητικής ροής στο τύλιγμα διέγερσης σειράς. Αυτή η αύξηση της μαγνητικής ροής στο τύλιγμα σειράς λόγω εσωτερικής συνδεσμολογίας τείνει να μειώσει τη συνολική μαγνητεγερτική δύναμη. Συνεπώς, μειώνεται η επαγόμενη τάση E_A και μέσω της σχέσης 2.94 και η τάση στα άκρα της γεννήτριας. Καθώς και τα δύο φαινόμενα συμβάλλουν στη μείωση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας με την αύξηση του φορτίου, η χαρακτηριστική φορτίου για αυτό το είδος γεννήτριας φθίνει πολύ απότομα, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.50. Δεν χρησιμοποιείται γενικά, καθώς η λειτουργία της, θυμίζει πηγή ρεύματος και χρησιμοποιείται μόνο σε συσκευές φόρτισης συσσωρευτών και ηλεκτροσυγκολλήσεις.



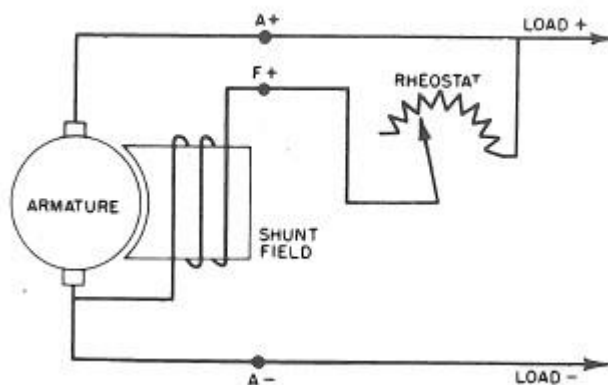
Εικόνα 2.50: Χαρακτηριστική φορτίου γεννήτριας ΣΡ διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4].

2.5.1.7 Γεννήτριες ΣΡ σε αεροπλάνα

Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος δε χρησιμοποιείται ευρέως τα τελευταία χρόνια λόγω της αύξησης των ενεργειακών απαιτήσεων των αεροπλάνων. Καθώς το μέγεθος και οι ανάγκες για παροχή

ηλεκτρικής ενέργειας στα αεροπλάνα αυξάνονται, οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος έχουν αντικατασταθεί με τις σύγχρονες γεννήτριες. Παρόλα αυτά, η χρήση τους δεν έχει εξαλειφθεί τελείως, διότι χρησιμοποιούνται ακόμα σε μικρά αεροπλάνα και ελικόπτερα, στα οποία οι ηλεκτρικές ανάγκες είναι μικρότερες. Ο λόγος, που δε χρησιμοποιούνται σε μεγάλα αεροπλάνα, είναι κυρίως το βάρος και το κόστος συντήρησης, καθώς για την τροφοδότηση ίδιου μεγέθους φορτίου η γεννήτρια ΣΡ απαιτεί μεγαλύτερο όγκο και βάρος σε σχέση με μια σύγχρονη γεννήτρια (χαμηλή τάση → μεγαλύτερο ρεύμα → μεγαλύτερη διατομή αγωγού → μεγαλύτερο βάρος και όγκος). Επιπλέον, το κόστος συντήρησης είναι αυξημένο, διότι ο κύκλος συντήρησης είναι πιο συχνός, οφειλόμενος κατά κύριο λόγο στη φθορά των ψηκτρών και του συλλέκτη.

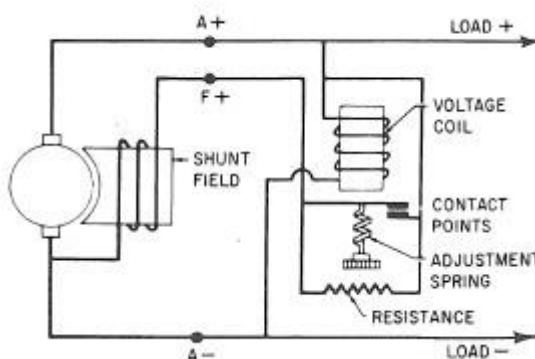
Η γεννήτρια ΣΡ, που χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα και ελικόπτερα, είναι συνήθως παράλληλης διέγερσης, διότι παρουσιάζει μεγαλύτερη σταθερότητα με τις μεταβολές του φορτίου. Η τάση, που παράγεται στα άκρα της, είναι 28 Volts DC. Για τη σταθεροποίηση αυτής της τάσης στα άκρα της γεννήτριας με τις μεταβολές του φορτίου χρησιμοποιούνται ρυθμιστικά (voltage regulator), τα οποία ενεργούν στο τύλιγμα διέγερσης ρυθμίζοντας το ρεύμα, που το διαπερνά. Η απλούστερη μορφή ενός ρυθμιστή τάσης πραγματοποιείται με μια μεταβλητή αντίσταση σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.51.



Εικόνα 2.51: Απλοποιημένη μορφή ρυθμιστή τάσης (voltage regulator) σε γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διέγερσης [22].

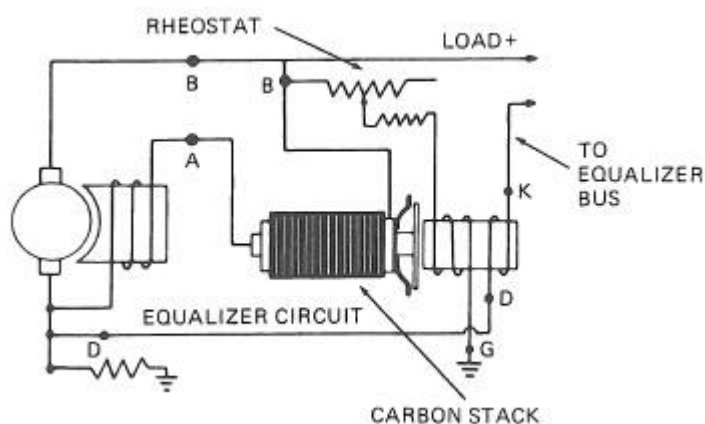
Παρόλα αυτά, είναι αναγκαίο η παραπάνω διαδικασία να γίνεται αυτοματοποιημένα με κάθε μεταβολή του φορτίου χωρίς να υπάρχει έλεγχος από κάποιο ανθρώπινο παράγοντα. Για τον λόγο αυτό, ένας πιο ρεαλιστικός ρυθμιστής τάσης φαίνεται στην εικόνα 2.52. Σε αυτήν την περίπτωση, ένα βοηθητικό πηνίο συνδέεται παράλληλα στο τύλιγμα διέγερσης και είναι υπεύθυνο για τον έλεγχο μιας ηλεκτρικής επαφής. Όταν η τάση στα άκρα της γεννήτριας είναι στο επιθυμητό επίπεδο, τότε το πηνίο αυτό παράγει ένα μαγνητικό πεδίο ικανό να ανοίξει την επαφή ελέγχου. Όταν γίνει αυτό, όλο

το ρεύμα της διέγερσης διαπερνά την ωμική αντίσταση και περιορίζεται στην επιθυμητή τιμή. Όταν το φορτίο στα άκρα της γεννήτριας αυξηθεί, τότε η τάση στα άκρα της μειώνεται. Με αυτήν την πτώση το μαγνητικό πεδίο του βοηθητικού πηνίου δεν είναι ικανό να διατηρήσει ανοιχτή την επαφή, με αποτέλεσμα να κλείσει. Τότε, το ρεύμα του τυλίγματος αυξάνεται, διότι η ωμική αντίσταση τίθεται εκτός κυκλώματος. Με την αύξηση αυτή του ρεύματος διέγερσης ενισχύεται το μαγνητικό πεδίο των πόλων και, συνεπώς, η τιμή της τάσης στα άκρα της γεννήτριας φτάνει την ονομαστική της.



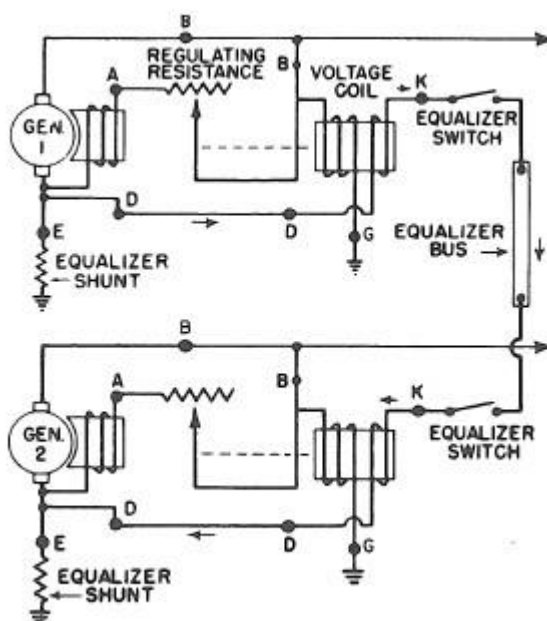
Εικόνα 2.52: Αυτοματοποιημένος ρυθμιστής τάσης (vibrator-type voltage regulator) [22].

Παρόμοια λειτουργία παρουσιάζει και ο ρυθμιστής τάσης τύπου άνθρακα (carbon-pile voltage regulator), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.53. Σε αυτόν τον ρυθμιστή, σε ένα κεραμικό κύλινδρο τοποθετούνται δίσκοι άνθρακα, οι οποίοι συμπιέζονται από ελατήρια. Η ωμική αντίσταση, που παρουσιάζουν συνολικά οι δίσκοι, εξαρτάται από την ανάλογη δύναμη, που ασκεί το ελατήριο συμπίεσης σε αυτούς. Η δύναμη των ελατηρίων και ταυτόχρονα η ωμική τους αντίσταση ελέγχονται από το βοηθητικό πηνίο, το οποίο συνδέεται παράλληλα στο τύλιγμα διέγερσης. Συνεπώς, η συνολική αντίσταση των δίσκων καθορίζουν την τιμή του ρεύματος, που ρέει στο τύλιγμα διέγερσης.



Εικόνα 2.53: Ρυθμιστής τάσης τύπου άνθρακα [22].

Όταν ένα αεροπλάνο διαθέτει περισσότερες από μία γεννήτριες ΣΡ, είναι απαραίτητο να συνδέονται παράλληλα και να τροφοδοτούν το κύκλωμα με την ίδια ποσότητα ρεύματος. Το γεγονός αυτό είναι πολύ σημαντικό, διότι στην περίπτωση, που οι γεννήτριες ΣΡ δε λαμβάνουν το ίδιο μέγεθος φορτίου, τότε η μία λειτουργεί εις βάρος της άλλης. Με άλλα λόγια, κάποιες γεννήτριες τροφοδοτούν με περισσότερο ρεύμα το κύκλωμα σε σχέση με κάποιες άλλες. Η βασική προϋπόθεση για τον παραλληλισμό των γεννητριών ΣΡ είναι η επικράτηση της ίδιας τιμής στα άκρα τους ($28\text{Volts} \pm 0.2$). Για τη διασφάλιση αυτής της προϋπόθεσης υπάρχουν κυκλώματα εξισορρόπησης (equalizing circuit), όπως φαίνεται στην εικόνα 2.54.



Εικόνα 2.54: Κύκλωμα παραλληλισμού γεννητριών ΣΡ (equalizing circuit) [22].

Το παραπάνω κύκλωμα αποτελείται ουσιαστικά από το κύκλωμα ρύθμισης τάσης και ένα επιπλέον βοηθητικό κύκλωμα, αυτό της εξισορρόπησης. Στα άκρα της κάθε αντίστασης εξισορρόπησης (equalizer shunt), η οποία αποτελεί ουσιαστικά ένα διαιρέτη τάσης, αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού, η οποία είναι ανάλογη με την τάση, που επικρατεί στα άκρα της γεννήτριας. Όταν οι δύο γεννήτριες δεν παρουσιάζουν ίδια τάση εξόδου, τότε η διαφορά δυναμικού, που επικρατεί στο κύκλωμα εξισορρόπησης, λαμβάνει μια τιμή. Συνεπώς, ρέει ένα ρεύμα, του οποίου η κατεύθυνση θα σχετίζεται με την τάση στα άκρα των γεννητριών. Το ρεύμα αυτό περνά μέσα από ένα τύλιγμα, το οποίο είναι τοποθετημένο στον ίδιο πόλο, που είναι τοποθετημένο το πηνίο ρύθμισης τάσης. Ανάλογα με τη φορά του ρεύματος και της έντασής του ενισχύεται ή μειώνεται αντίστοιχα η συνισταμένη μαγνητική ροή των πόλων ρύθμισης τάσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη ρύθμιση της αντίστασης στο τύλιγμα διέγερσης. Η διαδικασία αυτή σταματά, όταν και οι δύο γεννήτριες παρουσιάσουν στα άκρα τους ίδια τάση και, συνεπώς, δε ρέει ρεύμα στο τύλιγμα εξισορρόπησης.



Εικόνα 2.55: Γεννήτρια ΣΡ παράλληλης διέγερσης 28V - 300A.



Εικόνα 2.56: Ρυθμιστής τάσης τύπου άνθρακα.

2.5.2 Συσσωρευτές

Η ανάγκη για την κάλυψη φορητών ενεργειακών αναγκών και για την αποθήκευση ενέργειας και πιθανή μελλοντική της χρήση οδήγησαν τον άνθρωπο στην κατασκευή μιας συσκευής, η οποία θα του εξασφάλιζε τα παραπάνω. Αυτή η συσκευή ονομάστηκε συσσωρευτής. Ήδη από τα αρχαία χρόνια, οι άνθρωποι προσπαθούσαν να κατασκευάσουν τέτοιες συσκευές, όπως ανακάλυψε ο Wilhelm Konig το 1938 στη Βαγδάτη. Η συσκευή αυτή, που ανακαλύφθηκε, ήταν ένα πήλινο δοχείο, που περιείχε ένα χάλκινο κύλινδρο και περιέκλειε μια σιδερένια ράβδο. Σύμφωνα με τους επιστήμονες, αυτή αποτελούσε μια αρχαία μπαταρία, που χρησιμοποιούταν για παραγωγή μικρής ποσότητας ηλεκτρισμού και πιο πιθανό για τις επιμεταλλώσεις. Η συσκευή αυτή είναι γνωστή ως η μπαταρία της Βαγδάτης και χρονολογείται από το 250π.Χ έως το 600μ.Χ. Με το πέρασμα των χρόνων και την εξέλιξη της επιστήμης οι μπαταρίες έγιναν αναπόσπαστο κομμάτι της ζωής του ανθρώπου, διότι το συντροφεύουν σε όλες πλέον τις φορητές συσκευές, που απαιτούν ηλεκτρική ενέργεια.

2.5.2.1 Αρχή λειτουργίας συσσωρευτών

Σύμφωνα με τη θεωρία ηλεκτροδιαλυτικής τάσεως του Nernst (1889), αν ένα μέταλλο εμβαπτιστεί σε ένα διάλυμα, το οποίο περιέχει ιόντα του ίδιου ή άλλου μετάλλου, παρατηρείται, ότι το μέταλλο αυτό εκπέμπει ιόντα στο διάλυμα και, συνεπώς, αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού μεταξύ τους. Η διάταξη αυτή καλείται ημιστοιχείο.

Αν συνδυαστούν κατάλληλα δύο ημιστοιχεία, τότε δημιουργείται το γαλβανικό στοιχείο και παρουσιάζεται διαφορά τάσης μεταξύ των δύο μετάλλων. Το ένα μέταλλο αποτελεί τον αρνητικό πόλο και το άλλο το θετικό. Στον αρνητικό πόλο, που ονομάζεται κάθοδος, γίνεται πρόσληψη ηλεκτρονίων, ενώ στο θετικό, που ονομάζεται άνοδος, γίνεται αποβολή ηλεκτρονίων. Σύμφωνα με τα παραπάνω, στην κάθοδο γίνονται αναγωγές, ενώ στην άνοδο οξειδώσεις.

Σε ένα γαλβανικό στοιχείο το δυναμικό, το οποίο παρουσιάζεται μεταξύ της ανόδου και της καθόδου, εξαρτάται από το επιμέρους δυναμικό του κάθε ημιστοιχείου (ηλεκτροδίου). Το επιμέρους δυναμικό αυτό του κάθε ημιστοιχείου ονομάζεται απόλυτο δυναμικό και δεν είναι επακριβώς ορισμένο ακόμα και στη σύγχρονη επιστήμη. Για τον προσδιορισμό του έγινε σύγκριση του κάθε διαφορετικού ημιστοιχείου με ένα ημιστοιχείο αναφοράς, στο οποίο η διαφορά δυναμικού με το διάλυμά του θεωρήθηκε μηδενική. Αυτό το ηλεκτρόδιο ήταν του υδρογόνου. Αυτή η διαφορά δυναμικού ονομάζεται κανονικό δυναμικό (E^0) και δίνεται από τον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Ηλεκτροχημική σειρά δυναμικών διαφόρων ηλεκτροδίων [15].

Ηλεκτρόδιο	Ηλεκτροδιακή δράση	$E^0 (V)$
<i>Οξίνα διαλύματα</i>		
Li Li⁺	$Li^+ + e \leftrightarrow Li$	-3,0450
K K⁺	$K^+ + e \leftrightarrow K$	-2,9250
Cs Cs⁺	$Cs + e \leftrightarrow Cs$	-2,9230
Ba Ba⁺⁺	$Ba^{++} + 2e \leftrightarrow Ba$	-2,9000
Ca Ca⁺⁺	$Ca^{++} + 2e \leftrightarrow Ca$	-2,8700
Na Na⁺	$Na^+ + e \leftrightarrow Na$	-2,7140
Mg Mg⁺⁺	$Mg^{++} + 2e \leftrightarrow Mg$	-2,3700
Al Al⁺³	$Al^{+3} + 3e \leftrightarrow Al$	-1,6600
Zn Zn⁺⁺	$Zn^{++} + 2e \leftrightarrow Zn$	-0,7630
Fe Fe⁺⁺	$Fe^{++} + 2e \leftrightarrow Fe$	-0,4400
Cd Cd⁺⁺	$Cd^{++} + 2e \leftrightarrow Cd$	-0,4030
Sn Sn⁺⁺	$Sn^{++} + 2e \leftrightarrow Sn$	-0,1360
Pb Pb⁺⁺	$Pb^{++} + 2e \leftrightarrow Pb$	-0,1260
Fe Fe⁺³	$Fe^{+3} + 3e \leftrightarrow Fe$	-0,0360
Pt D₂ D⁺	$2D^+ + 2e \leftrightarrow D_2$	-0,00340
Pt H₂ H⁺	$2H + 2e \leftrightarrow H_2$	±0,0000
Pt Sn⁺², Sn⁺⁴	$Sn^{+4} + 2e \leftrightarrow Sn^{+2}$	+0,1500
Pt Cu⁺, Cu⁺⁺	$Cu^{++} + e \leftrightarrow Cu^+$	+0,1530
Pt S₂O₃⁻², S₄O₆⁻²	$S_4O_6^{-2} + 2e \leftrightarrow 2S_2O_3^{-2}$	+0,1700
Cu Cu⁺⁺	$Cu^{++} + 2e \leftrightarrow Cu$	+0,3370
Pt I₂ I⁻	$I_2 + 2e \leftrightarrow 2I^-$	+0,5355
Pt Fe(CN)₆⁻⁴, Fe(CN)₆⁻³	$Fe(CN)_6^{-3} + e \leftrightarrow Fe(CN)_6^{-4}$	+0,6900
Pt Fe⁺², Fe⁺³	$Fe^{+3} + e \leftrightarrow Fe^{+2}$	+0,7710
Ag Ag⁺	$Ag^+ + e \leftrightarrow Ag$	+0,7991
Hg Hg⁺⁺	$Hg^{++} + 2e \leftrightarrow Hg$	+0,8540
Pt Hg₂⁺⁺, Hg⁺⁺	$2Hg^{++} + 2e \leftrightarrow Hg_2^{++}$	+0,9200
Pt Br₂ Br⁻	$Br_2 + 2e \leftrightarrow 2Br^-$	+1,0652
Pt MnO₂ Mn⁺⁺, H⁺	$MnO_2 + 4H^+ + 2e \leftrightarrow Mn^{++} + 2H_2O$	+1,2300
Pt Cr⁺³, Cr₂O₇⁻², H⁺	$Cr_2O_7^{-2} + 14H^+ + 6e \leftrightarrow 2Cr^{+3} + 7H_2O$	+1,3300
Pt Cl₂ Cl⁻	$Cl_2 + 2e \leftrightarrow 2Cl^-$	+1,3595
Pt Ce⁺³, Ce⁺⁴	$Ce^{+4} + e \leftrightarrow Ce^{+3}$	+1,6100
Pt Co⁺², Co⁺³	$Co^{+3} + e \leftrightarrow Co^{+2}$	+1,8200
Pt SO₄⁻², S₂O₈⁻²	$S_2O_8^{-2} + 2e \leftrightarrow 2SO_4^{-2}$	+1,9800
<i>Αλκαλικά διαλύματα</i>		
Pt Ca Ca(OH)₂ OH⁻	$Ca(OH)_2 + 2e \leftrightarrow 2OH^- + Ca$	-3,0300
Pt H₂PO₂⁻, HPO₃⁻², OH⁻	$HPO_3^{-2} + 2e \leftrightarrow H_2PO_2^- + 3OH^-$	-1,5700
Zn ZnO₂⁻², OH⁻	$ZnO_2^{-2} + 2H_2O + 2e \leftrightarrow Zn + 4OH^-$	-1,2160

Pt SO₃⁻², SO₄⁻², OH⁻	SO ₄ ⁻² + H ₂ O + 2e ↔ SO ₃ + 2OH ⁻	-0,9300
Pt H₂ OH⁻	2H ₂ O + 2e ↔ H ₂ + 2OH ⁻	-0,8280
Ni Ni(OH)₂ OH⁻	Ni(OH) ₂ + 2e ↔ Ni + 2OH ⁻	-0,7200
Pb PbCO₃ CO₃⁻²	PbCO ₃ + 2e ↔ Pb + CO ₃ ⁻²	-0,5060
Pt OH⁻, HO₂⁻	HO ₂ ⁻ + H ₂ O + 2e ↔ 3OH ⁻	+0,8800

Ο γενικός τύπος υπολογισμού του δυναμικού ενός ημιστοιχείου δίνεται από τη σχέση του Nernst σε θερμοκρασία διαλύματος 25° C

$$E = E^0 + \frac{0,059}{n} \cdot \log a_{\text{ιόντων}} \quad (\text{σχέση 2.97})$$

Όπου

n: ο αριθμός των ηλεκτρονίων, που λαμβάνουν μέρος στην αντίστοιχη ηλεκτροχημική δράση

a: ενεργότητα διαλύματος ή συγκέντρωση

Στην περίπτωση, που η ενεργότητα του διαλύματος είναι ίση με μονάδα (*a* = 1), τότε ισχύει:

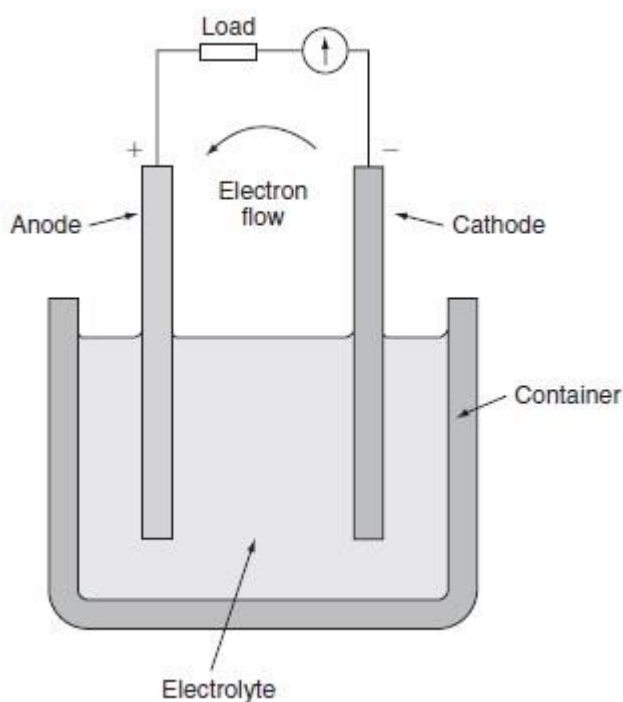
$$E = E^0 \quad (\text{σχέση 2.98})$$

Η ηλεκτρεγερτική δύναμη ενός γαλβανικού στοιχείου δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$E_{\sigma\tau} = E_{(\theta\epsilon\tau\iota\kappa\omicron)} - E_{(\alpha\rho\nu\eta\tau\iota\kappa\omicron)} \quad (\text{σχέση 2.99})$$

Όπου θετικό θεωρείται το στοιχείο, που στον πίνακα 2.1 παρουσιάζει μεγαλύτερο δυναμικό, και αρνητικό το στοιχείο, που παρουσιάζει μικρότερο δυναμικό.

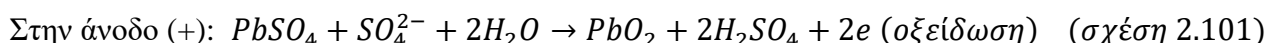
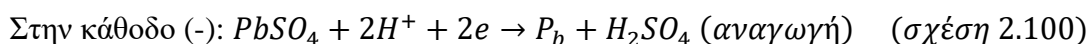
Οι συσσωρευτές με τη σημερινή τους μορφή είναι γαλβανικά στοιχεία, που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μέσω της διαδικασίας της οξειδοαναγωγής. Η παραπάνω χημική αντίδραση πραγματοποιείται μέσα στα «στοιχεία» ή «κελιά» του συσσωρευτή (storage cell). Η χημική αυτή διαδικασία απαιτεί την ύπαρξη δύο διαφορετικών μετάλλων και ενός ηλεκτρολύτη συγκεκριμένων χημικών ουσιών για κάθε είδος μπαταρίας. Ο ηλεκτρολύτης είναι υπεύθυνος για τη συσσώρευση ανιόντων και κατιόντων γύρω από την άνοδο και την κάθοδο του στοιχείου. Τα στοιχεία του συσσωρευτή χαρακτηρίζονται ως πρωτεύοντα, όταν αυτά δεν μπορούν να επαναφορτιστούν, και δευτερεύοντα, όταν υπάρχει δυνατότητα επαναφόρτισης. Μια σχηματική απεικόνιση των παραπάνω φαίνεται στην εικόνα 2.57.



Εικόνα 2.57: Σχηματική απεικόνιση στοιχείου συσσωρευτή [14].

2.5.2.2 Συσσωρευτές μολύβδου (lead – acid)

Οι συσσωρευτές μολύβδου εντάσσονται στην κατηγορία των γαλβανικών στοιχείων. Στα συγκεκριμένα γαλβανικά στοιχεία, τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από πλάκες μολύβδου (Pb), τα οποία εμβαπτίζονται σε διάλυμα θεικού οξέος (H_2SO_4) με περιεκτικότητα 20-30 %. Με την πάροδο του χρόνου, τα δύο ηλεκτρόδια θα επικαλυφθούν με ένα στρώμα θεικού μολύβδου ($PbSO_4$). Όταν αυτά τα ηλεκτρόδια συνδεθούν με μια πηγή συνεχούς τάσης, τότε θα ξεκινήσει η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Σε αυτήν τη διαδικασία, το ανιόν SO_4^{2-} θα κατευθυνθεί προς την άνοδο και θα οξειδώσει το στρώμα θεικού οξέος ($PbSO_4$) προς διοξείδιο του μολύβδου (PbO_2). Ταυτόχρονα, τα κατιόντα υδρογόνου (H^+) θα κατευθυνθούν προς την κάθοδο και θα αντιδράσουν με το στρώμα του θεικού μολύβδου προς μεταλλικό μολύβδο. Οι ηλεκτροχημικές δράσεις, που γίνονται κατά τη διάρκεια της φόρτισης, είναι οι παρακάτω:



Στην περίπτωση, που τα άκρα του γαλβανικού στοιχείου μετά την παραπάνω διαδικασία συνδεθούν σε ένα κύκλωμα, παρατηρείται ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο κύκλωμα. Οι ηλεκτροχημικές διαδικασίες, που γίνονται εντός της διάταξης κατά τη διάρκεια της αποφόρτισης, είναι οι παρακάτω:

Στην κάθοδο (-): $Pb + SO_4^{2-} \rightarrow PbSO_4 + 2e^-$ (σχέση 2.102)

Στην άνοδο (+): $PbO_2 + 4H^+ + SO_4^{2-} + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O$ (σχέση 2.103)

Από τα παραπάνω παρατηρείται, ότι κατά τη διάρκεια της φόρτισης η περιεκτικότητα του διαλύματος θειικού οξέος αυξάνεται ($1,14 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow 1,28 \text{ gr/cm}^3$ περίπου), ενώ κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης μειώνεται ($1,28 \text{ gr/cm}^3 \rightarrow 1,14 \text{ gr/cm}^3$ περίπου) και απελευθερώνεται νερό. Για αυτό το λόγο, για να διαπιστωθεί η κατάσταση της φόρτισης ενός γαλβανικού στοιχείου, αρκεί η μέτρηση της πυκνότητας του ηλεκτρολυτικού υγρού.

Ένας συσσωρευτής μολύβδου κατασκευάζεται από πολλά γαλβανικά στοιχεία, τα οποία συνδέονται με κατάλληλο τρόπο (σειρά – παράλληλα), ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη τάση και ένταση στα άκρα της. Η ηλεκτρεγερτική δύναμη κάθε στοιχείου ανέρχεται περίπου στα 2.11 Volts σε πλήρη φόρτιση. Ο γενικός εμπειρικός κανόνας για τον υπολογισμό της ΗΕΔ ενός στοιχείου δίνεται με τον παρακάτω τύπο:

$$E_{\text{συσ}} = 0,84 + \text{πυκνότητα ηλεκτρολυτικού υγρού} \quad (\text{σχέση 2.104})$$

Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, η τάση παραμένει σχεδόν σταθερή στο στοιχείο του συσσωρευτή μολύβδου και είναι ίση με 2 Volts (κλειστό κύκλωμα). Αν η τάση αυτή φτάσει την τιμή 1,7-1,8 Volts, το στοιχείο χάνει τη σταθερότητά του και είναι αναγκαία η επαναφόρτισή του. Συνήθως, η επαναφόρτιση πρέπει να γίνεται, προτού το στοιχείο φτάσει τα 1,7 Volts, αλλιώς οι χημικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται, είναι καταστροφικές γι' αυτό. Ο βαθμός απόδοσης αυτών των μπαταριών (ενέργεια εξόδου κατά την εκφόρτιση προς ενέργεια εισόδου κατά τη φόρτιση) κυμαίνεται κοντά στο 75% με 90%.

Η φόρτιση των συσσωρευτών μολύβδου πραγματοποιείται είτε με σταθερή παροχή τάσης ή με σταθερή παροχή έντασης ρεύματος, του οποίου η τιμή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1/10 με 2/10 της συνολικής χωρητικότητας της μπαταρίας. Επιπλέον, κρίνεται σημαντικό τα καπάκια των στοιχείων να παραμένουν καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης ανοιχτά, διότι με την αύξηση της θερμοκρασίας αναπτύσσονται εύφλεκτοι ατμοί, που μπορεί να οδηγήσουν σε καταστροφή του συσσωρευτή.

Το στοιχείο του συσσωρευτή μολύβδου παρουσιάζει μικρή εσωτερική αντίσταση της τάξεως 10^{-3} έως $10^{-2} \Omega$. Γι' αυτόν τον λόγο, οι συσσωρευτές αυτοί έχουν καλή απόκριση σε μεγάλες απαιτήσεις ρεύματος, διότι παρουσιάζουν μικρή εσωτερική πτώση τάσεως.

Οι συνηθέστερες βλάβες ενός συσσωρευτή μολύβδου προέρχονται τις περισσότερες φορές από κακή συντήρηση και λειτουργία και αναφέρονται παρακάτω:

- **Θείκωση των πλακών:** Σε αυτήν την περίπτωση, στις πλάκες του στοιχείου σχηματίζονται κρύσταλλοι θεικού μολύβδου και φράζουν τους πόρους των πλακών. Έτσι, η εσωτερική αντίσταση του μολύβδου αυξάνεται και η διαδικασία της οξείδωσης και αναγωγής δυσκολεύεται. Το παραπάνω φαινόμενο προκαλείται, είτε όταν υπάρχουν μεγάλα ρεύματα εκφόρτισης, είτε όταν το διάλυμα θεικού οξέος (ηλεκτρολύτης) είναι πολύ πυκνό ή ακόμα όταν ο συσσωρευτής έχει παραμείνει αρκετό καιρό χωρίς να πραγματοποιηθεί κύκλος φόρτισης. Για την αποκατάσταση αυτής της βλάβης πρέπει να αφαιρεθεί ο ηλεκτρολύτης και ο συσσωρευτής να πληρωθεί με απεσταγμένο νερό. Στη συνέχεια πρέπει να υποστεί μερικές φορτίσεις και αποφορτίσεις, έως ότου σταθεροποιηθεί η τάση στα άκρα του. Στο τέλος των διαδικασιών αυτών, τα στοιχεία του συσσωρευτή ξαναγεμίζουν με το σωστό διάλυμα ηλεκτρολύτη.
- **Αποκόλληση ενεργών υλικών:** Σε αυτήν την περίπτωση, υπάρχει αποκόλληση μέρους των πλακών μολύβδου του στοιχείου. Η βλάβη αυτή προέρχεται από πτώση ή κραδασμό του συσσωρευτή ή ακόμα και από τη φόρτιση του συσσωρευτή πέραν του προβλεπόμενου χρονικού διαστήματος.
- **Διόγκωση και στρέβλωση των πλακών:** Σε αυτήν την περίπτωση, οι πλάκες παραμορφώνονται και διογκώνονται με κίνδυνο την εσωτερική ένωσή τους, που οδηγεί σε βραχυκύκλωση του συσσωρευτή. Η βλάβη αυτή μπορεί να προκληθεί από υπερβολικό ρεύμα εκφόρτισης ή υπερφόρτιση.
- **Πήξη ηλεκτρολυτικού υγρού:** Η πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού υγρού μεταβάλλεται ανάλογα με την κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή και κυμαίνεται περίπου από $1,14 \text{ gr/cm}^3$ έως $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Το σημείο πήξης ενός διαλύματος εξαρτάται άμεσα από την περιεκτικότητα. Χαρακτηριστικό είναι, ότι για αφόρτιστους συσσωρευτές (διάλυμα $1,14 \text{ gr/cm}^3$) το σημείο πήξης του υγρού είναι στους -8° C , ενώ για φορτισμένους συσσωρευτές (διάλυμα $1,28 \text{ gr/cm}^3$) το σημείο πήξης του υγρού είναι στους -70° C . Συνεπώς, οι συσσωρευτές μολύβδου είναι αναγκαίο να παραμένουν φορτισμένοι κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

2.5.2.3 Συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου (Ni-Cd)

Οι συσσωρευτές Νικελίου – Καδμίου εντάσσονται και αυτοί στην κατηγορία των γαλβανικών στοιχείων. Η χρησιμοποίησή τους ξεκίνησε τη δεκαετία του 1950, διότι παρουσίαζαν κάποια πλεονεκτήματα σε σχέση με τις μπαταρίες μολύβδου, όπως η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, καθώς και τα μεγαλύτερα επίπεδα φόρτισης και αποφόρτισης. Τα μειονεκτήματα, που παρουσιάζουν συγκριτικά με τους συσσωρευτές μολύβδου, είναι το αυξημένο κόστος κατασκευής καθώς και η χαμηλότερη τάση παραγωγής κάθε στοιχείου (1,2 – 1,3 Volts). Τα στοιχεία των συγκεκριμένων συσσωρευτών αποτελούνται από την άνοδο (+), που κατασκευάζεται υδροξείδιο του νικελίου (NiOH_2), και την κάθοδο (-), που κατασκευάζεται από κάδμιο (Cd). Τα στοιχεία εμβαπτίζονται σε

διάλυμα υδροξειδίου του καλίου (KOH) με περιεκτικότητα 30%. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης του συσσωρευτή ανταλλάσσονται ιόντα μεταξύ καθόδου και ανόδου δια μέσω του διαλύματος. Κατά την ανταλλαγή αυτή, στην κάθοδο πραγματοποιείται αναγωγή και σχηματίζεται μεταλλικό κάδμιο και η άνοδος οξειδώνεται σχηματίζοντας οξείδιο του νικελίου (NiO). Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, στην κάθοδο θα πραγματοποιηθεί οξείδωση και θα σχηματιστεί υδροξείδιο του καδμίου (CdOH₂) και στην άνοδο θα πραγματοποιηθεί αναγωγή και θα σχηματιστεί υδροξείδιο του νικελίου (NiOH₂).

Η φόρτιση του συσσωρευτή νικελίου – καδμίου γίνεται με σταθερή τάση ή σταθερό ρεύμα και πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή κατά τη φόρτιση, διότι σε περίπτωση υπερφόρτισης εκλύονται πολύ εύφλεκτα αέρια και υπάρχει κίνδυνος ανάφλεξης.

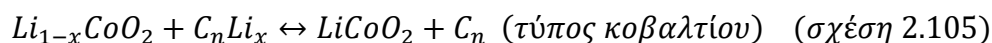
Επίσης, παρουσιάζει πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση (κάτω από 1mΩ ανά στοιχείο). Γι' αυτόν τον λόγο, είναι ικανή να προσφέρει μεγάλο ρεύμα εκφόρτισης με σταθερή τάση στα άκρα της. Επιπλέον, είναι ικανή να παρέχει μεγαλύτερη ισχύ συγκριτικά με μια μπαταρία μολύβδου ίδιου μεγέθους.

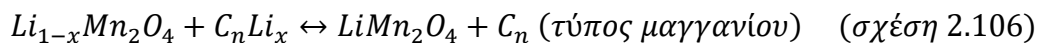
Στους συγκεκριμένους συσσωρευτές, σε αντίθεση με αυτούς του μολύβδου, δεν είναι εφικτό να ληφθούν στοιχεία για την κατάσταση της φόρτισής τους από την πυκνότητα του ηλεκτρολυτικού υγρού, διότι παραμένει σταθερή. Για τον λόγο αυτό, ο έλεγχος της κατάστασης του συσσωρευτή νικελίου – καδμίου γίνεται με τη μέθοδο της ελεγχόμενης αποφόρτισης στην οποία στα άκρα του συσσωρευτή συνδέεται κατάλληλο φορτίο ώστε η παροχή έντασης ρεύματος να παραμένει σταθερή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.

2.5.2.4 Συσσωρευτές λιθίου

Παρόμοια με τους άλλους συσσωρευτές, αντίστοιχα και αυτοί του λιθίου αποτελούνται από τρία μέρη: το θετικό ηλεκτρόδιο, το οποίο κατασκευάζεται από ένα οξείδιο μετάλλου με συνηθέστερα το οξείδιο λιθίου κοβαλτίου (LiCoO₂) ή το οξείδιο λιθίου μαγγανίου (LiMn₂O₄), το αρνητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο κατασκευάζεται από άνθρακα και τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος αποτελείται από άλας λιθίου σε οργανικό διάλυμα.

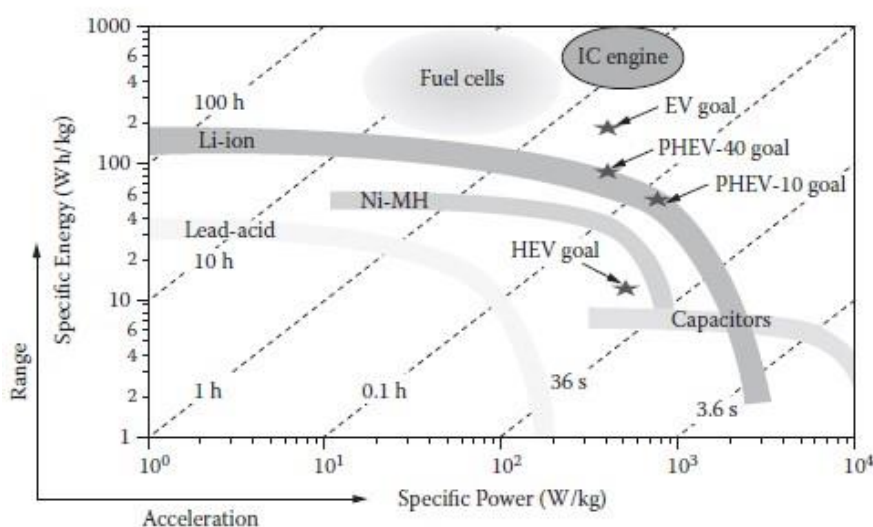
Κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, ιόντα λιθίου Li μεταφέρονται από τον αρνητικό πόλο του συσσωρευτή στο θετικό διαμέσου του ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, μια πηγή συνδέεται στα ηλεκτρόδια με τάση μεγαλύτερη από την παραγομένη τάση του συσσωρευτή. Αυτό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να κινηθούν αντίθετα και να προσκολληθούν στο πορώδες υλικό του αρνητικού ηλεκτροδίου. Οι χημικές διεργασίες, που πραγματοποιούνται στο συσσωρευτή λιθίου, δίνονται παρακάτω:





Οι ηλεκτροχημικές δυνατότητες των συσσωρευτών λιθίου είναι γνωστές πολλά χρόνια. Η εξέλιξη, όμως, στο χειρισμό των υλικών, καθώς και η χρησιμοποίηση μη υδάτινου ηλεκτρολύτη, έδωσαν σε αυτούς τους συσσωρευτές πλεονεκτήματα πολύ σημαντικά έναντι συσσωρευτών, όπως είναι αυτός του μολύβδου και του νικελίου – καδμίου.

Οι συσσωρευτές λιθίου παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση συγκριτικά με τους συσσωρευτές μολύβδου και νικελίου – καδμίου. Αποδίδουν, ουσιαστικά, μεγαλύτερα ποσά ενέργειας σε αναλογία με το βάρος τους σε σχέση με τους άλλους τύπους μπαταριών (εικόνα 2.58). Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα, η οποία προέρχεται κυρίως από τη μεγάλη διαφορά ηλεκτροχημικού δυναμικού, που παρουσιάζει το λίθιο σε σχέση με τα άλλα στοιχεία (πίνακας 2.1). Λόγω της χρήσης μη υδάτινου ηλεκτρολύτη, οι συσσωρευτές λιθίου παρουσιάζουν σταθερή λειτουργία, ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, λόγω της ανάπτυξης τέτοιου είδους ηλεκτρολύτη, δεν υπάρχει ανάγκη για κάποιου είδους συντήρηση, καθώς και κατά τη διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης παραμένουν ερμητικά κλειστοί χωρίς ανάπτυξη αερίων. Παρόλα αυτά, πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή, ώστε να μην υπάρξει υπερφόρτιση, διότι λόγω της μεγάλης αντιδραστικότητας του μετάλλου αναπτύσσονται μεγάλες θερμοκρασίες με κίνδυνο ανάφλεξης. Η παραγομένη τάση ενός στοιχείου συσσωρευτή λιθίου κυμαίνεται από 2,5 Volts έως 4,2 Volts ανάλογα με το είδος των επιλεγμένων ηλεκτροδίων. Έτσι, οι συσσωρευτές λιθίου έχουν μικρότερο βάρος συγκριτικά με άλλους, διότι χρησιμοποιούνται λιγότερα στοιχεία για την επίτευξη συγκεκριμένης τάσης.



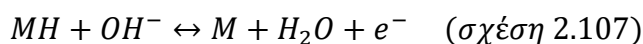
Εικόνα 2.58: Διάγραμμα σχέσης ενέργειας – βάρους & ισχύος – βάρους για διάφορα είδη συσσωρευτών [37].

2.5.2.5 Συσσωρευτές νικελίου – μετάλλου (Ni-MH)

Οι μπαταρίες νικελίου – μετάλλου είναι ουσιαστικά μια εξέλιξη των μπαταριών νικελίου – καδμίου, οι οποίες αναπτύχθηκαν κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους. Λόγω της τοξικότητας και της επικινδυνότητας, που παρουσιάζει το κάδμιο τόσο στην πανίδα, όσο και στη χλωρίδα, η χρήση του είναι αναγκαίο να περιοριστεί. Επιπλέον, οι μπαταρίες νικελίου – μετάλλου παρουσιάζουν πλεονεκτήματα, όπως είναι η μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, που μπορούν να αποθηκεύσουν σε σχέση με το βάρος (εικόνα 2.58). Το παραπάνω πλεονέκτημα είναι σημαντικό για χρήσεις, που απαιτούν αυξημένη ενέργεια, αλλά το βάρος είναι αναγκαίο να παραμείνει χαμηλό, όπως ισχύει για τις φορητές συσκευές επικοινωνίας. Επιπλέον, παρουσιάζουν μεγάλο αριθμό κύκλων φορτίσεων – εκφορτίσεων. Παρόλα αυτά, έπειτα από 200 – 300 κύκλους παρατηρείται πτώση στην απόδοσή του. Ένα επιπλέον μειονέκτημα αυτών των μπαταριών είναι το αυξημένο κόστος παραγωγής σε σχέση με τους συσσωρευτές νικελίου – καδμίου.

Κατασκευαστικά οι συσσωρευτές Ni-MH αποτελούνται από:

Την άνοδο, η οποία κατασκευάζεται από προσμίξεις νικελίου και λανθάνιου, και οι χημικές αντιδράσεις, που λαμβάνουν χώρα, είναι οι παρακάτω:



Την κάθοδο, η οποία κατασκευάζεται από υδροξείδιο του νικελίου, και οι χημικές αντιδράσεις, που πραγματοποιούνται, είναι οι εξής:



Τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος αποτελείται από υδροξείδιο του καλίου και είναι υπεύθυνος για τις ηλεκτροχημικές δράσεις, που πραγματοποιούνται.

Τέλος, η παραγόμενη τάση ενός στοιχείου νικελίου – μετάλλου είναι 1,35 – 1,4 Volts.

2.5.2.6 Συσσωρευτές σε αεροπλάνα

Οι συσσωρευτές στα αεροπλάνα αποτελούν ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα. Η χρήση τους είναι εκτεταμένη και σε διαφορετικά συστήματα. Αρχικά, κάθε αεροπλάνο διαθέτει μια κύρια μπαταρία, η οποία είναι τοποθετημένη σε συγκεκριμένο μέρος, ώστε να παραμένει προστατευμένη από μηχανικές καταπονήσεις, καύσιμα, χημικά και ακραίες θερμοκρασίες. Ταυτόχρονα, το μέρος τοποθέτησής της πρέπει να είναι άμεσα προσβάσιμο, ώστε να γίνονται οι απαιτούμενες οπτικές επιθεωρήσεις και προγραμματισμένες συντηρήσεις. Η τυποποιημένη παραγόμενη τάση του κυρίου

συσσωρευτή του αεροπλάνου είναι 24 Volts DC, όταν είναι τύπου νικελίου – καδμίου ή οξέων μολύβδου. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια υπάρχουν αεροπλάνα, που χρησιμοποιούν συσσωρευτή ιόντων λιθίου με παραγόμενη τάση 32 Volts DC.

Η κατασκευή των συσσωρευτών νικελίου – καδμίου και οξέων μολύβδου γίνεται από υλικά, τα οποία παρουσιάζουν αντοχή στη διάβρωση, που μπορεί να προέλθει από την εκροή ηλεκτρολύτη. Για τον λόγο αυτό, διαθέτουν οπές σε συγκεκριμένα σημεία, ώστε να γίνεται ελεγχόμενη απόρριψη ηλεκτρολύτη σε περίπτωση υπερχειλίσης και να μην υπάρξει καταστροφή ευαίσθητων εξαρτημάτων από την καυστικότητα του. Τα σημεία αυτά βρίσκονται στο άνω μέρος του περιβλήματος του συσσωρευτή, στα οποία τοποθετούνται σωληνάκια, που οδηγούν εκτός του δομικού μέρους του αεροπλάνου. Επιπλέον, αυτές οι οπές συμβάλλουν και στην εξισορρόπηση της πίεσης εντός της μπαταρίας, καθώς και στην ψύξη της από φυσική ροή αέρα. Εντός του εξωτερικού περιβλήματος είναι τοποθετημένα τα στοιχεία του συσσωρευτή. Τα στοιχεία αυτά είναι κατασκευασμένα από στεγανό πλαστικό και στο πάνω μέρος τους διαθέτουν τις ενώσεις των ηλεκτροδίων, καθώς και καπάκι, από το οποίο πραγματοποιείται η συμπλήρωση ηλεκτρολύτη. Τα στοιχεία αυτά συνδέονται με κατάλληλη σειρά, ώστε στα άκρα του συσσωρευτή να εμφανίζεται η απαιτούμενη τάση (24 Volts). Τα συγκεκριμένα άκρα, τα οποία αποτελούν το θετικό και αρνητικό πόλο, οδηγούνται από το εσωτερικό του συσσωρευτή στο εξωτερικό περίβλημα σε κατάλληλο τύπο ακροδέκτη. Σε αυτόν τον τύπο ακροδέκτη συνδέεται ταχυσύνδεσμος, ο οποίος αποτελεί την ηλεκτρική διασύνδεση με το υπόλοιπο αεροπλάνο.

Ο συσσωρευτής είναι υπεύθυνος για την απευθείας τροφοδότηση των κυκλωμάτων ασφαλείας, όπως είναι ενδεικτικά το σύστημα πυρόσβεσης των κινητήρων, επικοινωνίες ανάγκης, σημαντικά όργανα πλοήγησης και φωτισμός ασφαλείας. Επιπλέον, η μπαταρία είναι ικανή να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια ανάλογη της χωρητικότητάς της, όταν οι γεννήτριες του αεροπλάνου είναι εκτός λειτουργίας. Επίσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση κινητήρα αεροπλάνου, όταν δεν υπάρχει κάποια άλλη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (εξωτερική πηγή, λειτουργία γεννήτριας άλλου κινητήρα όταν πρόκειται για αεροπλάνα με περισσότερους από έναν κινητήρες).

Η μπαταρία νικελίου – καδμίου χρησιμοποιεί 19 στοιχεία, ώστε να επιτύχει τη διαφορά δυναμικού των 24 Volts, ενώ η μπαταρία μολύβδου χρησιμοποιεί 12 στοιχεία.

Οι μπαταρίες νικελίου – μετάλλου δε χρησιμοποιούνται ως κύριοι συσσωρευτές. Παρόλα αυτά, βρίσκουν εφαρμογή σε δευτερεύοντα συστήματα, όπως είναι φορητός φωτισμός ασφαλείας, καθώς και συστήματα επικοινωνίας.



Εικόνα 2.59: Συσσωρευτής οξέων μολύβδου τοποθετημένος επί του αεροπλάνου.



Εικόνα 2.60: Εσωτερικές διασυνδέσεις στοιχείων συσσωρευτή νικελίου – καδμίου.



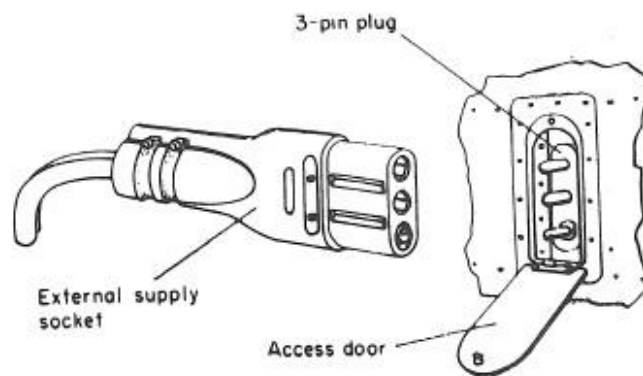
Εικόνα 2.61: Στοιχείο συσσωρευτή νικελίου – καδμίου.

2.6 Εξωτερικές και βοηθητικές πηγές παροχής ηλεκτρικής ενέργειας

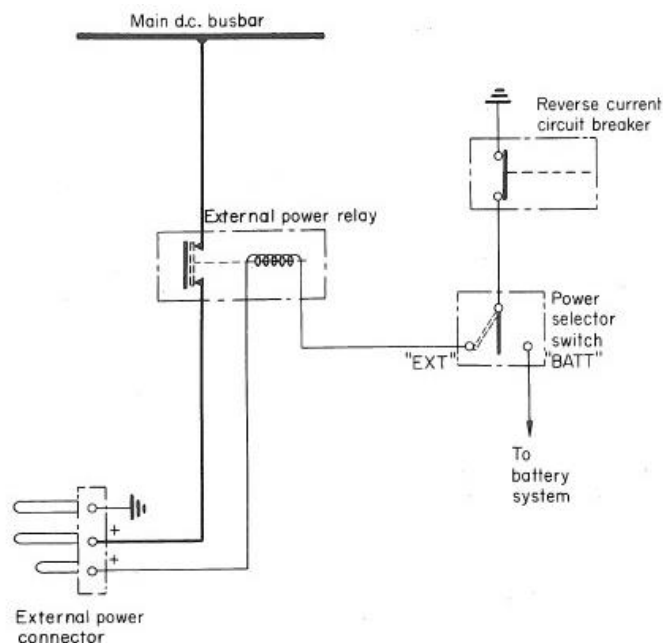
Όταν ένα αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος και πραγματοποιεί περιοδικές επιθεωρήσεις, αποκατάσταση βλάβης ή άλλου είδους εργασίες, πολλές φορές είναι απαραίτητο να λειτουργήσουν κάποια συστήματά του. Τα συστήματα αυτά μπορεί να είναι φωτισμός, λειτουργία θυρών, επιφανειών ελέγχου πτήσης, αντλιών πίεσης υδραυλικού, αντλιών καυσίμου, καθώς και άλλα συστήματα, που χρησιμοποιούν ηλεκτρική ενέργεια. Όπως γίνεται αντιληπτό, δεν είναι εφικτή η συνεχής λειτουργία των κινητήρων του αεροπλάνου, ώστε οι γεννήτριες να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, είναι αδύνατον η μπαταρία του αεροπλάνου να καταφέρει να ανταπεξέλθει στις ηλεκτρικές απαιτήσεις όλων των συστημάτων. Για αυτόν τον λόγο, το αεροπλάνο διασυνδέεται με μια εξωτερική πηγή τάσης, η οποία λαμβάνει ενέργεια είτε από το επίγειο δίκτυο, είτε από εξωτερικές γεννήτριες. Η διασύνδεση αυτή γίνεται μέσω ειδικού συνδέσμου και είναι εφικτή η παροχή DC και AC τάσης.

Η παροχή DC τάσης 28Volts γίνεται διαμέσου ενός τριπολικού συνδέσμου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.62. Ο ένας πόλος του συνδέσμου παρέχει το θετικό άκρο και ο άλλος τον αρνητικό. Ο τρίτος πόλος είναι μικρότερου μήκους από τους άλλους δύο και αποτελεί ένα είδος ασφάλειας κατά τον χειρισμό, καθώς και ένδειξη, ότι η εξωτερική πηγή είναι συνδεδεμένη. Ο πόλος αυτός παρέχει μια

θετική τάση, η οποία είναι υπεύθυνη για την ενεργοποίηση ενός ρελέ φορτίου. Το ρελέ αυτό είναι υπεύθυνο για την εμπλοκή και απεμπλοκή των φορτίων του αεροπλάνου με μεγάλη ταχύτητα, ώστε να μην υπάρξει ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου κατά τη σύνδεση και αποσύνδεση του συνδέσμου, όπως φαίνεται στην εικόνα 2.63. Κατά τη σύνδεση του ακροδέκτη, πρώτα έρχονται σε επαφή ο θετικός και ο αρνητικός πόλος, καθώς είναι πιο μεγάλου μήκους. Άρα, το ηλεκτρικό κύκλωμα διακόπτεται από το ρελέ φορτίου, που είναι ανενεργό. Στη συνέχεια, έρχεται σε επαφή και ο τρίτος πόλος, ο οποίος είναι πιο μικρού μήκους, ενεργοποιώντας το ρελέ. Συνεπώς, ξεκινά η ροή ενέργειας διαμέσου του ρελέ φορτίου. Κατά την αποσύνδεση, πρώτα απεμπλέκεται ο τρίτος πόλος, όντας πιο μικρού μήκους. Συνεπώς, η ροή ενέργειας διακόπτεται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα από το ρελέ φορτίου. Στη συνέχεια, αποσυνδέονται και οι δύο πόλοι (αρνητικός – θετικός) χωρίς τη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου.

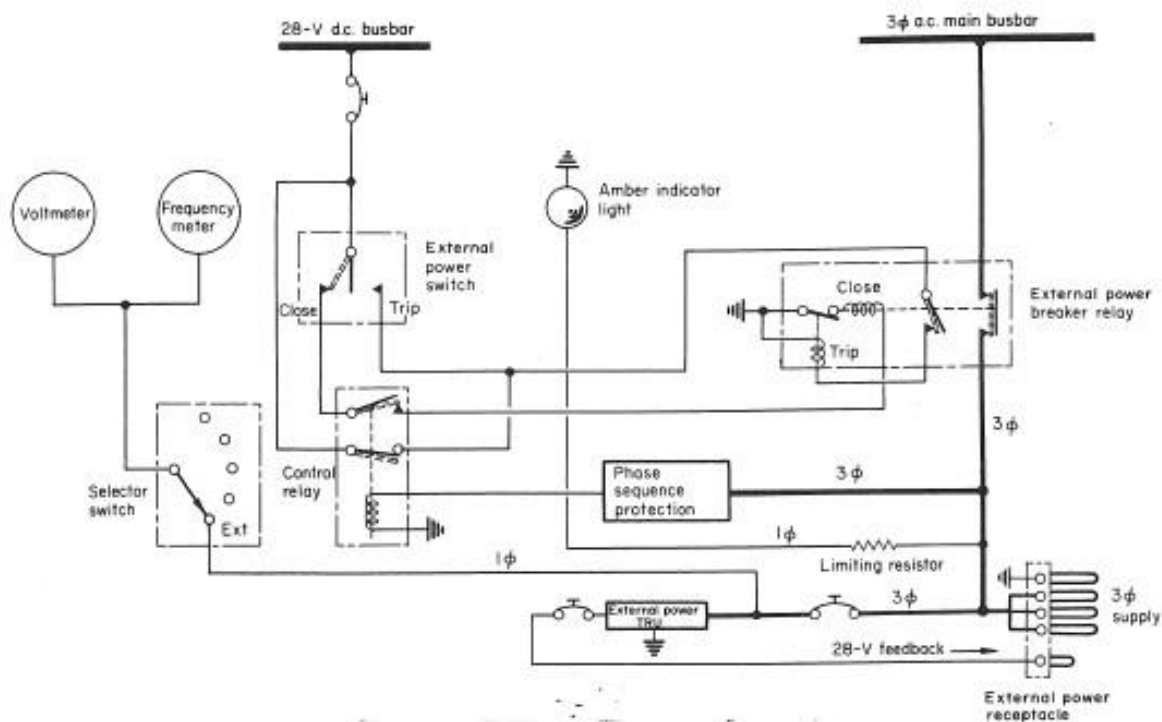


Εικόνα 2.62: Ταχυσύνδεσμος εξωτερικής πηγής DC τάσης – αεροπλάνου [26].

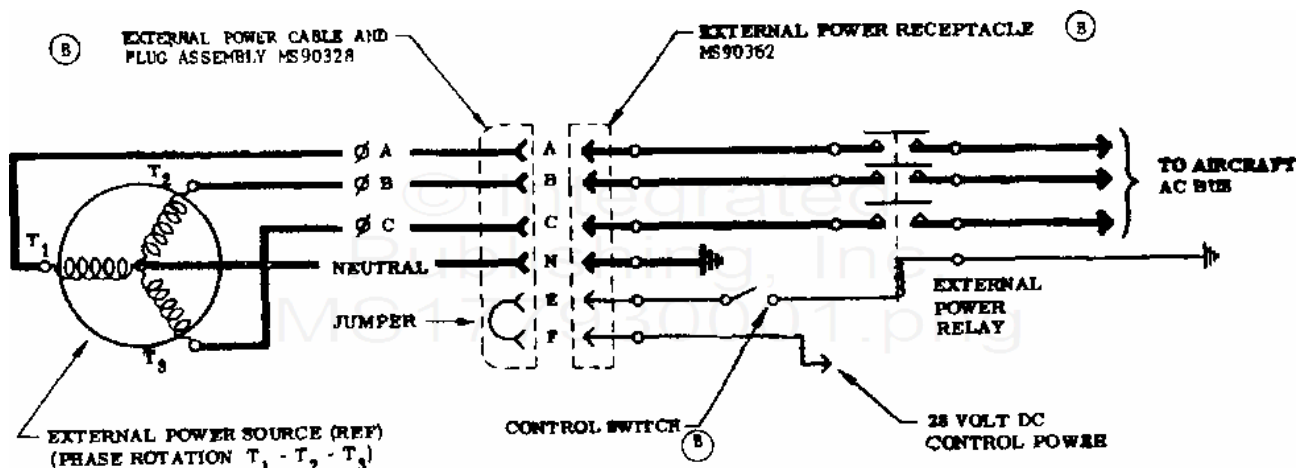


Εικόνα 2.63: Ενδεικτικό διάγραμμα λειτουργίας συνδέσμου DC τάσης-κύκλωμα αεροπλάνου [26].

Εκτός από τη σύνδεση DC τάσης, υπάρχει και σύνδεση AC τριφασικής τάσης, η οποία έχει τιμή φασικής τάσης 115 Volts και συχνότητας 400Hz. Η διασύνδεση γίνεται με ειδικό ταχυσύνδεσμο, παρόμοιο με αυτόν της DC διασύνδεσης. Η διαφορά βρίσκεται στο πλήθος των διασυνδεδεμένων ακροδεκτών. Σε αυτήν την περίπτωση είναι έξι. Οι A-B-C αποτελούν τις τρεις φάσεις, ο N αποτελεί τον ουδέτερο, οι E-F αποτελούν μια εξωτερική γέφυρα. Κατά τη σύνδεση της εξωτερικής τριφασικής παροχής, οι τρεις φάσεις και ο ουδέτερος αποτελούν τους τέσσερις ακροδέκτες μεγαλύτερης διατομής. Στο αεροπλάνο οι τρεις φάσεις οδηγούνται σε ένα ρελέ ελέγχου της διαδοχής και της συχνότητας των φάσεων (phase sequence and frequency relay). Εάν πληρούνται οι παραπάνω απαιτήσεις, τότε το ρελέ οπλίζει και το αεροπλάνο τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια. Οι άλλοι δύο ακροδέκτες (E-F) του συνδέσμου είναι μικρότερου μήκους και είναι βραχυκυκλωμένοι μεταξύ τους. Αυτοί οι ακροδέκτες είναι υπεύθυνοι για την αποφυγή ηλεκτρικού τόξου κατά τη σύνδεση και αποσύνδεση του συνδέσμου. Εντός του αεροπλάνου υπάρχει μια μονάδα μετασχηματιστή ανορθωτή (Transformer Rectifier Unit – T.R.U), ο οποίος μετασχηματίζει και ανορθώνει την AC τάση σε DC 28Volts. Η τάση αυτή οδηγείται στον ακροδέκτη E και διαμέσου του εξωτερικού συνδέσμου (εξωτερική γέφυρα) εφαρμόζεται στον ακροδέκτη F. Η τάση αυτή από τον ακροδέκτη F οδηγείται σε ρελέ φορτίου, το οποίο ελέγχει και αυτό τη ροή φορτίου προς το αεροπλάνο. Ένα ενδεικτικό κύκλωμα της AC διασύνδεσης φαίνεται στην εικόνα 2.64 ενώ το τυπικό σχεδιάγραμμα ενός AC ταχυσύνδεσμου στην εικόνα 2.65.



Εικόνα 2.64: Ενδεικτικό κύκλωμα αεροπλάνου για διασύνδεση με AC εξωτερική πηγή [26].



Εικόνα 2.65: Τυπικό σχεδιάγραμμα AC ταχυσύνδεσμου - 6 pins [41]

Τέλος, τα μεγάλα αεροπλάνα διαθέτουν μια βοηθητική μονάδα παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και αέρα (Auxiliary Power Unit – A.P.U), ώστε να τροφοδοτήσουν τα διάφορα συστήματά του. Το APU αποτελείται από ένα μικρό αεροκινητήρα, ο οποίος διαθέτει ηλεκτρική γεννήτρια ικανή να τροφοδοτήσει τις ηλεκτρικές ανάγκες του αεροπλάνου. Χρησιμοποιείται κατά την εκκίνηση των κυρίων κινητήρων του αεροπλάνου παρέχοντάς τους πίεση αέρα. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και σε έκτακτες περιπτώσεις, όπως είναι η απώλεια κάποιου κινητήρα, ώστε το αεροπλάνο να μη χάσει την ηλεκτρική του ενέργεια. Το APU μπορεί να εκκινηθεί με χρήση μπαταρίας ή εξωτερικής πηγής.

2.7 Συμπεράσματα

Το αεροπλάνο αποτελεί ένα αυτόνομο σύστημα, το οποίο έχει ανάγκη από ηλεκτρική ενέργεια. Όπως αναπτύχθηκε και στο κεφάλαιο 2, ανάλογα με το είδος του αεροπλάνου χρησιμοποιούνται και τα αντιστοιχα συστήματα. Σε μικρά αεροπλάνα χρησιμοποιούνται γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, ενώ σε μεγάλα αεροπλάνα γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Ο λόγος, που γίνεται αυτό, είναι η σχέση παραγόμενης ενέργειας και βάρους. Ανεξάρτητα, όμως, με το είδος των γεννητριών, που φέρει το αεροπλάνο, όλοι οι τύποι διαθέτουν συσσωρευτή, που τροφοδοτεί τα συστήματα ζωτικής σημασίας. με πιο διαδεδομένους εκείνους των οξέων μολύβδου και νικελίου – καδμίου. Εξάιρση αποτελούν τα αεροπλάνα τελευταίας τεχνολογίας, που διαθέτουν συσσωρευτές ιόντων λιθίου, βελτιώνοντας σε μεγάλο βαθμό τη σχέση παραγόμενης ενέργειας και βάρους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : Μετασχηματισμός και μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας στα πτητικά μέσα

3.1 Εισαγωγή

Σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αεροπλάνο γίνεται με τη βοήθεια των γεννητριών. Κάθε αεροπλάνο διαθέτει ένα είδος γεννητριών για την παραγωγή της κύριας ισχύος του. Αυτή η παραγωγή γίνεται είτε με AC γεννήτριες, είτε με DC, αλλά ποτέ και τα δυο είδη ταυτόχρονα. Αυτή η επιλογή γίνεται κατά τον σχεδιασμό του αεροπλάνου και διαφέρει από τύπο σε τύπο. Όπως γίνεται αντιληπτό, δεν είναι εφικτό όλα τα συστήματα του αεροπλάνου να τροφοδοτούνται με την ίδια μορφή και τιμή τάσεως με της παραγομένης. Άλλα συστήματα απαιτούν AC 115 Volts - 400 Hz και άλλα 28 Volts DC. Παρόλα αυτά, υπάρχουν και συστήματα, που απαιτούν τάση χαμηλότερης τιμής (ηλεκτρονικά εξαρτήματα). Γι' αυτό τον λόγο, χρησιμοποιούνται συσκευές μετασχηματισμού της τιμής της τάσης, αλλά και συσκευές, που αλλάζουν το είδος της τάσης (AC↔DC). Αυτές οι ηλεκτρικές συσκευές (διατάξεις) αποτελούν βασικό εξοπλισμό σε ένα αεροπλάνο, όπως αποτελούν και οι πηγές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (γεννήτριες, συσσωρευτές).

3.2 Μετασχηματιστής

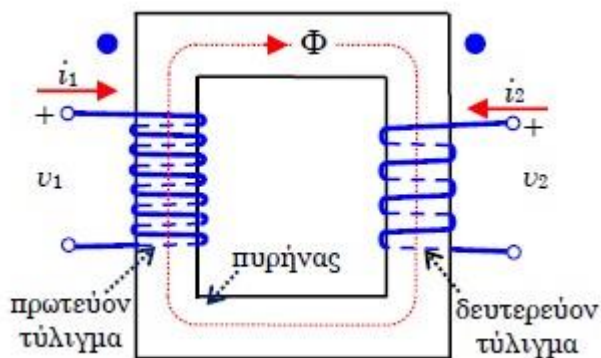
Η μορφή του μετασχηματιστή, που χρησιμοποιείται μέχρι και σήμερα, αναπτύχθηκε το 1891 από Άγγλο μηχανικό W. M. Mordey. Ωστόσο, η έννοια της επαγωγής δύο πηνίων, τα οποία βρίσκονται σε κοντινή απόσταση, ήταν γνωστή από το 1831 με το πείραμα του δακτυλιοειδούς μετασχηματιστή του Faraday. Αρκετά πειράματα και προσπάθειες έγιναν στο διάστημα των 60 χρόνων. Ο G. Page το 1836 στην εργασία, που παρουσίασε, συσχέτιζε τα φαινόμενα αυτεπαγωγής και επαγωγής μεταξύ δύο αγωγών. Ο C. F. Varley 1856 ανέπτυξε έναν μετασχηματιστή, στον οποίο επιτεύχθηκε μείωση των απωλειών δινορευμάτων. Το 1886 ο Westinhouse αγόρασε τα πνευματικά δικαιώματα του διπλώματος ευρεσιτεχνίας των Lucien Gauland και John D. Gibbs και κατασκεύασε μια πειραματική εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας στη Μασαχουσέτη, που βασιζόταν στο εναλλασσόμενο ρεύμα με χρήση μετασχηματιστή. [32, §1.7.7.1]

3.2.1 Αρχή λειτουργίας μετασχηματιστή

Η πιο απλή μορφή ενός μετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 3.1. Δύο αγωγίμα σύρματα τυλίγονται γύρω από έναν πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από σιδηρομαγνητικό υλικό. Ο πυρήνας έχει συγκεκριμένη διατομή S και μέση μαγνητική διαδρομή ℓ . Το πρώτο αγωγίμο σύρμα αποτελεί το πρωτεύον, διότι διοχετεύει ηλεκτρική ισχύ, ενώ το δεύτερο αγωγίμο σύρμα ονομάζεται δευτερεύον,

διότι λαμβάνει την ηλεκτρική ισχύ. Ο συγκεκριμένος μετασχηματιστής θεωρείται ιδανικός και, συνεπώς, ισχύουν τα παρακάτω:

- Η ροή σκέδασης και των δύο τυλιγμάτων θεωρείται μηδενική.
- Οι απώλειες ενέργειας εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού θεωρούνται μηδενικές.
- Οι αγωγοί του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος θεωρούνται ιδανικοί και δεν παρουσιάζουν ωμική αντίσταση.
- Το σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει σταθερή μαγνητική διαπερατότητα $\vec{\mu}$.
- Σε όλο το μήκος της κλειστής διαδρομής εντός του σιδηρομαγνητικού υλικού η μαγνητική ροή θεωρείται ομοιόμορφη.



Εικόνα 3.1: Απλοποιημένος μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων [31].

Εάν το πρωτεύον τυλίγμα, αρχικά, αρχίσει να διαρρέεται με ρεύμα έντασης i_1 , τότε σύμφωνα με τον νόμο του Ampere αναπτύσσεται γύρω του μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} . Συνεπώς, στη διατομή S του σιδηρομαγνητικού υλικού αναπτύσσεται μαγνητική ροή Φ , σύμφωνα με το νόμο του Gauss.

Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι σχέσεις που αναπτύσσονται είναι οι εξής:

Από τον νόμο του Ampere:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{tot} = \mathcal{F} \Rightarrow H_1 \cdot \ell = N_1 \cdot i_1 \Rightarrow H_1 = \frac{N_1 \cdot i_1}{\ell} \quad (\text{σχέση 3.1})$$

Όπου:

\mathcal{F} : η μαγνητεγερτική δύναμη ($A \cdot t$)

H_1 : ένταση μαγνητικού πεδίου

N_1 : αριθμός σπειρών τυλίγματος

Από τον νόμο του Gauss:

$$\Phi_1 = \iint_S \vec{B}_1 \cdot \vec{dS} = B_1 \cdot S = \mu \cdot H_1 \cdot S \quad (\text{σχέση 3.2})$$

Εάν γίνει αντικατάσταση του H_1 από τη σχέση 3.1 στη σχέση 3.2, προκύπτει:

$$\Phi_1 = \mu \cdot \frac{N_1 \cdot i_1}{\ell} \cdot S \quad (\text{σχέση 3.3})$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του πρωτεύοντος τυλίγματος, που προέρχεται από το ρεύμα i_1 , δίνεται από τον τύπο:

$$\lambda_{11} = N_1 \cdot \Phi_1 = N_1 \cdot \mu \cdot \frac{N_1 \cdot i_1}{\ell} \cdot S \Rightarrow \lambda_{11} = N_1^2 \cdot \mu \cdot \frac{S}{\ell} \cdot i_1 \quad (\text{σχέση 3.4})$$

Σε ένα πηνίο με την αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος υπάρχει αύξηση της μαγνητικής επαγωγής και, κατ' επέκταση, αύξηση της πεπλεγμένης ροής. Ο λόγος της πεπλεγμένης ροής προς την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, που διαρρέει ένα πηνίο, ονομάζεται αυτεπαγωγή. Μονάδα μέτρησης είναι το H (Henry). Η αυτεπαγωγή του πρωτεύοντος τυλίγματος, αν θεωρηθεί, ότι το τύλιγμα του δευτερεύοντος δε διαρρέεται από ρεύμα, δίνεται από τη σχέση:

$$L_1 = \left. \frac{\lambda_1}{i_1} \right|_{i_2=0} = \frac{\lambda_{11}}{i_1} = N_1^2 \cdot \frac{\mu \cdot S}{\ell} \quad (\text{σχέση 3.5})$$

Η μαγνητική αντίσταση \mathcal{R} ενός μαγνητικού κυκλώματος ορίζεται ως το πηλίκο της μαγνητοεγερτικής δύναμης προς τη μαγνητική ροή και δίνεται από τον τύπο:

$$\mathcal{R} = \frac{\mathcal{F}}{\Phi} = \frac{\ell}{\mu \cdot S} \quad (\text{σχέση 3.6})$$

Αν γίνει συνδυασμός των σχέσεων 3.5 και 3.6, προκύπτει:

$$L_1 = N_1^2 \cdot \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{N_1^2}{\mathcal{R}} \quad (\text{σχέση 3.7})$$

Η μαγνητική ροή του πρωτεύοντος τυλίγματος διαμέσου του πυρήνα διέρχεται από το δευτερεύον τύλιγμα, δημιουργώντας έτσι μια πεπλεγμένη ροή λ_{21} και υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\lambda_{21} = N_2 \cdot \Phi_1 = N_2 \cdot \mu \cdot \frac{N_1 \cdot i_1}{\ell} \cdot S = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu \cdot \frac{S}{\ell} \cdot i_1 \quad (\text{σχέση 3.8})$$

Ο λόγος της πεπλεγμένης ροής, που διέρχεται από το δευτερεύον τύλιγμα, όταν το πρωτεύον διαρρέεται από ρεύμα, ονομάζεται αλληλεπαγωγή και δίνεται από τη σχέση παρακάτω:

$$M_{21} = \left. \frac{\lambda_2}{i_1} \right|_{i_2=0} = \frac{\lambda_{21}}{i_1} = N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{\mu \cdot S}{\ell} = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}} \quad (\text{σχέση 3.9})$$

Στην περίπτωση, που ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει μόνο το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή, τότε η ανάλυση ακολουθεί την ίδια διαδικασία, αλλά αυτήν τη φορά από τη μεριά του δευτερεύοντος.

Από τον νόμο του Ampere:

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{\ell} = I_{tot} = \mathcal{F} \Rightarrow H_2 \cdot \ell = N_2 \cdot i_2 \Rightarrow H_2 = \frac{N_2 \cdot i_2}{\ell} \quad (\text{σχέση 3.10})$$

Από το νόμο του Gauss:

$$\Phi_1 = \iint_S \vec{B}_2 \cdot d\vec{S} = B_2 \cdot S = \mu \cdot H_2 \cdot S = \mu \cdot \frac{N_2 \cdot i_2}{\ell} \cdot S \quad (\text{σχέση 3.11})$$

Ο υπολογισμός της πεπλεγμένης ροής από το δευτερεύον τύλιγμα:

$$\lambda_{22} = N_2 \cdot \Phi_2 = N_2 \cdot \mu \cdot \frac{N_2 \cdot i_2}{\ell} \cdot S = N_2^2 \cdot \mu \cdot \frac{S}{\ell} \cdot i_2 \quad (\text{σχέση 3.12})$$

Ο υπολογισμός της αυτεπαγωγής του δευτερεύοντος τυλίγματος:

$$L_2 = \left. \frac{\lambda_2}{i_2} \right|_{i_1=0} = \frac{\lambda_{22}}{i_2} = N_2^2 \cdot \frac{\mu \cdot S}{\ell} = N_2^2 \cdot \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}} \quad (\text{σχέση 3.12})$$

Η πεπλεγμένη ροή, που αναπτύσσεται στο πρωτεύον τύλιγμα, όταν το δευτερεύον διαρρέεται από ρεύμα, υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\lambda_{12} = N_1 \cdot \Phi_2 = N_1 \cdot \mu \cdot \frac{N_2 \cdot i_2}{\ell} \cdot S = N_1 \cdot N_2 \cdot \mu \cdot \frac{S}{\ell} \cdot i_2 \quad (\text{σχέση 3.13})$$

Η αλληλεπαγωγή των δύο τυλιγμάτων υπολογίζεται με τη σχέση:

$$M_{12} = \left. \frac{\lambda_1}{i_2} \right|_{i_1=0} = \frac{\lambda_{12}}{i_2} = N_1 \cdot N_2 \cdot \frac{\mu \cdot S}{\ell} = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}} \quad (\text{σχέση 3.14})$$

Από τις σχέσεις 3.9 και 3.14 παρατηρείται, ότι οι αλληλεπαγωγές των δύο τυλιγμάτων είναι ίσες. Δηλαδή:

$$M_{21} = M_{12} = M = \frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}} \quad (\text{σχέση 3.15})$$

Όταν και τα δύο ρεύματα υπάρχουν ταυτόχρονα, δημιουργούνται οι συνολικές πεπλεγμένες ροές λ_1 και λ_2 και ισούνται με:

$$\lambda_1 = \lambda_{11} + \lambda_{12} = L_1 \cdot i_1 + M \cdot i_2 \quad (\text{σχέση 3.16})$$

$$\lambda_2 = \lambda_{21} + \lambda_{22} = M \cdot i_1 + L_2 \cdot i_2 \quad (\text{σχέση 3.17})$$

Αν τα ρεύματα, που εφαρμόζονται, είναι μεταβαλλόμενα στο πεδίο του χρόνου, τότε σύμφωνα με τον νόμο του Faraday αναπτύσσονται ηλεκτρεγερτικές δυνάμεις, σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$e_1 = -\frac{d\lambda_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.18})$$

$$e_2 = -\frac{d\lambda_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.19})$$

Σύμφωνα με τον κανόνα του Lenz και θεωρώντας το πρωτεύον και δευτερεύον πηνίο ως παθητικά στοιχεία, οι τάσεις u_1 και u_2 είναι ίσες και αντίθετες των ηλεκτρεγερτικών δυνάμεων και προκύπτει:

$$u_1 = -e_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.20})$$

$$u_2 = -e_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.21})$$

Θεωρώντας, ότι το σιδηρομαγνητικό υλικό παρουσιάζει γραμμικότητα, τότε συνδυάζοντας τη σχέση 3.20 με τη σχέση 3.16, καθώς και την 3.21 με την 3.17 προκύπτει:

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} + M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.22})$$

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.23})$$

Όταν ο μετασχηματιστής λάβει στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος μια τάση της μορφής $u_1 = V_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ και το δευτερεύον τύλιγμα είναι ανοιχτοκυκλωμένο και, συνεπώς, το ρεύμα i_2 είναι μηδενικό, τότε οι σχέσεις 3.22 και 3.23 γίνονται:

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.24})$$

$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.25})$$

Πραγματοποιώντας διαίρεση μεταξύ των τάσεων, προκύπτει ο λόγος μετασχηματισμού α και ισούται με:

$$\alpha = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{L_1}{M} = \frac{\frac{N_1^2}{\mathcal{R}}}{\frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}}} = \frac{N_1}{N_2} = n \quad (\text{σχέση 3.26})$$

Όπου n : ο λόγος των σπειρών των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή

Στη συνέχεια, αν το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή βραχυκυκλωθεί και στο πρωτεύον εφαρμοστεί τάση της μορφής $u_1 = V_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, προκύπτει η παρακάτω σχέση:

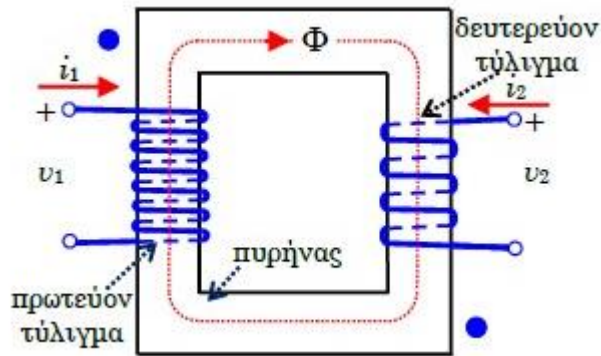
$$u_2 = M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} = 0 \Rightarrow M \cdot \frac{di_1}{dt} = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.27})$$

Ολοκληρώνοντας τη σχέση 3.27 στο πεδίο του χρόνου, προκύπτει:

$$M \cdot \frac{di_1}{dt} = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \Rightarrow \int M \cdot \frac{di_1}{dt} = - \int L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \Rightarrow M \cdot i_1(t) = -L_2 \cdot i_2(t) \Rightarrow$$

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = -\frac{L_2}{M} = -\frac{\frac{N_2^2}{\mathcal{R}}}{\frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}}} = -\frac{N_2}{N_1} = -\frac{1}{n} \quad (\text{σχέση 3.28})$$

Οι παραπάνω σχέσεις ισχύουν μόνο για μετασχηματιστή, που το δευτερεύον τύλιγμα έχει τυλιχθεί με φορά τέτοια, ώστε η μαγνητική ροή, που αναπτύσσεται από τη ροή του ρεύματος σε αυτό, να ενισχύει τη μαγνητική ροή, που δημιουργείται από το ρεύμα του πρωτεύοντος. Ο διαχωρισμός αυτού του είδους των μετασχηματιστών γίνεται με μια τελεία, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Εάν η τελεία βρίσκεται σε διαγώνια διάταξη από αυτή του πρωτεύοντος, τότε το δευτερεύον έχει τυλιχθεί με τέτοιο τρόπο, ώστε η μαγνητική του ροή να έχει αντίθετη κατεύθυνση από αυτή του πρωτεύοντος (εικόνα 3.2).



Εικόνα 3.2: Απλοποιημένος μετασχηματιστής δύο τυλιγμάτων αφαιρούμενων πεπλεγμένων ροών πρωτεύοντος – δευτερεύοντος [31].

Εάν πραγματοποιηθεί παρόμοια ανάλυση και σε αυτόν τον μετασχηματιστή, προκύπτουν οι σχέσεις για την τάση του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} - M \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.29})$$

$$u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} + L_2 \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (\text{σχέση 3.30})$$

Με ανοικτοκυκλωμένο το δευτερεύον και εφαρμόζοντας τάση της μορφής $u_1 = V_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$, προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$u_1 = L_1 \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.31})$$

$$u_2 = -M \cdot \frac{di_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.32})$$

Βάση των παραπάνω, ο λόγος μετασχηματισμού α των τάσεων ισούται:

$$\alpha = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} = \frac{L_1}{-M} = \frac{\frac{N_1^2}{\mathcal{R}}}{-\frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}}} = -\frac{N_1}{N_2} = -n \quad (\text{σχέση 3.33})$$

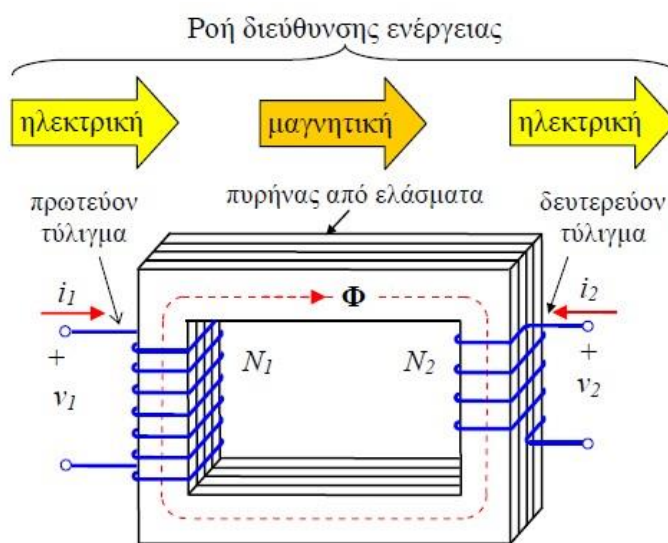
Ο λόγος των εντάσεων του μετασχηματιστή ισούται:

$$\frac{i_1(t)}{i_2(t)} = \frac{L_2}{M} = \frac{\frac{N_2^2}{\mathcal{R}}}{\frac{N_1 \cdot N_2}{\mathcal{R}}} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{n} \quad (\text{σχέση 3.34})$$

Ο λόγος μετασχηματισμού $|a|$ σε ένα μετασχηματιστή είναι πολύ σημαντικός, διότι μέσω αυτού λαμβάνονται χρήσιμα συμπεράσματα για το είδος του μετασχηματιστή. Αν ο λόγος μετασχηματισμού είναι μεγαλύτερος της μονάδας, τότε ο μετασχηματιστής καλείται υποβιβασμού, διότι η τάση που πρωτεύοντος είναι μεγαλύτερη από την τάση του δευτερεύοντος, ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι μικρότερο σε σχέση με το ρεύμα του δευτερεύοντος. Αν ο λόγος μετασχηματισμού είναι μικρότερος από τη μονάδα, τότε ο μετασχηματιστής καλείται ανύψωσης, διότι η τάση του πρωτεύοντος είναι μικρότερη από αυτή του δευτερεύοντος, ενώ ταυτόχρονα το ρεύμα του πρωτεύοντος είναι μεγαλύτερο από αυτό του δευτερεύοντος. Τέλος, αν ο λόγος μετασχηματισμού ισούται με τη μονάδα, τότε τα μεγέθη τάσης και έντασης είναι ίδια και στα δύο τυλίγματα. Αυτός οι μετασχηματιστής ονομάζεται γαλβανικής απομόνωσης, διότι δεν υπάρχει ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ των τυλιγμάτων.[31 §13.4.3]

3.2.2 Κατασκευαστικά μέρη Μ/Σ

Ένας μετασχηματιστής αποτελείται από το μαγνητικό κύκλωμα, το οποίο το αποτελεί ο πυρήνας του, και το ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο το αποτελούν τα τυλίγματά του. Η ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας ενός μετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 3.3 παρακάτω.



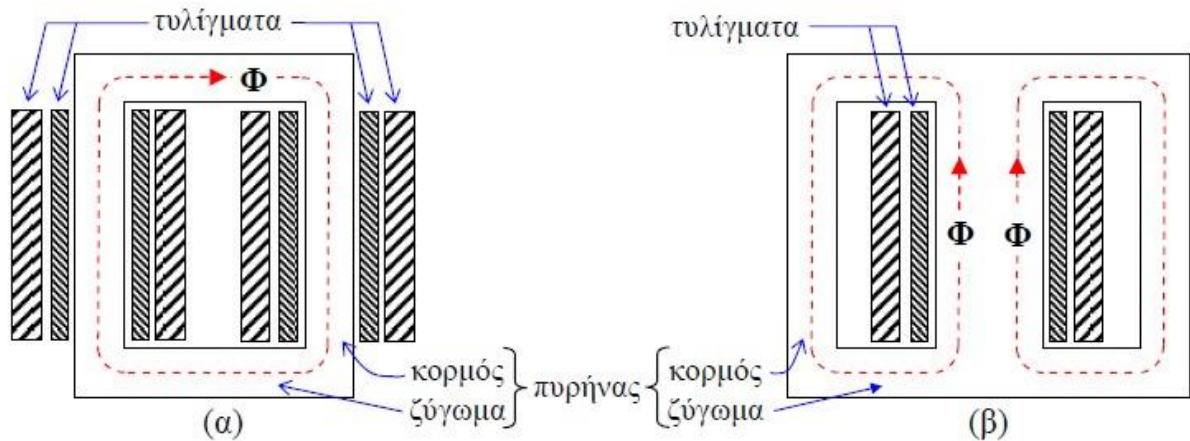
Εικόνα 3.3: Ροή ενέργειας στον μετασχηματιστή [33].

Ο πυρήνας κατασκευάζεται από λεπτά σιδηρομαγνητικά ελάσματα, τα οποία είναι μονωμένα μεταξύ τους, ώστε να υπάρξει περιορισμός των απωλειών σκεδάσεως και δινορευμάτων. Η μαγνητική επαγωγή, που αναπτύσσεται στους πυρήνες των μετασχηματιστών ισχύος, κυμαίνεται μεταξύ 1-1,4 T, ενώ σε μετασχηματιστές τηλεπικοινωνίας έως 10^{-4} T. Συνήθως, για την κατασκευή τους χρησιμοποιείται πυριτιούχος χάλυβας με ποσοστό πυριτίου έως 4,5%. Με την αύξηση του πυριτίου μειώνονται οι απώλειες δινορευμάτων, αλλά αυξάνει την σαθρότητα του ελάσματος. Η μόνωσή τους

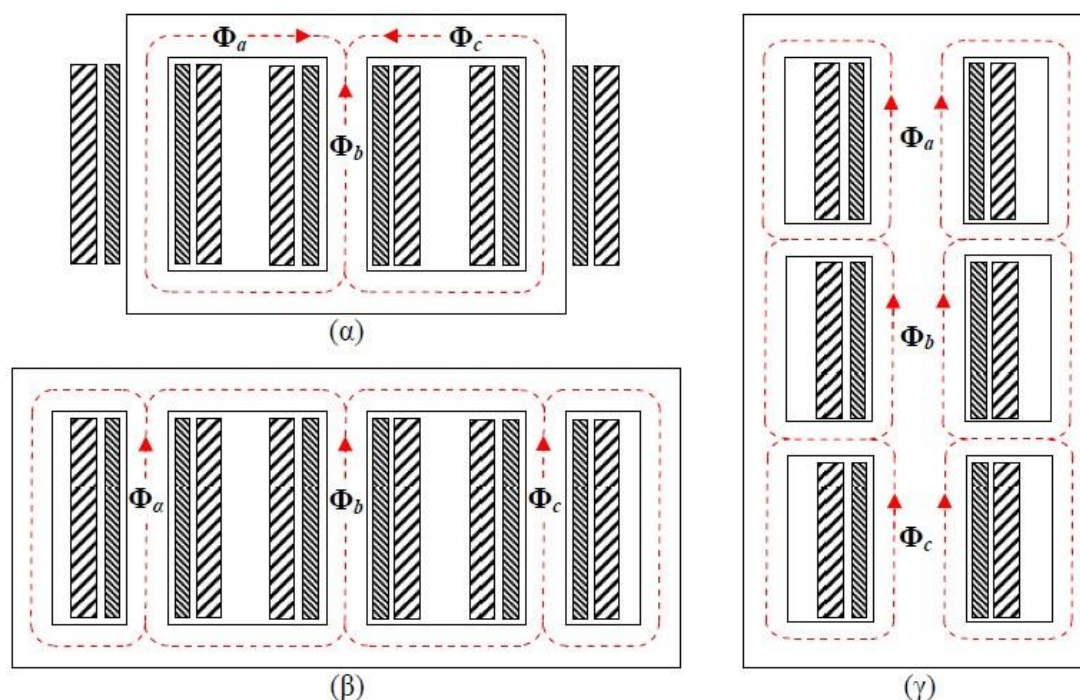
επιτυγχάνεται είτε με την παρεμβολή μονωτικού χαρτιού πάχους 0,02-0,03 mm, είτε με την επάλειψη μονωτικού φιλμ βερνικιού πάχους μερικών μm. Το πάχος των ελασμάτων αυτών κυμαίνεται από 0,25mm έως 0,50 mm. Ο πυρήνας του μετασχηματιστή αποτελείται από οριζόντια και κάθετα τμήματα. Τα οριζόντια τμήματα ονομάζονται ζυγώματα, ενώ τα κάθετα κορμοί και είναι τα τμήματα του μετασχηματιστή, στα οποία τοποθετούνται τα τυλίγματα. Συνήθως, το άνω ζύγωμα του μετασχηματιστή αποχωρίζεται από τον υπόλοιπο πυρήνα, ώστε να είναι εύκολη η τοποθέτηση των ηλεκτρικών τυλιγμάτων κατά την κατασκευή.

Ο μετασχηματιστής, ανάλογα με το είδος του πυρήνα, μπορεί να χωριστεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- Τύπου πυρήνα: Σε αυτήν την κατηγορία, ο πυρήνας αποτελείται από δύο κορμούς, όταν πρόκειται για μονοφασικό μετασχηματιστή, ενώ, όταν πρόκειται για τριφασικό μετασχηματιστή, ο πυρήνας αποτελείται από τρεις κορμούς. Στους κορμούς αυτούς είναι τοποθετημένα τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος.
- Τύπου μανδύα κελύφους: Σε αυτήν την κατηγορία, ο πυρήνας αποτελείται από τρεις κορμούς για ένα μονοφασικό μετασχηματιστή. Σε αυτό, τα τυλίγματα τοποθετούνται στο μεσαίο κορμό, ενώ το μαγνητικό κύκλωμα κλείνει δια μέσου των άλλων δύο κορμών, που μπορούν να έχουν την μισή διατομή από τον μεσαίο. Οι κορμοί σε έναν τριφασικό μετασχηματιστή τύπου μανδύα κελύφους μπορεί να είναι είτε τριών, είτε πέντε κορμών, ανάλογα με τη διαμόρφωσή του.



Εικόνα 3.4: Τομή μονοφασικού μετασχηματιστή τύπου α) πυρήνα β) μανδύα κελύφους [33].

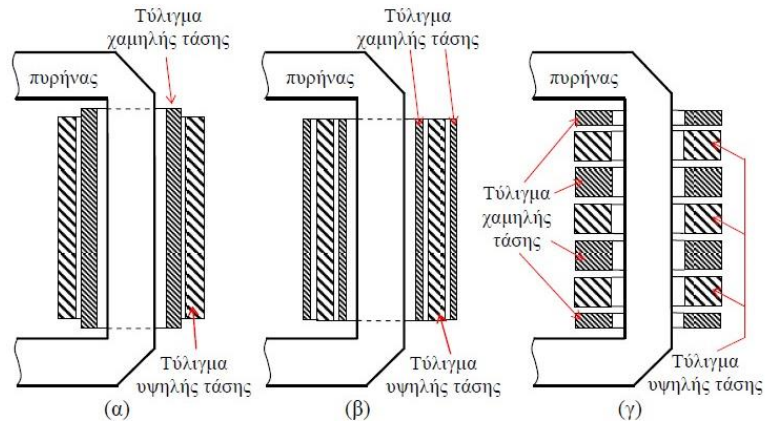


Εικόνα 3.5: Τομή τριφασικού μετασχηματιστή τύπου α) πυρήνα β) μανδύα κελύφους πέντε κορμών γ) μανδύα κελύφους τριών κορμών [33].

Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή κατασκευάζονται συνήθως από αλουμίνιο ή χαλκό κυλινδρικής διατομής από 0,2mm έως 4,1 mm. Επιπλέον, χρησιμοποιείται και η ορθογωνική διατομή, όπου οι συνηθέστερες διαστάσεις για τη μικρή πλευρά κυμαίνονται από 1,25mm έως 8mm, ενώ για τη μεγάλη πλευρά από 4mm έως 20mm. Τυλίγματα από συνεστραμμένους αγωγούς χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές υψηλών τάσεων, ενώ τυλίγματα από φύλλα χαλκού ή αλουμίνιου χρησιμοποιούνται σε χαμηλή τάση με μεγάλη ένταση ρεύματος. Κατά την κατασκευή ενός μετασχηματιστή πρέπει να δίνεται μεγάλη σημασία στις θερμικές και μηχανικές καταπονήσεις, που λαμβάνουν χώρα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή. Για αυτόν τον λόγο, η ένταση ρεύματος δεν πρέπει να ξεπερνά τα 4 A/mm^2 , όταν πρόκειται για ορθογώνιο αγωγό, ενώ για κυλινδρικό αγωγό τα 3 A/mm^2 , εφόσον η ψύξη τους πραγματοποιείται με λάδι. Όταν η ψύξη γίνεται με τη βοήθεια του αέρα, τότε η μέγιστη επιτρεπόμενη ένταση περιορίζεται στα 2 A/mm^2 . Τα τυλίγματα του μετασχηματιστή μονώνονται μεταξύ τους με κυριότερα μέσα μόνωσης αυτή του βερνικιού, χαρτιού, κάπρον, τέλερεν και υαλοβάμβακα.

Ο τρόπος περιέλιξης των τυλιγμάτων του μετασχηματιστή γύρω από τους κορμούς του πυρήνα αποτελεί κριτήριο για τη δημιουργία δύο μεγάλων κατηγοριών διαχωρισμού, οι οποίοι αναφέρονται παρακάτω:

- Κυλινδρικά ή σωληνωτά τυλίγματα: Σε αυτήν την κατηγορία, τα τυλίγματα τόσο του πρωτεύοντος όσο και του δευτερεύοντος τοποθετούνται σε κοινούς κορμούς. Η περιέλιξή τους πραγματοποιείται σε επίπεδα, όπως φαίνεται στο α και β της εικόνας 3.6.
- Δισκοειδή τυλίγματα: Σε αυτήν την κατηγορία, και τα δύο τυλίγματα τοποθετούνται σε κοινούς κορμούς. Παρόλα αυτά, δεν τοποθετούνται σε επίπεδα, όπως στα κυλινδρικά τυλίγματα, αλλά τμηματικά το ένα δίπλα στο άλλο εναλλάξ, δημιουργώντας, ουσιαστικά, πακέτα τυλιγμάτων, που ονομάζονται δίσκοι, όπως φαίνεται στο γ της εικόνας 3.6. [33 §2.2]



Εικόνα 3.6: Τομή κορμού μετασχηματιστή με τυλίγματα κυλινδρικού τύπου (α & β) και δισκοειδούς τύπου (γ) [33].

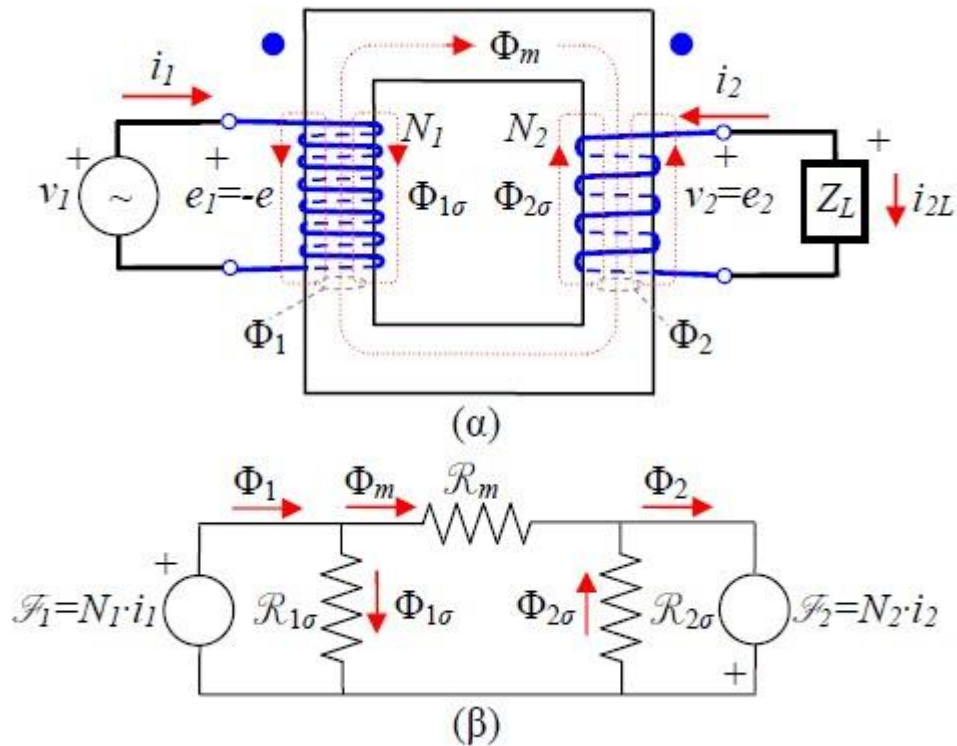
3.2.3 Πραγματικός Μ/Σ

Ένας μετασχηματιστής, από τη στιγμή, που κατασκευάζεται και λειτουργεί σε διάφορες εφαρμογές στην καθημερινότητα του ανθρώπου, δεν ακολουθεί την αρχή λειτουργίας ενός ιδανικού μετασχηματιστή. Οι μετασχηματιστές αυτοί ονομάζονται πραγματικοί και παρουσιάζουν κάποιες διαφορές από τους ιδανικούς.

Αρχικά, η μαγνητική ροή Φ_1 , που παράγεται από το πρωτεύον τυλίγμα, όταν αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, δε διέρχεται εξ ολοκλήρου από το σιδηρομαγνητικό υλικό του πυρήνα (Φ_m). Αντιθέτως, ένα μέρος της διέρχεται από τον αέρα. Η μαγνητική αυτή ροή ονομάζεται ροή σκέδασης $\Phi_{1\sigma}$. Το ίδιο ισχύει και για τη μαγνητική ροή Φ_2 , που αναπτύσσεται από τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος του δευτερεύοντος.

Αυτές οι μαγνητικές ροές συναντούν κάποια αντίσταση, η οποία οφείλεται στη φύση του υλικού, που διαρρέουν. Οι αντιστάσεις αυτές ονομάζονται μαγνητικές αντιστάσεις και συμβολίζονται με \mathcal{R} . Πιο συγκεκριμένα, η μαγνητική αντίσταση, που συναντούν οι ροές σκέδασης $\Phi_{1\sigma}$ και $\Phi_{2\sigma}$, οφείλεται στον αέρα και συμβολίζεται με $\mathcal{R}_{1\sigma}$ και $\mathcal{R}_{2\sigma}$ αντίστοιχα, ενώ η μαγνητική αντίσταση, που συναντά

η μαγνητική ροή Φ_m , οφείλεται στο σιδηρομαγνητικό υλικό και συμβολίζεται με \mathcal{R}_m . Όπως γίνεται αντιληπτό, οι μαγνητικές αντιστάσεις σκέδασης παρουσιάζουν μεγαλύτερη τιμή από τη μαγνητική αντίσταση του πυρήνα. Οι μαγνητικές αντιστάσεις σε ένα μαγνητικό κύκλωμα συμπεριφέρονται κατά αντιστοιχία με τις ωμικές αντιστάσεις ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Τα παραπάνω αποτυπώνονται στην εικόνα 3.7.



Εικόνα 3.7: α) Πραγματικός μονοφασικός μετασχηματιστής με προστιθέμενες μαγνητικές ροές, β) ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα [33].

Σύμφωνα με τον νόμο του Gauss, προκύπτει:

$$\Phi_1 = \Phi_{1\sigma} + \Phi_m \quad (\text{σχέση 3.35})$$

$$\Phi_2 = \Phi_{2\sigma} + \Phi_m \quad (\text{σχέση 3.36})$$

Σύμφωνα με το ισοδύναμο μαγνητικό κύκλωμα της εικόνας 3.7 και το νόμο του Kirchhoff, προκύπτει ότι:

$$-\mathcal{F}_1 + \Phi_{1\sigma} \cdot \mathcal{R}_{1\sigma} = 0 \Rightarrow N_1 \cdot i_1 = \Phi_{1\sigma} \cdot \mathcal{R}_{1\sigma} \quad (\text{σχέση 3.37})$$

$$-\mathcal{F}_2 + \Phi_{2\sigma} \cdot \mathcal{R}_{2\sigma} = 0 \Rightarrow N_2 \cdot i_2 = \Phi_{2\sigma} \cdot \mathcal{R}_{2\sigma} \quad (\text{σχέση 3.38})$$

$$-\Phi_{1\sigma} \cdot \mathcal{R}_{1\sigma} + \Phi_m \cdot \mathcal{R}_m - \Phi_{2\sigma} \cdot \mathcal{R}_{2\sigma} = 0 \Rightarrow N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = \Phi_m \cdot \mathcal{R}_m = \mathcal{F}_m \quad (\text{σχέση 3.39})$$

Στην περίπτωση, που θεωρηθεί, ότι η μαγνητεγερτική δύναμη \mathcal{F}_m παράγεται από το ρεύμα διέγερσης i_φ ανηγμένο στο πρωτεύον, τότε η σχέση 3.39 παίρνει τη μορφή:

$$N_1 \cdot i_1 + N_2 \cdot i_2 = N_1 \cdot i_\varphi \Rightarrow i_1 + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 = i_\varphi \Rightarrow i_1 + i'_2 = i_\varphi \quad (\text{σχέση 3.40})$$

Όπου:

i'_2 : ρεύμα δευτερεύοντος ανηγμένο στο πρωτεύον

Εάν το ρεύμα του δευτερεύοντος θεωρηθεί εξερχόμενο ως ρεύμα φορτίου, τότε η σχέση 3.40 θα πάρει τη μορφή:

$$i_1 = i'_{2L} + i_\varphi \quad (\text{σχέση 3.41})$$

Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday και λαμβάνοντας υπόψη, ότι το πηνίο κατασκευάζεται από αγωγό και παρουσιάζει μια ωμική αντίσταση R_1 , η τάση στα άκρα του πρωτεύοντος τυλίγματος ισούται:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_1}{dt} \quad (\text{σχέση 3.42})$$

Εάν γίνει αντικατάσταση της σχέσης 3.35 στη σχέση 3.42, προκύπτει ότι:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d(\Phi_{1\sigma} + \Phi_m)}{dt} = R_1 \cdot i_1 + N_1 \cdot \frac{d\Phi_{1\sigma}}{dt} + N_1 \cdot \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (\text{σχέση 3.43})$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης 3.43 αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση του αγωγού. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην πτώση τάσης, που εμφανίζεται στην αυτεπαγωγή σκέδασης του πρωτεύοντος τυλίγματος $L_{1\sigma}$. Ο τρίτος όρος αντιστοιχεί στην επαγωγική πτώση τάσης, που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου του πρωτεύοντος.

Η σχέση 3.43 μπορεί να γραφτεί ως:

$$v_1(t) = R_1 \cdot i_1 + L_{1\sigma} \cdot \frac{di_1}{dt} + e_1(t) \quad (\text{σχέση 3.44})$$

Όπου:

$$L_{1\sigma} = \frac{\lambda_{1\sigma}}{i_1} = \frac{N_1 \cdot \Phi_{1\sigma}}{i_1} = \frac{N_1^2}{R_{1\sigma}} \quad (\text{σχέση 3.45})$$

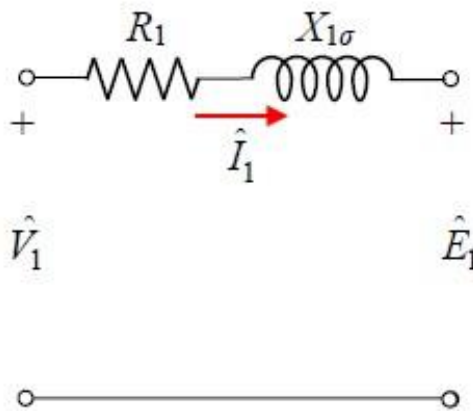
Η σχέση 3.44 μπορεί να γραφτεί στο πεδίο συχνοτήτων ως φασιθέτες:

$$\hat{V}_1 = R_1 \cdot \hat{I}_1 + j \cdot L_{1\sigma} \cdot \omega \cdot \hat{I}_1 + \hat{E}_1 = R_1 \cdot \hat{I}_1 + j \cdot X_{1\sigma} \cdot \hat{I}_1 + \hat{E}_1 \quad (\text{σχέση 3.46})$$

Όπου

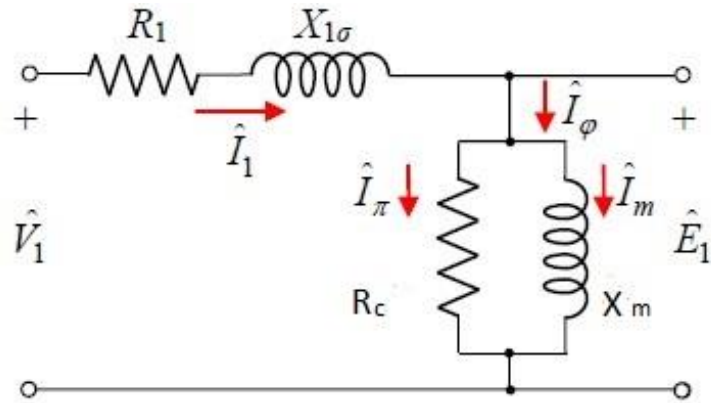
$X_{1\sigma}$: αντίδραση σκέδασης πρωτεύοντος τυλίγματος

Το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του πρωτεύοντος τυλίγματος με βάση τα παραπάνω παίρνει τη μορφή της εικόνας 3.8.



Εικόνα 3.8: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πρωτεύοντος τυλίγματος πραγματικού Μ/Σ [33].

Σύμφωνα με τη σχέση 3.41, το ρεύμα του πρωτεύοντος τυλίγματος i_1 διασπάται σε δύο μέρη: το ρεύμα διέγερσης i_φ και το ρεύμα δευτερεύοντος i_2' ανηγμένου στο πρωτεύον. Το ρεύμα διέγερσης χωρίζεται και αυτό σε δύο συνιστώσες. Η πρώτη συνιστώσα είναι το ρεύμα μαγνήτισης $i_m(t)$, ενώ η δεύτερη συνιστώσα είναι το ρεύμα απωλειών πυρήνα $i_\pi(t)$. Η συνιστώσα του ρεύματος μαγνήτισης συσχετίζεται με τη μαγνητική αντίσταση του πυρήνα, ενώ το ρεύμα απωλειών πυρήνα συσχετίζεται με τις απώλειες δινορευμάτων και υστέρησης. Το ισοδύναμο κύκλωμα της εικόνας 3.8 με το συνδυασμό του εγκαρσίου κλάδου μαγνήτισης λαμβάνει τη μορφή της εικόνας 3.9



Εικόνα 3.9: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πρωτεύοντος με κλάδο μαγνήτισης πραγματικού Μ/Σ [33].

Στο δευτερεύον τύλιγμα πραγματοποιείται η ίδια διαδικασία με αυτή του πρωτεύοντος. Σύμφωνα με τον νόμο του Faraday, σε συνδυασμό με την πτώση τάσης στην ωμική αντίσταση που παρουσιάζει ο αγωγός, ισχύει ότι:

$$v_2(t) = R_2 \cdot i_2 + N_2 \cdot \frac{d\Phi_{2\sigma}}{dt} + N_2 \cdot \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (\text{σχέση 3.47})$$

Ο πρώτος όρος της σχέσης 3.47 αντιστοιχεί στην πτώση τάσης πάνω στην ωμική αντίσταση του αγωγού. Ο δεύτερος όρος αντιστοιχεί στην πρώτη τάσης που εμφανίζεται στην αυτεπαγωγή σκέδασης του δευτερεύοντος τυλίγματος $L_{2\sigma}$. Ενώ ο τρίτος όρος αντιστοιχεί στην επαγωγική πτώση τάσης που εμφανίζεται στα άκρα του πηνίου του δευτερεύοντος.

Η σχέση 3.47 μπορεί να γραφτεί ως:

$$v_2(t) = R_2 \cdot i_2 + L_{2\sigma} \cdot \frac{di_2}{dt} + e_2(t) \quad (\text{σχέση 3.48})$$

Όπου:

$$L_{2\sigma} = \frac{\lambda_{2\sigma}}{i_2} = \frac{N_2 \cdot \Phi_{2\sigma}}{i_2} = \frac{N_2^2}{R_{2\sigma}} \quad (\text{σχέση 3.49})$$

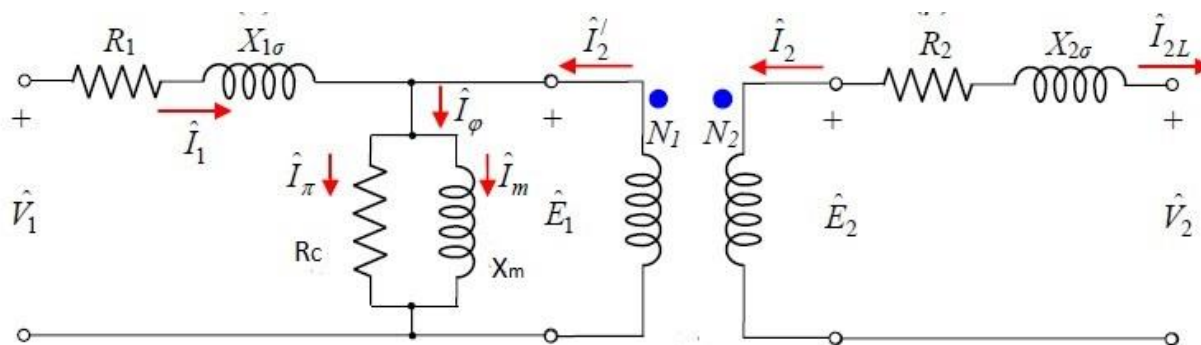
Η σχέση 3.48 μπορεί να γραφτεί στο πεδίο συχνοτήτων ως φασιθέτες:

$$\hat{V}_2 = R_2 \cdot \hat{I}_2 + j \cdot L_{2\sigma} \cdot \omega \cdot \hat{I}_2 + \hat{E}_2 = R_2 \cdot \hat{I}_2 + j \cdot X_{2\sigma} \cdot \hat{I}_2 + \hat{E}_2 \quad (\text{σχέση 3.50})$$

Όπου

$X_{2\sigma}$: αντίδραση σκέδασης δευτερεύοντος τυλίγματος

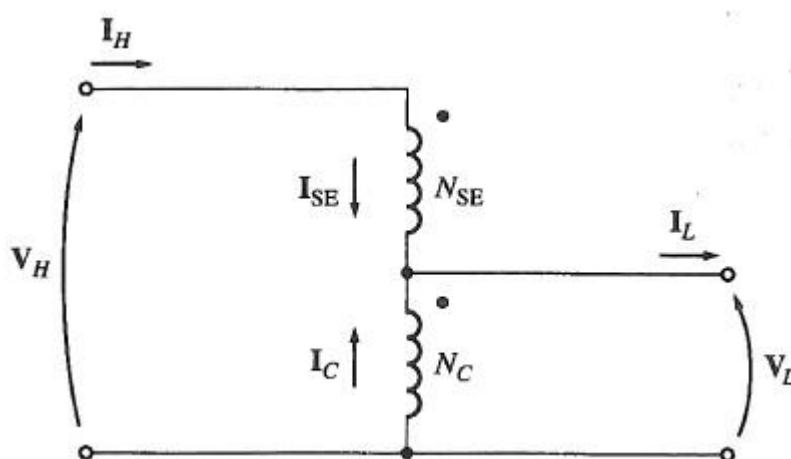
Με βάση τα παραπάνω το συνολικό ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα ενός πραγματικού μετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 3.10. [33 §2.5.1, 2.5.2]



Εικόνα 3.10: Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα πραγματικού Μ/Σ [33].

3.2.4 Αυτομετασχηματιστής

Ο αυτομετασχηματιστής είναι ένας απλός μετασχηματιστής, στον οποίο υπάρχει ένα τύλιγμα. Ουσιαστικά τα δυο τυλίγματα πρωτεύον και δευτερεύον, που υπάρχουν στους κοινούς μετασχηματιστές, συνδέονται σε σειρά μεταξύ τους. Αν και εσωτερικά υπάρχει ένα κοινό τύλιγμα, εξωτερικά υπάρχουν ακροδέκτες για υψηλή και χαμηλή τάση. Η τάση του ενός τυλίγματος, εκ των δυο είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων των τυλιγμάτων που βρίσκονται σε σειρά. Το τύλιγμα που συμμετέχει και στις δυο τάσεις (εισόδου – εξόδου) ονομάζεται κοινό, ενώ το άλλο τύλιγμα ονομάζεται σειράς, διότι συνδέεται σε σειρά με το κοινό τύλιγμα. Η συνδεσμολογία ενός αυτομετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 3.11.



Εικόνα 3.11: Συνδεσμολογία αυτομετασχηματιστή υποβιβασμού [4].

Ένας αυτομετασχηματιστής λειτουργεί ως ανύψωσης και ως υποβιβασμού τάσης, ακριβώς όπως και ένας απλός μετασχηματιστής.

Η τάση που επικρατεί στα άκρα του κοινού τυλίγματος συμβολίζεται με V_C , ενώ το ρεύμα που το διαρρέει συμβολίζεται με I_C . Αντίστοιχα, η τάση που επικρατεί στα άκρα του τυλίγματος σειράς συμβολίζεται με V_{SE} , ενώ το ρεύμα που το διαρρέει συμβολίζεται με I_{SE} . Ένας αυτομετασχηματιστής παρουσιάζει ένα ζευγάρι άκρων με υψηλότερη διαφορά δυναμικού, η οποία αναγράφεται με V_H , ενώ το αντίστοιχο ρεύμα με I_H . Το άλλο ζευγάρι άκρων του αυτομετασχηματιστή παρουσιάζει μικρότερη διαφορά δυναμικού, η οποία αναγράφεται με V_L και το αντίστοιχο ρεύμα με I_L .

Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων που επικρατούν στα άκρα των τυλιγμάτων δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{V_C}{V_{SE}} = \frac{N_C}{N_{SE}} \quad (\text{σχέση 3.51})$$

Όπου:

N_C : αριθμός σπειρών κοινού τυλίγματος.

N_{SE} : αριθμός σπειρών τυλίγματος σειράς.

Οι σχέσεις μεταξύ των ρευμάτων που διαρρέουν τα τυλίγματα του αυτομετασχηματιστή δίνονται από τον παρακάτω τύπο:

$$N_C \cdot I_C = N_{SE} \cdot I_{SE} \quad (\text{σχέση 3.52})$$

Οι σχέσεις μεταξύ των τάσεων που επικρατούν στα άκρα του αυτομετασχηματιστή, σε σχέση με τις τάσεις στα άκρα των τυλιγμάτων δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$V_L = V_C \quad (\text{σχέση 3.53})$$

$$V_H = V_C + V_{SE} \quad (\text{σχέση 3.54})$$

Κατά αντιστοιχία και τα ρεύματα εισόδου και εξόδου, σε σχέση με τα ρεύματα που διαρρέουν τα τυλίγματα του αυτομετασχηματιστή δίνονται από τους παρακάτω τύπους:

$$I_L = I_C + I_{SE} \quad (\text{σχέση 3.55})$$

$$I_H = I_{SE} \quad (\text{σχέση 3.56})$$

Εάν όμως η σχέση 3.51 εκφραστεί ως προς τον όρο V_{SE} και στη συνέχεια αντικατασταθεί στην σχέση 3.54 προκύπτει:

$$V_H = V_C + \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot V_C \quad (\text{σχέση 3.57})$$

Από τη σχέση 3.53 το $V_C = V_L$ οπότε η σχέση 3.57 μπορεί να γραφτεί ως:

$$V_H = V_L + \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot V_L = \frac{V_L \cdot (N_C + N_{SE})}{N_C} \Rightarrow \frac{V_L}{V_H} = \frac{N_C}{N_C + N_{SE}} \quad (\text{σχέση 3.58})$$

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για τα ρεύματα των τυλιγμάτων. Εάν η σχέση 3.52 εκφραστεί ως προς τον όρο I_C και στη συνέχεια αντικατασταθεί στην εξίσωση 3.55 προκύπτει:

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot I_{SE} + I_{SE} \quad (\text{σχέση 3.59})$$

Από τη σχέση 3.56 το $I_H = I_{SE}$ οπότε η σχέση 3.59 μπορεί να γραφτεί ως:

$$I_L = \frac{N_{SE}}{N_C} \cdot I_H + I_H = \frac{I_H \cdot (N_{SE} + N_C)}{N_C} \Rightarrow \frac{I_L}{I_H} = \frac{N_C + N_{SE}}{N_C} \quad (\text{σχέση 3.60})$$

Οι αυτομετασχηματιστές χρησιμοποιούνται, κατά κύριο λόγο σε εφαρμογές, που η τάση στην είσοδο έχει μικρή διαφορά από την τάση στην έξοδο. Σε αυτές τις εφαρμογές είναι δαπανηρή η κατασκευή απλού μετασχηματιστή, που ουσιαστικά θα διαθέτει περίπου ίδιο αριθμό σπειρών στο πρωτεύον και στο δευτερεύον, ώστε να επιτύχει μια μικρή διαφορά στην τιμή της τάσης.[4 §2.9]

3.2.5 Μετασχηματιστής μετρήσεων

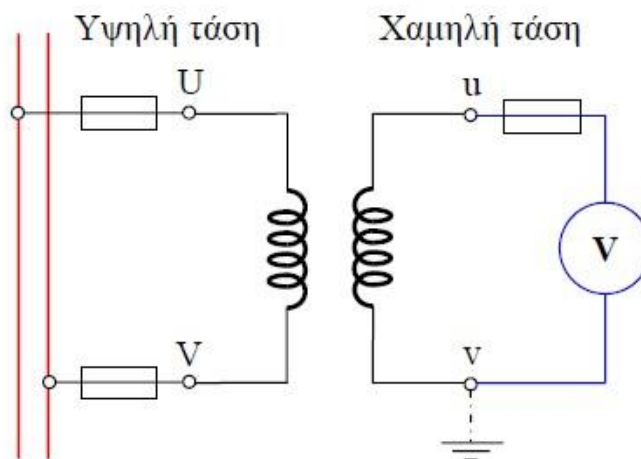
Οι μετασχηματιστές μετρήσεων είναι απλοί μετασχηματιστές με ειδικό τύπο περιέλιξης, ώστε να μεταβιβάζουν στο δευτερεύον τύλιγμα ένα μετασχηματισμένο δείγμα του μετρούμενου μεγέθους. Τα συνηθέστερα μετρούμενα μεγέθη είναι η τάση και η ένταση ηλεκτρικού ρεύματος. Γι' αυτό τον λόγο, οι μετασχηματιστές αυτοί χωρίζονται σε δυο κατηγορίες:

- Μετασχηματιστής τάσης: Ο μετασχηματιστής αυτός είναι μονοφασικός μικρής ισχύος, δηλαδή μεταφέρει μικρή ποσότητα ισχύος από το πρωτεύον στο δευτερεύον τύλιγμα, η οποία είναι απαραίτητη για τη λειτουργία του οργάνου που συνδέεται σε αυτό. Το όργανο που συνδέεται στο δευτερεύον είναι το βολτόμετρο. Ουσιαστικά αυτού του είδους ο μετασχηματιστής λειτουργεί εν κενώ φορτιού στο δευτερεύον τύλιγμα, διότι το βολτόμετρο παρουσιάζει πολύ μεγάλη ωμική αντίσταση. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η τοποθέτηση ασφαλιστικών διατάξεων και στα δύο τυλίγματα, ώστε να αποφευχθεί τυχόν βραχυκύκλωμα. Το πρωτεύον και το δευτερεύον τύλιγμα τοποθετούνται σε διαφορετικούς κορμούς για τέλεια γαλβανική απομόνωση. Ένα πολύ

σημαντικό χαρακτηριστικό αυτών των μετασχηματιστών είναι η κλάση που έχει καθοριστεί για τις συσκευές μετρήσεων. Η κλάση παρουσιάζει το ποσοστό σφάλματος, που μπορεί να προκύψει κατά τη διάρκεια του μετασχηματισμού. Το σφάλμα αυτό αφορά το μέτρο της τάσης F_u , αλλά και της γωνίας F_ϕ . Η σχέση προσδιορισμού του σφάλματος στο μέτρο της τάσης δίνεται από την παρακάτω σχέση : [33 §2.12.3, 4 §2.13]

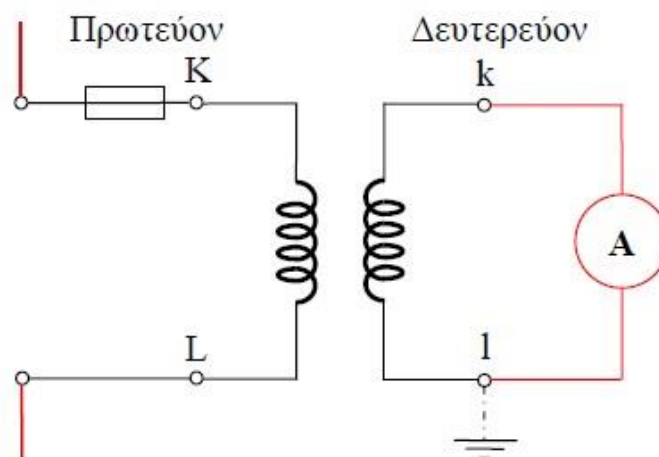
$$F_u = \frac{a \cdot \tilde{V}_2 - \tilde{V}_1}{\tilde{V}_1} \cdot 100\% \quad (\text{σχέση 3.61})$$

Μια ενδεικτική συνδεσμολογία ενός μετασχηματιστή τάσης με συνδεδεμένο βολτόμετρο στη μεριά του δευτερεύοντος φαίνεται στην εικόνα 3.12.

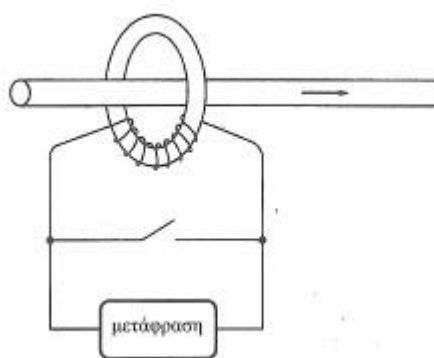


Εικόνα 3.12: Συνδεσμολογία Μ/Σ τάσης με βολτόμετρο [33].

- Μετασχηματιστής έντασης: Ο μετασχηματιστής αυτός είναι μονοφασικός ειδικής κατασκευής, διότι είναι σχεδιασμένος να λειτουργεί με βραχυκυκλωμένο δευτερεύον. Αυτό συμβαίνει, διότι στο δευτερεύον τύλιγμα συνδέεται αμπερόμετρο, το οποίο παρουσιάζει πολύ μικρή (σχεδόν μηδενική) ωμική αντίσταση. Λόγω των παραπάνω, είναι απαραίτητο στον μετασχηματιστή έντασης να εξασφαλίζεται, ότι και με απουσία του οργάνου μέτρησης, το δευτερεύον θα παραμένει βραχυκυκλωμένο. Γι' αυτό τον λόγο, ο μετασχηματιστής αυτός λειτουργεί με την βοήθεια κάποιων αυτοματισμών, οι οποίοι εξασφαλίζουν ότι με την αποσύνδεση του οργάνου θα συνδεθεί αυτόματα μια γέφυρα βραχυκύκλωσης. Οι μετασχηματιστές αυτοί χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές για μέτρηση έντασης ρεύματος, που είναι πολύ μεγάλη και τα όργανα δεν είναι δυνατό να μετρήσουν απευθείας. Γι' αυτό τον λόγο, τοποθετώντας τέτοιου είδους μετασχηματιστή ουσιαστικά διευρύνεται η μετρητική ικανότητα των οργάνων, σύμφωνα με τον λόγο μετασχηματισμού. Η συνδεσμολογία τέτοιου είδους μετασχηματιστή φαίνεται στην εικόνα 3.12 και 3.13. [33 §2.12.3, 4 §2.13]



Εικόνα 3.13: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης με αμπερόμετρο [33].



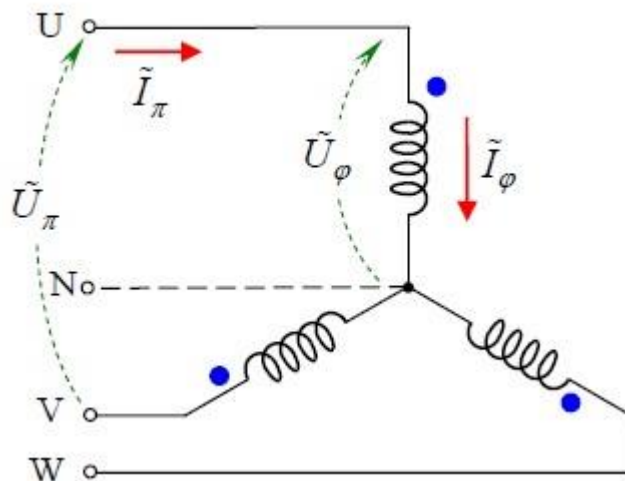
Εικόνα 3.14: Συνδεσμολογία μετασχηματιστή έντασης χωρίς τη διακοπή του κυκλώματος [4].

3.2.6 Τριφασικός μετασχηματιστής

Η κατασκευή των τριφασικών μετασχηματιστών μπορεί να πραγματοποιηθεί, είτε με την κατάλληλη σύνδεση μονοφασικών μετασχηματιστών, είτε από την κατασκευή ολόσωμων τριφασικών μετασχηματιστών έξι τυλιγμάτων. Όπως γίνεται αντιληπτό, στους ολόσωμους μετασχηματιστές, τα μαγνητικά κυκλώματα των τριών φάσεων αλληλοσυνδέονται, ενώ κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει στην συστοιχία των μονοφασικών μετασχηματιστών. Κάποια από τα πλεονέκτημα του ολόσωμου τριφασικού μετασχηματιστή, έναντι της συστοιχίας των μονοφασικών είναι ο μικρότερος όγκος και ταυτόχρονα το μικρότερο βάρος. Συνεπώς, λόγω των παραπάνω, το κατασκευαστικό κόστος είναι μικρότερο για τους ολόσωμους τριφασικούς μετασχηματιστές. Ένα από τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν οι συστοιχίες των μονοφασικών μετασχηματιστών είναι η ευκολότερη επισκευή σε περίπτωση βλάβης, καθώς είναι ευκολότερη η απομάκρυνση μεμονωμένου μονοφασικού μετασχηματιστή από το δίκτυο. [16 §3.15]

Οι τριφασικοί ολόσωμοι μετασχηματιστές διαθέτουν έξι τυλίγματα. Τα τρία τυλίγματα αποτελούν τα πρωτεύοντα τυλίγματα κάθε φάσης του μετασχηματιστή, ενώ τα υπόλοιπα τρία αποτελούν τα δευτερεύοντα τυλίγματά του. Οι συνδεσμολογίες που μπορούν να πραγματοποιηθούν μεταξύ των τυλιγμάτων ανεξάρτητα αν ανήκουν στο πρωτεύον ή στο δευτερεύον είναι οι εξής :

- Συνδεσμολογία αστέρα: Σε αυτήν τη συνδεσμολογία το ένα άκρο κάθε πηνίου συνδέεται σε έναν κοινό κόμβο. Αυτός ο κόμβος αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα αυτής της συνδεσμολογίας, διότι σε δίκτυα χαμηλής τάσης υπάρχει σύνδεση ουδέτερου, ώστε να εξυπηρετούνται μονοφασικές καταναλώσεις. Η συνδεσμολογία αυτή φαίνεται στην εικόνα 3.15.



Εικόνα 3.15: Συνδεσμολογία τριγώνου [33].

Οι σχέσεις που προκύπτουν για αυτήν τη συνδεσμολογία είναι οι παρακάτω:

Η ενεργός τιμή φασικής τάσης (μεταξύ φάσης και ουδέτερου κόμβου), όταν η εφαρμοζόμενη τάση είναι της μορφής $u(t) = U_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$$\tilde{U}_\varphi = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{max}}{2} \quad (\text{σχέση 3.62})$$

Η ενεργός τιμή της πολικής τάσης (μεταξύ δυο φάσεων) δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{U}_\pi = \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_\varphi \quad (\text{σχέση 3.63})$$

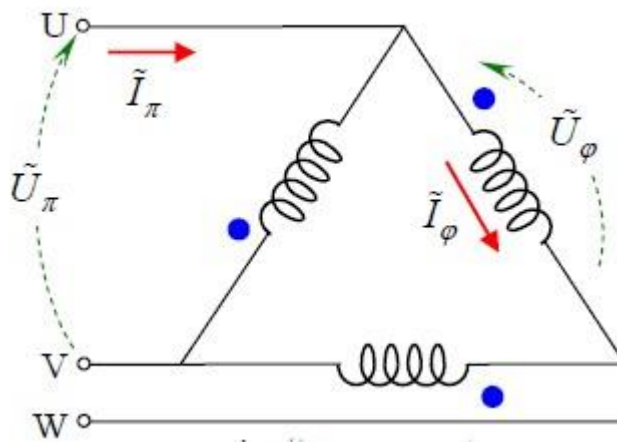
Σύμφωνα με την εικόνα 3.15, το ρεύμα που διαρρέει τη γραμμή είναι κοινό με το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του πηνίου άρα ισχύει ότι:

$$\tilde{I}_\varphi = \tilde{I}_\pi \quad (\text{σχέση 3.63})$$

Η συνολική φαινόμενη ισχύς της συνδεσμολογίας δίνεται από τη σχέση:

$$|S_{3\varphi}| = 3 \cdot \tilde{U}_{\varphi} \cdot \tilde{I}_{\varphi} = \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_{\pi} \cdot \tilde{I}_{\pi} \quad (\text{σχέση 3.64})$$

- Συνδεσμολογία τριγώνου: Σε αυτήν τη συνδεσμολογία το τέλος του κάθε πηνίου συνδέεται με την αρχή του επόμενου, σχηματίζοντας ένα τρίγωνο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3.16. Στα σημεία σύνδεσης των πηνίων συνδέονται και οι γραμμές του τριφασικού δικτύου. Σε αυτήν την περίπτωση, όπως φαίνεται, δεν υπάρχει σημείο σύνδεσης του ουδέτερου κόμβου, συνεπώς δεν υπάρχει δυνατότητα τροφοδότησης μονοφασικών καταναλώσεων. Παρόλα αυτά, η συνδεσμολογία αυτή προσφέρει ομοιόμορφη φόρτιση όταν υπάρχουν ασύμμετρες καταναλώσεις.



Εικόνα 3.16: Συνδεσμολογία τριγώνου [33].

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τη συνδεσμολογία αυτή είναι οι παρακάτω:

Σύμφωνα με την εικόνα 3.16, η ενεργός τιμή της φασικής τάσης \tilde{U}_{φ} είναι ίδια με την ενεργό τιμή της πολικής τάσης \tilde{U}_{π} , δηλαδή:

$$\tilde{U}_{\pi} = \tilde{U}_{\varphi} \quad (\text{σχέση 3.65})$$

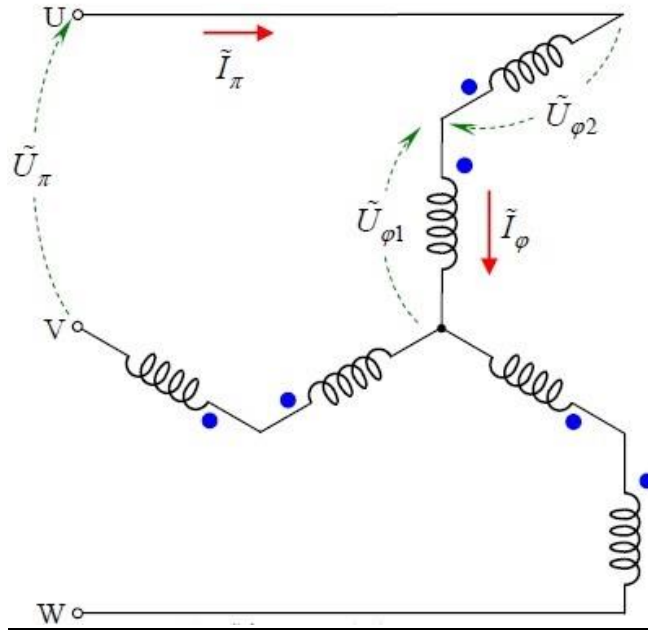
Η ενεργός τιμή του ρεύματος γραμμής (πολικό ρεύμα) \tilde{I}_{π} είναι διαφορετική από την ενεργό τιμή του ρεύματος που διαρρέει το κάθε πηνίο (φασικό ρεύμα) \tilde{I}_{φ} και δίνεται από τη σχέση:

$$\tilde{I}_{\pi} = \sqrt{3} \cdot \tilde{I}_{\varphi} \quad (\text{σχέση 3.66})$$

Η φαινόμενη ισχύς της συνδεσμολογίας αυτής είναι ίδια με αυτήν της συνδεσμολογίας αστέρα και δίνεται από τη σχέση:

$$|S_{3\phi}| = 3 \cdot \tilde{U}_\phi \cdot \tilde{I}_\phi = \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_\pi \cdot \tilde{I}_\pi \quad (\text{σχέση 3.67})$$

- Συνδεσμολογία ζιγκ – ζαγκ ή τεθλασμένου αστέρα: Σε αυτήν τη συνδεσμολογία κάθε πηνίο μιας φάσης αποτελείται από δύο επιμέρους τυλίγματα, τα οποία είναι τοποθετημένα σε διαφορετικούς κορμούς και το ένα εκ των οποίων έχει αντίθετη μαγνητική πολικότητα. Η συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα φαίνεται στην εικόνα 3.17.



Εικόνα 3.17: Συνδεσμολογία τεθλασμένου αστέρα [33].

Οι σχέσεις που προκύπτουν σε αυτήν τη συνδεσμολογία είναι οι παρακάτω:

Τα επιμέρους τυλίγματα διαθέτουν ίδιο αριθμό σπειρών και γι' αυτόν τον λόγο οι επιμέρους ενεργές τιμές τάσης είναι ίδιες, δηλαδή:

$$\tilde{U}_{\phi 1} = \tilde{U}_{\phi 2} \quad (\text{σχέση 3.68})$$

Η συνολική τιμή ενεργού τάσης της μια φάσης ισούται με:

$$\tilde{U}_\phi = 0.5 \cdot \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_{\phi 1} \quad (\text{σχέση 3.69})$$

Η αντίστοιχη ενεργός τιμή πολικής τάσης ισούται με:

$$\tilde{U}_\pi = \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_\phi \quad (\text{σχέση 3.70})$$

Το ρεύμα γραμμής (πολικό) είναι αυτό που διαρρέει το τύλιγμα του πηνίου (φασικό), δηλαδή ισχύει:

$$\tilde{I}_\varphi = \tilde{I}_\pi \quad (\text{σχέση 3.71})$$

Η συνολική φαινόμενη ισχύς ισούται:

$$|S_{3\varphi}| = 3 \cdot \tilde{U}_\varphi \cdot \tilde{I}_\varphi = \sqrt{3} \cdot \tilde{U}_\pi \cdot \tilde{I}_\pi \quad (\text{σχέση 3.72})$$

Σύμφωνα με τις συνδεσμολογίες που αναλυθήκαν παραπάνω, ένας ολόσωμος τριφασικός μετασχηματιστής μπορεί να συνδυάζει διάφορες συνδεσμολογίες. Ανάλογα με τη χρήση του μπορεί να διαθέτει διαφορετική συνδεσμολογία στο πρωτεύον και διαφορετική στο δευτερεύον. [33 §2.14.3]

3.2.7 Παραλληλισμός μετασχηματιστών

Δύο ή περισσότεροι μετασχηματιστές λειτουργούν παράλληλα όταν τα επιμέρους τυλίγματα τους (πρωτεύον – δευτερεύον) συνδέονται παράλληλα. Αρχικά με τη σύνδεση αυτή επιτυγχάνεται αύξηση του φορτίου που μπορεί να τροφοδοτηθεί. Επιπρόσθετα δεν είναι αναγκαίο η κατασκευή μεγάλων μετασχηματιστών, όπου το κόστος και το μέγεθος είναι αυξημένο. Τέλος η λειτουργία παράλληλων μετασχηματιστών σε ένα δίκτυο αποτελεί μια δικλείδα ασφάλειας, ώστε σε πιθανή βλάβη το φορτίο να συνεχίσει να τροφοδοτείται από τους εναπομείναντες εν λειτουργία μετασχηματιστές. Ο παραλληλισμός μετασχηματιστών μπορεί να πραγματοποιηθεί και στους μονοφασικούς, αλλά και στους τριφασικούς, όταν πληρούνται οι απαραίτητες προϋποθέσεις.

Στους μονοφασικούς μετασχηματιστές πρέπει να πληρούνται τα παρακάτω:

- Ορθή πολικότητα και ίδιες ονομαστικές τάσεις: Σε αυτήν την περίπτωση τα τυλίγματα των δυο η περισσότερων μετασχηματιστών που πρόκειται να συνδεθούν παράλληλα, πρέπει να συνδεθούν στους κατάλληλους ζυγούς με την ορθή πολικότητα. Επιπλέον οι μετασχηματιστές που είναι προς παραλληλισμό πρέπει να συνδέονται σε ζυγούς, που διαθέτουν την ονομαστική τάση λειτουργίας. Σε διαφορετική περίπτωση υπάρχει κίνδυνος διάσπασης των μονώσεων, εάν η τάση είναι υψηλότερη από την ονομαστική ή οι μετασχηματιστές θα λειτουργούν με μειωμένη ονομαστική ισχύ, εάν η τάση είναι μικρότερη από την ονομαστική.
- Διαμοιρασμός του φορτίου ανάλογα με την ικανότητα: Όταν οι μετασχηματιστές που συνδέονται παράλληλα δεν διαθέτουν όλοι την ίδια ικανότητα φόρτισης, τότε οι μετασχηματιστές με τη μικρότερη ικανότητα μπορεί να οδηγηθούν σε υπερφόρτιση. Ταυτόχρονα αν ένας μετασχηματιστής δεν λάβει το απαιτούμενο ελάχιστο φορτίο, τότε υπολειτουργεί και δεν αναπτύσσει την απαιτούμενη θερμοκρασία. Γι' αυτόν τον λόγο με την προσθήκη κατάλληλων

σύνθετων αντιστάσεων υπάρχει δυνατότητα διαμοιρασμού του φορτιού ανάλογα με τις ικανότητες κάθε μετασχηματιστή.

- Τρεις σχέσεις μεταφοράς: Οι μετασχηματιστές που συνδέονται παράλληλα πρέπει να διαθέτουν ίδιους λόγους μετασχηματισμού. Στην περίπτωση που οι μετασχηματιστές τροφοδοτούνται από την ίδια ονομαστική τάση και ο λόγος μετασχηματισμού είναι άνισος, τότε η τάση του δευτερεύοντος θα διαφέρει.
- Τσοι λόγοι ισοδύναμων αντιδράσεων προς αντιστάσεις: Η συνθήκη αυτή είναι επιθυμητή, αλλά όχι αναγκαία. Σε αυτή την περίπτωση εάν ο λόγος X/R και στους δυο μετασχηματιστές δεν είναι ίδιος, τότε τα ρεύματα δεν είναι συμφασικά. Συνεπώς η συνολική φαινόμενη ισχύς των μετασχηματιστών που λειτουργούν παράλληλα, είναι μικρότερη από τη συνολική φαινόμενη ισχύ των μετασχηματιστών εάν λειτουργούσαν μεμονωμένα.

Στους τριφασικούς ολόσωμους μετασχηματιστές πρέπει να πληρούνται οι παρακάτω συνθήκες:

- Ορθή πολικότητα: Είναι απαραίτητο σε όλους τους μετασχηματιστές που συνδέονται παράλληλα να εξασφαλίζεται η ορθή πολικότητα, όπως και στους μονοφασικούς.
- Τδια ακολουθία φάσεων: Είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται η ίδια διαδοχή φάσεων σε όλους τους μετασχηματιστές που πρόκειται να λειτουργήσουν παράλληλα, διότι υπάρχει κίνδυνος βραχυκύκλωσης μεταξύ φάσεων.
- Τδια ομάδα ζεύξης: Σε όλους τους μετασχηματιστές που πρόκειται να λειτουργήσουν παράλληλα, πρέπει να εξασφαλίζεται ότι η επαγόμενη τάση στο δευτερεύον τους δεν θα διαθέτει διαφορά φάσης από τον έναν μετασχηματιστή στον άλλο. Ειδάλλως υπάρχει κίνδυνος βραχυκύκλωσης.
- Τδιες ονομαστικές τάσεις
- Τσοι λόγοι μετασχηματισμού
- Τσοι λόγοι ισοδύναμων αντιδράσεων προς αντιστάσεις
- Διαμοιρασμός του φορτιού ανάλογα με την ικανότητα [10 §6]

3.2.8 Μετασχηματιστές σε αεροπλάνα

Οι μετασχηματιστές είναι οι ηλεκτρικές συσκευές που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στα αεροπλάνα. Λόγω του μεγάλου βαθμού απόδοσης, καθώς και της περιορισμένης συντήρησης, χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που είναι απαραίτητος ο μετασχηματισμός των ηλεκτρικών μεγεθών (τάση – ένταση) του εναλλασσόμενου ρεύματος. Κάθε αεροπλάνο για τη λειτουργία του διαθέτει εναλλασσόμενη τάση τιμής 115V/200V - 400Hz, η οποία δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθεί σε όλες της εφαρμογές. Αρκετά συστήματα όπως ηλεκτρονικές διατάξεις, φωτισμός και αισθητήρες απαιτούν

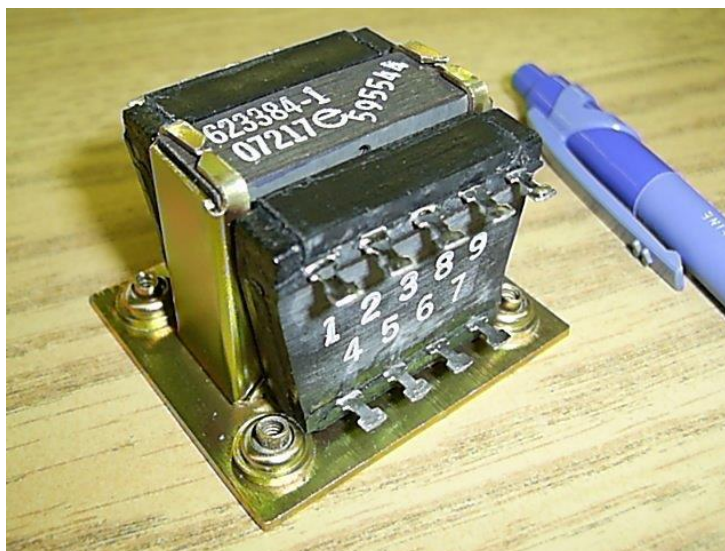
Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

εναλλασσόμενη τάση μικρότερης τιμής. Επιπλέον για λόγους ασφαλείας διάφορα συστήματα στα οποία υπάρχει χειρισμός που εμπλέκεται ανθρώπινος παράγοντας είναι απαραίτητο να γίνεται με τάση μικρότερης τιμής. Επίσης ο μετασχηματιστής αποτελεί και το πρώτο στάδιο της διαδικασίας μετατροπής του εναλλασσόμενου ρεύματος σε συνεχές (γραμμικός ανορθωτής).

Μια ακόμα εξίσου σημαντική εφαρμογή των μετασχηματιστών στα αεροπλάνα είναι οι μετασχηματιστές τάσης και έντασης. Οι μετασχηματιστές αυτοί χρησιμοποιούνται για την ένδειξη εναλλασσόμενης τιμής τάσης και ρεύματος σε καίρια σημεία του αεροσκάφους. Τέτοια σημεία είναι η έξοδος εναλλασσόμενης γεννήτριας, παροχή εναλλασσόμενης εξωτερικής πηγής καθώς και κύριοι ζυγοί του αεροπλάνου.



Εικόνα 3.18: Μετασχηματιστές έντασης σε αεροπλάνο.



Εικόνα 3.19: Μετασχηματιστής αεροπλάνου 400Hz πολλών λήξεων.

3.3 Ανορθωτικές διατάξεις (AC to DC)

Η πρωτογενής παραγωγή ισχύος πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο από AC τάση. Παρόλα αυτά πολλές εφαρμογές απαιτούν τη χρήση DC τάσης. Συνεπώς είναι απαραίτητη η μετατροπή των μεγεθών, διότι η τοπική παραγωγή DC τάσης είναι οικονομικά και τεχνικά ασύμφορη. Με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών ισχύος, η διαδικασία της μετατροπής των ηλεκτρικών μεγεθών από εναλλασσόμενα σε συνεχή έγινε οικονομικά συμφέρουσα, με μεγάλο βαθμό απόδοσης και δυνατότητα παροχής ισχύος μεγάλης τιμής. Οι ανορθωτικές διατάξεις χωρίζονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες οι οποίες είναι:

- Μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις.
- Ανορθωτικές διατάξεις ελεγχόμενες από τη φάση.

3.3.1 Μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις

Η ανόρθωση της ac τάσης σε dc τάση με μη ελεγχόμενο τρόπο γίνεται με τη βοήθεια διόδων. Σε αυτές τις ανορθωτικές διατάξεις η ροή ισχύος πραγματοποιείται μόνο από την ac πλευρά (είσοδος) προς την dc (έξοδος). Πολλά ηλεκτρονικά συστήματα ισχύος όπως είναι τα διακοπτικά dc τροφοδοτικά, τα ac κινητήρια συστήματα, καθώς και οι dc σερβομηχανισμοί χρησιμοποιούν τέτοιου είδους μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις. Με την εξέλιξη των ηλεκτρονικών ισχύος αυτοί οι ανορθωτές τις περισσότερες φορές τροφοδοτούνται απευθείας από το δίκτυο, ώστε να αποφεύγεται η χρήση ογκώδους μετασχηματιστή. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει μείωση του βάρους και του όγκου που είναι αναγκαία στις σύγχρονες διατάξεις ηλεκτρονικών. [19 §5.1]

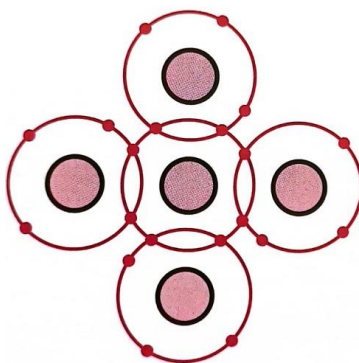
3.3.1.1 Αρχή λειτουργίας διόδου

Στη φύση υπάρχουν οι αγωγοί, οι μονωτές και οι ημιαγωγοί. Τα άτομα των αγωγών διαθέτουν έως τρία ηλεκτρόνια σθένους (εξωτερική στοιβάδα), στο οποίο οι ελκτικές δυνάμεις από τον πυρήνα είναι ασθενείς. Αυτό έχει ως συνέπεια την εύκολη αποκόλληση του από τον πυρήνα δημιουργώντας έτσι ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι μονωτές διαθέτουν έως επτά ηλεκτρόνια στη ζώνη σθένους (εξωτερική στοιβάδα) που συγκρατούνται με μεγάλες δυνάμεις από τον πυρήνα, συνεπώς δεν μπορούν να δημιουργηθούν ελεύθερα ηλεκτρόνια. Οι ημιαγωγοί είναι στοιχεία που παρουσιάζουν ηλεκτρικές ιδιότητες μεταξύ αυτών ενός αγωγού και ενός μονωτή. Οι ημιαγωγοί διαθέτουν τέσσερα ηλεκτρόνια σθένους και οι συνηθέστεροι είναι το γερμάνιο και το πυρίτιο.

Το γερμάνιο είναι χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιαγωγού. Διαθέτει τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική τροχιά. Αρκετά χρόνια πριν ήταν το μόνο διαθέσιμο υλικό που χρησιμοποιούνταν για την κατασκευή εξαρτημάτων ημιαγωγών. Το μειονέκτημα όμως που παρουσίαζε με το υπερβολικό ανάστροφο ρεύμα, έστρεψε την τεχνολογία στη χρήση άλλων ημιαγωγών όπως είναι το πυρίτιο.

Το πυρίτιο είναι από τα πιο άφθονα υλικά στη γη μετά το οξυγόνο. Στα πρώτα στάδια της κατασκευής ημιαγωγικών εξαρτημάτων η δυσκολία που παρουσίαζε το πυρίτιο στον εξευγενισμό του δεν του επέτρεψαν τη διάδοση του. Με τη λύση αυτών των προβλημάτων το πυρίτιο αποτέλεσε το θεμέλιο για την ανάπτυξη των μοντέρνων ηλεκτρονικών.

Συνδυάζοντας τα άτομα του πυριτίου σχηματίζεται ένα στερεό που ονομάζεται κρύσταλλος. Η σύνδεση αυτή οδηγεί κάθε άτομο να διαθέτει οχτώ ηλεκτρόνια στη στοιβάδα σθένους, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.20. Η σύνδεση αυτή των ατόμων του πυριτίου είναι γνωστή ως ομοιοπολικός δεσμός.

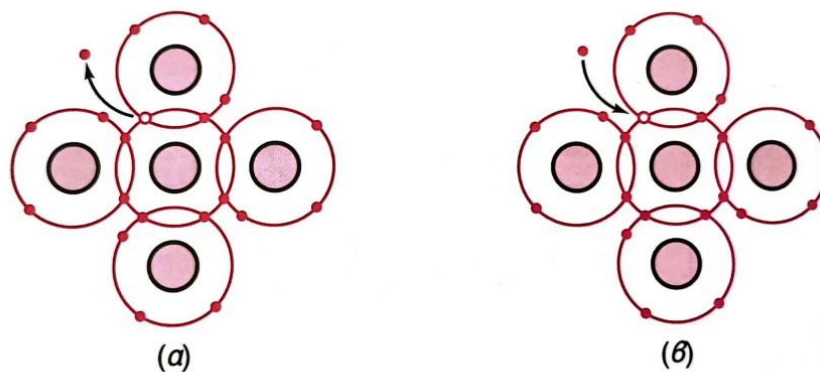


Εικόνα 3.20: Σύνδεση των ατόμων πυριτίου [18].

Η εξωτερική στοιβάδα ενός ατόμου μπορεί να δεχθεί μέχρι οκτώ ηλεκτρόνια. Αυτός ο αριθμός αποτελεί τον κορεσμό της στοιβάδας σθένους χωρίς κανέναν να μπορεί να το εξηγήσει πλήρως για

πιο λόγο γίνεται αυτό. Ένας κρύσταλλος πυριτίου σε θερμοκρασία δωματίου (25°C) είναι σχεδόν ένας τέλειος μονωτής.

Σε θερμοκρασία πάνω από το απόλυτο μηδέν (-273°C) η θερμική ενέργεια περιβάλλοντος αναγκάζει τα άτομα να ταλαντώνονται. Οι μηχανικές αυτές δονήσεις στα άτομα πυριτίου είναι ικανές να απελευθερώσουν ένα ηλεκτρόνιο από την εξωτερική στοιβάδα. Το ηλεκτρόνιο αυτό μετά την απελευθέρωση του ατόμου είναι ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο. Στη θέση του ηλεκτρονίου δημιουργείται ένα κενό που ονομάζεται οπή, η οποία έλκει οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο βρεθεί κοντά της (εικόνα 3.21). Σε θερμοκρασία δωματίου τα άτομα πυριτίου που βρίσκονται στον κρύσταλλο μπορούν να απελευθερώσουν μόνο μερικές οπές. Για την αύξηση των οπών σε έναν κρύσταλλο είναι αναγκαίο η προθήκη προσμίξεων.

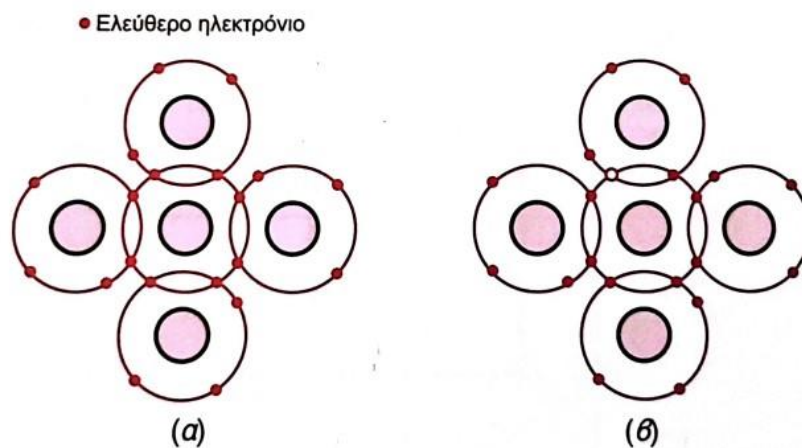


Εικόνα 3.21: Άτομα κρυστάλλου πυριτίου α) δημιουργία οπής β) δέσμευση οπής από ηλεκτρόνιο [18].

Η προσθήκη προσμίξεων ονομάζεται και εμπλουτισμός (doping) ενός ημιαγωγού. Με τον κατάλληλο εμπλουτισμό ενός ημιαγωγού μπορεί να γίνει αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων ή αύξηση του αριθμού των οπών.

Για την αύξηση των ελεύθερων ηλεκτρονίων ο κρύσταλλος πυριτίου θερμαίνεται ώστε να μετατραπεί από στερεό σε υγρό. Με τη διαδικασία αυτή σπάζουν οι ομοιοπολικοί δεσμοί των ατόμων. Σε αυτήν τη διαδικασία προστίθενται πεντασθενή άτομα στο λιωμένο πυρίτιο. Πεντασθενή άτομα είναι τα άτομα που διαθέτουν πέντε ηλεκτρόνια στην εξωτερική στοιβάδα (στοιβάδα σθένους). Τέτοια άτομα είναι το αρσενικό, το αντιμόνιο και ο φωσφόρος. Μια τέτοια ένωση φαίνεται στην εικόνα 3.22 (α).

Για την αύξηση των οπών ο εμπλουτισμός γίνεται με την προσθήκη τρισθενών ατόμων. Δηλαδή άτομα που διαθέτουν στην εξωτερική στοιβάδα τρία ηλεκτρόνια. Τρισθενή άτομα είναι το αργίλιο, το βόριο και το γάλλιο. Μια τέτοια ένωση φαίνεται στην εικόνα 3.22 (β).



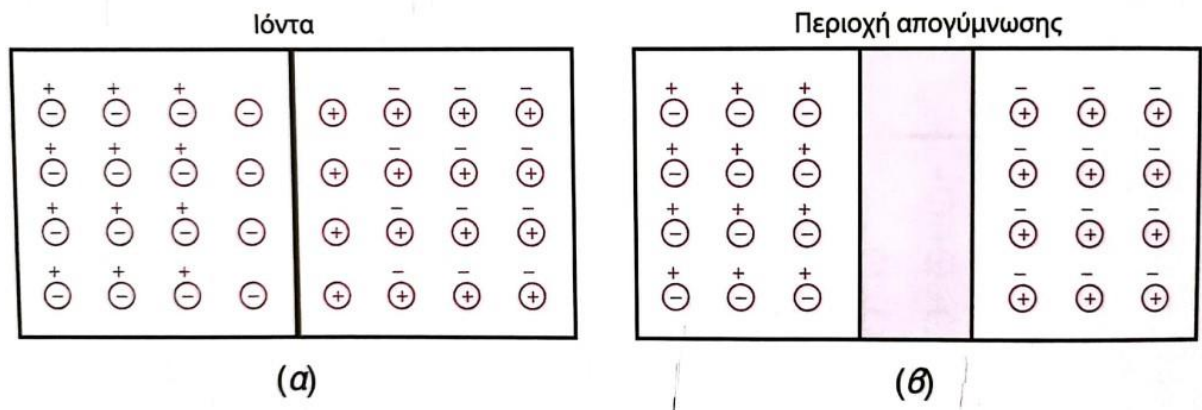
Εικόνα 3.22: Εμπλουτισμός ημιαγωγού α) αύξηση ελεύθερων ηλεκτρονίων β) αύξηση των αριθμών των οπών [18].

Ο ημιαγωγός που έχει εμπλουτιστεί με πεντασθενή άτομα ονομάζεται τύπου n (negative), ενώ ο ημιαγωγός που έχει εμπλουτιστεί με τρισθενή άτομα ονομάζεται τύπου p (positive).

Σε έναν κρύσταλλο που γίνεται εμπλουτισμός του μισού, ώστε αυτός να είναι τύπου n και του άλλου μισού, ώστε αυτός να είναι p , δημιουργείται μια επαφή pn , που ονομάζεται αλλιώς δίοδος επαφής.

Με την επαφή των δυο αυτών ημιαγωγών τα ελεύθερα ηλεκτρόνια από την επαφή n μπορούν να περάσουν στην επαφή p . Όταν ένα ηλεκτρόνιο αφήσει την επαφή n σε αυτήν το πεντασθενές άτομο βρίσκεται με έλλειμα ηλεκτρονίων και γίνεται θετικό ιόν. Όταν το ηλεκτρόνιο εισέλθει στην επαφή p έλκεται από μια οπή και το τρισθενές άτομο βρίσκεται με περίσσια ηλεκτρονίων και γίνεται αρνητικό ιόν. Κάθε ζευγάρι θετικών και αρνητικών ιόντων που δημιουργείται κοντά στο σημείο επαφής ονομάζεται δίπολο. Αυτή η περιοχή γύρω από το σημείο επαφής που αδειάζει από φορείς ονομάζεται περιοχή απογύμνωσης (εικόνα 3.23).

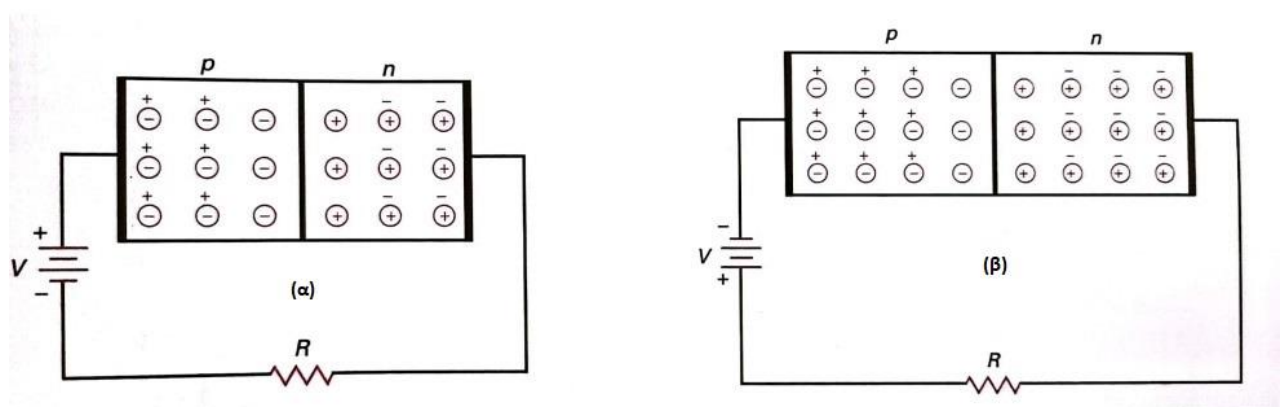
Μεταξύ θετικών και αρνητικών ιόντων στην περιοχή απογύμνωσης αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αυξάνεται με κάθε είσοδο ενός ηλεκτρονίου. Αυτή η αύξηση σταματά όταν επέλθει ισορροπία και τα ηλεκτρόνια δεν έχουν την απαιτούμενη ενέργεια, ώστε να διαπεράσουν την περιοχή απογύμνωσης. Το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ιόντων είναι ισοδύναμο με μια διάφορα δυναμικού που ονομάζεται φράγμα δυναμικού. Στις διόδους γερμανίου είναι ίση με 0,3 Volts ενώ στις διόδους πυριτίου είναι ίση με 0,7 Volts.



Εικόνα 3.23: Επαφή pn α) δημιουργία ιόντων β) περιοχή απογύμνωσης [18].

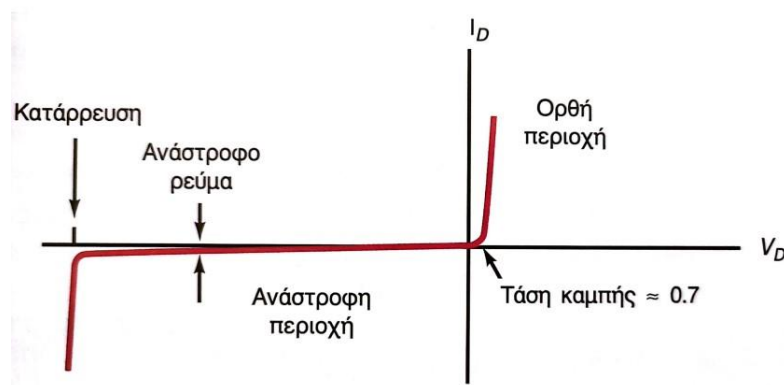
Μια εξωτερική πηγή dc τάσης συνδέεται στα άκρα της διόδου. Όταν ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδεθεί στη μεριά του ημιαγωγού τύπου n και ο θετικός πόλος συνδεθεί στη μεριά του ημιαγωγού τύπου p τότε λέγεται ότι η διόδος έχει πολωθεί ορθά, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.24 (α). Στην ορθή πόλωση, όταν η τάση της πηγής υπερβαίνει το φράγμα δυναμικού της διόδου, τότε τα ηλεκτρόνια από την επαφή n έχουν αρκετή ενέργεια, ώστε να μετάβουν στην επαφή p . Συνεπώς υπάρχει μια ροή ηλεκτρικού ρεύματος δια μέσω της διόδου.

Όταν ο αρνητικός πόλος συνδεθεί στη μεριά του ημιαγωγού τύπου p και ο θετικός πόλος στη μεριά του ημιαγωγού τύπου n , τότε λέγεται ότι η διόδος έχει πολωθεί ανάστροφα, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.24 (β). Στην αναστροφή πόλωση ο αρνητικός πόλος της μπαταρίας έλκει τις οπές και ο θετικός πόλος έλκει τα ηλεκτρόνια. Λόγω αυτού η περιοχή απογύμνωσης διευρύνεται και η διάφορα δυναμικού μεγαλώνει. Συνεπώς κατά την αναστροφή πόλωση δεν υπάρχει ροή ηλεκτρικού ρεύματος.



Εικόνα 3.24: Πόλωση διόδου α) ορθή πόλωση β) ανάστροφη πόλωση [18].

Μια διόδος παρουσιάζει κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα οποία καθορίζουν τις εκάστοτε δυνατότητες της. Τα χαρακτηριστικά αυτά μπορούν να περιγραφούν από τη χαρακτηριστική καμπύλη της διόδου που φαίνεται στην εικόνα 3.25 παρακάτω:

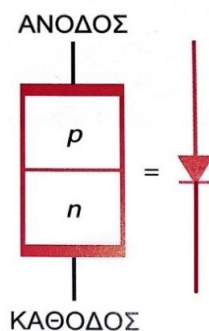


Εικόνα 3.25: Χαρακτηριστική καμπύλη διόδου [18].

Η ορθή περιοχή αποτελεί την περιοχή που η διόδος άγει. Δηλαδή είναι ορθά πολωμένη και το ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από αυτή. Η κάθε διόδος όντας διαφορετικά κατασκευασμένη στην ορθή περιοχή διαθέτει ένα μέγιστο *dc* ορθό ρεύμα λειτουργίας. Το ρεύμα αυτό συμβολίζεται με I_{max} , I_0 , $I_{f(max)}$ και αποτελεί το μέγιστο ρεύμα, που μπορεί μια διόδος να διαχειριστεί, χωρίς να υπάρξει μείωση του χρόνου ζωής της ή η υποβάθμιση των χαρακτηριστικών της λόγω της υπερβολικής θερμοκρασίας. Επιπλέον η τάση καμπής (V_K) αντιστοιχεί στην τάση, που η διόδος αρχίζει να άγει και εξαρτάται από το υλικό κατασκευής (πυρίτιο, γερμάνιο), καθώς και από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην αναστροφή περιοχή η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Στην αναστροφή πόλωση ένα μικρό ρεύμα εξακολουθεί να ρέει λόγω των ατελειών που παρουσιάζει ο κρύσταλλος, οι οποίες προέρχονται από τις προσμίξεις και τη θερμοκρασία. Το σύμβολο του μέγιστου ανάστροφου ρεύματος συμβολίζεται με I_R και είναι της τάξης των μA . Κάθε διόδος χαρακτηρίζεται από μια μέγιστη αναστροφή τάση ή μέγιστη τάση διάσπασης. Πέρα από την τάση αυτή η διόδος οδηγείται στην κατάρρευση και το ανάστροφο ρεύμα αυξάνεται απότομα καταστρέφοντας τη διόδο. [18, §2]

Ο σχηματικός συμβολισμός μιας διόδου φαίνεται στην εικόνα 3.26.



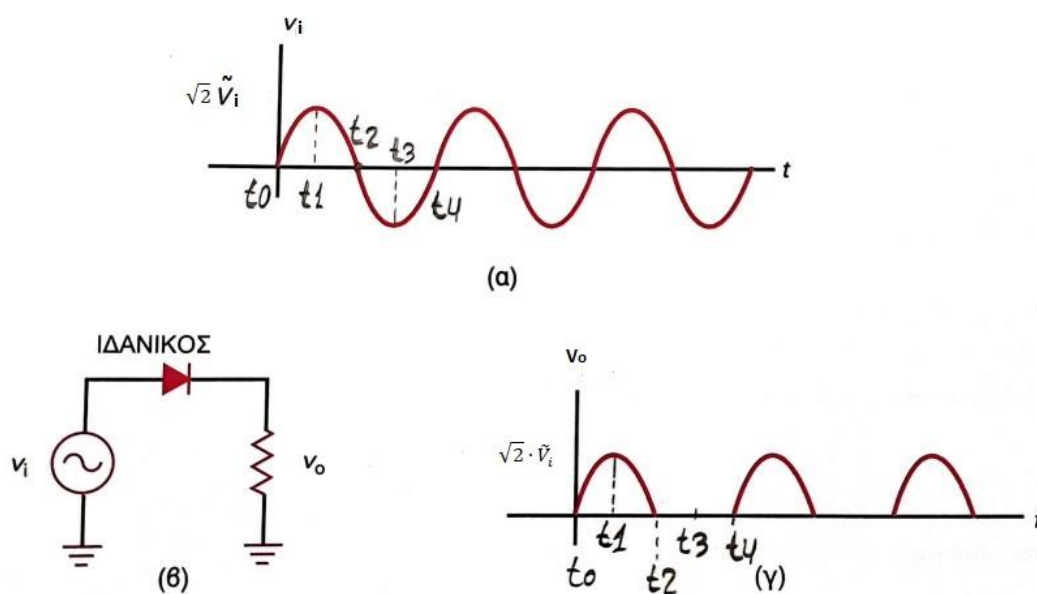
Εικόνα 3.26: Σχηματικό διάγραμμα διόδου [18].

3.3.1.2 Ημιανορθωτής

Μια τάση της μορφής $V_i = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t)$ εφαρμόζεται σε ένα κύκλωμα που περιλαμβάνει μια δίοδο και αντίσταση σε σειρά, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.27. Η τάση αυτή θεωρείται ως τάση εισόδου του κυκλώματος, ενώ η τάση που εφαρμόζεται στα άκρα της αντίστασης θεωρείται ως τάση εξόδου και συμβολίζεται με V_o .

Από τη χρονική στιγμή t_0 έως t_1 η στιγμιαία τιμή τάση αρχίζει να αυξάνεται από την τιμή 0 έως την τιμή $\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$. Η τάση αυτή είναι θετική και πολώνει ορθά τη δίοδο που βρίσκεται στο κύκλωμα. Συνεπώς η τάση εξόδου που εφαρμόζεται στα άκρα της αντίστασης λαμβάνει ίδιες τιμές με την τάση εισόδου. Από τη χρονική στιγμή t_1 έως t_2 η τάση εισόδου λαμβάνει μια τιμή από $\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$ έως 0. Αν και η στιγμιαία τιμή τάσης, μειώνεται παραμένει θετική. Συνεπώς η δίοδος και σε αυτό το χρονικό διάστημα πολώνεται ορθά, οπότε η τάση εισόδου εμφανίζεται στην έξοδο του κυκλώματος. Από τη χρονική στιγμή t_2 έως τη t_3 η τιμή της τάσης λαμβάνει τιμές από 0 έως $-\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$. Συνεπώς η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και σταματά να άγει και η τάση εξόδου μηδενίζεται. Από τη χρονική στιγμή t_3 έως την t_4 η τιμή της τάσης εισόδου λαμβάνει τιμές από $-\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$ έως 0. Συνεπώς και κατά τη διάρκεια αυτή η δίοδος πολώνεται ανάστροφα και η τάση εξόδου παραμένει μηδενική.

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται σε κάθε περίοδο της ημιτονοειδούς τάσης εισόδου. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από αυτήν τη διαδικασία είναι τάση εξόδου του κυκλώματος να λαμβάνει μόνο θετικές μεταβαλλόμενες τιμές τάσης από 0 έως $\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$. [18 §4.1]



Εικόνα 3.27: α) είσοδος ημιανορθωτή β) κύκλωμα γ) έξοδος ημιανορθωτή [18].

Το κύκλωμα της εικόνας 3.27 αποτελεί έναν μονοφασικό ημιανορθωτή και οι σχέσεις που τον χαρακτηρίζουν είναι οι εξής:

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου:

$$\bar{V}_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{2\pi} \cdot [-\cos(\omega t)]_0^\pi =$$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{2\pi} \cdot (-\cos \pi + \cos 0^\circ) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi} \quad (\text{σχέση 3.73})$$

Η μέση τιμή ρεύματος ισούται με:

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{V}_o}{R} \quad (\text{σχέση 3.74})$$

Η ενεργός τιμή τάσης εξόδου (RMS) ισούται με:

$$\tilde{V}_o = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^\pi [\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t)]^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = \frac{\tilde{V}_i}{\sqrt{2}} \quad (\text{σχέση 3.75})$$

Όπου

\tilde{V}_i : η ενεργός τιμή της τάσης εισόδου

Η ενεργός τιμή έντασης εισόδου και εξόδου ισούται με:

$$\tilde{I}_i = \tilde{I}_o = \frac{\tilde{V}_o}{R} = \frac{\tilde{V}_i}{\sqrt{2} \cdot R} \quad (\text{σχέση 3.76})$$

Η ενεργός τιμή της ισχύος εξόδου ισούται με:

$$P_o = \tilde{I}_o^2 \cdot R = \frac{\tilde{V}_o^2}{R} = \left(\frac{\tilde{V}_i}{\sqrt{2}} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{R} \right) = \frac{\tilde{V}_i^2}{2 \cdot R} \quad (\text{σχέση 3.77})$$

Η μέση ισχύς εξόδου ισούται με:

$$\bar{P}_o = \bar{V}_o \cdot \bar{I}_o = \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi} \right) \cdot \left(\frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi \cdot R} \right) = \frac{2 \cdot \tilde{V}_i^2}{\pi^2 \cdot R} \quad (\text{σχέση 3.78})$$

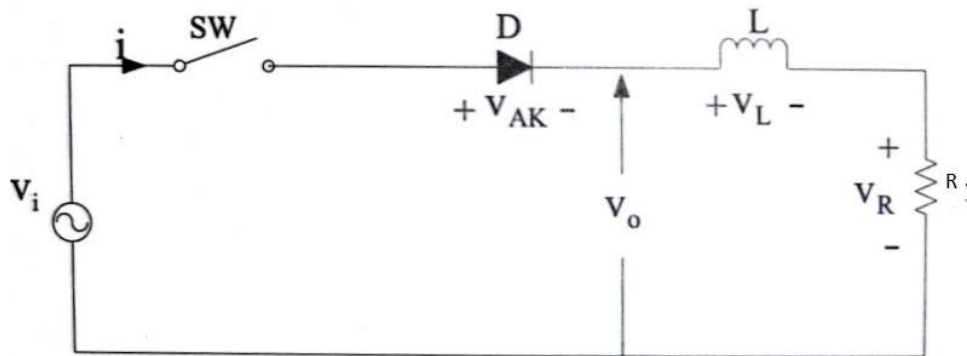
Η φαινόμενη ισχύς εισόδου ισούται με:

$$S_i = \tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_i = \tilde{V}_i \cdot \frac{\tilde{V}_i}{\sqrt{2} \cdot R} = \frac{\tilde{V}_i^2}{\sqrt{2} \cdot R} \quad (\text{σχέση 3.79})$$

Εάν η διόδος είναι ιδανική, τότε ισχύει ότι $P_i = P_o$ και συνεπώς ο συντελεστής ισχύος στην είσοδο του ανορθωτή ισούται με:

$$\lambda = \frac{P_i}{S_i} = \frac{P_i}{\tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_i} = \frac{P_o}{\tilde{V}_i \cdot \tilde{I}_i} = \frac{\frac{\tilde{V}_i^2}{2 \cdot R}}{\tilde{V}_i \cdot \frac{\tilde{V}_i}{\sqrt{2} \cdot R}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (\text{σχέση 3.80})$$

Το φορτίο όμως που συνδέεται στον ημιανορθωτή μπορεί να παρουσιάσει και επαγωγική συμπεριφορά το κύκλωμα λαμβάνει τη μορφή της εικόνας 3.28.



Εικόνα 3.28: Κύκλωμα ημιανορθωτή με επαγωγική συμπεριφορά [37].

Όταν ο διακόπτης κλείσει, στην αρχή της θετικής ημιπεριόδου η διόδος του κυκλώματος πολώνεται ορθά, οπότε οι σχέσεις που ισχύουν είναι οι παρακάτω:

$$V_L + V_R = V_o = V_i \Rightarrow L \cdot \frac{di_i}{dt} + R \cdot i_i = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t) \quad (\text{σχέση 3.81})$$

Για το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα ισχύει ότι είναι το άθροισμα της μόνιμης συνιστώσας και της μεταβατικής συνιστώσας, οπότε ισχύει:

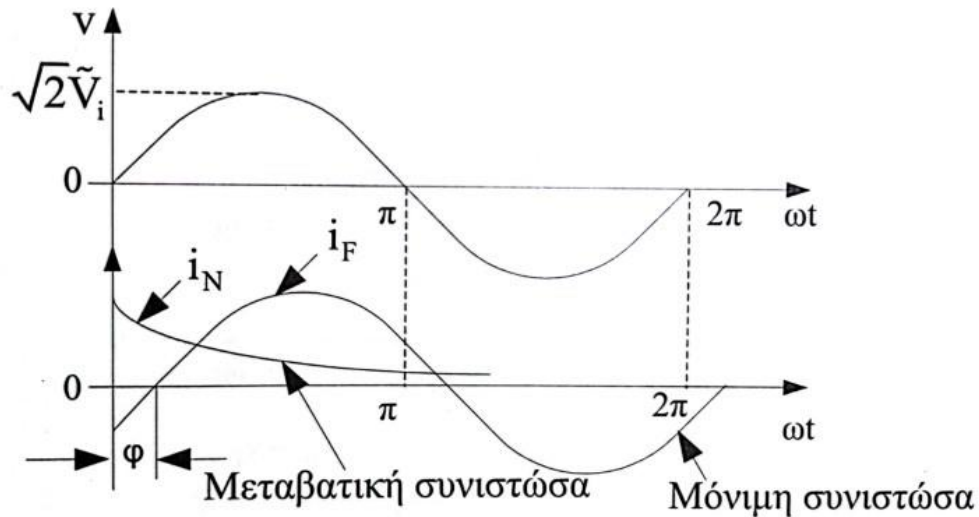
$$i_i = i_o = i_N + i_F = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{[R^2 + (\omega \cdot L)^2]}} + A \cdot e^{-(R/L) \cdot t} = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t - \varphi)}{|Z_o|} + A \cdot e^{-(\frac{\omega t}{\omega \tau})} \quad (\text{σχέση 3.82})$$

Όπου

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega \cdot L}{R} \right) : \text{γωνιά φορτιού}$$

$$\tau = \frac{L}{R} : \text{σταθερά φορτιού}$$

Στην εικόνα 3.29 φαίνεται η χαρακτηριστική της τάσης και των συνιστωσών του ρεύματος.



Εικόνα 3.29: Χαρακτηριστική τάσης και ρεύματος ημιανορθωτή με επαγωγική συμπεριφορά [37].

Ο όρος A υπολογίζεται για $i(\omega t = 0) = 0$ μέσω της σχέσης 2.82 και προκύπτει:

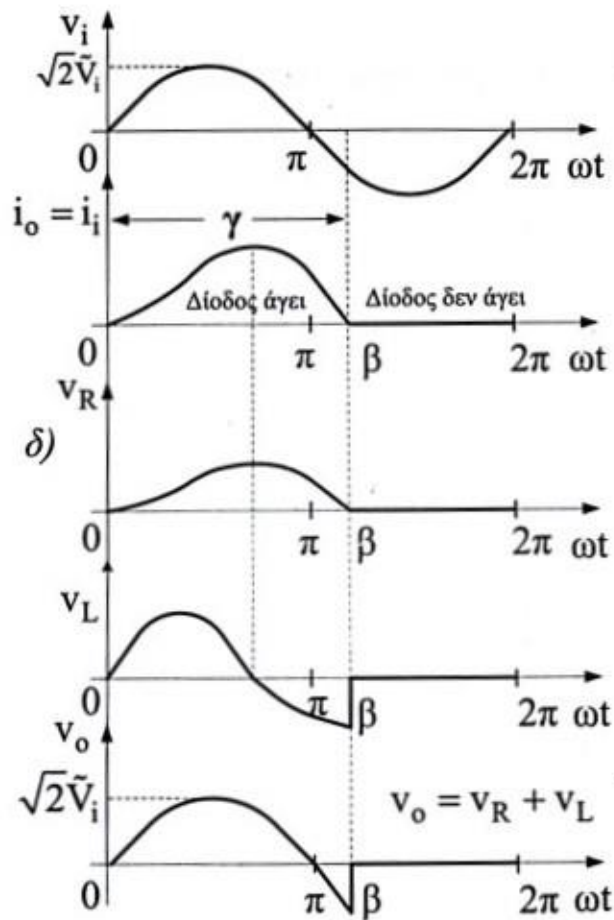
$$A = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\varphi)}{|Z_o|} \quad (\text{σχέση 3.83})$$

Αντικαθιστώντας το A της σχέσης 3.83 στην σχέση 3.82 προκύπτει:

$$i_i = i_o = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{|Z_o|} \cdot \left[\sin(\omega t - \varphi) + e^{-\left(\frac{\omega \cdot t}{\omega \cdot \tau}\right)} \cdot \sin \varphi \right] \quad (\text{σχέση 3.84})$$

Στα κυκλώματα που παρουσιάζουν επαγωγική συμπεριφορά το ρεύμα έπεται χρονικά της τάσης. Καθώς το ρεύμα παίρνει τη μέγιστη του τιμή και ο ρυθμός αύξησης του $\frac{di}{dt} = 0$ τότε η τάση στα άκρα του πηνίου ισούται με $V_L = L \cdot \frac{di}{dt} = 0$. Καθώς το ρεύμα μειώνεται η κλίση του γίνεται αρνητική και συνεπώς η τάση στα άκρα του πηνίου γίνεται και αυτή αρνητική. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η διόδος να παραμένει πολωμένη και μετά τη γωνιά π στην οποία μηδενίζεται η τάση. Η νέα γωνιά για την οποία σταματάει να άγει η διόδος ονομάζεται γωνιά σβέσης και συμβολίζεται

με β . Τα παραπάνω αποτυπώνονται στις κυματομορφές των τάσεων και εντάσεων του κυκλώματος στην εικόνα 3.30.



Εικόνα 3.30: Χαρακτηριστική τάσεων – εντάσεων κυκλώματος ημιανορθωτή με φορτίο επαγωγικής συμπεριφοράς [37].

Από την εικόνα 3.30 προκύπτουν οι παρακάτω σχέσεις:

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου ισούται:

$$\bar{V}_o = \frac{1}{T} \int_0^T V_o(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^\beta \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{2\pi} \cdot [-\cos(\omega t)]_0^\beta =$$

$$\frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{2\pi} \cdot (-\cos \beta + \cos 0^\circ) = \frac{\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{2\pi} \cdot (1 - \cos \beta) \quad (\text{σχέση 3.85})$$

Η μέση τιμή του ρεύματος εισόδου – εξόδου ισούται:

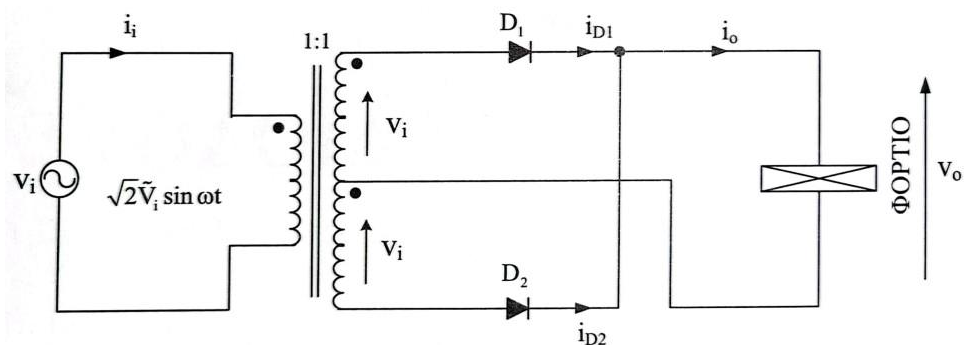
$$\bar{I}_o = \frac{\bar{V}_o}{R} \quad (\text{σχέση 3.86})$$

Η ενεργός τιμή τάσης εξόδου είναι ίση με [37 §2.7]:

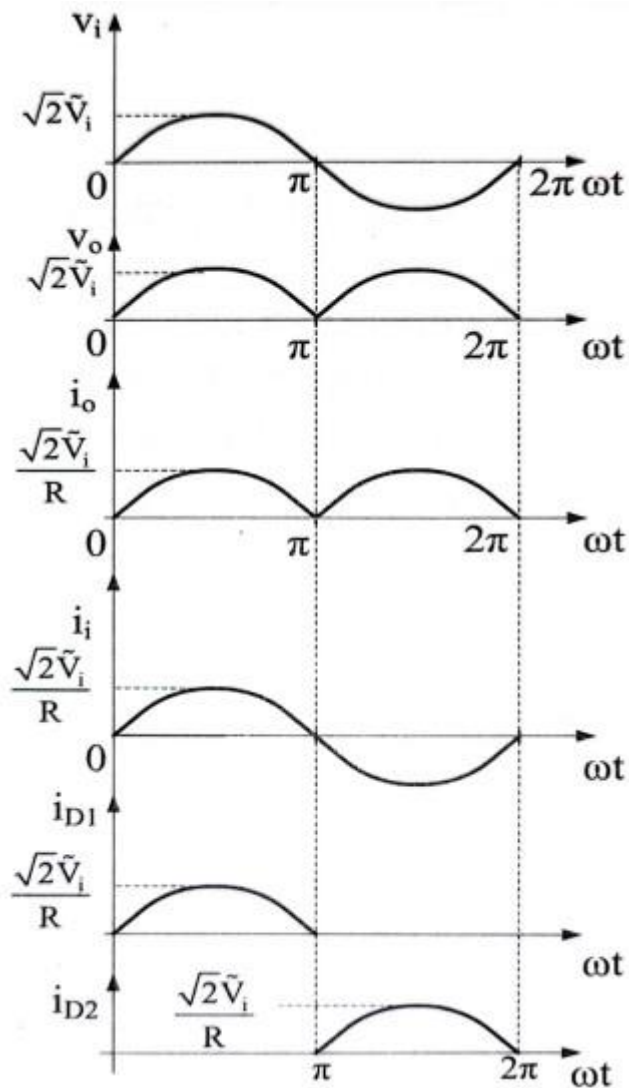
$$\tilde{V}_o = \left[\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^\beta [\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t)]^2 d(\omega t) \right]^{1/2} = \left[\frac{\tilde{V}_i^2}{2\pi} \cdot \left(\beta - \frac{\sin 2\beta}{2} \right) \right]^{1/2} \quad (\sigma\chi\epsilon\sigma\eta \ 3.87)$$

3.3.1.3 Ανορθωτής πλήρους κύματος

Στην εικόνα 3.31 παρουσιάζεται η πιο απλή διάταξη μη ελεγχόμενης πλήρης ανόρθωσης. Αποτελείται από έναν μετασχηματιστή με δυο ίσες λήψεις καθώς και δυο διόδους. Εάν μια τάση της μορφής $V_i = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \sin(\omega \cdot t)$ εφαρμοστεί στο κύκλωμα, τότε κατά τη διάρκεια της θετικής ημιπεριόδου θα άγει η διάδος D_1 . Αντίθετα κατά τη διάρκεια την αρνητικής ημιπεριόδου άγει η διάδος D_2 . Λόγω του κοινού σημείου σύνδεσης πριν το φορτίο, όποια και από τις δυο διόδους άγει, η τάση του φορτίου παραμένει θετική μεταβαλλόμενη από την τιμή 0 έως την τιμή $\sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i$. Όταν το φορτίο παρουσιάζει ωμική συμπεριφορά, τότε η τάση και το ρεύμα λαμβάνουν ταυτόχρονα τη μέγιστη θετική και μηδενική τιμή τους. Δηλαδή η διάδος D_1 σταματά να άγει στη γωνιά π και η D_2 στη γωνιά 2π . Όταν το φορτίο γίνεται ωμικό - επαγωγικό τότε η κυμάτωση αυτή μειώνεται.



Εικόνα 3.31: Κύκλωμα ανορθωτή πλήρους κύματος [37].



Εικόνα 3.32: Χαρακτηριστικές εισόδου - εξόδου ανορθωτή πλήρους κύματος ωμικού φορτίου [37].

Όποιο και αν είναι το φορτίο η τάση στην έξοδο του ανορθωτή, δεν παρουσιάζει καθαρά DC συνιστώσα. Υπάρχουν και άλλες αρμονικές, οι οποίες επηρεάζουν τη λειτουργία του κυκλώματος. Για τον λόγο αυτό η τάση εξόδου είναι αναγκαίο να παρασταθεί με σειρές Fourier, ώστε να ελεγχθεί η ποιότητα της. Συνεπώς η τάση και το ρεύμα εξόδου μπορούν να γραφτούν ως:

$$v_o = \bar{V}_o + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{V}_{o1,n} \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{V}_{o2,n} \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.88})$$

$$i_o = \bar{I}_o + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{I}_{o1,n} \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n) + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{I}_{o2,n} \cdot \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (\text{σχέση 3.89})$$

Λόγω ότι οι $f(v_o)$ και $f(i_o)$ είναι άρτιες, δηλαδή $f(t) = f(-t)$, οι συντελεστές Fourier $\hat{V}_{o2,n}$ και $\hat{I}_{o2,n}$ είναι ίσοι με το μηδέν. Επομένως οι σχέσεις 3.88 και 3.89 γράφονται:

$$v_o = \bar{V}_o + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{V}_{o,n} \cdot \cos(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.90})$$

$$i_o = \bar{I}_o + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{I}_{o,n} \cdot \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (\text{σχέση 3.91})$$

Όπου:

n : τάξη αρμονικής συνιστώσας

$$\bar{V}_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi} = 0,9 \cdot \tilde{V}_i: \text{ μέση τιμή τάσης εξόδου πλήρης ανόρθωσης}$$

\bar{I}_o : μέση τιμή ρεύματος εξόδου

$\hat{V}_{o,n}$: πλάτος n – οστής αρμονικής συνιστώσας τάσης εξόδου

$\hat{I}_{o,n}$: πλάτος n – οστής αρμονικής συνιστώσας ρεύματος εξόδου

Για τον υπολογισμό του πλάτους της n – οστής αρμονικής συνιστώσας της τάσης εξόδου χρησιμοποιείται η σχέση υπολογισμού των συντελεστών της σειράς Fourier. Συνεπώς:

$$\hat{V}_{o,n} = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt = \frac{4}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^{\pi} v_o \cdot \cos(n\omega t) d\omega t =$$

$$\frac{2}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{n-1} - \frac{1}{n+1} \right) \quad (\text{σχέση 3.92})$$

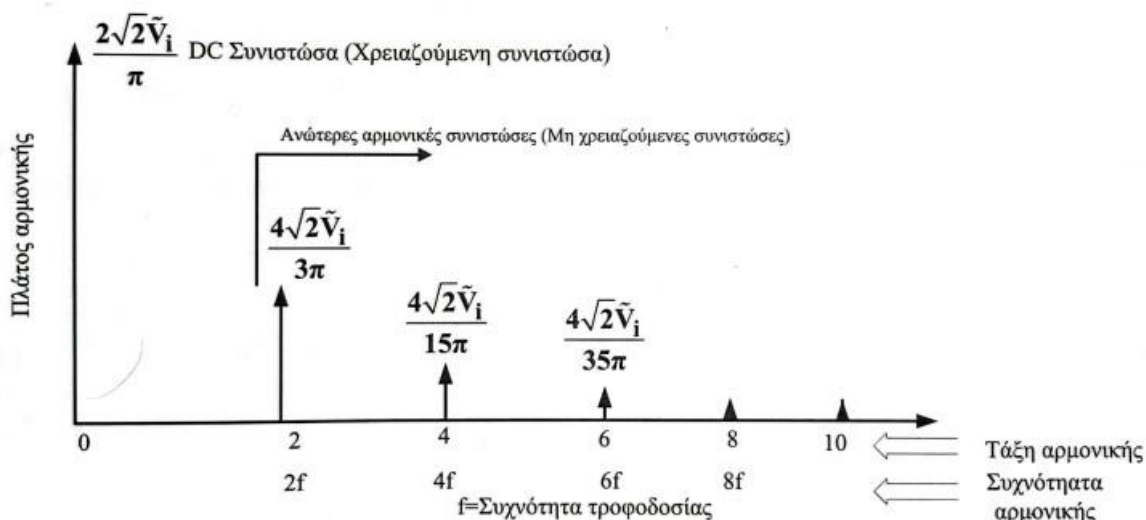
Το πλάτος n – οστής αρμονικής συνιστώσας του ρεύματος εξόδου δίνεται από τη σχέση:

$$\hat{I}_{o,n} = \frac{|\hat{V}_{o,n}|}{|Z_{o,n}|} \quad (\text{σχέση 3.93})$$

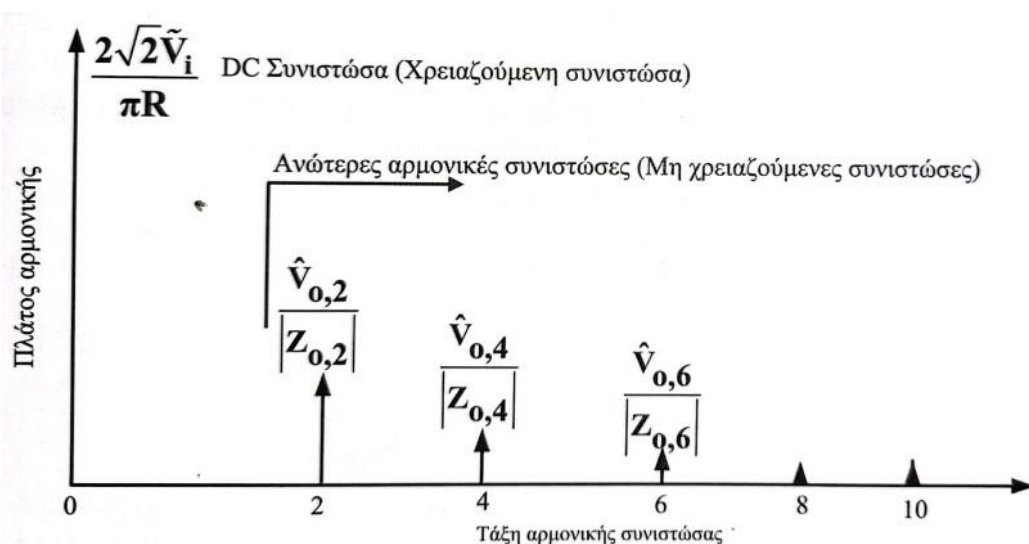
Όπου:

$$Z_{o,n} = \sqrt{R^2 + (n \cdot \omega \cdot L)^2}: \text{ σύνθετη αντίσταση φορτίου } n \text{ – οστής αρμονικής συχνότητας}$$

Με βάση τα παραπάνω μπορεί να κατασκευαστεί το διάγραμμα πλάτους αρμονικών σε σχέση με τη συχνότητα για την τάση και το ρεύμα εξόδου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.33 και 3.34.



Εικόνα 3.33: Αναπαράσταση των συνιστωσών της τάσης εξόδου v_o στο πεδίο της συχνότητας [37].



Εικόνα 3.34: Αναπαράσταση των συνιστωσών του ρεύματος εξόδου i_o στο πεδίο της συχνότητας [37].

Με βάση τα παραπάνω η τάση και το ρεύμα εξόδου του ανορθωτή πλήρους κύματος μπορούν να παρασταθούν με σειρές Fourier.

$$v_o = \frac{2\sqrt{2}\tilde{V}_i}{\pi} + \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{3\pi} \cdot \cos 2\omega t + \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{15\pi} \cdot \cos 4\omega t + \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{35\pi} \cdot \cos 6\omega t + \dots \quad (\text{σχέση 3.94})$$

$$i_o = \frac{2\sqrt{2}\tilde{V}_i}{\pi R} + \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{3\pi|Z_{o,2}|} \cdot \cos(2\omega t - \varphi_2) + \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{15\pi|Z_{o,4}|} \cdot \cos(4\omega t - \varphi_4) + \dots$$

$$+ \frac{4\sqrt{2}\tilde{V}_i}{35\pi|Z_{o,6}|} \cdot \cos(6\omega t - \varphi_6) + \dots \quad (\text{σχέση 3.95})$$

Η μέση τιμή του ρεύματος εξόδου δίνεται από την σχέση:

$$\bar{I}_o = \frac{\bar{V}_o}{R} = \frac{2\sqrt{2}\tilde{V}_i}{\pi R} \quad (\text{σχέση 3.96})$$

Η ενεργός τιμή της τάσης και του ρεύματος για τον ανορθωτή πλήρους κύματος δίνεται από τους παρακάτω τύπους: [37 §4.2]

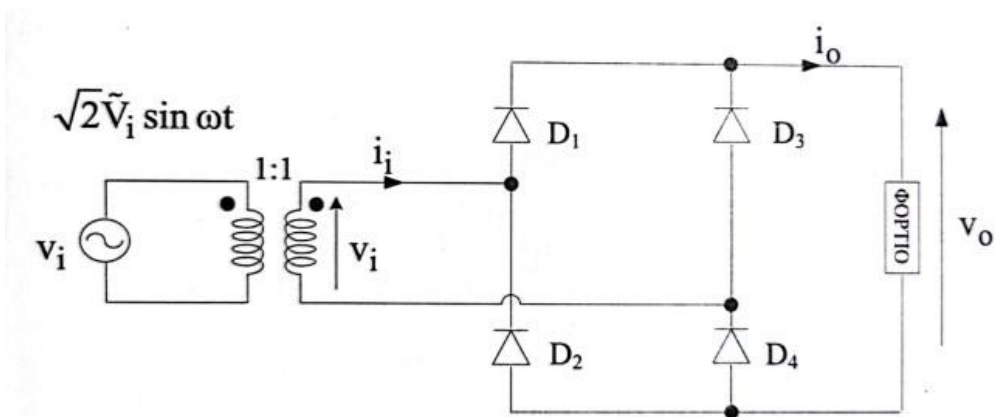
$$\begin{aligned} \tilde{V}_o &= \left[\bar{V}_o^2 + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left(\frac{\hat{V}_{o,n}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{1/2} = \sqrt{\bar{V}_o^2 + \left(\frac{\hat{V}_{o,2}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{V}_{o,4}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots} \\ &= \sqrt{\bar{V}_o^2 + \tilde{V}_{o,2}^2 + \tilde{V}_{o,4}^2 + \dots} \quad (\text{σχέση 3.96}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{I}_o &= \left[\bar{I}_o^2 + \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \left(\frac{\hat{I}_{o,n}}{\sqrt{2}} \right)^2 \right]^{1/2} = \sqrt{\bar{I}_o^2 + \left(\frac{\hat{I}_{o,2}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{I}_{o,4}}{\sqrt{2}} \right)^2 + \dots} \\ &= \sqrt{\bar{I}_o^2 + \tilde{I}_{o,2}^2 + \tilde{I}_{o,4}^2 + \dots} \quad (\text{σχέση 3.97}) \end{aligned}$$

3.3.1.4 Μονοφασικός ανορθωτής γέφυρας

Στην εικόνα 3.33 φαίνεται μια ανορθωτική διάταξη τύπου γέφυρας. Η συγκεκριμένη ανορθωτική διάταξη διαθέτει τέσσερις διόδους. Κατά τη θετική ημιπερίοδο άγουν οι διόδοι D_1 και D_2 εφαρμόζοντας θετική τάση στα άκρα του φορτίου. Κατά την αρνητική ημιπερίοδο οι διόδοι D_3 και D_4 πολώνονται ορθά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το φορτίο να βρίσκεται πάλι με τάση θετικής πολικότητας. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η ανόρθωση σε συνδεσμολογία γέφυρας είναι οι εξής:

- Δεν απαιτείται περίπλοκη κατασκευή μετασχηματιστή.
- Η καταπόνηση των διόδων είναι μικρότερη.

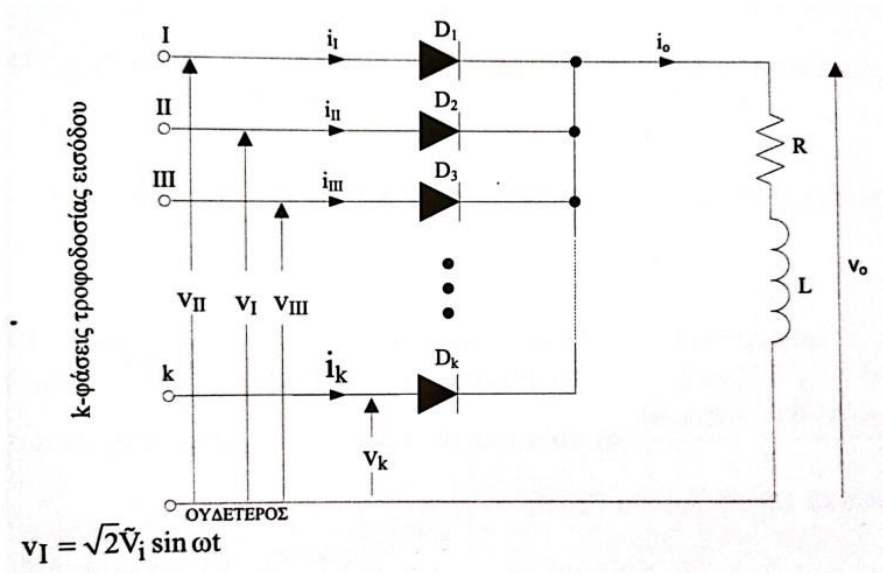


Εικόνα 3.35: Ανορθωτής συνδεσμολογίας γέφυρας [37].

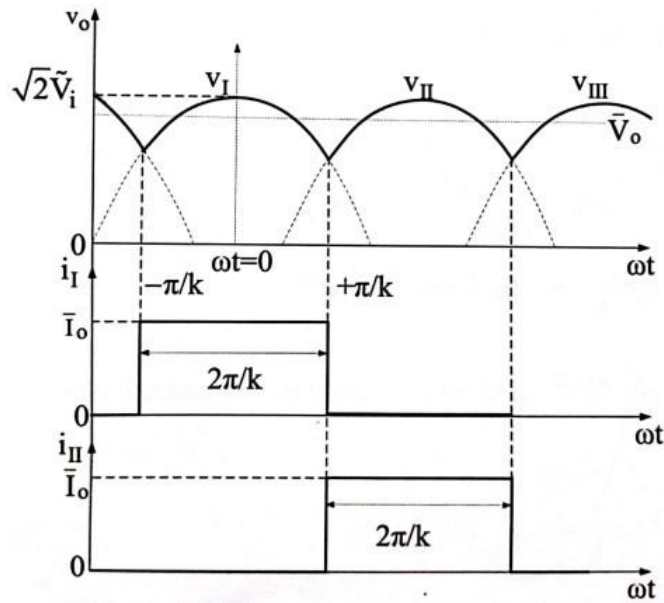
3.3.1.5 Τριφασικός ανορθωτής

Όταν υπάρχουν περισσότερες από μια φάσεις εισόδου το κύκλωμα ανόρθωσης ονομάζεται πολυφασικό. Λόγω της διάδοσης του συστήματος των τριών φάσεων έχει επικρατήσει η τριφασική ανόρθωση, η οποία χωρίζεται σε ανόρθωση κοινού σημείου και σε τριφασική ανόρθωση γέφυρας.

Στην εικόνα 3.36 φαίνεται μια πολυφασική ανόρθωση κοινού σημείου, ενώ στην εικόνα 3.37 οι χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου. Η ανόρθωση αυτή μπορεί να τροφοδοτηθεί με m αριθμό φάσεων και να παρουσιάζει k αριθμό παλμών για κάθε κύκλο λειτουργίας. Με την αύξηση των αριθμών των φάσεων μειώνεται η κυμάτωση της τάσης εξόδου, αλλά αυξάνεται το κόστος κατασκευής.



Εικόνα 3.36: Πολυφασική ανόρθωση κοινού σημείου [37].



Εικόνα 3.37: Χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου πολυφασικού ανορθωτή κοινού σημείου που παρουσιάζει καθαρά dc ρεύμα εξόδου ($\omega L \gg R$) [37].

Από τις κυματομορφές τις εικόνας 3.37 προκύπτει η μέση τιμή της τάσης εξόδου:

$$\bar{V}_o = \frac{1}{2\pi/k} \int_{-\pi/k}^{\pi/k} \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \cos(\omega t) d(\omega t) = \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \left(\frac{\sin\left(\frac{\pi}{k}\right)}{\frac{\pi}{k}} \right) \quad (\text{σχέση 3.98})$$

Όπου:

k: ο αριθμός των φάσεων εισόδου

\tilde{V}_i : ενεργός τιμή τάσης εισόδου

Η τάση εξόδου v_o μπορεί να αναπτυχθεί με σειρά Fourier, όπως φαίνεται παρακάτω:

$$v_o = \bar{V}_o + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{V}_{o1,n} \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{V}_{o2,n} \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.99})$$

Λόγω ότι η τάση εξόδου v_o είναι άρτια συνάρτηση, η σειρά Fourier περιλαμβάνει μόνο συνημιτονοειδής συνιστώσες. Συνεπώς ο συντελεστής Fourier $\hat{V}_{o1,n}$ μπορεί να γραφτεί ως $\hat{V}_{o,n}$ και ισούται με:

$$\hat{V}_{o,n} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^T v_o \cdot \cos(n\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{2\pi} \cdot \int_{-\pi/k}^{\pi/k} v_o \cdot \cos(n\omega t) d(\omega t) =$$

$$\frac{k}{\pi} \cdot \int_{-\pi/k}^{\pi/k} v_o \cdot \cos(n\omega t) d\omega t = \frac{k}{\pi} \cdot \int_{-\pi/k}^{\pi/k} \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(n\omega t) d\omega t =$$

$$= \frac{k \cdot \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi \cdot (n^2 - 1)} \cdot \left[(n - 1) \cdot \sin\left(\frac{(n + 1)}{k} \cdot \pi\right) + (n + 1) \cdot \sin\left(\frac{(n - 1)}{k} \cdot \pi\right) \right] \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 3.100)$$

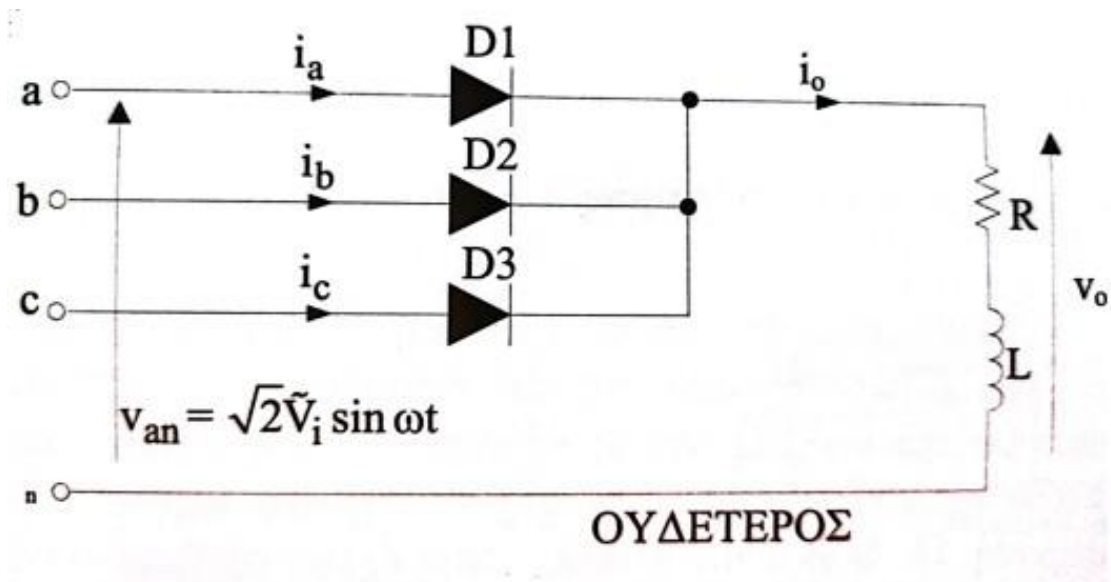
Με τη βοήθεια των τριγωνομετρικών σχέσεων $\sin(A + B) = \sin A \cdot \cos B + \cos A \cdot \sin B$ και $\sin(A - B) = \sin A \cdot \cos B - \cos A \cdot \sin B$ η σχέση 3.100 γράφεται:

$$\hat{V}_{o,n} = \frac{k \cdot \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi \cdot (n^2 - 1)} \cdot \left[n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{k}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{k}\right) - \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{k}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right) \right] \quad (\sigma\chi\epsilon\sigma\eta \ 3.101)$$

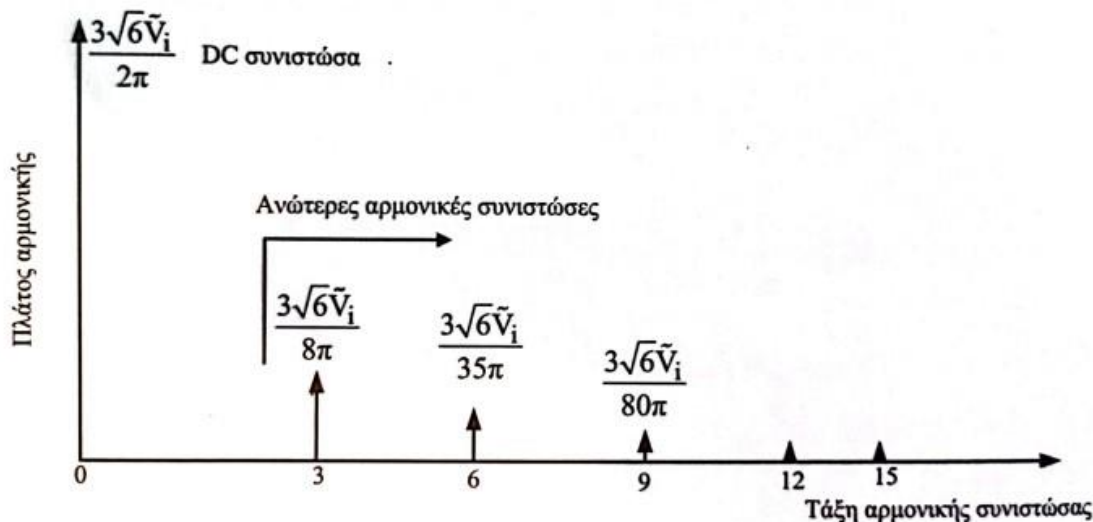
Η σχέση 3.101 ισχύει μόνο για $n = 0, 1k, 2k, 3k, 4k \dots$ συνεπώς ο όρος $n \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi}{k}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{k}\right) = 0$ και η σχέση 3.101 γράφεται:

$$\hat{V}_{o,n} = \frac{k \cdot \sqrt{2} \cdot \tilde{V}_i}{\pi \cdot (n^2 - 1)} \cdot \cos\left(\frac{n \cdot \pi}{k}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{k}\right) \quad (\sigma\chi\epsilon\sigma\eta \ 3.102)$$

Με βάση τα παραπάνω για τριφασική ανόρθωση κοινού σημείου φαίνεται στην εικόνα 3.38. ενώ στην εικόνα 3.39 φαίνονται τα πλάτη των εμφανιζομένων συνιστωσών της τάσης εξόδου στο πεδίο της συχνότητας.

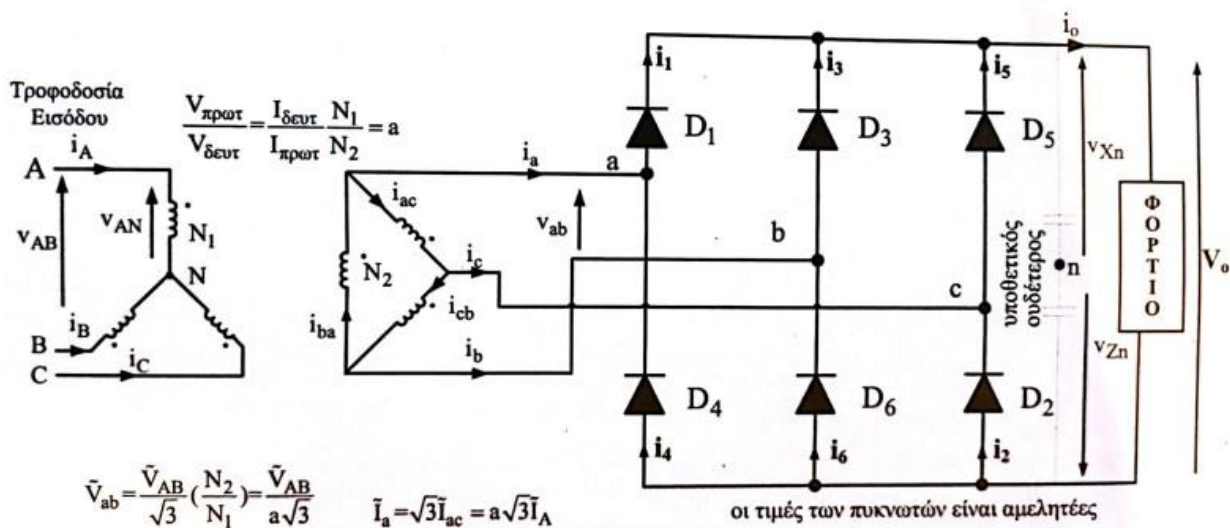


Εικόνα 3.38: Τριφασικός ανορθωτής κοινού σημείου [37].

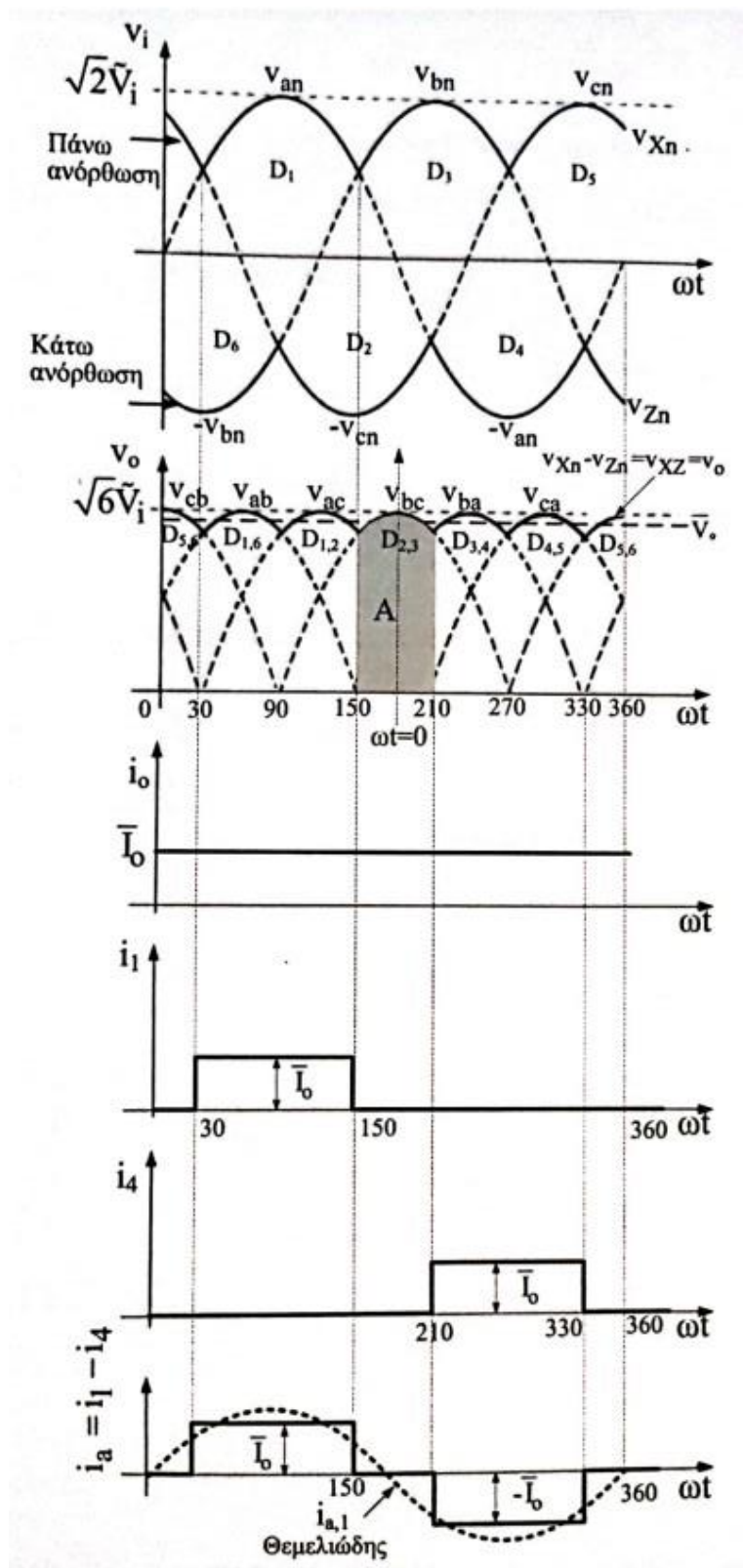


Εικόνα 3.39: Πλάτη αρμονικών συνιστωσών τάσης εξόδου τριφασικού ανόρθωτή κοινού σημείου εκφρασμένο στο φάσμα συχνοτήτων [37].

Στην εικόνα 3.40 φαίνεται μια τριφασική ανόρθωση γέφυρας με χρήση τριφασικού μετασχηματιστή. Ενώ στην εικόνα 3.41 φαίνονται οι χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου της τριφασικής γέφυρας ανόρθωσης.



Εικόνα 3.40: Τριφασική γέφυρα ανόρθωσης [37].



Εικόνα 3.41: Χαρακτηριστικές εισόδου – εξόδου τριφασικής γέφυρας ανόρθωσης [37].

Η μέση τιμή της τάσης εξόδου αυτού του τύπου της ανόρθωσης δίνεται από την σχέση:

$$\begin{aligned} \bar{V}_o &= \frac{1}{\pi/3} \cdot \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{6}\tilde{V}_i \cos(\omega t) d(\omega t) = \left[\frac{3\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi} \cdot \sin(\omega t) \right]_{-\pi/6}^{\pi/6} = \frac{3\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi} \\ &= 2,34\tilde{V}_i \quad (\text{σχέση 3.103}) \end{aligned}$$

Όπως φαίνεται από την εικόνα 3.41 η τάση εξόδου παρουσιάζει μια περιοδικότητα και έχει άρτια συμμετρία με περίοδο 1/6 της περιόδου της τάσης εξόδου. Συνεπώς οι αρμονικές συνιστώσες που παρουσιάζονται είναι της τάξης 6n και η σειρά Fourier περιλαμβάνει μόνο συνημιτονοειδής συνιστώσες. Συνεπώς ο συντελεστής Fourier $\hat{V}_{o,n}$ ισούται με:

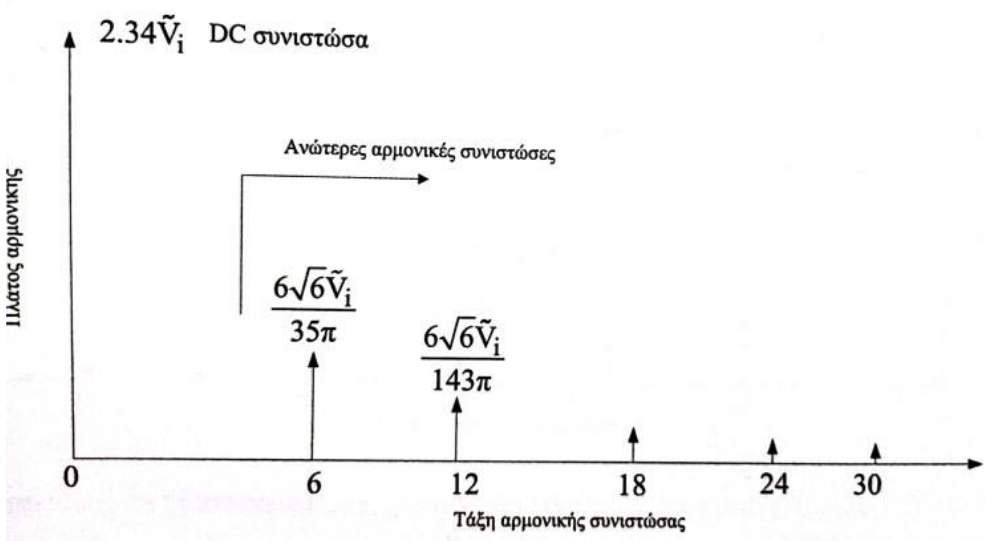
$$\hat{V}_{o,n} = \frac{(-2) \cdot 6\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi(n^2 - 1)} \cos \frac{n\pi}{6} \sin \frac{\pi}{6} = \frac{-6\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi(n^2 - 1)} \cos \frac{n\pi}{6} \quad (\text{σχέση 3.104})$$

Όπου n=6,12,18,... : Τάξη αρμονικής

Με βάση τα παραπάνω η τάση εξόδου μπορεί να εκφραστεί με σειρά Fourier όπως φαίνεται παρακάτω.

$$v_o = \frac{3\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi} + \frac{6\sqrt{6}\tilde{V}_i}{\pi} \cdot \left(\frac{1}{35} \cos 6\omega t - \frac{1}{143} \cos 12\omega t + \dots \right) \quad (\text{σχέση 3.105})$$

Η παραπάνω σχέση σε σχηματική απεικόνιση φαίνεται στην εικόνα 3.42. [37 §4.5, 4.6]

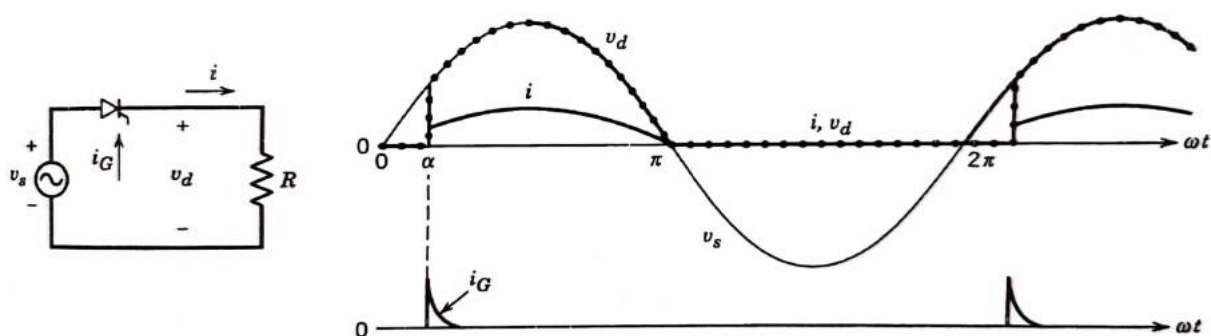


Εικόνα 3.42: Φασματικές συνιστώσες τάσης εξόδου τριφασικού ανορθωτή γέφυρας [37].

3.3.2 Ελεγχόμενες από την φάση ανορθωτικές διατάξεις

Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο να υπάρχει έλεγχος της dc τάσης εξόδου του ανορθωτή. Τέτοιες εφαρμογές είναι dc και ac κινητήρια συστήματα. Ο έλεγχος αυτός πραγματοποιείται με τη βοήθεια θυρίστορ έναντι των απλών διόδων που χρησιμοποιούνται στις μη ελεγχόμενες ανορθωτικές διατάξεις. Η διαφορά ενός θυρίστορ σε σχέση με μια απλή δίοδο είναι ότι για να μεταβεί σε κατάσταση αγωγής χρειάζεται έναν παλμό έναυσης. Συνεπώς με αυτόν τον τρόπο είναι εφικτός ο έλεγχος της μέσης τιμής της τάσης εξόδου.

Ένα απλό κύκλωμα ελεγχόμενης ημιανόρθωσης με ωμικό φορτίο φαίνεται στην εικόνα 3.43.

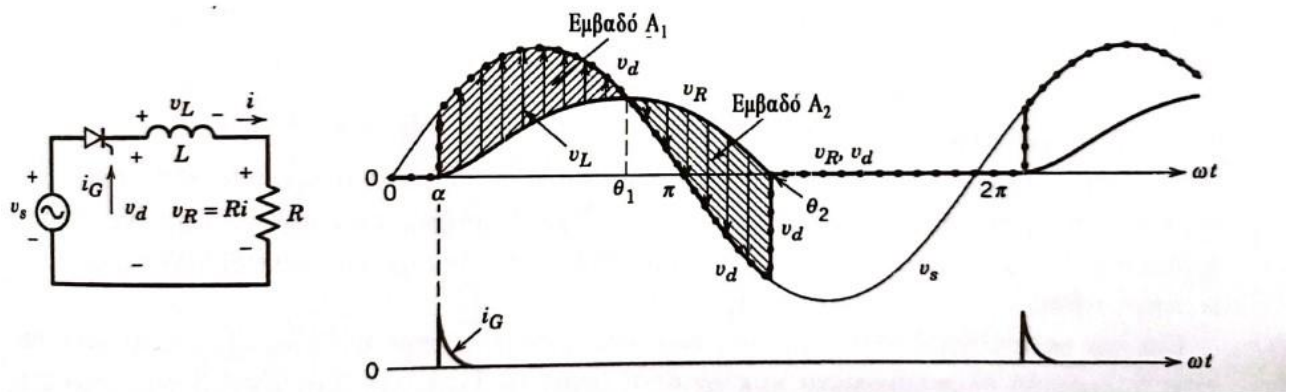


Εικόνα 3.43: Ελεγχόμενη ημιανόρθωση με ωμικό φορτίο [19].

Σε αυτήν την εικόνα ένα θυρίστορ συνδέεται σε σειρά με μια πηγή εναλλασσόμενης τάσης και μια ωμική αντίσταση. Στον ακροδέκτη που αποτελεί την πύλη του θυρίστορ εφαρμόζεται ένας θετικός παλμός μικρής διάρκειας. Κατά τη διάρκεια που η θετική ημιπερίοδος της τάσης εισόδου ξεκινά δεν εμφανίζεται ταυτόχρονα και στα άκρα του φορτίου όπως στην περίπτωση μιας απλής διόδου. Η τάση αυτή εμφανίζεται την χρονική στιγμή που το θυρίστορ λάβει τον θετικό παλμό στον ακροδέκτη της πύλης ($\omega t = \alpha$). Όταν η τάση εισόδου λάβει την τιμή μηδέν ($\omega t = \pi$), τότε το θυρίστορ παύει να άγει και η τάση εξόδου μηδενίζεται. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε περίοδο της τάσης εισόδου. Η χρονική στιγμή που εφαρμόζεται ο παλμός έναυσης του θυρίστορ ονομάζεται γωνία έναυσης και μπορεί να παραχθεί από κατάλληλα ολοκληρωμένα κυκλώματα.

Στην εικόνα 3.44 το φορτίο έχει επαγωγική συμπεριφορά. Μετά τη χρονική στιγμή $\omega t = \alpha$ αρχίζει η ροή ηλεκτρικού ρεύματος προς το φορτίο λόγω της θετικής τάσης στα άκρα του θυρίστορ. Από τη χρονική στιγμή α έως τη θ_1 η τάση στα άκρα του πηνίου είναι θετική και το ρεύμα αυξάνεται. Από τη χρονική στιγμή θ_1 η τάση του πηνίου γίνεται αρνητική και το ρεύμα αρχίζει να μειώνεται. Το

ρεύμα μηδενίζεται τη χρονική στιγμή θ_2 . Αυτό σημαίνει ότι το θυρίστορ συνεχίζει να άγει και για αρνητικές τιμές τάσης εισόδου. [19 §6.1, 6.2]



Εικόνα 3.44: Ελεγχόμενος ημιανορθωτής με επαγωγικό φορτίο [19].

3.3.3 Εφαρμογές σε αεροπλάνα

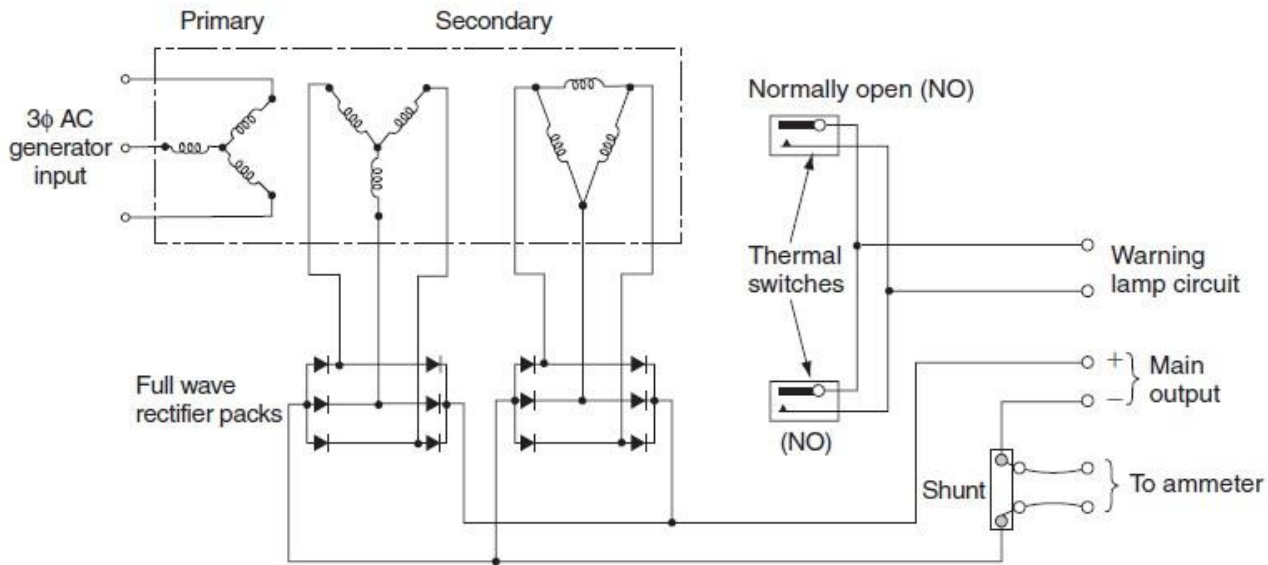
Στα περισσότερα μεγάλου μεγέθους αεροπλάνα η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με AC γεννήτριες. Αυτές οι γεννήτριες παράγουν τριφασική τάση με ενεργό τιμή φασικής τάσης 115 Volts και ενεργό τιμή πολικής τάσης 200Volts. Η τάση αυτή είναι ημιτονοειδής μορφής με συχνότητα 400Hz. Πολλά συστήματα του αεροπλάνου για τη λειτουργία τους χρειάζονται 28 Volts DC.

Η ανόρθωση της τάσης πραγματοποιείται με ηλεκτρονικές διατάξεις που ονομάζονται Transformer Rectifier Units (TRU). Οι διατάξεις αυτές αποτελούνται από έναν τριφασικό μετασχηματιστή ή τριφασικό αυτομετασχηματιστή, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον υποβιβασμό της τιμής της εναλλασσόμενης τάσης. Η υποβιβασμένη τάση σε τιμή εισέρχεται στην είσοδο της τριφασικής γέφυρας και στη συνέχεια εξέρχεται ανορθωμένη.

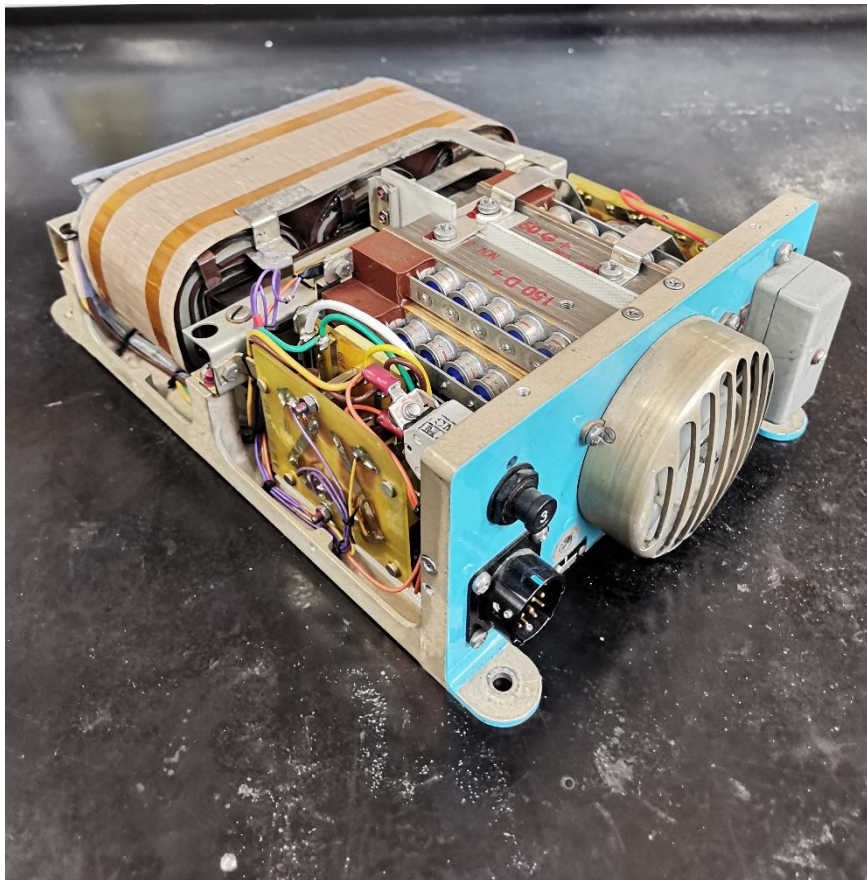
Στην εικόνα 3.45 φαίνεται το κύκλωμα ενός TRU που χρησιμοποιείται σε αεροπλάνα. Το πρωτεύον του μετασχηματιστή είναι συνδεδεμένο σε συνδεσμολογία τριγώνου. Διαθέτει δυο διαφορετικά τύλιγματα δευτερεύοντος. Το πρώτο τύλιγμα δευτερεύοντος είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο. Στη συνδεσμολογία αυτή (Δ - Δ) η κάθε φάση του πρωτεύοντος βρίσκεται σε φάση με την αντίστοιχη του δευτερεύοντος. Το δεύτερο τύλιγμα είναι συνδεδεμένο σε τρίγωνο. Στη συνδεσμολογία αυτή (Δ -Y) οι φάσεις του δευτερεύοντος έχουν διαφορά στη γωνία κατά 60° από τις αντίστοιχες του πρωτεύοντος.

Ο συνδυασμός αυτός έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργείται στην είσοδο του ανορθωτή ένα σύστημα έξι διαφορετικών τάσεων έναντι τριών που θα είχε αν χρησιμοποιούνταν ένα τύλιγμα δευτερεύοντος.

Συνεπώς η κυμάτωση που παρουσιάζει η ανορθωμένη τάση είναι μικρότερη και οι απαιτήσεις για φίλτρο ελαττώνονται.



Εικόνα 3.45: Κύκλωμα TRU [14].



Εικόνα 3.46: TRU (3Φ είσοδος 115/200 Volts - 400Hz / Έξοδος 28Volts DC).

3.4 Αντιστροφείς DC-AC διακοπτικού τύπου (inverter)

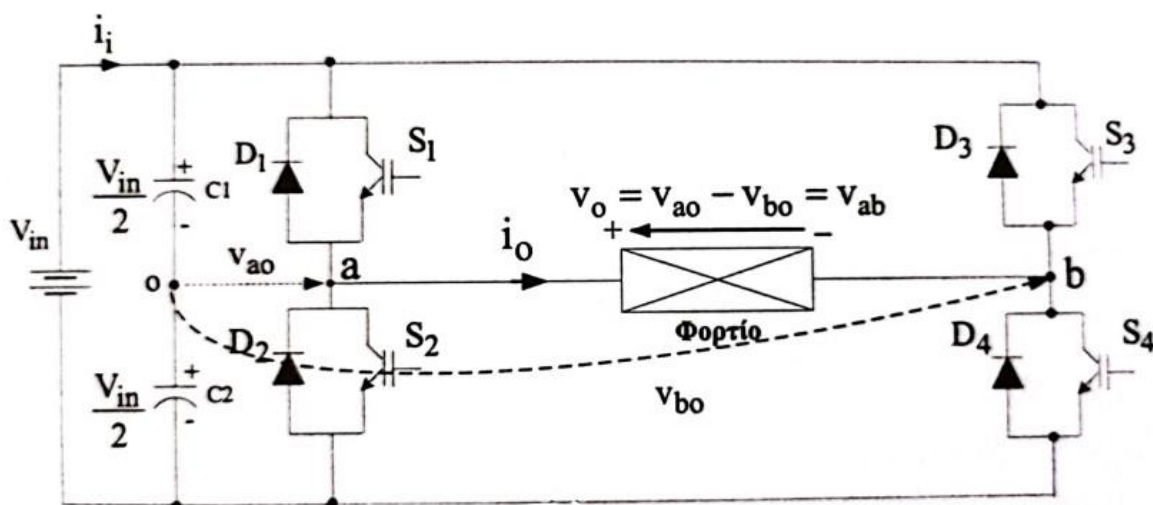
Οι αντιστροφείς dc – ac διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η μετατροπή της συνεχούς τάσης εισόδου σε εναλλασσόμενη τάση ημιτονοειδούς μορφής με ελεγχόμενα τόσο το πλάτος της τάσης, όσο και τη συχνότητά της. Οι αντιστροφείς χωρίζονται σε δυο κύριες κατηγορίες:

- Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή συνεχούς τάσης (Voltage Source Inverter, VSI)
- Αντιστροφείς τροφοδοτούμενοι από πηγή συνεχούς ρεύματος (Current Source Inverter, CSI)

Οι παραπάνω κατηγορίες μπορούν να υποδιαιρεθούν στις εξής:

- Μονοφασικοί αντιστροφείς ημιγέφυρας
- Μονοφασικοί αντιστροφείς γέφυρας
- Τριφασικοί αντιστροφείς γέφυρας

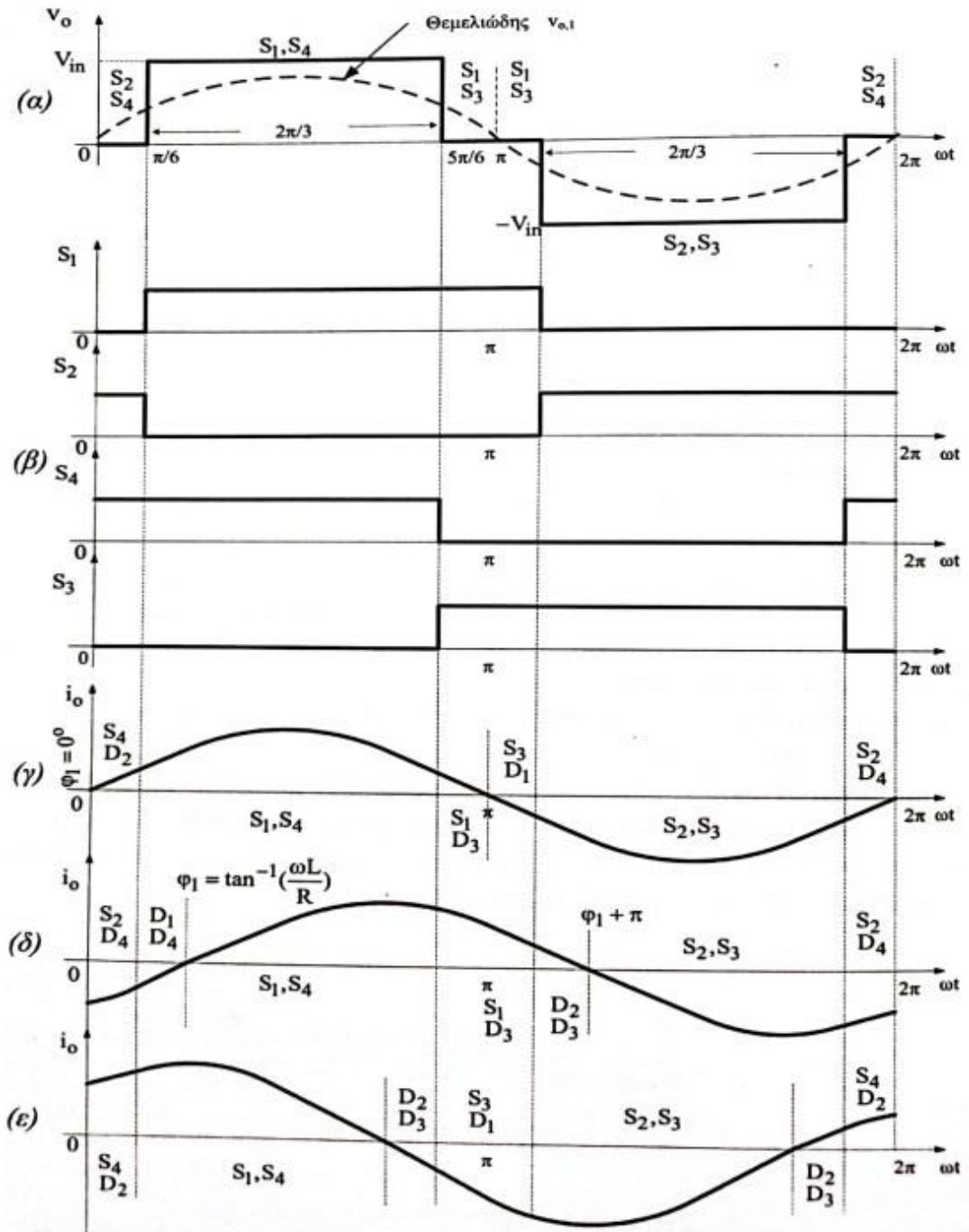
3.4.1 Μονοφασικός αντιστροφέας συνδεσμολογίας γέφυρας



Εικόνα 3.47: Μονοφασικός αντιστροφέας τύπου γέφυρας [37].

Η συνδεσμολογία ενός μονοφασικού αντιστροφέα τύπου γέφυρας φαίνεται στην εικόνα 3.47. Σε αυτό το κύκλωμα οι διακόπτες S1,S2,S3,S4 κατασκευάζονται από διάφορα είδη ημιαγωγικών στοιχείων ανάλογα με την ισχύ που έχουν να διαχειριστούν, όπως IGBTs, MOSFETs, θυρίστορ. Για την ορθή λειτουργία του κυκλώματος, οι ηλεκτρονικοί διακόπτες αυτοί πρέπει να άγουν σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ενός εξωτερικού κυκλώματος παραγωγής παλμών που ονομάζεται κύκλωμα οδήγησης. Το κύκλωμα οδήγησης και οι παλμοί που παράγονται από αυτό καθορίζουν τα επίπεδα της τάσης εξόδου του αντιστροφέα. Στην εικόνα 3.48 φαίνονται οι

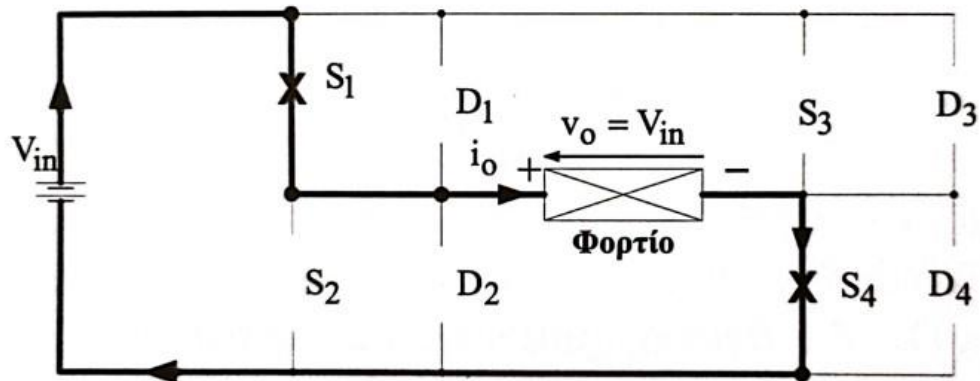
κυματομορφές ενός μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας με κύκλωμα οδήγησης τέτοιο, ώστε η τάση εξόδου να παρουσιάζει τρία επίπεδα (V_{in} , 0 , $-V_{in}$).



Εικόνα 3.48: Κυματομορφές μονοφασικού αντιστροφέα πλήρους γέφυρας α) τάση εξόδου τριών επιπέδων β) παλμοί κυκλώματος οδήγησης των IGBTs γ) ρεύμα εξόδου ωμικού φορτίου δ) ρεύμα εξόδου για ωμικό – επαγωγικό φορτίο ε) ρεύμα εξόδου για ωμικό – χωρητικό φορτίο [37].

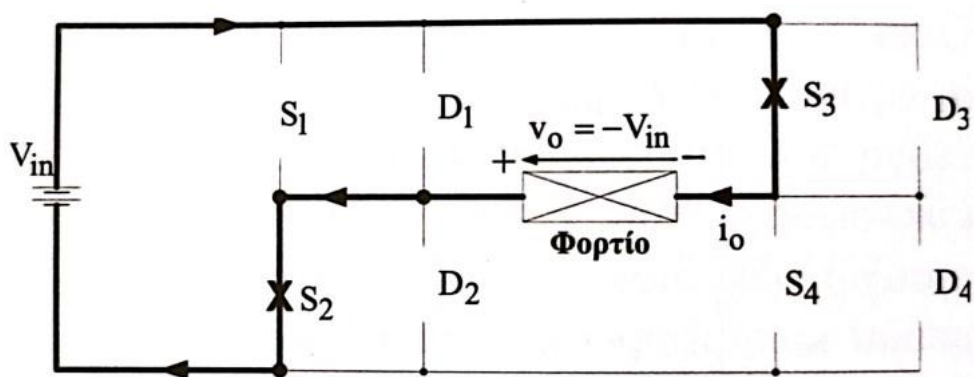
Ανάλογα με το είδος του φορτίου που τροφοδοτεί ένας αντιστροφέας προκύπτουν και τα εξής συμπεράσματα:

1. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου λαμβάνουν ταυτόχρονα θετικές τιμές (δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι θετική), τότε άγουν οι διακόπτες S1 και S4. Σε αυτήν την περίπτωση η ροή ισχύος γίνεται από την είσοδο προς την έξοδο του αντιστροφέα και η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 3.49.



Εικόνα 3.49: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή διακοπών S1 και S4 [37].

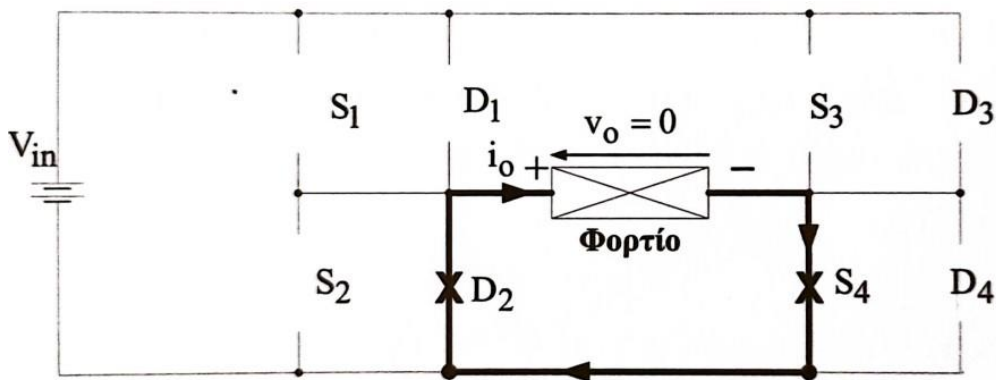
2. Όταν το ρεύμα και η τάση εξόδου λαμβάνουν ταυτόχρονα αρνητικές τιμές (δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι θετική), τότε άγουν οι διακόπτες S2 και S3 και η ροή ισχύος πάλι ρέει από την είσοδο του αντιστροφέα προς την έξοδο. Η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 3.50.



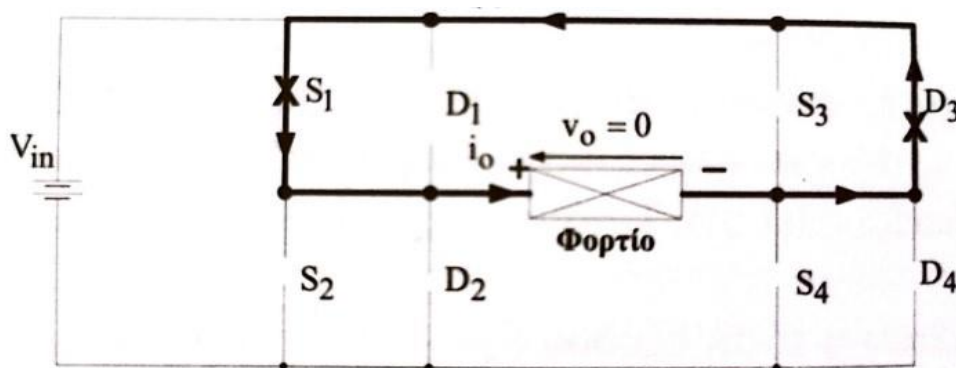
Εικόνα 3.50: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή διακοπών S2 και S3 [37].

3. Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή και το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι μηδενική), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη ημιαγωγικών στοιχείων (S4,D2), (S1,D3). Αν στην περίπτωση που άγει ο διακόπτης S1, τότε το ρεύμα αναγκάζεται να βρεθεί σε

αγωγή και η διάδος D3. Αν στην περίπτωση που άγει ο διακόπτης S4, τότε το ρεύμα αναγκάζει να βρεθεί σε αγωγή η διάδος D2. Το ρεύμα αυτό που ρέει στο υποκύκλωμα (S1 – φορτίο – D3) και (S4 – φορτίο – D2) ονομάζεται ανακυκλώμενο ρεύμα. Σε αυτήν την κατάσταση δεν υπάρχει ροή ισχύος μεταξύ εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα. Η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος ανάλογα με τον διακόπτη που βρίσκεται σε αγωγή φαίνεται στην εικόνα 3.51 και 3.52.

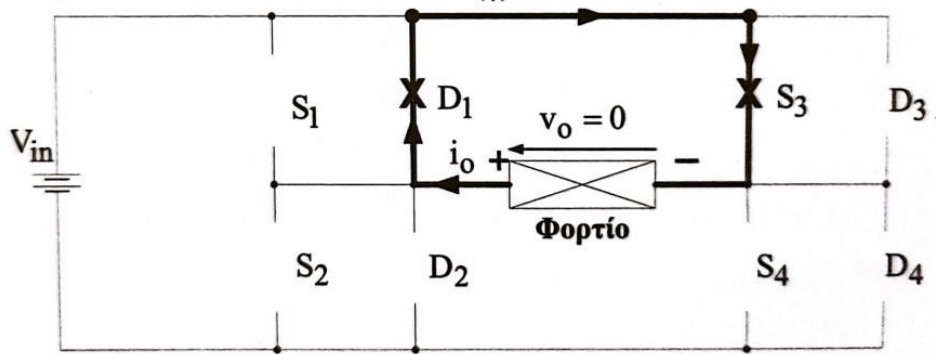


Εικόνα 3.51: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S4 και D2 [37].

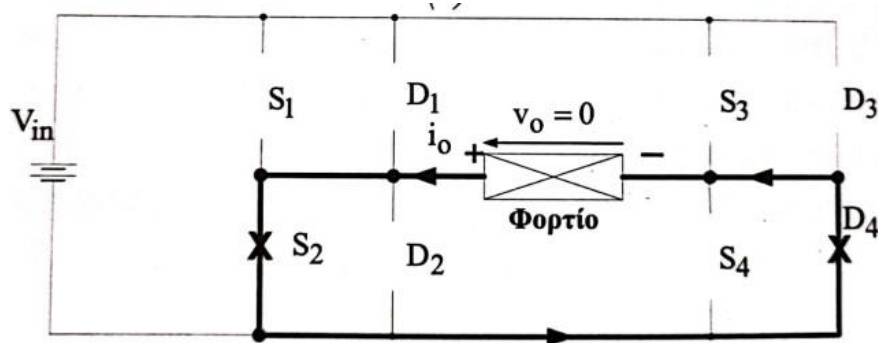


Εικόνα 3.52: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S1 και D3 [37].

4. Όταν η τάση εξόδου έχει μηδενική τιμή και το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλαδή η ισχύς εξόδου είναι μηδενική), τότε μπορεί να άγει ένα από τα ζεύγη ημιαγωγικών στοιχείων (S3,D1) , (S2,D4). Αν στην περίπτωση που άγει ο διακόπτης S3, τότε το ρεύμα αναγκάζει να βρεθεί σε αγωγή και η διάδος D1. Αν στην περίπτωση που άγει ο διακόπτης S2, τότε το ρεύμα αναγκάζει να βρεθεί σε αγωγή η διάδος D4. Το ρεύμα αυτό που ρέει στο υποκύκλωμα (S3 – φορτίο – D1) και (S2 – φορτίο – D4) ονομάζεται ανακυκλώμενο ρεύμα. Σε αυτήν την κατάσταση δεν υπάρχει ροή ισχύος μεταξύ εισόδου και εξόδου του αντιστροφέα. Η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος ανάλογα με τον διακόπτη που βρίσκεται σε αγωγή φαίνεται στην εικόνα 3.53 και 3.54.

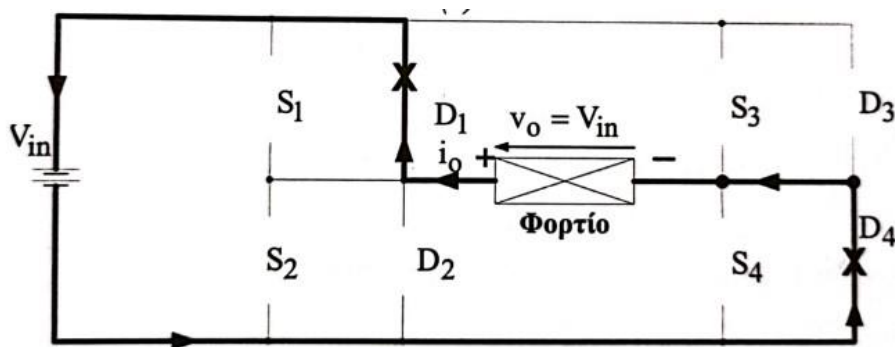


Εικόνα 3.53: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S3 και D1 [37].



Εικόνα 3.54: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή S2 και D4 [37].

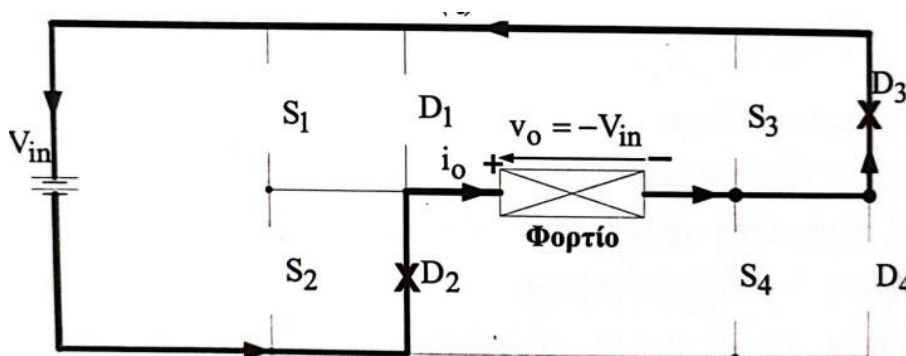
5. Όταν η τάση εξόδου έχει θετική τιμή και το ρεύμα εξόδου έχει αρνητική τιμή (δηλαδή η ισχύς εξόδου έχει αρνητική τιμή), τότε οι δίοδοι D1 και D4 αναγκάζονται να βρεθούν σε αγωγή. Με αυτήν τη διαδικασία ισχύς μεταφέρεται από το φορτίο προς την πηγή και ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ανόρθωση. Η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 3.55.



Εικόνα 3.55: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή D1 και D4 [37].

6. Όταν η τάση εξόδου έχει αρνητική τιμή και το ρεύμα εξόδου έχει θετική τιμή (δηλαδή η ισχύς εξόδου έχει αρνητική τιμή), τότε οι δίοδοι D2 και D3 αναγκάζονται να βρεθούν σε αγωγή.

Με αυτήν τη διαδικασία ισχύς μεταφέρεται από το φορτίο προς την πηγή και ο αντιστροφέας λειτουργεί ως ανόρθωση. Η ενεργός διαδρομή του κυκλώματος φαίνεται στην εικόνα 3.56.



Εικόνα 3.56: Μονοφασικός αντιστροφέας γέφυρας με αγωγή D1 και D4 [37].

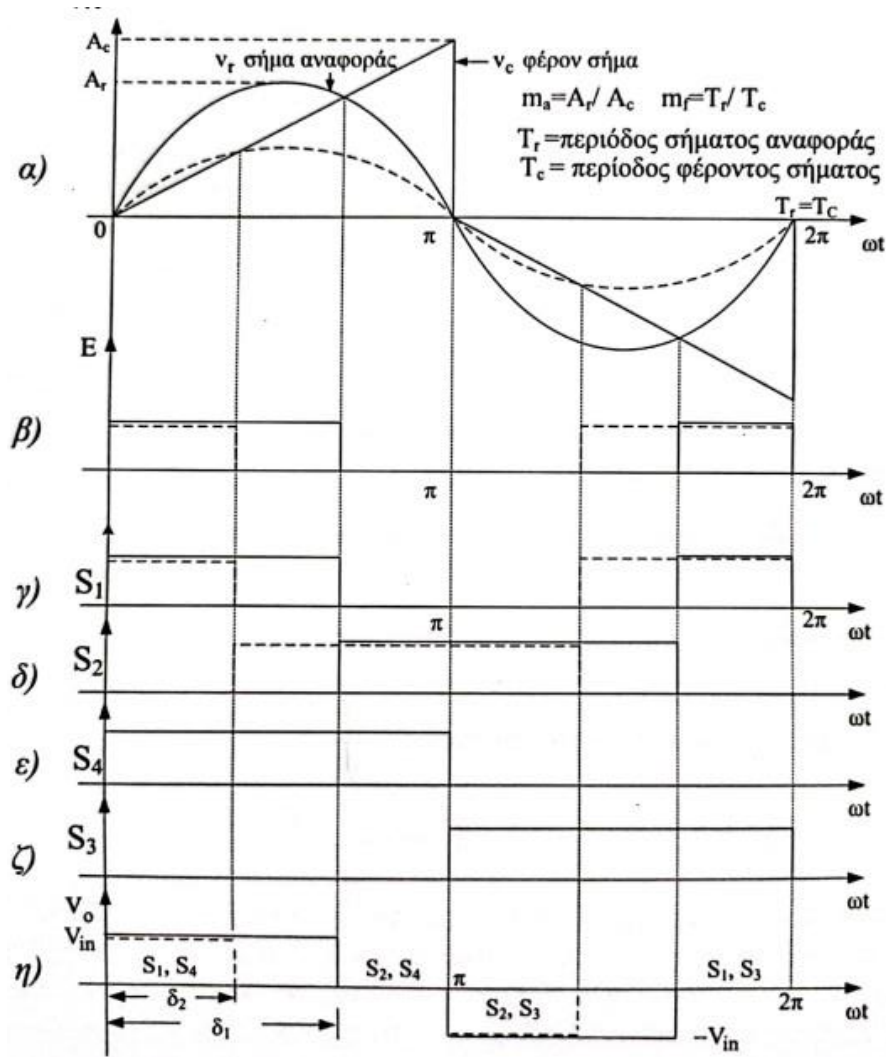
Σύμφωνα με τα παραπάνω τέτοιου είδους αντιστροφείς μπορούν να μεταφέρουν ενέργεια και από την πηγή προς το φορτίο και αντίστροφα. Γι' αυτόν τον λόγο ονομάζονται και αμφίπλευροι αντιστροφείς. Δηλαδή αν αυτόν ο αντιστροφέας συνδεθεί σε ένα κύκλωμα, το οποίο τροφοδοτεί μια εναλλασσόμενη ηλεκτρική μηχανή και αυτή η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας, τότε η ροή ισχύος θα γίνεται από την πηγή προς τη μηχανή. Εάν η μηχανή αυτή λειτουργεί ως γεννήτρια, τότε η ροή ισχύος θα γίνεται από τη γεννήτρια δια μέσου του αντιστροφέα (που λειτουργεί ως ανορθωτής) προς την πηγή εισόδου. [37 §6.2]

3.4.2 Διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM)

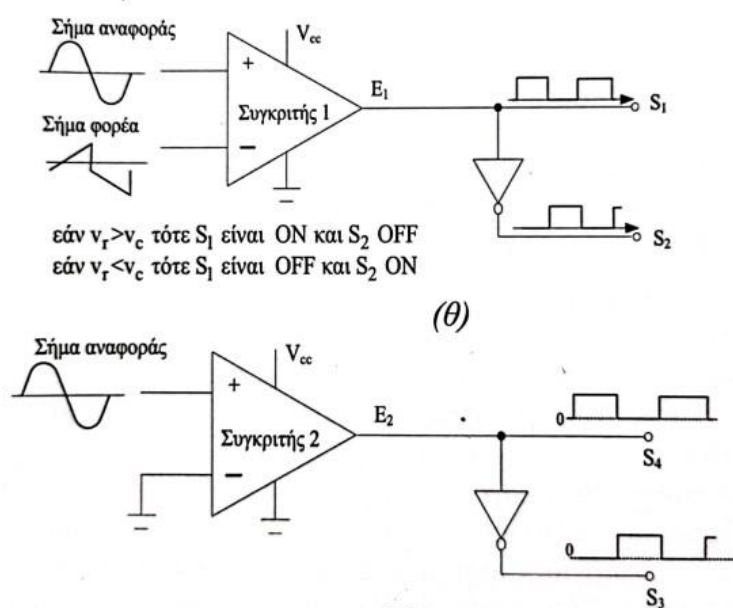
Για τη λειτουργία του κυκλώματος του αντιστροφέα είναι απαραίτητο η ύπαρξη ενός κυκλώματος οδήγησης που ελέγχει την αγωγή των διακοπών. Η τεχνική αυτή ονομάζεται διαμόρφωση εύρους παλμών (PWM – Pulse Width Modulation), η οποία επιτυγχάνει τον έλεγχο της τάσης εξόδου μέσω της αυξομείωσης του εύρους των παλμών της τάσης εξόδου.

Στην τεχνική αυτή με τη βοήθεια ηλεκτρονικών κυκλωμάτων υπάρχει παραγωγή δύο σημάτων. Το πρώτο σήμα έχει ημιτονοειδή μορφή και ονομάζεται κυματομορφή αναφοράς. Το δεύτερο σήμα είναι τριγωνικό και ονομάζεται κυματομορφή φέροντος σήματος. Τα δυο σήματα αυτά πρέπει να είναι συγχρονισμένα μεταξύ τους και να έχουν την ίδια συχνότητα (εικόνα 3.57a).

Στη συνέχεια τα δυο αυτά σήματα εφαρμόζονται στην είσοδο ενός συγκριτή, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.58. Όσο η τάση του σήματος αναφοράς (V_r) είναι μεγαλύτερη από την τάση του φέροντος (V_c), ο συγκριτής στην έξοδο του έχει τάση $+V_{sat}$. Όταν η τάση του φέροντος (V_c) γίνει μεγαλύτερη από την τάση του σήματος αναφοράς (V_r), ο συγκριτής μηδενίζει την τάση εξόδου του.



Εικόνα 3.57: Κυματομορφές τεχνικής PWM [37].

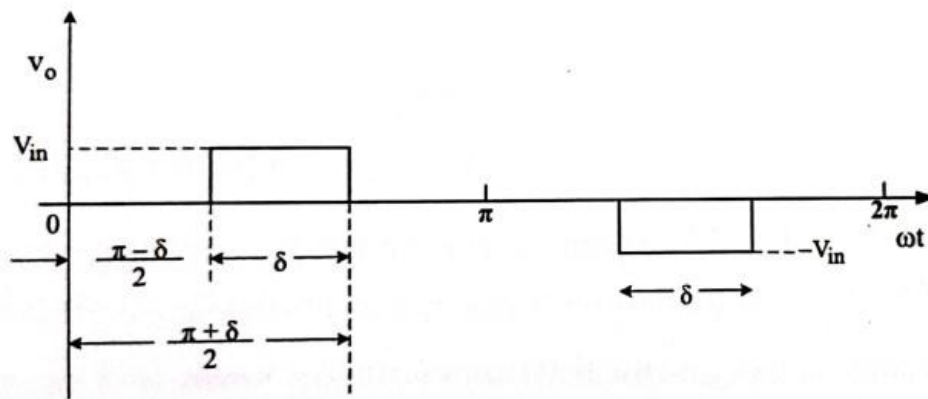


Εικόνα 3.58: Κύκλωμα συγκριτών τεχνικής PWM [37].

Ο συγκριτής Νο 1 ελέγχει τους διακόπτες S1 και S2, οι οποίοι δεν λειτουργούν ταυτόχρονα, διότι ο S2 τροφοδοτείται από την έξοδο του συγκριτή παρεμβάλλοντας μια πύλη NOT. Ο συγκριτής Νο 2 συγκρίνει το σήμα αναφοράς με τη γείωση. Συνεπώς η τάση στη έξοδο του είναι $+V_{sat}$ με σταθερό εύρος 180° . Οι διακόπτες S3 και S4 ελέγχονται από τον συγκριτή Νο 2. Παρόλα αυτά δεν άγουν ταυτόχρονα διότι ο διακόπτης S3 τροφοδοτείται με την παρεμβολή μιας πύλης NOT.

Με τη μεταβολή της συχνότητας του σήματος αναφοράς υπάρχει έλεγχος στη συχνότητα της τάσης εξόδου. Επιπλέον μέσω του σήματος αναφοράς υπάρχει και έλεγχος της rms τιμής της τάσης εξόδου. Γι' αυτόν τον λόγο το σήμα αναφοράς ονομάζεται συνήθως και σήμα ελέγχου.

Η κυματομορφή της τάσης εξόδου ενός αντιστροφέα έχει τη μορφή που φαίνεται στην εικόνα 3.59 παρακάτω:



Εικόνα 3.59: Κυματομορφή τάσης εξόδου μονοφασικού αντιστροφέα γέφυρας [37].

Η τάση αυτή μπορεί να αναπτυχθεί με σειρές Fourier όπως φαίνεται παρακάτω:

$$v_o = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} a_n \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1,2,3}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.106})$$

Όπου:

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{in} \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (\text{σχέση 3.107})$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} V_{in} \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (\text{σχέση 3.108})$$

Βάσει της εικόνας 3.59 η συνάρτηση της τάσης εξόδου είναι περιττή, συνεπώς οι συντελεστές a_n μηδενίζονται, οπότε η τάση εξόδου γράφεται :

$$v_o = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} b_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.109})$$

Από τους κανόνες της σειράς Fourier για περιττές συναρτήσεις:

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} V_o \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{8}{2\pi} \int_{\frac{\pi-\delta}{2}}^{\pi/2} V_{in} \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{4V_{in}}{n\pi} [-\cos(n\omega t)] \Big|_{\frac{\pi-\delta}{2}}^{\pi/2} =$$

$$= \frac{4V_{in}}{n\pi} \sin \frac{n\delta}{2} \quad (\text{σχέση 3.110})$$

Εάν η σχέση 3.110 αντικατασταθεί στην σχέση 3.109 τότε προκύπτει:

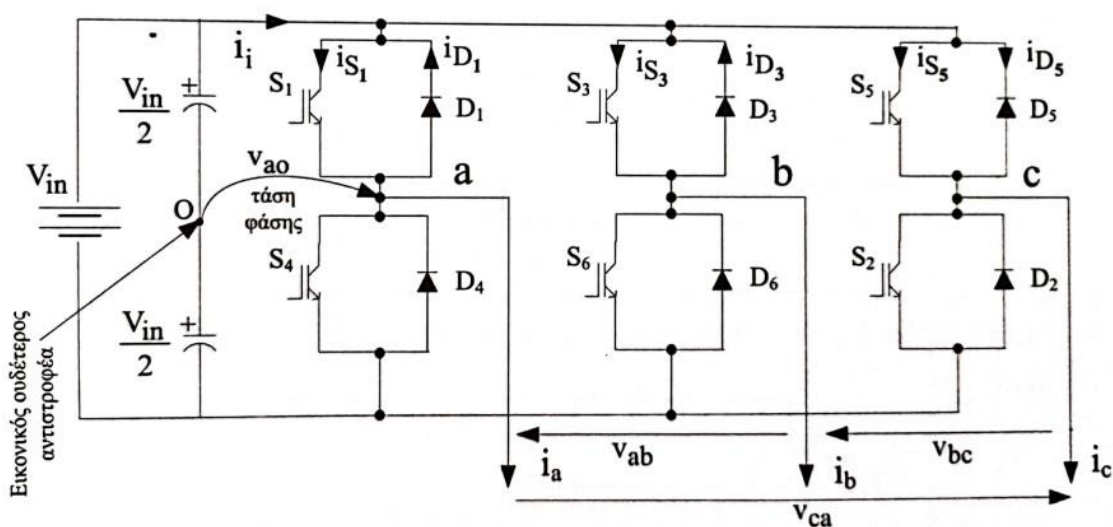
$$v_o = \sum_{n=1,2,3}^{\infty} \frac{4V_{in}}{n\pi} \sin \frac{n\delta}{2} \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{σχέση 3.111})$$

Η τάση της θεμελιώδους αρμονικής ισούται με [37 §6.2.1]:

$$\hat{V}_{o,1} = \frac{4V_{in}}{\pi} \sin \frac{\delta}{2} \quad (\text{σχέση 3.112})$$

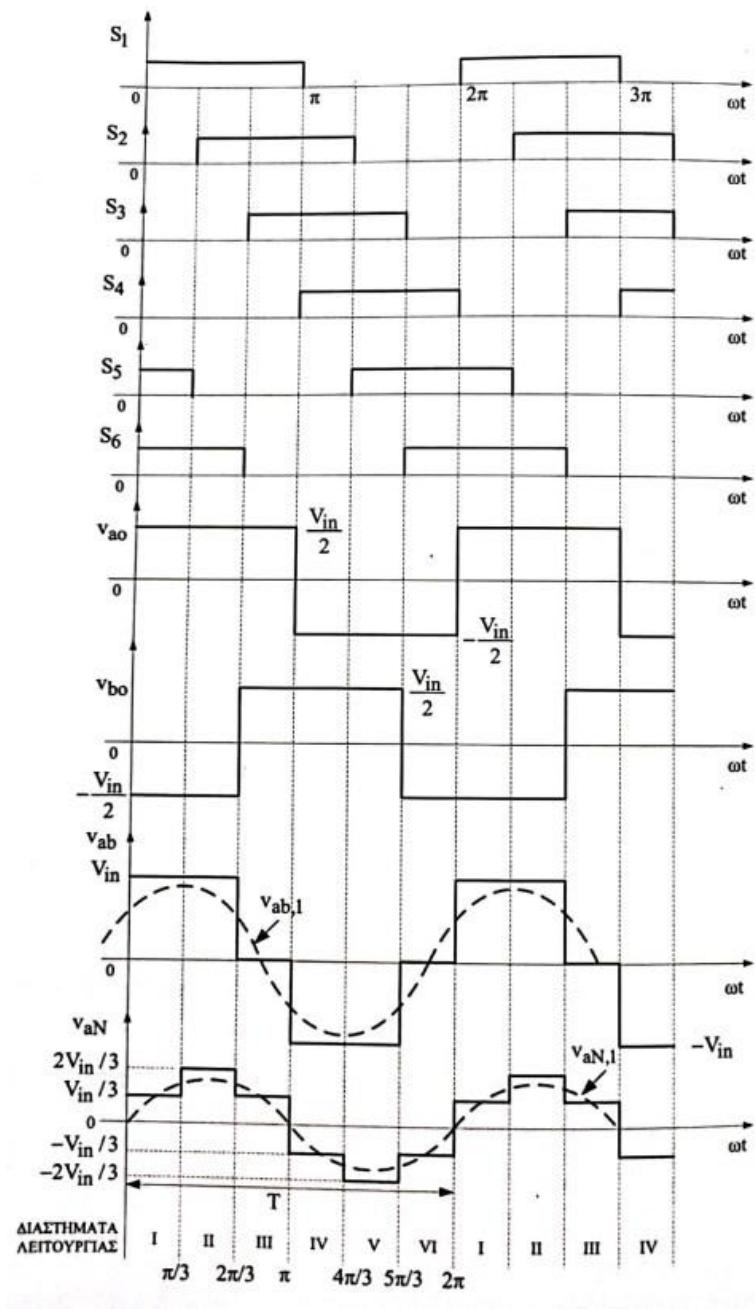
3.4.3 Τριφασικός αντιστροφείας

Το κύκλωμα ενός τριφασικού αντιστροφείας φαίνεται στην εικόνα 3.60 παρακάτω:



Εικόνα 3.60: Κύκλωμα τριφασικού αντιστροφείας [37].

Στο κύκλωμα ισχύος του τριφασικού αντιστροφέα χρησιμοποιούνται ηλεκτρονικοί διακόπτες οι οποίοι μπορεί να είναι IGBTs, GTO, MOSFETs ή θυρίστορ. Η επιλογή του είδους του διακόπτη γίνεται βάσει της απαιτούμενης παρεχόμενης ισχύος. Όπως και στον μονοφασικό αντιστροφέα, έτσι και στον τριφασικό αντιστροφέα, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός κυκλώματος οδήγησης για τον έλεγχο των διακοπών S1-S6. Από την εικόνα 3.60 γίνεται αντιληπτό ότι δεν πρέπει να βρισκονται σε αγωγή ταυτόχρονα τα ζεύγη διακοπών (S1,S4), (S3,S6), (S5,S2), διότι θα υπάρξει βραχυκύκλωση στην πηγή συνεχούς τάσης. Οι χαρακτηριστικές κυματομορφές του τριφασικού αντιστροφέα φαινονται στην εικόνα 3.61.

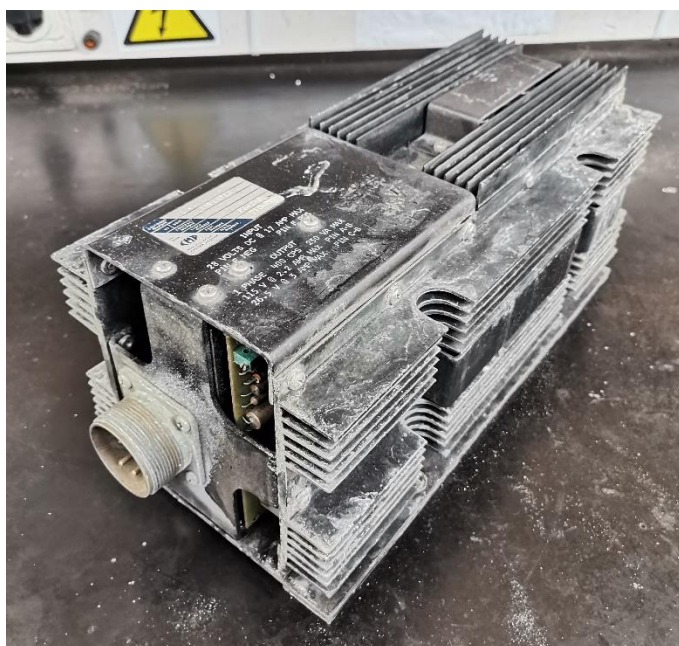


Εικόνα 3.61: Χαρακτηριστικές τριφασικού αντιστροφέα για συμμετρικό ωμικοεπαγωγικό φορτίο [37].

Για να επιτευχθούν οι κατάλληλες κυματομορφές των τάσεων στην έξοδο του αντιστροφέα, είναι απαραίτητη η σωστή αλληλουχία παλμών στους διακόπτες του κυκλώματος. Πιο αναλυτικά στην εικόνα 3.61 στο πρώτο διάστημα $[0, \pi/3]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S1, S5, S6 και η φασική τάση V_{ao} λαμβάνει τιμή $+V_{in}/2$. Στο δεύτερο διάστημα $[\pi/3, 2\pi/3]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S1, S2, S6 και η τάση εξόδου V_{ao} λαμβάνει τιμή $+V_{in}/2$. Στο τρίτο διάστημα $[2\pi/3, \pi]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S1, S2, S3 και η τιμή της φασικής τάσης V_{ao} λαμβάνει τιμή $+V_{in}/2$. Στο τέταρτο διάστημα $[\pi, 4\pi/3]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S2, S4, S3 και η τάση V_{ao} λαμβάνει τιμή $-V_{in}/2$. Στο πέμπτο διάστημα $[4\pi/3, 5\pi/3]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S5, S4, S3 και η τιμή της φασικής τάσης V_{ao} είναι $-V_{in}/2$. Στο έκτο διάστημα $[5\pi/3, 2\pi]$ βρίσκονται σε αγωγή οι διακόπτες S5, S4, S6 και η τιμή της φασικής τάσης V_{ao} είναι $-V_{in}/2$. [37 §6.3]

3.4.4 Εφαρμογές σε αεροπλάνα

Οι αντιστροφείς (inverters) χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στα αεροπλάνα. Όπως έχει αναφερθεί, τα αεροπλάνα διαθέτουν γεννήτριες που παράγουν ένα είδος ισχύος. Αυτή είναι είτε η εναλλασσόμενη, είτε η συνεχής. Όταν το αεροπλάνο διαθέτει γεννήτριες συνεχούς ρεύματος είναι απαραίτητη η μετατροπή του σε εναλλασσόμενο για τη λειτουργία διάφορων συστημάτων. Αυτό τον ρόλο τον αναλαμβάνουν τα inverter, τα οποία λαμβάνουν την DC τάση εισόδου και την μετατρέπουν σε AC τάση στην έξοδο τους. Η τάση αυτή μπορεί να είναι είτε μονοφασική, είτε τριφασική. Αυτό καθορίζεται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε αεροπλάνου. Τα σύγχρονα αεροπλάνα διαθέτουν inverter στατικού τύπου, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.62.



Εικόνα 3.62: Μονοφασικό inverter 115V – 400Hz.

3.5 Συμπεράσματα

Κάθε αεροπλάνο διαθέτει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από γεννήτριες. Οι γεννήτριες αυτές είναι ικανές να τροφοδοτήσουν όλες τις ηλεκτρικές απαιτήσεις του αεροπλάνου. Παρόλα αυτά το είδος της παραγόμενης ισχύος κάθε αεροπλάνου είναι σταθερό. Αυτή η παραγωγή γίνεται είτε στα 28V DC από γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, είτε 115-200V AC - 400Hz από γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος. Το αεροπλάνο όμως διαθέτει καταναλώσεις οι οποίες χρειάζονται και DC και AC τάση. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητη η διαδικασία του μετασχηματισμού, ανόρθωσης και αντίστροφης της ηλεκτρικής ισχύος ανάλογα με τις απαιτήσεις. Οι διαδικασίες αυτές αποτελούν ζωτικής σημασίας για τη σωστή λειτουργία του αεροπλάνου.

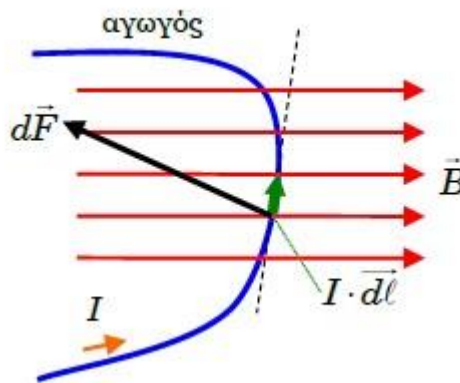
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : Ηλεκτρικοί κινητήρες

4.1 Δύναμη που ασκείται σε ρευματοφόρο αγωγό ευρισκόμενο σε μαγνητικό πεδίο

Όταν ένα στοιχειώδες φορτίο dq κινείται εντός μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής \vec{B} με ταχύτητα \vec{v} , τότε το μαγνητικό πεδίο του ασκεί μια στοιχειώδη δύναμη $d\vec{F}$ που δίνεται από τη σχέση:

$$d\vec{F} = dq \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 4.1})$$

Εάν το φορτίο κινείται σε μια διαδρομή που σχηματίζει ένας αγωγός, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.1, η σχέση 4.1 μπορεί να αναδιατυπωθεί όπως φαίνεται στη σχέση 4.2.



Εικόνα 4.1: Στοιχειώδης δύναμη που ασκείται σε στοιχειώδη μέρος του αγωγού όταν αυτός διαρρέεται από στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο [31].

$$d\vec{F} = dq \cdot \vec{v} \times \vec{B} = dq \cdot \frac{d\vec{\ell}}{dt} \times \vec{B} = \frac{dq}{dt} \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} = I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 4.2})$$

Όπου I : ένταση ηλεκτρικού ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό.

Εάν αυτές οι στοιχειώδεις δυνάμεις προστεθούν, τότε η συνολική δύναμη που ασκείται στον αγωγό που διαρρέεται από ρεύμα, ονομάζεται δύναμη Laplace και υπολογίζεται με τη σχέση:

$$\vec{F}_\mu = \int_C I \cdot d\vec{\ell} \times \vec{B} = I \cdot \int_C d\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 4.3})$$

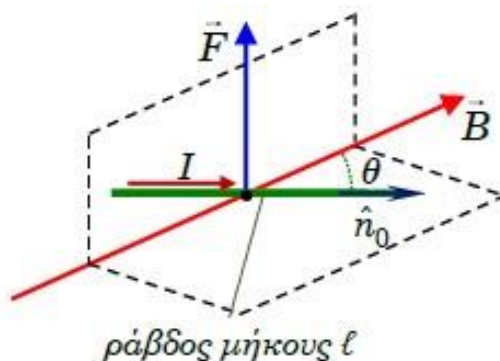
Όταν ο αγωγός που βρίσκεται εντός μαγνητικού πεδίου είναι ευθύγραμμος, τότε η σχέση 4.3 γράφεται:

$$\vec{F} = I \cdot \ell \cdot \hat{n}_o \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 4.4})$$

Λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες του εξωτερικού γινομένου, η δύναμη Laplace που ασκείται σε έναν ευθύγραμμο ρευματοφόρο αγωγό η σχέση 4.4 γράφεται:

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \theta \quad (\text{σχέση 4.5})$$

Όπου θ η γωνιά που σχηματίζεται μεταξύ του διανύσματος \vec{B} και του μοναδιαίου διανύσματος \hat{n}_0 [31 §11.2.3].



Εικόνα 4.2: Ασκούμενη δύναμη Laplace που ασκείται σε ευθύγραμμο αγωγό ευρισκόμενου σε μαγνητικό πεδίο [31].

4.2 Είδη κινητήρων

Σχεδόν την ίδια χρονική περίοδο με την ανάπτυξη της γεννήτριας υπήρξε και η ανάπτυξη της εννοίας του ηλεκτρικού κινητήρα. Ο Salvatore dal Negro το 1830 έδειξε ότι μπορεί να επιτευχθεί μια περιστροφική κίνηση, διότι ένας μαγνήτης βρισκόταν σε συνεχή ταλάντωση όταν πλησίαζε ένα πηνίο που διαρρεόταν από ηλεκτρικό ρεύμα. Το 1831 ο Joseph Henry ανέπτυξε ένα είδος ηλεκτρομηχανής που βασιζόταν σε μόνιμους μαγνήτες. Το 1838 ο Heinrich Lenz διατύπωσε πρώτος ότι μια ηλεκτρογεννήτρια μπορούσε να λειτουργήσει και ως κινητήρας. Η διατύπωση αυτή πέρασε απαρατήρητη μέχρι το 1860, όπου ο Pacinotti κατασκεύασε μια μηχανή με συλλέκτη, όπου το μαγνητικό πεδίο ουσιαστικά παρέμενε στάσιμο, ακόμα και με την περιστροφή του σιδερένιου μέρους της. Η πρώτη ηλεκτρική μηχανή, η οποία πουλήθηκε σε μεγάλες ποσότητες ήταν η ηλεκτρική πένα του Thomas Alva Edison, όπου η συγκεκριμένη περιλάμβανε μια μικροσκοπική για την εποχή ηλεκτρομηχανή. Το 1887 ο Frank Julian Sprague κατασκεύασε ένα σιδηρόδρομο 12 μιλίων στην Βιρτζίνια των ΗΠΑ. Ο Sprague με το έργο του έδωσε αποτελεσματικές λύσεις στα ζητήματα ελέγχου της ταχύτητας του σιδηροδρόμου και άνοιξε τον δρόμο για την παραγωγή των ηλεκτρομηχανών έλξης [32 §1.7.6]. Οι ηλεκτρικές μηχανές μπορούν να λειτουργήσουν και ως γεννήτριες και ως ηλεκτρικοί κινητήρες αλλάζοντας φυσικά η φορά της ροής της ισχύος. Οι ηλεκτρικές μηχανές χωρίζονται (γεννήτρια - κινητήρας) σε τρεις μεγάλες κατηγορίες

- Σύγχρονες μηχανές
- Μηχανές επαγωγής ή ασύγχρονες μηχανές
- Μηχανές συνεχούς ρεύματος [34 §4.1]

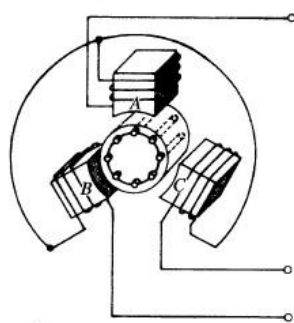
4.3 Τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας

Ο τριφασικός ασύγχρονος κινητήρας κατατάσσεται στην κατηγορία των κινητήρων επαγωγής. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των κινητήρων είναι ότι δεν απαιτούν την ύπαρξη τυλίγματος διέγερσης και γι' αυτόν τον λόγο η χρήση τους είναι ευρέως διαδεδομένη. Δεν απαιτούν συντήρηση, διότι δεν διαθέτουν εξαρτήματα που βρίσκονται σε τριβή πέρα από τα σημεία έδρασης του δρομέα [34 §7.1]. Οι επαγωγικοί κινητήρες μπορεί να κυμαίνονται από $\frac{1}{2}$ του ίππου έως και μεγαλύτεροι από 100.000 ίππους. Αν και η χρήση τους είναι διαδεδομένη, δεν χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται πολύ μεγάλη ροπή και σε εφαρμογές με λεπτομερή ρύθμιση των στροφών. Το κόστος κατασκευής τους είναι μικρότερο από αντιστοιχούν κινητήρες συνεχούς ρεύματος ίδιας ονομαστικής ισχύος και ταχύτητας περιστροφής [3 §4.1].

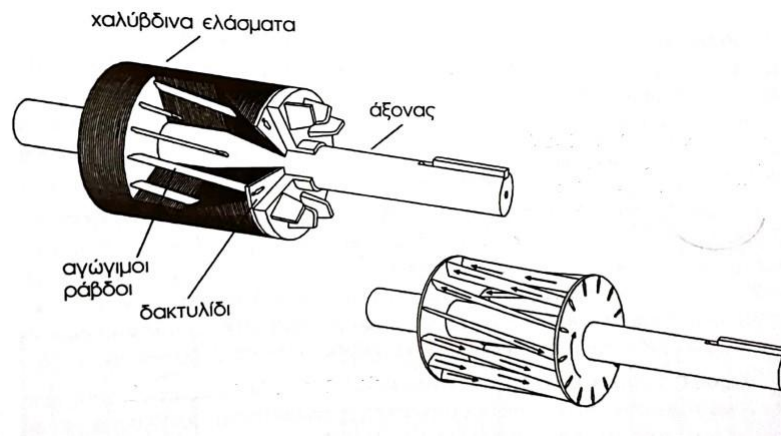
4.3.1 Αρχή λειτουργίας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας αποτελείται από τον στάτη και τον δρομέα. Στον στάτη είναι τοποθετημένα τρία τεμάχια σιδηρομαγνητικού πυρήνα, τα οποία είναι κατανεμημένα κατά 120° μεταξύ τους. Γύρω από τους πυρήνες τυλίγονται αγωγοί που αποτελούν τα πηνία του κινητήρα. Το ένα άκρο του πηνίου συνδέεται στο τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο, ενώ το άλλο άκρο συνδέεται με κατάλληλο τρόπο, ώστε να επιτευχθεί είτε συνδεσμολογία τριγώνου, είτε αστέρα.

Ο δρομέας του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα αποτελείται από δυο δακτυλίδια, τα οποία είναι βραχυκυκλωμένα μεταξύ τους με ράβδους, σχηματίζοντας έτσι έναν κλωβό. Στο κενό που δημιουργεί ο κλωβός τοποθετούνται σιδηροελάσματα, σχηματίζοντας έτσι έναν στερεό κύλινδρο, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.4.

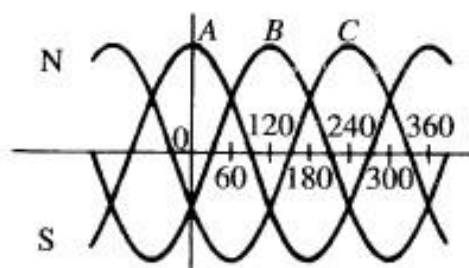


Εικόνα 4.3: Τυλίγματα σε συνδεσμολογία τριγώνου ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [3].

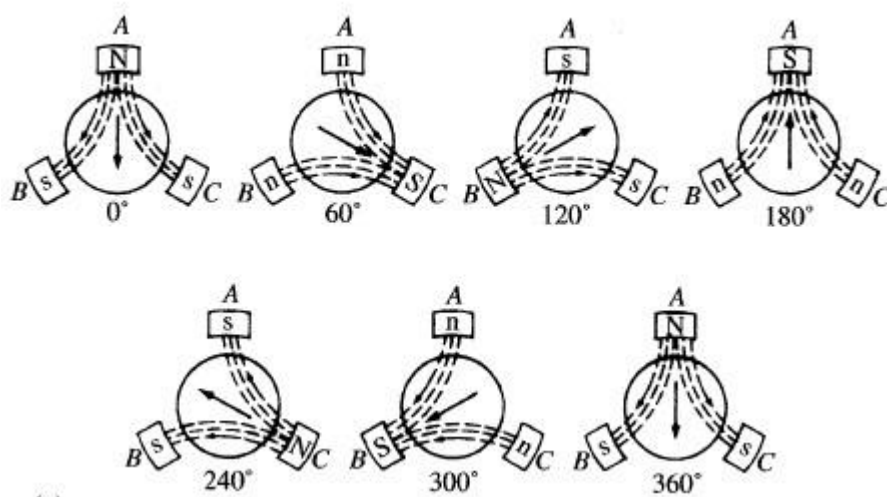


Εικόνα 4.4: Δρομέας ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [39].

Οι φάσεις ενός τριφασικού δικτύου παρουσιάζουν μια χρονική καθυστέρηση μεταξύ τους στην απόκτηση των μέγιστων, μηδενικών και μέγιστων αρνητικών τιμών τους (διαφορά φάσης). Αυτή η διαφορά φάσης σε ένα τριφασικό δίκτυο είναι 120° . Για τον λόγο αυτό όταν συνδεθούν στον επαγωγικό κινητήρα το ρεύμα που διαρρέει κάθε τυλίγμα έχει και αυτό μια διαφορά φάσης σε σχέση με τα υπόλοιπα δυο τυλίγματα. Αυτό έχει ως συνέπεια το μαγνητικό πεδίο κάθε πόλου να εναλλάσσεται κάθε 120° και ο κάθε πόλος να συμπεριφέρεται και ως βόρειος και ως νότιος. Στην εικόνα 4.5 φαίνονται οι κυματομορφές των τάσεων που εφαρμόζονται στα άκρα των τυλιγμάτων του κινητήρα. Στην εικόνα 4.6 φαίνεται η συμπεριφορά των πηνίων του κινητήρα σε κάθε χρονική στιγμή. Πιο αναλυτικά ένας εξωτερικός παρατηρητής τη χρονική στιγμή $t = 0$ βλέπει τον πόλο A ως έναν ισχυρό βόρειο πόλο λόγω της μέγιστης στιγμιαίας τιμής τάσης που λαμβάνει. Ενώ οι πόλοι B και C είναι ασθενείς νότιοι. Τη χρονική στιγμή $t = \pi/3$ (60°) ο πόλος C είναι ισχυρός νότιος, ενώ οι πόλοι A και B είναι ασθενείς βόρειοι. Τη χρονική στιγμή $t = 2\pi/3$ (120°) ο πόλος B είναι ένας ισχυρός βόρειος, ενώ οι πόλοι A και C ασθενείς νότιοι. Ουσιαστικά ο παρατηρητής θα παρατηρήσει μια περιστροφή του μαγνητικού πεδίου, που προέρχεται από την εναλλαγή βορείου και νοτίου πόλου κάθε τυλίγματος του στάτη.



Εικόνα 4.5: Κυματομορφές τριφασικής τάσης που εφαρμόζεται στα άκρα του επαγωγικού κινητήρα [3].



Εικόνα 4.6: Εναλλαγή πολικότητας μαγνητικού πεδίου στο εσωτερικό του επαγωγικού κινητήρα [3].

Η περιστροφή αυτή της ροής (περιστρεφόμενο πεδίο) παράγεται από τριφασικά ρεύματα που τροφοδοτούν σταθερά πηνία. Το στρεφόμενο αυτό πεδίο περιστρέφεται με μια ταχύτητα, η οποία ονομάζεται σύγχρονη ταχύτητα περιστροφής και δίνεται από τη σχέση:

$$n_{sync} = \frac{120f}{P} \quad (\text{σχέση 4.6})$$

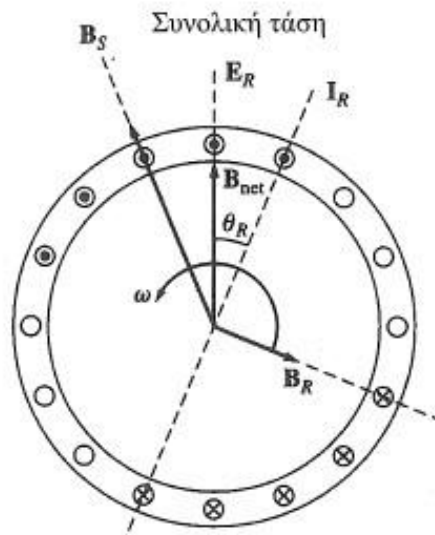
Όπου

f : συχνότητα τριφασικού συστήματος

P : αριθμός πόλων μηχανής

Στον δρομέα αναπτύσσεται μια τάση από επαγωγή λόγω της περιστροφής του μαγνητικού πεδίου σύμφωνα με τον νόμο του Faraday. Λόγω κλειστού κυκλώματος (βραχυκυκλωμένος δρομέας) ρέει ηλεκτρικό ρεύμα στις ράβδους του δρομέα. Σύμφωνα με τον νόμο του Laplace όταν ένας αγωγός διαρρέεται από ρεύμα ευρισκόμενος εντός μαγνητικού πεδίου αναπτύσσεται σε αυτόν δύναμη η οποία τείνει να τον κινήσει. Η φορά του ρεύματος που ρέει στις μπάρες του δρομέα εξαρτάται από τον κανόνα του δεξιού χεριού [3 §4.2]

Επειδή οι αγωγοί του δρομέα συνθέτουν μια αυτεπαγωγή, η μέγιστη τιμή του ρεύματος του δρομέα καθυστερεί σε σχέση με τη μέγιστη τιμή της επαγόμενης τάσης. Επιπλέον όταν οι αγωγοί του δρομέα αρχίσουν να διαρρέονται από ρεύμα, τότε αναπτύσσεται γύρω τους μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής B_r , όπως φαίνεται στην εικόνα 4.7.



Εικόνα 4.7: Δρομέας κλωβού ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4].

Ουσιαστικά τα δυο μαγνητικά πεδία (στάτη \vec{B}_S και δρομέα \vec{B}_R) που αναπτύσσονται παρουσιάζουν μια διαφορά φάσης μεταξύ τους και η συνολική ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = k(\vec{B}_S \times \vec{B}_R) \quad (\text{σχέση 4.7})$$

Όπου k : κατασκευαστική σταθερά κινητήρα

Από τη σχέση 4.7 παρατηρείται ότι, αν η γωνιά μεταξύ των δυο μαγνητικών πεδίων γίνει ίση με το μηδέν (συμφασικά διανύσματα \vec{B}_S και \vec{B}_R), τότε η ροπή του κινητήρα μηδενίζεται. Ουσιαστικά ο δρομέας του κινητήρα μπορεί να περιστρέφεται με ταχύτητα πολύ κοντά στην σύγχρονη χωρίς ποτέ να γίνεται ίδια. Αυτό γίνεται διότι δεν θα υπάρχει σχετική κίνηση των αγωγών του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη και συνεπώς δεν θα αναπτύσσεται επαγόμενη τάση στα άκρα τους. Το μέγεθος που περιγράφει τη σχετική κίνηση του δρομέα ως προς το μαγνητικό πεδίο του στάτη είναι η ολίσθηση και δίνεται από τη σχέση [4 §7.2]:

$$s = \frac{n_{sync} - n_m}{n_{sync}} \cdot 100\% \quad (\text{σχέση 4.8})$$

4.3.2 Ισοδύναμο κύκλωμα

Για την ανάλυση του ισοδύναμου κυκλώματος του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα τα τυλίγματα του στάτη της μηχανής θεωρούνται συμμετρικά και συνδεδεμένα σε τρίγωνο. Επιπλέον τα τυλίγματα

αυτά θεωρούνται ότι τροφοδοτούνται από συμμετρικές πολυφασικές τάσεις. Τέλος οι τάσεις και τα ρεύματα της μηχανής θεωρούνται ημιτονοειδής μορφής.

Το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται από τα εναλλασσόμενα ρεύματα (πηγή - δίκτυο), τα οποία τροφοδοτούν τα τυλίγματα του στάτη αναπτύσσουν στα ίδια τυλίγματα μια τάση από επαγωγή. Η τάση αυτή ονομάζεται αντιηλεκτρεγερτική δύναμη. Συνεπώς η διανυσματική σχέση που περιγράφει την τάση ανά φάση δίνεται από τη σχέση:

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + \vec{I}_1(R_1 + jX_1) \quad (\text{σχέση 4.9})$$

Όπου:

\vec{V}_1 : η τάση ακροδεκτών του στάτη

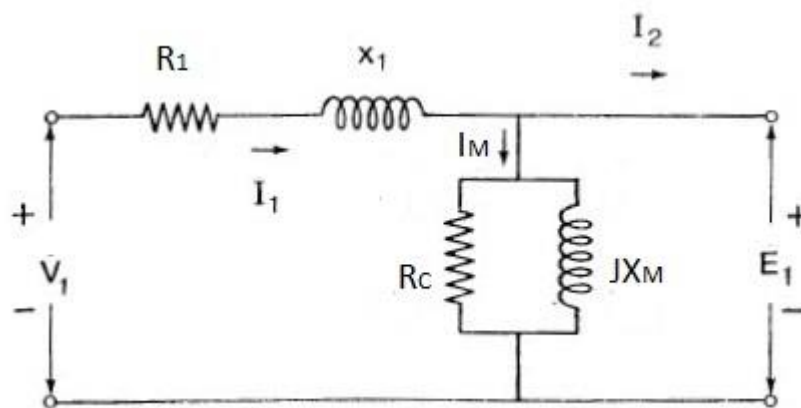
\vec{E}_1 : Η συνισταμένη ΑΗΕΔ που αναπτύσσεται από τη μαγνητική ροή διάκενού

\vec{I}_1 : ρεύμα του στάτη

R_1 : η πραγματική αντίσταση του τυλίγματος στάτη

jX_1 : η αντίδραση σκεδάσεως του στάτη

Το ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη φαίνεται στην εικόνα 4.8 παρακάτω:



Εικόνα 4.8: Ισοδύναμο κύκλωμα στάτη μιας φάσης ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [10].

Παρόμοια με το ισοδύναμο κύκλωμα ενός μετασχηματιστή το ρεύμα του στάτη μπορεί να αναλυθεί σε δυο συνιστώσες: τη συνιστώσα φορτίου και τη συνιστώσα διεγέρσεως. Η συνιστώσα φορτίου I_2 είναι υπεύθυνη για την παραγωγή κύματος ΜΕΔ, η οποία αντιτίθεται στην ΗΕΔ του ρεύματος του

δρομέα. Ενώ η συνιστώσα διεγέρσεως I_M είναι υπεύθυνη για την παραγωγή του μαγνητικού πεδίου του στάτη [10 §12.1].

Το κύκλωμα της εικόνας 4.8 δεν αντιπροσωπεύει ολόκληρο το ισοδύναμο κύκλωμα του ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα, διότι δεν περιλαμβάνεται η επίδραση του δρομέα. Όταν τα τυλίγματα του στάτη της μηχανής διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα, τότε επάγεται τάση στον δρομέα. Αυτή η επαγόμενη τάση είναι ανάλογη της σχετικής κίνησης των δυο μαγνητικών πεδίων στάτη και δρομέα. Η σχετική αυτή κίνηση γίνεται μέγιστη όταν ο δρομέας της μηχανής παραμένει κινητοποιημένος, ενώ γίνεται ελάχιστη όταν η ταχύτητα του δρομέα φτάσει τη σύγχρονη ταχύτητα της μηχανής. Για οποιαδήποτε ενδιάμεση ταχύτητα η επαγόμενη τάση στον δρομέα είναι ανάλογη της ολίσθησης (σχέση 4.8). Εάν η επαγόμενη τάση με ακινητοποιημένο δρομέα συμβολίζεται με E_{R0} , η επαγόμενη τάση για οποιαδήποτε τιμή ολίσθησης δίνεται από τη σχέση:

$$E_R = s \cdot E_{R0} \quad (\text{σχέση 4.10})$$

Ενώ η συχνότητα της επαγόμενης τάσης του δρομέα δίνεται από την σχέση:

$$f_r = s \cdot f \quad (\text{σχέση 4.11})$$

Ο δρομέας της μηχανής παρουσιάζει μια αντίσταση και μια αντίδραση. Η αντίσταση του δρομέα R_R παραμένει σταθερή ενώ η αντίδραση X_R δεν είναι σταθερή και εξαρτάται από την ολίσθηση που παρουσιάζει ο κινητήρας. Η σχέση υπολογισμού της αντίδρασης δίνεται από την σχέση :

$$X_R = \omega_r \cdot L_R = 2 \cdot \pi \cdot f_r \cdot L_R \quad (\text{σχέση 4.12})$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 4.11 στη 4.12 προκύπτει:

$$X_R = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f \cdot L_R \quad (\text{σχέση 4.13})$$

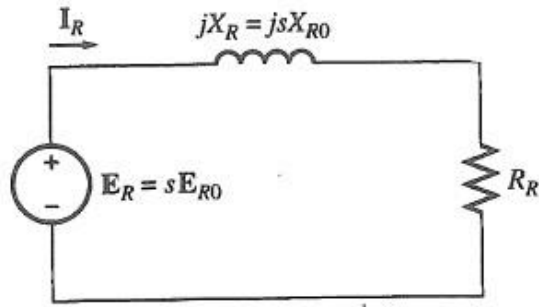
Αναλύοντας τη σχέση 4.13 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$X_R = s \cdot (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_R) = s \cdot X_{R0} \quad (\text{σχέση 4.14})$$

Όπου

X_{R0} : αντίδραση ακινητοποιημένου δρομέα

Συνεπώς το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα φαίνεται στην εικόνα 4.9.

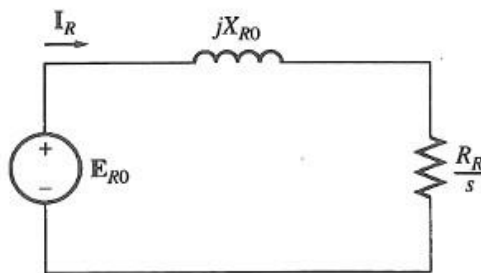


Εικόνα 4.9: Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4].

Σύμφωνα με τον νόμο του Ohm η ένταση του ρεύματος που κυκλοφορεί στον δρομέα δίνεται από την σχέση:

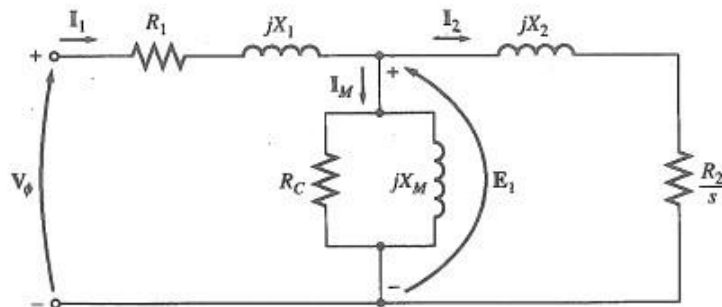
$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (\text{σχέση 4.15})$$

Σύμφωνα με τη σχέση 4.15 το ισοδύναμο κύκλωμα του δρομέα παίρνει τη μορφή της εικόνας 4.10.



Εικόνα 4.10: Ισοδύναμο κύκλωμα δρομέα ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα [4].

Τα ισοδύναμα κυκλώματα στάτη και δρομέα είναι αναγκαίο να εκφραστούν σε ένα ενιαίο κοινό ισοδύναμο κύκλωμα. Το κύκλωμα αυτό λαμβάνει την παρακάτω μορφή:



Εικόνα 4.11: Ισοδύναμο κύκλωμα μιας φάσης επαγωγικού κινητήρα [4].

Στο κύκλωμα της εικόνας 4.11 τα ισοδύναμα μεγέθη των στοιχείων του δρομέα έχουν μεταφερθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα του στάτη μέσω του λόγου μετασχηματισμού a_{eff} . Οι σχέσεις υπολογισμού των νέων μεγεθών του δρομέα ανηγμένων στον στάτη φαίνονται παρακάτω:

$$E_1 = E'_R = a_{eff} \cdot E_{R0} \quad (\text{σχέση 4.16})$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{eff}} \quad (\text{σχέση 4.17})$$

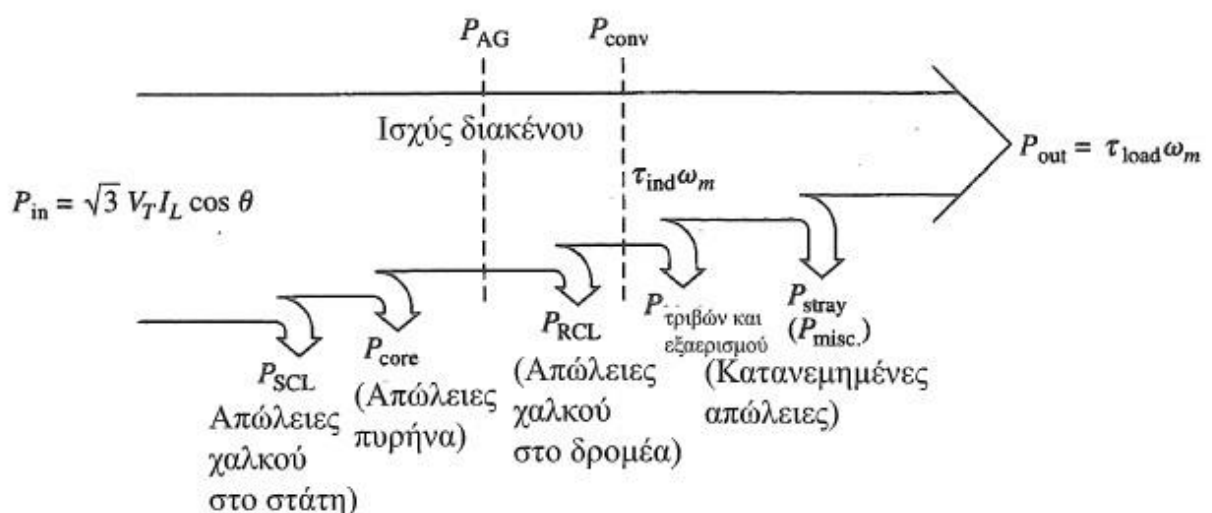
$$R_2 = a_{eff}^2 \cdot R_R \quad (\text{σχέση 4.18})$$

$$X_2 = a_{eff}^2 \cdot X_{R0} \quad (\text{σχέση 4.19})$$

Στην πραγματικότητα είναι πολύ δύσκολο η μέτρηση της ωμικής αντίστασης και αντίδρασης του δρομέα όταν πρόκειται για επαγωγικούς κινητήρες κλωβού. Επιπλέον εξίσου δύσκολο είναι ο προσδιορισμός του λόγου μεταφοράς του επαγωγικού κινητήρα. Γι' αυτόν τον λόγο υπάρχουν διάφορες μέθοδοι μέτρησης της ανακλώμενης ωμικής αντίστασης R_2 και αντίδρασης X_2 . [4 §4.3]

4.3.3 Ισχύς, ροπή και χαρακτηριστικές καμπύλες ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα

Το διάγραμμα ροής ισχύος ενός ασύγχρονου τριφασικού κινητήρα φαίνεται στην εικόνα 4.12 παρακάτω.



Εικόνα 4.12: Διάγραμμα ροής ισχύος ενός επαγωγικού κινητήρα [4].

Η ηλεκτρική ισχύς εισόδου ενός επαγωγικού κινητήρα υπολογίζεται βάσει του τριφασικού συστήματος τάσεων και εντάσεων. Οι πρώτες απώλειες που υπολογίζονται είναι αυτές που προέρχονται από την ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων του στάτη και ονομάζονται απώλειες χαλκού στάτη (P_{SCL}). Στη συνέχεια ένα ποσό ισχύος χάνεται εξαιτίας των δινορρευμάτων που αναπτύσσονται στον στάτη, καθώς και σε απώλειες υστέρησης (P_{core}). Στη συνέχεια η ισχύς που απομένει περνά στον δρομέα μέσω του διακένου που σχηματίζεται μεταξύ του στάτη και του δρομέα. Η ισχύς αυτή ονομάζεται ισχύς διακένου (P_{AG}). Ένα μέρος της μεταφερομένης αυτής ισχύος χάνεται στην ωμική αντίσταση του τυλίγματος του δρομέα (κλωβός). Οι απώλειες αυτές ονομάζονται απώλειες χαλκού δρομέα (P_{RCL}). Η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική (P_{conv}). Στη μηχανική ισχύ υπάρχουν απώλειες που οφείλονται σε διάφορες τριβές που υπάρχουν στο εσωτερικό της μηχανής (ρουλεμάν έδρασης, φτερωτή ψύξης) και ονομάζονται απώλειες τριβών και εξαερισμού ($P_{F\&W}$). Επιπλέον στις μηχανικές απώλειες εντάσσονται και οι κατανεμημένες απώλειες (P_{misc}). Η ισχύς που απομένει είναι η ισχύς εξόδου της μηχανής (P_{out}).

Απώλειες πυρήνα υπάρχουν και στον στάτη και στον δρομέα. Λόγω ότι η μηχανή περιστρέφεται πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα οι απώλειες πυρήνα του δρομέα είναι λιγότερες σε σχέση με τις απώλειες πυρήνα του στάτη. Γι' αυτόν τον λόγο οι συνολικές απώλειες πυρήνα λαμβάνονται υπόψη στον στάτη και όχι στον δρομέα.

Οι απώλειες τριβών και εξαερισμού καθώς και οι κατανεμημένες απώλειες αυξάνονται με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Δηλαδή, όταν ο κινητήρας λειτουργεί με τις μέγιστες ονομαστικές στροφές, οι απώλειες τριβών και εξαερισμού γίνονται μέγιστες. Παρόλα αυτά όταν ο δρομέας πλησιάζει τη σύγχρονη ταχύτητα οι απώλειες πυρήνα μειώνονται. Οι τρεις κατηγορίες απωλειών αυτές μπορούν να συμψηφιστούν και να ονομαστούν απώλειες περιστροφής. Οι απώλειες περιστροφής θεωρούνται σταθερές με την μεταβολή της ταχύτητας, διότι οι επιμέρους απώλειες μεταβάλλονται με αντίθετη κατεύθυνση.

Με βάση τα παραπάνω και σε συνδυασμό οι απώλειες χαλκού του στάτη ανά φάση (P_{SCL}) υπολογίζονται με τη σχέση:

$$P_{SCL} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 \quad (\text{σχέση 4.20})$$

Οι απώλειες του πυρήνα (P_{core}) του επαγωγικού κινητήρα δίνονται από τη σχέση:

$$P_{core} = \frac{3 \cdot E_1^2}{R_c} \quad (\text{σχέση 4.21})$$

Η ισχύς του διάκενου υπολογίζεται από τη σχέση:

$$P_{AG} = P_{in} - P_{SCL} - P_{core} \quad (\text{σχεση 4.22})$$

Οι απώλειες χαλκού του δρομέα (P_{RCL}) δίνονται από την σχέση:

$$P_{RCL} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \quad (\text{σχέση 4.23})$$

Η ισχύς διακένου (P_{AG}) μπορεί να καταναλωθεί μόνο στην ωμική αντίσταση που παρουσιάζει ο δρομέας. Συνεπώς μπορεί να γραφτεί:

$$P_{AG} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} \quad (\text{σχέση 4.24})$$

Με την αφαίρεση των απωλειών χαλκού του στάτη, απωλειών πυρήνα και απωλειών χαλκού του δρομέα από την ισχύ εισόδου του κινητήρα, η ισχύς που απομένει μετατρέπεται από ηλεκτρική σε μηχανική και δίνεται από τη σχέση:

$$P_{conv} = P_{AG} - P_{RCL} = 3 \cdot I_2^2 \cdot \frac{R_2}{s} - 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1}{s} - 1\right) \Rightarrow$$

$$P_{conv} = 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{1-s}{s}\right) \quad (\text{σχέση 4.25})$$

Σε συνδυασμό των σχέσεων 4.23 και 4.24 προκύπτει:

$$P_{RCL} = s \cdot P_{AG} \quad (\text{σχεση 4.26})$$

Σύμφωνα με τη σχέση 4.26 παρατηρείται ότι όσο μικρότερη είναι η ολίσθηση, τόσο μικρότερες είναι οι απώλειες χαλκού του δρομέα. Δηλαδή όταν ο δρομέας περιστρέφεται κοντά στις σύγχρονες στροφές, οι απώλειες χαλκού του δρομέα ελαττώνονται.

Όταν οι απώλειες τριβών και οι κατανεμημένες απώλειες είναι γνωστές η ισχύς εξόδου δίνεται από τη σχέση:

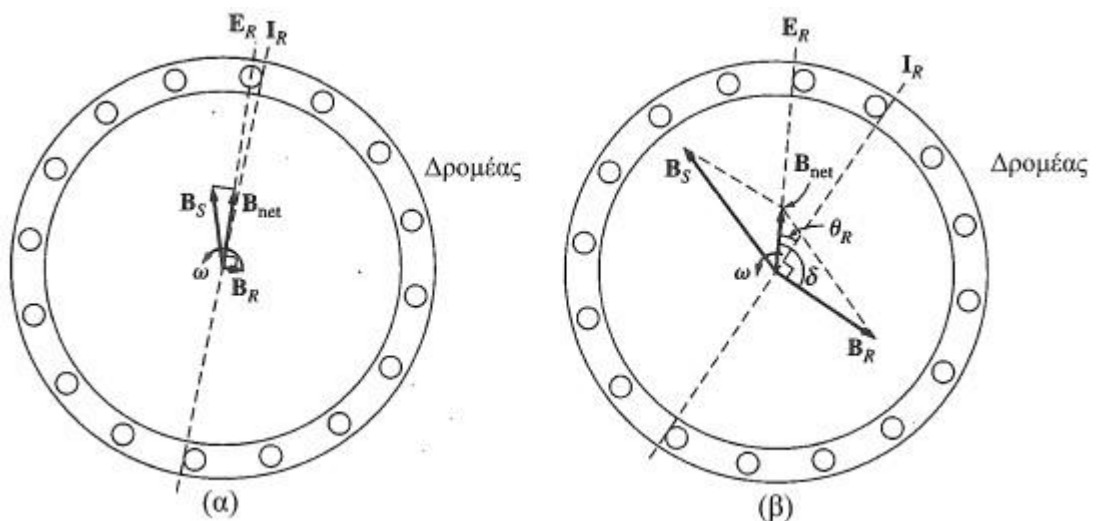
$$P_{out} = P_{conv} - P_{F\&W} - P_{misc} \quad (\text{σχέση 4.27})$$

Η επαγόμενη ροπή στο εσωτερικό της μηχανής είναι η ροπή που αναπτύσσεται κατά τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική και δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = \frac{P_{conv}}{\omega_m} \quad (\text{σχέση 4.28})$$

Στην εικόνα 4.13α φαίνεται ένας επαγωγικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου δρομέα που λειτουργεί χωρίς φορτίο. Σε αυτήν την περίπτωση ο δρομέας περιστρέφεται πολύ κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο B_{net} της μηχανής παράγεται από το ρεύμα μαγνήτισης I_M . Τα πλάτη του συνολικού μαγνητικού πεδίου καθώς και του ρεύματος μαγνήτισης είναι ανάλογα της τάσης E_1 . Σε μια πραγματική μηχανή η τάση E_1 μεταβάλλεται ανάλογα με τη μεταβολή του φορτίου καθώς οι σύνθετες αντιστάσεις και αντιδράσεις προκαλούν μεταβολή της πτώσης τάσης με τη μεταβολή του φορτίου. Παρόλα αυτά οι μεταβολές αυτές είναι μικρές και η τάση E_1 παραμένει σχεδόν σταθερή με τη μεταβολή του φορτίου.

Η επαγόμενη τάση στον δρομέα E_R καθώς και το αντίστοιχο ρεύμα του δρομέα I_R παραμένουν σε χαμηλή τιμή διότι η ολίσθηση είναι πολύ μικρή (σχέση 4.10). Το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R που παράγεται από το ρεύμα δρομέα I_R έπεται του συνολικού μαγνητικού πεδίου της μηχανής κατά περίπου 90° . Το ρεύμα του στάτη είναι μεγάλο ακόμα και για λειτουργία χωρίς φορτίο και κατά συνέπεια και το μαγνητικό πεδίο του στάτη.



Εικόνα 4.13: Μαγνητικά πεδία στο εσωτερικό του επαγωγικού κινητήρα που λειτουργούν με
α)χωρίς φορτίο β)μεγάλο φορτίο [4].

Η αναπτυσσόμενη ροπή της μηχανής δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = k \cdot \vec{B}_R \times \vec{B}_{net} \quad (\text{σχέση 4.29})$$

Ενώ το μέτρο της αναπτυσσόμενης ροπής δίνεται από τη σχέση:

$$\tau_{ind} = k \cdot B_R \cdot B_{net} \cdot \sin\delta \quad (\text{σχέση 4.30})$$

Στην εικόνα 4.13β φαίνεται ο ίδιος επαγωγικός κινητήρας ο οποίος λειτουργεί με αυξημένο φορτίο. Με την αύξηση του φορτίου η ταχύτητα του δρομέα μειώνεται. Με τη μείωση αυτή η ολίσθηση του κινητήρα αυξάνεται. Με την αύξηση της ολίσθησης αυξάνεται και η επαγόμενη τάση του δρομέα E_R (σχέση 4.10). Με την αύξηση της τάσης του δρομέα υπάρχει και αντίστοιχη αύξηση του ρεύματος του δρομέα I_R . Με την αύξηση του ρεύματος του δρομέα αυξάνεται και το μαγνητικό πεδίο του δρομέα B_R . Επιπλέον υπάρχει μεταβολή και της γωνίας μεταξύ της επαγόμενης τάσης του δρομέα E_R και του αντίστοιχου ρεύματος του δρομέα I_R λόγω της αύξησης της επαγωγικής αντίδρασης του δρομέα του κινητήρα. Μέσω της σχέσης 4.30 παρατηρούνται τα εξής: Με την αύξηση του μαγνητικού πεδίου του δρομέα B_R η ροπή του κινητήρα τείνει να αυξηθεί, ενώ με την αύξηση της γωνίας δ η ροπή τείνει να μειωθεί ($\sin\delta$). Επειδή η αύξηση του μαγνητικού πεδίου είναι εντονότερη, η ροπή αυξάνεται έως ένα σημείο το οποίο ονομάζεται μέγιστη ροπή ανατροπής. Μετά από αυτό το σημείο ο όρος $\sin\delta$ μειώνεται περισσότερο σε σχέση με την αύξηση του όρου B_R . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα με περαιτέρω αύξηση του φορτίου η ροπή τ_{ind} να μηδενίζεται και ο κινητήρας να σταματά.

Η γωνία δ που σχηματίζεται μεταξύ των μαγνητικών πεδίων μπορεί να εκφραστεί σε συνάρτηση της γωνίας του συντελεστή ισχύος (θ_R) με βάση την παρακάτω σχέση:

$$\delta = \theta_R + 90^\circ \quad (\text{σχέση 4.31})$$

Συνεπώς κατά αντιστοιχία προκύπτει:

$$\sin\delta = \sin(\theta_R + 90^\circ) = \cos\theta_R \quad (\text{σχέση 4.32})$$

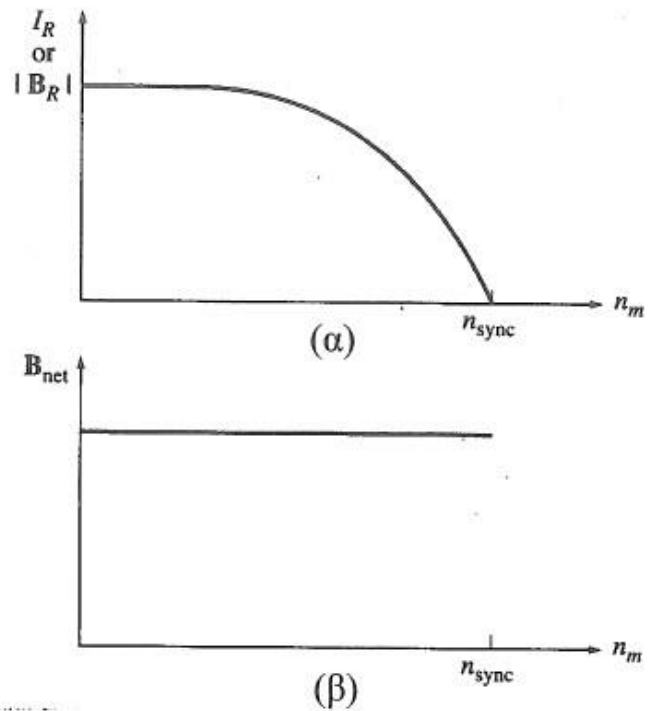
Όπου:

$\cos\theta_R$: συντελεστής ισχύος του δρομέα

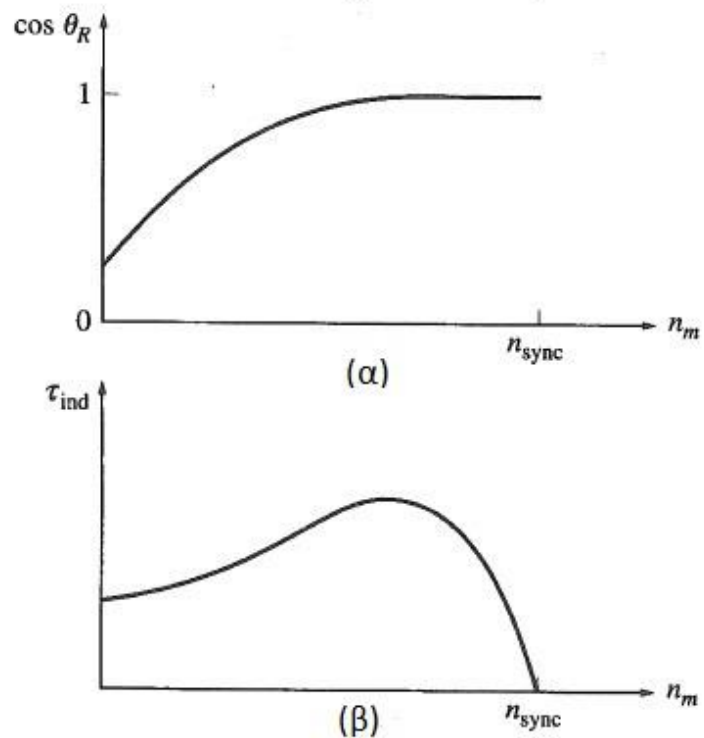
Ο υπολογισμός της γωνίας του συντελεστή ισχύος (θ_R) γίνεται βάσει της σχέσης:

$$\theta_R = \tan^{-1} \frac{X_R}{R_R} = \tan^{-1} \frac{sX_{R0}}{R_R} \quad (\text{σχέση 4.33})$$

Βάσει των παραπάνω οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν φαίνονται στην εικόνα 4.14 και 4.15: [4 §7.4, 7.5]



Εικόνα 4.14: Γραφικές παραστάσεις επαγωγικού κινητήρα α) ρεύμα συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα β) συνολικό μαγνητικό πεδίο συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα [4].

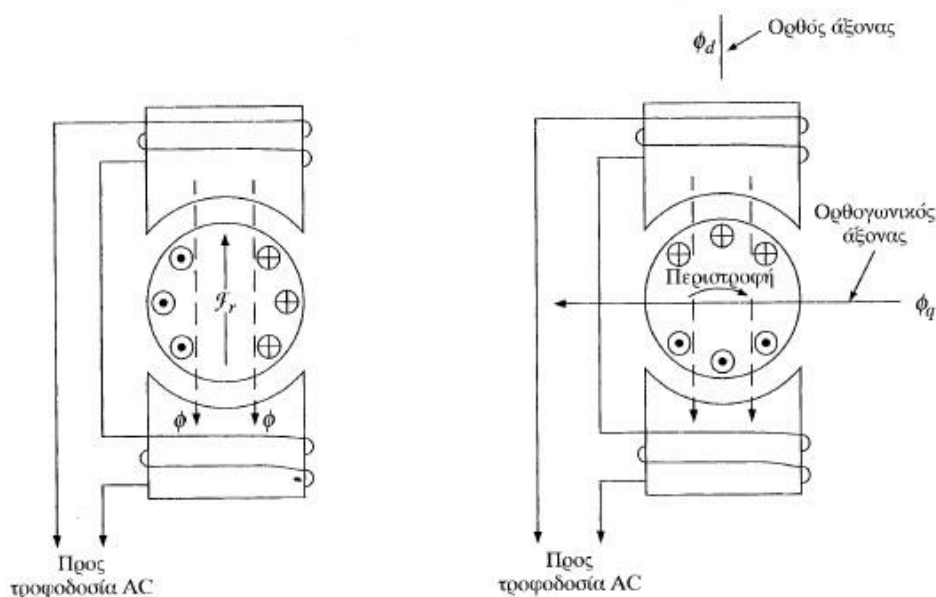


Εικόνα 4.15: Γραφικές παραστάσεις επαγωγικού κινητήρα α) συντελεστής ισχύος συνάρτηση της ταχύτητας δρομέα β) ροπή συνάρτηση της ταχύτητας του δρομέα [4].

4.4 Μονοφασικός κινητήρα επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα – Αρχή λειτουργίας

Ο μονοφασικός κινητήρας επαγωγής βραχυκυκλωμένου δρομέα κατασκευαστικά μοιάζει με τον τριφασικό επαγωγικό κινητήρα. Η σημαντικότερη διαφορά είναι ότι ο μονοφασικός κινητήρας επαγωγής διαθέτει ένα μονοφασικό τύλιγμα στον στάτη. Αυτό έχει ως συνέπεια το μαγνητικό πεδίο στον στάτη να μην περιστρέφεται, όπως στους τριφασικούς επαγωγικούς κινητήρες, αλλά να πάλλεται. Δηλαδή λαμβάνει μέγιστη και ελάχιστη τιμή πάντα της ίδιας κατεύθυνσης. Εάν ο δρομέας του κινητήρα είναι ακινητοποιημένος, δεν υπάρχει σχετική κίνηση του μαγνητικού πεδίου του στάτη σε σχέση με τις ράβδους του δρομέα. Συνεπώς δεν αναπτύσσεται ροπή στρέψης στη μηχανή.

Εάν όμως με κάποιο τρόπο ο κινητήρας λάβει μια αρχική περιστροφή, τότε στη συνέχεια υπάρχει μια ανάπτυξη ροπής. Σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται ένα στρεφόμενο πεδίο έτσι υπάρχει διατήρηση της αναπτυσσόμενης ροπής και ο δρομέας της μηχανής στρέφεται κοντά στη σύγχρονη ταχύτητα. Η συμπεριφορά αυτή εξηγείται από τη θεωρία των ορθογωνικών πεδίων ή εναλλακτικά από τη θεωρία του διπλού στρεφόμενου πεδίου.

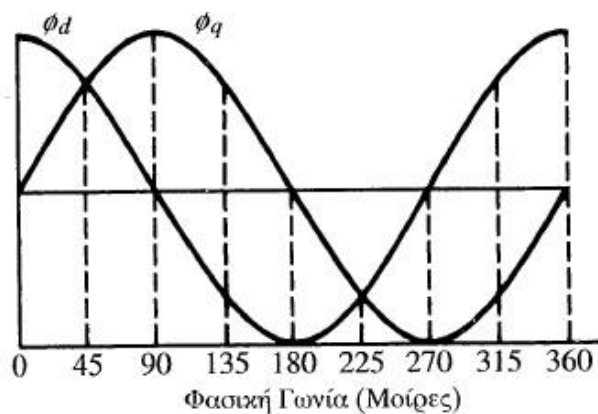


Εικόνα 4.16: Διάγραμμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα α) μηδενική ροπή λόγω ευθυγραμμισμένων πεδίων β) ανάπτυξη ροπής λόγω αρχικής κίνησης δρομέα [3].

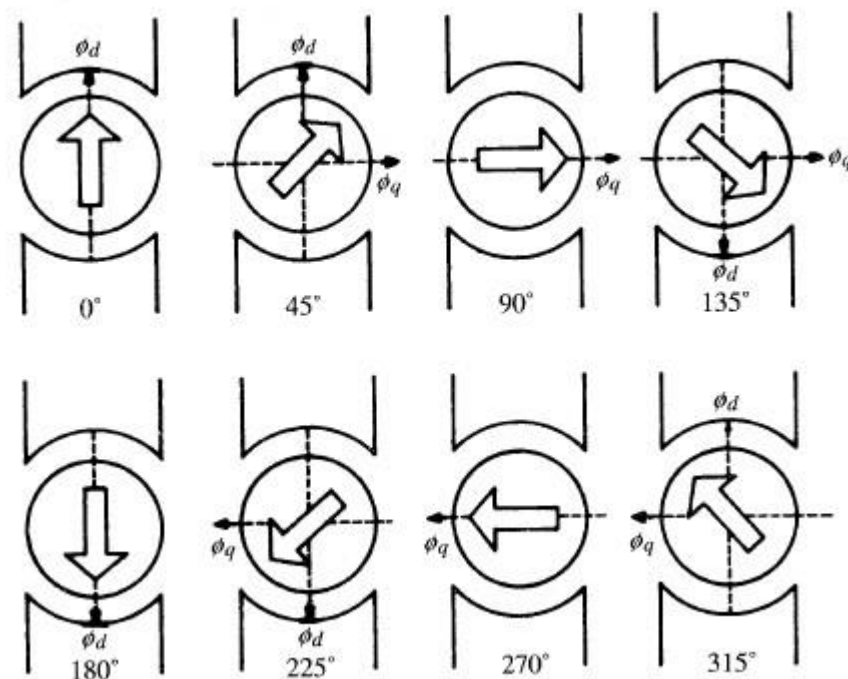
Σύμφωνα με τη θεωρία των ορθογωνικών πεδίων εάν ο δρομέας έχει λάβει μια αρχική περιστροφή οι αγωγοί του τέμνουν τη μαγνητική ροή των κύριων πόλων. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να αναπτύσσεται μια τάση εξ επαγωγής στους αγωγούς του δρομέα και ταυτόχρονα να ρέει ένα ρεύμα σε αυτούς. Με τη ροή αυτή του ρεύματος αναπτύσσεται ένα μαγνητικό πεδίο, το οποίο έχει διαφορά

90° από αυτό των κύριων πόλων. Η ροή των κύριων πόλων ονομάζεται ροή ορθού άξονα, ενώ η ροή του δρομέα ονομάζεται ροή εγκάρσιου ορθογωνικού άξονα. Με την κίνηση του δρομέα οι αγωγοί μετατοπίζονται και τη θέση τους λαμβάνουν νέοι αγωγοί. Με αυτόν τον τρόπο διατηρείται η ροή ορθογωνικού άξονα και ο κινητήρας συνεχίζει να περιστρέφεται.

Στην εικόνα 4.17 φαίνονται οι κυματομορφές των ροών κύριου άξονα (Φ_d) και εγκάρσιου ορθογωνικού άξονα (Φ_q). Στην εικόνα 4.18 φαίνεται σχηματικά η ροή κύριου άξονα, η ροή εγκάρσιου ορθογωνικού άξονα, καθώς και η συνισταμένη ροή αυτών κατά φασική αντιστοιχία του διαγράμματος της εικόνας 4.17. Τα μεγάλα βέλη υποδηλώνουν τη στιγμιαία συνισταμένη ροή.

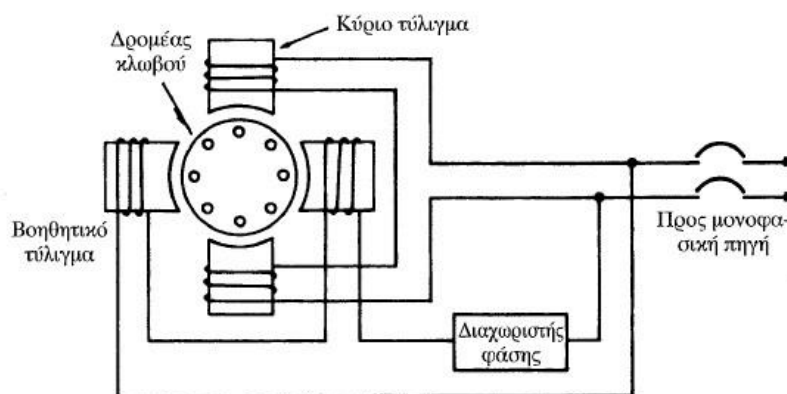


Εικόνα 4.17: Κυματομορφές ροών μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα [3].



Εικόνα 4.18: Σχηματική απεικόνιση ροών μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα [3].

Για την εκκίνηση του μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα χωρίς την παροχή εξωτερικής μηχανικής περιστροφής είναι απαραίτητο να δημιουργηθεί ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο σε μηχανές που τροφοδοτούνται με μια φάση δημιουργείται με ένα βοηθητικό τύλιγμα, το οποίο τοποθετείται με διαφορά 90° ηλεκτρικών μοιρών από το κύριο. Το βοηθητικό αυτό τύλιγμα τροφοδοτείται από την ίδια φάση με αυτή του κύριου τυλίγματος παρεμβάλλοντας έναν διαχωριστή φάσης, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.19. Ο διαχωρισμός φάσης γίνεται με την τοποθέτηση χωρητικότητας ή αντίστασης σε σειρά με το βοηθητικό τύλιγμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ρεύμα που διαρρέει το βοηθητικό τύλιγμα να μην είναι συμφασικό με το ρεύμα που διαρρέει το κύριο τύλιγμα. Αφού το κάθε μαγνητικό πεδίο είναι συμφασικό με το ρεύμα που το δημιουργεί, τότε και τα δυο μαγνητικά πεδία (κύριου τυλίγματος – βοηθητικού τυλίγματος) έχουν διαφορά φάσης μεταξύ τους. Όταν ο κινητήρας λάβει αρχική ροπή στρέψης, τότε η αυτοδιέγερση θα διατηρήσει το πεδίο ορθοκανονικού άξονα. Έτσι το βοηθητικό τύλιγμα μπορεί να αποσυνδεθεί από το κύκλωμα με τη βοήθεια κάποιου φυγοκεντρικού διακόπτη [3 §6.2, 6.3].



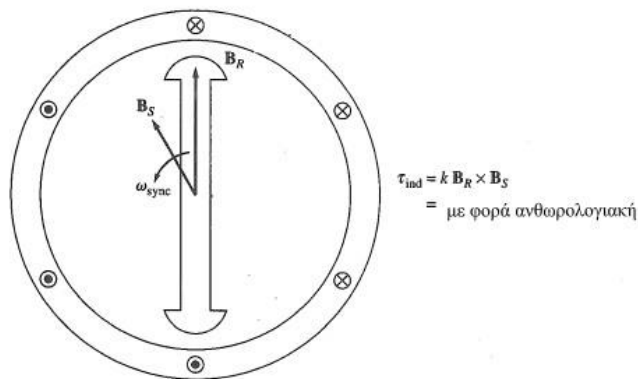
Εικόνα 4.19: Σχηματικό διάγραμμα μονοφασικού επαγωγικού κινητήρα με βοηθητικό τύλιγμα [3].

4.5 Σύγχρονοι κινητήρες

4.5.1 Αρχή λειτουργίας σύγχρονων κινητήρων

Σε έναν σύγχρονο κινητήρα ο στάτης ονομάζεται οπισμός και κατασκευαστικά είναι όμοιος με αυτόν ενός τριφασικού επαγωγικού κινητήρα. Ο στάτης φέρει τυλίγματα που συνδέονται σε τριφασικό εναλλασσόμενο δίκτυο. Όταν αυτά τα τυλίγματα τροφοδοτηθούν με τριφασική εναλλασσόμενη τάση δημιουργούν ένα στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο (B_S). Ο δρομέας του σύγχρονου κινητήρα φέρει, τυλίγματα τα οποία τροφοδοτούνται από πηγή συνεχούς τάσης μέσω δακτυλιδιών ολίσθησης. Το ρεύμα (I_f) που διαρρέει το τύλιγμα το δρομέα παράγει γύρω του ένα μαγνητικό πεδίο (B_r). Συνεπώς στο εσωτερικό της μηχανής υπάρχουν δύο μαγνητικά πεδία που τείνουν να ευθυγραμμιστούν μεταξύ τους. Δηλαδή οι πόλοι του δρομέα ευθυγραμμίζονται με πόλους αντίθετης

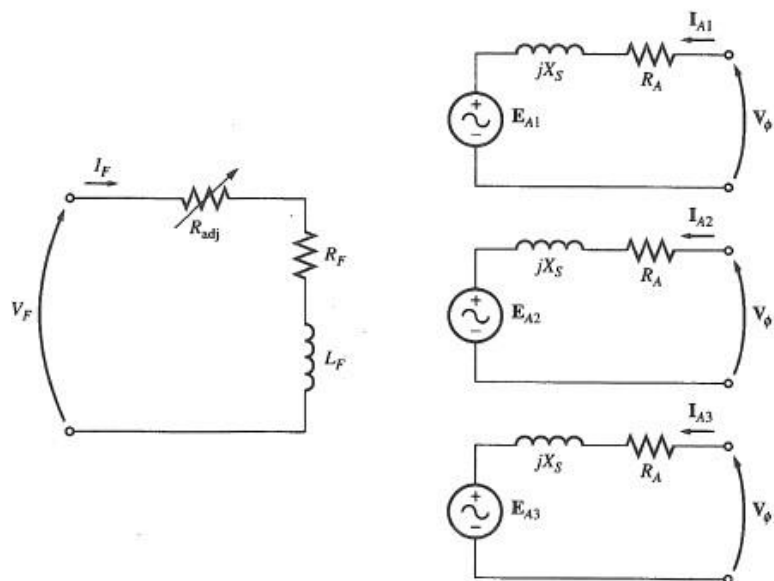
πολικότητας που δημιουργούνται από το στρεφόμενο μαγνητικό πεδίο του στάτη. Λόγω ότι το μαγνητικό πεδίο του στάτη περιστρέφεται συνεχώς το μαγνητικό πεδίο του δρομέα συνέχεια προσπαθεί να το φτάσει. Όσο μεγαλύτερη είναι η γωνιά που σχηματίζεται μεταξύ των δυο μαγνητικών πεδίων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η ροπή που αναπτύσσεται στον κινητήρα [3 §8.2], [4 § 6.1].



Εικόνα 4.20: Σύγχρονος κινητήρας [4].

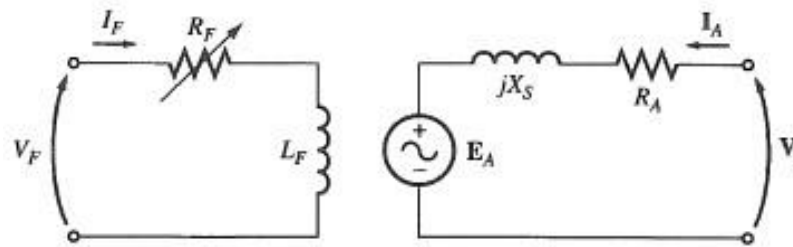
4.5.2 Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός σύγχρονου κινητήρα είναι σχεδόν ίδιο με το ισοδύναμο κύκλωμα μιας σύγχρονης γεννήτριας. Η βασική διαφορά βρίσκεται στη φορά του ρεύματος του στάτη ($I_{A1} - I_{A2} - I_{A3}$), η οποία είναι αντίθετη από αυτή της σύγχρονης γεννήτριας. Αυτό συμβαίνει διότι σε έναν κινητήρα η ροή ισχύος αλλάζει (μετατροπή ηλεκτρικής ενέργειας σε μηχανική).



Εικόνα 4.21: Ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα [4].

Λόγω της συμμετρίας που παρουσιάζουν οι φάσεις ενός κινητήρα, το ισοδύναμο κύκλωμα για λόγους απλοποίησης μπορεί να λάβει τη μορφή της εικόνας 4.22.



Εικόνα 4.22: Ανά φάση ισοδύναμο κύκλωμα σύγχρονου κινητήρα [4].

Λόγω της αλλαγής φοράς του ρεύματος στάτη (σε σχέση με την φορά του ρεύματος στην γεννήτρια) οι σχέσεις των τάσεων αλλάζουν και οι εξισώσεις βάση τον κανόνα του Kirchhoff γίνονται:

$$\vec{V}_\varphi = \vec{E}_A + jX_S \vec{I}_A + R_A \vec{I}_A \quad (\text{σχέση 4.34})$$

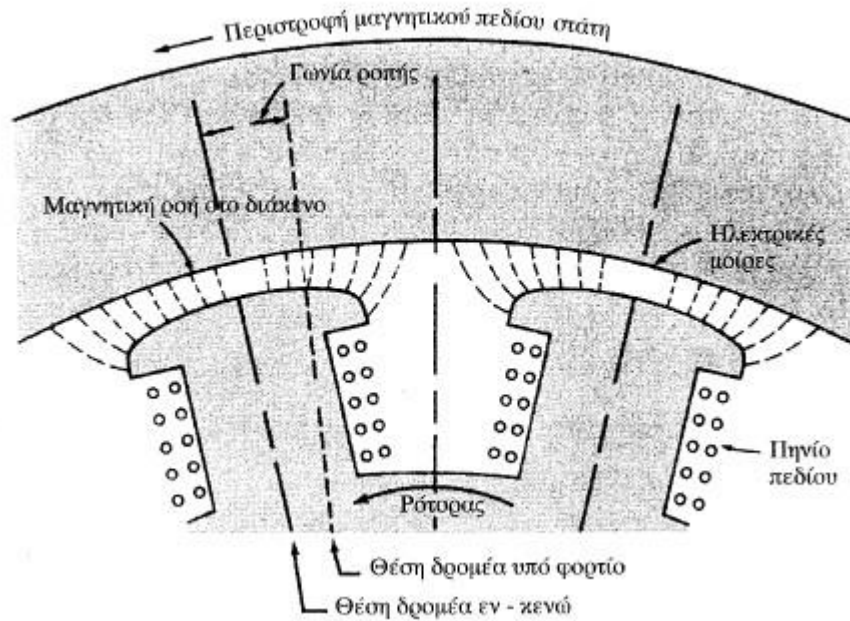
Λύνοντας ως προς E_A η σχέση 4.34 γράφεται [4 §6.1] :

$$\vec{E}_A = \vec{V}_\varphi - jX_S \vec{I}_A - R_A \vec{I}_A \quad (\text{σχέση 4.35})$$

4.5.3 Ισχύς, ροπή και χαρακτηριστικές καμπύλες σύγχρονου κινητήρα

Σε έναν σύγχρονο κινητήρα στην κατάσταση μόνιμης λειτουργίας μπορεί να μεταβληθεί το φορτίο, το οποίο είναι συνδεδεμένο στον άξονα, καθώς και το ρεύμα διέγερσης του.

Στον σύγχρονο κινητήρα οι πόλοι του δρομέα είναι ευθυγραμμισμένοι με τους πόλους αντίθετης πολικότητας που δημιουργούνται από το στρεφόμενο πεδίο του στάτη. Γι' αυτόν τον λόγο όπως γίνεται αντιληπτό, ο δρομέας περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Όταν όμως στον κινητήρα υπάρχει αύξηση του φορτίου, αυτή η ευθυγράμμιση διαταράσσεται. Δηλαδή οι μαγνήτες του δρομέα μεταβάλλουν τη γωνιακή τους θέση σε σχέση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτό φαίνεται στην εικόνα 4.23. Ουσιαστικά το μαγνητικό πεδίο του δρομέα σχηματίζει μια διαφορά γωνίας σε σχέση με το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο. Η γωνιά αυτή ονομάζεται γωνιά ροπής δ του σύγχρονου κινητήρα. Ο κινητήρας κατά την αύξηση του φορτίου επιβραδύνει λίγο, ώστε να αλλάξει η γωνιακή του θέση σε σχέση με τη ροή του στάτη και στη συνέχεια επανέρχεται στις σύγχρονες στροφές. Με τη μείωση του φορτίου ο δρομέας επιταχύνει, ώστε να επιτευχθεί η ευθυγράμμιση των μαγνητικών ροών και στη συνέχεια επανέρχεται στις σύγχρονες στροφές. Στην περίπτωση που το φορτίο είναι μεγαλύτερο από το μέγιστο φορτίο του κινητήρα ο δρομέας αποσυγχρονίζεται.

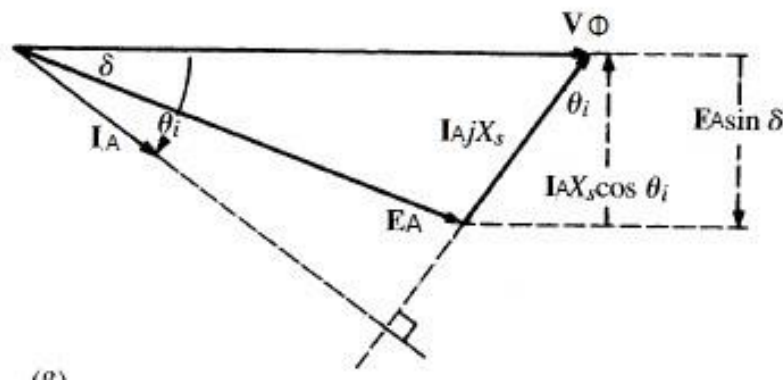


Εικόνα 4.23: Στιγμιότυπο εσωτερικού μέρους σύγχρονου κινητήρα [3].

Με εξαίρεση τους σύγχρονους κινητήρες μικρής ισχύος η αντίσταση οπλισμού R_A είναι πολύ μικρή σε σχέση με τη σύγχρονη αντίδραση X_S , οπότε η σχέση 4.34 μπορεί να γραφτεί ως:

$$\vec{V}_\phi = E_A + jX_S \vec{I}_A \quad (\text{σχέση 4.36})$$

Το διανυσματικό διάγραμμα που αντιστοιχεί στην απλοποιημένη σχέση 4.36 φαίνεται στην εικόνα 4.24 παρακάτω.



Εικόνα 4.24: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα όταν η αντίσταση οπλισμού θεωρείται αμελητέα [3].

Με γεωμετρική ανάλυση του διαγράμματος του σύγχρονου κινητήρα της εικόνας 4.24 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$I_A X_s \cos \theta_i = -E_A \sin \delta \quad (\text{σχέση 4.37})$$

Πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη με V_ϕ και αναδιατάσσοντας ξανά τους όρους της σχέσης προκύπτει:

$$V_\phi I_A \cos \vartheta_i = \frac{-V_\phi E_A}{X_s} \sin \delta \quad (\text{σχέση 4.38})$$

Όπως γίνεται αντιληπτό, ο αριστερός όρος της εξίσωσης 4.38 εκφράζει την πραγματική ισχύ του σύγχρονου κινητήρα και μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$P_{in,1\phi} = V_\phi I_A \cos \vartheta_i \quad (\text{σχέση 4.39})$$

Η ισοδύναμη

$$P_{in,1\phi} = \frac{-V_\phi E_A}{X_s} \sin \delta \quad (\text{σχέση 4.40})$$

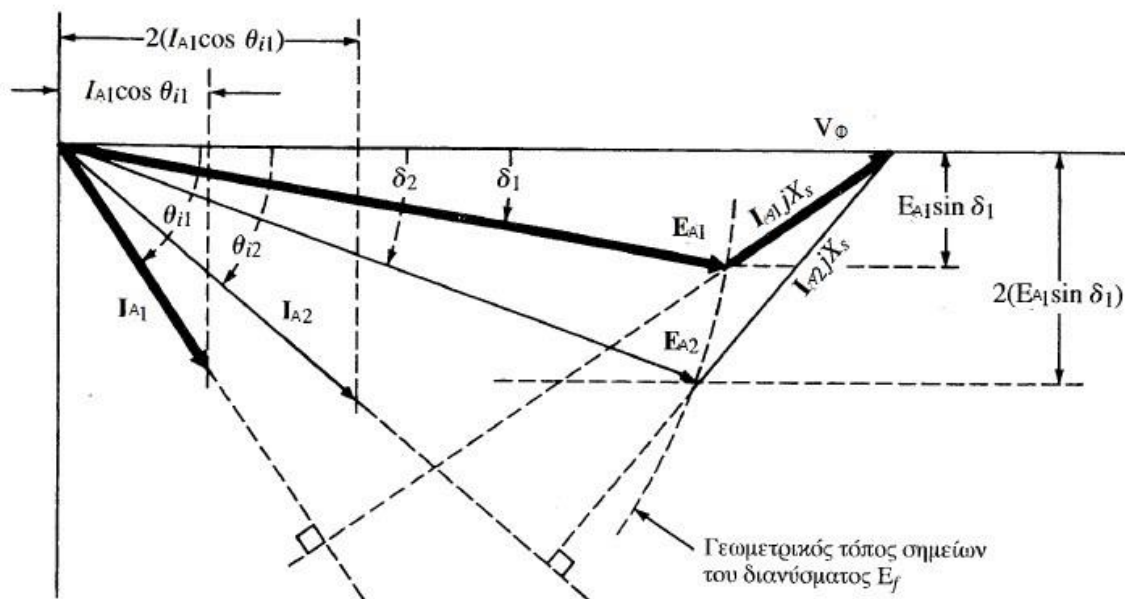
Συνεπώς η συνολική ισχύς ενός τριφασικού σύγχρονου κινητήρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{in} = 3V_\phi I_A \cos \theta_i \quad (\text{σχέση 4.41})$$

Η ισοδύναμη

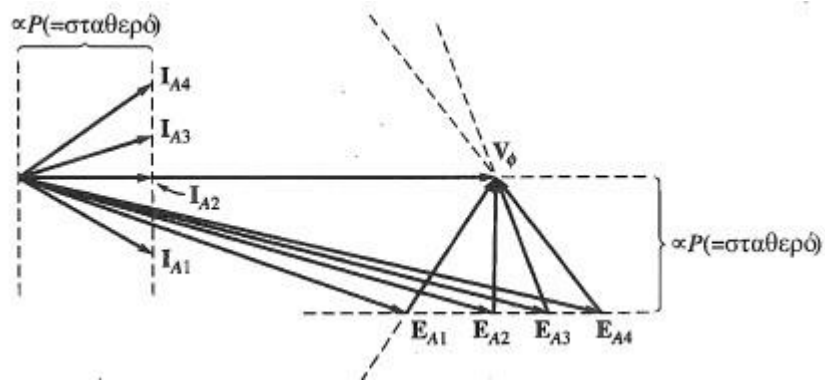
$$P_{in} = 3 \frac{-V_\phi E_A}{X_s} \sin \delta \quad (\text{σχέση 4.42})$$

Με τη μεταβολή του φορτίου στον άξονα του κινητήρα, όπως έγινε αναφορά και στην αρχή της παραγράφου, υπάρχει ταυτόχρονη επίδραση στη γωνία ροπής δ του κινητήρα και στον συντελεστή ισχύος. Αυτό διανυσματικά απεικονίζεται στην εικόνα 4.25. Με έντονο μαύρο χρώμα υποδηλώνονται οι αρχικές συνθήκες, ενώ με απλό χρωματισμό υποδηλώνονται οι νέες συνθήκες με διπλάσιο φορτίο. Όπως είναι λογικό με τον διπλασιασμό του φορτίου σύμφωνα με τη σχέση 4.39 διπλασιάζεται ο όρος $I_A \cos \vartheta_i$ ή αντίστοιχα σύμφωνα με τη σχέση 4.40 διπλασιάζεται ο όρος $E_A \sin \delta$ [3 §8.4, 8.7, 8.8].

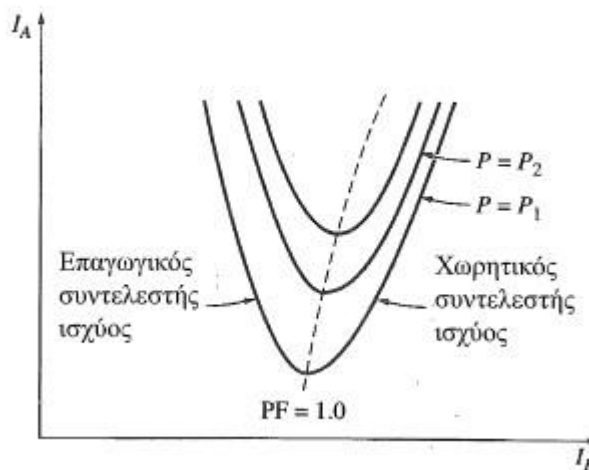


Εικόνα 4.25: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα κυλινδρικού δρομέα με μεταβολή στο φορτίο [3].

Εκτός από τη μεταβολή του φορτιού στον άξονα του σύγχρονου κινητήρα ένα άλλο μέγεθος που μπορεί να μεταβληθεί είναι αυτό του ρεύματος διέγερσης I_F . Με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης υπάρχει ταυτόχρονη μεταβολή της τάσης V_F . Η μεταβολή αυτή της τάσης διέγερσης προκαλεί με τη σειρά της μεταβολή της τάσης E_A , χωρίς όμως να υπάρχει αντίστοιχη μεταβολή της ισχύς εξόδου του κινητήρα. Αυτό συμβαίνει, διότι η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης δεν επηρεάζει την ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα και ταυτόχρονα η ροπή του φορτιού παραμένει σταθερή. Επιπλέον η εναλλασσόμενη τάση τροφοδοσίας V_ϕ παραμένει σταθερή διότι ο κινητήρας είναι συνδεδεμένος σε δίκτυο άπειρου ζυγού. Τελικά τα τμήματα $I_A \cos \theta_i$ και $E_A \sin \delta$ παραμένουν αμετάβλητα, διότι σχετίζονται με την ισχύ, η οποία παραμένει σταθερή. Στην εικόνα 4.26 φαίνεται διανυσματικά οι επιπτώσεις στον κινητήρα που προκαλεί η μεταβολή του ρεύματος διέγερσης. Όπως παρατηρείται στο διανυσματικό διάγραμμα με κάθε μεταβολή του ρεύματος διέγερσης υπάρχει αντίστοιχη μεταβολή της τάσης E_A και ταυτόχρονα και του ρεύματος I_A . Αυτό οδηγεί τον κινητήρα να αλλάζει συμπεριφορά και να λειτουργεί καθ' επιλογή ως ωμικό – επαγωγικό- χωρητικό φορτίο. Με άλλα λόγια με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης επιτυγχάνεται έλεγχος της άεργου ισχύος του κινητήρα. Στην εικόνα 4.27 φαίνεται η γραφική παράσταση του ρεύματος οπλισμού I_A σε συνάρτηση του ρεύματος διέγερσης I_F . Η χαρακτηριστική καμπύλη αυτή ονομάζεται V , διότι έχει αντίστοιχο σχήμα. Οι καμπύλες αυτές είναι πολλές και κάθε μια αντιστοιχεί σε διαφορετικό ποσοστό κατανάλωσης πραγματικής ισχύος. Στο κατώτερο σημείο κάθε καμπύλης ο κινητήρας καταναλώνει μόνο πραγματική ισχύ και συμπεριφέρεται ως ωμικό φορτίο. [4 §6.2]



Εικόνα 4.26: Διανυσματικό διάγραμμα σύγχρονου κινητήρα με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης [4].



Εικόνα 4.27: Καμπύλες V σύγχρονου κινητήρα [4].

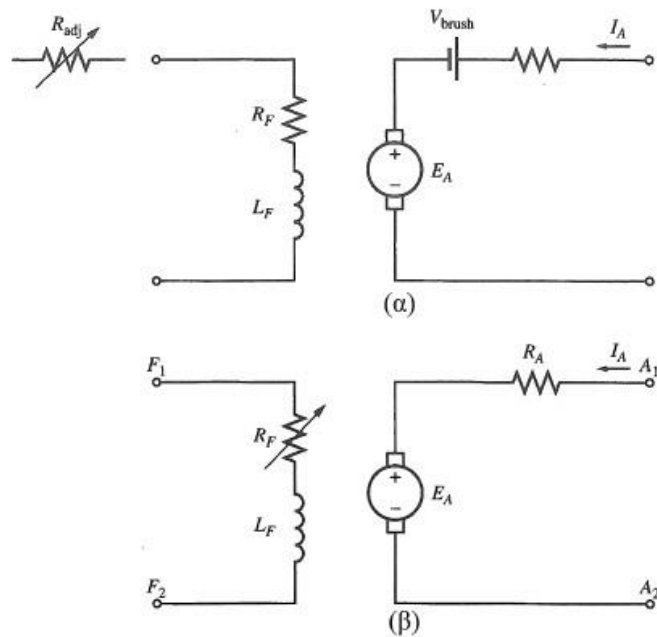
4.6 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος

Από τα τέλη του 19^{ου} αιώνα μέχρι και σήμερα τα περισσότερα συστήματα ισχύος ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν εναλλασσόμενο ρεύμα. Παρόλα αυτά οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος εξακολούθησαν να έχουν ένα μεγάλο ποσοστό στον ετήσιο αριθμό πωλήσεων μέχρι τη δεκαετία του 1960. Πάρα το γεγονός ότι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας συνεχούς ρεύματος συναντώνταν σπάνια, οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παρέμειναν ευρέως διαδεδομένοι. Το γεγονός που συντρέχει για αυτό είναι ότι ακόμα και στη σύγχρονη εποχή τα συστήματα συνεχούς ρεύματος είναι αναντικατάστατα στα επιβατικά οχήματα και φορτηγά, καθώς και στα αεροπλάνα. Επιπλέον σε εφαρμογές που απαιτείται μεγάλη μεταβολή στην ταχύτητα περιστροφής είναι αξιόπεραστοι [4 §9.1]. Η ταχύτητα περιστροφής των κινητήρων συνεχούς ρεύματος μπορεί να ρυθμιστεί με μεγάλη ευκολία σε μικρά βήματα. Οι κινητήρες αυτοί μπορούν να αναπτύξουν ονομαστική ροπή σε όλο το εύρος των στροφών τους. Εάν δεν ελεγχθεί σωστά αυτό το είδος κινητήρων, υπάρχει περίπτωση να

αναπτυχθούν μεγάλες ταχύτητες που θα οδηγήσουν στην αυτοκαταστροφή τους από φυγόκεντρες δυνάμεις [3 §10,1].

Μια ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει είτε ως γεννήτρια, είτε ως κινητήρας. Αυτό εξαρτάται από το είδος της ενέργειας που εισέρχεται στη μηχανή. Εάν η εισαγόμενη ενέργεια είναι ηλεκτρική και η εξερχόμενη μηχανική, τότε η μηχανή λειτουργεί ως κινητήρας. Δηλαδή στην περίπτωση που η ηλεκτρική μηχανή συνεχούς ρεύματος λειτουργεί ως κινητήρας αναπτύσσει στον άξονα της μια ροπή οδήγησης.

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός κινητήρα συνεχούς ρεύματος φαίνεται στην εικόνα 4.28. Το κύκλωμα του οπλισμού παριστάνεται με μια ιδανική πηγή τάσης E_A και με μια ισοδύναμη αντίσταση R_A , η οποία είναι ουσιαστικά το ισοδύναμο κύκλωμα Thevenin και περιλαμβάνει τους αγωγούς του δρομέα, τους βοηθητικούς πόλους και το τύλιγμα αντιστάθμισης. Η πτώση τάσης των ψηκτρών V_{brush} παριστάνεται με μια μικρή πηγή τάσης. Λόγω ότι αυτή η πτώση τάσης είναι μικρή, πολλές φορές αμελείται. Το τύλιγμα διέγερσης παριστάνεται με την αυτεπαγωγή L_F και την αντίσταση R_F . Η μεταβλητή αντίσταση R_{adj} χρησιμοποιείται για τον έλεγχο του ρεύματος διέγερσης [4 §9.2].



Εικόνα 4.28: α) Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ, β) απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ΣΡ [4].

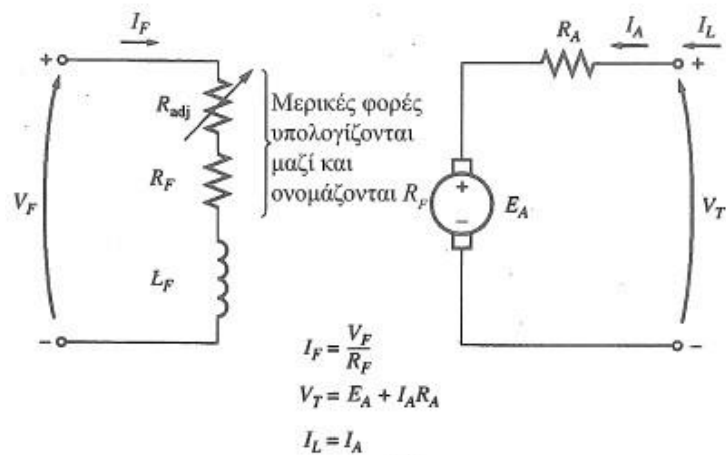
Ο διαχωρισμός των κινητήρων συνεχούς ρεύματος γίνεται με βάση τη συνδεσμολογία που ακολουθείται στο κύκλωμα διέγερσης σε σχέση με αυτήν του επαγωγικού τυμπάνου. Συνεπώς οι κατηγορίες που σχηματίζονται είναι οι παρακάτω:

- Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης και παράλληλης διέγερσης,
- Κινητήρας διέγερσης σειράς,
- Κινητήρας συνθέτης διέγερσης.

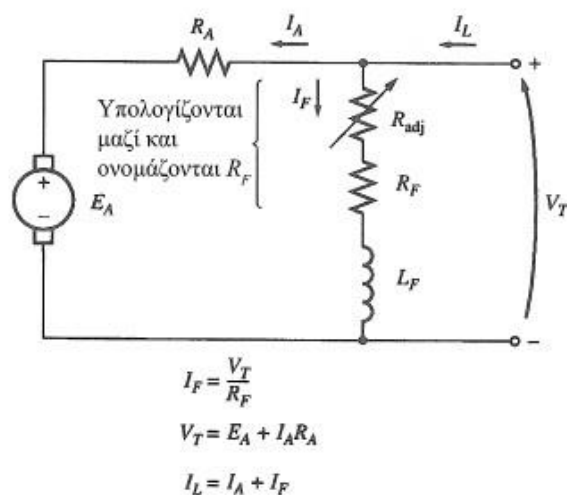
4.6.1 Κινητήρες συνεχούς ρεύματος ξένης και παράλληλης διέγερσης

Εάν σε ένα κινητήρα συνεχούς ρεύματος θεωρηθεί ότι η τάση τροφοδοσίας παραμένει σταθερή, τότε δεν υπάρχει κάποια ουσιαστική διαφορά μεταξύ των κινητήρων ξένης διέγερσης με αυτούς της παράλληλης διέγερσης. Συνεπώς η ανάλυση των δυο κινητήρων είναι η ίδια, εάν πληρείται η παραπάνω προϋπόθεση.

Τα ισοδύναμα κυκλώματα αυτών των κινητήρων φαίνονται στις εικόνες 4.29 και 4.30 παρακάτω:



Εικόνα 4.29: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα ξένης διέγερσης [4]



Εικόνα 4.30: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα παράλληλης διέγερσης [4].

Εάν σε αυτούς τους κινητήρες υπάρξει μια αύξηση του φορτίου στον άξονα περιστροφής τους, τότε η ροπή του φορτίου θα ξεπεράσει τη ροπή που κινητήρα. Συνεπώς ο κινητήρας θα επιβραδύνει. Με τη μείωση αυτήν της ταχύτητας η τάση που παράγεται στο εσωτερικό του κινητήρα μειώνεται λόγω της σχέσης:

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega \quad (\text{σχέση 4.43})$$

Με τη μείωση της εσωτερικής τάσης E_A υπάρχει αύξηση του ρεύματος I_A λόγω της σχέσης:

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \quad (\text{σχέση 4.44})$$

Η αύξηση αυτή του ρεύματος οδηγεί σε ταυτόχρονη αύξηση της ροπής του κινητήρα έως τη στιγμή που οι δύο ροπές (κινητήρα – φορτίου) εξισορροπηθούν. Ο κινητήρας μετά την εξισορρόπηση των ροπών περιστρέφεται με μικρότερη ταχύτητα.

Με τη χρήση του νόμου των τάσεων του Kirchhoff, η τάση στα άκρα του κινητήρα ισούται:

$$V_T = E_A + I_A R_A \quad (\text{σχέση 4.45})$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση 4.43 στη 4.45 προκύπτει:

$$V_T = K\Phi\omega + I_A R_A \quad (\text{σχέση 4.46})$$

Η ροπή του κινητήρα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \quad (\text{σχέση 4.47})$$

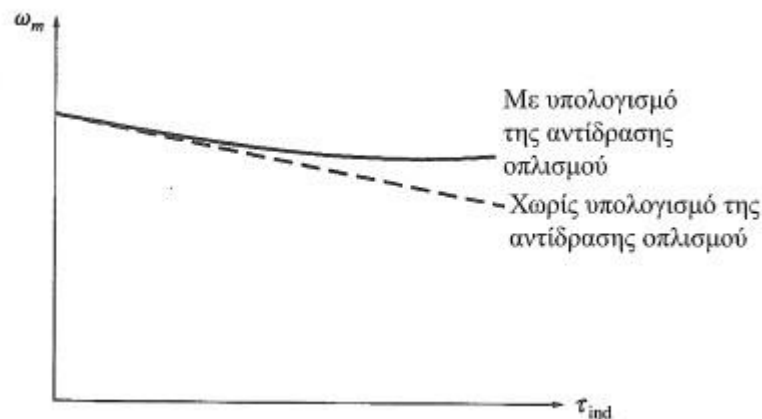
Εάν η σχέση 4.47 εκφραστεί ως προς το I_A και αντικατασταθεί στη σχέση 4.46, προκύπτει:

$$V_T = K\Phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\Phi} R_A \quad (\text{σχέση 4.48})$$

Εάν η σχέση 4.48 εκφραστεί ως προς τη γωνιακή ταχύτητα ω προκύπτει:

$$\omega = \frac{V_T}{K\Phi} - \frac{R_A}{(K\Phi)^2} \tau_{ind} \quad (\text{σχέση 4.49})$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί μια ευθεία με αρνητική κλίση, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.31.



Εικόνα 4.31: Χαρακτηριστική στροφών – ροπής κινητήρα ΣΡ ξένης και παράλληλης διέγερσης. [4].

Είναι απαραίτητο τα υπόλοιπα μεγέθη της εξίσωσης 4.49, να παραμένουν σταθερά με τις μεταβολές του φορτίου, ώστε να ισχύει η παραπάνω χαρακτηριστική. Επίσης ένας κινητήρας ΣΡ με τη μεταβολή του φορτίου και την ταυτόχρονη μεταβολή του ρεύματος, παρουσιάζει μια παραμόρφωση στο εσωτερικό μαγνητικό πεδίο της μηχανής, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της μαγνητικής ροής. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίδραση σπλισμού. Για τον περιορισμό του φαινομένου αυτού χρησιμοποιούνται τυλίγματα αντιστάθμισης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η χαρακτηριστική ταχύτητας ροπής να ακολουθεί μια πιο περιορισμένη μεταβολή.

Για τον έλεγχο των στροφών ενός κινητήρα ξένης και παράλληλης διέγερσης υπάρχουν τρεις μέθοδοι οι οποίοι είναι οι εξής:

- Μεταβολή της αντίστασης (R_F) του κυκλώματος διέγερσης της μηχανής,
- Μεταβολή της τάσης που εφαρμόζεται στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα,
- Σύνδεση μεταβλητής αντίστασης στο τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου του κινητήρα.

Η μεταβολή της αντίστασης διέγερσης R_F έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση ή τη μείωση του ρεύματος, που ρέει στο κύκλωμα της διέγερσης (ρεύμα διέγερσης I_F) μέσω της σχέσης:

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (\text{σχέση 4.50})$$

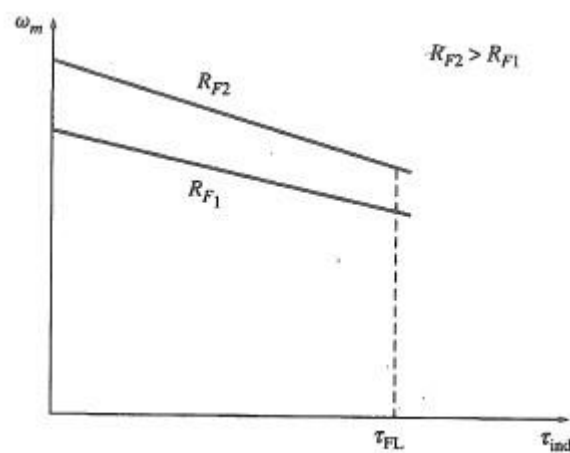
Δηλαδή με την αύξηση της τιμής της αντίστασης R_F , η τιμή του ρεύματος διέγερσης I_F μειώνεται. Η μεταβολή αυτή του ρεύματος επηρεάζει τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό της μηχανής. Με τη μεταβολή της μαγνητικής ροής Φ μεταβάλλεται και η εσωτερική τάση του κινητήρα E_A μέσω της σχέσης 4.43. Η εσωτερική τάση E_A μεταβάλλεται αντίθετα ως προς το ρεύμα που ρέει στο επαγωγικό

τύμπανο του κινητήρα I_A , μέσω της σχέσης 4.51. Συνεπώς με μία μείωση του ρεύματος διέγερσης I_F υπάρχει ταυτόχρονη μείωση της εσωτερικής τάσης E_A , το οποίο οδηγεί στην αύξηση του ρεύματος τυμπάνου I_A .

$$I_A = \frac{V_T - E_A}{R_A} \quad (\text{σχέση 4.51})$$

Η επαγόμενη ροπή του κινητήρα δίνεται από τη σχέση 4.47 παραπάνω. Από τη σχέση αυτή παρατηρείται ότι για μία μείωση του ρεύματος διέγερσης I_F , υπάρχει μείωση της μαγνητικής ροής Φ , αλλά ταυτόχρονα και αύξηση του ρεύματος του επαγωγικού τυμπάνου I_A . Λόγω ότι η αύξηση του ρεύματος I_A είναι εντονότερη από την αντίστοιχη μείωση της μαγνητικής ροής Φ , η επαγόμενη ροπή τ_{ind} τελικά αυξάνεται.

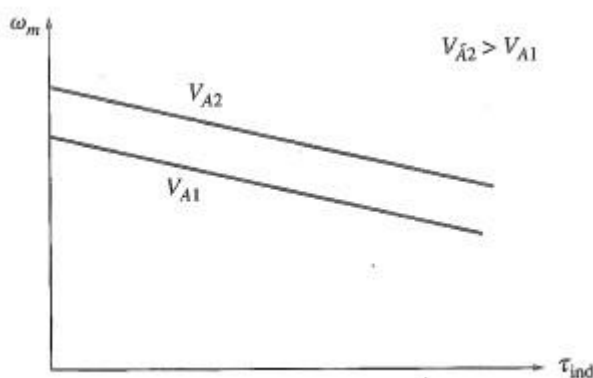
Μετά την αύξηση της ροπής τ_{ind} , ο κινητήρας αρχίζει να περιστρέφεται με μεγαλύτερη ταχύτητα, διότι η ροπή του κινητήρα τ_{ind} είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του φορτίου τ_{load} . Με την αύξηση όμως της ταχύτητας αυξάνεται και η εσωτερική τάση E_A της μηχανής, που οδηγεί στη μείωση του ρεύματος τυμπάνου I_A . Συνεπώς μειώνεται και η ροπή του κινητήρα τ_{ind} . Αυτό γίνεται έως τη στιγμή που οι δυο ροπές (κινητήρα – φορτίου) εξισορροπηθούν σε νέα μεγαλύτερη ταχύτητα. Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται γραφικά στην εικόνα 4.32.



Εικόνα 4.32: Γραφική παράσταση ταχύτητας - ροπής με τη μεταβολή της αντίστασης διέγερσης. [4].

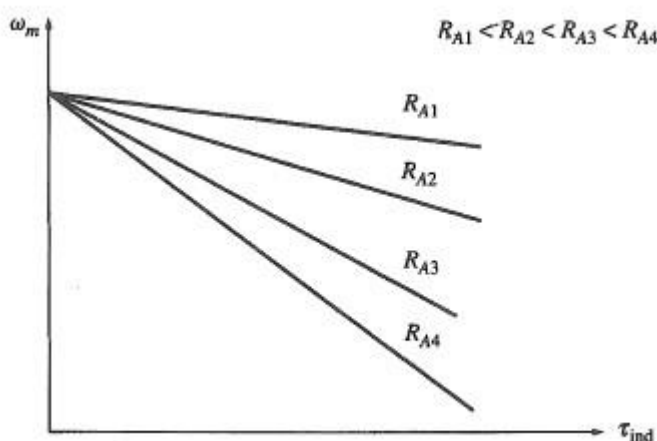
Για τον έλεγχο της ταχύτητα ενός κινητήρα, με τη μέθοδο της μεταβολής της τάσης στα άκρα του οπλισμού του, είναι απαραίτητο η τάση στα άκρα του τυλίγματος διέγερσης να παραμένει σταθερή. Με μια αύξηση της τάσης στα άκρα του οπλισμού V_T το αντίστοιχο ρεύμα I_A αυξάνεται μέσω της σχέσης 4.51. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της ροπής του κινητήρα μέσω της σχέσης 4.47.

Λόγω ότι η ροπή του κινητήρα είναι μεγαλύτερη από τη ροπή του φορτίου οδηγεί τον κινητήρα σε επιτάχυνση. Η αύξηση όμως της ταχύτητας του κινητήρα ω οδηγεί στην αύξηση της εσωτερικής τάσης E_A μέσω της σχέσης 4.43. Συνεπώς αυτό οδηγεί στη μείωση του ρεύματος τυμπάνου I_A . Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της ροπής του κινητήρα έως τη στιγμή που θα εξισορροπηθεί με τη ροπή του φορτίου. Η εξισορρόπηση αυτή γίνεται σε μεγαλύτερη ταχύτητα από την αρχική. Στην εικόνα 4.33 φαίνεται γραφικά η μεταβολή της ταχύτητας με τη μέθοδο αυτή.



Εικόνα 4.33: Χαρακτηριστική ροπής στροφών με την μεταβολή της τάσης οπλισμού [4].

Στην τρίτη μέθοδο μια ωμική αντίσταση συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου. Με τον τρόπο αυτό υπάρχει έλεγχος του ρεύματος I_A , μέσω της σχέσης 4.49. Ο τρόπος ελέγχου αυτός είναι πολύ δαπανηρός, διότι οι απώλειες στην αντίσταση είναι μεγάλες και δεν προτιμάται. Χρησιμοποιείται όταν όλες οι άλλες μέθοδοι κοστίζουν ακριβά για την υλοποίησή τους. Στην εικόνα 4.34 φαίνεται η χαρακτηριστική στροφών – ροπής για αυτή την μέθοδο ελέγχου.



Εικόνα 4.34: Χαρακτηριστική στρόφων – ροπής με τη χρήση μεταβλητής αντίστασης στο κύκλωμα του επαγωγικού τυμπάνου [4].

Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι ελέγχου είναι αυτές της μεταβολής του ρεύματος διέγερσης και της μεταβολής της τάσης στα άκρα του επαγωγικού τυμπάνου. Παρόλα αυτά είναι αναγκαίο η τήρηση των ορίων ασφαλούς λειτουργίας για κάθε κινητήρα.

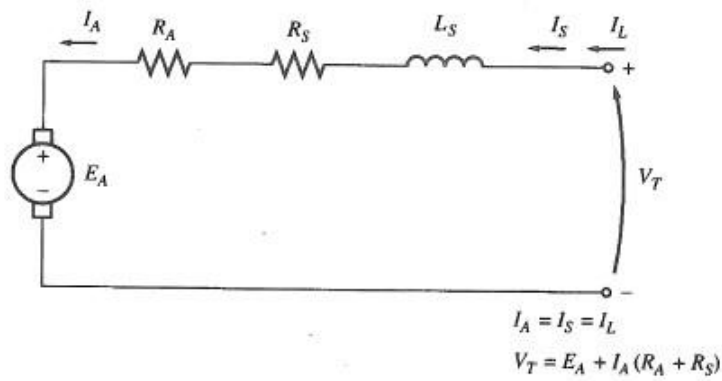
Στη μέθοδο με τη μεταβολή του ρεύματος διέγερσης, όσο το ρεύμα I_F μειώνεται, η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα αυξάνεται, ενώ όσο το ρεύμα I_F αυξάνεται, η ταχύτητα περιστροφής μειώνεται. Η ελάχιστη τιμή της ταχύτητας που μπορεί να αναπτύξει ένας κινητήρας, εξαρτάται από την τιμή του μέγιστου ρεύματος που μπορεί να ρέει στο τύλιγμα διέγερσης, χωρίς αυτό να καταστραφεί από υπερφόρτιση. Όταν ένας κινητήρας τροφοδοτείται με την ονομαστική του τάση, την ονομαστική ισχύ και το ονομαστικό ρεύμα διέγερσης, τότε θα περιστρέφεται με την ονομαστική του ταχύτητα, που ονομάζεται βασική ταχύτητα. Συνεπώς η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα με τη μέθοδο αυτή μπορεί να λαμβάνει μόνο τιμή ίση ή μεγαλύτερη της βασικής, διότι το ρεύμα διέγερσης δεν μπορεί να ξεπεράσει την ονομαστική του τιμή για λόγους ασφαλείας του κινητήρα.

Στη μέθοδο με τη μεταβολή της τάσης στα άκρα του οπλισμού, όσο η τάση V_T μειώνεται, ταυτόχρονα και η ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα ελαττώνεται, ενώ, όσο η τάση V_T αυξάνεται, υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση και της ταχύτητας περιστροφής του κινητήρα. Όπως γίνεται αντιληπτό η τάση στα άκρα του οπλισμού δεν μπορεί να λάβει τιμή πάνω από την ονομαστική. Γι' αυτό τον λόγο η ταχύτητα περιστροφής λαμβάνει τιμή ίση ή μικρότερη από την ονομαστική ταχύτητα περιστροφής.

Συνδυάζοντας και τις δυο μεθόδους ελέγχου σε έναν κινητήρα υπάρχει δυνατότητα με τις κατάλληλες μεταβολές, ο κινητήρας να περιστραφεί σε ένα μεγάλο εύρος ταχύτητας, τόσο κάτω από την ταχύτητα βάσης, αλλά όσο και πάνω από αυτή. [4 §9.4]

4.6.2 Κινητήρας διέγερσης σειράς

Σε έναν κινητήρα συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς, το τύλιγμα του επαγωγικού τυμπάνου συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα διέγερσης. Συνεπώς το τύλιγμα διέγερσης κατασκευάζεται με αγωγό διατομής ίδιου μεγέθους με αυτόν του επαγωγικού τυμπάνου. Κατασκευαστικά το τύλιγμα διέγερσης στους κινητήρες αυτούς είναι μεγαλύτερης διατομής και με λιγότερες σπείρες συγκριτικά με το τύλιγμα διέγερσης στους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Στην εικόνα 4.35 φαίνεται το ισοδύναμο κύκλωμα του κινητήρα διέγερσης σειράς.



Εικόνα 4.35: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρα διέγερσης σειράς [4].

Εφαρμόζοντας τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff προκύπτει:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (\text{σχέση 4.52})$$

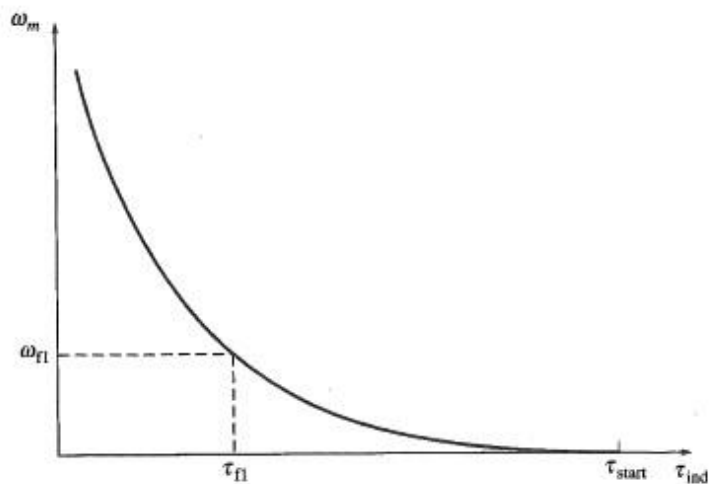
Η επαγόμενη ροπή δίνεται από την σχέση:

$$\tau_{ind} = K\Phi I_A \quad (\text{σχέση 4.53})$$

Μέσω καταλλήλων μετατροπών η σχέση μεταξύ ροπής και στροφών δίνεται από τη σχέση:

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A - R_S}{Kc} \quad (\text{σχέση 4.54})$$

Βάσει της σχέσης 4.54 το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η ταχύτητα ενός κινητήρα διέγερσης σειράς μεταβάλλεται αντιστρόφως ανάλογα με τη τετραγωνική ριζά της ροπής του.



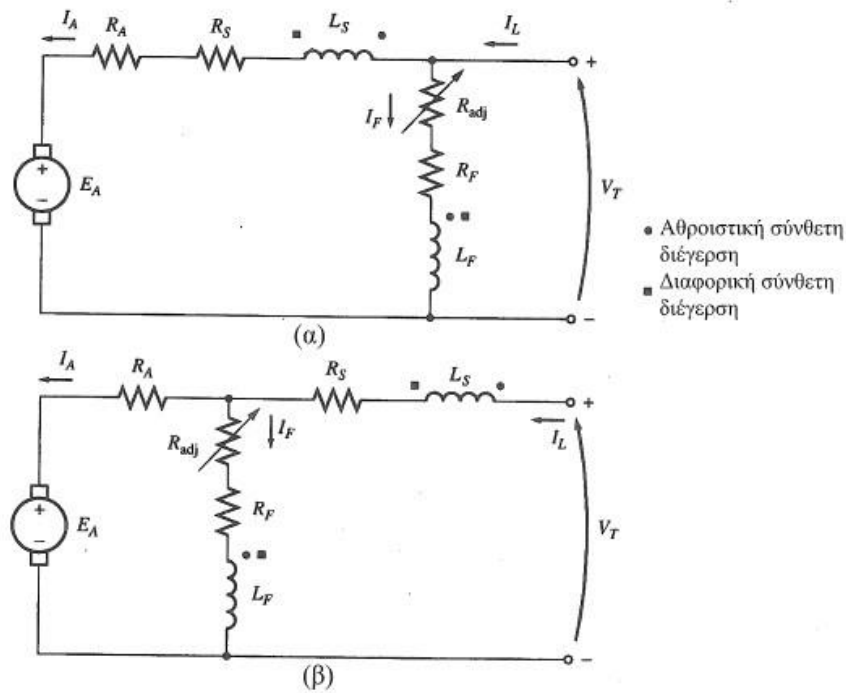
Εικόνα 4.36: Χαρακτηριστική καμπύλη ροπής – στροφών κινητήρα διέγερσης σειράς [4].

Από τη χαρακτηριστική καμπύλη της εικόνας 4.36 παρατηρείται ότι η ταχύτητα του κινητήρα γίνεται άπειρη για μηδενική ροπή. Δηλαδή όταν στον κινητήρα δεν συνδεθεί κάποιο φορτίο, τότε η ταχύτητα του αυξάνεται συνεχώς. Η ροπή του κινητήρα όμως δεν είναι μηδενική, διότι υπάρχουν οι απώλειες πυρήνα, οι μηχανικές και οι κατανεμημένες απώλειες. Παρόλα αυτά εάν δεν συνδεθεί κατάλληλο φορτίο στον άξονα του, οι στροφές του αυξάνονται σε σημείο που προκαλούν βλάβη του κινητήρα. Επιπλέον από τη χαρακτηριστική καμπύλη παρατηρείται ότι αυτοί οι κινητήρες παρουσιάζουν μεγάλη ροπή κατά την εκκίνησή τους. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπως κινητήρες ανελκυστήρων, κινητήρες εκκίνησης και έλξης.

Σε αυτούς τους κινητήρες υπάρχει μόνο μια αποδοτική μέθοδος για τον έλεγχο των στροφών τους. Η μέθοδος αυτή είναι η μεταβολή της τάσης στα άκρα του οπλισμού του κινητήρα. Με την αύξηση της τάσης υπάρχει αύξηση του αριθμού των στροφών, ενώ με τη μείωση της τάσης υπάρχει ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητας του κινητήρα. [4 §9.6]

4.6.3 Κινητήρας συνθέτης διέγερσης

Οι κινητήρες που εντάσσονται σε αυτήν την κατηγορία διαθέτουν δύο τύλιγματα διέγερσης: ένα τύλιγμα το οποίο συνδέεται σε σειρά με το τύλιγμα οπλισμού και κατασκευάζεται από αγωγό μεγάλης διατομής και ένα τύλιγμα το οποίο συνδέεται παράλληλα με το τύλιγμα του οπλισμού και κατασκευάζεται από αγωγό μικρότερης διατομής. Σε αυτήν την κατηγορία οι κινητήρες διαχωρίζονται σε δυο υποκατηγορίες. Ο διαχωρισμός τους γίνεται με βάση τη μαγνητική ροή στο εσωτερικό τους. Οι υποκατηγορίες αυτές είναι: η αθροιστικής σύνθετης διέγερσης και διαφορικής σύνθετης διέγερσης. Τα ισοδύναμα κυκλώματα των κινητήρων αθροιστικής σύνθετης διέγερσης και διαφορικής σύνθετης διέγερσης φαίνονται στην εικόνα 4.37 παρακάτω.



Εικόνα 4.37: Ισοδύναμο κύκλωμα κινητήρων σύνθετης διέγερσης α) μεταπαράλληλη συνδεσμολογία β)προπαράλληλη συνδεσμολογία [4].

Από τον νόμο των τάσεων του Kirchhoff στην μεταπαράλληλης συνδεσμολογίας προκύπτει:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S) \quad (\text{σχέση 4.55})$$

Τα ρεύματα στο εσωτερικό του κινητήρα δίνονται από τις σχέσεις:

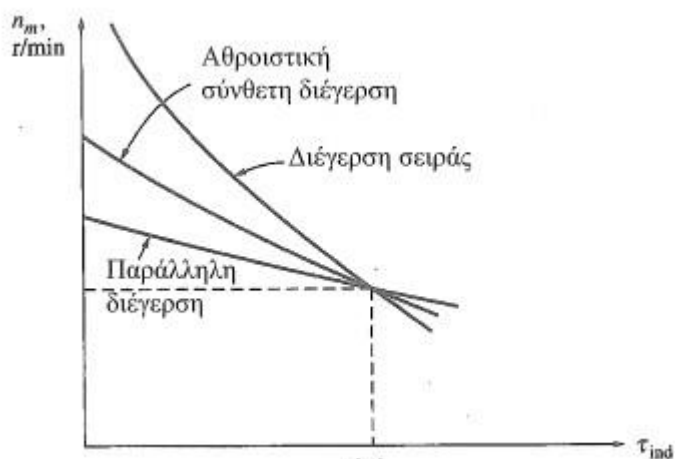
$$I_A = I_L - I_F \quad (\text{σχέση 4.56})$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F} \quad (\text{σχέση 4.57})$$

Στο εσωτερικό του κινητήρα σύνθετης διέγερσης υπάρχει μια σταθερή μαγνητική ροή, η οποία προέρχεται από το παράλληλο τύλιγμα και μια μεταβλητή μαγνητική ροή, η οποία προέρχεται από το τύλιγμα σειράς.

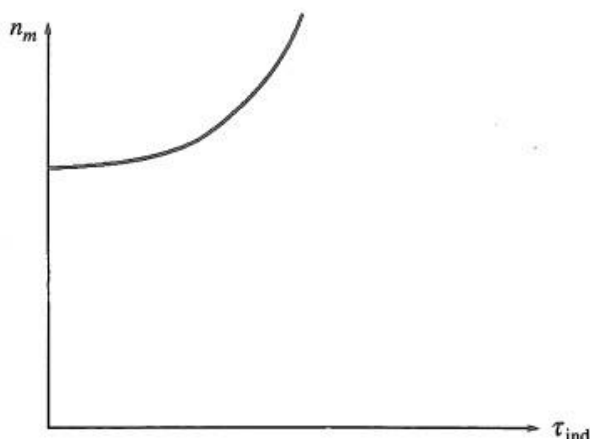
Στους κινητήρες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης τα τυλίγματα που είναι υπεύθυνα για την παραγωγή των μαγνητικών ροών αυτών, συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε οι μαγνητικές ροές να αθροίζονται μεταξύ τους. Για τον λόγο αυτό οι κινητήρες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης διαθέτουν μεγαλύτερη ροπή από τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης και μικρότερη από τους κινητήρες διέγερσης σειράς. Το πλεονέκτημα των κινητήρων αυτών είναι ότι παρουσιάζουν αρκετά υψηλή ροπή και δεν επιταχύνουν ασταμάτητα όταν δεν φέρουν κάποιο φορτίο στον άξονα τους. Όταν το

φορτίο αυτό είναι μικρό, το τύλιγμα σειράς δεν παίζει ουσιαστικό ρόλο και ο κινητήρας συμπεριφέρεται σχεδόν ίδια με τους κινητήρες παράλληλης διέγερσης. Όταν όμως το φορτίο στον άξονα γίνει μεγάλο, τότε η συμπεριφορά του κινητήρα μοιάζει με αυτήν του κινητήρα σειράς. Στην εικόνα 4.38 φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής – στροφών για τους κινητήρες αθροιστικής σύνθετης διέγερσης.



Εικόνα 4.38: Χαρακτηριστική ροπής - στροφών κινητήρα αθροιστικής σύνθετης διέγερσης σε σύγκριση με τους κινητήρες διέγερσης σειράς και παράλληλης διέγερσης [4].

Στους κινητήρες διαφορικής σύνθετης διέγερσης η μαγνητική ροή, που δημιουργείται από το τύλιγμα σειράς, αφαιρείται από τη μαγνητική ροή, που δημιουργείται από το παράλληλο τύλιγμα. Αυτό σημαίνει ότι με μια αύξηση του φορτίου του κινητήρα υπάρχει αύξηση του ρεύματος οπλισμού και ταυτόχρονα μείωση της εσωτερικής μαγνητικής ροής του κινητήρα. Αυτό όμως συνεπάγεται ότι η ταχύτητα του κινητήρα αυξάνεται. Με μια περαιτέρω αύξηση του φορτίου, η εσωτερική μαγνητική ροή μειώνεται και ο κινητήρας συνεχίζει να επιταχύνει. Συμπερασματικά ο κινητήρας διαφορικής σύνθετης διέγερσης είναι ασταθής. Για τον λόγο αυτόν τέτοιου είδους κινητήρες δεν χρησιμοποιούνται σχεδόν σε καμία εφαρμογή. Τα προβλήματα γίνονται μεγαλύτερα κατά τη διαδικασία εκκίνησης αυτών των κινητήρων. Λόγω της αφαίρεσης των μαγνητικών ροών, υπάρχει περίπτωση αντίστροφης της πολικότητας των πόλων της μηχανής. Αυτό σημαίνει ότι ο κινητήρας μπορεί να παραμείνει κινητοποιημένος ή να περιστραφεί με ανάποδη φορά. Εφαρμογή βρίσκουν μόνο σε συστήματα ασφαλείας, που είναι απαραίτητη η διακοπή τροφοδοσίας, όταν η ροή ισχύος αλλάξει κατεύθυνση σε ένα κύκλωμα. Στην εικόνα 4.38 φαίνεται η χαρακτηριστική ροπής – στροφών ενός κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4 §9.7].



Εικόνα 4.39: Χαρακτηριστική ροπής – στροφών κινητήρα διαφορικής σύνθετης διέγερσης [4].

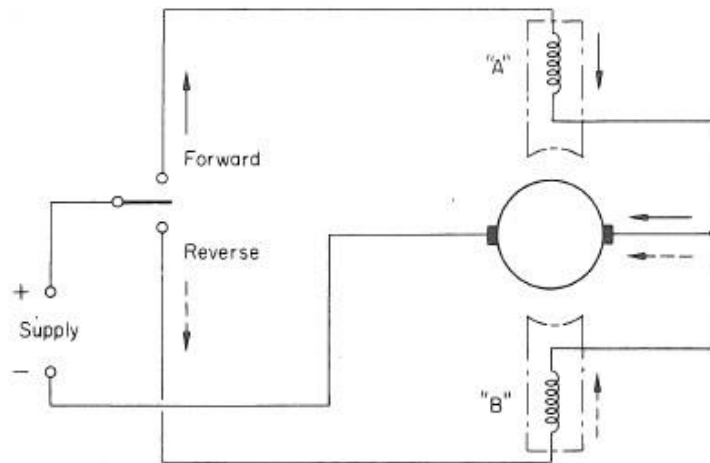
4.7 Χρήση κινητήρων σε πτητικά μέσα

Οι ηλεκτρικοί κινητήρες είναι ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα που υπάρχουν σε ένα αεροπλάνο. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η μετατροπή της ηλεκτρικής σε μηχανική ενέργεια. Για τον λόγο αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε όλα τα συστήματα ενός αεροσκάφους. Η κατηγοριοποίηση τους μπορεί να γίνει με βάση: το σύστημα στο οποίο ανήκουν (σύστημα καυσίμου, σύστημα προσγείωσης κ.α.), το είδος της τροφοδοσίας που απαιτούν για τη λειτουργία τους (DC – AC), τη διάρκεια λειτουργίας τους και την ισχύ τους. Πολλές φορές η κατηγοριοποίηση τους γίνεται με βάση τις μηχανικές ιδιότητες που παρουσιάζουν, όπως είναι οι αντλίες και οι βαλβίδες.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος με διέγερση σειράς χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπως είναι οι εκκίνητες κινητήρων καύσης (starter motor) και κίνηση επιφανειών ελέγχου.

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος παράλληλης διέγερσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης και ο έλεγχος των στροφών είναι επιθυμητός, όπως είναι ανεμιστήρες ψύξης (fans), περιστροφικές αντλίες (rotary pumps), καθώς και περιστροφικούς μετατροπείς ενέργειας (rotary inverters).

Σε πολλές εφαρμογές είναι απαραίτητο ο κινητήρας συνεχούς ρεύματος να περιστρέφεται και στις δυο κατευθύνσεις. Για το λόγο αυτόν χρησιμοποιούνται κινητήρες ειδικής κατασκευής που διαθέτουν δυο τυλίγματα διέγερσης (split – field motor). Η αλλαγή της φοράς περιστροφής γίνεται με τη μέθοδο της εναλλαγής της κατεύθυνσης του ρεύματος στα τυλίγματα διέγερσης. Συνεπώς κάθε τύλιγμα χρησιμοποιείται για την αντίστοιχη φορά περιστροφής και ενεργοποιείται με την κατάλληλη επιλογή του διακόπτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 4.40.



Εικόνα 4.40: Σχέδιο κινητήρα με δύο τυλίγματα διέγερσης για αλλαγή φοράς περιστροφής (split – field motor) [26].

Κινητήρες με δύο τυλίγματα διέγερσης χρησιμοποιούνται σε ειδικές ηλεκτρομηχανικές διατάξεις, οι οποίες ονομάζονται κινητήρες ενεργοποίησης (motor actuators). Οι διατάξεις αυτές εκτός από τον κινητήρα περιλαμβάνουν και ένα σύστημα γραναζιών και αξόνων, το οποίο είναι υπεύθυνο για τη μετάδοση της κίνησης. Η κίνηση η οποία εκτελούν μπορεί να είναι είτε γραμμική, είτε περιστροφική. Βασικό χαρακτηριστικό αυτών των διατάξεων είναι η αργή και μικρής έκτασης κίνηση των μηχανικών μερών. Επιπλέον περιλαμβάνουν εσωτερικούς τερματικούς διακόπτες ώστε να καθορίζεται το εύρος κίνησης τους. Έναν γραμμικός κινητήρας ενεργοποίησης φαίνεται στην εικόνα 4.41.



Εικόνα 4.41: Γραμμικός κινητήρας ενεργοποίησης (linear actuator).

Οι AC κινητήρες που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό είναι οι ασύγχρονοι τριφασικοί, οι οποίοι δεν παρουσιάζουν συχνές βλάβες και η ανάγκη για συντήρηση είναι μικρή. Έχουν καλή απόδοση και χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που δεν απαιτείται μεγάλη ροπή εκκίνησης, όπως είναι αντλίες καυσίμου και υδραυλικού συστήματος [26 §9].



Εικόνα 4.42: Τριφασική αντλία υδραυλικού συστήματος.

4.8 Συμπεράσματα

Οι κινητήρες που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα είναι διαφόρων ειδών ανάλογα με τις απαιτήσεις της εφαρμογής, οι οποίες καθορίζουν εάν ο κινητήρας που χρησιμοποιείται είναι συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος. Είναι ένα από τα βασικότερα εξαρτήματα, διότι είναι υπεύθυνοι για την ηλεκτρομηχανική μετατροπή της ενέργειας εκεί που είναι απαραίτητο. Πιο συγκεκριμένα παρέχουν στον χειρίστη του συστήματος τη δυνατότητα ελέγχου μηχανικών μερών με ηλεκτρικές εντολές, γεγονός που καθιστά τον έλεγχο του αεροπλάνου ευκολότερο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : Ηλεκτρικά δίκτυα πτητικών μέσων

5.1 Εισαγωγή

Με το πέρασμα των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας, οι κατασκευάστριες εταιρείες αεροπλάνων δίνουν μεγάλη έμφαση στη σωστή και ασφαλή λειτουργία του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού συστήματος. Όλες οι διασυνδέσεις μεταξύ των εξαρτημάτων των συστημάτων αυτών γίνεται με τη βοήθεια αγωγών και καλωδίων, τα οποία λαμβάνονται υπόψη ως ένα ξεχωριστό σύστημα του αεροσκάφους. Το ηλεκτρικό δίκτυο είναι αναγκαίο να λαμβάνεται υπόψη ως ένα κρίσιμο σύστημα του αεροπλάνου και να μην θεωρείται ως ένα σύστημα που από τη στιγμή που τοποθετήθηκε δεν χρειάζεται συντήρηση και παραμελείται. Για τον λόγο αυτό η νομοθεσία θέσπισε έναν νέο όρο, το EWIS (Electrical Wiring Interconnection System). Με τον όρο EWIS συμπεριλαμβάνεται κάθε καλώδιο και συσκευή, τα οποία είναι υπεύθυνα για τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ δυο ή περισσότερων σημείων [14 §7].

5.2 Χαρακτηριστικά αγωγών που χρησιμοποιούνται στα πτητικά μέσα

Οι αγωγοί και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα ποικίλουν ανάλογα με τον τύπο του αεροπλάνου, το σύστημα που τροφοδοτούν, καθώς και τις συνθήκες του περιβάλλοντος που βρίσκονται. Κάθε καλώδιο και αγωγός διαθέτει κάποια κατασκευαστικά χαρακτηριστικά, τα οποία αφορούν: το βάρος του, την ελαστικότητα του, την ωμική αντίσταση του, την ονομαστική τάση και ρεύμα λειτουργίας, καθώς και τη μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας.

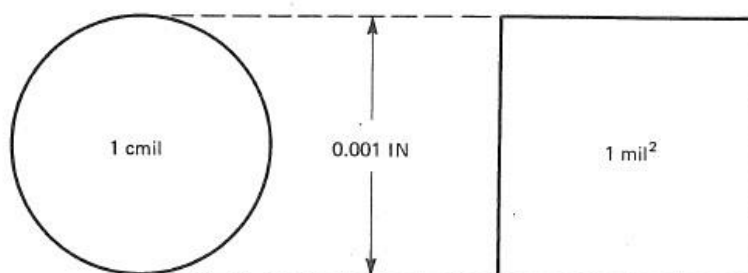
Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα είναι αναγκαίο να παρουσιάζουν μεγάλη ελαστικότητα, ώστε να αποφευχθεί η μηχανική κόπωση από τους κραδασμούς που υπάρχουν κατά τη διάρκεια της πτήσης. Επιπλέον λόγω του περιορισμένου χώρου τα ελαστικά καλώδια παρουσιάζουν ευκολότερη όδευση μέσα στη δομή ενός αεροπλάνου. Η ελαστικότητα ενός αγωγού επιτυγχάνεται με τη χρήση πολλών συνεστραμμένων κλώνων. Οι περισσότεροι αγωγοί διαθέτουν από 7 έως 19 κλώνους όταν πρόκειται για μικρής διατομής, ενώ μεγαλύτερης διατομής αγωγοί διαθέτουν περισσότερους από 19 κλώνους.

Το υλικό κατασκευής του αγωγίμου μέρους (κλώνοι) ενός αγωγού εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος που πρόκειται να τοποθετηθεί. Ο χαλκός είναι το επικρατέστερο υλικό κατασκευής. Παρόλα αυτά για να αποφευχθεί η οξείδωση του, στο εξωτερικό μέρος τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα διαφορετικού μετάλλου με τη μέθοδο της επιμετάλλωσης. Ο επικασσιτερωμένος χαλκός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η θερμοκρασία περιβάλλοντος δεν ξεπερνά τους 105°C. Ο επαργυρωμένος χαλκός χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που η θερμοκρασία περιβάλλοντος ξεπερνά τους 200°C ενώ ο επινικελωμένος χαλκός χρησιμοποιείται για θερμοκρασία περιβάλλοντος από

200°C έως 260°C. Επιπλέον για θερμοκρασία κάτω των 105°C ως κύριο υλικό κατασκευής αντί του χαλκού χρησιμοποιείται και το αλουμίνιο. Όταν όμως χρησιμοποιείται αγωγός αλουμινίου, πρέπει να είναι τουλάχιστον κατά δύο μεγέθη μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο αγωγό χαλκού, λόγω της μεγαλύτερης ειδικής αντίστασης που παρουσιάζει.

Το υλικό κατασκευής της εξωτερικής μόνωσης των αγωγών που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα διαφέρει ανάλογα με τις συνθήκες περιβάλλοντος που πρόκειται να τοποθετηθούν. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται είναι το φθοριούχο πολυβινυλιδένιο (PVF), φθοριούχο αιθυλένιο προπυλένιο (FEP), τετραφθοροαιθυλένιο (TFE), πολυμερές τετραφθοροαιθυλένιο (ETFE).

Το μέγεθος των αγωγών ορίζεται με βάση το Αμερικανικό πρότυπο (American Wire Gage – AWG), στο οποίο ως μονάδα μέτρησης για κυκλικούς αγωγούς χρησιμοποιείται το κυκλικό χιλιοστό της ίντσας (circular mil). Το κυκλικό χιλιοστό της ίντσας είναι μονάδα μέτρησης εμβαδού, η οποία ισούται με το εμβαδόν ενός κύκλου με διάμετρο ένα χιλιοστό της ίντσας (0,001 in). Για τετραγωνικούς αγωγούς χρησιμοποιείται το τετραγωνικό χιλιοστό της ίντσας (square mil). Το τετραγωνικό χιλιοστό της ίντσας είναι μονάδα μέτρησης εμβαδού, η οποία ισούται με το εμβαδόν ενός τετράγωνου με μήκος πλευράς ένα χιλιοστό της ίντσας (0,001 in). Τα παραπάνω φαίνονται στην εικόνα 5.1 παρακάτω.



Εικόνα 5.1: Κυκλικό χιλιοστό της ίντσας και τετραγωνικό χιλιοστό της ίντσας [22].

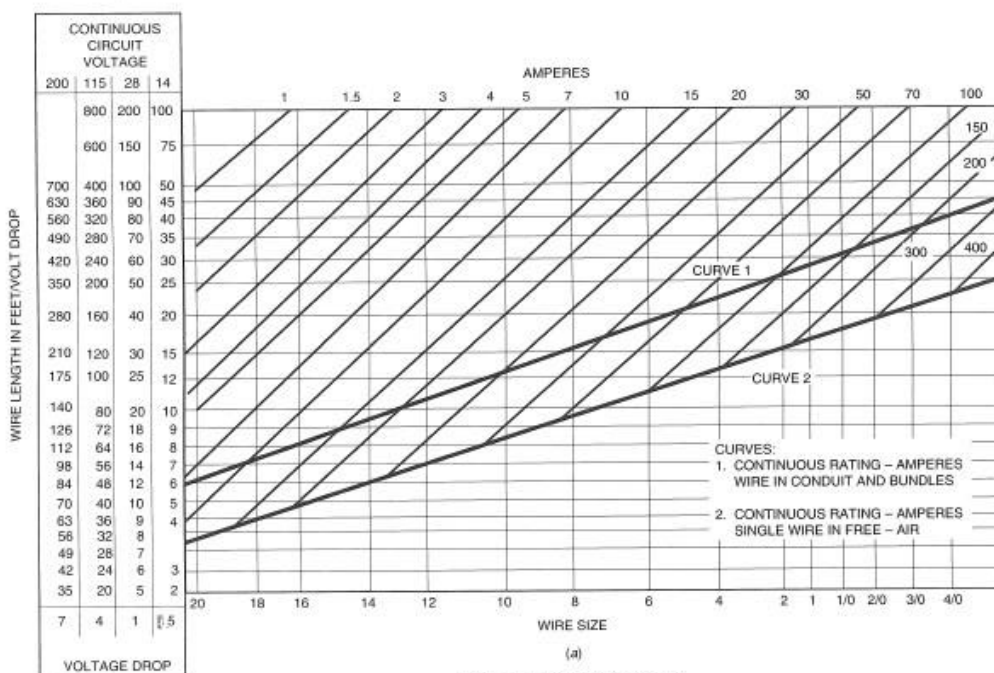
Οι αγωγοί πρέπει να είναι ικανοί να διαχειριστούν τη ροή του ρεύματος στο εσωτερικό τους, χωρίς να υπερθερμαίνονται και χωρίς να παρουσιάζουν πτώση τάσης. Η επιτρεπόμενη πτώση τάσης με βάση τον Αμερικανικό οργανισμό (FAA) φαίνεται στην εικόνα 5.2.

Nominal system voltage	Allowable voltage drop (V)	
	Continuous operation	Intermittent operation
14	0.5	1.0
28	1.0	2.0
115	4.0	8.0
200	7.0	14.0

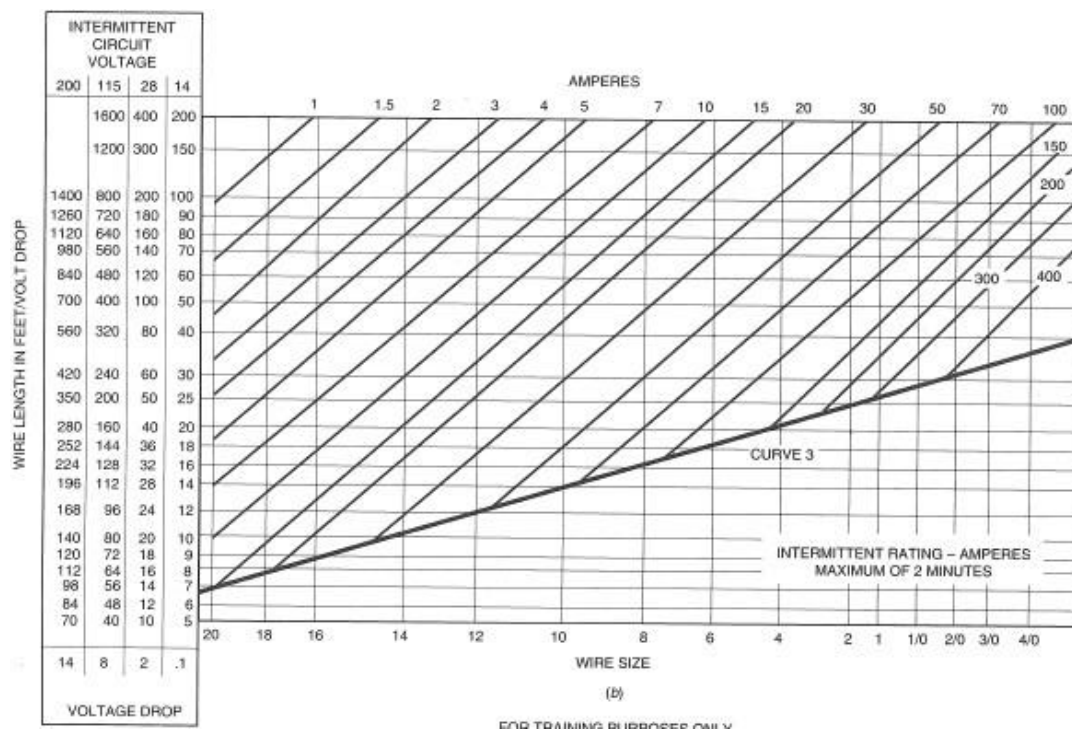
Εικόνα 5.2: Μέγιστη επιτρεπόμενη πτώση τάσης σε αγωγούς [22].

Η μέγιστη αυτή επιτρεπόμενη πτώση τάσης αναφέρεται στη διαφορά δυναμικού μεταξύ του σημείου αναχώρησης με το σημείο άφιξης στο ηλεκτρικό ή ηλεκτρονικό εξάρτημα, όταν το κύκλωμα τροφοδοτείται με την αντίστοιχη ονομαστική τάση. Ο πίνακας στην εικόνα 5.2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί όταν για κάθε κύκλωμα έχει επιλεγεί το σωστό μέγεθος αγωγού, το οποίο διαρρέεται από ονομαστικό ρεύμα για συγκεκριμένο μήκος.

Για τη σωστή επιλογή όμως ενός καλωδίου χρησιμοποιούνται οι πίνακες στις εικόνες 5.3 και 5.4. Στους πίνακες αυτούς αρχικά γίνεται επιλογή της ονομαστικής τάσης που πρόκειται να λειτουργήσει το κύκλωμα. Στη συνέχεια ορίζεται το μήκος της γραμμής του κυκλώματος από την αριστερή στήλη. Έπειτα ορίζεται η ένταση του ρεύματος, που πρόκειται να διαρρέει το συγκεκριμένο κύκλωμα. Ακολουθώντας την προέκταση οριζόντια δεξιά του μήκους της γραμμής και τη διαγώνια γραμμή της έντασης του ρεύματος, στο σημείο τομής των δυο αυτών γραμμών ορίζεται το μέγεθος της διατομής του καλωδίου, που πρέπει να χρησιμοποιηθεί, στο κάτω μέρος του πίνακα. Στην περίπτωση που το σημείο τομής βρίσκεται αναμεσα σε δύο μεγέθη αγωγού επιλέγεται η μεγαλύτερη για λόγους ασφαλείας. Εξαιρεση αποτελεί η περίπτωση που κατά την αναζήτηση του σημείου τομής ο αναγνώστης εντοπίσει πρώτα μια έντονη μαύρη διαγώνια γραμμή (curve 1, curve 2, curve 3). Τότε είναι αναγκαίο να ακολουθείται η έντονη μαύρη γραμμή έως το σημείο που θα συναντηθεί με τη διαγώνια γραμμή του ρεύματος, που έχει επιλεγεί για τη συγκεκριμένη εφαρμογή, και στο σημείο αυτό ορίζεται το σημείο τομής.



Εικόνα 5.3: Πίνακας επιλογής μεγέθους αγωγού για συγκεκριμένο μήκος και συγκεκριμένη ένταση ρεύματος υπό συνθήκες συνεχούς λειτουργίας αγωγού 1) μέσα σε περίβλημα 2) στον αέρα [22].



Εικόνα 5.4: Πίνακας επιλογής μεγέθους αγωγού για συγκεκριμένο μήκος και συγκεκριμένη ένταση ρεύματος για λειτουργία μικρότερη των δύο λεπτών [22].

Από τον πίνακα της εικόνας 5.3 προκύπτει κατά προσέγγιση ο πίνακας της εικόνας 5.5, στον οποίο μπορεί να υπολογιστεί η πτώση τάσης για οποιοδήποτε μήκος αγωγού με τη χρήση του νόμου του Ohm.

Wire size, AWG	Maximum amperes		Resistance Ω/ 1000 ft (20°C)	Area, cmil	Weight, lb/ 1000 ft
	Free air	Conduit or bundled			
20	11	7.5	10.25	1 119	5.6
18	16	10	6.44	1 779	8.4
16	22	13	4.76	2 409	10.8
14	32	17	2.99	3 830	17.1
12	41	23	1.88	6 088	25.0
10	55	33	1.10	10 443	42.7
8	73	46	0.70	16 864	69.2
6	101	60	0.436	26 813	102.7
4	135	80	0.274	42 613	162.5
2	181	100	0.179	66 832	247.6
1	211	125	0.146	81 807	288.0
0	245	150	0.114	104 118	382
00	283	175	0.090	133 665	482
000	328	200	0.072	167 332	620
0000	380	225	0.057	211 954	770

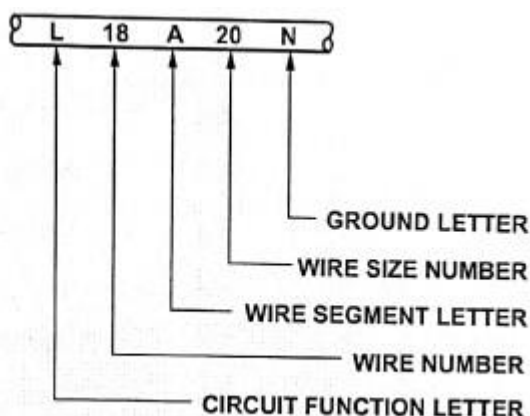
Εικόνα 5.5: Χαρακτηριστικά αγωγών χαλκού ως προς την ένταση του ρεύματος για λειτουργία εντός περιβλήματος και ελεύθερου αέρα [22].

Στην εικόνα 5.6 φαίνονται τα χαρακτηριστικά των αγωγών αλουμινίου που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αρίθμηση στον πίνακα αυτό ξεκινάει από το μέγεθος 6 AWG. Αυτό γίνεται, διότι αγωγοί αλουμινίου μικρότερης διατομής δεν χρησιμοποιούνται.

Wire or cable size, AWG	Maximum amperes		Resistance, Ω/1000 ft (20°)	Area, cmil	Weight, lb/1000 ft
	Free air	Conduit or bundled			
AL-6	83	50	0.641	28 280	
AL-4	108	66	0.427	42 420	
AL-2	152	90	0.268	67 872	
AL-0	202	123	0.169	107 464	166
AL-00	235	145	0.133	138 168	204
AL-000	266	162	0.109	168 872	250
AL-0000	303	190	0.085	214 928	303

Εικόνα 5.6: Χαρακτηριστικά αγωγών αλουμινίου [22].

Σε ένα αεροπλάνο ο αριθμός των εγκατεστημένων αγωγών είναι πολυάριθμος. Εκτός αυτού υπάρχουν αγωγοί μεγάλου μήκους και διαφορετικού μεγέθους, οι οποίοι λόγω δομής του αεροπλάνου είναι δύσκολος ο εντοπισμός της όδευσής τους. Για τον λόγο αυτό οι κατασκευάστριες εταιρίες χρησιμοποιούν ένα είδος σήμανσης για την αναγνώρισή τους. Η σήμανση αυτή είναι τυπωμένη πάνω στη μόνωση του αγωγού και γίνεται με ειδική εκτυπωτική μηχανή. Η σήμανση αυτή αποτελείται από λατινικά γράμματα και αριθμούς, που το καθένα έχει ξεχωριστή σημασία και προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για το κύκλωμα, στο οποίο ανήκει ο αγωγός. Η σήμανση είναι επαναλαμβανόμενη σε όλο το μήκος του αγωγού με απόσταση περίπου 30 – 40 cm μεταξύ της κάθε εκτύπωσης. Στην εικόνα 5.7 φαίνεται ένα παράδειγμα σήμανσης αγωγού.

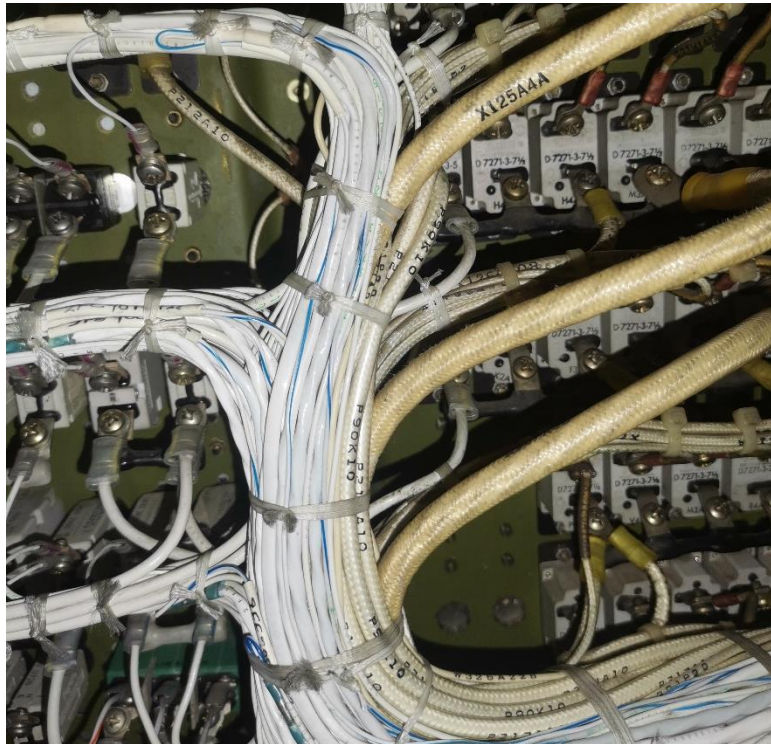


Εικόνα 5.7: Επεξήγηση σήμανσης αγωγού αεροπλάνου.

Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.7, το πρώτο γράμμα από αριστερά στη σήμανση υποδεικνύει σε ποιο σύστημα ανήκει ο εκάστοτε αγωγός. Τα γράμματα αυτά έχουν αντιστοιχηθεί από τη νομοθεσία και όλες οι κατασκευάστριες εταιρίες χρησιμοποιούν τα ίδια. Στην εικόνα 5.8 φαίνονται οι αντιστοιχίες των γραμμάτων με τα συστήματα. Ο επόμενος αριθμός της σήμανσης υποδηλώνει τον αριθμό του αγωγού στο συγκεκριμένο σύστημα. Το επόμενο γράμμα υποδηλώνει το τμήμα του αγωγού. Πιο συγκεκριμένα, εάν ένας αγωγός μεγάλου μήκους δεν ακολουθεί συνεχή πορεία αλλά χωρίζεται σε τμήματα, τότε σε κάθε τμήμα αλλάζει και το συγκεκριμένο γράμμα. Ο επόμενος αριθμός αναφέρεται στη διατομή του αγωγού. Το τελευταίο γράμμα μπορεί να είναι το N, το οποίο εάν υπάρχει υποδηλώνει ότι αυτός ο αγωγός συνδέεται με τη γείωση του αεροπλάνου. Εξαιρέση αποτελούν οι αγωγοί στα τριφασικά συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτούς το τελευταίο γράμμα μπορεί να είναι το A,B ή C το οποίο υποδηλώνει τον αριθμό της φάσης [22 §4].

CODE	NOMENCLATURE	CODE	NOMENCLATURE
ADF	Automatic Direction Finder	Q	Fuel and Oil
ALT or ALTM	Radio (Radar) Altimeter	R	Radio (navigation and communication)
ARC	UHF Communication	RD	Direction Finder
ATC	Air Traffic Control	RF	VHF Liaison
AUD	Interphone	RL	HF Communication
C	Control Surfaces	RM	Marker Beacon
COMM	Communication	RN	Navigation
D	Instruments (other than flight or engine)	RU	UHF Command
DME	Distance Measuring Equipment	RV	VHF Command
E	Engine Instruments	RZ	Interphone and Headphone
F	Flight Instruments	S	Radar
FL	Electrical Filter	SX	IFF Transponder
G	Landing Gear	T	Special Electronics
GPS	Global Positioning System	TCS	Traffic Collision and Avoidance System
GYRO	Gyromagnetic Compass	V	DC Power and DC Control Cables for AC System
H	Heating, Ventilating, and De-icing	VHF	VHF Communication
J	Ignition	W	Warning and Emergency
K	Engine Control	X	AC Power
L	Lighting	XPDR	Transponder
M	Miscellaneous Electric		
MKR or MB	Marker Beacon		
N	Ground		
NAV	Navigation		
P	DC Power		

Εικόνα 5.8: Συντομογραφίες συστημάτων που χρησιμοποιούνται στη σήμανση των αγωγών.

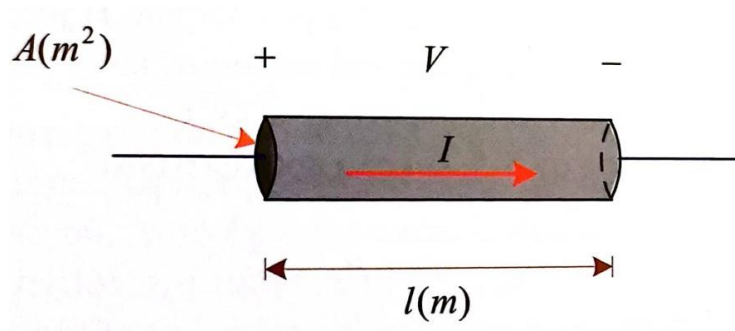


Εικόνα 5.9: Αγωγοί με σήμανση.

5.3 Ωμική αντίσταση αγωγού

Οι ωμικές απώλειες αποτελούν τον κύριο παράγοντα απωλειών ισχύος στους αγωγούς. Όταν πρόκειται για συνεχές ρεύμα ή ρεύμα μερικών δεκάδων Hz, το ρεύμα που ρέει στον αγωγό θεωρείται ομοιόμορφα κατανομημένο και η ωμική αντίσταση, που παρουσιάζει ο αγωγός, ισούται με την ισοδύναμη ωμική αντίσταση συνεχούς ρεύματος.

Έστω ένας αγωγός κυκλικής διατομής όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10: Αγωγός κυκλικής διατομής που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα [24].

Από τον νόμο του Ohm ισχύει:

$$V = R \cdot I \quad (\text{σχέση 5.1})$$

Όπου:

V : Διαφορά δυναμικού μεταξύ των δύο ακρών του αγωγού,

I : Η ένταση του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό,

R : Ωμική αντίσταση του αγωγού.

Η ωμική αντίσταση του αγωγού για το συνεχές ρεύμα ισούται με:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (\text{σχέση 5.2})$$

Όπου:

ρ : ειδική αντίσταση υλικού αγωγού (Ωm)

A : διατομή κυλινδρικού αγωγού (m^2)

Η ειδική αντίσταση ενός υλικού εξαρτάται από τη θερμοκρασία και είναι ένα μέγεθος που το χαρακτηρίζει. Για τα περισσότερα υλικά, με την αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχει μια αντίστοιχη αύξηση της τιμής της ειδικής αντίστασης. Σε μια μικρή περιοχή θερμοκρασιών (περίπου μέχρι $100^\circ C$) η τιμή της ειδικής αντίστασης ενός μετάλλου μπορεί να υπολογιστεί με μια πολύ καλή προσέγγιση από την παρακάτω σχέση:

$$\rho_{\theta_2} = \rho_{\theta_1} [1 + \alpha_{\theta_1} (\theta_2 - \theta_1)] \quad (\text{σχέση 5.3})$$

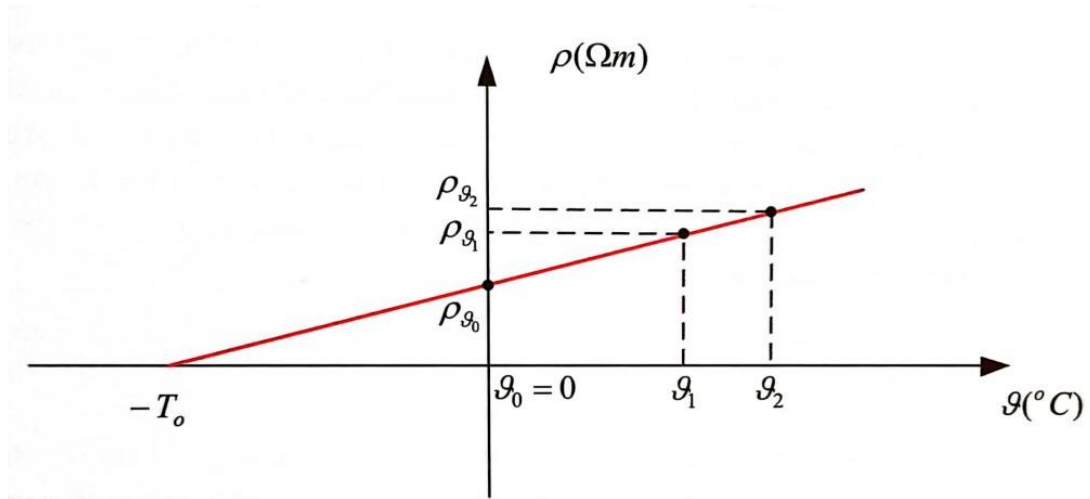
Όπου:

ρ_{θ_2} : ειδική αντίσταση υλικού για θερμοκρασία θ_2

ρ_{θ_1} : ειδική αντίσταση υλικού για τη θερμοκρασία αναφοράς (χαλκός: $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega m$ αλουμίνιο : $2,8 \cdot 10^{-8} \Omega m$ για θερμοκρασία $\theta_1 = 20^\circ C$)

α_{θ_1} : θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης του υλικού ($\alpha_{Cu,20^\circ C} = 0,00383$ και $\alpha_{Al,20^\circ C} = 0,00410$)

Ο υπολογισμός του θερμοκρασιακού συντελεστή για οποιαδήποτε θερμοκρασία μπορεί να γίνει προσεγγιστικά με τη βοήθεια του διαγράμματος της εικόνας 5.11. Στην περίπτωση αυτή θεωρείται ότι η ειδική αντίσταση ενός υλικού ακολουθεί γραμμική εξάρτηση με τη θερμοκρασία σε όλο το εύρος της.



Εικόνα 5.11: Γραμμική εξάρτηση της ειδικής αντίστασης από την θερμοκρασία [24].

Το σημείο $-T_o$ αντιπροσωπεύει την τιμή της θερμοκρασίας, για την οποία η ειδική αντίσταση του υλικού θα γινόταν μηδενική. Χρησιμοποιώντας το θεώρημα των όμοιων τριγώνων στην εικόνα 5.10 προκύπτει η παρακάτω σχέση:

$$\frac{\rho_{\theta_2}}{\rho_{\theta_1}} = \frac{T_o + \theta_2}{T_o + \theta_1} \quad (\text{σχέση 5.4})$$

Σε συνδυασμό των σχέσεων 5.3 και 5.4 προκύπτει ο θερμοκρασιακός συντελεστής της ειδικής αντίστασης του υλικού.

$$\alpha_{\theta_1} = \frac{1}{T_o + \theta_1} \quad (\text{σχέση 5.5})$$

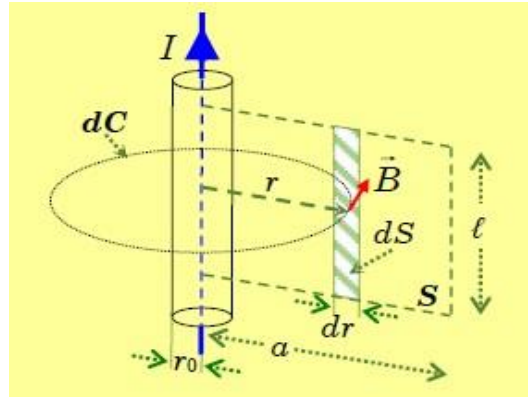
Σε συνδυασμό των σχέσεων 5.2 και 5.3 προκύπτει η μεταβολή της ωμικής αντίστασης ενός υλικού σε συνάρτηση της θερμοκρασίας για ένα μικρό εύρος από $0^\circ C$ έως $100^\circ C$.

$$R_{\theta_2} = R_{\theta_1}[1 + \alpha_{\theta_1}(\theta_2 - \theta_1)] \quad (\text{σχέση 5.6})$$

Όλα τα παραπάνω ισχύουν όταν η ροή του ρεύματος παρουσιάζει ομοιόμορφη κατανομή σε ολόκληρη τη διατομή του αγωγού. Με την αύξηση της συχνότητας του ρεύματος αυτή η ομοιομορφία διαταράσσεται λόγω του επιδερμικού φαινομένου. Για τον λόγο αυτό, σε αυτήν την περίπτωση, η ωμική αντίσταση του αγωγού διαφέρει από την τιμή που παρουσιάζει στο συνεχές ρεύμα. Συνεπώς, είναι αναγκαίο στις περιπτώσεις αυτές να πραγματοποιείται η κατάλληλη διόρθωση [24 §5.3].

5.4 Αυτεπαγωγή αγωγού

Ένας αγωγός που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα, σύμφωνα με το νόμο του Ampere, αναπτύσσεται γύρω του μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} . Η αναπτυσσόμενη μαγνητική επαγωγή είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέει τον αγωγό. Η μαγνητική επαγωγή έχει κατεύθυνση, η οποία ακολουθεί τον κανόνα του δεξιόστροφου κοχλία, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12.



Εικόνα 5.12: Υπολογισμός αυτεπαγωγής αγωγού [31].

Το μέτρο της μαγνητικής επαγωγής σε έναν ευθύγραμμο αγωγό για ακτίνα r γύρω από το κέντρο του, δίνεται από τη σχέση:

$$B(r) = \begin{cases} \frac{\mu \cdot I \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} & r \leq r_0 \\ \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} & r > r_0 \end{cases} \quad (\text{σχέση 5.7})$$

Για τον υπολογισμό της πεπλεγμένης ροής λ , ορίζεται μια επιφάνεια S , η οποία έχει διαστάσεις ύψους ℓ και ακτίνας a , όπως φαίνεται στην εικόνα 5.12.

Η στοιχειώδης πεπλεγμένη ροή $d\lambda$, στο αντίστοιχο εμβαδόν dS , για ακτίνα r μεγαλύτερη από r_0 , ισούται με την αντίστοιχη μαγνητική ροή $d\Phi$, λόγω της μη ύπαρξης σπειρών. Συνεπώς:

$$d\lambda = d\Phi = B(r) \cdot \ell \cdot dr = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \ell \cdot dr \quad \text{για } r > r_0 \quad (\text{σχέση 5.8})$$

Για ακτίνα r , η οποία είναι μικρότερη από r_0 , η στοιχειώδης πεπλεγμένη ροή $d\lambda$ διαφέρει από την αντίστοιχη στοιχειώδη μαγνητική ροή $d\Phi$, η οποία ισούται με:

$$d\Phi(r) = B(r) \cdot \ell \cdot dr = \frac{\mu \cdot I \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} \cdot \ell \cdot dr \quad \text{για } r < r_0 \quad (\text{σχέση 5.9})$$

Σε έναν αγωγό η πυκνότητα του ρεύματος \mathcal{J} θεωρείται ομοιόμορφη και ισούται με το πηλίκο του συνολικού ρεύματος του αγωγού I προς τη συνολική διατομή $\pi \cdot r_0^2$. Δηλαδή:

$$\mathcal{J} = \frac{I}{\pi \cdot r_0^2} \quad (\text{σχέση 5.10})$$

Οπότε η ισοδύναμη ένταση του ρεύματος $I(r)$, η οποία διέρχεται από τη διατομή του αγωγού με ακτίνα μικρότερη από την ακτίνα r_0 ισούται με:

$$I(r) = \mathcal{J} \cdot \pi \cdot r^2 = \frac{I}{\pi \cdot r_0^2} \cdot \pi \cdot r^2 = I \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \quad (\text{σχέση 5.11})$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις 5.7, 5.9 και 5.11, προκύπτει η συνολική στοιχειώδης πεπλεγμένη ροή $d\lambda$, για ακτίνα r μικρότερη από την r_0 .

$$d\lambda(r) = d\Phi(r) \cdot \frac{I(r)}{I} = \frac{\mu \cdot \left(I \cdot \frac{r^2}{r_0^2} \right) \cdot r}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} \cdot \ell \cdot dr \quad \text{για } r < r_0 \quad (\text{σχέση 5.12})$$

Η συνολική πεπλεγμένη ροή του αγωγού στην περιοχή από 0 έως a ισούται:

$$\begin{aligned} \lambda_{S(a)} &= \int_0^a d\lambda = \int_0^{r_0} d\lambda + \int_{r_0}^a d\lambda = \int_0^{r_0} \frac{\mu \cdot I \cdot r^3}{2 \cdot \pi \cdot r_0^2} \cdot \ell \cdot dr + \int_{r_0}^a \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r} \cdot \ell \cdot dr = \\ &= \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r_0^4} \cdot \ell \cdot \frac{r^4}{4} \Big|_0^{r_0} + \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ell \cdot \ln r \Big|_{r_0}^a = \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r_0^4} \cdot \ell \cdot \frac{r_0^4}{4} + \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ell \cdot \ln \frac{a}{r_0} \Rightarrow \\ \lambda_{S(a)} &= \frac{\mu \cdot I}{8 \cdot \pi} \cdot \ell + \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ell \cdot \ln \frac{a}{r_0} \quad (\text{σχέση 5.13}) \end{aligned}$$

Η αυτεπαγωγή του ευθύγραμμου αγωγού ορίζεται ως, ο λόγος της πεπλεγμένης ροής προς την ένταση του ρεύματος και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

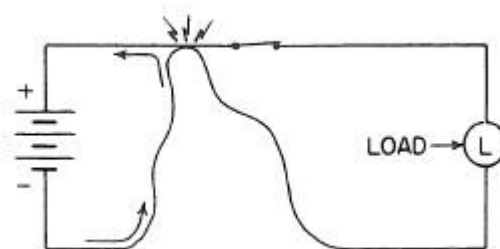
$$L_{S(a)} = \frac{\lambda_{S(a)}}{I} = \frac{\frac{\mu \cdot I}{8 \cdot \pi} \cdot \ell + \frac{\mu \cdot I}{2 \cdot \pi} \cdot \ell \cdot \ln \frac{a}{r_0}}{I} = \frac{\mu \cdot \ell}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu \cdot \ell}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{a}{r_0} \quad (\text{σχέση 5.14})$$

Πολλές φορές είναι προτιμότερο η αυτεπαγωγή να ορίζεται ανά μονάδα μήκους του αγωγού, οπότε η σχέση 5.14 μπορεί να γραφτεί [31 §13.2.3]:

$$L_{S(a)} \text{ ανα } 1 \text{ μέτρο} = \frac{L_{S(a)}}{\ell} = \frac{\mu}{8 \cdot \pi} + \frac{\mu}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{a}{r_0} \quad (\text{σχέση 5.15})$$

5.5 Στοιχεία προστασίας ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Ένας μεγάλος εχθρός των ηλεκτρικών κυκλωμάτων είναι η ανάπτυξη ρευμάτων πολύ μεγάλης έντασης, η οποία είναι πέρα από τις ονομαστικές ικανότητες του εκάστοτε κυκλώματος. Με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα κύκλωμα, παρουσιάζεται αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς, σύμφωνα με τον νόμο του Joule. Με την αύξηση της θερμοκρασίας στους αγωγούς υπάρχει κίνδυνος καταστροφής της εξωτερικής μόνωσης και πρόκληση πυρκαγιάς, καθώς και τήξη του μετάλλου του αγωγού και διακοπή του κυκλώματος. Η ανάπτυξη τέτοιων μεγάλων ρευμάτων γίνεται τις περισσότερες φορές ακούσια από κάποιο σφάλμα στο κύκλωμα ή από κάποια υπερφόρτιση. Όταν ένα κύκλωμα για κάποιο λόγο παρουσιάσει πολύ μικρή αντίσταση, τότε μέσω του νόμου του Ohm, το ρεύμα που το διαρρέει αυξάνεται απότομα. Σε αυτήν την περίπτωση, το κύκλωμα παρουσιάζει βραχυκύκλωμα, το οποίο αποτελεί σοβαρό πρόβλημα. Ένα τυπικό βραχυκύκλωμα φαίνεται στην εικόνα 5.13. Όταν όμως σε ένα κύκλωμα το φορτίο, το οποίο είναι συνδεδεμένο αυξηθεί, τότε η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνεται αντίστοιχα. Κάθε αγωγός όμως ενός κυκλώματος είναι κατασκευασμένος ώστε να διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα μιας ορισμένης μέγιστης τιμής. Όταν το ρεύμα του φορτίου ξεπεράσει αυτήν την ορισμένη τιμή, τότε ο αγωγός υπερφορτίζεται.



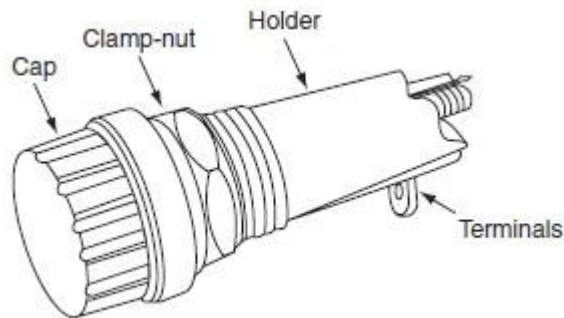
Εικόνα 5.13: Τυπική απεικόνιση βραχυκυκλώματος [22].

Για την προστασία του κυκλώματος από τους παραπάνω κινδύνους χρησιμοποιούνται διάφορα εξαρτήματα, τα οποία είναι υπεύθυνα να διακόπτουν εσκεμμένα το κύκλωμα, ώστε να μην αναπτύσσονται ρεύματα μεγάλης έντασης.

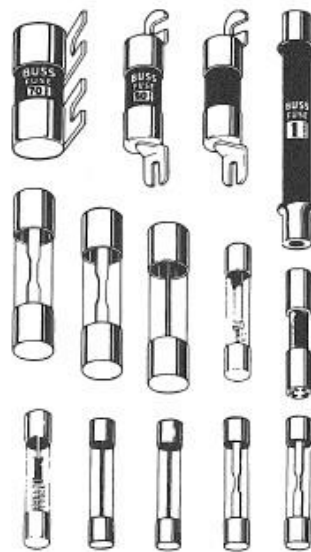
- Ασφάλειες τήξεως (fuses)

Οι ασφάλειες τήξεως είναι εξαρτήματα, τα οποία έχουν σχεδιαστεί, ώστε να προστατεύουν το κύκλωμα από τη διέλευση ρεύματος μεγάλης έντασης, που προέρχεται από βραχυκύκλωμα ή υπερφόρτιση. Κατασκευαστικά διαθέτουν ένα σύρμα, το οποίο έχει σχεδιαστεί, ώστε να παρουσιάζει χαμηλό σημείο τήξης και είναι τοποθετημένο εντός γυάλινου ή κεραμικού περιβλήματος. Το υλικό κατασκευής του σύρματος αυτού είναι συνήθως κασσίτερος, μόλυβδος, βισμούθιο και ασήμι. Το

σύρμα αυτό εδράζεται σε δυο αγώγιμα καπάκια, όπου πραγματοποιείται η διασύνδεση με το υπόλοιπο κύκλωμα. Η ασφάλεια τήξεως συνδέεται σε σειρά με το κύκλωμα και σε περίπτωση υπερφόρτισης ή βραχυκυκλώματος, το σύρμα τήκεται και διακόπτει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος. Το γυάλινο ή κεραμικό περίβλημα προστατεύει από την ανάπτυξη ηλεκτρικού τόξου κατά τη διάρκεια της τήξης του σύρματος. Μια τυπική διάταξη ασφάλειας τήξεως φαίνεται στην εικόνα 5.15. Οι ασφάλειες αυτές τοποθετούνται σε ειδικές θήκες και σε περίπτωση τήξης τους δεν ξαναχρησιμοποιούνται.



Εικόνα 5.14: Θήκη τοποθέτησης ασφάλειας τήξεως [14].

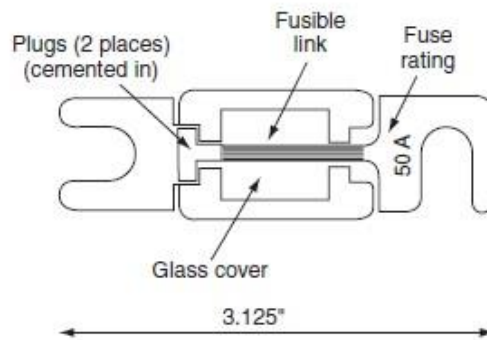


Εικόνα 5.15: Διαφορά είδη ασφαλειών τήξεως [22].

- Περιοριστές ρεύματος (current limiters)

Οι περιοριστές ρεύματος είναι ένα είδος ασφαλειών τήξης, οι οποίοι παρουσιάζουν μεγάλο σημείο τήξης. Συνεπώς παρουσιάζουν μια σχετική καθυστέρηση στη διακοπή του κυκλώματος, σε σχέση με τις απλές ασφάλειες τήξης. Χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, όπου παρουσιάζεται μεγαλύτερο ρεύμα λειτουργίας, όπως είναι οι μπάρες διανομής. Κατασκευαστικά για την επίτευξη της καθυστέρησης

στην τήξη του νήματος, το υλικό που χρησιμοποιείται είναι ο χαλκός. Στην εικόνα 5.16 φαίνεται ένας τυπικός περιοριστής ρεύματος.



Εικόνα 5.16: Σχηματική απεικόνιση περιοριστή ρεύματος [14].

- Αντίσταση περιορισμού (Limiting resistors)

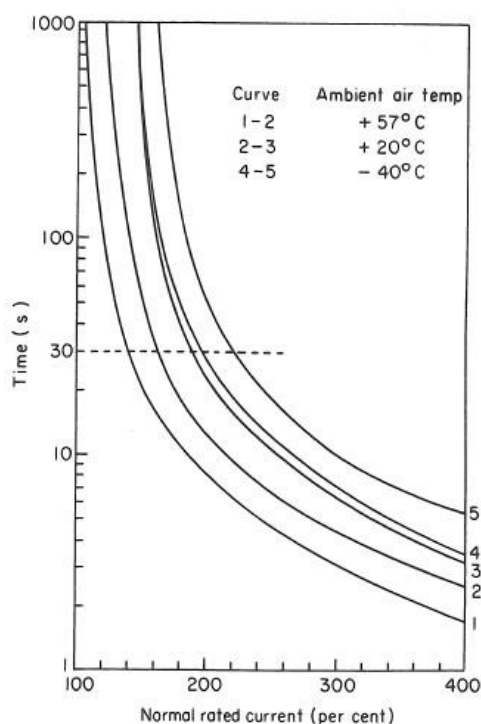
Είναι ωμικές αντιστάσεις ειδικής κατασκευής, οι οποίες συνδέονται σε σειρά με ένα φορτίο, ώστε να περιορίζουν το ρεύμα του κυκλώματος. Τέτοιο είδος αντιστάσεων χρησιμοποιούνται σε κινητήρες, όπου κατά την εκκίνηση είναι επιθυμητό η ένταση του ρεύματος να παραμείνει σε χαμηλή τιμή. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται με ένα κύκλωμα αυτοματισμού, ώστε, όταν ο κινητήρας φτάσει μια επιθυμητή ταχύτητα, η αντίσταση περιορισμού αποσυνδέεται από το κύκλωμα.



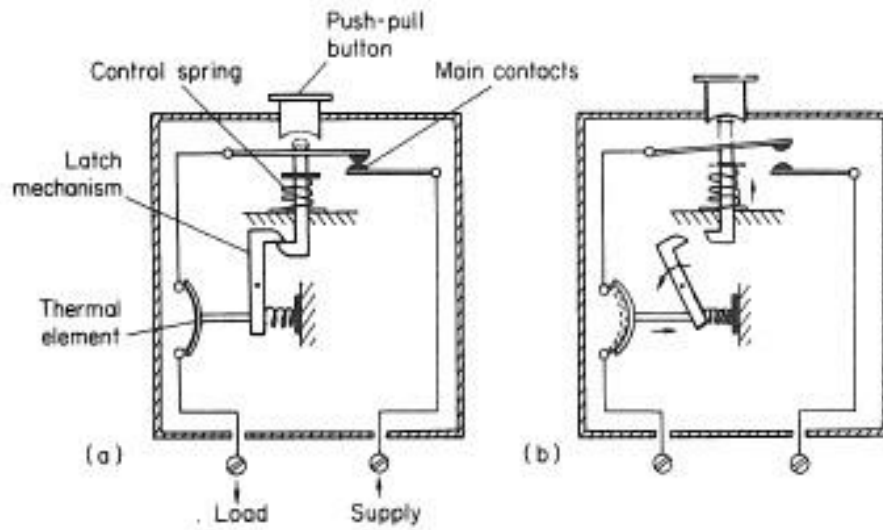
Εικόνα 5.17: Αντίσταση περιορισμού ρεύματος.

- Αυτόματη ασφάλεια (Circuit breaker)

Η αυτόματη ασφάλεια χρησιμοποιείται με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι ασφάλειες τήξης (fuses) και οι περιοριστές ρεύματος (current limiters). Η διαφορά που παρουσιάζει μια αυτόματη ασφάλεια, σε σχέση με τα άλλα δύο είδη, είναι η δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης μετά από ένα βραχυκύκλωμα ή υπερένταση. Η αρχή λειτουργίας της αυτόματης ασφάλειας βασίζεται σε δύο ελάσματα, τα οποία παρουσιάζουν διαφορετικό συντελεστή διαστολής. Τα δύο αυτά ελάσματα είναι σε επαφή μεταξύ τους, αποτελώντας ένα διμεταλλικό έλασμα. Όταν το διμεταλλικό αυτό έλασμα διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα θερμαίνεται, σύμφωνα με τον νόμο του Joule. Η θερμότητα αυτή κάνει το ένα μέταλλο να διαστέλλεται με διαφορετικό ρυθμό σε σχέση με το άλλο. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διμεταλλικό έλασμα να κάμπτεται. Όταν η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή για κάθε ασφάλεια, τότε το έλασμα κάμπτεται αρκετά, ώστε να ενεργοποιήσει μια επαφή που διακόπτει το κύκλωμα. Μετά τη διακοπή του κυκλώματος, η αυτόματη ασφάλεια μπορεί να ξανά ενεργοποιηθεί χειροκίνητα, εφόσον το πρόβλημα το οποίο την ενεργοποίησε, έχει αποκατασταθεί. Ο χρόνος ενεργοποίησης της αυτόματης ασφάλειας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, καθώς και από την ένταση του ρεύματος που διέρχεται μέσα από αυτήν. Στην εικόνα 5.18 φαίνεται η χαρακτηριστική της ταχύτητας ενεργοποίησης σε σχέση με την ένταση του ρεύματος.



Εικόνα 5.18: Χαρακτηριστικές χρόνου ενεργοποίησης της αυτόματης ασφάλειας σε σχέση με την ένταση του ρεύματος [26].



Εικόνα 5.19: Σχηματικό διάγραμμα αυτόματης ασφάλειας α) κλειστό κύκλωμα, β) ενεργοποιημένη από διέλευση μεγάλης έντασης ρεύματος [26].

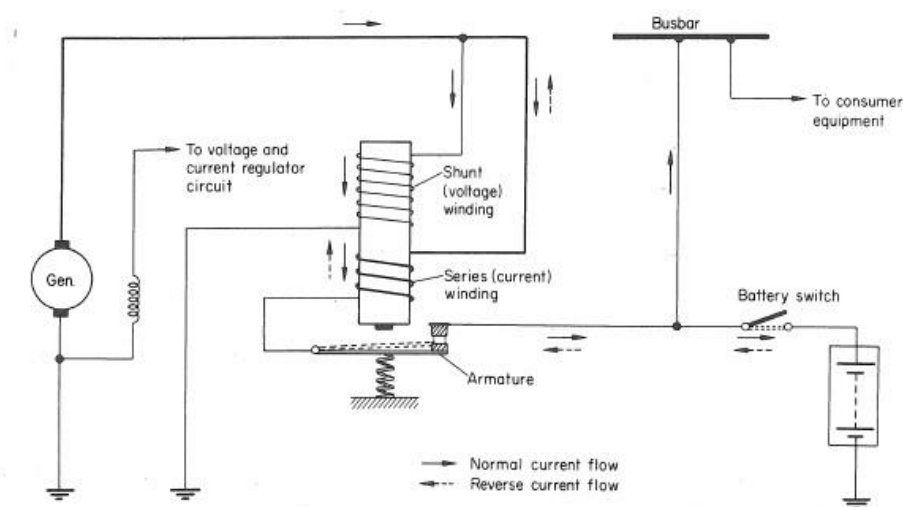


Εικόνα 5.20: Διάφορα είδη αυτόματης ασφάλειας.

Εκτός από ένα βραχυκύκλωμα ή μια υπερφόρτιση, ένα κύκλωμα μπορεί να αντιμετωπίσει και άλλων ειδών προβλήματα, που μπορούν να προκαλέσουν σοβαρές βλάβες. Τέτοιου είδους προβλήματα είναι η υπέρταση, η υπόταση, καθώς και η ανάστροφη ροή ρεύματος σε ένα κύκλωμα. Επιπλέον, όταν πρόκειται για κύκλωμα εναλλασσόμενου ρεύματος, η διαφορά που μπορεί να παρουσιαστεί στη συχνότητα αποτελεί εξίσου σημαντικό πρόβλημα. Για την αντιμετώπιση τέτοιων προβλημάτων, οι κατασκευαστές αεροσκαφών χρησιμοποιούν διάφορες προστατευτικές διατάξεις.

- Προστασία έναντι ανάστροφου ρεύματος

Σε ένα σύστημα η ροή ηλεκτρικού ρεύματος γίνεται από την πηγή προς την κατανάλωση. Σε περίπτωση βλάβης όμως αυτή η ροή μπορεί να αντιστραφεί προξενώντας πολλά προβλήματα στη λειτουργία ενός αεροπλάνου. Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο η ύπαρξη διατάξεων προστασίας που δεν θα επιτρέψουν την ανάστροφη αυτή ροή. Μια τέτοια διάταξη είναι το ρελέ αποκοπής ανάστροφου ρεύματος (reverse current cut – out relay), το οποίο αποτελεί εξάρτημα του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του αεροπλάνου. Μπορεί να αποτελεί είτε ξεχωριστό εξάρτημα του αεροπλάνου, είτε μέρος του ρυθμιστή τάσης μιας γεννήτριας. Το συγκεκριμένο ρελέ αποτελείται από δύο πηνία, τα οποία είναι τυλιγμένα σε κοινό σιδηρομαγνητικό υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.21. Κατά τη διάρκεια που η γεννήτρια βρίσκεται σε λειτουργία και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, το τύλιγμα της τάσης (shunt – voltage winding) παράγει μαγνητικό πεδίο και κλείνει την επαφή. Με τον τρόπο αυτό, το παραγόμενο ρεύμα της γεννήτριας φορτίζει την μπαταριά του αεροπλάνου. Όταν όμως η γεννήτρια λόγω αστοχίας σταματήσει να λειτουργεί, τότε το μαγνητικό πεδίο του τυλίγματος τάσης, σταματάει και η επαφή του κυκλώματος ανοίγει. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται η ροή ηλεκτρικού ρεύματος από την μπαταριά στη γεννήτρια του αεροπλάνου.

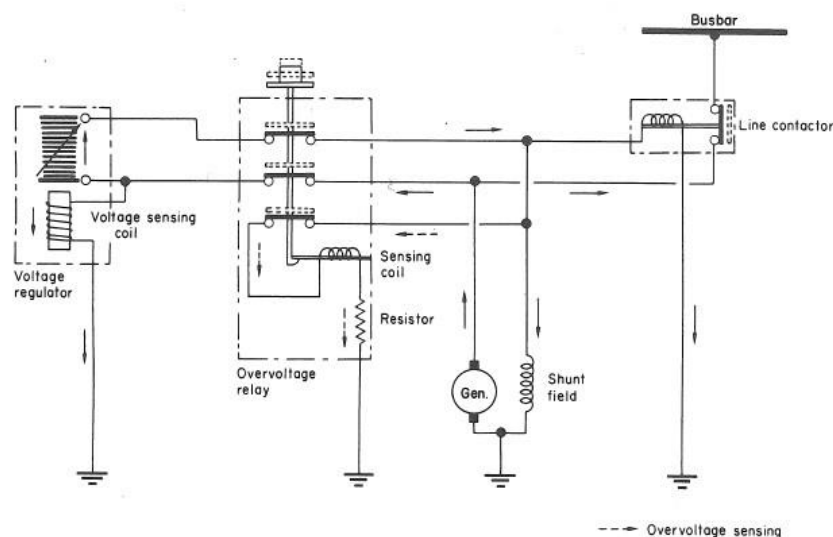


Εικόνα 5.21: Σχηματικό διάγραμμα reverse current cut – out relay [26].

- Ρελέ προστασίας από υπέρταση (overvoltage relay)

Μια τέτοια διάταξη αποτελείται από ένα πηνίο, το οποίο συνδέεται σε σειρά με μια ωμική αντίσταση. Τα άκρα τους συνδέονται στο σημείο που είναι επιθυμητό να ανιχνευθεί μια υπέρταση. Συνήθως τέτοιο σημείο αποτελεί η έξοδος μιας γεννήτριας, προτού συνδεθεί στο υπόλοιπο αεροπλάνο. Με την ανάπτυξη υπέρτασης η τάση στα άκρα του πηνίου και της αντίστασης αυξάνεται. Ταυτόχρονα με την αύξηση της τάσης αυξάνεται και το ρεύμα που ρέει στο κύκλωμα. Με την αύξηση του ρεύματος το

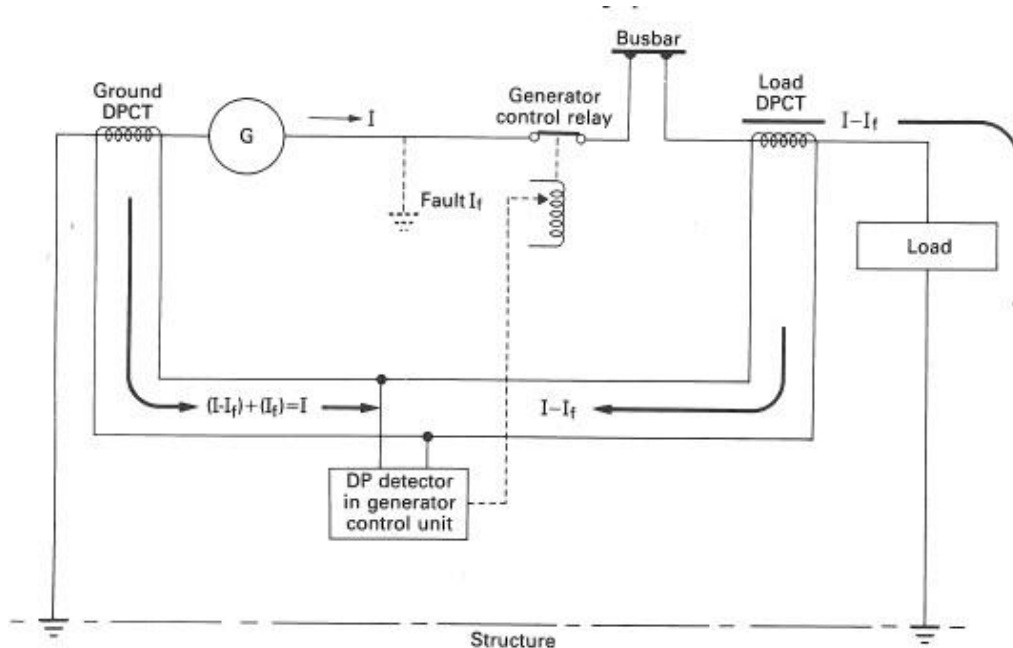
μαγνητικό πεδίο του πηνίου γίνεται ισχυρότερο και είναι ικανό να ενεργοποιήσει τις μηχανικές επαφές και να αποσυνδέσει το κύκλωμα. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στην εικόνα 5.22. Μετά από μια υπέρταση και την ενεργοποίηση της προστασίας είναι απαραίτητο το σύστημα να επανεκκινηθεί μηχανικά με τη χρήση μπουτόν επαναφοράς.



Εικόνα 5.22: Σχηματικό διάγραμμα overvoltage relay σε σύστημα συνεχούς ρεύματος [26].

- Προστασία διαφορικού ρεύματος (Differential current protection)

Ο σκοπός της συγκεκριμένης προστασίας είναι να ανιχνεύει διαρροή ηλεκτρικού ρεύματος στη γραμμή που συνδέει τη γεννήτρια με τη μπάρα διανομής σε ένα αεροπλάνο. Ουσιαστικά ανιχνεύει τη διαφορά του ρεύματος που αναχωρεί από τη γεννήτρια με το ρεύμα που φτάνει στην μπάρα διανομής. Κάθε τέτοια διαφορά ρεύματος ονομάζεται διαφορικό σφάλμα. Σε ένα εναλλασσόμενο σύστημα η σύγκριση γίνεται ξεχωριστά για κάθε φάση με τη χρήση δύο τριφασικών μετασχηματιστών. Ο πρώτος συνδέεται στη μεριά της επιστροφής της γεννήτριας (DPCT ground) και ο δεύτερος στη μεριά του φορτίου (DPCT load). Στην εικόνα 5.23 φαίνεται το ισοδύναμο μονοφασικό κύκλωμα μιας διάταξης προστασίας διαφορικού ρεύματος. Το ρεύμα που αναχωρεί από τη γεννήτρια είναι ίσο με I . Όταν υπάρχει μια διαρροή στη γραμμή, το ρεύμα που διαφεύγει προς τα μεταλλικά μέρη του αεροπλάνου είναι ίσο με I_f . Συνεπώς το ρεύμα που φτάνει στο φορτίο και ανιχνεύει ο μετασχηματιστής DPCT load είναι ίσο με $I - I_f$. Το ρεύμα, το οποίο επιστρέφει στη γεννήτρια και ανιχνεύει ο μετασχηματιστής DPCT ground, είναι ίσο με το ρεύμα του φορτίου $I - I_f$ και το ρεύμα που διαφεύγει προς τα μεταλλικά μέρη I_f . Όταν η διαφορά των ρευμάτων μεταξύ των δύο μετασχηματιστών είναι μεγαλύτερη από 20 – 30 A, τότε το σύστημα προστασίας ενεργοποιείται και ο διακόπτης που συνδέει τη γεννήτρια με την μπάρα διανομής διακόπτει το κύκλωμα [26 §7].



Εικόνα 5.23: Σχηματικό μονοφασικό διάγραμμα προστασίας διαφορικού ρεύματος [26].

5.6 Συνδέσεις αγωγών

Σε ένα αεροπλάνο οι αγωγοί είναι υπεύθυνοι να παρέχουν ηλεκτρική διασύνδεση μεταξύ των συστημάτων. Ο αριθμός των διασυνδέσεων εξαρτάται από το μέγεθος και το είδος του αεροπλάνου. Όμως παρόλες τις διαφορές που μπορεί να παρουσιάζουν τα αεροπλάνα μεταξύ τους, οι διασυνδέσεις των αγωγών ακολουθούν σχεδόν το ίδιο μοτίβο. Γενικά υπάρχουν δύο τύποι διασύνδεσης των αγωγών, στους οποίους ο διαχωρισμός γίνεται με βάση τη συχνότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης. Για παράδειγμα οι αγωγοί που συνδέονται σε τερματικά σημεία σύνδεσης, καθώς και σημεία γειώσεων δεν παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα σύνδεσης και αποσύνδεσης. Σε αντίθετη περίπτωση οι αγωγοί που καταλήγουν σε συσκευές και ενδεικτικά όργανα παρουσιάζουν μεγάλη συχνότητα για σύνδεση και αποσύνδεση σε περίπτωση βλάβης και περιοδικές επιθεωρήσεις.

- Πρεσαριστοί ακροδέκτες

Στους πρεσαριστούς ακροδέκτες η ηλεκτρική διασύνδεση εξασφαλίζεται με την πίεση δύο μετάλλων, τα οποία έρχονται σε επαφή δημιουργώντας έτσι μια αγωγή μάζα. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πρεσαριστών ακροδεκτών. Ένας τυπικός πρεσαριστός ακροδέκτης φαίνεται στην εικόνα 5.24. Ο ακροδέκτης αυτός αποτελείται από ένα κυλινδρικό σημείο (barrel) στο οποίο τοποθετείται το αγωγή μέρος του αγωγού. Στο σημείο αυτό ασκείται πίεση με ειδικό εργαλείο, το οποίο μπορεί να είναι είτε μηχανικό, είτε υδραυλικό. Με την άσκηση της πίεσης, το μεταλλικό κυλινδρικό σημείο του ακροδέκτη εγκλωβίζει το μεταλλικό μέρος του αγωγού, εξασφαλίζοντας έτσι μια αγωγή σύνδεση. Το κυλινδρικό σημείο του ακροδέκτη αρκετές φορές συνοδεύεται με εξωτερική μόνωση. Η

προέκταση του κυλινδρικού σημείου ονομάζεται γλώσσα του ακροδέκτη (tongue) και αποτελεί το τερματικό σημείο στο οποίο τοποθετείται κοχλίας για την ένωσή του στο τερματικό σημείο. Το μέγεθος του ακροδέκτη εξαρτάται από το μέγεθος του αγωγού στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι ένα μέγεθος ακροδέκτη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δύο με τρία διαφορετικά μεγέθη καλωδίων, δηλαδή ένας ακροδέκτης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για καλώδια μεγέθους από 18AWG έως 22AWG. Επιπλέον υπάρχουν πολλά είδη γλώσσας ακροδέκτη ανάλογα με το σημείο στο οποίο πρόκειται να συνδεθεί [26 §5, 22 §4].



Εικόνα 5.24: Πρεσαριστοί ακροδέκτες [26].

- Ακροδέκτες με κόλληση

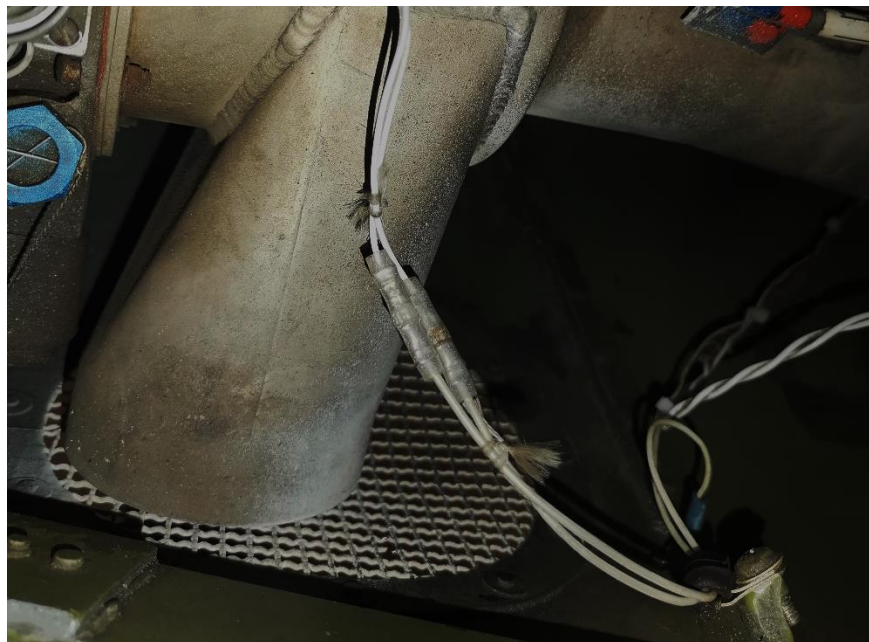
Οι ακροδέκτες με κόλληση δεν χρησιμοποιούνται ευρέως στις ηλεκτρικές διασυνδέσεις στο αεροπλάνο. Οι αγωγοί σε ένα αεροπλάνο παρουσιάζουν μεγάλη ευκαμπτότητα, ώστε να μην υπάρξει μηχανική καταπόνηση από τις δονήσεις που δέχονται κατά τη διάρκεια της πτήσης. Η κόλληση όμως σε έναν αγωγό δεν παρουσιάζει ελαστικότητα, με αποτέλεσμα τη μηχανική καταπόνηση στο σημείο της σύνδεσης που οδηγεί στην κοπή του αγωγού. Παρόλα αυτά η χρήση τέτοιου είδους ακροδεκτών βρίσκουν εφαρμογή στα ηλεκτρονικά κυκλώματα, στα οποία είναι αναγκαίο να εξασφαλίζεται η χαμηλή ωμική αντίσταση στο σημείο της σύνδεσης [22 §4].

- Σύνδεσμοι αγωγών (splice tube)

Οι σύνδεσμοι αγωγών χρησιμοποιούνται όταν ο αγωγός ενός κυκλώματος κοπεί μετά από μηχανική καταπόνηση. Είναι μεταλλικοί κύλινδροι όπου στο εξωτερικό του διαθέτουν μονωτική επίστρωση, ώστε να εξασφαλίζεται η ηλεκτρική μόνωση της σύνδεσης. Από τις δύο μεριές του κυλίνδρου τοποθετούνται τα μεταλλικά μέρη του αγωγού και στη συνέχεια οι οπές του κυλίνδρου πρεσάρονται εξασφαλίζοντας έτσι την ηλεκτρική διασύνδεση του κυκλώματος. Στην εικόνα 5.25 φαίνονται διάφορα είδη συνδέσμων, ενώ στην εικόνα 5.26 φαίνεται η διασύνδεση των αγωγών.



Εικόνα 5.25: Διάφορα είδη splice tube.



Εικόνα 5.26: Σύνδεση αγωγών με splice tube.

- Τερματικά σημεία διασύνδεσης (electric terminal strips)

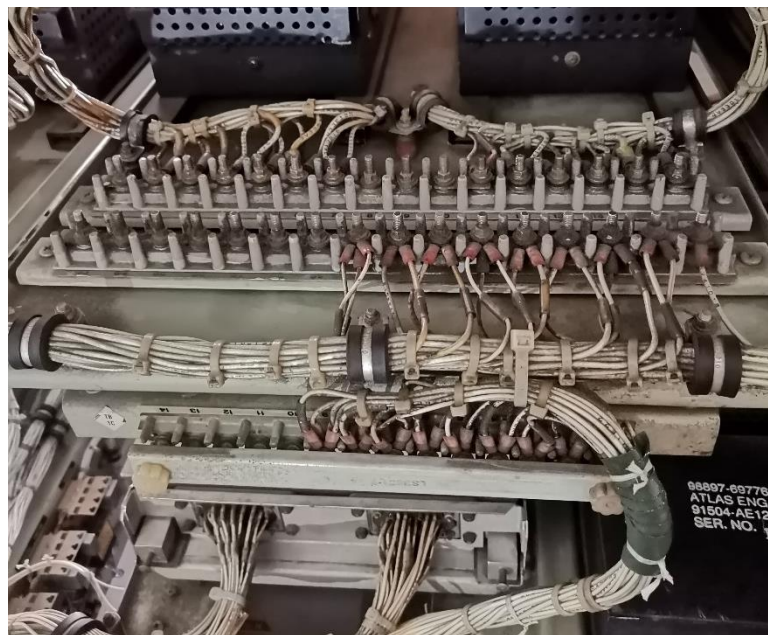
Τα τερματικά σημεία διασύνδεσης κατασκευάζονται από μονωτικό συνθετικό υλικό ή από κεραμικό υλικό. Διαθέτουν μεταλλικά σημεία, τα οποία αποτελούν τις θέσεις, που τοποθετούνται οι ακροδέκτες των καλωδίων. Τα μεταλλικά αυτά σημεία, διαθέτουν σπείρωμα, ώστε ο ακροδέκτης που τοποθετείται να συσφίγγεται για να υπάρχει καλή ηλεκτρική σύνδεση. Οι θέσεις αυτές είναι μονωμένες μεταξύ τους, παρόλα αυτά δίνεται η δυνατότητα της διασύνδεσης τους με χρήση μεταλλικής μπάρας (γέφυρας). Στις θέσεις αυτές τοποθετούνται οι ακροδέκτες των αγωγών και με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται η ηλεκτρική διασύνδεση διαφόρων κυκλωμάτων. Στην εικόνα 5.27

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

φαίνονται διάφορα είδη τερματικών σημείων σύνδεσης, ενώ στην εικόνα 5.28 φαίνεται μια πραγματική διασύνδεση αγωγών σε τερματικό σημείο σύνδεσης.



Εικόνα 5.27: Διάφορα είδη terminal strips.

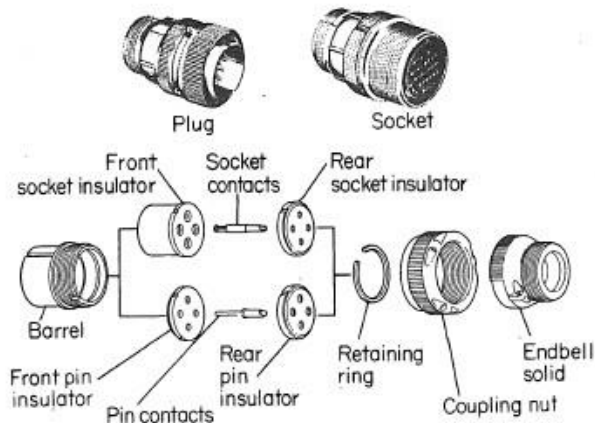


Εικόνα 5.28: Διασύνδεση αγωγών σε terminal strip.

- Ηλεκτρικές Φίτσες (connectors)

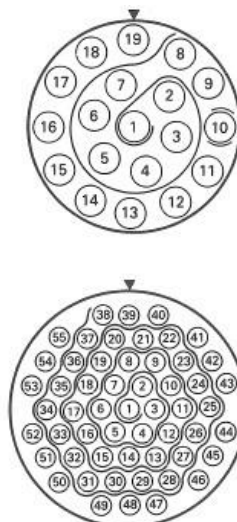
Οι φίτσες είναι ο πλέον πιο διαδεδομένος τρόπος σύνδεσης των ηλεκτρικών εξαρτημάτων, ο οποίος αποτελεί τον ασφαλέστερο και γρηγορότερο τρόπο αποσύνδεσης και επανασύνδεσης συσκευών, που

χρησιμοποιούνται σε ένα αεροπλάνο. Ένας τρόπος διαχωρισμού των φισσών γίνεται με βάση του είδους των υποδοχών που διαθέτουν. Η πρώτη κατηγορία είναι η φίσσα με θηλυκούς ακροδέκτες (socket contact). Η δεύτερη κατηγορία είναι η φίσσα με αρσενικούς ακροδέκτες (pin contact). Κατασκευαστικά οι φίσσες είναι μεταλλικές και στο εσωτερικό τους διαθέτουν μονωτικό υλικό, ώστε οι επαφές να είναι ηλεκτρικά μονωμένες. Η δομή μιας φίσσας φαίνεται στην εικόνα 5.29.



Εικόνα 5.29: Κατασκευαστικά μέρη αεροπορικής φίσσας [26].

Υπάρχουν πολλά και διαφορά μεγέθη φίσσας. Το μέγεθος μιας φίσσας εξαρτάται από τον αριθμό των επαφών που διαθέτει, καθώς και από το μέγεθος τους, το οποίο καθορίζεται από την ένταση του ρεύματος που τους διαρρέει. Οι επαφές μιας φίσσας είναι αριθμημένες, ώστε να είναι εύκολος ο διαχωρισμός τους, καθώς και ο εντοπισμός ενός αγωγού που συνδέεται σε αυτή. Η αρίθμηση χρησιμοποιεί λατινικά γράμματα ή αριθμούς και είναι τυποποιημένη με βάση διεθνείς πρότυπα. Στην εικόνα 5.30 φαίνεται η αρίθμηση σε φίσσες διαφορετικού μεγέθους χρησιμοποιώντας αριθμούς.



Εικόνα 5.30: Αρίθμηση επαφών σε φίσσες διαφορετικού μεγέθους [26].

Για τη σύνδεση των αγωγών στις επαφές μιας φίσσας υπάρχουν δύο τρόποι, οι οποίοι καθορίζονται από τον κατασκευαστή. Ο πρώτος τρόπος είναι με τη χρήση κόλλησης, ενώ ο δεύτερος με τη μέθοδο πρεσαρίσματος. Στην εικόνα 5.31 φαίνονται διάφορα είδη φισσών που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα [22 §4, 26 §5].



Εικόνα 5.31: Διάφορα είδη ηλεκτρικών φισσών.

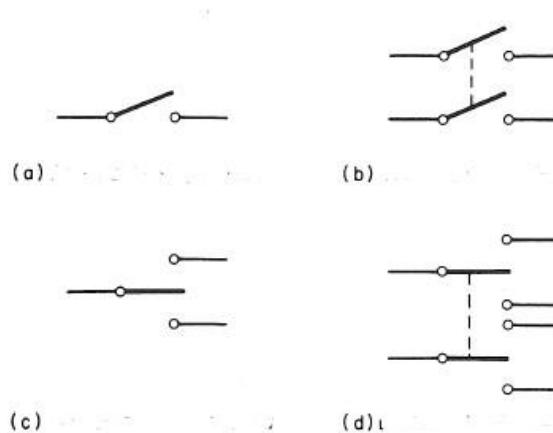
5.7 Στοιχεία ελέγχου ηλεκτρικών κυκλωμάτων

Σε ένα αεροπλάνο είναι απαραίτητο ο χειριστής να έχει τον πλήρη έλεγχο των συστημάτων. Για τον λόγο αυτόν υπάρχουν διάφορα εξαρτήματα, με τα οποία το επιτυγχάνει. Πολλές διεργασίες είναι αυτοματοποιημένες εκτελούνται μετά από κάποιες άλλες και αρκετές ενεργοποιούνται ταυτόχρονα. Ο έλεγχος των κυκλωμάτων πραγματοποιείται με διακόπτες, οι οποίοι παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες ανάλογα με το είδος τους.

- Διακόπτης (switch)

Ένας διακόπτης στην απλούστερη μορφή του διαθέτει δύο επαφές και μια κινητή αγώγιμη επιφάνεια. Ανάλογα με τη θέση της αγώγιμης επιφάνειας οι επαφές είναι συνδεδεμένες ή αποσυνδεδεμένες. Η αγώγιμη επιφάνεια ονομάζεται πόλος. Ο αριθμός των πόλων ενός διακόπτη δείχνει πόσα κυκλώματα μπορεί να συνδέσει και να αποσυνδέσει με τον χειρισμό του. Για τον λόγο αυτόν ένας διακόπτης χαρακτηρίζεται ως μονοπολικός όταν διαθέτει ένα πόλο, διπολικός όταν διαθέτει δύο πόλους, τριπολικός όταν διαθέτει τρεις πόλους και ούτω κάθε εξής. Αρκετές φορές είναι απαραίτητος ο συνδυασμός περισσότερων κυκλωμάτων. Τη δουλειά αυτή μπορεί να την κάνει ένας διακόπτης, ο

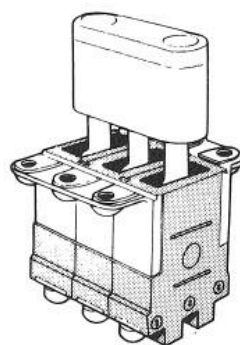
ο οποίος ονομάζεται μεταγωγικός, ο οποίος είναι υπεύθυνος να πραγματοποιεί τέτοιου είδους εναλλαγές στα κυκλώματα.



Εικόνα 5.32: Σχηματικό διάγραμμα α) μονοπολικού διακόπτη, β) διπολικού διακόπτη, γ) μεταγωγικού διακόπτη, δ) διπολικού μεταγωγικού διακόπτη [26].

- Διακόπτες με μηχανική σύνδεση (toggle switch)

Σε αρκετές εφαρμογές είναι απαραίτητο η ενεργοποίηση δύο ή περισσότερων διακοπών να γίνεται ταυτόχρονα. Για να επιτευχθεί αυτό, χρησιμοποιείται μηχανική ένωση μεταξύ των διακοπών, οι οποίοι έχουν τοποθετηθεί από τον κατασκευαστή σε διπλάνες θέσεις. Επίσης υπάρχει περίπτωση, που ένα σύστημα δεν πρέπει να ενεργοποιηθεί από τον χειριστή ταυτόχρονα με κάποιο άλλο. Τη λύση σε αυτό το πρόβλημα δίνει ένα έλασμα, το οποίο με την ενεργοποίηση ενός διακόπτη θέτει ταυτόχρονα τον δεύτερο διακόπτη σε απενεργοποίηση.

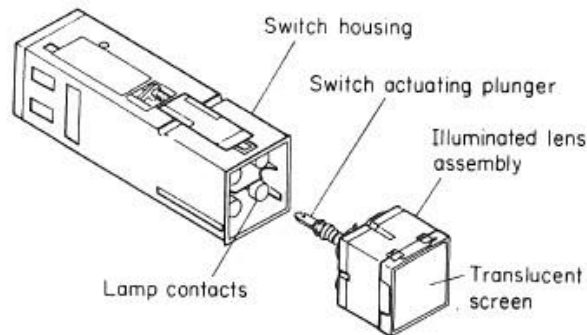


Εικόνα 5.33: Μηχανική σύνδεση διακοπών [26].

- Διακόπτης πίεσης (push switch)

Οι διακόπτες πίεσης χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που είναι επιθυμητή η προσωρινή ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση ενός κυκλώματος. Η κατάσταση στην οποία βρίσκεται ο διακόπτης

αλλάζει κάθε φορά με την πίεση που ασκεί ο χειρίστης στην πρόσοψη του διακόπτη. Αρκετές φορές οι διακόπτες αυτοί φέρουν ενδεικτική λυχνία, ώστε να αναγνωρίζει ο χειρίστης με ευκολία την κατάσταση του διακόπτη (ενεργοποιημένος – απενεργοποιημένος).



Εικόνα 5.34: Σχηματικό διάγραμμα push switch [26].

- Διακόπτης μπουτόν

Ο διακόπτης μπουτόν κατασκευαστικά μοιάζει με έναν διακόπτη πίεσης. Η βασική τους διαφορά είναι ότι ο διακόπτης μπουτόν βρίσκεται σε θέση ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης (ανάλογα με το είδος του μπουτόν) μόνο κατά τη διάρκεια που ο χειρίστης πιέζει το κομβίο. Όταν η πίεση σταματήσει να ασκείται από τον χειρίστη, το μπουτόν επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Τέτοια μπουτόν χρησιμοποιούνται σε συστήματα επικοινωνίας, καθώς και για την ενεργοποίηση συστημάτων ασφαλείας του αεροπλάνου.



Εικόνα 5.35: Διακόπτες μπουτόν σε χειριστήριο.

- Περιστροφικός διακόπτης (rotary switch)

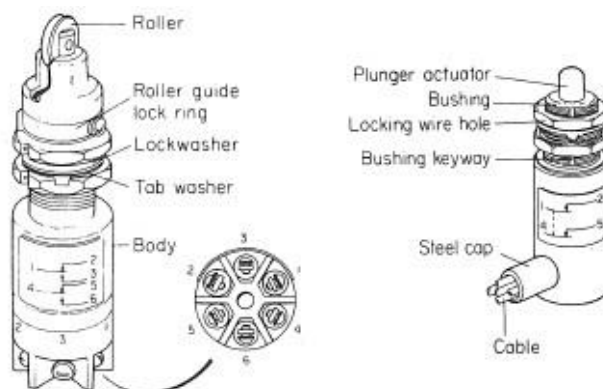
Η χρήση του περιστροφικού διακόπτη σε ένα αεροπλάνο είναι ευρέως διαδεδομένη. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, που είναι απαραίτητος ο συνδυασμός κυκλωμάτων, όπως είναι η μέτρηση ενός βολτομέτρου σε διαφορετικά σημεία ενός κυκλώματος. Όταν ο χειρίστης περιστρέφει τον διακόπτη εσωτερικά, ενεργοποιούνται και απενεργοποιούνται διάφορα κυκλώματα μέσω των επαφών που διαθέτει. Υπάρχουν πολλά είδη περιστροφικού διακόπτη ανάλογα με τον κατασκευαστή.



Εικόνα 5.36: Περιστροφικός διακόπτης.

- Μικροδιακόπτης (micro – switch)

Ο μικροδιακόπτης αποτελεί ένα είδος διακόπτη ειδικής κατασκευής. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην ίδια με ενός μπουτόν. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται ως διακόπτης ορίων ή ως διακόπτης ένδειξης της θέσης μιας κινουμένης επιφάνειας. Χαρακτηριστικό ενός μικροδιακόπτη είναι ότι για την εναλλαγή της κατάστασης του (ενεργοποιημένος – απενεργοποιημένος) απαιτείται πολύ μικρή μετατόπιση του κινούμενου μέρους του, η οποία είναι της τάξης των μερικών χιλιοστών του μέτρου.



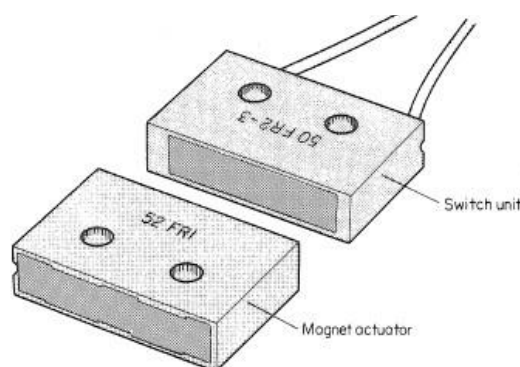
Εικόνα 5.37: Σχηματικό διάγραμμα μικροδιακόπτη [26].

- Ρεοστατικός διακόπτης (rheostats)

Ο ρεοστατικός διακόπτης εμφανισιακά μοιάζει με έναν περιστροφικό διακόπτη. Παρόλα αυτά παρουσιάζει μεγάλη διαφορά στη λειτουργία του. Ο ρεοστατικός διακόπτης είναι ουσιαστικά μια μεταβλητή αντίσταση, όπου με την περιστροφή του η τιμή της αντίστασης αλλάζει. Τέτοιου είδους διακόπτης χρησιμοποιείται σε κυκλώματα που χρειάζεται έλεγχος της έντασης του ρεύματος, όπως είναι κυκλώματα φωτισμού.

- Μαγνητικός διακόπτης (proximity switch)

Ο μαγνητικός διακόπτης αποτελείται από δύο μέρη, από τα οποία το ένα αποτελεί το σταθερό μέρος του διακόπτη και το άλλο το κινητό μέρος του. Το σταθερό μέρος αποτελεί τις επαφές του διακόπτη και συνδέεται ηλεκτρικά με αγωγούς. Το κινητό μέρος αποτελεί τον μαγνήτη, ο οποίος είναι υπεύθυνος να ελέγχει μαγνητικά τις επαφές του σταθερού μέρους. Καθώς το κινητό μέρος πλησιάζει το σταθερό μέρος, το μαγνητικό πεδίο του μαγνήτη έλκει τις επαφές του σταθερού μέρους και ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί τον διακόπτη. Το αντίθετο συμβαίνει όταν ο μαγνήτης απομακρύνεται από το σταθερό μέρος. Οι διακόπτες αυτοί μπορούν να είναι είτε κανονικά κλειστοί (normally close), είτε κανονικά ανοιχτοί (normally open). Τέτοιου είδους διακόπτες χρησιμοποιούνται ως διακόπτες ορίων ή ένδειξη θέσης ενός κινητού μέρους. Σε πολλά σύγχρονα αεροπλάνα αντικαθιστούν τους μικροδιακόπτες.

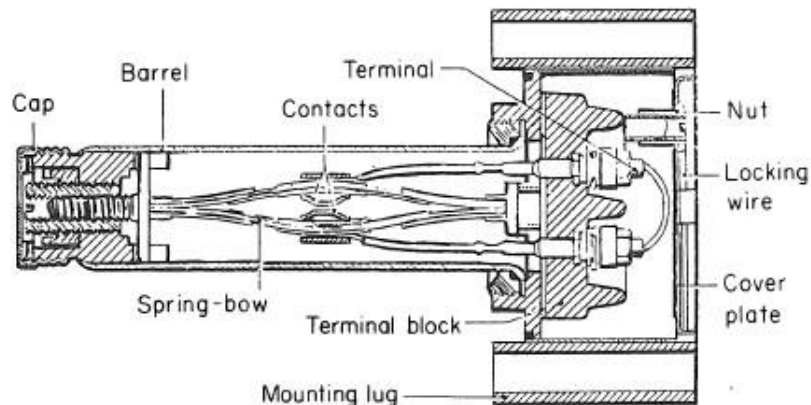


Εικόνα 5.38: Μαγνητικός διακόπτης [26].

- Θερμικός διακόπτης (thermal switch)

Ο θερμικός διακόπτης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές στις οποίες είναι απαραίτητος ο αυτόματος έλεγχος της θερμοκρασίας. Η αρχή λειτουργίας του βασίζεται σε ένα διμεταλλικό έλασμα το οποίο κάμπτεται με τη μεταβολή της θερμοκρασίας. Όταν η θερμοκρασία ξεπεράσει μια τιμή αναφοράς, ξεχωριστή για κάθε διακόπτη, τότε το διμεταλλικό έλασμα επενεργεί ενεργοποιώντας τις επαφές του διακόπτη. Τις περισσότερες φορές ο θερμικός διακόπτης χρησιμοποιείται, ώστε να προειδοποιεί τον

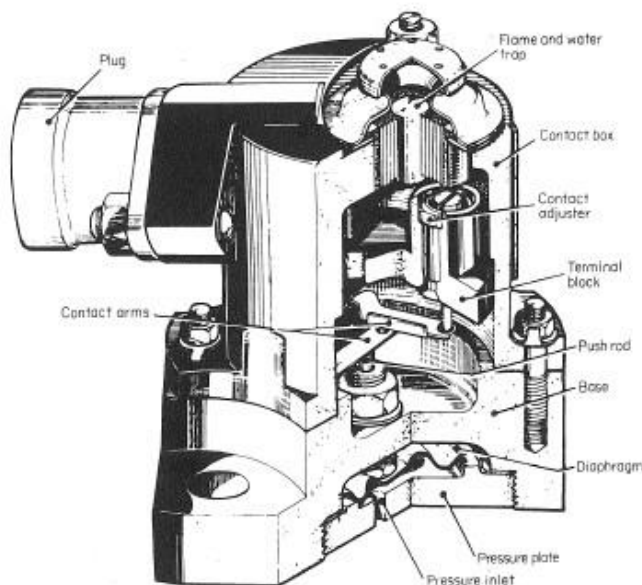
χειριστή για ανάπτυξη αντικανονικής θερμοκρασίας σε διαφορά σημεία και συστήματα του αεροπλάνου.



Εικόνα 5.39: Δομή θερμικού διακόπτη [26].

- Πρεσοδιακόπτης (pressure switch)

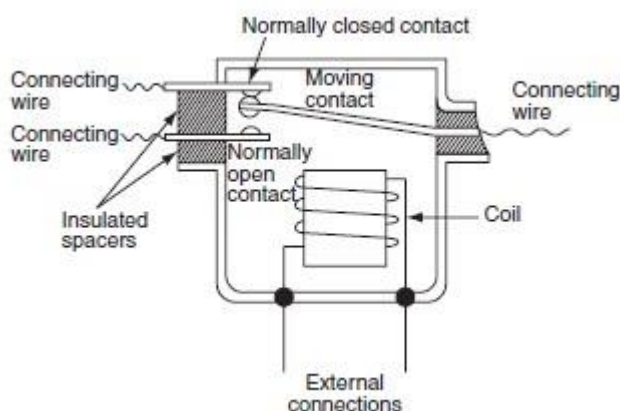
Ο πρεσοδιακόπτης χρησιμοποιείται σε εφαρμογές για τον έλεγχο της πίεσης κάποιου ρευστού. Κατασκευαστικά διαθέτει μια οπή στην οποία εισέρχεται το ρευστό. Στο εσωτερικό της οπής διαθέτει ένα διάφραγμα, το οποίο ανάλογα με την πίεση του ρευστού επενεργεί στις επαφές ενός διακόπτη. Ο πρεσοδιακόπτης χρησιμοποιείται για να ενημερώνει τον χειριστή ότι η τιμή της πίεσης ενός ρευστού δεν έχει ξεπεράσει τα όρια ασφαλούς λειτουργίας του συγκεκριμένου συστήματος του αεροπλάνου.



Εικόνα 5.40: Δομή πρεσοδιακόπτη [26].

- Ρελέ (relay)

Το ρελέ είναι ένα ηλεκτρικό εξάρτημα, το οποίο αξιοποιώντας τη δύναμη του μαγνητικού πεδίου, μπορεί να ελέγξει ένα ηλεκτρικό κύκλωμα. Στην απλούστερη μορφή του διαθέτει δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος μηχανισμός είναι αυτός των επαφών του, των οποίων το μέγεθος εξαρτάται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που μπορούν να διαχειριστούν. Ο δεύτερος μηχανισμός είναι το τύλιγμα του πηνίου το οποίο ελέγχει την κατάσταση των επαφών (ενεργοποιημένες – απενεργοποιημένες) του ρελέ. Ουσιαστικά με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο τύλιγμα του πηνίου δημιουργείται μαγνητικό πεδίο, το οποίο έλκει τον μηχανισμό των επαφών και αντίστοιχα κλείνει ή ανοίγει το κύκλωμα. Ο ρόλος του ρελέ είναι πολύ σημαντικός, διότι με ένα κύκλωμα το οποίο διαρρέεται με μικρή ένταση ρεύματος (κύκλωμα πηνίου) μπορεί να επιτευχθεί έλεγχος ενός κυκλώματος μεγάλης έντασης ή ακόμα και τάσης (κύκλωμα επαφών) [22 §6, 26 §6]



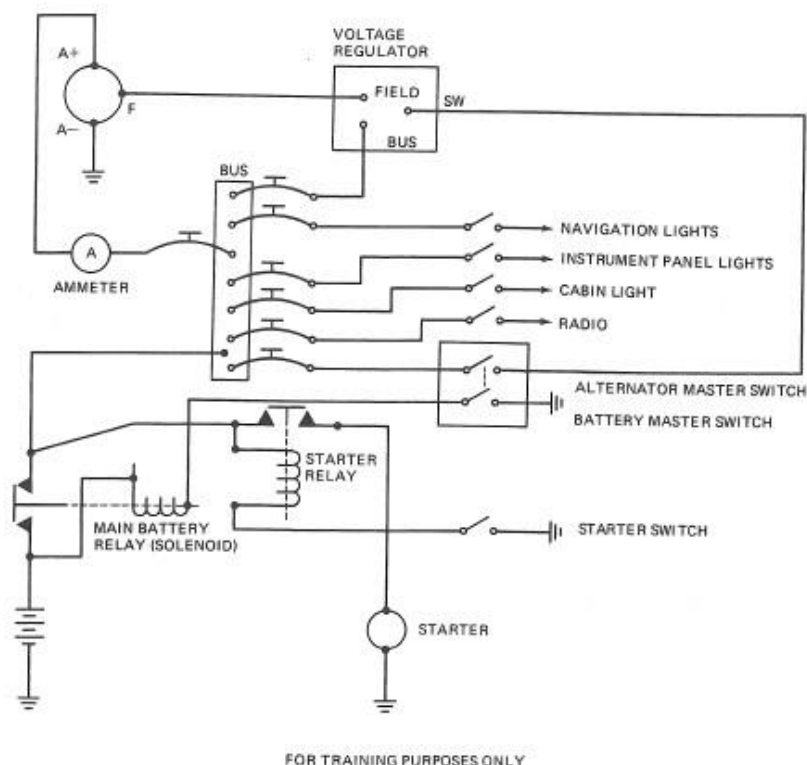
Εικόνα 5.41: Σχηματικό διάγραμμα ρελέ [14].

5.8 Τυπική δομή συστήματος διανομής σε πτητικά μέσα

Σε ένα τυπικό αεροσκάφος η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να γίνει με τρεις διαφορετικούς τρόπους ανάλογα με τον τύπο του, οι οποίοι είναι με AC γεννήτρια, DC γεννήτρια και με συσσωρευτή. Η γεννήτρια συνεχούς ρεύματος χρησιμοποιείται σε μικρά αεροπλάνα και ελικόπτερα, ενώ η γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος σε μεγάλα μεταγωγικά και επιβατικά αεροπλάνα. Η μπαταρία χρησιμοποιείται σε όλους τους τύπους αεροσκαφών και ελικοπτέρων. Σε ένα δίκτυο διανομής ενός αεροπλάνου, τα σημεία στα οποία διασυνδέονται τα διάφορα κυκλώματα ονομάζονται μπάρες διανομής. Οι μπάρες είναι κατασκευασμένες από χαλκό μεγάλης διατομής, ώστε να είναι ικανές να αντέξουν το φορτίο όλων των κυκλωμάτων που είναι συνδεδεμένα σε αυτές. Κάθε κύκλωμα το οποίο συνδέεται στην μπάρα διανομής διαθέτει προστασία από υπερένταση. Στις μπάρες διανομής συνδέεται ο θετικός ακροδέκτης του κυκλώματος, ενώ ο αρνητικός ακροδέκτης συνδέεται στο

μεταλλικό μέρος του αεροσκάφους, το οποίο ονομάζεται σημείο γείωσης του κυκλώματος. Τα κυκλώματα που υλοποιούνται μόνο με έναν αγωγό ονομάζονται συστήματα μονού αγωγού (single – wire system). Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εξοικονόμηση αγωγών, το οποίο συνδυάζεται με μείωση του συνολικού βάρους του αεροπλάνου. Παρόλα αυτά υπάρχουν κυκλώματα σε ένα αεροσκάφος, τα οποία χρησιμοποιούν δύο αγωγούς. Τα μεγαλύτερα αεροπλάνα διαθέτουν περισσότερες από μία μπάρες διανομής, οι οποίες διαχωρίζονται με βάση τη σπουδαιότητα των κυκλωμάτων που συνδέονται σε αυτές.

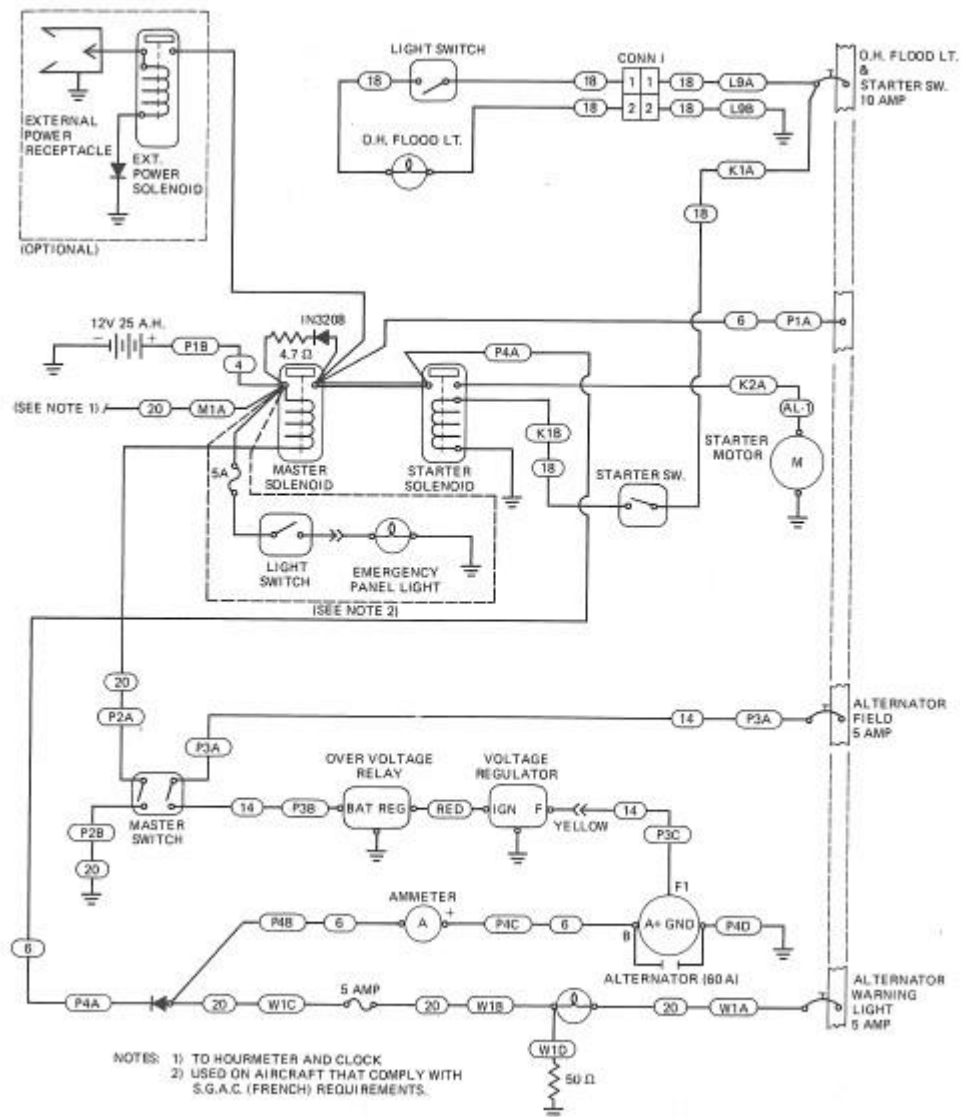
Ένα τυπικό σύστημα διανομής ενός μικρού αεροπλάνου φαίνεται στην εικόνα 5.42.



Εικόνα 5.42: Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα μικρού αεροπλάνου [22].

Σε ένα τέτοιο κύκλωμα περιλαμβάνεται ο συσσωρευτής, ο οποίος με την ενεργοποίηση του ρελέ ισχύος της μπαταρίας τροφοδοτεί την μπάρα διανομής. Με την ενεργοποίηση του διακόπτη εκκίνησης, ο αντίστοιχος κινητήρας εκκίνησης τροφοδοτείται δια μέσου του ρελέ ισχύος εκκίνησης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο κινητήρας εσωτερικής καύσης του αεροπλάνου να τεθεί σε λειτουργία. Με τη λειτουργία του κινητήρα του αεροπλάνου, η γεννήτρια περιστρέφεται και παράγει ηλεκτρική ενέργεια, ώστε να τροφοδοτήσει την μπάρα διανομής. Η τάση στα άκρα της γεννήτριας είναι μεγαλύτερη από αυτή στα άκρα της μπαταρίας. Συνεπώς κατά τη λειτουργία της γεννήτριας φορτίζεται ο συσσωρευτής και τροφοδοτούνται τα φορτία που είναι συνδεδεμένα στην μπάρα διανομής.

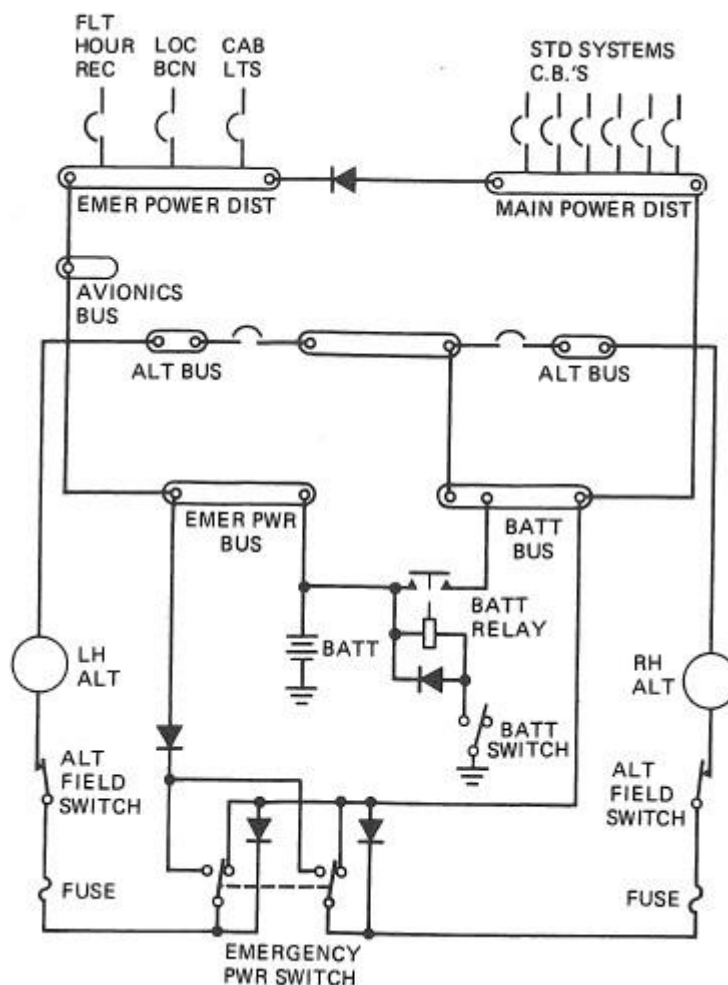
Το κύκλωμα διανομής της εικόνας 5.42 αποτελεί ένα τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα, το οποίο χρησιμοποιείται για εκπαιδευτικούς λόγους. Παρόλα αυτά ένα πιο αντιπροσωπευτικό ηλεκτρικό κύκλωμα ενός μικρού αεροπλάνου φαίνεται στην εικόνα 5.43.



Εικόνα 5.43: Ηλεκτρικό κύκλωμα μονοκινητήριου αεροπλάνου [22].

Στο ηλεκτρικό κύκλωμα της εικόνας 5.43 περιλαμβάνει την υποδοχή της εξωτερικής πηγής, καθώς και τα κυκλώματα ασφαλείας που τροφοδοτούνται κατευθείαν από τον συσσωρευτή του αεροπλάνου.

Όταν πρόκειται για μικρό αεροπλάνο ή ελικόπτερο το οποίο διαθέτει δύο κινητήρες το ηλεκτρικό κύκλωμα διανομής διαφοροποιείται. Ένα τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής ενός αεροπλάνου με δύο κινητήρες φαίνεται στην εικόνα 5.44 παρακάτω.



Εικόνα 5.44: Τυπικό ηλεκτρικό δίκτυο διανομής δικινητήριου αεροπλάνου [22].

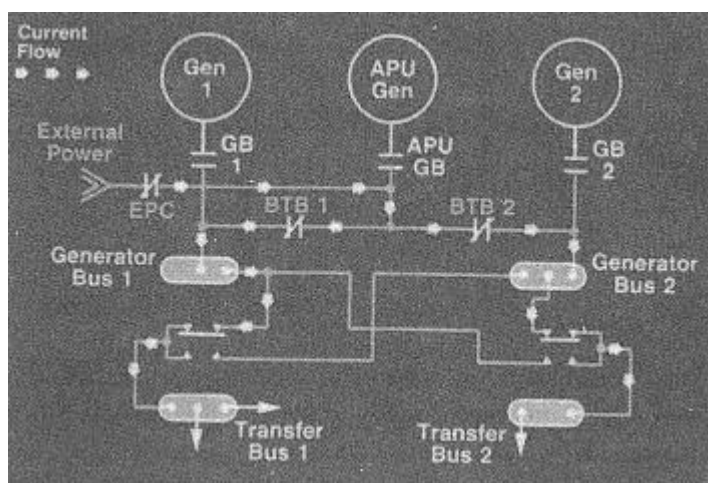
Σε ένα τέτοιο ηλεκτρικό δίκτυο, οι γεννήτριες του συστήματος σχεδιάζονται, ώστε σε περίπτωση βλάβης μίας εκ των δύο, να είναι ικανή η παραμένουσα σε λειτουργία να τροφοδοτήσει όλες τις καταναλώσεις του αεροπλάνου. Επίσης το δίκτυο χωρίζεται σε περισσότερες από μια μπάρες διανομής και τα κυκλώματα διαχωρίζονται ανάλογα με τη σπουδαιότητά τους. Οι μπάρες διανομής έκτακτης ανάγκης (emergency bus) συνδέονται με τις κύριες μπάρες (main bus) διανομής με αγωγούς σύνδεσης. Μεταξύ αυτών των μπαρών παρεμβάλλεται μια δίοδος ισχύος, η οποία είναι υπεύθυνη να επιτρέψει τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος μόνο προς τη μια κατεύθυνση (κύρια μπάρα → μπάρα έκτακτης ανάγκης). Αυτό συμβαίνει, διότι σε περίπτωση κάποιας βλάβης στην κύρια μπάρα διανομής, η μπάρα έκτακτης ανάγκης απομονώνεται και συνεχίζει να τροφοδοτείται κατευθείαν από την μπαταρία. Στην εικόνα 5.44 φαίνεται μια δίοδος συνδεδεμένη παράλληλα με το πηνίο του ρελέ ισχύος της μπαταρίας. Η δίοδος συνδέεται ανάστροφα στα άκρα του πηνίου για λόγους προστασίας του ηλεκτρικού δικτύου από ανάστροφες υπερτάσεις, οι οποίες δημιουργούνται από την απότομη διακοπή της τάσης τροφοδοσίας στα άκρα του πηνίου.

Τα μεγαλύτερα αεροπλάνα παρουσιάζουν αρκετές ομοιότητες με τα ηλεκτρικά δίκτυα των μικρών. Διαθέτουν μια μπαταριά, η οποία συνδέεται κατευθείαν στην μπάρα της μπαταρίας (battery bus bar) ή την μπάρα έκτακτης ανάγκης (emergency bus bar). Επιπλέον τα περισσότερα μεγάλα αεροπλάνα διαθέτουν γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος για την παραγωγή της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες αυτές συνδέονται με τις AC μπάρες. Παρόλα αυτά είναι αναγκαίο και η χρήση συνεχούς ρεύματος, τόσο για τη φόρτιση της μπαταρίας, αλλά και για την τροφοδότηση των κυκλωμάτων DC. Για τον λόγο αυτό διαθέτουν και μπάρες συνεχούς ρεύματος, οι οποίες τροφοδοτούνται μέσω ανορθωτών. Για λόγους ασφαλείας είναι αναγκαίο η ύπαρξη μετατροπέων (inverter), οι οποίοι χρησιμοποιούνται σε περίπτωση βλάβης των AC γεννητριών λαμβάνοντας ενέργεια από τον συσσωρευτή. Στην περίπτωση αυτή τα inverter δεν είναι ικανά να τροφοδοτήσουν με ηλεκτρική ενέργεια όλα τα κυκλώματα που χρησιμοποιούν AC τάση. Συνεπώς η έξοδος τους τροφοδοτούν μόνο τα συστήματα ανάγκης μέσω των μπαρών έκτακτης ανάγκης εναλλασσόμενου ρεύματος (essential AC bus). Με τον τρόπο αυτό υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία των AC μπαρών και των DC μπαρών.

Υπάρχουν τρία βασικά μοντέλα διασύνδεσης του εναλλασσόμενου ηλεκτρικού δικτύου διανομής σε ένα μεγάλο αεροπλάνο, τα οποία είναι τα εξής:

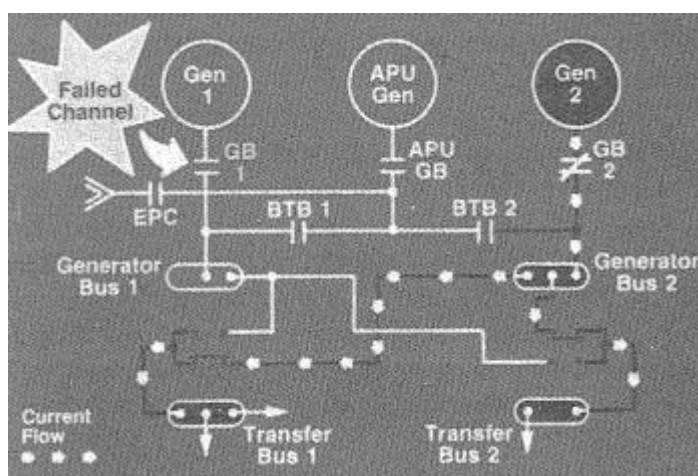
- Ηλεκτρικό σύστημα διαχωρισμένων μπαρών (split – bus electrical system)

Σε αυτήν τη μέθοδο τα αεροπλάνα διαθέτουν δύο ή περισσότερα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τα οποία είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους. Η δομή ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στην εικόνα 5.45.



Εικόνα 5.45: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διαχωριζόμενους ζυγούς [22].

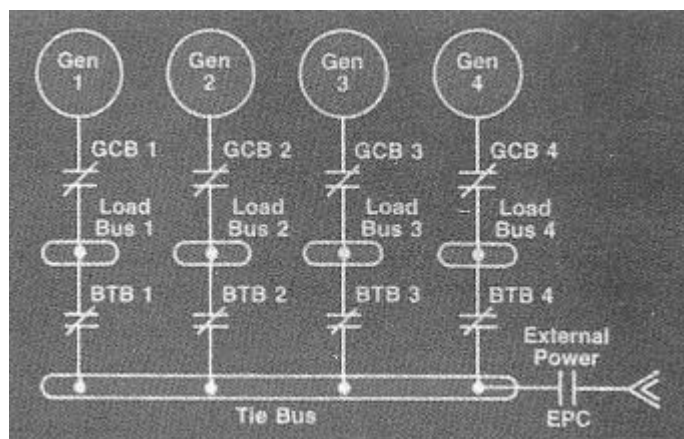
Κάθε συστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαθέτει τη δικιά του μπάρα διανομής καθώς και τους δικούς τους ανορθωτές για τη μετατροπή της AC τάσης σε DC. Παρόλα αυτά υπάρχει διασύνδεση των δυο συστημάτων, η οποία ενεργοποιείται σε περίπτωση βλάβης κάποιας γεννήτριας. Στην περίπτωση αυτή η παραμένουσα σε λειτουργία γεννήτρια είναι ικανή να τροφοδοτεί και τα δύο συστήματα. Επιπλέον σε τέτοιες περιπτώσεις μπορεί να ενεργοποιηθεί και ο βοηθητικός κινητήρας ο οποίος διαθέτει τη δικιά του γεννήτρια και αναλαμβάνει να τροφοδοτήσει το σύστημα που παρουσιάζει τη βλάβη. Η παροχή της εξωτερικής πηγής τροφοδοτεί όλα τα συστήματα του αεροπλάνου, όταν οι γεννήτριες του αεροπλάνου είναι εκτός λειτουργία και το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος. Η απομόνωση του συστήματος, το οποίο παρουσιάζει βλάβη, γίνεται μέσω αυτόματους διακόπτες ισχύος.



Εικόνα 5.46: Ενεργοποίηση του συστήματος διαχωρισμού μπαρών σε περίπτωση βλάβης [22].

- Παράλληλο ηλεκτρικό σύστημα (parallel electrical system)

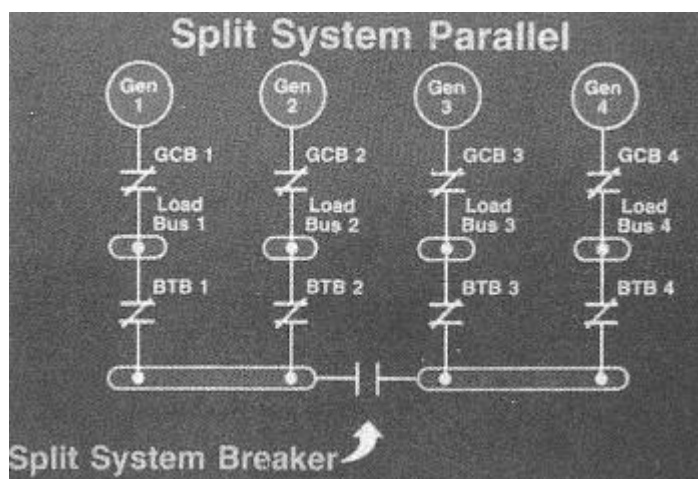
Σε αυτήν τη μέθοδο τα αεροπλάνα διαθέτουν γεννήτριες, οι οποίες τροφοδοτούν μια κεντρική μπάρα διανομής. Οι γεννήτριες εναλλασσόμενου ρεύματος που συνδέονται στην μπάρα διανομής είναι απαραίτητο να λειτουργούν παράλληλα και το φορτίο διαμοιράζεται ομοιόμορφα. Σε περίπτωση βλάβης μια γεννήτριας το σύστημα εξακολουθεί να λειτουργεί και οι παραμένουσες γεννήτριες φορτίζονται παραπάνω. Για τον λόγο αυτόν οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν γεννήτριες μεγαλύτερης ισχύος, ώστε σε περίπτωση βλάβης κάποιας από αυτές, οι παραμένουσες να συνεχίσουν να λειτουργούν στην ονομαστική περιοχή. Στη σύνδεση των γεννητριών με την κεντρική μπάρα διανομής παρεμβάλλονται αυτόματοι διακόπτες ισχύος, ώστε να είναι εφικτή η σύνδεση και η αποσύνδεση τους από το σύστημα. Στην εικόνα 5.47 φαίνεται η δομή ενός παράλληλου ηλεκτρικού συστήματος.



Εικόνα 5.47: Δομή παράλληλου ηλεκτρικού συστήματος [22].

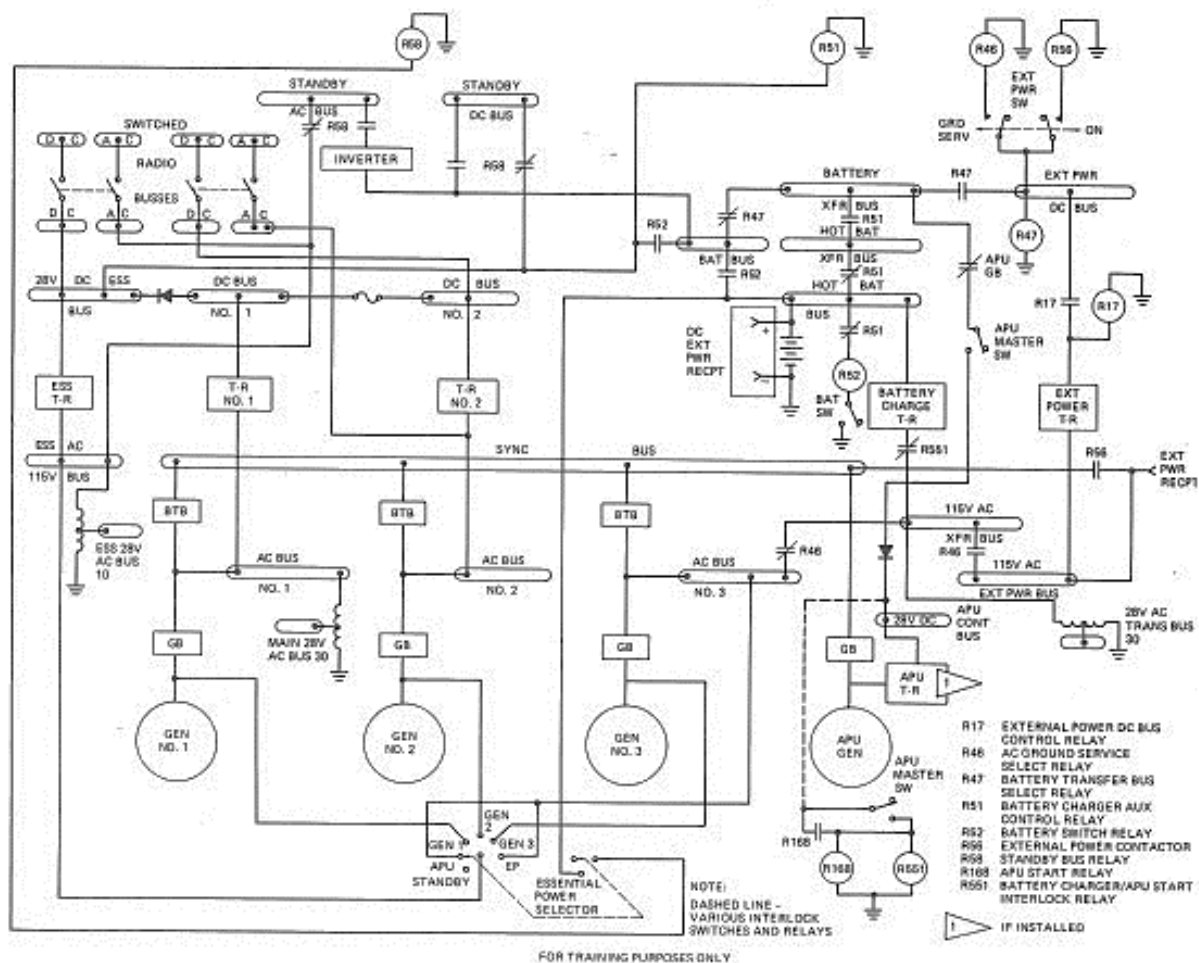
- Διαχωρισμένο παράλληλο σύστημα (split parallel system)

Η μέθοδος αυτή αποτελεί τον συνδυασμό των δύο προηγούμενων. Ένα διαχωρισμένο παράλληλο σύστημα λειτουργεί, όταν το αεροπλάνο διαθέτει τουλάχιστον τέσσερις γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε κάθε μπάρα διανομής συνδέονται τουλάχιστον δύο γεννήτριες, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα. Επιπλέον οι μπάρες μεταξύ τους διασυνδέονται. Σε περίπτωση βλάβης των γεννητριών που τροφοδοτούν μια μπάρα, υπάρχει διασύνδεση μεταξύ των μπαρών, ώστε κανένα σύστημα να μην χάσει την τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας. Η δομή ενός τέτοιου συστήματος φαίνεται στην εικόνα 5.48.



Εικόνα 5.48: Δομή διαχωρισμένου παράλληλου συστήματος [22].

Ένα πιο ολοκληρωμένο δομικό διάγραμμα ενός συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα αεροπλάνο φαίνεται στην εικόνα 5.49 παρακάτω. Η εικόνα αυτή περιλαμβάνει τα συστήματα εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και τα συστήματα συνεχούς ρεύματος [22 §12].



Εικόνα 5.49: Ολοκληρωμένη τυπική δομή ηλεκτρικού συστήματος μεγάλου αεροπλάνου [22].

5.9 Συμπεράσματα

Τα ηλεκτρικά δίκτυα σε ένα αεροπλάνο αποτελούν τον συνδετικό κρίκο μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία γίνεται από τις γεννήτριες και του συνόλου των καταναλώσεων. Οι κατασκευάστριες εταιρίες δίνουν μεγάλη προσοχή στη μελέτη, τον σχεδιασμό και τη συντήρησή τους. Γι' αυτόν τον λόγο τα δίκτυα αντιμετωπίζονται ως ένα ξεχωριστό σύστημα, τα οποία παρουσιάζουν την ίδια σπουδαιότητα με τα υπόλοιπα συστήματα του αεροπλάνου. Συνεπώς εκδίδονται τροποποιήσεις, καθώς και βελτιώσεις των ηλεκτρικών δικτύων ενός αεροπλάνου, ώστε να μηδενιστεί η εκδήλωση κάποιου ατυχήματος που να προέρχεται από αυτά. Τα δίκτυα των σύγχρονων αεροσκαφών διαθέτουν αρκετές δικλείδες ασφαλείας, ώστε σε περίπτωση βλάβης να μην τεθούν εκτός λειτουργίας σημαντικά συστήματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : Φωτισμός

6.1 Εισαγωγή

Ο φωτισμός σε ένα αεροπλάνο είναι πολύ σημαντικός και οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι αρκετοί. Αρχικά ένα αεροπλάνο είναι ικανό να πραγματοποιεί πτήσεις ακόμα και τη νύχτα. Συνεπώς είναι απαραίτητο να διαθέτει φωτισμό, ώστε να ξεχωρίζει η θέση του στον νυχτερινό ουρανό και η αεροπλοΐα του να γίνεται με ασφάλεια, τόσο για τον ίδιο, αλλά και όσο για τα υπόλοιπα αεροπλάνα. Επιπλέον στο εσωτερικό χώρο του αεροπλάνου ο φωτισμός είναι εξίσου σημαντικός. Τα πολυάριθμα συστήματα του αεροπλάνου απαιτούν και πολλά εξαρτήματα για τον χειρισμό τους όπως είναι όργανα, ηλεκτρικοί διακόπτες και μηχανικά εξαρτήματα. Κατά τη διάρκεια της νύχτας κάτι τέτοιο είναι αδύνατο να επιτευχθεί χωρίς φωτισμό. Τέλος απαραίτητος αποτελεί ο τεχνητός φωτισμός και κατά τη διάρκεια της μέρας σε σημεία τα οποία ο φυσικός φωτισμός δεν επαρκεί, όπως είναι η καμπίνα επιβατών και ο χώρος μεταφοράς φορτίων.

6.2 Η έννοια του φωτός

Το φως είναι ένα φυσικό φαινόμενο το οποίο καθορίζει αρκετές δραστηριότητες του ανθρώπου πάνω στη γη. Από τα αρχαία χρόνια η μόνη πηγή φωτός κατά τη διάρκεια της ημέρας ήταν ο Ήλιος ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας ήταν η Σελήνη. Για τον λόγο αυτό ο άνθρωπος προσπάθησε να παράξει φως με τεχνητό τρόπο, όπως είναι η καύση των ξύλων και η χρήση κεριών. Στην σύγχρονη εποχή η παραγωγή φωτός γίνεται με ηλεκτρικά μέσα, όπως είναι οι λαμπτήρες πυράκτωσης, λαμπτήρες εκκένωσης, καθώς και οι φωτοδιόδοι.

Αυτοί που προσπάθησαν πρώτοι να εξηγήσουν την έννοια του φωτός ήταν οι αρχαίοι Έλληνες, οι οποίοι θεωρούσαν ότι εκπέμπαν ακτινοβολίες από τα μάτια τους προς τα υπόλοιπα αντικείμενα και έτσι έβλεπαν. Ο Αριστοτέλης, αλλά και άλλοι αρχαίοι φιλόσοφοι, απέρριψαν την παραπάνω εικασία και διατύπωσαν ότι οι πηγές φωτός εκπέμπαν πολύ μικρά σωματίδια πολύ κοντά το ένα από το άλλο, τα οποία εισέρχονταν στο ανθρώπινο μάτι και έτσι έβλεπαν.

Πραγματοποιήθηκαν αρκετά πειράματα και προσπάθειες διατύπωσης της έννοιας του φωτός μέχρι το τέλος του 18^{ου} αιώνα όπου ο Maxwell διατύπωσε την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του φωτός. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή το φως είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο εισέρχεται στο ανθρώπινο μάτι. Το κύμα αυτό δημιουργεί ένα ερέθισμα το οποίο αναγνωρίζει ο ανθρώπινος εγκέφαλος. Για ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα ισχύει ότι:

$$C = \lambda \cdot f \quad (\text{σχέση 6.1})$$

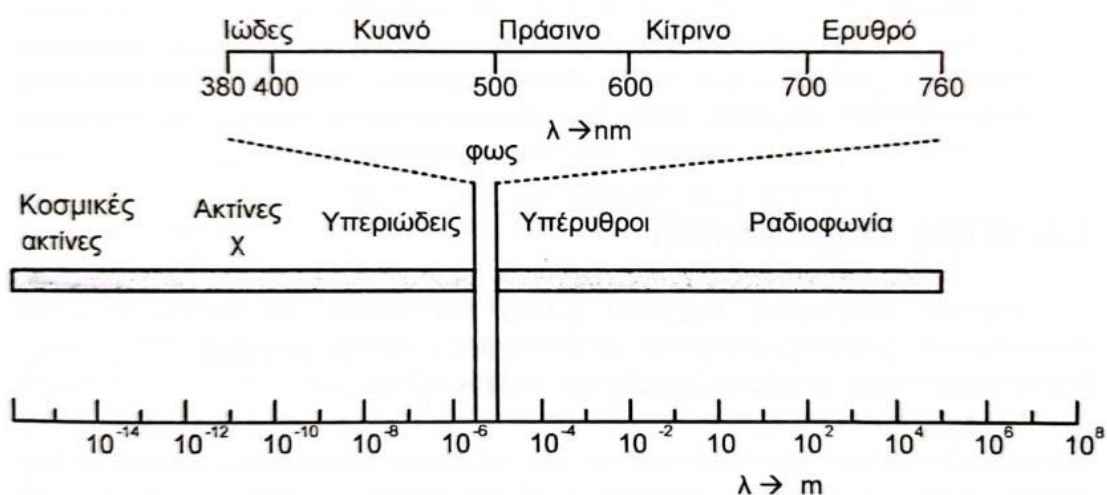
Όπου

C: ταχύτητα του φωτός (299.792.458 m/s)

λ : μήκος κύματος (m)

f: συχνότητα κύματος (Hz)

Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας φαίνεται στην εικόνα 6.1 παρακάτω. Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα το οποίο μπορεί να αντιληφθεί ο ανθρώπινος εγκέφαλος κυμαίνεται από 315nm έως 1050nm. Όσα ηλεκτρομαγνητικά κύματα εκπέμπονται σε διαφορετικό μήκος κύματος από αυτό, ο ανθρώπινος εγκέφαλος δεν μπορεί να τα αναγνωρίσει.



Εικόνα 6.1: Φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας [27].

Κάθε σώμα το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν (-273° C) εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, η οποία ονομάζεται θερμική ακτινοβολία. Σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann η θερμική ακτινοβολία ενός σώματος ισούται με:

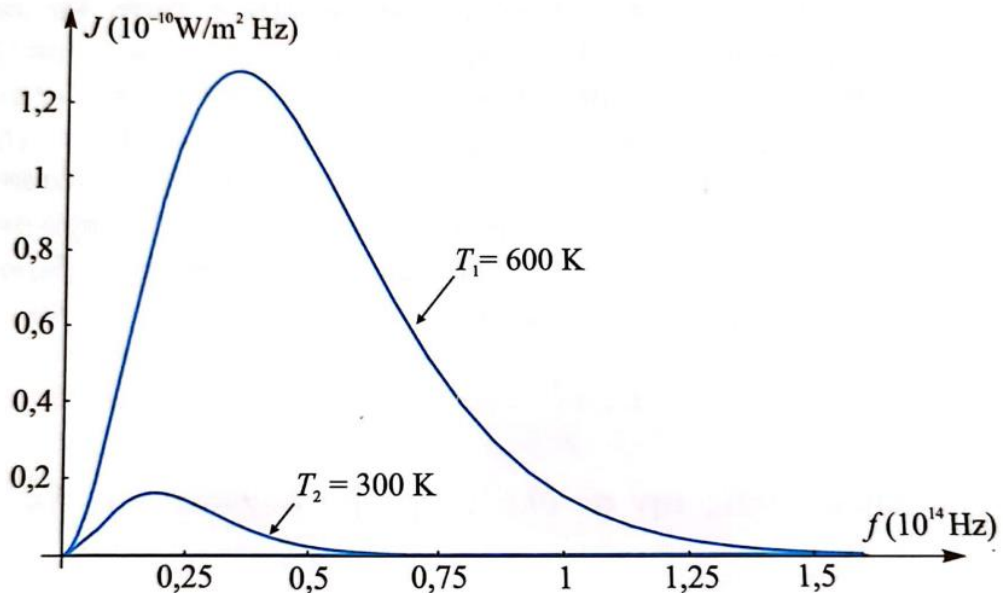
$$I = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{σχέση 6.2})$$

Όπου

T: θερμοκρασία του σώματος (K)

σ : σταθερά Stefan – Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$)

Σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann κάθε σώμα το οποίο βρίσκεται στην ίδια θερμοκρασία εκπέμπει το ίδιο φάσμα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (θερμική ακτινοβολία) ανεξάρτητα από το υλικό κατασκευής του.



Εικόνα 6.2: Φασματική κατανομή θερμικής ακτινοβολίας για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας [28].

Σύμφωνα με τον νόμο της μετατόπισης του Wien, γνωρίζοντας τη θερμοκρασία που βρίσκεται ένα σώμα είναι εύκολος ο υπολογισμός του μήκους κύματος, στο οποίο γίνεται η μέγιστη εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μέσω της σχέσης:

$$\lambda(max) = \frac{0,29}{T} \cong \frac{0,3}{T} \quad (\text{σχέση 6.3})$$

Ο Planck εντυπωσιασμένος από την παγκοσμιότητα της θερμικής ακτινοβολίας διατύπωσε τον γενικό εμπειρικό τύπο της φασματικής έντασης, ο οποίος πήρε το όνομα του και δίνεται από τη σχέση:

$$J(f, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} \quad (\text{σχέση 6.4})$$

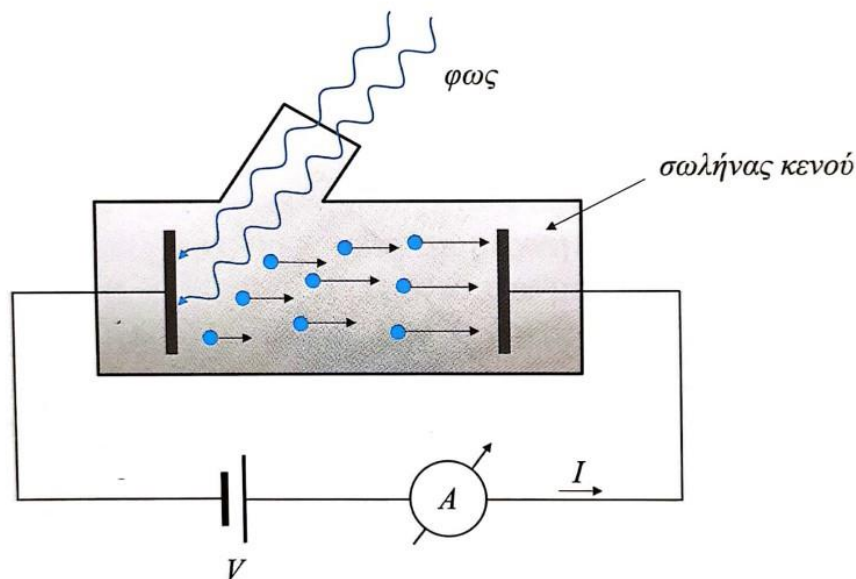
Όπου

k: σταθερά Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}$)

h: σταθερά του Planck ($6,62 \cdot 10^{-34} J \cdot s$)

Ο Plank ήταν ο πρώτος ο οποίος διατύπωσε ότι η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα μέλαν σώμα χωρίζεται σε κβάντα (ποσά). Δηλαδή η ενέργεια είναι κβαντισμένη και λαμβάνει μόνο διακριτές τιμές.

Την ίδια περίοδο ο Hertz με την καθοριστική συμβολή του Lenard περιέγραψαν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, στο οποίο ένα μέταλλο εκπέμπει ηλεκτρόνια όταν πάνω του προσπίπτει ορατή ή υπεριώδης ακτινοβολία.



Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση φωτοηλεκτρικού φαινομένου [28].

Η κινητική ενέργεια των αποσπώμενων ηλεκτρονίων είναι ίση με:

$$K = e \cdot V \quad (\text{σχέση 6.5})$$

Οι παρατηρήσεις, οι οποίες έγιναν μετά το παραπάνω πείραμα ήταν οι εξής:

- Η ένταση του ρεύματος του φωτοηλεκτρικού φαινομένου αυξάνεται ανάλογα με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Το ρεύμα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου εμφανίζεται μόνο όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή ($f_0 = f_{min}$), χαρακτηριστικό του μετάλλου που χρησιμοποιείται. Αν $f < f_0$ τότε δεν θα υπάρξει φωτοηλεκτρικό ρεύμα, όποια και αν είναι η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων για $f > f_0$ δεν εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, αλλά μόνο από τη συχνότητά της.

- Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της δέσμης φωτός στο μέταλλο.

Η αδυναμία της κλασικής φυσικής να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο οδήγησε τον A.Einstein το 1905 να επεκτείνει τα όρια της παραδοχής του Planck θεωρώντας ότι η κβάντωση είναι μια εγγενής ιδιότητα του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Έτσι διατύπωσε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από φωτόνια, τα οποία έχουν ενέργεια ίση με:

$$E = h \cdot f \quad (\text{σχέση 6.6})$$

Για να ολοκληρωθεί όμως η κατοχύρωση της κβάντωσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πρέπει τα φωτόνια εκτός από φορείς ενέργειας να έχουν και ορμή. Η ορμή (p) ενός σωματιδίου δίνεται από τη σχέση:

$$p = m \cdot c \quad (\text{σχέση 6.7})$$

Η μάζα του φωτονίου (m) δίνεται από τη θεωρία της σχετικότητας όπου :

$$E = m \cdot c^2 \quad (\text{σχέση 6.8})$$

Συνεπώς με συνδυασμό των σχέσεων 6.6 και 6.8 προκύπτει η μάζα ενός φωτονίου και δίνεται από τη σχέση:

$$\mu = \frac{h \cdot f}{c^2} \quad (\text{σχέση 6.9})$$

Ταυτόχρονα η ορμή ενός φωτονίου δίνεται από τη σχέση:

$$p = \mu \cdot c = \frac{h \cdot f}{c^2} \cdot c = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\left(\frac{c}{f}\right)} = \frac{h}{\lambda} \quad (\text{σχέση 6.10})$$

Σύμφωνα με τον Einstein και τη σχετικότητα τα φωτόνια, επειδή έχουν ενέργεια, θα έχουν μάζα και ορμή. Έτσι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα παρουσιάζει κυματικές ιδιότητες, αλλά και σωματιδιακές. Η παραπάνω διατύπωση του A.Einstein επαληθεύτηκε πειραματικά με το φαινόμενο Compton το 1922, όπου και οι τελευταίες αμφισβητήσεις του κυματοσωματιδιακού δυισμού του φωτός κατέρρευσαν [28 §1].

6.3 Παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εντός ορατού φάσματος

Κάθε αντικείμενο, το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann (σχέση 6.2), της οποίας το μέγιστο μήκος κύματος δίνεται από τον νόμο του Wien (σχέση 6.3). Ο άνθρωπος όπως δεν είναι σε θέση να αντιληφθεί όλα τα μήκη κύματος του φάσματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Αντιλαμβάνεται μόνο όσα μήκη κύματος βρίσκονται εντός του ορατού φάσματος, το οποίο βρίσκεται μεταξύ 380nm και 780nm. Η παραγωγή τέτοιων ακτινοβολιών μπορεί να γίνει με φυσικό τρόπο, όπως είναι το φως του ήλιου που φτάνει στην επιφάνεια της γης, καθώς και με τεχνητό τρόπο, όπως είναι οι λαμπτήρες. Οι τεχνικές που αξιοποίησε ο άνθρωπος για την παραγωγή φωτός είναι οι εξής:

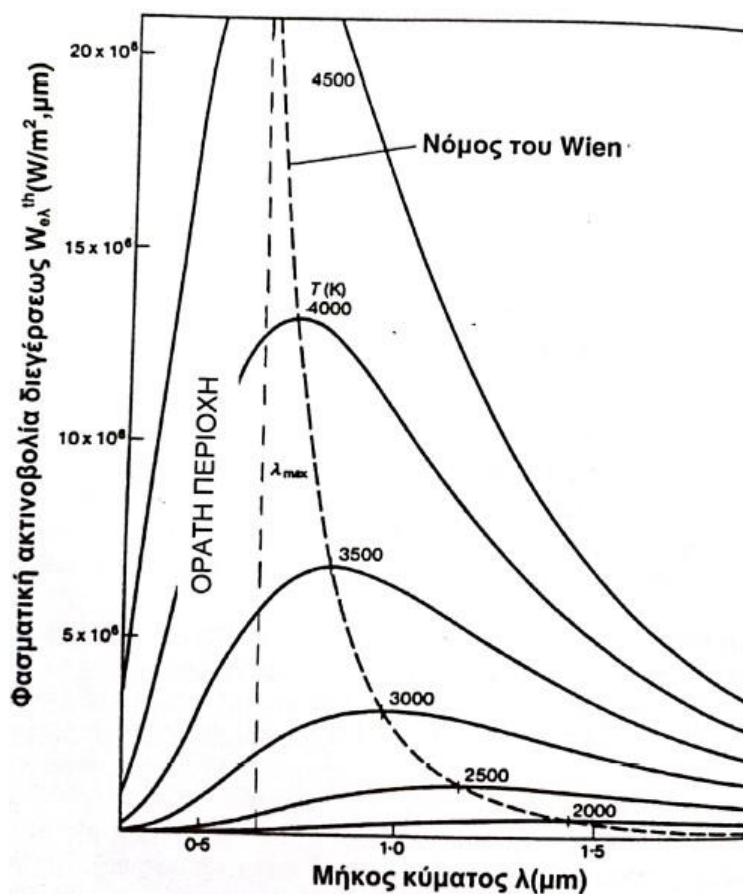
- Όταν ένα σώμα ή υγρό θερμανθεί σε θερμοκρασία περίπου 1000° K (726° C), τότε η εκπεμπόμενη ακτινοβολία βρίσκεται στο ορατό φάσμα.
- Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περάσει μέσα από ένα αέριο, τότε τα μόρια του εκπέμπουν ακτινοβολία της οποίας το φάσμα εξαρτάται από τη φύση του αερίου.
- Όταν ηλεκτρικό ρεύμα περάσει μέσα από ορισμένα στερεά, όπως είναι ημιαγωγοί και ορισμένα φωσφορούχα υλικά, τότε παράγεται ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Όταν ένα στερεό απορροφήσει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος μπορεί να την επαναεκπέμψει σε ακτινοβολία, η οποία βρίσκεται εντός του ορατού φάσματος.
- Όταν ηλεκτρόνια πέσουν πάνω σε φώσφορο, τότε παράγεται ακτινοβολία που βρίσκεται στο ορατό φάσμα [27 §1.2].

6.4 Λαμπτήρας πυράκτωσης

Ο Thomas Edison το 1870 έλαβε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για την κατασκευή του πρώτου λαμπτήρα πυράκτωσης, ο οποίος έμοιαζε αρκετά με τον σημερινό. Ο Edison στον λαμπτήρα που κατασκεύασε χρησιμοποίησε νήμα άνθρακα, το οποίο θερμαινόταν όταν διαρρέοταν από ηλεκτρικό ρεύμα. Αν και ο άνθρακας παρουσίαζε μεγάλο σημείο τήξεως, η θερμοκρασία λειτουργίας του λαμπτήρα γινόταν σε χαμηλότερη θερμοκρασία λόγω της ταχείας εξάχνωσης του νήματος. Τα επόμενα χρόνια χρησιμοποιήθηκαν αρκετά υλικά για την κατασκευή του νήματος με επικρατέστερο το βολφράμιο. Το σημείο τήξεως του υλικού αυτού είναι 3650 K και είναι μικρότερο από του άνθρακα. Παρόλα αυτά παρουσιάζει μεγαλύτερη θερμοκρασία λειτουργίας (2800 K έως 3000 K).

Όταν ένα σώμα θερμανθεί, τότε τα μόρια του διεγείρονται και εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος, σύμφωνα με τον νόμο των Stefan – Boltzmann. Σύμφωνα με τον νόμο του Wien γνωρίζοντας τη θερμοκρασία του σώματος μπορεί να υπολογιστεί

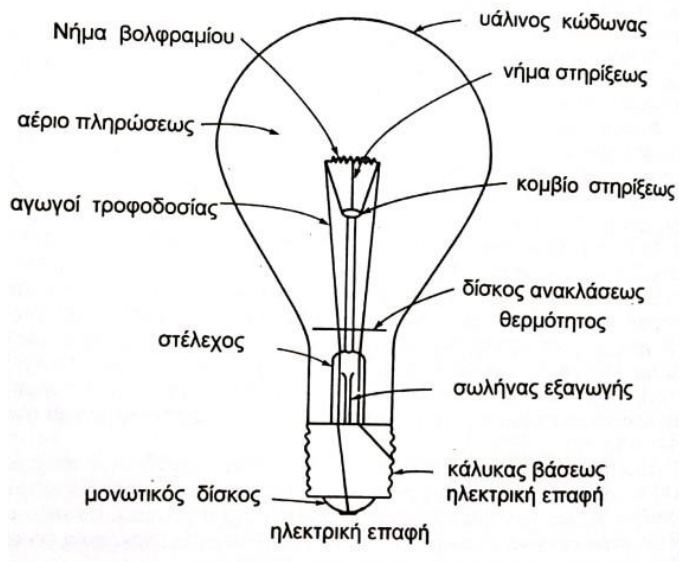
το μήκος κύματος, στο οποίο παρουσιάζεται η μέγιστη εκπομπή. Ένα τέτοιο διάγραμμα φαίνεται στην εικόνα 6.4.



Εικόνα 6.4: Διάγραμμα ακτινοβολούμενης ενέργειας συνάρτηση του μήκους κύματος για διαφορετικές θερμοκρασίες [27].

Το εμβαδόν που περικλείεται κάτω από κάθε καμπύλη θερμοκρασίας δείχνει τη συνολική ενέργεια της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Το εμβαδόν όμως κάτω από την κάθε καμπύλη και μεταξύ των μηκών κύματος 380nm και 780nm δείχνει την ενέργεια την ορατής ακτινοβολίας. Επιπλέον από την εικόνα 6.4 παράγεται το συμπέρασμα, ότι όσο η θερμοκρασία αυξάνεται, τόσο περισσότερη ενέργεια της ακτινοβολίας εκπέμπεται στο ορατό φάσμα. Η αύξηση όμως αυτή για τον λαμπτήρα πυράκτωσης περιορίζεται από το σημείο τήξεως του βολφραμίου. Για τη μεγαλύτερη αντοχή των λαμπτήρων πυράκτωσης οι κατασκευαστές χρησιμοποιούν αέριο πλήρωσης, το οποίο βρίσκεται υπό πίεση. Το αέριο αυτό στις περισσότερες περιπτώσεις αποτελείται από μίγμα 85% αργό και 15% άζωτο. Παρόλα αυτά η μέθοδος παραγωγής φωτός με αύξηση της θερμοκρασίας δεν αποτελεί οικονομική λύση, διότι μόλις το 10% της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας μετατρέπεται σε φωτεινή. Η δομή ενός λαμπτήρα πυράκτωσης φαίνεται στην εικόνα 6.5. Το νήμα του λαμπτήρα περικλείεται μέσα σε ένα ύαλο, ο οποίος μπορεί να είναι διάφανος ή χρωματισμένος. Ο ύαλος αυτός είναι υπεύθυνος για την ομοιόμορφη διάχυση του φωτός. Για την επίτευξη μεγαλύτερης διάχυσης φωτός το εσωτερικό του

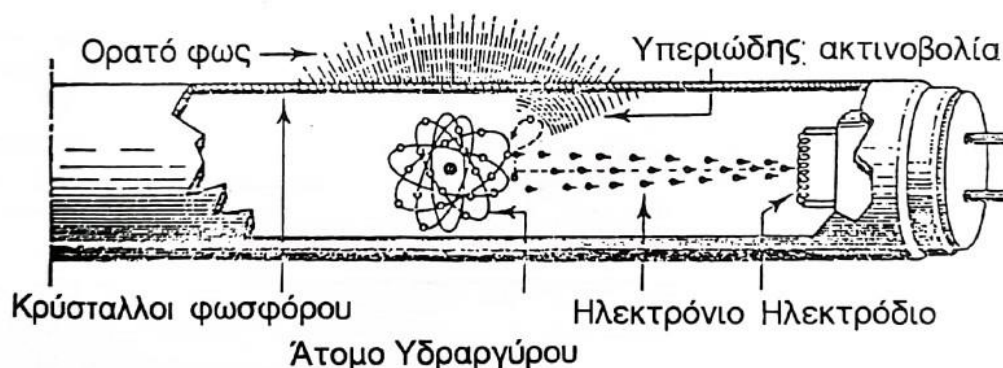
ύαλου καλύπτεται με λευκό πυριτικό άλας. Ο κάλυκας του λαμπτήρα χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική διασύνδεση. Υπάρχουν δυο μεγάλες κατηγορίες κάλυκα, οι οποίες είναι ο βιδωτός και ο μισής στροφής η αλλιώς bayonet. Το υλικό κατασκευής του κάλυκα είναι ορείχαλκος, αλουμίνιο ή νικέλιο [27 §1.4].



Εικόνα 6.5: Σχηματικό διάγραμμα λαμπτήρα πυράκτωσης [27].

6.5 Λαμπτήρας εκκένωσης

Οι λαμπτήρες εκκένωσης βρίσκονται εμπορικά διαθέσιμοι εδώ και 60 χρόνια. Παρουσιάζουν μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τους λαμπτήρες πυράκτωσης. Οι λαμπτήρες εκκένωσης αποτελούνται από ένα μακρόστενο γυάλινο σωλήνα, όπου στα άκρα του διαθέτει δυο ηλεκτρόδια. Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι επικαλυμμένα με κατάλληλο υλικό το οποίο έχει την ικανότητα να εκπέμπει ηλεκτρόνια λόγω θέρμανσης. Ο σωλήνας στο εσωτερικό του περιέχει ένα μείγμα αερίων (αργού – υδραργύρου), το οποίο υπό φυσιολογικές συνθήκες αποτελείται από ουδέτερα άτομα. Παρόλα αυτά λόγω της ύπαρξης της κοσμικής ακτινοβολίας πάντοτε υπάρχει ένας αριθμός ελεύθερων ηλεκτρονίων και ιόντων. Όταν στα άκρα του λαμπτήρα εφαρμοστεί μια υψηλή τάση τότε δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο θέτει σε κίνηση τα ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται και συγκρούονται με τα άτομα του αργού, τα οποία με τη σειρά τους διεγείρονται και ιονίζονται. Τα ιονισμένα άτομα του αργού συντελούν στη διεγερση των ατόμων του υδραργύρου, τα οποία παράγουν ακτινοβολία. Η παραγόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται στο φάσμα της υπεριώδους ακτινοβολίας, η οποία δεν γίνεται αντιληπτή από το ανθρώπινο μάτι. Για τη μετατροπή της υπεριώδους ακτινοβολίας σε ορατή συντελεί η φθορίζουσα ουσία με την οποία είναι επικαλυμμένα τα εσωτερικά τοιχώματα του σωλήνα [27 §1.9]



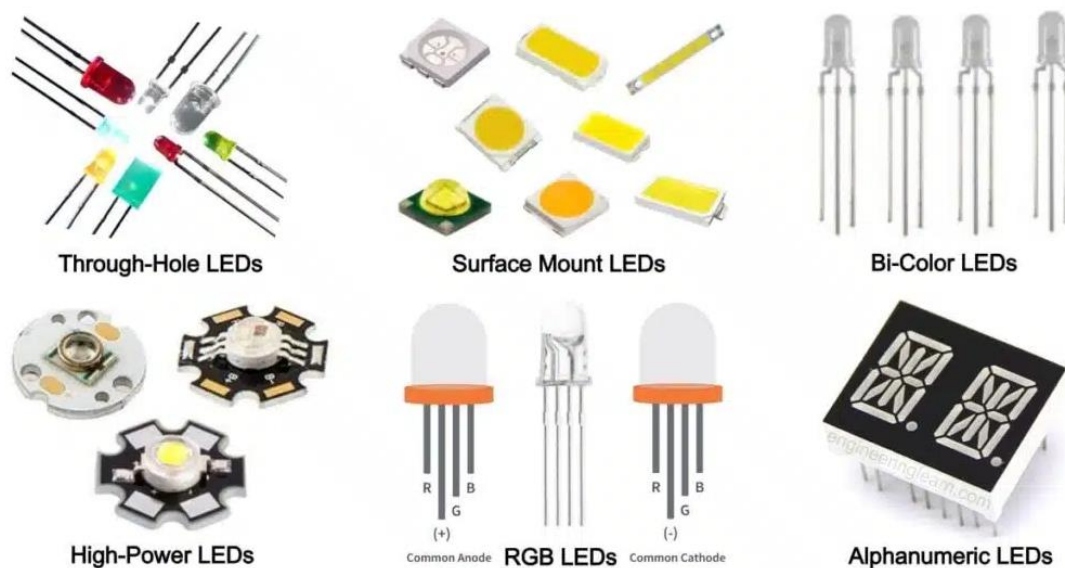
Εικόνα 6.6: Μηχανισμός εκκένωσης λαμπτήρα φθορισμού [27].

6.6 Δίοδος Led

Η δίοδος Led αποτελεί τη νεότερη ανακάλυψη που χρησιμοποιείται για την παραγωγή τεχνητού φωτός. Το Led αποτελεί ένα ηλεκτρονικό εξάρτημα, το οποίο υπάγεται στην τεχνολογία στερεάς κατάστασης (solid – state lighting – SSL). Δηλαδή δεν διαθέτουν νήμα πυράκτωσης, ούτε κάποιο αέριο υπό πίεση, αλλά βασίζονται στη ροή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός ημιαγωγού. Σε μια δίοδο led, η οποία είναι ορθά πολωμένα ηλεκτρόνια διασχίζουν την περιοχή απογύμνωσης (επαφή) και συνδέονται με μια οπή. Καθώς τα ηλεκτρόνια μεταπηδούν από μια μεγαλύτερη ενεργειακή στάθμη σε μια χαμηλότερη, τότε ακτινοβολούν ενέργεια. Το φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, που εκπέμπει ένα Led εξαρτάται από τα υλικά κατασκευής των ημιαγωγικών στοιχείων της διόδου. Με χρήση φωσφορικών ουσιών επιτυγχάνεται η διεύρυνση και η μετατόπιση της παραγόμενης ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο φάσμα. Συνεπώς το χρώμα του παραγόμενου φωτός εξαρτάται μόνο από τις προσμίξεις και όχι από το κέλυφος της διόδου, όπως αυτό γίνεται σε άλλους τύπους συμβατών λαμπτήρων.

Ένα υλικό, το οποίο χρησιμοποιήθηκε αρχικά στις διόδους Led ήταν το φωσφορούχο γάλλιο (GaP). Το συγκεκριμένο υλικό παρήγαγε ακτινοβολία σε μήκος κύματος από κόκκινο έως πράσινο. Τα μειονεκτήματα αυτού του υλικού ήταν η αυξημένη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία μείωνε δραματικά τη διάρκεια ζωής του Led. Ένα άλλο υλικό, το οποίο χρησιμοποιείται σπάνια τα τελευταία χρόνια λόγω της χαμηλής απόδοσης του είναι το αλουμίνιο αρσενικούχο γάλλιο (AlGaAs). Το υλικό αυτό εξέπεμπε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία σε μήκος κύματος του πράσινου σε κόκκινου καθώς και στο υπέρυθρο. Τα παραπάνω μειονεκτήματα ξεπεράστηκαν με τη χρήση του αλουμίνιου ινδίου φωσφορούχο γαλλίου (AlInGaP). Το υλικό αυτό αντέχει υψηλές θερμοκρασίες και έχει καλή απόδοση. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία βρίσκεται στο φάσμα του κόκκινου και του πορτοκαλί.

Η τεχνολογία των διόδων Led αναπτύσσεται συνεχώς. Με τη χρήση διάφορων υλικών είναι εφικτή η παραγωγή ακτινοβολίας σε αρκετά μήκη κύματος, τα οποία ήταν δύσκολο να παραχθούν τα προηγούμενα χρόνια. Στην εικόνα 6.7 φαίνονται κάποια είδη Led τα οποία υπάρχουν στην αγορά.



Εικόνα 6.7: Διάφορα είδη LED που διατίθενται στην αγορά [40].

6.7 Εσωτερικός φωτισμός

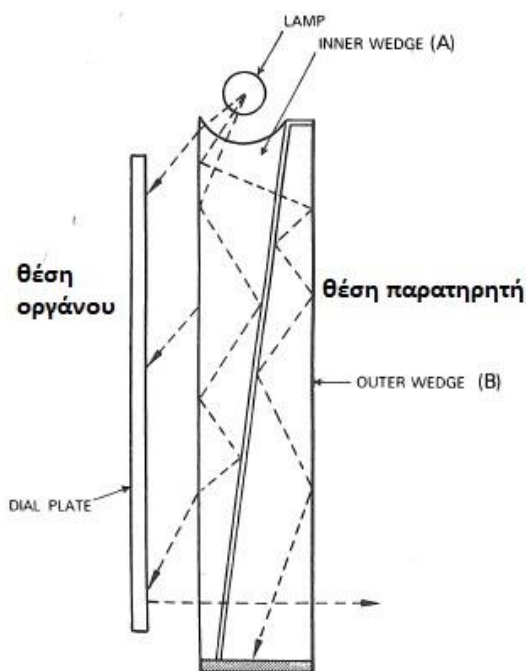
Ο εσωτερικός φωτισμός σε ένα αεροπλάνο είναι πολύ σημαντικός για τη σωστή και ασφαλή λειτουργία του. Αφορά όλο το φωτισμό, ο οποίος χρησιμοποιείται στο εσωτερικό μέρος του αεροσκάφους. Βοηθάει τους χειριστές να πραγματοποιούν σωστό χειρισμό στα εξαρτήματά του και να αναγνωρίζουν τις ενδείξεις των διαφόρων πληροφοριών που λαμβάνουν από τα όργανα και τις οθόνες. Επιπλέον όταν πρόκειται για επιβατικό αεροπλάνο, ο εσωτερικός φωτισμός βοηθάει τους επιβαίνοντες να χρησιμοποιήσουν τους χώρους του με ασφάλεια και τους προσφέρει άνεση στο ταξίδι. Ο εσωτερικός φωτισμός χωρίζεται στις παρακάτω κατηγορίες.

- Φωτισμός πιλοτήριου

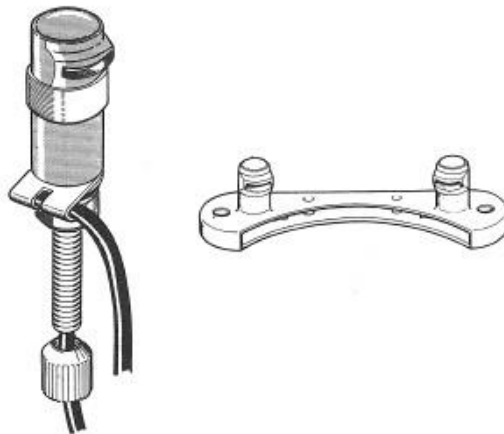
Σε αυτήν την κατηγορία εντάσσονται όλα τα τεχνικά μέσα παραγωγής φωτός, τα οποία χρησιμοποιούνται στον χώρο του πιλοτήριου. Ο γενικός φωτισμός του χώρου πραγματοποιείται με φωτιστικά (dome light), τα οποία τοποθετούνται στην οροφή. Τα συγκεκριμένα φωτιστικά στα περισσότερα αεροπλάνα τροφοδοτούνται με συνεχή τάση 28 Volts. Σε αρκετές περιπτώσεις παρέχεται η δυνατότητα ρύθμισης της έντασης του φωτός, η οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί με δυο μεθόδους. Η πρώτη γίνεται μέσω μεταβλητής αντίστασης, στην οποία η ένταση του φωτός ρυθμίζεται από μηδενική έως τη μέγιστη. Στη δεύτερη μέθοδο το φωτιστικό σώμα περιλαμβάνει δυο λαμπτήρες διαφορετικής έντασης, οι οποίοι ενεργοποιούνται μέσω επιλογικού διακόπτη.

Οι χειρίστες κατά τη διάρκεια της πτήσης αρκετές φορές είναι απαραίτητο να συμβουλευτούν γραπτά εγχειρίδια. Σε αυτές τις περιπτώσεις ο γενικός φωτισμός του πιλοτήριου (dome light) μπορεί να μην είναι ικανοποιητικός. Γι' αυτό τον λόγο οι κατασκευαστές τοποθετούν μικρούς προβολείς (floodlight), οι οποίοι παρέχουν φως μεγαλύτερης έντασης. Οι προβολείς αυτοί είναι τοποθετημένοι σε συγκεκριμένα σημεία. Παρόλα αυτά δύναται να μετακινηθούν σε κοντινές αποστάσεις μέσω εύκαμπτου καλωδίου.

Στον χώρο του πιλοτήριου βασικό εξοπλισμό αποτελούν τα διαφορά όργανα του αεροπλάνου. Από τα όργανα αυτά ο χειρίστης αντλεί πληροφορίες για την κατάσταση που βρίσκονται τα διάφορα συστήματα του. Συνεπώς η σωστή ανάγνωση των οργάνων κατά τη διάρκεια της πτήσης αποτελεί ζωτικής σημασίας. Γι' τον λόγο αυτό οι κατασκευαστές τοποθετούν ειδικό φωτισμό στα όργανα, ο οποίος μπορεί να είναι ενσωματωμένος (integral instrument lighting) ή να βρίσκεται εξωτερικά (pillar and bridge lighting) από αυτό. Ο ενσωματωμένος φωτισμός βασίζεται στις συνεχείς ανακλάσεις, οι οποίες προέρχονται από έναν ενσωματωμένο λαμπτήρα και μια διπλή γυάλινη επιφάνεια στο μπροστινό μέρος του οργάνου (εικόνα 6.8). Ο εξωτερικός φωτισμός του οργάνου αποτελείται από λαμπτήρα, ο οποίος τοποθετείται σε ειδική βάση και φωτίζει εστιασμένα προς τη γυάλινη επιφάνεια του (εικόνα 6.9).

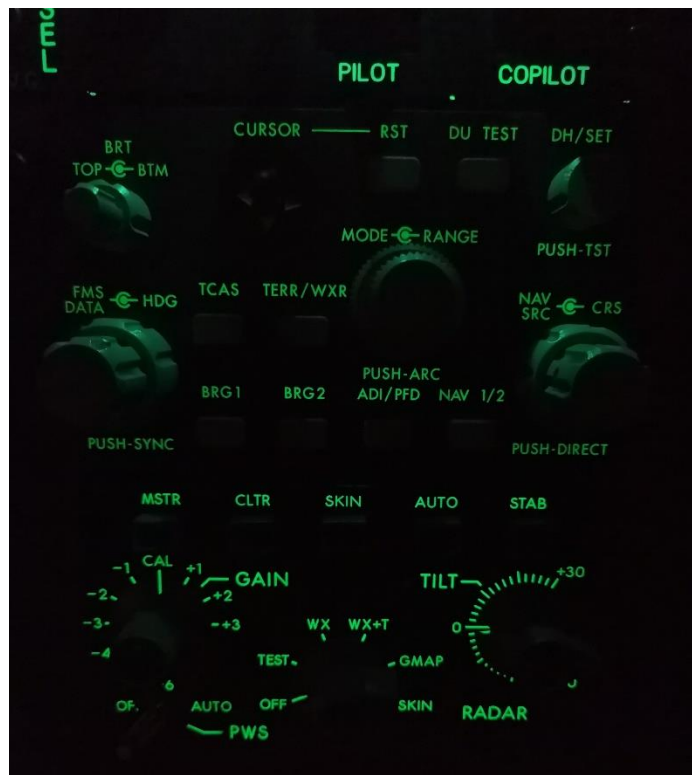


Εικόνα 6.8: Σχηματικό διάγραμμα εσωτερικού φωτισμού οργάνου [26].



Εικόνα 6.9: Ειδικές βάσεις λαμπτήρων για εξωτερικό φωτισμό οργάνων [26].

Επιπλέον στο χώρο του πιλοτήριου εκτός από όργανα υπάρχουν διακόπτες, μπουτόν και διάφορες επιφάνειες, οι οποίες αναγράφουν κωδικοποιημένα την περιγραφή των διαφόρων συστημάτων, ώστε να είναι εφικτή η αναγνώρισή τους. Κατά τη διάρκεια τις νύχτας για την εύκολη ανάγνωση τους χρησιμοποιείται φωτισμός, ο οποίος τοποθετείται εσωτερικά των επιφανειών αυτών. Ο φωτισμός αυτός διαπερνά μόνο τα σημεία, στα οποία υπάρχει κωδικοποιημένη περιγραφή κάνοντας την ορατή στον χειρίστη του συστήματος [26 §10].



Εικόνα 6.10: Εσωτερικός φωτισμός επιφανειών

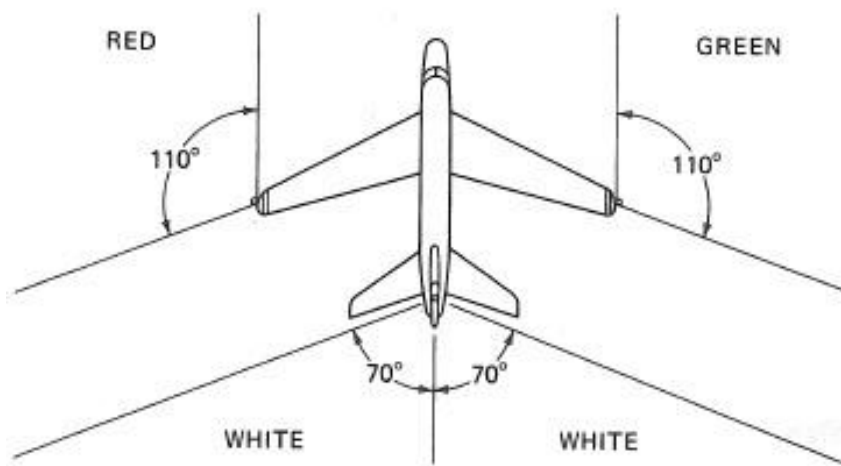
- **Φωτισμός χώρου επιβατών:** Ο φωτισμός του χώρου των επιβατών αποτελεί εξίσου σημαντικό κομμάτι στη διάρκεια μιας πτήσης. Δίνεται μεγάλη σημασία στον σχεδιασμό και την ποιότητα του φωτισμού των επιβατών από τις κατασκευάστριες εταιρίες. Η ένταση του φωτισμού πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μην προκαλεί το αίσθημα της δυσφορίας στους επιβάτες και ταυτόχρονα να πραγματοποιούνται όλες οι κινήσεις και οι διάφοροι χειρισμοί με ασφάλεια. Ο γενικός φωτισμός τις καμπίνας των επιβατών πραγματοποιείται με λαμπτήρες φθορισμού, οι οποίοι τις περισσότερες φορές είναι τοποθετημένοι στην οροφή. Ο χειρισμός τους γίνεται συνήθως από τους υπαλλήλους που βρίσκονται στον χώρο των επιβατών. Πέρα από τον γενικό φωτισμό υπάρχει και ο φωτισμός ασφάλειας, ο οποίος περιλαμβάνει τα φωτιστικά που δείχνουν την έξοδο κίνδυνου ή φωτίζουν τις χειρολαβές για την απεμπλοκή διαφόρων θυρίδων έκτακτης ανάγκης. Τα φωτιστικά αυτά διαθέτουν δικιά τους μπαταρία που ενεργοποιείται σε περίπτωση κινδύνου ή απώλεια ηλεκτρικής ισχύος. Τέλος το αεροπλάνο μπορεί να διαθέτει και ειδικό φωτισμό σε σημεία όπου ο γενικός φωτισμός δεν είναι ικανός να φτάσει όπως είναι ντουλάπια μικρών αντικειμένων και χώροι αποσκευών. Ο χειρισμός αυτών των φωτιστικών γίνεται από τοπικό διακόπτη [26 §10, 22 §13].

6.8 Εξωτερικός φωτισμός

Όσα αεροπλάνα πραγματοποιούν νυχτερινές πτήσεις, είναι υποχρεωτικό με βάση τη νομοθεσία να διαθέτουν εξωτερικό φωτισμό, ώστε να γίνεται γνωστή η θέση τους στον νυχτερινό ουρανό. Κάθε κύκλωμα φωτισμού χρησιμοποιείται για ένα συγκεκριμένο σκοπό. Για τον λόγο αυτό χωρίζονται σε κατηγορίες, οι οποίες είναι οι εξής:

- **Φώτα θέσης ή φώτα πλοήγησης (position lights or navigation lights)**
Ο συγκεκριμένος φωτισμός παρέχει πληροφορίες σε έναν εξωτερικό παρατηρητή για την κατεύθυνση που ακολουθεί ένα αεροπλάνο. Με βάση τους διεθνούς κανονισμούς αεροπλοΐας έχει θεσπιστεί κάθε αεροπλάνο που πραγματοποιεί τροχοδρόμηση ή πτήση κατά τη διάρκεια της νύχτας να διαθέτει φώτα πλοήγησης. Η κατηγορία αυτή αποτελείται από φωτιστικά σώματα, τα οποία είναι τοποθετημένα στις δυο άκρες των πτερύγων του αεροπλάνου καθώς και στο πίσω μέρος του. Η αριστερή άκρη της πτέρυγας φέρει φωτισμό κόκκινου χρώματος ενώ η δεξιά πράσινου χρώματος. Ο φωτισμός που είναι τοποθετημένος στο πίσω άκρο του αεροπλάνου είναι χρώματος λευκού. Η συγκεκριμένη εναλλαγή του χρώματος του φωτός έχει επιλεγεί ώστε να γίνεται γνωστή η κατεύθυνση του αεροπλάνου κατά τη διάρκεια της νύχτας. Στην περίπτωση που ένας εξωτερικός παρατηρητής βλέπει το κόκκινο φως στην αριστερή μεριά και το πράσινο στη δεξιά, τότε το αεροπλάνο απομακρύνεται από αυτόν. Όταν όμως ο παρατηρητής δει στον νυχτερινό ουρανό ότι ο αριστερός φωτισμός είναι πράσινος, ενώ ο δεξιός κόκκινος, τότε το

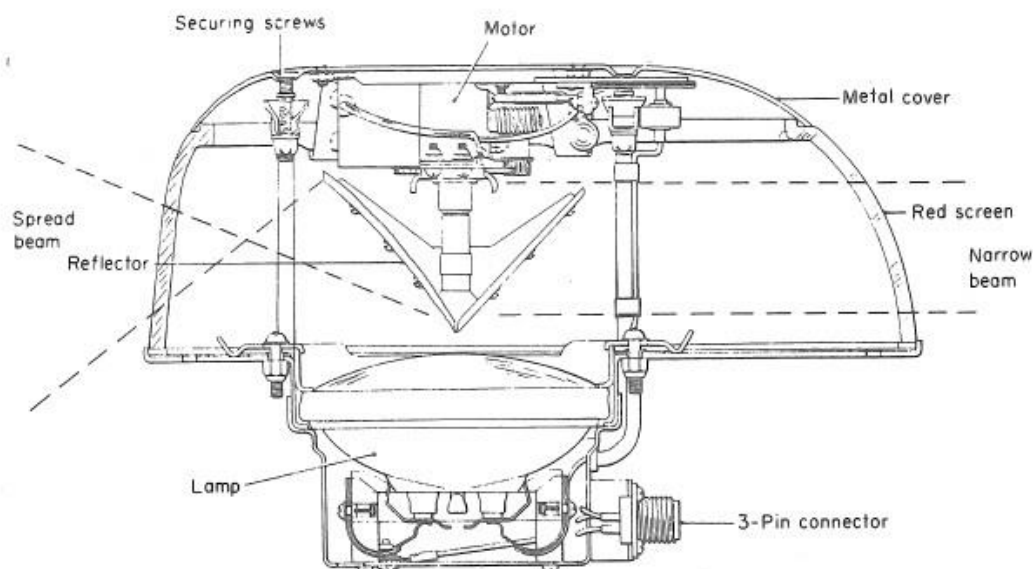
αεροπλάνο πλησιάζει προς αυτόν. Σε αρκετές περιπτώσεις ο φωτισμός πλοήγησης μπορεί να πάλλεται, ενώ σε άλλες είναι εφικτή η ρύθμιση της έντασης του φωτός. Στην εικόνα 6.11 φαίνονται τα σημεία του αεροπλάνου που είναι τοποθετημένα τα φώτα πλοήγησης.



Εικόνα 6.11: Φωτά πλοήγησης (navigation lights) σε αεροπλάνο [22].

- Φώτα αντισύγκρουσης (anti-collision light)

Τα φώτα αυτά δείχνουν το στίγμα του αεροπλάνου και σε συνδυασμό με τα φώτα πλοήγησης ο προσδιορισμός της θέσης του αεροπλάνου στον αέρα γίνεται ευκολότερη. Το σύστημα παραγωγής φωτός γίνεται με δυο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο το φωτιστικό σώμα διαθέτει έναν λαμπτήρα, ένα περιστρεφόμενο μηχανισμό καθώς και το εξωτερικό περίβλημα, το οποίο είναι κόκκινου χρώματος. Ο περιστρεφόμενος μηχανισμός διαθέτει έναν ανακλαστήρα ο οποίος βρίσκεται απέναντι από τον λαμπτήρα. Κατά τη λειτουργία ο λαμπτήρας φωτοβολεί και ταυτόχρονα ο ανακλαστήρας περιστρέφεται. Με τον τρόπο αυτό η φωτεινή δέσμη περιστρέφεται και γίνεται ορατή σε όλη της περίμετρο του αεροπλάνου. Η ταχύτητα περιστροφής του ανακλαστήρα είναι περίπου 45 rpm. Η δομή ενός περιστρεφόμενου φωτιστικού αντισύγκρουσης φαίνεται στην εικόνα 6.12. Στον δεύτερο τρόπο χρησιμοποιείται ένας πυκνωτής ο οποίος φορτίζεται από μια πηγή τάσης και εκφορτίζεται μεταξύ δυο ηλεκτροδίων που βρίσκονται εντός σωλήνα, ο οποίος περιέχει αέριο. Με την εκφόρτιση αυτή εντός του σωλήνα παράγεται φως. Η περίοδος της φόρτισης – εκφόρτισης είναι περίπου 70 φορές το λεπτό. Ένας εξωτερικός παρατηρητής και στις δυο κατηγορίες θα παρατηρήσει ένα κόκκινο φως, το οποίο αναβοσβήνει λειτουργώντας ως φάρος. Τα φώτα αντισύγκρουσης τοποθετούνται συνήθως στο άνω και στο κάτω εξωτερικό μέρος της ατράκτου. Εναλλακτικά τοποθετούνται στο άνω μέρος του ουραίου κάθετου σταθερού.



Εικόνα 6.12: Δομή περιστρεφόμενου φωτιστικού αντισύγκρουσης [26].

- Φώτα προσγείωσης (landing lights) και φώτα τροχοδρόμησης (taxi lights)

Τα φώτα προσγείωσης χρησιμοποιούνται όταν ένα αεροπλάνο προσεγγίζει ένα αεροδρόμιο και πρόκειται να πραγματοποιήσει προσγείωση σε αυτό, καθώς και όταν βρίσκεται στη διαδικασία της απογείωσης. Τα φώτα αυτά είναι λευκού χρώματος και φωτίζουν τον χώρο μπροστά από το ρύγχος του αεροπλάνου. Η τυπική ισχύς των λαμπτήρων που χρησιμοποιούνται είναι 600W και η τροφοδοσία γίνεται με συνεχή τάση 28V. Σε αρκετούς τύπους αεροπλάνων τα φώτα προσγείωσης διαθέτουν μηχανισμό με τον οποίον οι χειρίστες μπορούν να κατευθύνουν τη δέσμη του παραγόμενου φωτός στο επιθυμητό σημείο. Ο χειρισμός αυτός πραγματοποιείται μέσω διακοπών εντός του πιλοτήριου. Οι μηχανισμοί αυτοί διαθέτουν τερματικούς διακόπτες, οι οποίοι επιτρέπουν την κίνηση του φωτιστικού σώματος εντός συγκεκριμένων ορίων.

Τα φώτα τροχοδρόμησης χρησιμοποιούνται κατά τη διάρκεια που το αεροπλάνο βρίσκεται στον διάδρομο προσγείωσης και κινείται. Τα φώτα αυτά είναι υπεύθυνα να φωτίζουν τον χώρο του εδάφους μπροστά από το αεροπλάνο, ώστε η τροχοδρόμηση να γίνεται με ασφάλεια. Τις περισσότερες φορές τα φωτιστικά τροχοδρόμησης είναι τοποθετημένα στο σύστημα προσγείωσης. Για τον λόγο αυτό ενεργοποιούνται όταν οι τροχοί του αεροπλάνου είναι εκτεταμένοι. Η τυπική ισχύς των λαμπτήρων αυτών είναι 250W και τροφοδοτούνται συνήθως με συνεχή τάση 28V.



Εικόνα 6.13: Φως προσγείωσης σε αεροπλάνο (Landing light).



Εικόνα 6.14: Φώτα τροχοδρόμησης σε αεροπλάνο (Taxi light).

- Φωτισμός χώρων επιθεώρησης

Κατά τη διάρκεια μιας πτήσης αρκετές φορές είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί μια οπτική επιθεώρηση (μέσω μικρών θυρίδων) σε σημεία τα οποία βρίσκονται εξωτερικά του αεροπλάνου και οι χειριστές δεν έχουν πρόσβαση. Για τον λόγο αυτό οι κατασκευαστές έχουν τοποθετήσει φωτισμό σε καίρια σημεία, του οποίου ο χειρισμός γίνεται από τον εσωτερικό χώρο του αεροπλάνου. Τέτοια σημεία είναι το σύστημα προσγείωσης, οι πτέρυγες καθώς και οι κινητήρες

του αεροπλάνου. Τα φωτιστικά σώματα που χρησιμοποιούνται είναι τύπου προβολέα και φέρουν λαμπτήρες ισχύος από 60W έως 250W [26 §10, 22 §13].

6.9 Συμπεράσματα

Η παραγωγή τεχνητού φωτός με χρήση λαμπτήρων ήταν μια σημαντική εξέλιξη της τεχνολογίας. Το τεχνητό φως βοήθησε στην πραγματοποίηση εργασιών που κατά τη διάρκεια της νύχτας ή με ανεπαρκή φυσικό φωτισμό ήταν αδύνατες. Η πτήση ενός αεροπλάνου χωρίς την ύπαρξη τεχνητού φωτισμού θα ήταν αδύνατη. Αυτό αφορά κατά κύριο λόγο την ασφάλεια τόσο των επιβατών ενός αεροπλάνου, όσο και την ασφάλεια των ανθρώπων και εγκαταστάσεων στο έδαφος. Ο φωτισμός που φέρει ένα αεροπλάνο έχει θεσπιστεί με βάση διεθνούς κανονισμούς διότι πτήσεις πραγματοποιούνται συνεχώς μεταξύ διαφορετικών κρατών. Έτσι εάν δεν επικρατούσε ένα διεθνές πρότυπο, η προσέγγιση ενός αεροπλάνου στον διάδρομο προσγείωσης κατά τη διάρκεια της νύχτας θα ήταν δύσκολη μεταξύ διαφορετικών κρατών. Συνεπώς οι μετακινήσεις μπορεί να παρουσίαζαν δυσκολία στην εκτέλεση τους και ο κίνδυνος ατυχήματος θα ήταν μεγαλύτερος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΡΓΑΝΑ ΚΑΙ ΑΙΣΘΗΤΗΡΕΣ

7.1 Εισαγωγή

Η έννοια της μέτρησης περιέχει τη διαδικασία της σύγκρισης ιδίων μεγεθών, τα οποία είναι γνωστά εκ των προτέρων. Γι' αυτόν τον λόγο η επιστήμη οδηγήθηκε στη δημιουργία προτύπων, ώστε να είναι εφικτή η διαδικασία της σύγκρισης. Όσο απλή και αν ακούγεται η διαδικασία της σύγκρισης, δεν είναι πάντα εύκολη, διότι εμπεριέχεται ένα σφάλμα. Αυτό αποτέλεσε αντικείμενο μελέτης για τους επιστήμονες με σκοπό τη βελτίωση της ακρίβειας των μετρήσεων, ακόμα και για απλές μετρήσεις, όπως είναι το βάρος και μήκος. Με το πέρασμα των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας οι διατάξεις μέτρησης και οι συσκευές που χρησιμοποιήθηκαν έδωσαν ακριβέστερα αποτελέσματα στις μετρήσεις. Σε αυτό συντέλεσε αρχικά η ένταξη των ηλεκτρονικών και μετέπειτα η χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η σύγχρονη εξαγωγή μετρήσεων πραγματοποιείται με χρήση αισθητήρων, όπου κύριο σκοπό έχουν τη μετατροπή του φυσικού μεγέθους σε ηλεκτρικό σήμα. Η επεξεργασία αυτού του σήματος από κατάλληλες συσκευές (όργανα μετρήσεων) δίνει την τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Στα αεροπλάνα οι αισθητήρες και τα όργανα μέτρησης αποτελούν εξαρτήματα υψίστης σημασίας, διότι με αυτά ο χειρίστης έχει πλήρη εικόνα των συστημάτων που βρίσκονται σε λειτουργία [29 §1.1].

7.2 Μεγέθη και μονάδες

Τα μεγέθη στην τεχνολογία των μετρήσεων είναι πολύ σημαντικά, διότι αναφέρονται σε ποσότητες, που περιγράφουν φυσικά ή άλλα φαινόμενα. Τα φυσικά αυτά μεγέθη μπορούν να χωριστούν σε δυο μεγάλες κατηγορίες, οι οποίες είναι τα μονόμετρα και τα ανυσματικά. Τα μονόμετρα μεγέθη ορίζονται από την αριθμητική τιμή τους και τη μονάδα μέτρησης τους. Σε αντίθεση με τα ανυσματικά μεγέθη που εκτός αυτών για τον ορισμό τους χρειάζονται κατεύθυνση και σημείο εφαρμογής. Η μονάδα μέτρησης του φυσικού μεγέθους αποτελεί πολύ σημαντικό κομμάτι, διότι με την εσφαλμένη χρήση της μπορεί να δημιουργηθεί παραλογισμός. Για τον λόγο αυτό υπάρχουν πρότυπα, τα οποία αντιστοιχούν τα φυσικά μεγέθη με τις μονάδες μέτρησης. Από το 1960 η επιστημονική κοινότητα εξέδωσε ένα διεθνώς αποδεκτό σύστημα με τις μονάδες των θεμελιωδών μεγεθών (SI). Ονομάστηκαν καθ' αυτόν τον τρόπο διότι όλα τα υπόλοιπα μεγέθη (παράγωγα μεγέθη) προκύπτουν βάσει αυτών. Παρόλα αυτά δεν χρησιμοποιούνται πάντα οι μονάδες μέτρησης του διεθνούς συστήματος. Το φαινόμενο αυτό συναντάται πολύ συχνά στα αεροπλάνα τα οποία κατασκευάζονται στην Αμερική, όπου ακολουθούν ένα δικό τους σύστημα μεγεθών που ονομάζεται USCS (United Stage Customary System). Συνεπώς αρκετές φορές είναι απαραίτητη η μετατροπή των μονάδων μέτρησης αυτών στο διεθνές σύστημα. Στον πίνακα 7.1 φαίνονται τα θεμελιώδη μεγέθη με τη μονάδα μέτρησης τους,

καθώς και τον συμβολισμό τους. Ενώ στον πίνακα 7.2 φαίνονται κάποια παράγωγα μεγέθη με τη μονάδα μέτρησης και τον συμβολισμό τους.

Πίνακας 7.1: Θεμελιώδη μεγέθη στο SI [29].

Μέγεθος	Μονάδα	Σύμβολο
Μήκος	Μέτρο	m
Μάζα	Χιλιόγραμμα	Kg
Χρόνος	Δευτερόλεπτο	s
Ηλεκτρικό ρεύμα	Ampere	A
Θερμοκρασία	Kelvin	K
Ένταση φωτός	Candela	cd
Ποσότητα ουσίας	mole	mol

Πίνακας 7.2: Παράγωγα μεγέθη στο SI [29]

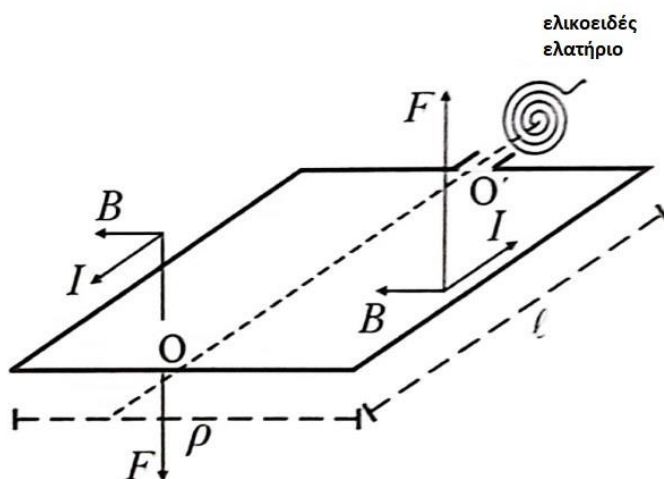
Μέγεθος	Μονάδα	Σύμβολο
Συχνότητα	Hertz	Hz
Πυκνότητα	Χιλιόγραμμα ανά κυβικό μέτρο	kg/m^3
Ταχύτητα	Μέτρο ανά δευτερόλεπτο	m/s
Δύναμη	Newton	N
Πίεση	Newton ανά τετραγωνικό μέτρο	N/m^2
Ενέργεια	Joule	J
Ισχύς	Watt	W
Ποσότητα ηλεκτρισμού	Coulomb	Cb
Διαφορά δυναμικού	Volt	V
Ηλεκτρική αντίσταση	Ohm	Ω
Ηλεκτρική χωρητικότητα	Farad	F
Μαγνητική ροή	Weber	Wb
Επαγωγή	Henry	H
Ηλεκτρική αγωγιμότητα	Siemens	S

Για την παραγωγή των θεμελιωδών μεγεθών χρησιμοποιήθηκαν φυσικά αντικείμενα ή διατάξεις, τα οποία ονομάστηκαν πρότυπα. Υπάρχουν δυο κατηγορίες προτύπων, οι οποίες είναι τα πρωτογενή και τα δευτερογενή. Τα πρωτογενή πρότυπα φυλάσσονται σε ειδικούς χώρους με συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος, ώστε να μην επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες. Ειδικά και σύνθετα εγχειρίδια περιγράφουν ακριβώς τη λειτουργία και την ακρίβεια αυτών των προτύπων. Τα

δευτερογενή πρότυπα είναι πιο εύχρηστα και συνήθως παρουσιάζουν μικρότερη ακρίβεια από αυτήν των πρωτογενών. Χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο για διακριβώσεις οργάνων μέτρησης. Με τη διαδικασία της διακρίβωσης το όργανο μέτρησης ελέγχεται για το σφάλμα που παρουσιάζει στη μέτρηση σε σχέση με το πρότυπο. Σε περίπτωση απόκλισης εκτός των ορίων, τότε υπάρχει η αντίστοιχη ρύθμιση του οργάνου. Οι διακριβώσεις αυτές τις περισσότερες φορές γίνονται σε διαπιστευμένα εργαστήρια, τα οποία πιστοποιούν τη μετρητική ικανότητα του αντίστοιχου οργάνου μέτρησης [29 §1.2, 1.3].

7.3 Όργανο κινητού πηνίου

Το όργανο κινητού πηνίου αναφέρεται πολλές φορές και ως όργανο κινητού πλαισίου. Όπως φαίνεται στην εικόνα 7.1 αποτελείται από ένα πλαίσιο που έχει διαστάσεις $\rho \times \ell$ και είναι τυλιγμένοι N σπείρες. Ο άξονας περιστροφής του πλαισίου είναι η διακεκομμένη ευθεία OO' , η οποία περνά από το κέντρο των πλευρών με μήκος ρ . Το πλαίσιο πραγματοποιεί περιστροφή μόνο γύρω από τον άξονα OO' και βρίσκεται μέσα σε ομογενές μαγνητικό πεδίο, το οποίο δημιουργείται από τους πόλους ενός φυσικού μονίμου μαγνήτη. Συνεπώς οι μαγνητικές γραμμές του μαγνητικού πεδίου είναι παράλληλες με την πλευρά μήκους ρ του πλαισίου και κάθετες με την πλευρά μήκους ℓ του πλαισίου.



Εικόνα 7.1: Αγώγιμο πλαίσιο οργάνου κινητού πηνίου [29].

Όταν οι αγωγοί του πλαισίου διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα I , τότε δημιουργούνται ζεύγος δυνάμεων στις πλευρές μήκους ℓ σύμφωνα με τον κανόνα των τριών δακτύλων.

$$\vec{F} = I(\vec{\ell} \times \vec{B}) \quad (\text{σχέση 7.1})$$

Η ροπή που αναπτύσσεται στο πλαίσιο λόγω του ζεύγους δυνάμεων ισούται με:

$$\vec{M} = \vec{\rho} \times \vec{F} \quad (\text{σχέση 7.2})$$

Η ροπή που αναπτύσσεται μπορεί να εξισορροπηθεί με τη ροπή που αναπτύσσει ένα ελικοειδές ελατήριο με σταθερά k .

$$M = F\rho = M_\varepsilon = k\varphi \quad (\text{σχέση 7.3})$$

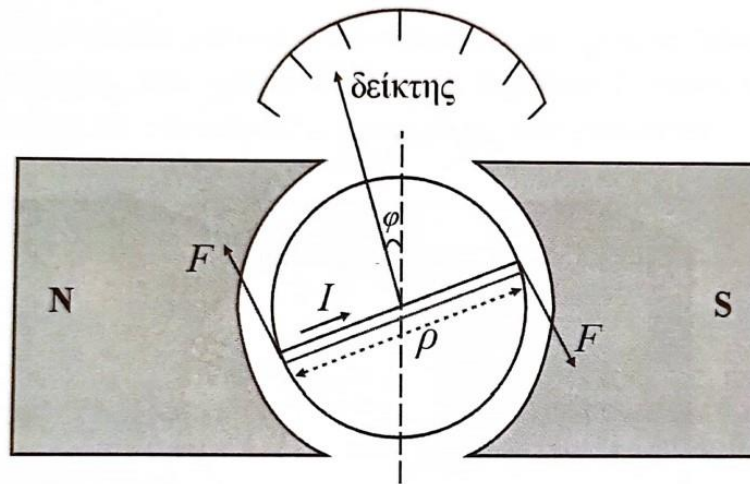
Όπου φ : η τελική γωνιά στροφής στη θέση ισορροπίας.

Εάν γίνει αντικατάσταση των σχέσεων 7.1 και 7.2 στη σχέση 7.3 τότε προκύπτει:

$$BI\ell N\rho = k\varphi \Rightarrow I = \frac{k}{B\ell\rho N} \varphi = \frac{k}{BSN} \varphi \quad (\text{σχέση 7.4})$$

Όπου S : το εμβαδόν του κάθε πλαισίου

Από τη σχέση 7.4 παρατηρείται ότι η εξάρτηση του ρεύματος και της θέσης του δείκτη του οργάνου παρουσιάζει μια γραμμική εξάρτηση.



Εικόνα 7.2: Δομή ενός οργάνου κινητού πηνίου [29].

Τα όργανα κινητού πηνίου παρουσιάζουν μέγιστο ρεύμα κλίμακας (I_{fs}), το οποίο αντιστοιχεί στην τιμή του ρεύματος, για την οποία ο δείκτης του οργάνου φτάνει στη μέγιστη οριακή θέση. Μέσω της σχέσης 7.4 προκύπτει ότι:

$$I_{fs} = \frac{k}{BSN} \varphi_{max} \quad (\text{σχέση 7.5})$$

Στα όργανα αυτά η φορά του ρεύματος του πλαισίου έχει μεγάλη σημασία, διότι με εναλλαγή της φοράς του το όργανο τείνει να περιστραφεί σε αντίθετη φορά. Επιπλέον ο αριθμός των τυλιγμάτων του πλαισίου καθώς και η διατομή του αγωγού που χρησιμοποιείται επηρεάζουν την εσωτερική αντίσταση του οργάνου, η οποία συμβολίζεται $R_{εσ}$.

Έστω ότι ένα όργανο κινητού πηνίου τροφοδοτηθεί με καθαρά ημιτονοειδές εναλλασσόμενο ρεύμα όπου η στιγμιαία τιμή της έντασης του δίνεται από τη σχέση:

$$i(t) = I_p \sin(\omega t + \theta) \quad (\text{σχέση 7.6})$$

Όπου:

$I_p = I\sqrt{2}$: η μέγιστη τιμή του ρεύματος

I : η ενεργός τιμή του καθαρά ημιτονοειδούς αυστηρώς εναλλασσόμενου ρεύματος

Η γωνιά απόκλισης του δείκτη του οργάνου σε αυτή την περίπτωση δίνεται από τη σχέση:

$$\varphi(t) = \frac{i(t)}{\frac{k}{BSN}} \quad (\text{σχέση 7.7})$$

Όπου σε αυτήν την περίπτωση η γωνιά φ εξαρτάται από τη συχνότητα του ρεύματος. Στην περίπτωση που η συχνότητα του ρεύματος που διατρέχει το πλαίσιο είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα που μπορεί να αντιδράσει το όργανο, ο δείκτης του θα ακολουθήσει τη μέση τιμή του.

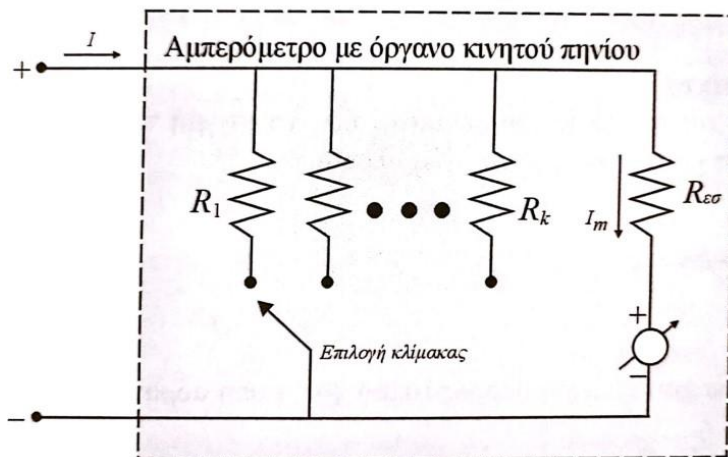
$$\begin{aligned} \varphi_{\mu} &= \frac{I\sqrt{2}}{\frac{k}{BSN} T} \int_0^T \sin(\omega t + \theta) dt = \frac{I\sqrt{2}}{\frac{k}{BSN} \omega T} [\cos(\omega t + \theta)]_0^T = \\ &= -\frac{I\sqrt{2}}{\frac{k}{BSN} \omega T} \left[\cos\left(\frac{2\pi}{T} T + \theta\right) - \cos \theta \right] = 0 \quad (\text{σχέση 7.8}) \end{aligned}$$

Με βάση τη σχέση 7.8 το όργανο κινητού πηνίου δεν αντιδρά σε ρεύματα ημιτονικής μορφής. Παρόλα αυτά είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν όργανα κινητού πηνίου για μέτρηση ημιτονοειδούς ρεύματος εάν χρησιμοποιηθεί ανορθωτική διάταξη και το όργανο βαθμονομηθεί στην ενεργή τιμή του ρεύματος.

Τα όργανα κινητού πηνίου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αμπερόμετρα, ωμόμετρα και βολτόμετρα.

- Συνδεσμολογία αμπερομέτρου

Στη συνδεσμολογία αυτή του οργάνου χρησιμοποιούνται αντιστάσεις κλίμακας R_k , οι οποίες συνδέονται παράλληλα. Αυτό γίνεται, ώστε το ρεύμα που πρόκειται να μετρηθεί να μην υπερβαίνει το μέγιστο επιτρεπτό I_{max} .



Εικόνα 7.3: Όργανο κινητού πηνίου σε συνδεσμολογία αμπερομέτρου [29].

Με τη βοήθεια της εικόνας μπορεί να υπολογιστεί το μετρούμενο ρεύμα I ως εξής:

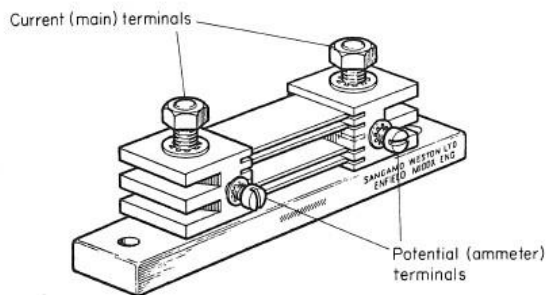
$$I_m R_{\varepsilon\sigma} = (I - I_m) R_k \Rightarrow I = I_m \left(\frac{R_{\varepsilon\sigma}}{R_k} + 1 \right) \quad (\text{σχέση 7.9})$$

Η σχέση 7.9 εκφράζει τη γραμμική εξάρτηση του μετρούμενου ρεύματος I με το ρεύμα που διαρρέει το όργανο κινητού πηνίου I_m . Γνωρίζοντας τις τιμές των αντιστάσεων κλίμακας καθώς και του μέγιστου ρεύματος του οργάνου είναι εφικτό η βαθμονόμηση του αμπερομέτρου για ρεύμα κλίμακας I_k , το οποίο αντιστοιχεί στο μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα του οργάνου.

$$I_k = I_m \left(\frac{R_{\varepsilon\sigma}}{R_k} + 1 \right) \quad (\text{σχέση 7.10})$$

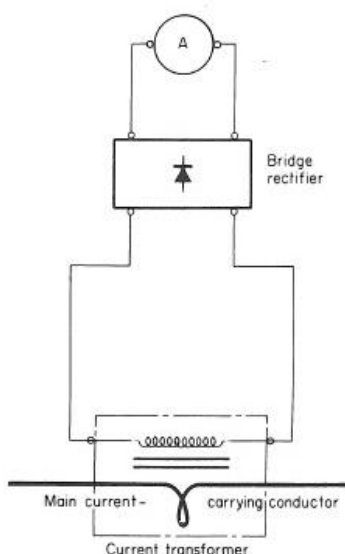
Οι ενδιάμεσες τιμές στην κλίμακα προσδιορίζονται αναλογικά και χαράσσονται πάνω στο καντράν του αμπερομέτρου. Η σύνδεση του αμπερομέτρου στο κύκλωμα γίνεται σε σειρά. Συνεπώς η παρεμβολή αυτή εισάγει ένα μόνιμο σφάλμα στη μέτρηση. Λόγω της μικρής αντίστασης εισόδου που παρουσιάζει το όργανο, η συνολική επίδραση στο κύκλωμα θα είναι μικρή. Για μεγαλύτερες κλίμακες η παράλληλη αντίσταση κλίμακας R_k θα λαμβάνει μικρότερες τιμές. Για τον λόγο αυτό και η συνολική αντίσταση εισόδου θα μικραίνει λόγω παράλληλης σύνδεσης. Συνεπώς θα μειώνεται και το σφάλμα της μέτρησης [29 §3.2].

Στα αεροπλάνα για τη μέτρηση της έντασης του ρεύματος χρησιμοποιούνται όργανα κινητού πηνίου. Συνήθως η ένταση του ρεύματος μετριέται στην έξοδο των γεννητριών ή σε κάποιο κύριο ζυγό διανομής. Σε όλες τις περιπτώσεις το ρεύμα που πρόκειται να μετρηθεί είναι μεγάλης έντασης. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται μια ειδικής κατασκευής αντίσταση κλίμακας (shunt) όπως φαίνεται στην εικόνα 7.4. Η τιμή της ωμικής αντίστασης αυτής είναι μικρή και διαθέτει τέσσερα άκρα. Τα άκρα μεγαλύτερης διατομής συνδέονται σε σειρά με το κύκλωμα ισχύος ενώ τα άκρα μικρότερης διατομής με το όργανο κινητού πηνίου.



Εικόνα 7.4: Δομή αντίστασης κλίμακας που χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα [26].

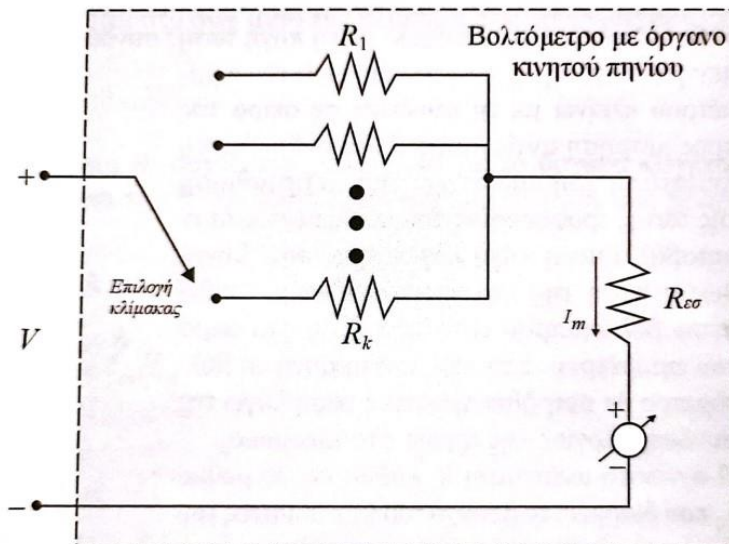
Για τη μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος αρχικά χρησιμοποιείται ένας μετασχηματιστής έντασης ώστε να υποβιβαστεί η ένταση του ρεύματος ανάλογα με τον λόγο μετασχηματισμού. Στη συνέχεια το υποβιβασμένο ρεύμα οδηγείται σε μια ανορθωτική διάταξη και από εκεί στο όργανο κινητού πηνίου, όπου και πραγματοποιείται η μέτρησή του. Μια τέτοια διάταξη φαίνεται στην εικόνα 7.5 παρακάτω [26 §8].



Εικόνα 7.5: Διάταξη μέτρησης εναλλασσόμενου ρεύματος με όργανο κινητού πηνίου [26].

- Συνδεσμολογία βολτομέτρου

Στη συνδεσμολογία αυτή χρησιμοποιούνται αντιστάσεις κλίμακας, οι οποίες συνδέονται σε σειρά με το όργανο κινητού πηνίου, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.6.



Εικόνα 7.6: Συνδεσμολογία βολτομέτρου με χρήση οργάνου κινητού πηνίου [29].

Η μετρούμενη τάση V δημιουργεί ένα ρεύμα I_m , το οποίο ρέει μέσα στο τύλιγμα του οργάνου του κινητού πηνίου.

$$I_m = \frac{V}{R_k + R_{\varepsilon\sigma}} \Rightarrow V = I_m(R_k + R_{\varepsilon\sigma}) \quad (\text{σχέση 7.11})$$

Η σχέση 7.11 εκφράζει τη γραμμική εξάρτηση της μετρούμενης τάσης V με το ρεύμα I_m που διαρρέει το όργανο κινητού πηνίου. Όταν το όργανο διαρρέεται με το μέγιστο επιτρεπτό ρεύμα I_{max} τότε μπορεί να οριστεί και η αντίστοιχη μέγιστη τάση κλίμακας V_k με γνωστές τιμές ωμικής αντίστασης $R_k, R_{\varepsilon\sigma}$ μέσω της σχέσης:

$$V_k = I_{max}(R_k + R_{\varepsilon\sigma}) \quad (\text{σχέση 7.12})$$

Οι ενδιάμεσες τιμές της τάσης προσδιορίζονται αναλογικά και χαράσσονται πάνω στην οθόνη ενδείξεων του οργάνου.

Η σύνδεση του βολτομέτρου γίνεται παράλληλα στο κύκλωμα που πρόκειται να μετρηθεί. Με την παρεμβολή του βολτομέτρου στο κύκλωμα, παρουσιάζεται μια διαταραχή λόγω της συνολικής αντίστασης εισόδου ($R_k + R_{\varepsilon\sigma}$). Η διαταραχή αυτή μειώνεται με την αύξηση της συνολικής αντίστασης εισόδου. Για τον λόγο αυτό η σύνδεση του βολτομέτρου στο κύκλωμα δημιουργεί ένα

μόνιμο σφάλμα (συστηματικό σφάλμα). Για μεγάλες κλίμακες η αντίσταση R_k αυξάνεται, ώστε το ρεύμα που διαρρέει το τύλιγμα του οργάνου κινητού πηνίου να μην υπερβεί τη μέγιστη επιτρεπτή. Με την αύξηση της αντίστασης κλίμακα αυξάνεται και η συνολική αντίσταση εισόδου. Συνεπώς το συστηματικό σφάλμα μειώνεται.

Τα όργανα κινητού πηνίου, τα οποία χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα ως βολτόμετρα διαθέτουν μια εσωτερική αντίσταση κλίμακας. Αυτό γίνεται, διότι η τάση που χρησιμοποιείται είναι σταθερή και δεν χρειάζεται αλλαγή κλίμακας για να μετρηθεί. Όταν η τάση που πρόκειται να μετρηθεί είναι εναλλασσόμενη, τότε παρεμβάλλεται ένας μετασχηματιστής τάσης, ο οποίος υποβιβάζει την τάση ανάλογα με τον λόγο μετασχηματισμού. Στη συνέχεια η υποβιβασμένη τάση οδηγείται σε μια ανορθωτική διάταξη και στη συνέχεια στο όργανο. Στην εικόνα 7.7 φαίνεται ένα όργανο κινητού πηνίου, το οποίο συνδέεται ως βολτόμετρο [29 §3.2].



Εικόνα 7.7: Όργανο κινητού πηνίου σε χρήση βολτομέτρου

7.4 Μέτρηση θερμοκρασίας

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται αισθητήρια, τα οποία ονομάζονται θερμόμετρα. Τα αισθητήρια αυτά αναπτυχθήκαν ώστε να ανιχνεύουν και να μετατρέπουν ένα φυσικό μέγεθος (θερμοκρασία) σε ηλεκτρικό σήμα, το οποίο οδηγείται σε ένα κύκλωμα προσαρμογής. Το κύκλωμα αυτό είναι υπεύθυνο να δώσει στο ηλεκτρικό σήμα την κατάλληλη μορφή, ώστε να είναι εφικτή η ανάγνωση του από το όργανο. Τα θερμόμετρα αποτελούν ένα από τα βασικότερα αισθητήρια, τα οποία μελετήθηκαν και αναπτυχθήκαν στο παρελθόν. Είναι ευρέως διαδεδομένη η χρήση τους σε σύγχρονες εφαρμογές και για την υλοποίησή τους ακολουθούνται διάφορες αρχές της φυσικής. Οι βασικές κατηγορίες θερμομέτρων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής:

- Θερμόμετρα τάσης – θερμοζεύγη (thermocouples)
- Θερμόμετρα αντίστασης – RTD και θερμίστορ
- Θερμόμετρα ημιαγωγικών ενώσεων [29 §8.1, 8.2]

7.4.1 Θερμοζεύγη (thermocouples)

Τα θερμοζεύγη είναι παθητικά αισθητήρια θερμοκρασίας. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρειάζονται εξωτερική πηγή τάσης για να λειτουργήσουν αλλά παράγουν τα ίδια. Η παραγόμενη αυτή τάση είναι ανάλογη με τη μετρούμενη θερμοκρασία. Τα θερμοηλεκτρικά στοιχεία (θερμοζεύγη) χρησιμοποιούνται συχνά και το εύρος της θερμοκρασίας που καλύπτουν είναι μεγάλη. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για θερμοκρασίες από -270°C έως 3000°C . Η ταχύτητα απόκρισης τους είναι μεγάλη με τις μεταβολές της θερμοκρασίας. Επιπλέον δεν αναπτύσσουν εσωτερική θερμοκρασία λόγω τροφοδοσίας διότι είναι παθητικά. Παρουσιάζουν ευκολία στη χρήση τους και μεγάλη ακρίβεια στις μετρήσεις. Παρόλα αυτά παρουσιάζουν κάποιες ιδιαιτερότητες όσο αφορά τη θερμοκρασία αναφοράς τους, καθώς και στο εύρος θερμοκρασιών όταν είναι απαραίτητη η αλλαγή τύπου θερμοζεύγους.

Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στο φαινόμενο Seebeck. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, όταν δυο διαφορετικά μέταλλα έρθουν σε επαφή, δημιουργώντας έτσι έναν κλειστό βρόχο (εικόνα 7.8 α) και τα σημεία επαφών βρίσκονται σε διαφορετικές θερμοκρασίες T_1 και T_2 , τότε ρέει ηλεκτρικό ρεύμα που ισούται με:

$$I = \frac{E}{R} \quad (\text{σχέση 7.13})$$

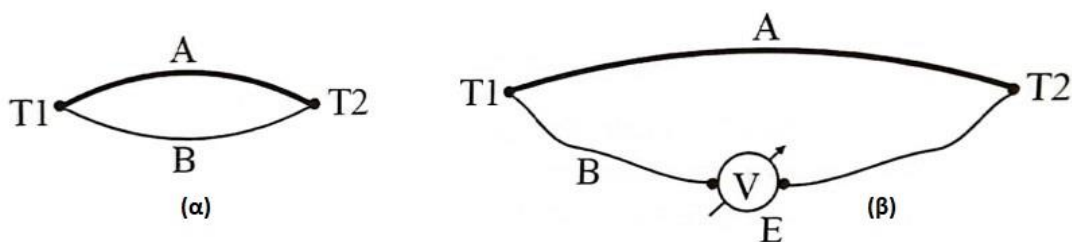
Όπου

E : η θερμοηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται στον βρόχο

R : ωμική αντίσταση των αγωγών

Όταν το κύκλωμα αυτό διακοπεί και τοποθετηθεί ένα βολτόμετρο με πολύ μεγάλη εσωτερική αντίσταση, τότε η ένδειξή του αντιστοιχεί στη θερμοηλεκτρική τάση του ζεύγους (εικόνα 7.8 β).

Η κατασκευή θερμομέτρου με βάση το φαινόμενο Seebeck είναι απλή διαδικασία, διότι η μόνη απαίτηση που παρουσιάζεται είναι η διατήρηση σταθερής θερμοκρασίας στο ένα άκρο της σύνδεσης (θερμοκρασία αναφοράς ή ψυχρή επαφή). Με εφαρμογή της συγκεκριμένης απαίτησης η μετρούμενη θερμοηλεκτρική τάση θα είναι ανάλογη του άλλου άκρου του βρόχου, το οποίο τοποθετείται στο σημείο μέτρησης (θερμή επαφή).



Εικόνα 7.8: α) διάταξη θερμοζεύγους β) μέτρηση θερμοηλεκτρικής τάσης [29].

Με το πέρασμα των ετών έχουν δοκιμαστεί πολλοί συνδυασμοί μετάλλων για τη δημιουργία θερμοζευγών. Παρόλα αυτά οι επικρατέστεροι τύποι αναφέρονται στη σχετική βιβλιογραφία με τα γράμματα *J, T, K, E, R, S*. Οι βασικές απαιτήσεις για τη δημιουργία ενός θερμοζεύγους είναι:

- Η μεγάλη ευαισθησία
- Η γραμμική συμπεριφορά μεταξύ της θερμοηλεκτρικής τάσης και της μετρούμενης θερμοκρασίας
- Ο χαμηλός βαθμός οξείδωσης σε υψηλές θερμοκρασίες

Στον πίνακα 7.3 φαίνονται τα χαρακτηριστικά μερικών εμπορικών θερμοζευγών.

Πίνακας 7.3: Χαρακτηριστικά πιο διαδεδομένων θερμοζευγών [29].

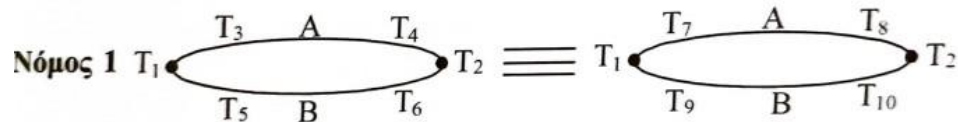
Τύπος και μέταλλα αγωγών θερμοζεύγους	Εύρος λειτουργίας	Χρωματικός κώδικας καλωδίων σύνδεσης
J: Σίδηρος (+) Κονσταντάνιο (-)	-184°C – 760°C	Λευκό (+) Κόκκινο (-)
T: Χαλκός (+) Κονσταντάνιο (-)	-184°C – 400°C	Μπλε (+) Κόκκινο (-)
K: Νικέλιο / Χρώμιο (+) Νικέλιο / Αλουμίνιο (-)	-184°C – 1260°C	Κίτρινο (+) Κόκκινο (-)

Για να επιτευχθεί η σωστή μέτρηση του θερμοζεύγους, είναι αναγκαίο να επιτευχθεί μια σταθερή θερμοκρασία στην ψυχρή επαφή, η οποία θα είναι γνωστή. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται αντιστάθμιση της θερμοκρασίας στο σημείο αναφοράς, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η μετρούμενη θερμοκρασία εξαρτάται μόνο από το σημείο της θέρμης επαφής. Αυτό επιτυγχάνεται με χρήση ισόθερμων πλακών, οι οποίες εξασφαλίζουν σταθερή θερμοκρασία στην ψυχρή επαφή του θερμοζεύγους μειώνοντας σε μεγάλο βαθμό το σφάλμα στη μέτρηση.

Η θερμοκρασιακή συμπεριφορά των θερμοζευγών περιγράφεται από πέντε νόμους, οι οποίοι είναι οι εξής:

- 1^{ος} νόμος

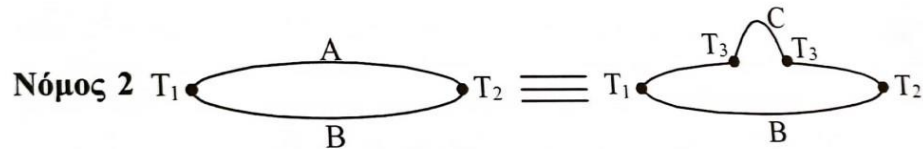
Η θερμοηλεκτρική τάση, η οποία αναπτύσσεται εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία που επικρατεί στα δυο σημεία ένωσης και όχι από τη θερμοκρασία που επικρατεί σε όλα τα σημεία του βρόχου. Αυτό αποτελεί και το βασικό πλεονέκτημα των θερμοζευγών, το οποίο αναφέρεται ως σημειακή μέτρηση της θερμοκρασίας.



Εικόνα 7.9: Σχηματική απεικόνιση 1^{ου} νόμου [29].

- 2^{ος} νόμος

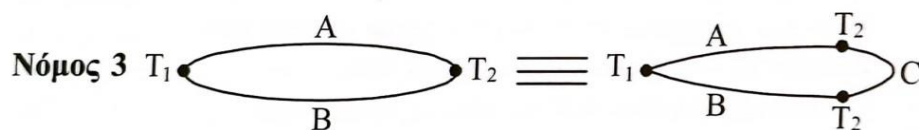
Με την παρεμβολή τρίτου διαφορετικού μετάλλου σε σειρά στον βρόχο η θερμοηλεκτρική τάση που αναπτύσσεται δεν μεταβάλλεται. Αυτό υποδηλώνει ότι είναι εφικτή η παρεμβολή οργάνου μέτρησης με ακροδέκτες χωρίς να υπάρξει αλλοίωση της μέτρησης.



Εικόνα 7.10: Σχηματική απεικόνιση 2^{ου} νόμου [29].

- 3^{ος} νόμος

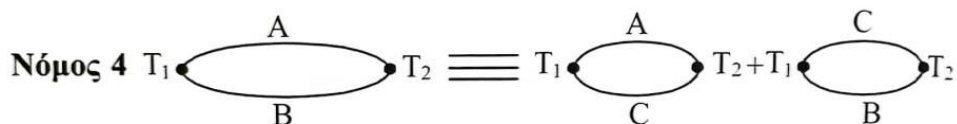
Εάν υπάρξει παρεμβολή τρίτου μετάλλου μεταξύ των μετάλλων στη θερμή ή την ψυχρή ένωση η θερμοηλεκτρική τάση δεν μεταβάλλεται. Αυτό υποδηλώνει ότι είναι εφικτή η συγκόλληση των δυο μετάλλων του θερμοζεύγους με χρήση διαφορετικού μετάλλου.



Εικόνα 7.11: Σχηματική απεικόνιση 3^{ου} νόμου [29].

- 4^{ος} νόμος

Η αναπτυσσόμενη θερμοηλεκτρική τάση σε ένα θερμοζεύγος, το οποίο αποτελείται από μέταλλα Α και Β, ισούται με το άθροισμα της θερμοκρασιακής τάσης, η οποία αναπτύσσεται από τον συνδυασμό των μετάλλων Α και C και των μετάλλων Β και C. Με την χρήση αυτού του νόμου είναι εφικτή η διακρίβωση της θερμοηλεκτρικής τάσης των μετάλλων Α και Β με μέταλλο αναφοράς το C.

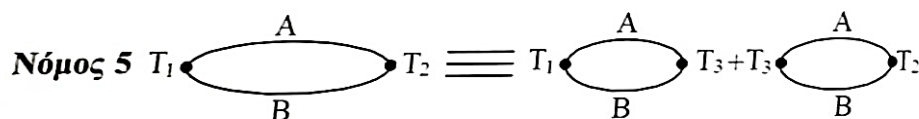


Εικόνα 7.12: Σχηματική απεικόνιση 4^{ου} νόμου [29].

- 5^{ος} νόμος

Ο νόμος αυτός καλείται και ως νόμος ενδιάμεσης θερμοκρασίας και περιγράφεται πλήρως από τη σχέση [29 §8.2] :

$$E(T_1, T_2) = E(T_1, T_3) + E(T_2, T_3) \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 7.14)$$



Εικόνα 7.13: Σχηματική απεικόνιση 5^{ου} νόμου [29].

Η χρήση των θερμοζευγών (thermocouples) είναι ευρέως διαδεδομένη στα αεροπλάνα. Χρησιμοποιούνται για μέτρηση θερμοκρασίας σε αεροκινητήρες και σε περιοχές όπου η θερμοκρασία είναι μεγάλη. Ο κυριότερος τύπος θερμοζεύγους που συναντάται σε αυτές τις εφαρμογές είναι ο Κ, διότι παρουσιάζει μεγάλο εύρος λειτουργίας. Αρκετές φορές οι κινητήρες των αεροπλάνων διαθέτουν συστοιχίες θερμοζευγών, οι οποίες ονομάζονται θερμοστήλες. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση της ευαισθησίας των θερμοζευγών και εξασφαλίζεται η αξιοπιστία της μέτρησης. Στην εικόνα 7.14 φαίνεται μια τέτοια συστοιχία από θερμοζεύγη στον κινητήρα αεροπλάνου.



Εικόνα 7.14: Συστοιχία θερμοζευγών περιμετρικά του κινητήρα αεροπλάνου.

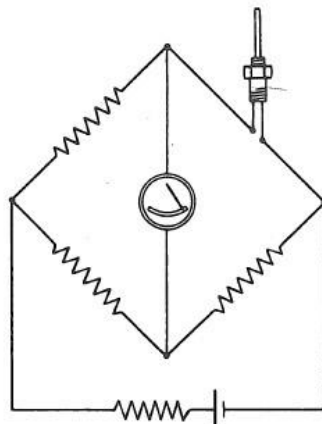
7.4.2 Αισθητήρια αγωγών (RTD)

Η αρχή λειτουργίας των συγκεκριμένων αισθητήρων βασίζεται στη μεταβολή της αντίστασης με την εναλλαγή της θερμοκρασίας. Όταν σε έναν αγωγό υπάρξει αύξηση της θερμοκρασίας, τότε αυξάνονται και οι ταλαντώσεις των ηλεκτρονίων και των ιόντων στο εσωτερικό του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση των συγκρούσεων με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και την ταυτόχρονη μείωση της ταχύτητάς τους. Αυτό μεταφράζεται με την αύξηση της τιμής της αντίστασης.

Το πιο διαδεδομένο υλικό για την κατασκευή τέτοιων αισθητήρων είναι ο λευκόχρυσος, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερη γραμμικότητα στη μεταβολή της αντίστασης σε σχέση με τη θερμοκρασία συγκριτικά με άλλα υλικά. Η χρήση λευκόχρυσου ως αισθητήρα RTD έχει επικρατήσει σε δύο τύπους, οι οποίοι είναι: ο PT100 και ο PT1000. Η συγκεκριμένη ονομασία έχει προέλθει από την τιμή της ωμικής αντίστασης κάθε τύπου στους 0°C. Η τιμή της αντίστασης του PT100 είναι 100Ω του PT1000 είναι 1000Ω [29 §8.2.2.1].

Οι αισθητήρες RTD στα αεροπλάνα βρίσκουν εφαρμογή στη μέτρηση της θερμοκρασίας, η οποία δεν ξεπερνά τους 150°C. Χρησιμοποιούνται για μέτρηση θερμοκρασίας χώρου επιβατών, καθώς και μέτρηση θερμοκρασίας υγρών, όπως είναι το λάδι του κινητήρα. Λόγω ότι ένας αισθητήρας RTD μεταβάλλει την τιμή της αντίστασης του και δεν παράγει κάποια τάση, όπως τα θερμοζεύγη, για τη

λειτουργία του χρειάζεται ένα κύκλωμα οδήγησης. Το κύκλωμα οδήγησης μπορεί να είναι μια γέφυρα Wheatstone, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.15.



Εικόνα 7.15: Τυπική διάταξη γέφυρας Wheatstone με αισθητήρα RTD [22].

Αρχικά σε αυτήν τη συνδεσμολογία πρέπει να ορισθεί το σημείο ισορροπίας της γέφυρας σε μια θερμοκρασία αναφοράς. Τις περισσότερες φορές αυτή η τιμή ισορροπίας είναι η θερμοκρασία 0°C. Στο σημείο ισορροπίας όλες οι αντιστάσεις πρέπει να έχουν ίδια τιμή ωμικής αντίστασης. Για τον λόγο αυτό όταν χρησιμοποιείται RTD τύπου PT100 οι υπόλοιπες αντιστάσεις της γέφυρας θα έχουν τιμή 100Ω, ενώ, όταν χρησιμοποιείται PT1000, θα έχουν 1000Ω. Όταν η γέφυρα βρίσκεται σε ισορροπία ο μεσαίος κλάδος που είναι τοποθετημένο το όργανο δεν διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Με την αύξηση της θερμοκρασίας στον αισθητήρα RTD υπάρχει ταυτόχρονη αύξηση και της ωμικής του αντίστασης. Όταν συμβεί αυτό η ισορροπία της γέφυρας διαταράσσεται και στον μεσαίο κλάδο ρέει ηλεκτρικό ρεύμα. Με τη ροή ηλεκτρικού ρεύματος στο μεσαίο κλάδο ο δείκτης του οργάνου μετακινείται δείχνοντας έτσι τη θερμοκρασία που ανίχνευσε ο αισθητήρας [22 §17].



Εικόνα 7.16: Αισθητήρας θερμοκρασίας μεταβλητής αντίστασης (RTD).

7.5 Μέτρηση ταχύτητας – στροφών

Από τις πιο σημαντικές πληροφορίες που μπορεί να λάβει ο χειρίστης ενός πτητικού μέσου είναι η ταχύτητα περιστροφής των διαφόρων περιστρεφόμενων μερών. Αυτή η πληροφορία είναι σημαντική, διότι σε περίπτωση που η ταχύτητα περιστροφής διαφόρων μηχανικών μερών ξεπεράσει κάποια όρια εγκυμονούνται σοβαροί κίνδυνοι για το πτητικό μέσο. Εάν όμως ο χειριστής διαθέτει έγκυρη ενημέρωση για την ταχύτητα περιστροφής στα καίρια αυτά σημεία, τότε μπορεί να ενεργήσει αποτρεπτικά στην εκδήλωση κάποιου ατυχήματος. Τέτοια μηχανικά μέρη είναι ο κινητήρας ενός αεροπλάνου, οι γεννήτριες καθώς και το κιβώτιο μετάδοσης κίνησης στον έλικα όταν πρόκειται για ελικόπτερο ή αεροπλάνο που διαθέτει τέτοιου είδους προωθητικό μέσο. Η μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής πραγματοποιείται με μικρές γεννήτριες, οι οποίες ονομάζονται ταχογεννήτριες (tachometer generator) ή με την αξιοποίηση του φαινομένου Hall.

7.5.1 Ταχογεννήτρια (Tachometer Generator)

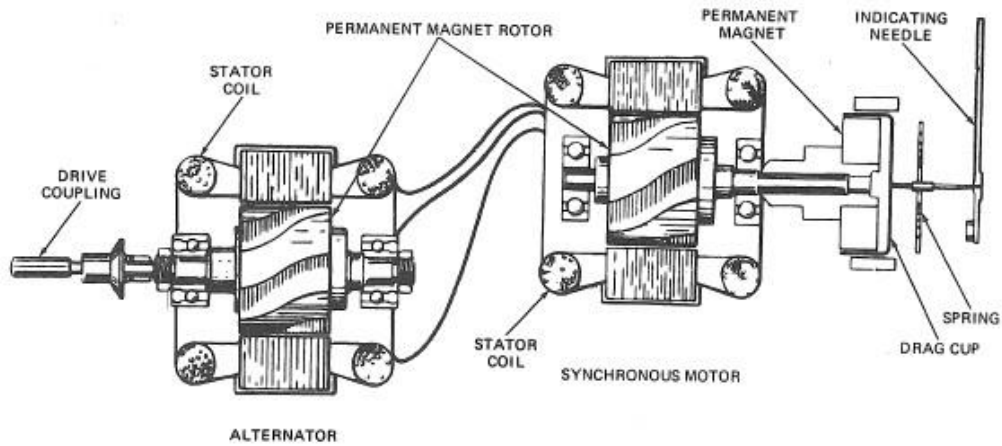
Οι ταχογεννήτριες που χρησιμοποιούνται στα αεροπλάνα για μέτρηση ταχύτητας περιστροφής διαφόρων μηχανικών μερών είναι δυο ειδών: Ταχογεννήτρια συνεχούς ρεύματος (dc tachometer generator) και ταχογεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος (ac tachometer generator).

Η αρχή λειτουργίας των ταχογεννητριών συνεχούς ρεύματος βασίζεται σε αυτήν των απλών γεννητριών συνεχούς ρεύματος με τη μονή διαφορά να συναντάται στον τρόπο δημιουργίας του εσωτερικού μαγνητικού πεδίου. Οι γεννήτριες αυτές δεν διαθέτουν τύλιγμα διέγερσης, αλλά μόνιμους μαγνήτες. Αυτό συμβαίνει, διότι το παραγόμενο ρεύμα δεν τροφοδοτεί κάποιο κύκλωμα ισχύος παραμόνο ένα όργανο κινητού πηνίου, στο οποίο έχει γίνει βαθμονόμηση της παραγομένης τάσης με την αντίστοιχη ταχύτητα. Η τάση παραγωγής της ταχογεννήτριας εξαρτάται από την ταχύτητα περιστροφής του άξονά της, ο οποίος λαμβάνει κίνηση από το σημείο που είναι επιθυμητή η μέτρηση της ταχύτητας. Με την αύξηση της ταχύτητας περιστροφής η παραγόμενη τάση αυξάνεται, με αποτέλεσμα ο δείκτης του οργάνου να μετακινείται.

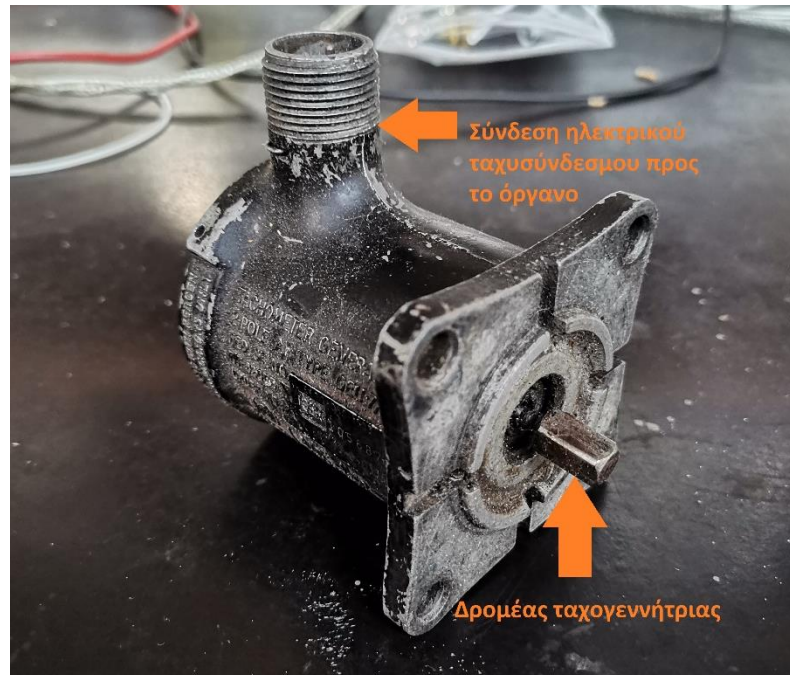
Η αρχή λειτουργίας των ταχογεννητριών εναλλασσόμενου ρεύματος βασίζεται σε αυτήν των συγχρόνων γεννητριών. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 7.17, ο άξονας της γεννήτριας αυτής συνδέεται στο σημείο, στο οποίο πρόκειται να μετρηθεί η ταχύτητα περιστροφής του. Στον άξονα είναι τοποθετημένος ένα μόνιμος μαγνήτης τεσσάρων πόλων. Στον στάτη της ταχογεννήτριας είναι τοποθετημένο ένα τριφασικό τύλιγμα. Με την περιστροφή του άξονα παράγεται στον στάτη μια τριφασική τάση, η οποία οδηγείται με αγωγούς στο όργανο. Το όργανο αυτό αποτελεί ουσιαστικά ένα σύγχρονο κινητήρα, ο οποίος στο στάτη διαθέτει ένα τριφασικό τύλιγμα και στο δρομέα διαθέτει ένα μόνιμο μαγνήτη. Η τριφασική τάση που εισέρχεται στο όργανο παράγει ένα περιστρεφόμενο

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

μαγνητικό πεδίο. Το μαγνητικό πεδίο του μόνιμου μαγνήτη που βρίσκεται στον άξονα του οργάνου προσπαθεί να ευθυγραμμιστεί με το μαγνητικό πεδίο του στάτη. Συνεπώς ο δρομέας αρχίζει να περιστρέφεται με τη σύγχρονη ταχύτητα. Ο δρομέας αυτός εξωτερικά δίνει κίνηση σε ένα άλλο μόνιμο μαγνήτη, ο οποίος περιστρέφεται μέσα σε ένα μεταλλικό κέλυφος. Με αυτή την περιστροφή αναπτύσσονται δυνάμεις που τείνουν να περιστρέψουν τον δείκτη του οργάνου. Με αυτό τον τρόπο και την κατάλληλη βαθμονόμηση του οργάνου ο χειριστής λαμβάνει την ένδειξη της ταχύτητας περιστροφής.



Εικόνα 7.17: Σχηματικό διάγραμμα διάταξης ταχογεννήτριας εναλλασσόμενου ρεύματος με όργανο μέτρησης [22].

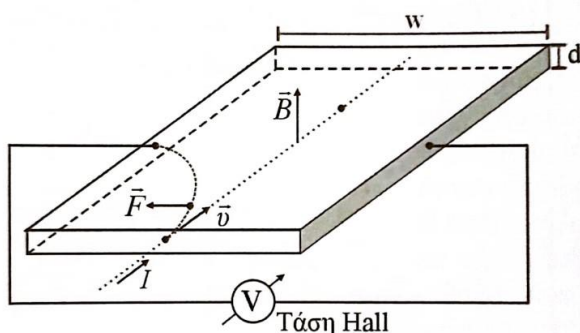


Εικόνα 7.18: Ταχογεννήτρια.

7.5.2 Αισθητήρια μαγνητικού πεδίου – φαινόμενο Hall

Το 1859 ο Tomson παρατήρησε ότι ένας αγωγός που διαρρέεται από ρεύμα μεταβάλλει την αντίστασή του όταν βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο. Το φαινόμενο αυτό ονομάστηκε μαγνητοαντίσταση και εξηγήθηκε λεπτομερώς το 1879 από τον Hall.

Έστω ότι ένα πλακίδιο αγωγού ή ημιαγωγού διαστάσεων διατομής $d \times w$ όπως φαίνεται στην εικόνα 7.19



Εικόνα 7.19: Διάταξη πλακιδίου Hall [29].

Το πλακίδιο αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα I και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο μαγνητικής επαγωγής \vec{B} . Το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το πλακίδιο είναι κάθετο με το μαγνητικό πεδίο. Οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος δέχονται μια δύναμη \vec{F}_m , η οποία είναι κάθετη στο διάνυσμα της ταχύτητας \vec{u} και της μαγνητικής επαγωγής \vec{B} και υπολογίζεται με το εξωτερικό γινόμενο:

$$\vec{F}_m = q(\vec{u} \times \vec{B}) \quad (\text{σχέση 7.15})$$

Οι φορείς του ηλεκτρικού ρεύματος με την επίδραση της δύναμης \vec{F}_m εκτελούν κίνηση βολής φτάνοντας στη σκιασμένη μεριά του πλακιδίου ή στην απέναντι ανάλογα με το πρόσημο τους. Με τη συγκέντρωση αυτή και λόγω του περιορισμένου χώρου αναπτύσσεται ηλεκτροστατικό πεδίο έντασης \vec{E} . Το ηλεκτροστατικό πεδίο αυτό ασκεί μία ηλεκτροστατική δύναμη \vec{F}_e στους φορείς του ρεύματος που εισέρχονται στο πλακίδιο. Η δύναμη αυτή παρουσιάζει αντίθετη φορά από τη δύναμη \vec{F}_m και υπολογίζεται από την σχέση:

$$\vec{F}_e = q\vec{E} \quad (\text{σχέση 7.16})$$

Η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου αυξάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των φορέων του ρεύματος στις σκιασμένες περιοχές. Αυτό σταματάει όταν οι δύο δυνάμεις εξισορροπηθούν, δηλαδή:

$$\begin{aligned}\vec{F}_m &= \vec{F}_e \Rightarrow q(\vec{u} \times \vec{B}) = q\vec{E} \Rightarrow \\ \Rightarrow \vec{E} &= \vec{u} \times \vec{B} \quad (\text{σχέση 7.17})\end{aligned}$$

Για ορθογώνιο πλακίδιο το διάνυσμα \vec{B} να είναι κάθετο στην επιφάνεια του πλακιδίου και ταυτόχρονα κάθετο στην ταχύτητα \vec{u} η σχέση 7.17 γράφεται:

$$E = uB \quad (\text{σχέση 7.18})$$

Η πυκνότητα του ρεύματος που διαρρέει το πλακίδιο δίνεται από τη σχέση:

$$J = nqu \quad (\text{σχέση 7.19})$$

Όπου

u: η ταχύτητα των φορέων ρεύματος

q: το φορτίο ενός φορέα ρεύματος

n: ο αριθμός των φορέων ανά μονάδα όγκου

Το ρεύμα που διαρρέει το πλακίδιο μπορεί να οριστεί σε σχέση με την πυκνότητα του ρεύματος:

$$I = Jwd \quad (\text{σχέση 7.20})$$

Όπου

wd: το κάθετο εμβαδό του πλακιδίου (εικόνα 7.19)

Η ένταση του ηλεκτροστατικού πεδίου μπορεί να γραφτεί σε σχέση με την ηλεκτρική τάση που δημιουργείται μεταξύ των επιφανειών συσσώρευσης φορτίων:

$$E = \frac{V}{w} \quad (\text{σχέση 7.21})$$

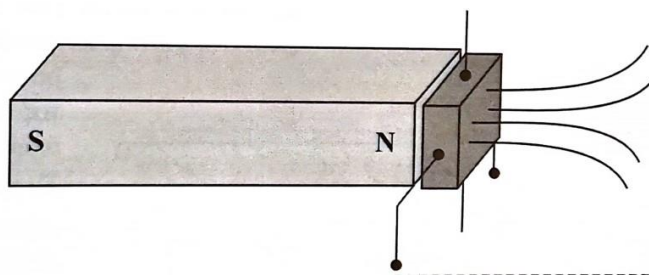
Συνδυάζοντας τις σχέσεις 7.18, 7.19 και 7.20 η σχέση 7.21 μπορεί να αναπτυχθεί ως εξής:

$$E = \frac{V}{w} = \frac{J}{nq} B = \frac{I}{wdnq} B \Rightarrow V = \frac{1}{nq} \frac{BI}{d} \quad (\text{σχέση 7.22})$$

Σύμφωνα με τη σχέση 7.22 στα άκρα του πλακιδίου αναπτύσσεται μια διαφορά δυναμικού, η οποία ονομάζεται τάση Hall (εικόνα 7.19). Η τάση αυτή είναι ανάλογη της έντασης του ρεύματος που διαρρέει το πλακίδιο, καθώς και του κάθετου μαγνητικού πεδίου μαγνητικής επαγωγής B , ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη με το πάχος d του πλακιδίου.

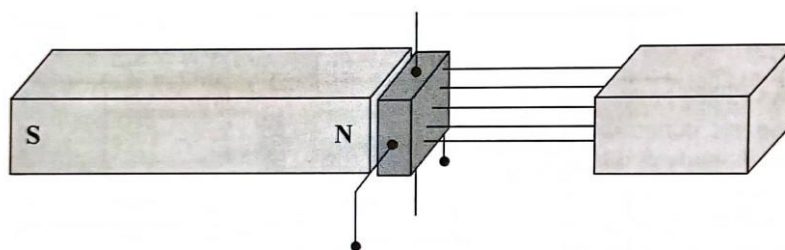
Ο συντελεστής $1/nq$ ονομάζεται συντελεστής Hall και εξαρτάται από το υλικό του πλακιδίου. Η διάταξη της εικόνας 7.19 αυτή ονομάζεται πλακίδιο Hall.

Τα παραπάνω χαρακτηριστικά του πλακιδίου Hall μπορούν να αξιοποιηθούν, ώστε να ανιχνεύεται η κίνηση σωμάτων που είναι κατασκευασμένα από σιδηρομαγνητικό υλικό. Τα αισθητήρια αυτά αξιοποιούν την πύκνωση των μαγνητικών γραμμών, οι οποίες παράγονται από φυσικό μαγνήτη όταν υπάρχει προσέγγιση σιδηρομαγνητικού υλικού. Το πλακίδιο Hall τοποθετείται στον βόρειο πόλο ενός φυσικού μαγνήτη, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.20.



Εικόνα 7.20: Διάταξη πλακιδίου Hall για μέτρηση ταχύτητας σώματος κατασκευασμένο από σιδηρομαγνητικό υλικό [29].

Το αισθητήριο αυτό διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα έντασης I και εμφανίζει μια τάση V_H , η οποία είναι ανάλογη του μαγνητικού πεδίου B . Οι μαγνητικές γραμμές σε αυτήν την περίπτωση εμφανίζουν μικρή πυκνότητα, η οποία οφείλεται στη μεγάλη μαγνητική αντίσταση του αέρα. Όταν όμως ένα σιδηρομαγνητικό υλικό πλησιάσει, οι μαγνητικές γραμμές πυκνώνουν, όπως φαίνεται στην εικόνα 7.21.



Εικόνα 7.21: Πύκνωση μαγνητικών γραμμών σε διάταξη μέτρησης ταχύτητας σιδηρομαγνητικού υλικού [29].

Σε αυτήν την περίπτωση η τάση Hall μεταβάλλεται. Με τον τρόπο αυτό είναι εφικτή η μέτρηση της ταχύτητας σωμάτων, τα οποία κατασκευάζονται από σιδηρομαγνητικό υλικό. Το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν υπάρχει απαίτηση το αισθητήριο μέτρησης να έρχεται σε επαφή με το αντικείμενο, του οποίου πρόκειται να μετρηθεί η ταχύτητα.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά διαδεδομένη στα σύγχρονα αεροπλάνα. Χρησιμοποιείται για μέτρηση στροφών κινητήρα, στους οποίους είναι επιθυμητή η ανέπαφη μέτρηση για λογούς φθοράς. Σε αυτήν την περίπτωση ο αισθητήρας Hall τοποθετείται απέναντι από ένα γρανάτζι. Με την περιστροφή του γραναζιού ο αισθητήρας μεταβάλλει την τάση του όταν οι προεξοχές (δόντια) των γραναζιών διέρχονται μπροστά από τον αισθητήρα. Η μεταβολή αυτή μεταφράζεται με κατάλληλα κυκλώματα και απεικονίζεται στο όργανο μέτρησης στροφών [29 §8.5].

7.6 Μέτρηση πίεσης

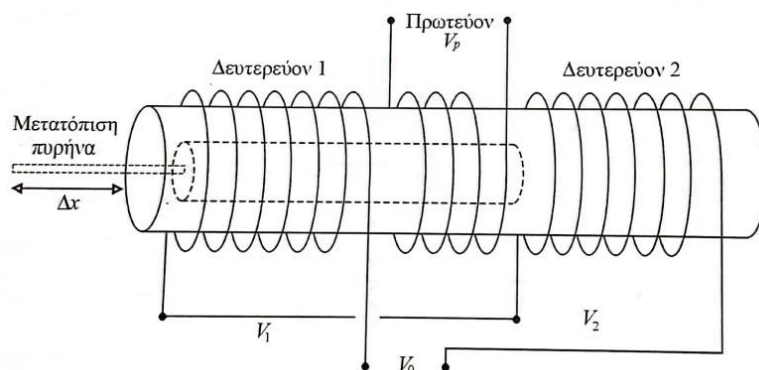
Αρκετά συστήματα στο αεροπλάνο περιέχουν κάποιο είδος υγρού. Για την κυκλοφορία αυτών των υγρών στα δίκτυα των σωληνώσεων χρησιμοποιούνται αντλίες, οι οποίες ανεβάζουν την πίεση του. Το υγρό που ρέει στις σωληνώσεις μπορεί να είναι καύσιμο ή κάποιο είδος λαδιού, όπως είναι το λάδι κινητήρα και το λάδι υδραυλικού συστήματος. Λόγω της σπουδαιότητας των συστημάτων, καθώς και για λόγους ασφαλείας έχει κριθεί απαραίτητο ο χειρίστης να λαμβάνει γνώση της πίεσης που επικρατεί σε αυτά. Η μέτρηση της πίεσης πραγματοποιείται με αισθητήρια που ονομάζονται μεταβιβαστές πίεσης (pressure transmitter).

Ο μεταβιβαστής πίεσης αποτελεί ένα ηλεκτρικό εξάρτημα ειδικής μεταλλικής κατασκευής (εικόνα 7.22). Συνήθως έχει σχήμα κυλινδρικό και στη μια πλευρά διαθέτει οπή, όπου εισέρχεται το υγρό, του οποίου η πίεση πρόκειται να μετρηθεί. Στην αντίθετη μεριά βρίσκεται η ηλεκτρική διασύνδεση υπό μορφή ταχυσύνδεσμου (ηλεκτρική φίσσα).



Εικόνα 7.22: Μεταβιβαστής πίεσης.

Όταν το υγρό εισέρχεται στην οπή, πιέζει ένα τύμπανο, στο οποίο είναι συνδεδεμένος ο σιδηρομαγνητικός πυρήνας ενός γραμμικά μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή (LVDT – Linear Variable Differential Transformer).



Εικόνα 7.23: Διάταξη πηνίων ενός γραμμικά μεταβλητού διαφορικού μετασχηματιστή [29].

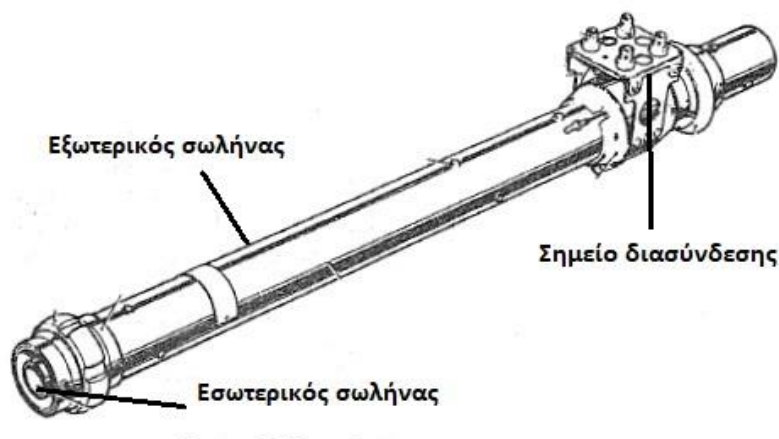
Η αρχή λειτουργίας αυτού του είδους αισθητήρα βασίζεται στη μεταβολή της αμοιβαίας επαγωγής μεταξύ των τυλιγμάτων, η οποία οφείλεται στη μετακίνηση του σιδηρομαγνητικού πυρήνα. Η έκφραση της μεταβολής αυτής γίνεται με την τιμή της επαγόμενης τάσης στα άκρα του δευτερεύοντος τυλίγματος. Τα τυλίγματα του δευτερεύοντος συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να εξασφαλίζεται η μηδενική τιμή επαγόμενης τάσης για συγκεκριμένη θέση του πυρήνα. Η θέση αυτή αποτελεί και το σημείο αναφοράς αυτού του αισθητήρα. Αυτή η συνθήκη επιτυγχάνεται όταν οι αμοιβαίες επαγωγές των δύο δευτερεύοντων τυλιγμάτων με το πρωτεύον παρουσιάζουν αντίθετα πρόσημα. Δηλαδή η συνολική επαγόμενη τάση στο δευτερεύον αποτελεί συνάρτηση της διαφοράς των δύο επιμέρους αμοιβαίων επαγωγών [29 §8.4.2, 30 §13]

7.7 Μέτρηση ποσότητας καυσίμου

Τα αεροπλάνα διαθέτουν δεξαμενές, στις οποίες αποθηκεύεται καύσιμο, ώστε να τροφοδοτούν τους κινητήρες κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Η ποσότητα του διαθέσιμου καυσίμου αποτελεί τη σημαντικότερη πληροφορία που μπορεί να λάβει ο χειρίστης. Η πλέον διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης ποσότητας καυσίμου είναι με χρήση πυκνωτών.

Η κάθε δεξαμενή του αεροπλάνου διαθέτει έναν αριθμό πυκνωτών, οι οποίοι είναι βυθισμένοι εντός του καυσίμου. Κατασκευαστικά ο πυκνωτής που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση αυτή αποτελείται από δυο κυλινδρικούς σωλήνες διαφορετικής διατομής. Ο σωλήνας με τη μικρότερη διατομή βρίσκεται στο εσωτερικό του σωλήνα με τη μεγαλύτερη διατομή χωρίς να βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Η απόσταση αυτή είναι σταθερή και επιτυγχάνεται με μονωτικούς αποστάτες. Οι δυο

αυτοί σωλήνες αποτελούν τις πλάκες του πυκνωτή, οι οποίες κατασκευάζονται από αλουμίνιο και διαθέτουν προστασία από τη διάβρωση. Η μορφή ενός τέτοιου πυκνωτή φαίνεται στην εικόνα 7.24 παρακάτω.



Εικόνα 7.24: Μορφή πυκνωτή μέτρησης ποσότητας καυσίμου [30].

Η αρχή λειτουργίας των πυκνωτών αυτών βασίζεται στη μεταβολή της χωρητικότητας τους με τη μεταβολή της στάθμης του καυσίμου. Αρχικά η χωρητικότητα ενός πυκνωτή εκφράζει την ικανότητα του συστήματος πλάκες πυκνωτή – μονωτικού υλικού που παρεμβάλλεται να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο. Η τιμή της χωρητικότητας εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των πλακών, τη θέση τους καθώς και τη διηλεκτρική σταθερά που παρουσιάζει το μονωτικό υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των πλακών. Ο γενικός τύπος της χωρητικότητας ενός πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (\text{σχέση 7.23})$$

Όπου:

Q: το συνολικό φορτίο των πλακών (C),

V: η διαφορά δυναμικού μεταξύ των πλακών (V)

Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας είναι το Farad (F). Επειδή το 1 Farad αποτελεί μεγάλη μονάδα μέτρησης για τους πυκνωτές τέτοιων εφαρμογών χρησιμοποιούνται οι υποδιαιρέσεις nF και pF.

Με κατάλληλη ανάπτυξη της σχέσης 7.23 η χωρητικότητα ενός κυλινδρικού πυκνωτή δίνεται από τη σχέση:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{\alpha_2}{\alpha_1}} \quad (\text{σχέση 7.24})$$

Όπου:

h: το ύψος των πλακών του πυκνωτή

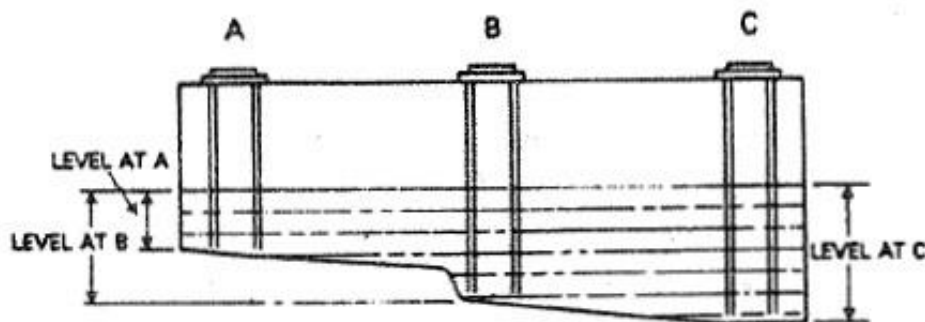
α_2 : το μήκος της ακτίνας της εξωτερικής κυλινδρικής πλάκας

α_1 : το μήκος της ακτίνας της εσωτερικής κυλινδρικής πλάκας

ϵ_r : η σχετική διηλεκτρική σταθερά του μονωτικού υλικού

ϵ_0 : απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού $8.8542 \cdot 10^{-12} \frac{C^2}{N \cdot m^2}$

Οι κυλινδρικοί πυκνωτές τοποθετούνται σε κατακόρυφη θέση εντός της δεξαμενής όπως φαίνεται στην εικόνα 7.25. Το καύσιμο εισέρχεται εντός του πυκνωτή μέσω οπών στο κάτω μέρος του και καταλαμβάνει το χώρο μεταξύ των κυλινδρικών πλακών, αποτελώντας έτσι το μονωτικό υλικό μεταξύ τους. Λόγω συγκοινωνούντων δοχείων η στάθμη εντός του πυκνωτή είναι ίδια με τη στάθμη της δεξαμενής. Συνεπώς με τη μείωση της στάθμης της δεξαμενής μειώνεται και η στάθμη εντός του πυκνωτή. Με τον τρόπο αυτό μεταβάλλεται και η χωρητικότητα του πυκνωτή, διότι το καύσιμο και ο αέρας παρουσιάζουν διαφορετική σχετική διηλεκτρική σταθερά ϵ_r .



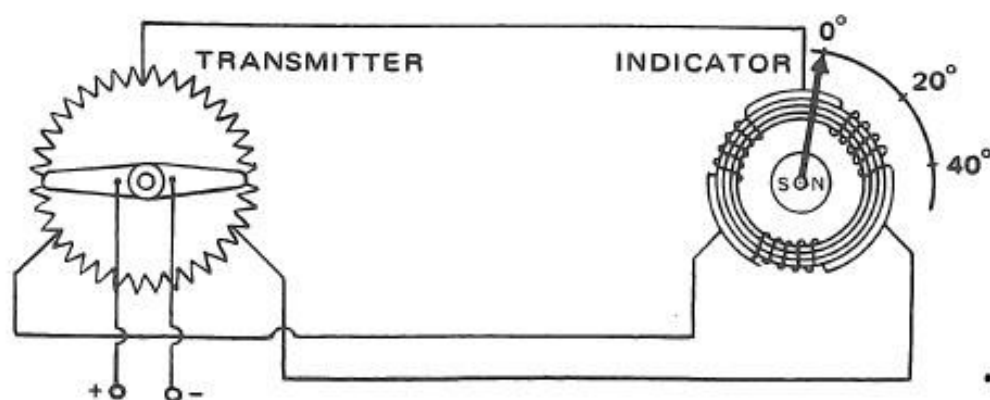
Εικόνα 7.25: Τοποθέτηση πυκνωτών εντός της δεξαμενής καυσίμου [30].

Εντός της δεξαμενής τοποθετούνται περισσότεροι από ένας πυκνωτές, οι οποίοι συνδέονται παράλληλα. Αυτό συμβαίνει, διότι με τη χρήση πολλών πυκνωτών που συνδέονται παράλληλα η αξιοπιστία της μέτρησης είναι μεγαλύτερη [30 §14, 31 §6]

7.8 Συγχρονομετάδοση (Synchro Systems)

Η συγχρονομετάδοση χρησιμοποιείται στα πτητικά μέσα για την αναπαράσταση της θέσης κάποιου μηχανικού εξαρτήματος στην οθόνη μετρήσεων ενός οργάνου. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την ένδειξη της θέσης των πτερύγων προσγείωσης (flaps), συστήματος προσγείωσης, καθώς και σε συστήματα ραντάρ και αυτόματου πιλότου.

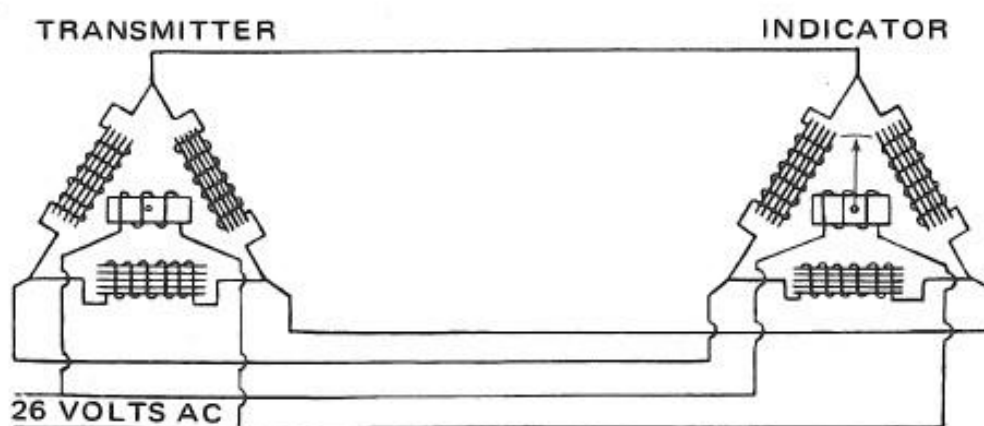
Αρχικά αναπτύχθηκε από την General Electric ένα σύστημα συγχρονομετάδοσης που χρησιμοποιούσε πηγή συνεχούς τάσης και αποτελούνταν από ένα μεταβιβαστή θέσης και ένα όργανο. Ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται στην εικόνα 7.26. Ο μεταβιβαστής θέσης αποτελείται από ένα ποτενσιόμετρο ειδικής κατασκευής, το οποίο παρουσιάζει συγκεκριμένη τιμή ωμικής αντίστασης και διαθέτει σημεία διασύνδεσης που ισαπέχουν μεταξύ τους. Με την εναλλαγή θέσης του περιστρεφόμενου άξονα η τιμή της τάσης σε κάθε σημείο διασύνδεσης είναι διαφορετική. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι η εναλλαγή της θέσης του άξονα γίνεται από το μηχανικό εξάρτημα, του οποίου πρόκειται να προσδιοριστεί η θέση. Τα σημεία διασύνδεσης του μεταβιβαστή συνδέονται με αγωγούς στα τυλίγματα του οργάνου μέτρησης, τα οποία βρίσκονται σε σύνδεση τριγώνου. Ανάλογα με τη θέση που λαμβάνει ο άξονας του ποτενσιόμετρου στον μεταβιβαστή, το ρεύμα που διαρρέει κάθε τύλιγμα του οργάνου είναι διαφορετικό. Ο δείκτης του οργάνου διαθέτει μονίμους μαγνήτες, οι οποίοι ευθυγραμμίζονται με το συνιστάμενο μαγνητικό πεδίο των τυλιγμάτων του οργάνου. Με τον τρόπο αυτό η θέση του δείκτη μεταβάλλεται και με την κατάλληλη βαθμονόμηση αποτυπώνει τη φυσική θέση που βρίσκεται το μηχανικό εξάρτημα.



Εικόνα 7.26: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συγχρονομετάδοσης με χρήση συνεχούς τάσης [22].

Ένα σύστημα συγχρονομετάδοσης λειτουργεί και με εναλλασσόμενο ρεύμα. Σε αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται δυο σύγχρονες μηχανές, εκ των οποίων μια μηχανή χρησιμοποιείται ως

μεταβιβαστής και η άλλη ως όργανο. Η σύγχρονη μηχανή που χρησιμοποιείται ως μεταβιβαστής λαμβάνει κίνηση από τη μετατόπιση του μηχανικού εξαρτήματος, του οποίου πρόκειται να προσδιοριστεί η θέση. Με περιστροφή του δρομέα του συγχρόνου κινητήρα παράγεται μια τάση στα τυλίγματα του στάτη, η οποία τροφοδοτεί το τριφασικό τύλιγμα του στάτη του σύγχρονου κινητήρα του οργάνου. Με τον τρόπο αυτό και την κατάλληλη βαθμονόμηση ο δείκτης του οργάνου μετακινείται προσδιορίζοντας τη θέση που βρίσκεται το μηχανικό εξάρτημα. Στην εικόνα 7.27 φαίνεται η δομή ενός συστήματος συγχρονομετάδοσης με χρήση εναλλασσόμενης τάσης [22 §17].



Εικόνα 7.27: Σχηματικό διάγραμμα συστήματος συγχρονομετάδοσης με χρήση εναλλασσόμενης τάσης [22].

7.9 Συμπεράσματα

Ο χειριστής ενός αεροπλάνου είναι αναγκαίο να λαμβάνει γνώση της κατάστασης που επικρατεί στα διαφορά συστήματά του. Αυτό επιτυγχάνεται με τα αισθητήρια, τα οποία διαθέτει και σκοπός αυτών είναι η μετατροπή των φυσικών μεγεθών σε ηλεκτρικό σήμα. Με καταλληλά κυκλώματα οδήγησης το ηλεκτρικό σήμα αυτό μετατρέπεται σε ένδειξη από τα όργανα, την οποία είναι σε θέση να αναγνωρίσει ο χειριστής. Τα συστήματα που περιλαμβάνουν αισθητήριο και όργανο πρέπει να ελέγχονται σε τακτά χρονικά διαστήματα, ώστε να πιστοποιείται η ορθή λειτουργία τους. Η διαδικασία της πιστοποίησης πραγματοποιείται από αδειοδοτούμενους φορείς, οι οποίοι χρησιμοποιούν δευτερογενή πρότυπα. Με τη διαδικασία αυτή υπολογίζεται το σφάλμα μέτρησης που παρουσιάζουν οι αισθητήρες και τα όργανα. Στην περίπτωση που το σφάλμα μέτρησης ξεπεράσει κάποια όρια, πραγματοποιείται ρύθμιση ή αντικατάστασή τους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : Λοιπά Συστήματα

8.1 Εισαγωγή

Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και την ικανότητα της σμίκρυνσης των ηλεκτρονικών εξαρτημάτων οι κατασκευάστριες εταιρίες επιτυγχάνουν την μείωση του απαιτούμενου χώρου, καθώς και του συνολικού βάρους. Για τον λόγο αυτό στα σύγχρονα αεροπλάνα τα ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά κυκλώματα χρησιμοποιούνται σχεδόν σε κάθε σύστημα. Συνεπώς τα τελευταία χρόνια γίνεται λόγος για ηλεκτρομηχανικά συστήματα σε ένα αεροπλάνο και αρκετές φορές για αμιγώς ηλεκτρικά. Τις περισσότερες φορές η ηλεκτρική ενέργεια στα ηλεκτρομηχανικά συστήματα χρησιμοποιείται ως έλεγχος ή παροχή πληροφοριών για την κατάσταση του συστήματος.

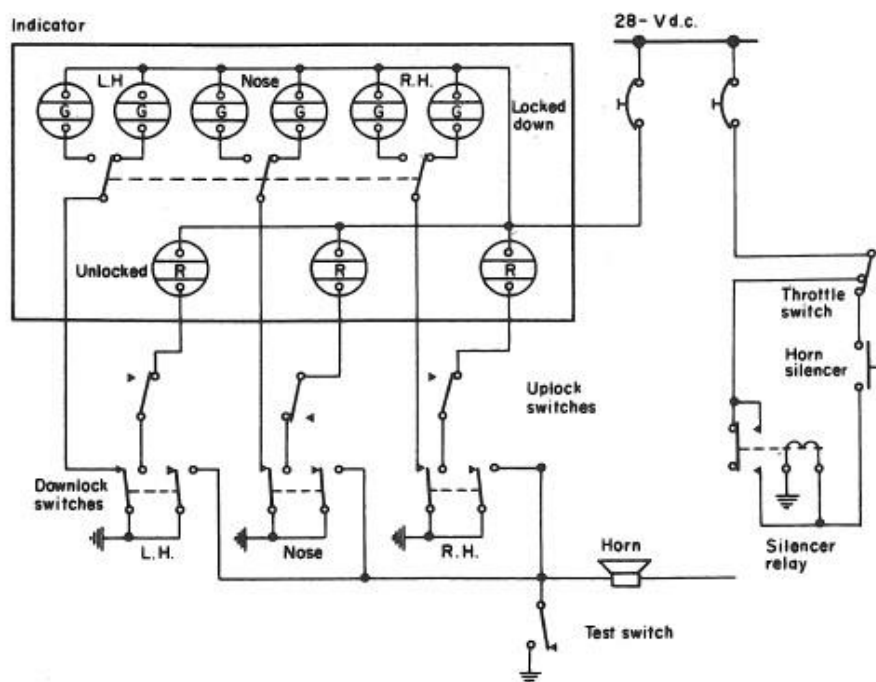
8.2 Σύστημα προσγείωσης

Το σύστημα προσγείωσης στα αεροπλάνα αποτελείται από τα εξαρτήματα εκείνα που του επιτρέπουν να βρίσκεται στο έδαφος με ασφάλεια και στη σωστή θέση. Τα εξαρτήματα αυτά είναι οι τροχοί, οι άξονες, τα φρένα, καθώς και οι αποσβέστηρες κραδασμών. Το σύστημα προσγείωσης εκτείνεται όταν το αεροπλάνο πρόκειται να προσγειωθεί, ενώ κατά τη διάρκεια της πτήσης πραγματοποιείται ανάσυρση σε ειδική θυρίδα που διαθέτει στο κάτω μέρος της ατράκτου. Στα μικρά αεροπλάνα η διαδικασία αυτή γίνεται με τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων, οι οποίοι ενεργοποιούνται μέσω διακοπών που βρίσκονται στον χώρο του πιλοτήριου. Οι κινητήρες αυτοί είναι συνεχούς ρεύματος και διαθέτουν μεγάλη ροπή. Στα μεγάλα αεροπλάνα το σύστημα προσγείωσης χρησιμοποιεί υδραυλική πίεση για την πραγματοποίηση της διαδικασίας ανάσυρσης και έκτασης. Σε αυτήν την περίπτωση οι διακόπτες που ενεργοποιούν τη διαδικασία δεν ελέγχουν ηλεκτρικούς κινητήρες, αλλά ηλεκτροβάνες, με τις οποίες ελέγχεται η υδραυλική πίεση που φτάνει στο σύστημα.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος του αεροπλάνου ο χειριστής είναι απαραίτητο να γνωρίζει κάθε στιγμή τη θέση που βρίσκεται το σύστημα προσγείωσης. Η πληροφορία αυτή παρέχεται στον χειριστή μέσω ενδεικτικών λυχνιών στον χώρο του πιλοτήριου. Οι ενδεικτικές λυχνίες αυτές ενεργοποιούνται μέσω μικροδιακοπών που βρίσκονται στο σύστημα προσγείωσης, το οποίο χωρίζεται σε τρία υποσυστήματα: το ριναίο υποσύστημα προσγείωσης (nose landing gear), το δεξί υποσύστημα προσγείωσης (right landing gear) και το αριστερό υποσύστημα προσγείωσης (left landing gear). Το αριστερό και το δεξί υποσύστημα προσγείωσης αναφέρεται συχνά και ως κύριο σύστημα προσγείωσης (main landing gear). Το αριστερό και το δεξί σύστημα προσγείωσης διαθέτει τρεις μικροδιακόπτες, οι οποίοι είναι:

- Μικροδιακόπτης άνω και ασφαλισμένος (up lock switch): Με την ενεργοποίηση αυτού του μικροδιακόπτη ο χειριστής λαμβάνει την πληροφορία ότι το αντίστοιχο υποσύστημα προσγείωσης (σκέλος) είναι μαζεμένο και ασφαλισμένο.
- Μικροδιακόπτης κάτω και ασφαλισμένος (down lock switch): Με την ενεργοποίηση αυτού του μικροδιακόπτη ο χειριστής λαμβάνει την πληροφορία ότι το αντίστοιχο υποσύστημα προσγείωσης (σκέλος) είναι εκτεταμένο και ασφαλισμένο.
- Μικροδιακόπτης επαφής με το έδαφος (touch down switch): Με την ενεργοποίηση αυτού του μικροδιακόπτη ο χειριστής λαμβάνει την πληροφορία ότι τα σκέλη του αεροπλάνου έχουν βρεθεί σε επαφή με το έδαφος.

Το ριναίο υποσύστημα προσγείωσης διαθέτει τους μικροδιακόπτες: άνω και ασφαλισμένος (up lock switch) και κάτω και ασφαλισμένος (down lock switch). Οι μικροδιακόπτες αυτοί λειτουργούν με τον ίδιο τρόπο που λειτουργούν και στα αλλά δυο υποσυστήματα. Το ριναίο υποσύστημα προσγείωσης δεν διαθέτει μικροδιακόπτη επαφής (touch down switch), όπως τα αλλά δυο υποσυστήματα. Παρόλα αυτά διαθέτει έναν άλλο διακόπτη, ο οποίος δίνει την πληροφορία ότι το ριναίο σκέλος βρίσκεται ευθυγραμμισμένο με τον διαμήκη άξονα του αεροπλάνου. Ο διακόπτης αυτός ονομάζεται μικροδιακόπτης ευθυγράμμισης ριναίου σκέλους (nose wheel centering). Ένα τυπικό διάγραμμα του κυκλώματος ένδειξης θέσης του συστήματος προσγείωσης φαίνεται στην εικόνα 8.1 παρακάτω. Σε αυτό το διάγραμμα γίνεται απεικόνιση μόνο των διακοπών άνω και κάτω ασφαλισμένων.



Εικόνα 8.1: Τυπικό διάγραμμα ένδειξης θέσης συστήματος προσγείωσης [22].

Ένα σύστημα προσγείωσης εκτός από τους μικροδιακόπτες ένδειξης θέσης διαθέτει και το σύστημα αντιολίσθησης (anti – skid). Ο χειρίστης κατά τη διάρκεια της προσγείωσης και μόλις το αεροπλάνο έρθει σε επαφή με το έδαφος ενεργοποιεί μέσω των ποδοστηρίων τη διαδικασία της πέδησης. Με τη διαδικασία αυτή η υδραυλική πίεση του συστήματος προσγείωσης ενεργοποιεί τα φρένα των τροχών του αεροπλάνου. Στη διαδικασία αυτή όπως γίνεται αντιληπτό η πέδηση μπορεί να μην είναι ομοιόμορφη σε όλους τους τροχούς. Συνεπώς το αεροπλάνο κινδυνεύει να κατευθυνθεί στη μεριά όπου η πέδηση είναι εντονότερη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αεροπλάνο να βρεθεί εκτός διάδρομου προσγείωσης θέτοντας σε κίνδυνο τόσο το ίδιο, όσο και τους επιβάτες αυτού. Το πρόβλημα αυτό λύνεται με τη χρήση του συστήματος αντιολίσθησης (anti – skid), το οποίο παρέχει ομοιόμορφη πέδηση σε όλους του τροχούς.

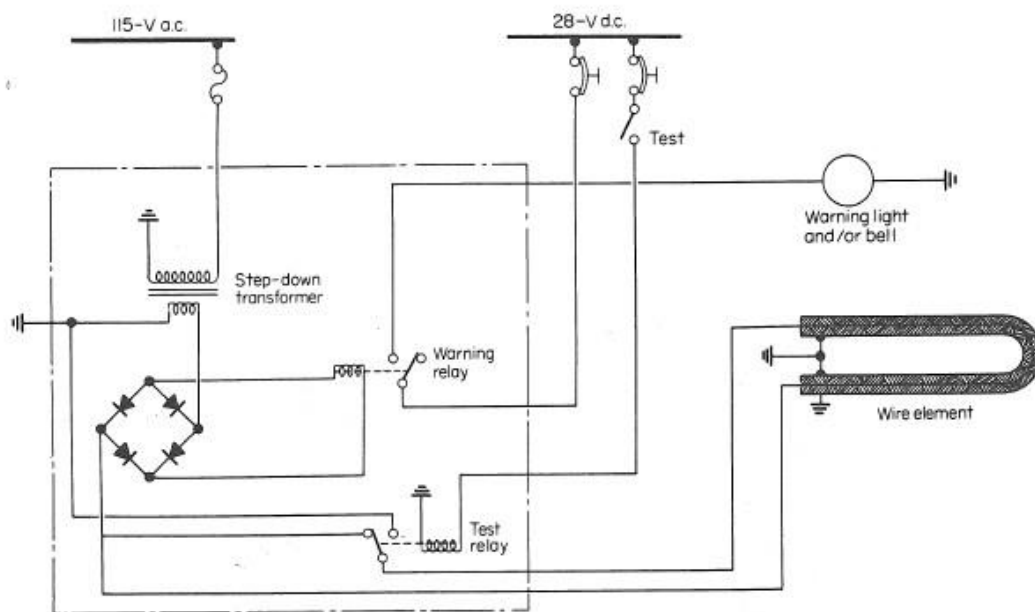
Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στις ταχογεννήτριες, οι οποίες τοποθετούνται στους τροχούς του αεροπλάνου. Οι γεννήτριες αυτές περιστρέφονται λαμβάνοντας κίνηση από τον τροχό, ο οποίος έρχεται σε επαφή με το έδαφος. Κατά τη διάρκεια αυτή παράγεται μια τάση, η οποία είναι ανάλογη της ταχύτητας περιστροφής του τροχού. Οι τάσεις αυτές οδηγούνται σε έναν συγκριτή, ο οποίος τις συγκρίνει. Όταν υπάρχει διαφορά στην τιμή της τάσης αυτής, τότε ένα αυτοματοποιημένο σύστημα επενεργεί στις ηλεκτροβαλβίδες των φρένων ελέγχοντας έτσι την πίεση του υδραυλικού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον έλεγχο της πέδησης κάθε τροχού ξεχωριστά [22 §10].

8.3 Σύστημα πυροπροστασίας

Η εκδήλωση πυρκαγιάς σε ένα αεροπλάνο είναι αναμφισβήτητα ένα πολύ σοβαρό πρόβλημα, το οποίο γίνεται μεγαλύτερο όταν ξεσπάσει σε περιοχές, στις οποίες δεν υπάρχει πρόσβαση. Τέτοιες περιοχές είναι οι κινητήρες, όπου ο συνδυασμός μεγάλης θερμοκρασίας και καυσίμου εγκυμονεί την πρόκληση πυρκαγιάς. Επιπλέον περιοχές όπως είναι οι χώροι μεταφοράς των αποσκευών, όταν πρόκειται για επιβατικό αεροπλάνο, καθώς και περιοχές τοποθέτησης φορτίου όταν πρόκειται για αεροπλάνο μεταφοράς, η πρόκληση πυρκαγιάς είναι πιθανή. Για τον λόγο αυτό ένα αεροπλάνο διαθέτει συστήματα για την έγκυρη ενημέρωση του χειριστή σε περίπτωση πυρκαγιάς, ώστε με κατάλληλες ενέργειες να περιοριστεί η έκταση της και οι επιπτώσεις της σε αυτό.

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα πυροπροστασίας σε ένα αεροπλάνο αποτελείται από τα συστήματα ανίχνευσης και από ένα σύστημα πυρόσβεσης. Η ανίχνευση πυρκαγιάς σε ένα αεροπλάνο γίνεται με διάφορους τρόπους και εξαρτάται από το είδος της περιοχής. Όταν πρόκειται για κινητήρες, η ανίχνευση γίνεται σε δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από θερμικούς διακόπτες, οι οποίοι ανιχνεύουν την αύξηση της θερμοκρασίας πέρα από τα φυσιολογικά όρια. Οι διακόπτες αυτοί ενεργοποιούν συνήθως ενδεικτικές λυχνίες, οι οποίες αναγράφουν υπερθέρμανση (Overheat). Σε

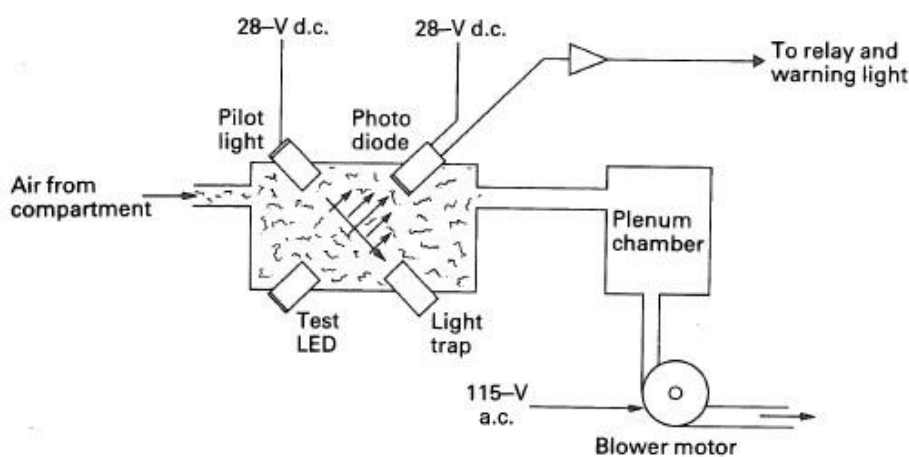
αυτήν την περίπτωση ο χειρίστης με διάφορες ενέργειες μπορεί να δράσει με κατάλληλους τρόπους, ώστε να αποφευχθεί μια πρόκληση πυρκαγιάς από υπερθέρμανση. Οι διακόπτες αυτοί ενεργοποιούνται συνήθως πριν την έναρξη κάποιας πυρκαγιάς. Το δεύτερο στάδιο αποτελείται από ένα σωλήνα (fire element) μικρής διατομής, ο οποίος τοποθετείται κατά μήκος του κινητήρα. Ο σωλήνας αυτός στο εσωτερικό του περιέχει ένα λεπτό σύρμα το οποίο καταλήγει σε μια ηλεκτρική επαφή. Το εξωτερικό κέλυφος του σωλήνα αποτελεί τη δεύτερη ηλεκτρική επαφή, όπου τις περισσότερες φορές συνδέεται με τη γείωση (μεταλλικό σκελετό – αρνητικός πόλος) του αεροπλάνου. Ανάμεσα στο σύρμα αυτό και στο κέλυφος του σωλήνα παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό, το οποίο δεν επιτρέπει την επαφή του εσωτερικού σύρματος με το εξωτερικό κέλυφος. Με την εκδήλωση πυρκαγιάς και την αύξηση της θερμοκρασίας σε υψηλά επίπεδα το μονωτικό υλικό αλλοιώνεται χάνοντας τις μονωτικές του ικανότητες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το εσωτερικό σύρμα να έρθει σε επαφή με το εξωτερικό κέλυφος λειτουργώντας ως διακόπτης και το ηλεκτρικό κύκλωμα να κλείσει. Με την ενεργοποίηση του κυκλώματος ανάβει μια προειδοποιητική λυχνία αναγγελίας φωτιάς (fire) και ηχεί σειρήνα. Στην εικόνα 8.2 φαίνεται ένα τυπικό κύκλωμα ανίχνευσης φωτιάς.



Εικόνα 8.2: Τυπικό διάγραμμα ανίχνευσης φωτιάς [26].

Όταν πρόκειται για χώρο τοποθέτησης διαφόρων αντικειμένων, όπως είναι χώροι αποσκευών ή χώροι μεταφοράς φορτίου, η προειδοποίηση εκδήλωσης πυρκαγιάς γίνεται με ανιχνευτές καπνού (smoke detectors). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η έντονη παραγωγή καπνού με την έναρξη της πυρκαγιάς. Σε τέτοιους χώρους δεν χρησιμοποιείται ο σωλήνας ανίχνευσης φωτιάς (fire element), διότι η ενεργοποίησή του θα καθυστερούσε, λόγω της απαίτησης υψηλής θερμοκρασίας και συνεπώς μεγάλης έκτασης πυρκαγιάς, η οποία θα ήταν αδύνατο να περιοριστεί.

Η αρχή λειτουργίας των ανιχνευτών καπνού είναι απλή και βασίζεται στη διάθλαση του φωτός. Στο εσωτερικό του ανιχνευτή υπάρχουν δύο πηγές παραγωγής φωτός και μια φωτοδίοδος, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.3. Η μια λυχνία (pilot light) φωτοβολεί διαρκώς και η δέσμη φωτός της φτάνει στην απέναντι πλευρά σε έναν απορροφητή φωτός (light trap). Ο εσωτερικός χώρος του ανιχνευτή επικοινωνεί με το εξωτερικό περιβάλλον μέσω οπών. Η επικοινωνία αυτή γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην εισέρχεται εξωτερικό φως και επηρεάζει το σύστημα. Όταν στον εξωτερικό χώρο υπάρξει καπνός, τότε θα εισέλθει και στο εσωτερικό του ανιχνευτή. Με την εισαγωγή του καπνού στο εσωτερικό του ανιχνευτή θα υπάρξει διάθλαση του φωτός της λυχνίας, η οποία θα αλλάξει κατεύθυνση και θα εισέλθει στη φωτοδίοδο. Έτσι η φωτοδίοδος θα ενεργοποιηθεί και με τη σειρά της θα ενεργοποιήσει μια προειδοποιητική λυχνία στον χώρο του πιλοτηρίου.



Εικόνα 8.3: Τυπικό σχεδιάγραμμα λειτουργίας ανιχνευτή καπνού [26].

Η διαδικασία της κατάσβεσης μιας πυρκαγιάς ενεργοποιείται πάντα χειροκίνητα από τον χειριστή. Κάθε αεροπλάνο διαθέτει ειδικές φιάλες, οι οποίες είναι γεμάτες με πυροσβεστικό μέσο υπό πίεση. Το συνηθέστερο πυροσβεστικό μέσο που χρησιμοποιείται είναι το Halon. Οι πυροσβεστικές φιάλες είναι τοποθετημένες σε συγκεκριμένο σημείο σύμφωνα με τον κατασκευαστή και διαθέτει ένα σύστημα σωληνώσεων όπου οδεύει το πυροσβεστικό μέσο μετά την ενεργοποίηση. Οι σωληνώσεις αυτές καταλήγουν σε συγκεκριμένα σημεία που η κατασκευάστρια εταιρία θεωρεί κρίσιμα, όπως είναι κινητήρες. Η ενεργοποίηση γίνεται μέσω μπουτόν ή χειρολαβής έλξης, όπως φαίνεται στην εικόνα 8.4. Οι διακόπτες αυτοί ενεργοποιούν κάποιου είδους θερμαινόμενη αντίσταση, η οποία λιώνει μια μεμβράνη συγκράτησης. Αρκετές φορές ενεργοποιεί κάποιου είδους ελεγχόμενου εκρηκτικού μηχανισμού (squib). Με τον τρόπο αυτό γίνεται ταχεία απελευθέρωση πυροσβεστικού μέσου στο δίκτυο σωληνώσεων. Τα περισσότερα αεροπλάνα διαθέτουν δυνατότητα πολλαπλών κατασβέσεων σε περίπτωση αποτυχίας της πρώτης [26 §10].



Εικόνα 8.4: Χειρολαβή έλξης ενεργοποίησης πυρόσβεσης.



Εικόνα 8.5: Πυροσβεστήρας ελικοπτέρου.

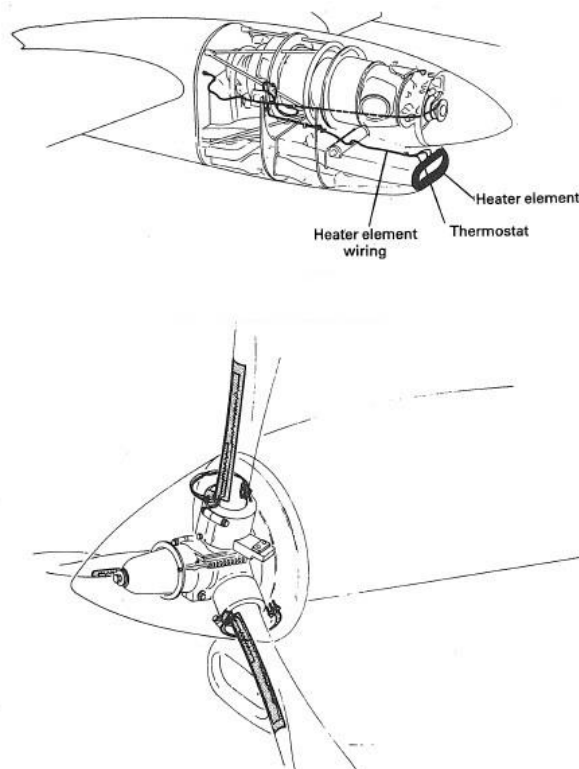
8.4 Συστήματα αντιπαγοποίησης - αποπαγοποίησης

Τα αεροπλάνα είναι κατασκευασμένα να πετούν σε μεγάλο υψόμετρο. Σε αυτό το υψόμετρο η θερμοκρασία του περιβάλλοντος είναι χαμηλότερη από αυτήν στην επιφάνεια της θάλασσας και τις περισσότερες φορές λαμβάνει τιμή χαμηλότερη του 0°C. Συνεπώς η υγρασία και η βροχή που πέφτει στην εξωτερική επιφάνεια του αεροπλάνου μετατρέπεται σε πάγο. Ο πάγος, ο οποίος συσσωρεύεται στην επιφάνεια, μεταβάλλει την αεροδυναμική και το βάρος του αεροπλάνου. Επιπλέον κομμάτι πάγου υπάρχει πιθανότητα να αποκολληθεί και να εισχωρήσει στον κινητήρα προκαλώντας καταστροφή στα πτερύγια του συμπιεστή. Ένα ακόμα μεγάλο πρόβλημα που μπορεί να προκαλέσει ο πάγος είναι η αλλοίωση των μετρήσεων που λαμβάνονται από το εξωτερικό περιβάλλον μέσω αισθητήρων που βρίσκονται στην εξωτερική επιφάνεια του αεροπλάνου. Τέτοιες μετρήσεις είναι της

ταχύτητας, της πίεσης και του υψομέτρου. Για την αποφυγή τέτοιων προβλημάτων, τα οποία μπορούν να αποδειχτούν άκρως επικίνδυνα υπάρχουν μέθοδοι, με τις οποίες εξασφαλίζεται ότι κρίσιμες επιφάνειες σαν αυτές που αναφέρθηκαν θα παραμείνουν καθαρές χωρίς συσσώρευση στρώματος πάγου. Η διαδικασία χωρίζεται σε δυο βασικές κατηγορίες: την αποπαγοποίηση (de – icing) και την αντιπαγοποίηση (anti – icing). Οι διαφορές των δυο αυτών κατηγοριών είναι ο χρόνος λειτουργίας, Η διαδικασία της αποπαγοποίησης (de – icing) είναι επαναλαμβανόμενη σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές. Στα ενδιάμεσα χρονικά διαστήματα επιτρέπεται η συσσώρευση λεπτού στρώματος πάγου σε επιφάνειες, οι οποίες δεν επηρεάζουν τη λειτουργία του αεροπλάνου. Η διαδικασία της αντιπαγοποίησης είναι ενεργή καθ' όλη την διάρκεια λειτουργίας του αεροπλάνου και δεν επιτρέπεται η συσσώρευση πάγου στις επιφάνειες αυτές.

Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αποπαγοποίηση και την αντιπαγοποίηση είναι ίδιες και είναι οι εξής:

- Πνευματική αποπαγοποίηση – αντιπαγοποίηση: Στη μέθοδο αυτή ειδικές σωλήνες (boots) διατρέχουν εσωτερικά διάφορες επιφάνειες, όπως είναι το χείλος προσβολής των πτερύγων και του κάθετου σταθερού. Στις σωλήνες αυτές ρέει ζεστός αέρας, ο οποίος λαμβάνεται από την τουρμπίνα των κινητήρων. Ο έλεγχος της ροής του αέρα γίνεται μέσω ηλεκτρικών βαλβίδων.
- Ηλεκτρική αποπαγοποίηση – αντιπαγοποίηση: Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται σε μικρότερης έκτασης επιφάνειες, στις οποίες η όδευση σωληνώσεων δεν είναι εφικτή. Τέτοιες επιφάνειες είναι οι έλικες, τζάμια πιλοτηρίου, ο χώρος εισαγωγής αεροστρόβιλου κινητήρα, καθώς και ηλεκτρικοί και ηλεκτρονικοί αισθητήρες. Στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες είναι τοποθετημένες στις επιφάνειες που υπάρχει κίνδυνος συσσώρευσης πάγου. Οι αντιστάσεις αυτές ενσωματώνονται στις επιφάνειες με χρήση συνθετικών υλικών. Η τάση τροφοδοσίας εξαρτάται από το μέγεθος της αντίστασης. Για μικρές θερμαντικές αντιστάσεις, όπως είναι στα τζάμια του πιλοτηρίου χρησιμοποιείται 28V DC, ενώ για μεγαλύτερες αντιστάσεις, όπως είναι οι έλικες και μεγάλες επιφάνειες χρησιμοποιείται 115-200V AC. Για την ελεγχόμενη θέρμανση και την αποφυγή ανάπτυξης μεγάλων θερμοκρασιών χρησιμοποιούνται θερμοστατικοί διακόπτες. Με την αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας αποκόπτουν την τροφοδοσία του κυκλώματος, ώστε να προστατέψουν τη θερμαντική αντίσταση, αλλά και την ίδια την επιφάνεια [26 §10].



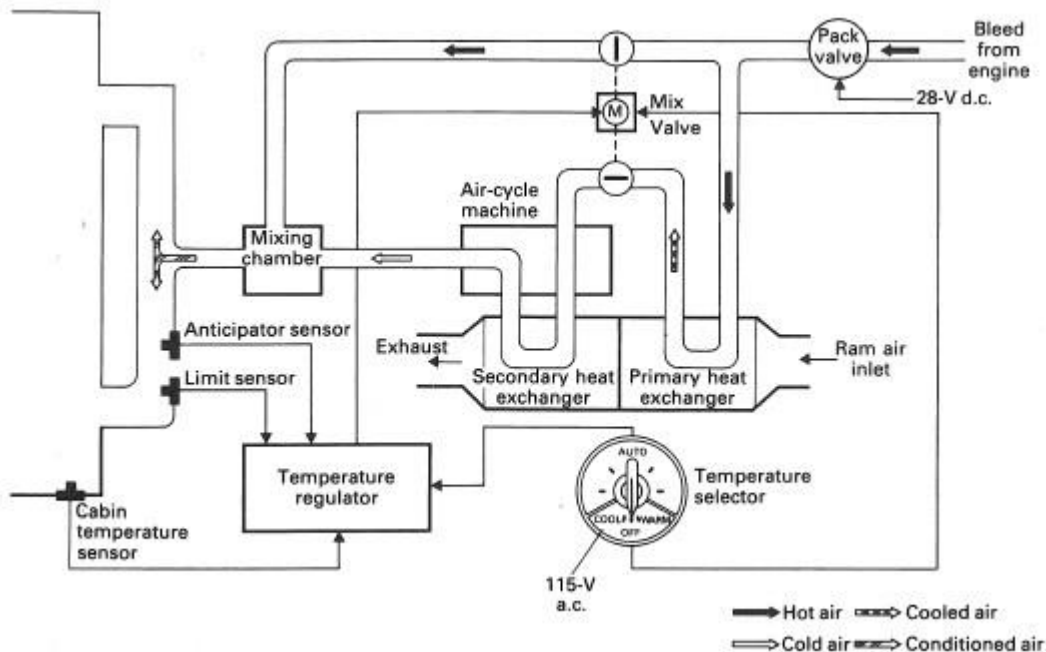
Εικόνα 8.6: Περιοχές χρήσης ηλεκτρικής αποπαγοποίηση – αντιπαγοποίηση [26].

8.5 Σύστημα κλιματισμού

Το σύστημα κλιματισμού σε ένα αεροπλάνο είναι υπεύθυνο να ρυθμίζει τη θερμοκρασία που επικρατεί στον χώρο του πιλοτήριου, στον χώρο των επιβατών, καθώς και σε άλλους χώρους ανάλογα με τον τύπο. Ένα σύστημα κλιματισμού αποτελείται από την παροχή αέρα, τη θέρμανση, την ψύξη, τον έλεγχο της θερμοκρασίας και το δίκτυο διανομής. Ένα τυπικό σύστημα κλιματισμού φαίνεται στην εικόνα 8.7 παρακάτω.

Ο κλιματισμός των χώρων με την επιθυμητή θερμοκρασία γίνεται με τη μείξη ζεστού και κρύου αέρα. Μέσω ενός αγωγού λαμβάνεται ζεστός αέρας από τη βαθμίδα του συμπιεστή του κινητήρα. Ο αέρας αυτός περνά από μια κεντρική βαλβίδα (pack valve), η οποία ενεργοποιείται από τον χώρο του πιλοτήριου. Στη συνέχεια μια ποσότητα ζεστού αέρα κατευθύνεται μέσω σωληνώσεων σε ένα ψυγείο, στο οποίο μειώνεται η θερμοκρασία του. Σε αυτό το σημείο πρέπει να αναφερθεί ότι δεν εισέρχεται κρύος αέρας από το εξωτερικό περιβάλλον, διότι τα αεροπλάνα διαθέτουν συμπιεζόμενη καμπίνα. Η επίτευξη της κατάλληλης θερμοκρασίας γίνεται με την ανάμειξη ζεστού και κρύου αέρα με τη χρήση μιας ηλεκτρικής βαλβίδας ανάμειξης (mix valve). Η ποσότητα του κρύου και ζεστού αέρα που εισέρχεται στον χώρο κλιματισμού καθορίζεται από έναν εκλεγκτή θερμοκρασίας, ο οποίος λαμβάνει την τιμή της επικρατούσας θερμοκρασίας από έναν αισθητήρα θερμοκρασίας στον χώρο της καμπίνας (cabin temperature sensor). Για την επίτευξη της επιθυμητής θερμοκρασίας χωρίς την

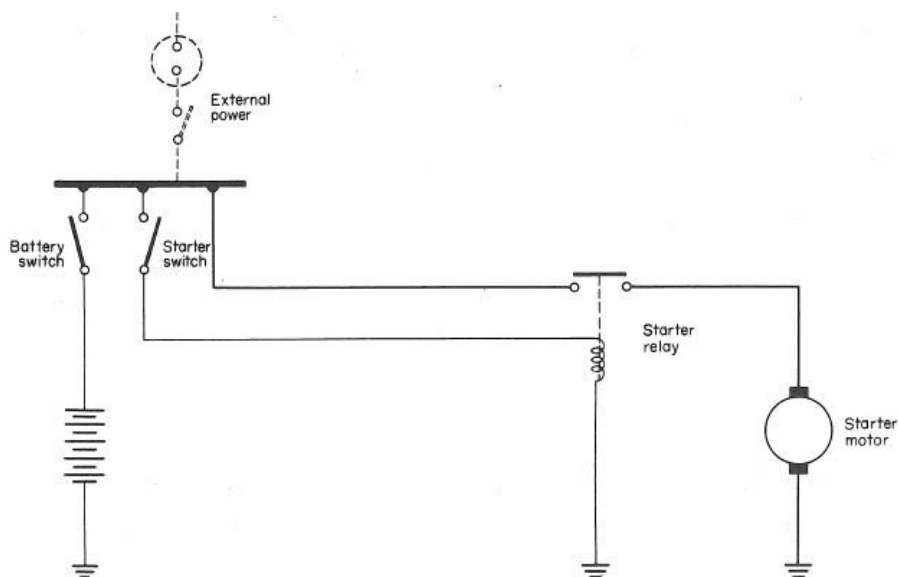
ανάπτυξη ξαφνικών κυμάτων θερμού ή κρύου αέρα χρησιμοποιείται ένας αισθητήρας θερμοκρασίας (anticipator sensor), ο οποίος τοποθετείται εντός των αγωγών μεταφοράς του κλιματιζόμενου αέρα. Επιπλέον για λόγους ασφαλείας ένας αισθητήρας (limit sensor) εξασφαλίζει ότι ο κλιματιζόμενος αέρας δεν θα ξεπεράσει το ανώτατο όριο θερμοκρασίας (συνήθως 90°C) [26 §10].



Εικόνα 8.7: Τυπική δομή ενός συστήματος κλιματισμού [26].

8.6 Συστήματα εκκίνησης – έναυσης κινητήρων

Η εκκίνηση ενός κινητήρα καύσης αεροπλάνου γίνεται είτε με ηλεκτρομηχανικό τρόπο, είτε με καθαρά ηλεκτρικό ανάλογο με τον τύπο και το μέγεθος του αεροπλάνου. Στην ηλεκτρική εκκίνηση χρησιμοποιείται ένας ηλεκτρικός κινητήρας, ο οποίος ονομάζεται κινητήρας εκκίνησης (starter motor). Ο κινητήρας αυτός είναι συνεχούς ρεύματος διέγερσης σειράς και παρουσιάζει μεγάλη ροπή κατά την εκκίνηση. Ο άξονας του κινητήρα εκκίνησης συνδέεται σε ένα κιβώτιο γραναζιών μέσω ενός συστήματος συμπλέκτη, ο οποίος είναι υπεύθυνος να εμπλέκει ή να απομπλέκει τον κινητήρα από το κιβώτιο των γραναζιών. Αυτό συμβαίνει για την αποφυγή φθορών που οφείλονται στις τριβές των ψηκτρών με τον συλλέκτη, καθώς και για αποφυγή λειτουργίας της μηχανής ως γεννήτρια. Η τροφοδοσία του κινητήρα εκκίνησης γίνεται από τον ζυγό της μπαταρίας (bus bar) μέσω ενός ρελέ ισχύος, το οποίο ελέγχεται από τον διακόπτη εκκίνησης που βρίσκεται στον χώρο του πιλοτήριου. Ο διακόπτης αυτός τις περισσότερες φορές διαθέτει έναν μηχανισμό ελατηρίου, ο οποίος τον επαναφέρει στην αρχική του θέση (ανοικτός διακόπτης) όταν ο πιλότος σταματήσει τη διαδικασία εκκίνησης. Ένα τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα αυτής της διαδικασίας ενεργοποίησης φαίνεται στην εικόνα 8.8 παρακάτω.

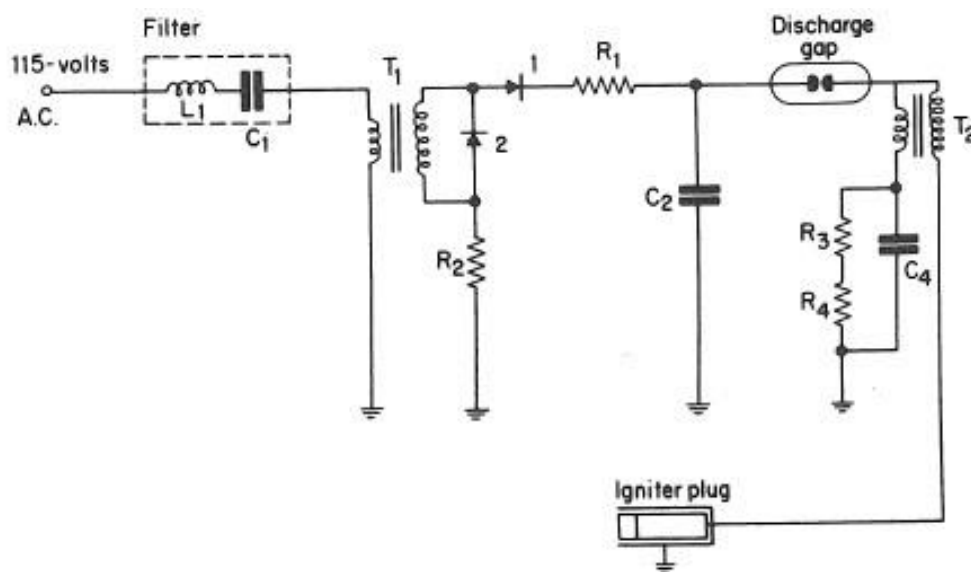


Εικόνα 8.8: Τυπικό ηλεκτρικό διάγραμμα ηλεκτρικής εκκίνησης [26].

Ο κινητήρας μέσω του κιβωτίου γραναζιών περιστρέφει τον συμπιεστή του αεροκινητήρα, ο οποίος συμπιέζει τον ατμοσφαιρικό αέρα και τον οδηγεί στον θάλαμο καύσης. Η περιστροφή του συμπιεστή με αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιείται μόνο σε μικρά αεροπλάνα και ελικόπτερα. Αυτό συμβαίνει, διότι για μια πιθανή εκκίνηση μεγάλων κινητήρων καύσης με χρήση κινητήρων εκκίνησης συνεχούς ρεύματος θα χρειαζόταν ηλεκτρικό σύστημα εκκίνησης μεγαλύτερου μεγέθους λόγω των ρευμάτων μεγάλης έντασης. Αυτό θα σήμαινε αύξηση του μεγέθους του κινητήρα εκκίνησης, των αγωγών καθώς και των χρησιμοποιούμενων συσσωρευτών που θα οδηγούσε στη συνολική αύξηση του βάρους. Ο συμπιεσμένος αέρας που εισέρχεται στον θάλαμο καύσης αναμειγνύεται με το καύσιμο δημιουργώντας έτσι ένα μείγμα αέρα – καυσίμου. Το μείγμα αυτό στον θάλαμο καύσης αναφλέγεται με τη χρήση σπινθήρα, ο οποίος προέρχεται από τους σπινθηριστές. Με την καύση του μείγματος παράγονται καυσαέρια, τα οποία εξέρχονται από τον θάλαμο καύσης και πέφτουν πάνω στην τουρμπίνα, την οποία περιστρέφουν. Η τουρμπίνα με τη σειρά της μέσω ενός άξονα παρέχει περιστροφή στον συμπιεστή, ο οποίος συνεχίζει να τροφοδοτεί τον θάλαμο καύσης με αέρα υπό πίεση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των στροφών του κινητήρα. Όταν ο αριθμός των στροφών ξεπεράσει ένα όριο χαρακτηριστικό για κάθε κινητήρα, ο κινητήρας εκκίνησης απομπλέκεται και η διαδικασία αυτοσυντηρείται.

Η ηλεκτρομηχανική εκκίνηση χρησιμοποιείται σε μεγάλα αεροπλάνα, όπου η περιστροφή του συμπιεστή με ηλεκτρικό κινητήρα δεν είναι εφικτή. Σε αυτήν την εκκίνηση χρησιμοποιείται ένας μικρότερος αεροκινητήρας (APU), ο οποίος παρέχει αέρα μέσω συστήματος σωληνώσεων και περιστρέφει τον συμπιεστή του κυρίως αεροκινητήρα.

Η παραγωγή σπινθήρα στον θάλαμο καύσης γίνεται με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο περιστρέφεται ο συμπιεστής. Στον θάλαμο καύσης είναι τοποθετημένα αντιδιαμετρικά τα εξαρτήματα παραγωγής σπινθήρα (μπουζί). Η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στη δημιουργία ηλεκτρικού τόξου μεταξύ δυο επαφών ακίδων όταν αυτές αναπτύξουν στα άκρα τους διαφορά δυναμικού μεγάλης τιμής. Αυτή η διαφορά δυναμικού είναι μεγαλύτερη των 2000V. Με την ηλεκτρική εκκένωση αυτή μεταξύ των ακροδεκτών αναφλέγεται το μείγμα καυσίμου που βρίσκεται στο χώρο. Ένα τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα σπινθηριστών φαίνεται στην εικόνα 8.9 παρακάτω [26 §10].



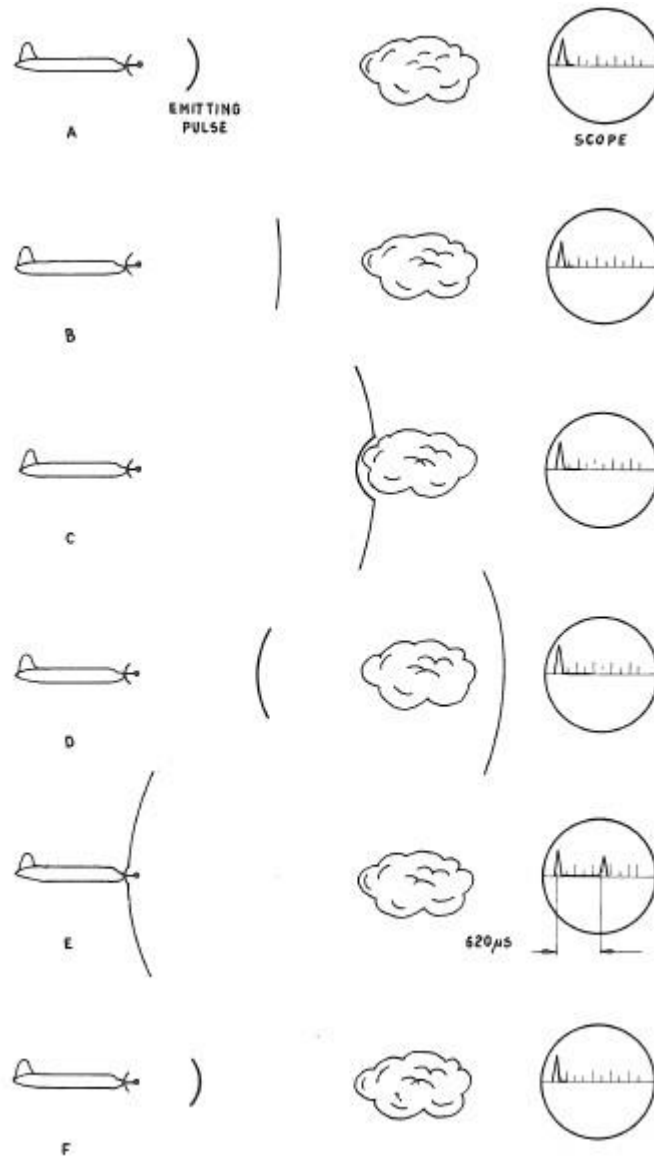
Εικόνα 8.9: Τυπικό ηλεκτρικό κύκλωμα σπινθηριστών [26].

8.7 Σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης καιρού

Για την εξασφάλιση της ασφάλειας μιας πτήσης είναι απαραίτητο ο χειρίστης ενός αεροπλάνου να γνωρίζει τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην κατεύθυνση που ακολουθεί. Η πληροφορία αυτή είναι πολύ σημαντική, διότι γίνεται εκτίμηση και προετοιμασία των μελλοντικών ενεργειών που πρόκειται να ακολουθηθούν από το πλήρωμα. Το σύστημα που είναι υπεύθυνο για την παροχή τέτοιων πληροφοριών στο αεροπλάνο είναι το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης καιρού (weather mapping system), το οποίο διαθέτει ως κύριο εξάρτημα το ραντάρ.

Η αρχή λειτουργίας του ραντάρ βασίζεται στην εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, τα οποία βρίσκονται στην περιοχή των ραδιοκυμάτων. Η τοποθέτηση του ραντάρ γίνεται στο μπροστινό μέρος του αεροπλάνου. Με την χρήση διαφόρων ηλεκτρονικών εξαρτημάτων παράγεται και εκπέμπεται ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μεγάλης ενέργειας. Το κύμα αυτό μεταδίδεται στον αέρα με κατεύθυνση, την οποία ακολουθεί το αεροπλάνο. Όταν το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αυτό συναντήσει

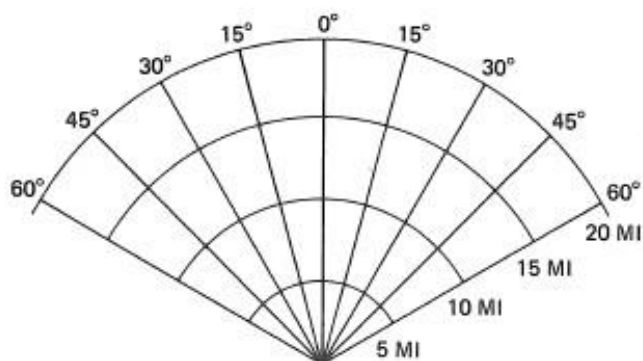
κάποιο εμπόδιο, όπως είναι ένα βουνό, ένα σύννεφο ή ακόμα και ένα άλλο αεροπλάνο ένα μέρος του ανακλάται και επιστρέφει προς το σημείο από το οποίο έγινε η εκπομπή. Το ραντάρ αυτό λαμβάνει το εισερχόμενο εξασθενημένο ηλεκτρομαγνητικό κύμα όπως φαίνεται στην εικόνα 8.10 παρακάτω.



Εικόνα 8.10: Εκπομπή και λήψη ηλεκτρομαγνητικού κύματος από το ραντάρ [22].

Με τη μέτρηση του χρόνου που μεσολαβεί μεταξύ του σήματος εκπομπής και του σήματος λήψης υπολογίζεται η απόσταση, στην οποία βρίσκεται το εμπόδιο. Μεγάλη σημασία δίνεται στον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ των εκπομπών του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Αυτό γίνεται, διότι εάν ο χρόνος εκπομπής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι πολύ μικρός, τότε το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο καταφθάνει από την ανάκλαση θα εξουδετερωθεί από το κύμα της επόμενης εκπομπής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη λήψη λανθασμένης πληροφορίας.

Τα πρώτα ραντάρ που χρησιμοποιήθηκαν ήταν αναλογικά και το σήμα που λαμβανόταν απεικονιζόταν σε μια οθόνη CRT, η οποία διέθετε άξονες συντεταγμένων για τον προσδιορισμό της ακριβούς θέσης του εκάστοτε εμποδίου σε σχέση με τη θέση του αεροπλάνου.



Εικόνα 8.11: Σύστημα συντεταγμένων σε οθόνη CRT [22].

Με την εξέλιξη της τεχνολογίας αναπτυχθήκαν ραντάρ ψηφιακού τύπου, τα οποία παρέχουν περισσότερες και πιο ακριβείς πληροφορίες στον χειριστή. Η απεικόνιση των καιρικών συνθήκων σε αυτού του είδους ραντάρ γίνεται με χρήση χρωμάτων. Το πράσινο χρώμα χρησιμοποιείται για χαμηλής έντασης καταιγίδα, το κίτρινο χρώμα χρησιμοποιείται για την απεικόνιση μέτριας έντασης καταιγίδα, ενώ το κόκκινο για μεγάλης έντασης καταιγίδα. Η συχνότητα εκπομπής του ηλεκτρομαγνητικού κύματος γίνεται σε δυο βασικές ζώνες, οι οποίες είναι η C – band (4000MHz - 8000MHz) και η X – band (8000MHz - 12000MHz). Κάθε ραντάρ είναι ικανό να εκπέμψει μόνο σε μια ζώνη και με βάση αυτό καθορίζονται οι πτητικές ικανότητες που παρουσιάζει ένα αεροπλάνο. Ένα αεροπλάνο που διαθέτει ραντάρ, το οποίο εκπέμπει στην ζώνη C είναι ικανό να πραγματοποιήσει πτήση διαμέσου άσχημων καιρικών συνθήκων (καταιγίδας). Αυτό συμβαίνει, διότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα, το οποίο εκπέμπεται σε αυτήν τη ζώνη δεν ανακλάται εύκολα από τα κοντινά σύννεφα. Αντίθετα όμως τα διαπερνά και παρέχει στον χειριστή την ικανότητα να γνωρίζει τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν σε μεγαλύτερη απόσταση. Συνεπώς το αεροπλάνο κατευθύνεται σε περιοχές, οι οποίες δεν επιφυλάσσουν χειρότερες καιρικές συνθήκες από τις ήδη υπάρχουσες. Όταν ένα αεροπλάνο διαθέτει ραντάρ, το οποίο εκπέμπει στην ζώνη X τότε δεν μπορεί να πραγματοποιήσει πτήση διαμέσου άσχημων καιρικών συνθήκων. Αυτό συμβαίνει, διότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα που εκπέμπεται στη ζώνη X δεν έχει την κατάλληλη ενέργεια, ώστε να απεικονίσει το βάθος των άσχημων καιρικών συνθήκων που επικρατούν. Για τον λόγο αυτό τα ραντάρ αυτά χρησιμοποιούνται μόνο για την αποφυγή καταιγίδων. Ένα τυπικό σύστημα ραντάρ που χρησιμοποιείται στα αεροπλάνα περιλαμβάνει την κεραία (antenna), τις οθόνες απεικόνισης (indicator), τον πίνακα ελέγχου (control panel) και τον εκπομπό – δέκτη (receiver – transmitter) [22 §16].

8.8 Συμπεράσματα

Ένα σύγχρονο αεροπλάνο διαθέτει αρκετά συστήματα, τα οποία λειτουργούν με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Κάποια από τα συστήματα αυτά παρέχουν σημαντικές πληροφορίες για τη θέση και την ασφάλεια του αεροπλάνου, όπως είναι οι διακόπτες στο σύστημα προσγείωσης, το σύστημα πυρανίχνευσης καθώς και το σύστημα έγκαιρης προειδοποίησης καιρού. Οι πληροφορίες αυτές δεν θα ήταν δύσκολο να μεταδοθούν στον χειριστή εάν δεν υπήρχαν τα ολοκληρωμένα ηλεκτρικά δίκτυα. Επιπλέον διάφορες διαδικασίες, όπως η εκκίνηση ενός κινητήρα καύσης, καθώς και η λειτουργία του συστήματος αντιπαγοποίησης, δεν θα πραγματοποιούνταν τόσο εύκολα και γρηγορά. Συνεπώς η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται σε όλες τις λειτουργίες του αεροπλάνου. Για τον λόγο αυτό οι κατασκευαστές υλοποιούν ένα ηλεκτρικό σύστημα, το οποίο πρέπει να παραμένει ασφαλές και αξιόπιστο ακόμα και σε δυσμενείς καταστάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο : Προσομοίωση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αεροπλάνου

9.1 Εισαγωγή

Κατά τη διάρκεια της κατασκευής ενός ηλεκτρικού συστήματος αεροσκάφους οι κατασκευάστριες εταιρίες είναι απαραίτητο να πραγματοποιούν διάφορες μελέτες για τη συμπεριφορά του. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται ώστε να αντλούνται πληροφορίες για τη συμπεριφορά του δικτύου σε διάφορες καταστάσεις, στις οποίες μπορεί να βρεθεί το αεροπλάνο. Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι άγνωστες αντιδράσεις που μπορεί να έχει το ηλεκτρικό σύστημα κατά τη διάρκεια μιας πτήσης. Επιπλέον όταν υπάρχει πλήρη γνώση της συμπεριφοράς του ηλεκτρικού δικτύου ενός αεροσκάφους η μελλοντική αναβάθμισή του αποτελεί ευκολότερη διαδικασία. Η μελέτη ενός ηλεκτρικού δικτύου μπορεί να πραγματοποιηθεί σε επίπεδο ανάλυσης φορτίου, καθώς και σε διάφορα σφάλματα που μπορεί να προκληθούν στο σύστημα προερχόμενα από βραχυκυκλώματα, καθώς και μεταβολές φορτίου.

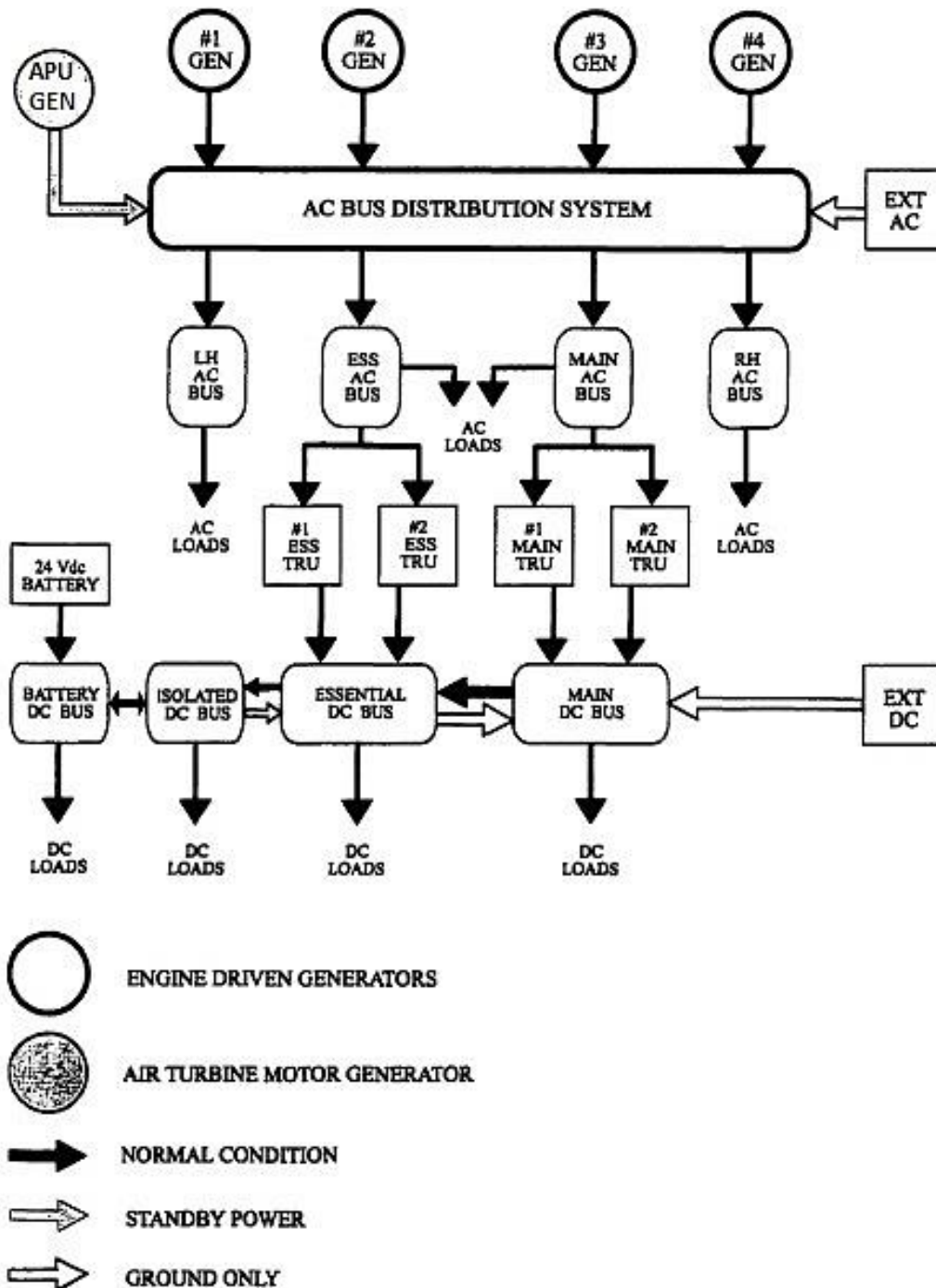
9.2 Διαμόρφωση δικτύου

Στην παρούσα εργασία θα μελετηθεί το ηλεκτρικό δίκτυο ενός μεταγωγικού αεροπλάνου μεγάλου μεγέθους, το οποίο διαθέτει τέσσερις ελικοστρόβιλους (turbo-prop) κινητήρες. Σε κάθε έναν από αυτούς είναι τοποθετημένη μια σύγχρονη γεννήτρια χωρίς ψήκτρες (brushless) ονομαστικής ισχύος 40 kVA. Το συγκεκριμένο αεροπλάνο διαθέτει μια βοηθητική μονάδα ισχύος (APU), η οποία φέρει μια σύγχρονη γεννήτρια ιδίων χαρακτηριστικών με αυτές των κύριων κινητήρων. Η δομή του ηλεκτρικού δικτύου του συγκεκριμένου αεροσκάφους φαίνεται στην εικόνα 9.1 παρακάτω. Η κάθε κύρια γεννήτρια παρέχει τριφασική ηλεκτρική ισχύ σε ένα ξεχωριστό ζυγό διανομής υπό κανονικές συνθήκες. Η γεννήτρια της βοηθητικής μονάδας ισχύος δεν τροφοδοτεί κανένα ζυγό διανομής σε κανονική λειτουργία και παραμένει σε αναμονή ως βοηθητική. Συνεπώς το αεροπλάνο διαθέτει τέσσερις κύριους ζυγούς διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίοι λαμβάνουν την εξής ονομασία:

- LH (LEFT HAND) AC BUS
- ESS AC BUS (ESSENTIAL AC BUS)
- MAIN AC BUS
- RH (RIGHT HAND) AC BUS

Οι ζυγοί αυτοί με τη σειρά τους τροφοδοτούν τα φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι ζυγοί ESS AC BUS και MAIN AC BUS εκτός από τα φορτία εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτούν μέσω

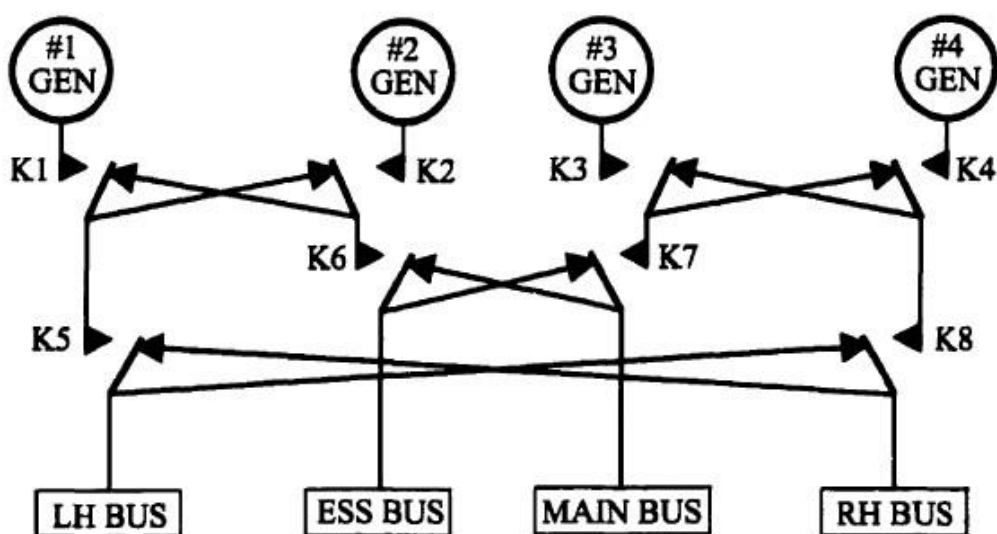
μετασχηματιστών – ανορθωτών (TRU – Transformer Rectifier Unit) και ρελέ αποκοπής ανάστροφου ρεύματος (RCCR – Reverse Current Cutout Relay) τους ζυγούς διανομής συνεχούς ρεύματος. Ο ζυγός διανομής ESS AC BUS μέσω δύο TRUs τροφοδοτεί τον ζυγό διανομής ESS DC BUS (ESSENTIAL DC BUS). Ο ζυγός διανομής MAIN AC BUS μέσω δύο TRUs τροφοδοτεί τον ζυγό διανομής MAIN DC BUS. Εκτός από αυτούς του δύο ζυγούς συνεχούς ρεύματος το αεροπλάνο διαθέτει τον ζυγό που παρέχει ηλεκτρική ισχύ ο συσσωρευτής, ο οποίος ονομάζεται BATTERY DC BUS. Με τη σειρά του ο ζυγός BATTERY DC BUS τροφοδοτεί τον ζυγό ISOLATED DC BUS.



Εικόνα 9.1: Δομή ηλεκτρικού δικτύου αεροσκάφους προς μελέτη

Όπως φαίνεται και στην εικόνα 9.1 οι ζυγοί διανομής συνεχούς ρεύματος διασυνδέονται μεταξύ τους. Η ροή ισχύος κατά τη διάρκεια της πτήσης γίνεται μόνο από το MAIN DC BUS προς το BATTERY DC BUS, ενώ το αντίθετο δεν επιτρέπεται. Η ροή ισχύος από το BATTERY DC BUS προς το MAIN DC BUS γίνεται μόνο κατά τη διάρκεια που το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος. Επιπλέον υπάρχει δυνατότητα παροχής εναλλασσόμενου και συνεχούς ρεύματος από εξωτερική πηγή, όταν το αεροπλάνο βρίσκεται στο έδαφος και οι γεννήτριες του βρίσκονται εκτός λειτουργίας.

Οι σύγχρονες γεννήτριες τροφοδοτούν τους ζυγούς διανομής εναλλασσόμενου ρεύματος μέσω συστήματος αυτοματισμού, το οποίο περιλαμβάνει ηλεκτρονόμους (ρελέ) ισχύος. Το σχηματικό διάγραμμα των ρελέ ισχύος που χρησιμοποιούνται φαίνονται στην εικόνα 9.2 παρακάτω.



Εικόνα 9.2: Μονογραμμικό διάγραμμα διασυνδεδεμένου συστήματος.

Ανάλογα με τον αριθμό των γεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία μέσω του κατάλληλου συνδυασμού των ηλεκτρονόμων ισχύος τροφοδοτούνται οι ζυγοί εναλλασσόμενου ρεύματος. Όταν μια ή περισσότερες γεννήτριες βρίσκονται εκτός λειτουργίας, τότε με την κατάλληλη ενεργοποίηση των ηλεκτρονόμων οι παραμένουσες γεννήτριες αναλαμβάνουν να τροφοδοτήσουν τα φορτία. Όταν κάποιος αριθμός γεννητριών τεθούν εκτός λειτουργίας και η ηλεκτρική ισχύ των παραμενόντων δεν επαρκεί, τότε τροφοδοτούνται μόνο τα φορτία που παρουσιάζουν μεγάλη σημασία. Όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί ζυγών εναλλασσόμενου ρεύματος με τις γεννήτριες που βρίσκονται σε λειτουργία φαίνονται στον πίνακα 9.1. Πιο αναλυτικά φαίνονται οι ζυγοί εναλλασσόμενου ρεύματος, καθώς και η σύγχρονη γεννήτρια που τους τροφοδοτεί ανάλογα με την κατάσταση που βρίσκεται το σύστημα τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Στο σημείο αυτό είναι απαραίτητο να τονιστεί ότι οι σύγχρονες

γεννήτριες δεν λειτουργούν ποτέ παράλληλα μεταξύ τους. Πιο συγκεκριμένα ένας ζυγός δεν λαμβάνει ποτέ ταυτόχρονα ηλεκτρική ισχύ από δυο διαφορετικές γεννήτριες την ίδια χρονική στιγμή.

Πίνακας 9.1: Αντιστοιχία ενεργοποιημένων γεννητριών με τους ζυγούς εναλλασσόμενου ρεύματος.

ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ				ΡΕΛΕ ΙΣΧΥΟΣ								ΖΥΓΟΙ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ			
G1	G2	G3	G4	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	LH	ESS	MAIN	RH
X				X					X				1	1	
	X				X				X				2	2	
		X				X				X			3	3	
			X				X			X			4	4	
X	X			X	X			X	X			1	2	2	1
X		X		X		X		X	X	X	X	1	1	3	3
X			X	X			X	X	X	X	X	1	1	4	4
	X	X			X	X		X	X	X	X	2	2	3	3
	X		X		X		X	X	X	X	X	2	2	4	4
		X	X			X	X			X	X	4	3	3	4
X	X	X		X	X	X		X	X	X	X	1	2	3	3
X	X		X	X	X		X	X	X	X	X	1	2	4	4
X		X	X	X		X	X	X	X	X	X	1	1	3	4
	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	2	2	3	4
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1	2	3	4

9.3 Ενεργειακός ισολογισμός του συστήματος

Ένα αεροσκάφος διαθέτει πολυάριθμα συστήματα και ηλεκτρικά εξαρτήματα, τα οποία καταναλώνουν ενέργεια για τη λειτουργία τους. Οι ηλεκτρικές καταναλώσεις (ηλεκτρικά φορτία) λαμβάνουν ηλεκτρική ισχύ από τους ζυγούς διανομής ανάλογα με τη σπουδαιότητα τους, η οποία κρίνεται από τον κατασκευαστή, καθώς και από τη μορφή της ηλεκτρικής ισχύος που χρειάζονται για να λειτουργήσουν.

Τα ηλεκτρικά εξαρτήματα του μεταγωγικού αεροσκάφους μεγάλου μεγέθους που περιγράφηκαν παραπάνω καθώς και οι αντίστοιχες ενεργειακές απαιτήσεις τους καταγράφονται στους πίνακες 9.2 έως 9.7 παρακάτω. Στους πίνακες 9.2 έως 9.5 καταγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλώσεων εναλλασσόμενου ρεύματος, οι οποίες τροφοδοτούνται από τους AC ζυγούς. Ενώ στους πίνακες 9.6 και 9.7 καταγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλώσεων συνεχούς ρεύματος, οι οποίες τροφοδοτούνται από τους DC ζυγούς.

Στον παρακάτω ενεργειακό ισολογισμό του αεροσκάφους καταγράφονται οι ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη διάρκεια τριών καταστάσεων, οι οποίες είναι οι εξής:

- Τροχοδρόμηση
- Απογείωση / προσγείωση
- Κανονική πτήση

Πιο αναλυτικά στους πίνακες 9.2 έως 9.5 αναγράφονται οι καταναλώσεις εναλλασσόμενου ρεύματος όπως αυτές παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία του συγκεκριμένου αεροσκάφους. Επιπλέον με βάση τη συγκεκριμένη βιβλιογραφία καταγράφεται το πλήθος (N) τους, η ονομαστική φαινόμενη ισχύς $S_{ον.απορ}$ σε (VA) καθώς και ο συντελεστής ισχύος $\cos(\varphi)$.

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα υπολογίζεται η ονομαστική απορροφούμενη πραγματική ισχύς σε (W) καθώς και η ονομαστική απορροφούμενη άεργη ισχύς σε (VAr) με χρήση των παρακάτω σχέσεων:

$$P_{ον.απορ} = S_{ον.απορ} \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{σχέση 9.1})$$

$$Q_{ον.απορ} = \sqrt{S_{ον.απορ}^2 - P_{ον.απορ}^2} \quad (\text{σχέση 9.2})$$

Στη συνέχεια υπολογίζεται η εγκατεστημένη πραγματική ισχύς σε (W) ανά κατηγορία καταναλωτή με χρήση της παρακάτω σχέσης:

$$P_{εγκατ} = P_{ον.απορ} \cdot N \quad (\text{σχέση 9.3})$$

Κατά τη διάρκεια της τροχοδρόμησης αναγράφονται το πλήθος (N) των καταναλωτών ανά κατηγορία που βρίσκονται σε λειτουργία καθώς και ο συντελεστής λειτουργίας f_s , ο οποίος προκύπτει βάσει λογικών παραδοχών. Βάσει αυτών των δεδομένων υπολογίζεται η πραγματική ισχύς λειτουργίας σε (W) καθώς και η άεργη ισχύς λειτουργίας σε (VAr) σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:

$$P_{λειτ} = P_{ον.απορ} \cdot f_s \cdot N \quad (\text{σχέση 9.4})$$

$$Q_{λειτ} = Q_{ον.απορ} \cdot f_s \cdot N \quad (\text{σχέση 9.5})$$

Στη συνέχεια η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις δύο άλλες καταστάσεις λειτουργίας (προσγείωση & απογείωση, πτήση).

Στους πίνακες 9.6 και 9.7 καταγράφονται όλες οι καταναλώσεις συνεχούς ρεύματος που τροφοδοτούνται από τους ζυγούς συνεχούς ρεύματος όπως αυτές αναγράφονται στη βιβλιογραφία του συγκεκριμένου αεροπλάνου. Επιπλέον αναγράφεται το πλήθος (N) των καταναλώσεων ανά κατηγορία που είναι εγκατεστημένοι στο αεροπλάνο. Στην συνέχεια καταγράφεται η ονομαστική απορροφούμενη ισχύς σε (W), η οποία δίνεται από τη βιβλιογραφία του αεροσκάφους.

Μετά τις παραπάνω καταγραφές υπολογίζεται η εγκατεστημένη ισχύς σε (W) ανά κατηγορία καταναλωτή σύμφωνα με την σχέση 9.3.

Κατά τη διάρκεια της τροχοδρόμησης αναγράφονται το πλήθος (N) των καταναλωτών ανά κατηγορία που βρίσκονται σε λειτουργία καθώς και ο συντελεστής λειτουργίας f_s , ο οποίος προκύπτει βάσει λογικών παραδοχών. Στη συνέχεια υπολογίζεται η ισχύς λειτουργίας σε (W) σύμφωνα με τη σχέση 9.4.

Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις δύο άλλες καταστάσεις λειτουργίας (προσγείωση & απογείωση, πτήση).

Πίνακας 9.2: Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής LH AC BUS.

α/α	Καταναλώσεις	N	Συν.απορ (VA)	συν(φ)	Ροικ.απορ (W)	Qοικ.απορ (VA)	Ρεγκατ (W)	Τροχοδρόμηση				Απογείωση & Προσγείωση				Πτήση			
								N	f _s	Ρλειτ (W)	Qλειτ (VAr)	N	f _s	Ρλειτ (W)	Qλειτ (VAr)	N	f _s	Ρλειτ (W)	Qλειτ (VAr)
1	Αποπαγοποίηση αλεξήνεμου 1η ομάδα (LOW)	3	2040	1	2040,0	0,0	6120,0	3	1	6120,0	0,0	3	1	6120,0	0,0	3	1	6120,0	0,0
2	Αποπαγοποίηση αλεξήνεμου 1η ομάδα (HIGH)	3	5020	1	5020,0	0,0	15060,0	3	0,01	150,6	0,0	3	0,01	150,6	0,0	3	0,05	753,0	0,0
3	Αποπαγοποίηση αλεξήνεμου 2η ομάδα (LOW)	6	1545	1	1545,0	0,0	9270,0	6	1	9270,0	0,0	6	1	9270,0	0,0	6	1	9270,0	0,0
4	Αποπαγοποίηση αλεξήνεμου 2η ομάδα (HIGH)	6	3850	1	3850,0	0,0	23100,0	6	0,01	231,0	0,0	6	0,01	231,0	0,0	6	0,05	1155,0	0,0
5	Μαγειρείο	2	4200	1	4200,0	0,0	8400,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	2	0,2	1680,0	0,0
6	Ανεμιστήρας χώρου μεταφοράς	1	2400	0,65	1560,0	1823,8	1560,0	1	1	1560,0	1823,8	1	1	1560,0	1823,8	1	1	1560,0	1823,8
7	Αντλία καυσίμου δεξαμενής Νο1	1	932	0,54	503,3	784,4	503,3	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4
8	Αντλία καυσίμου Νο1 αριστερής εξωτερικής δεξαμενής	1	1450	0,76	1102,0	942,4	1102,0	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ										18936,9	3550,7			18936,9	3550,7			22143,3	3550,7

Πίνακας 9.3: Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής ESS AC BUS

α/α	Καταναλώσεις	N	Συν.απορ (VA)	συν(φ)	Ροικ.απορ (W)	Qοικ.απορ (VA)	Ρεγκ.απορ (W)	Τροχοδρόμηση				Απογείωση & Προσγείωση				Πτήση			
								N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)	Q _{λειτ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)	Q _{λειτ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)	Q _{λειτ} (VAr)
1	Κινητήρας ρύθμισης επιφάνειας AILERON	1	282	0,98	276,4	56,1	276,4	1	0,05	13,8	2,8	1	0,05	13,8	2,8	1	0,05	13,8	2,8
2	Κινητήρας ρύθμισης επιφάνειας ELEVATOR	1	679	0,98	665,4	135,1	665,4	1	0,05	33,3	6,8	1	0,05	33,3	6,8	1	0,05	33,3	6,8
3	Κινητήρας ρύθμισης επιφάνειας RUDDER	1	282	0,98	276,4	56,1	276,4	1	0,05	13,8	2,8	1	0,05	13,8	2,8	1	0,05	13,8	2,8
4	Εξαρτήματα AC αυτόματου πιλότου	1	250	0,85	212,5	131,7	212,5	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	1	1	212,5	131,7
5	Πυξίδα	2	193	0,85	164,1	101,7	328,1	2	1	328,1	203,3	2	1	328,1	203,3	2	1	328,1	203,3
6	Υδραυλική αντλία πτέρωσης έλικα	4	3450	0,75	2587,5	2282,0	10350,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	4	0,01	103,5	91,3
7	Υδραυλική αντλία	2	2760	0,7	1932,0	1971,0	3864,0	2	1	3864,0	3942,1	2	1	3864,0	3942,1	2	1	3864,0	3942,1
8	Βοηθητική υδραυλική αντλία	1	3450	0,7	2415,0	2463,8	2415,0	1	1	2415,0	2463,8	1	1	2415,0	2463,8	1	1	2415,0	2463,8
9	Αντλία καυσίμου δεξαμενής Νο2	1	932	0,54	503,3	784,4	503,3	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4
10	Δέκτης HF Νο1	1	200	0,9	180,0	87,2	180,0	1	0,5	90,0	43,6	1	0,5	90,0	43,6	1	0,5	90,0	43,6
11	Πομπός HF Νο1	1	778	0,9	700,2	339,1	700,2	1	0,5	350,1	169,6	1	0,5	350,1	169,6	1	0,5	350,1	169,6
12	TACAN	2	200	0,8	160,0	120,0	320,0	2	1	320,0	240,0	2	1	320,0	240,0	2	1	320,0	240,0
13	Αλτίμετρο	1	100	0,9	90,0	43,6	90,0	1	1	90,0	43,6	1	1	90,0	43,6	1	1	90,0	43,6
14	Ραδιοπυξίδα	2	15	0,38	5,7	13,9	11,4	2	1	11,4	27,7	2	1	11,4	27,7	2	1	11,4	27,7
15	Radar Doppler	1	420	0,9	378,0	183,1	378,0	1	1	378,0	183,1	1	1	378,0	183,1	1	1	378,0	183,1
16	Radar καιρού	1	1768	0,9	1591,2	770,7	1591,2	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	1	1	1591,2	770,7
17	HIS	2	70	1	70,0	0,0	140,0	2	1	140,0	0,0	2	1	140,0	0,0	2	1	140,0	0,0
18	Όργανο ένδειξης οξυγόνου	2	4	1	4,0	0,0	8,0	2	1	8,0	0,0	2	1	8,0	0,0	2	1	8,0	0,0

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

19	Όργανο ένδειξης καυσίμου	16	8	1	8,0	0,0	128,0	8	1	64,0	0,0	8	1	64,0	0,0	8	1	64,0	0,0			
20	Όργανο ένδειξης ροής καυσίμου	4	14,5	0,35	5,1	13,6	20,3	4	1	20,3	54,3	4	1	20,3	54,3	4	1	20,3	54,3			
21	Μεταβιβαστής ροής καυσίμου	4	5,8	0,23	1,3	5,6	5,3	4	1	5,3	22,6	4	1	5,3	22,6	4	1	5,3	22,6			
22	Όργανο ένδειξης πίεσης λαδιού κινητήρα	4	5,9	0,18	1,1	5,8	4,2	4	1	4,2	23,2	4	1	4,2	23,2	4	1	4,2	23,2			
23	Γυροσκόπιο	2	38	0,88	33,4	18,0	66,9	2	1	66,9	36,1	2	1	66,9	36,1	2	1	66,9	36,1			
24	Φωτισμός οργάνων κινητήρα	32	0,94	1	0,9	0,0	30,1	32	1	30,1	0,0	32	1	30,1	0,0	32	1	30,1	0,0			
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ											8749,6	8249,8					8749,6	8249,8			10656,8	9243,4

Πίνακας 9.4: Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής MAIN AC BUS.

α/α	Καταναλώσεις	N	Συν.απορ (VA)	συν(φ)	Ρον.απορ (W)	Qον.απορ (VA)	Ρεγκατ (W)	Τροχοδρόμηση				Απογείωση & Προσγείωση				Πτήση			
								N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
1	Αντλία καυσίμου δεξαμενής Νο 3	1	932	0,54	503,3	784,4	503,3	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4	1	1	503,3	784,4
2	Αντλία καυσίμου αριστερής βοηθητικής δεξαμενής	2	1450	0,76	1102,0	942,4	2204,0	2	1	2204,0	1884,8	2	1	2204,0	1884,8	2	1	2204,0	1884,8
3	Αντλία καυσίμου δεξιάς βοηθητικής δεξαμενής	2	1450	0,76	1102,0	942,4	2204,0	2	1	2204,0	1884,8	2	1	2204,0	1884,8	2	1	2204,0	1884,8
4	Αντλία μεταφοράς καυσίμου	4	1450	0,76	1102,0	942,4	4408,0	0	0	0,0	0,0	0	0	0,0	0,0	4	0,2	881,6	753,9
5	Αντλία καυσίμου Νο2 αριστερής εξωτερικής δεξαμενής	1	1450	0,76	1102,0	942,4	1102,0	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4
6	Αντλία καυσίμου Νο1 δεξιάς εξωτερικής δεξαμενής	1	1450	0,76	1102,0	942,4	1102,0	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4
7	Δέκτης HF Νο2	1	200	0,9	180,0	87,2	180,0	1	0,5	90,0	43,6	1	0,5	90,0	43,6	1	0,5	90,0	43,6
8	Πομπός HF Νο2	1	778	0,9	700,2	339,1	700,2	1	0,5	350,1	169,6	1	0,5	350,1	169,6	1	0,5	350,1	169,6
9	Radar ανίχνευσης	1	1160	0,9	1044,0	505,6	1044,0	1	1	1044,0	505,6	1	1	1044,0	505,6	1	1	1044,0	505,6
10	Radar υψομέτρου	1	162	0,98	158,8	32,2	158,8	1	1	158,8	32,2	1	1	158,8	32,2	1	1	158,8	32,2
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ										8758,1	7189,8			8758,1	7189,8			9639,7	7943,7

Πίνακας 9.5 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής RH AC BUS.

α/α	Καταναλώσεις	N	Σον.απορ (VA)	συν(Φ)	Ρον.απορ (W)	Qον.απορ (VA)	Ρεγκατ (W)	Τροχοδρόμηση				Απογείωση & Προσγείωση				Πτήση			
								N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	N	f _s	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
1	Αντιπαγοποίηση κώνου έλικας	4	2290	1	2290,0	0,0	9160,0	4	1	9160,0	0,0	4	1	9160,0	0,0	4	1	9160,0	0,0
2	Αποπαγοποίηση κώνου έλικας	4	2290	1	2290,0	0,0	9160,0	4	0	0,0	0,0	4	0	0,0	0,0	4	0,2	1832,0	0,0
3	Αποπαγοποίηση πτερυγίων έλικα	4	2290	1	2290,0	0,0	9160,0	4	0	0,0	0,0	4	0	0,0	0,0	4	0,2	1832,0	0,0
4	Αντλία καυσίμου Νο4	1	930	0,54	502,2	782,7	502,2	1	1	502,2	782,7	1	1	502,2	782,7	1	1	502,2	782,7
5	Αντλία καυσίμου Νο2 δεξιάς εξωτερικής δεξαμενής	1	1450	0,76	1102,0	942,4	1102,0	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4	1	1	1102,0	942,4
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ										10764,2	1725,1			10764,2	1725,1			14428,2	1725,1

Πίνακας 9.6 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής ESS DC BUS.

α/α	Καταναλώσεις	N	Ρ _{ον.απορ} (W)	Ρ _{εγκατ} (W)	Τροχοδρόμηση			Απογείωση & Προσγείωση			Πτήση		
					N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)	N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)	N	f _s	Ρ _{λειτ} (W)
1	Συστήματα συνεχούς ρεύματος αυτόματου πιλότου	1	532,0	532,0	1	0	0,0	1	0	0,0	1	1	532,0
2	Ενδεικτής θέσης θυρίδας ψυγείου λαδιού κινητήρα	4	7,6	30,2	4	1	30,2	4	1	30,2	4	1	30,2
3	Ενδεικτής θέσης συστήματος προσγείωσης	3	4,8	14,3	3	1	14,3	3	1	14,3	3	1	14,3
4	Ενδεικτής θερμοκρασίας αντιπαγοποίησης	6	2,8	16,8	6	1	16,8	6	1	16,8	6	1	16,8
5	Όργανο ένδειξης θερμοκρασίας λαδιού κινητήρα	4	1,4	5,6	4	1	5,6	4	1	5,6	4	1	5,6
6	Όργανο ένδειξης ποσότητας λαδιού κινητήρα	4	16,8	67,2	4	1	67,2	4	1	67,2	4	1	67,2
7	Βαλβίδα ελέγχου συστήματος προσγείωσης	1	28,0	28,0	1	1	28,0	1	1	28,0	1	0	0,0
8	Βαλβίδες ελέγχου συστήματος κλιματισμού και αποπαγοποίησης	16	56,0	896,0	16	1	896,0	16	1	896,0	16	1	896,0
9	Ρελέ συστήματος κλιματισμού και αποπαγοποίησης	14	14,0	196,0	14	1	196,0	14	1	196,0	14	1	196,0
10	Ανιχνευτής πάγου	2	280,0	560,0	2	1	560,0	2	1	560,0	2	1	560,0
11	Θερμοδιακόπτες χείλους προσβολής	6	4,2	25,2	6	1	25,2	6	1	25,2	6	1	25,2
12	Θερμική αντίσταση σωλήνα ΡΙΤΟΤ	1	112,0	112,0	1	1	112,0	1	1	112,0	1	1	112,0
13	Ρελέ πτέρωσης έλικα	4	53,2	212,8	4	1	212,8	4	1	212,8	4	1	212,8
14	Μοτέρ ελέγχου θυρίδας ψυγείου λαδιού κινητήρα	4	148,4	593,6	4	1	593,6	4	1	593,6	4	1	593,6

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

15	Φώτα πλοήγησης	2	33,6	67,2	2	1	67,2	2	1	67,2	2	1	67,2	
16	Φώτα προσγείωσης	2	672,0	1344,0	2	1	1344,0	2	1	1344,0	1	0	0,0	
17	Φώτα αντισύγκρουσης	2	106,4	212,8	2	1	212,8	2	1	212,8	2	1	212,8	
18	Ρελέ ενεργοποίησης αντλιών υδραυλικού συστήματος	3	14,0	42,0	3	1	42,0	3	1	42,0	3	1	42,0	
19	Ρελέ αποκοπής ανάστροφου ρεύματος	4	14,0	56,0	4	1	56,0	4	1	56,0	4	1	56,0	
20	Ωμικές αντιστάσεις ελάχιστου φορτίου TRU	2	140,0	280,0	2	1	280,0	2	1	280,0	2	1	280,0	
21	Σύστημα ελέγχου θερμοκρασίας κινητήρα	4	42,0	168,0	4	1	168,0	4	1	168,0	4	1	168,0	
22	Διακόπτες υπερθέρμανσης κινητήρα	16	5,6	89,6	16	1	89,6	16	1	89,6	16	1	89,6	
23	Εξαρτήματα συστήματος ελέγχου επικοινωνίας και πλοήγησης	22	44,8	985,6	22	1	985,6	22	1	985,6	22	1	985,6	
							6002,9				6002,9			5162,9

Πίνακας 9.7 : Αναλυτικός ενεργειακός ισολογισμός του ζυγού διανομής MAIN DC BUS.

α/α	Καταναλώσεις	N	Ρov.απορ (W)	Ρεγκατ (W)	Τροχοδρόμηση			Απογείωση & Προσγείωση			Πτήση		
					N	f _s	Ρλειτ (W)	N	f _s	Ρλειτ (W)	N	f _s	Ρλειτ (W)
1	Βαλβίδες ελέγχου πτερυγίων προσγείωσης	2	25,2	50,4	2	1	50,4	2	1	50,4	0	0	0,0
2	Όργανο ένδειξης θέσης πτερυγίου προσγείωσης	1	8,4	8,4	1	1	8,4	1	1	8,4	1	1	8,4
3	Όργανο ένδειξης θέσης επιφανειών ρύθμισης (Rudder-Elevator-Aileron)	3	8,4	25,2	3	1	25,2	3	1	25,2	3	1	25,2
4	Θερμόμετρο εξωτερικού περιβάλλοντος	1	2,8	2,8	1	1	2,8	1	1	2,8	1	1	2,8
5	Βαλβίδες ελέγχου συστήματος προσγείωσης	3	16,8	50,4	3	1	50,4	3	1	50,4	3	0	0,0
6	Βαλβίδες ελέγχου κλιματιζόμενου αέρα	2	112,0	224,0	2	0	0,0	2	0	0,0	2	1	224,0
7	Φωτισμός πατώματος	21	22,4	470,4	21	1	470,4	21	1	470,4	21	1	470,4
8	Φωτισμός χώρου μεταφοράς και πιλοτηρίου (λευκό φως)	30	22,4	672,0	30	1	672,0	30	1	672,0	30	0	0,0
9	Φωτισμός χώρου μεταφοράς και πιλοτηρίου (κόκκινο φως)	30	42,0	1260,0	30	0	0,0	30	0	0,0	30	1	1260,0
10	Φωτισμός επιφανειών ελέγχου	490	1,1	548,8	490	1	548,8	490	1	548,8	490	1	548,8
11	Φως τροχοδρόμησης	2	168,0	336,0	2	1	336,0	2	0	0,0	2	0	0,0
12	Φωτισμός χώρων επιθεώρησης Νο1	4	56,0	224,0	4	0	0,0	4	0	0,0	4	0,5	112,0
13	Φωτισμός χώρων επιθεώρησης Νο2	15	22,4	336,0	15	0	0,0	15	0	0,0	15	0,5	168,0
14	Μοτέρ υαλοκαθαριστήρων	2	168,0	336,0	2	0	0,0	2	0	0,0	2	0,2	67,2
15	Ωμικές αντιστάσεις ελάχιστου φορτίου TRU	2	140,0	280,0	2	1	280,0	2	1	280,0	2	1	280,0

Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

16	Ρελέ προστασίας ανάστροφου ρεύματος	3	14,0	42,0	3	1	42,0	3	1	42,0	3	1	42,0
17	Ενδεικτική λυχνία ασφαλιζόμενων θυρών	7	5,6	39,2	7	1	39,2	7	1	39,2	7	1	39,2
18	Εξαρτήματα συστήματος ελέγχου επικοινωνίας και πλοήγησης	3	98,0	294,0	3	1	294,0	3	1	294,0	3	1	294,0
19	Εξαρτήματα RADAR	6	112,0	672,0	6	0	0,0	6	0	0,0	6	1	672,0
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ							2819,6			2483,6			4214,0

Από τον ενεργειακό ισολογισμό που πραγματοποιήθηκε τόσο στους ζυγούς του εναλλασσόμενου ρεύματος, όσο και στους ζυγούς συνεχούς ρεύματος προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα.

1. Υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας (όλες οι γεννήτριες σε λειτουργία) η κάθε μια γεννήτρια τροφοδοτεί συγκεκριμένο ζυγό εναλλασσόμενου ρεύματος.
2. Για μη κανονικές συνθήκες λειτουργίας (κάποιος αριθμός γεννητριών εκτός λειτουργίας) μια γεννήτρια μπορεί να τροφοδοτήσει μέχρι δύο ζυγούς εναλλασσόμενου ρεύματος (πίνακας 9.1).
3. Όταν μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτεί τον ζυγό ESS AC BUS τροφοδοτεί ταυτόχρονα και τον ζυγό ESS DC BUS μέσω των δύο TRUs που διαθέτει.
4. Όταν μια γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος τροφοδοτεί τον ζυγό MAIN AC BUS τροφοδοτεί ταυτόχρονα και τον ζυγό MAIN DC BUS μέσω των δύο TRUs που διαθέτει.
5. Η ενεργειακή κάλυψη των συστημάτων υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας είναι δεδομένη βάσει των αποτελεσμάτων των πινάκων 9.2 έως 9.7.

Με βάση τα παραπάνω είναι αναγκαίο να ελεγχθεί εάν η τροφοδότηση με ηλεκτρική ισχύ δυο ζυγών ταυτόχρονα από μια μόνο γεννήτρια είναι εφικτή. Βάσει του πίνακα 9.1 καθώς και τα συμπεράσματα υπ' αριθμών 4 και 5 οι ζυγοί, οι οποίοι μπορούν να τροφοδοτηθούν παράλληλα είναι οι εξής:

Πίνακας 9.8: Πιθανοί συνδυασμοί ζυγών, οι οποίοι μπορούν να τροφοδοτηθούν από μια γεννήτρια.

ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ 1^{ος}	ESS AC BUS + ESS DC BUS	MAIN AC BUS + MAIN DC BUS
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ 2^{ος}	LH AC BUS	RH AC BUS
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ 3^{ος}	LH AC BUS	ESS AC BUS + ESS DC BUS
ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΣ 4^{ος}	MAIN AC BUS + MAIN DC BUS	RH AC BUS

Για τον υπολογισμό της συνολικής φαινόμενης ισχύος του κάθε συνδυασμού χρησιμοποιείται η σχέση:

$$S_{\lambda\epsilon\iota\tau} = \sqrt{P_{o\lambda}^2 + Q_{o\lambda}^2} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.6)$$

Όπου:

$P_{o\lambda}$: το άθροισμα πραγματικής ισχύος των ζυγών που συμμετέχουν στον κάθε συνδυασμό

$Q_{o\lambda}$: το άθροισμα άεργου ισχύος των ζυγών που συμμετέχουν στον κάθε συνδυασμό

Πίνακας 9.9: Ενεργειακός ισολογισμός 1^{ου} συνδυασμού.

ΖΥΓΟΙ	Τροχοδρόμηση		Απογείωση & Προσγείωση		Πτήση	
	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
ESS AC BUS	8749,6	8249,8	8749,6	8249,8	10656,8	9243,4
ESS DC BUS	6002,9		6002,9		5162,9	
MAIN AC BUS	8758,1	7189,8	8758,8	7189,8	9639,7	7943,7
MAIN DC BUS	2819,6		2483,6		4214,0	
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ	26330,2	15439,6	25994,9	15439,6	29673,4	17187,1
Σ_{ΛΕΙΤ} (VA)	30523,1		30234,4		34291,5	

Πίνακας 9.10: Ενεργειακός ισολογισμός 2^{ου} συνδυασμού.

ΖΥΓΟΙ	Τροχοδρόμηση		Απογείωση & Προσγείωση		Πτήση	
	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
LH AC BUS	18936,9	3550,7	18936,0	3550,7	22143,0	3550,7
RH AC BUS	10764,2	1725,1	10764,2	1725,1	14428,2	942,4
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ	29701,1	5275,8	29700,2	5275,8	36571,2	4493,1
Σ_{ΛΕΙΤ} (VA)	30166,0		30165,1		36846,2	

Πίνακας 9.11: Ενεργειακός ισολογισμός 3^{ου} συνδυασμού.

ΖΥΓΟΙ	Τροχοδρόμηση		Απογείωση & Προσγείωση		Πτήση	
	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
ESS AC BUS	8749,6	8249,8	8749,6	8249,8	10656,8	9243,4
ESS DC BUS	6002,9		6002,9		5162,9	
LH AC BUS	18936,9	3550,7	18936,0	3550,7	22143,0	3550,7
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ	33689,4	11800,5	33688,5	11800,5	37962,7	12794,1
Σ_{ΛΕΙΤ} (VA)	35696,3		35695,5		40060,6	

Πίνακας 9.12: Ενεργειακός ισολογισμός 4^{ου} συνδυασμού.

ΖΥΓΟΙ	Τροχοδρόμηση		Απογείωση & Προσγείωση		Πτήση	
	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)	Ρ _{ΛΕΙΤ} (W)	Q _{ΛΕΙΤ} (VAr)
RH AC BUS	10764,2	1725,1	10764,2	1725,1	14428,2	942,4
MAIN AC BUS	8758,1	7189,8	8758,8	7189,8	9639,7	7943,7
MAIN DC BUS	2819,6		2483,6		4214,0	
ΣΥΝΟΛΟ ΙΣΧΥΟΣ	22341,9	8914,9	22006,6	8914,9	28281,9	8886,1
Σ_{ΛΕΙΤ} (VA)	24054,9		23743,8		29645,0	

Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα το ποσοστό φόρτισης μιας σύγχρονης γεννήτριας 40kVA, η οποία καλείται να τροφοδοτήσει το σύνολο των φορτίων των ζυγών που βρίσκονται σε διασύνδεση σε κατάσταση μη κανονικής λειτουργίας φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 9.13: Ποσοστό φόρτισης γεννήτριας 40kVA σε κατάσταση μη κανονικής λειτουργίας.

	Τροχοδρόμηση	Απογείωση & Προσγείωση	Πτήση
1^{ος} ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ	76,31 %	75,59 %	85,73 %
2^{ος} ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ	75,42 %	75,41 %	92,12 %
3^{ος} ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ	89,24 %	89,24 %	100,15 %
4^{ος} ΣΥΝΔΙΑΣΜΟΣ	60,13 %	59,36 %	74,11 %

9.4 Υλοποίηση συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αεροπλάνου μέσω προγραμματιστικού πακέτου MATLAB

Το κύκλωμα ηλεκτρικής ενέργειας του αεροσκάφους, το οποίο απεικονίζεται στην εικόνα 9.2, υλοποιήθηκε μέσω του προγραμματιστικού πακέτου MATLAB. Αρχικά στο σύστημα αυτό υλοποιήθηκαν οι δομές των ηλεκτρικών πηγών εναλλασσόμενου ρεύματος που φέρει το αεροπλάνο, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.3. Στην εικόνα αυτή απεικονίζεται μια τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος, στην οποία η τιμή της παραγόμενης τάσης στα άκρα της είναι αναγκαίο να λαμβάνει τιμή 200V με συχνότητα 400Hz. Η σύνθετη εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας υπολογίζεται προσεγγίσιμα σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ABB [38]. Ο υπολογισμός γίνεται ως εξής:

$$Z_G = R_a + jX_\varphi \quad (\text{σχέση 9.7})$$

Η βασική σύνθετη αντίσταση δίνεται από τη σχέση:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} \quad (\text{σχέση 9.8})$$

Όπου έχει οριστεί η βασική τάση και βασική ισχύς ως εξής:

$$U_b = 200V$$

$$S_b = 40 \text{ kVA}$$

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση 9.8 η βασική σύνθετη αντίσταση ισούται με:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{200^2}{40000} = 1\Omega \quad (\text{σχέση 9.9})$$

Η επαγωγική αντίδραση X_φ σε Ω υπολογίζεται με βάση την αντίστοιχη επαγωγική αντίδραση της γεννήτριας x_d , η οποία δίνεται σε ανά μονάδα σύμφωνα με τη σχέση:

$$X_\varphi = x_d \cdot Z_b \quad (\text{σχέση 9.10})$$

Όπου σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ABB η επαγωγική αντίδραση για αυτού του είδους τις γεννήτριες είναι $x_d=1,4$ pu.

Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στη σχέση 9.10 η επαγωγική αντίδραση σε Ω ισούται με:

$$X_\varphi = x_d \cdot Z_b = 1,4 \cdot 1 = 1,4 \Omega \quad (\text{σχέση 9.11})$$

Η ωμική αντίσταση R_α της γεννήτριας σύμφωνα με το εγχειρίδιο της ABB υπολογίζεται από την σχέση:

$$R_\alpha = 0,15 \cdot X_d \quad (\text{σχέση 9.12})$$

Αντικαθιστώντας το αποτέλεσμα της σχέσης 9.11 στη σχέση 9.12 προκύπτει το εξής αποτέλεσμα:

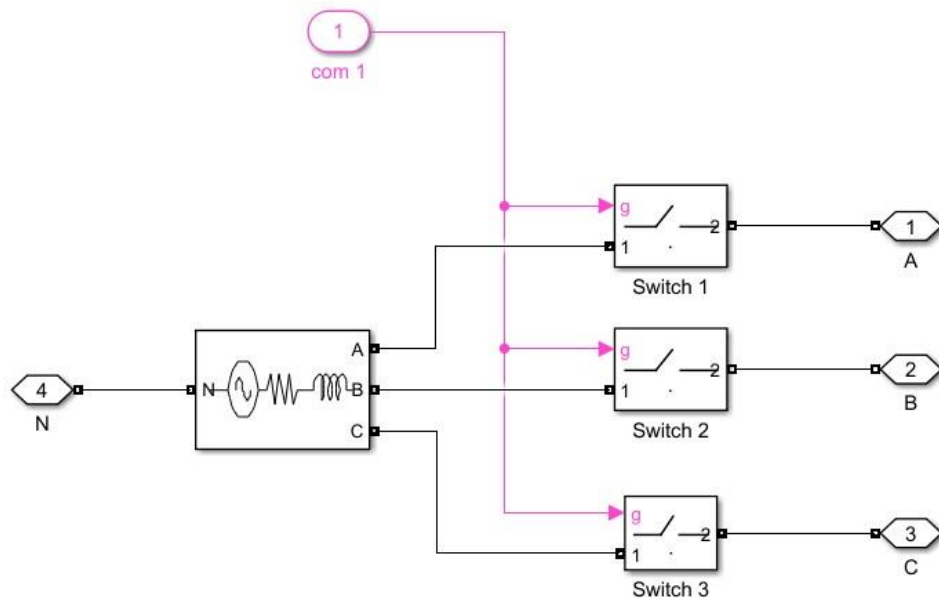
$$R_\alpha = 0,15 \cdot 1,4 = 0,21 \Omega \quad (\text{σχέση 9.12})$$

Συνεπώς αντικαθιστώντας τα αποτελέσματα στην σχέση 9.7 η εσωτερική συνθέτη αντίσταση της γεννήτριας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

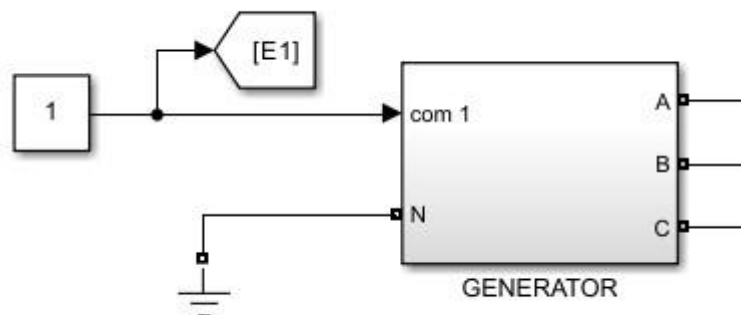
$$Z_G = R_\alpha + jX_\varphi = 0,21 + j1,4 \Omega \quad (\text{σχέση 9.13})$$

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκαν ιδανικοί διακόπτες, οι οποίοι συνδέθηκαν σε σειρά με τις εξόδους. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η προσομοίωση της κατάστασης, στην οποία βρίσκεται η αντίστοιχη τριφασική πηγή εναλλασσόμενου ρεύματος του αεροπλάνου (σε λειτουργία – εκτός λειτουργίας). Οι διακόπτες ελέγχονται μέσω συγκεκριμένου ακροδέκτη, ο οποίος λαμβάνει το λογικό

«0» για προσομοίωση της τριφασικής πηγής εκτός λειτουργίας ή το λογικό «1» για προσομοίωση της τριφασικής πηγής σε λειτουργία. Το σύνολο του κυκλώματος της εικόνας 9.3 αποτελεί τη δομή του υποσυστημάτων της εικόνας 9.4, το οποίο έχει ονομαστεί GENERATOR. Στο σύνολο του κυκλώματος της προσομοίωσης υπάρχουν τέσσερα τέτοια υποσυστήματα, τα οποία έχουν λάβει την ονομασία GENERATOR 1, GENERATOR 2, GENERATOR 3, GENERATOR 4.



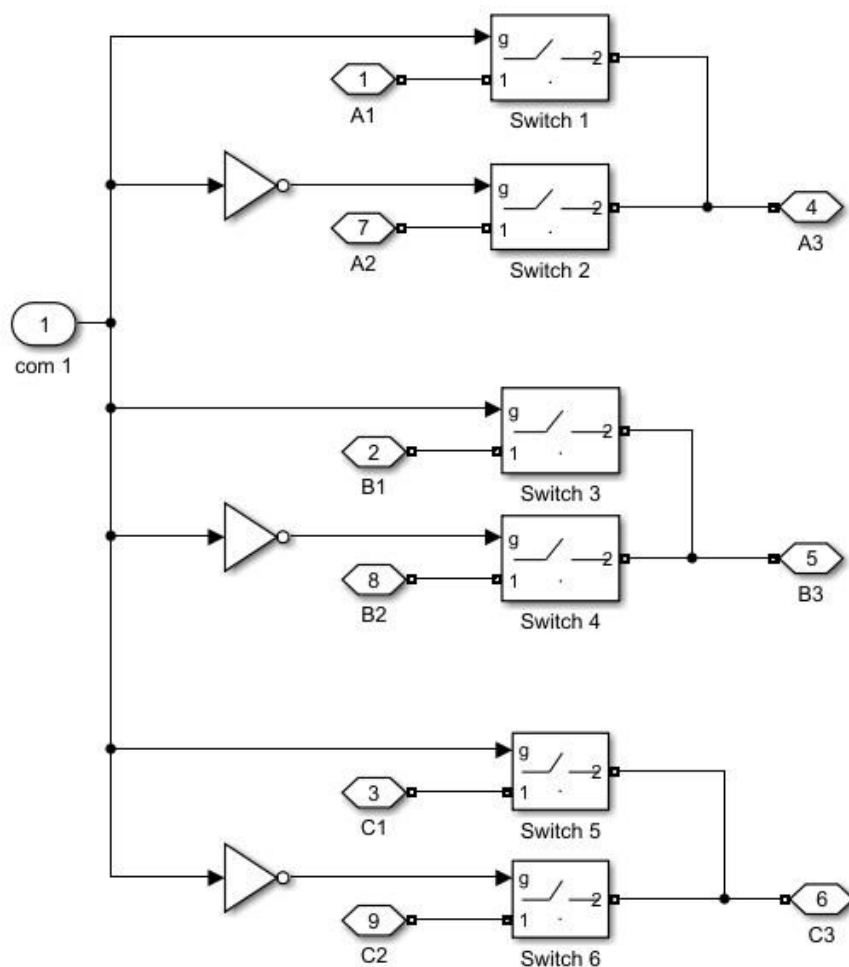
Εικόνα 9.3: Δομή πηγής ηλεκτρικής ενέργειας εναλλασσόμενου ρεύματος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.



Εικόνα 9.4: Απεικόνιση του υποσυστήματος GENERATOR στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Στη συνέχεια υλοποιήθηκαν τα κυκλώματα διασύνδεσης των γεννητριών με τους ζυγούς εναλλασσόμενου ρεύματος. Στις διασυνδέσεις αυτές χρησιμοποιούνται ρελέ ισχύος, τα οποία διαθέτουν κανονικά κλειστές επαφές (NC), καθώς και κανονικά ανοιχτές επαφές (NO). Το κύκλωμα,

το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ενός τέτοιου ρελέ ισχύος, φαίνεται στην εικόνα 9,5 παρακάτω.

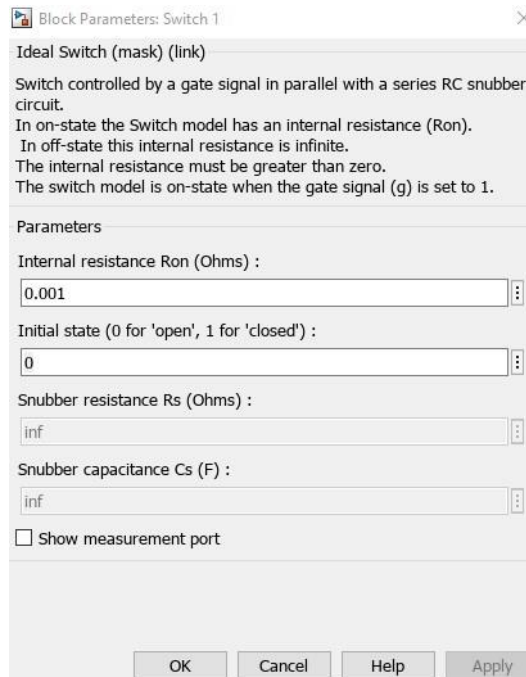


Εικόνα 9.5: Εσωτερικό κύκλωμα προσομοίωσης του ρελέ ισχύος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Στο κύκλωμα αυτό οι διακόπτες Switch 1, Switch 3 και Switch 5 αποτελούν τις κανονικά ανοιχτές επαφές (NO) του ρελέ ισχύος, ενώ οι διακόπτες Switch 2, Switch 4 και Switch 6 αποτελούν τις κανονικά κλειστές επαφές (NC) του ρελέ ισχύος. Η αρχική κατάσταση ηρεμίας του κάθε διακόπτη πριν την έναρξη της προσομοίωσης προγραμματίζεται μέσω του παραθύρου ρυθμίσεων, όπως φαίνεται στην εικόνα 9.6. Το πεδίο “initial state” λαμβάνει την τιμή «0», όταν πρόκειται για κανονικά ανοικτή επαφή, ενώ λαμβάνει την τιμή «1», όταν πρόκειται για κανονικά κλειστή επαφή. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης οι διακόπτες αυτοί ελέγχονται μέσω του ειδικού ακροδέκτη “g”, ο οποίος λαμβάνει το λογικό «0» ή το λογικό «1». Στο κύκλωμα ελέγχου των NC επαφών παρεμβάλλεται η λογική πύλη NOT, ώστε σε κατάσταση ηρεμίας του ρελέ (λογικό «0» στον ακροδέκτη Com 1) οι συγκεκριμένοι διακόπτες να λαμβάνουν στον ακροδέκτη “g” λογικό «1» και να παραμένουν

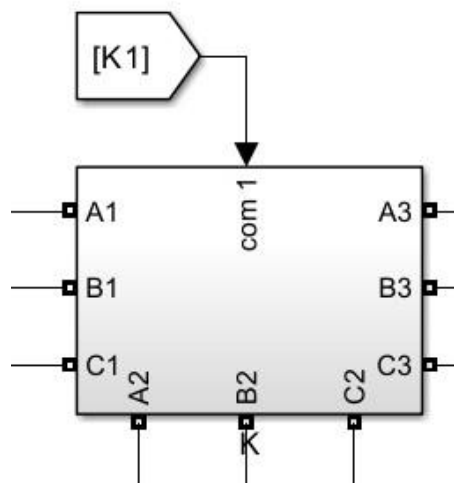
Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών

κλειστοί. Το αντίθετο συμβαίνει σε κατάσταση ενεργοποίησης του ρελέ (λογικό «1» στον ακροδέκτη Com 1).



Εικόνα 9.6: Παράθυρο ελέγχου των διακοπών στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Το κύκλωμα της εικόνα 9.5 αποτελεί το υποσύστημα της εικόνας 9.7, το οποίο λαμβάνει την ονομασία «K» και προσομοιώνει το ρελέ ισχύος του πίνακα 9.1. Όπως φαίνεται και από τον συγκεκριμένο πίνακα υπάρχουν οκτώ ίδια ρελέ ισχύος.



Εικόνα 9.7: Απεικόνιση του υποσυστήματος K (ρελέ ισχύος) στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Κατά τη διάρκεια μιας πτήσης και ανάλογα του αριθμού γεννητριών (πηγών εναλλασσόμενου ρεύματος) που βρίσκονται σε λειτουργία είναι αναγκαίο να ενεργοποιούνται συγκεκριμένα ρελέ ισχύος, ώστε να τροφοδοτούνται τα φορτία. Για τον έλεγχο των αντίστοιχων ρελέ ισχύος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB καταστρώθηκε ο πίνακας αλήθειας για κάθε ρελέ ξεχωριστά. Αρχικά με χρήση του πίνακα 9.1 ορίστηκαν ως μεταβλητές εισόδου οι τέσσερις γεννήτριες και ως μεταβλητή εξόδου κάθε φορά το αντίστοιχο ρελέ ισχύος. Κάθε λογική συνάρτηση του πίνακα 9.1 μπορεί να αναπτυχθεί ως άθροισμα ελαχίστων όρων. Σε αυτήν τη διαδικασία οι ελάχιστοι όροι ονομάζονται τα γινόμενα όλων των όρων της συνάρτησης όπου κάθε όρος εκφράζεται στην κανονική ή τη συμπληρωματική του μορφή. Συνεπώς με βάση το παραπάνω προκύπτουν τα εξής:

$$\mathbf{K}_1 = G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.14})$$

$$\mathbf{K}_2 = \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.15})$$

$$\mathbf{K}_3 = \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.16})$$

$$\mathbf{K}_4 = \bar{G}_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.17})$$

$$\mathbf{K}_5 = G_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.18})$$

$$\mathbf{K}_6 = G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.19})$$

$$\mathbf{K}_7 = \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.20})$$

$$\mathbf{K}_8 = G_1 \bar{G}_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 \bar{G}_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + \bar{G}_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + \bar{G}_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 \bar{G}_4 + G_1 G_2 \bar{G}_3 G_4 + G_1 \bar{G}_2 G_3 G_4 + \bar{G}_1 G_2 G_3 G_4 + G_1 G_2 G_3 G_4 \quad (\text{σχέση 9.21})$$

Στη συνέχεια για την απλοποίηση των παραπάνω λογικών συναρτήσεων γίνεται χρήση του χάρτη Karnaugh.

Πίνακας 9.14: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K1 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$				
\bar{G}_1G_2				
G_1G_2	1	1	1	1
$G_1\bar{G}_2$	1	1	1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_1 = G_1 \quad (\text{σχέση 9.22})$$

Πίνακας 9.15: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K2 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$				
\bar{G}_1G_2	1	1	1	1
G_1G_2	1	1	1	1
$G_1\bar{G}_2$				

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_2 = G_2 \quad (\text{σχέση 9.23})$$

Πίνακας 9.16: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K3 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$			1	1
\bar{G}_1G_2			1	1
G_1G_2			1	1
$G_1\bar{G}_2$			1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_3 = G_3 \quad (\text{σχέση 9.24})$$

Πίνακας 9.17: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K4 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$		1	1	
\bar{G}_1G_2		1	1	
G_1G_2		1	1	
$G_1\bar{G}_2$		1	1	

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_4 = G_4 \quad (\text{σχέση 9.25})$$

Πίνακας 9.18: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K5 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$				
\bar{G}_1G_2		1	1	1
G_1G_2	1	1	1	1
$G_1\bar{G}_2$		1	1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\begin{aligned} K_5 &= G_2G_4 + G_2G_3 + G_1G_4 + G_1G_3 + G_1G_2 = G_2(G_4 + G_3) + G_1(G_4 + G_3) + G_1G_2 \\ &= (G_3 + G_4)(G_1 + G_2) + G_1G_2 \quad (\text{σχέση 9.26}) \end{aligned}$$

Πίνακας 9.19: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K6 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$				
\bar{G}_1G_2	1	1	1	1
G_1G_2	1	1	1	1
$G_1\bar{G}_2$	1	1	1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_6 = G_1 + G_2 \quad (\text{σχέση 9.27})$$

Πίνακας 9.20: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K7 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$		1	1	1
\bar{G}_1G_2		1	1	1
G_1G_2		1	1	1
$G_1\bar{G}_2$		1	1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

$$K_7 = G_3 + G_4 \quad (\text{σχέση 9.28})$$

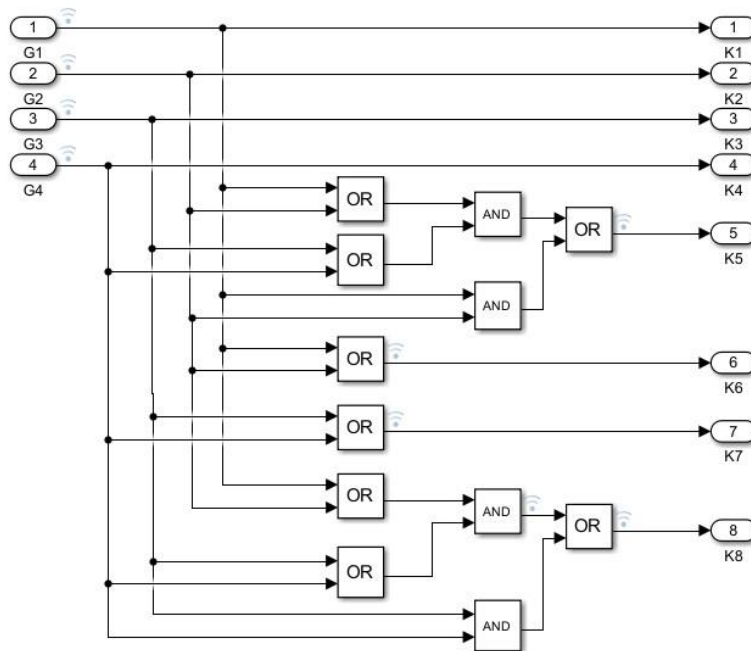
Πίνακας 9.21: Χάρτης Karnaugh λογικής συνάρτησης K8 ρελέ ισχύος.

	$\bar{G}_3\bar{G}_4$	\bar{G}_3G_4	G_3G_4	$G_3\bar{G}_4$
$\bar{G}_1\bar{G}_2$			1	
\bar{G}_1G_2		1	1	1
G_1G_2		1	1	1
$G_1\bar{G}_2$		1	1	1

Από τον παραπάνω πίνακα Karnaugh η απλοποιημένη λογική συνάρτηση που προκύπτει είναι η εξής:

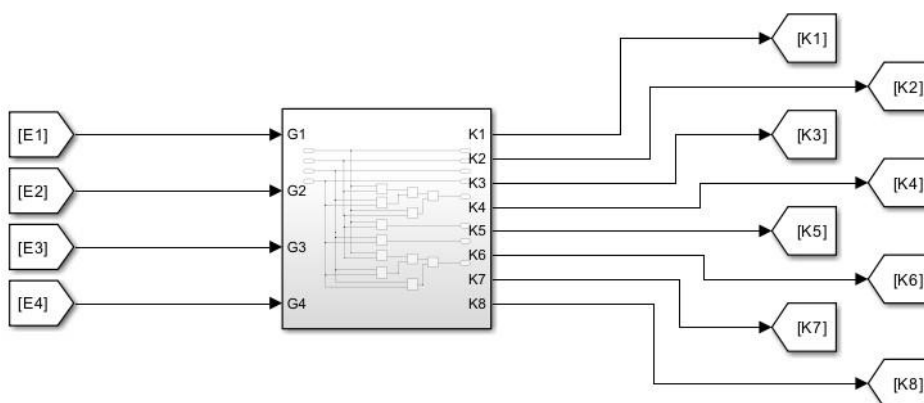
$$\begin{aligned} K_8 &= G_2G_4 + G_2G_3 + G_1G_4 + G_1G_3 + G_3G_4 = G_2(G_4 + G_3) + G_1(G_4 + G_3) + G_3G_4 \\ &= (G_3 + G_4)(G_1 + G_2) + G_3G_4 \quad (\text{σχέση 9.29}) \end{aligned}$$

Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων υλοποιήθηκε το κύκλωμα (εικόνα 9.8), το οποίο ελέγχει την ενεργοποίηση και την απενεργοποίηση των ρελέ ισχύος ανάλογα με τον αριθμό των γεννητριών που βρίσκονται σε λειτουργία.



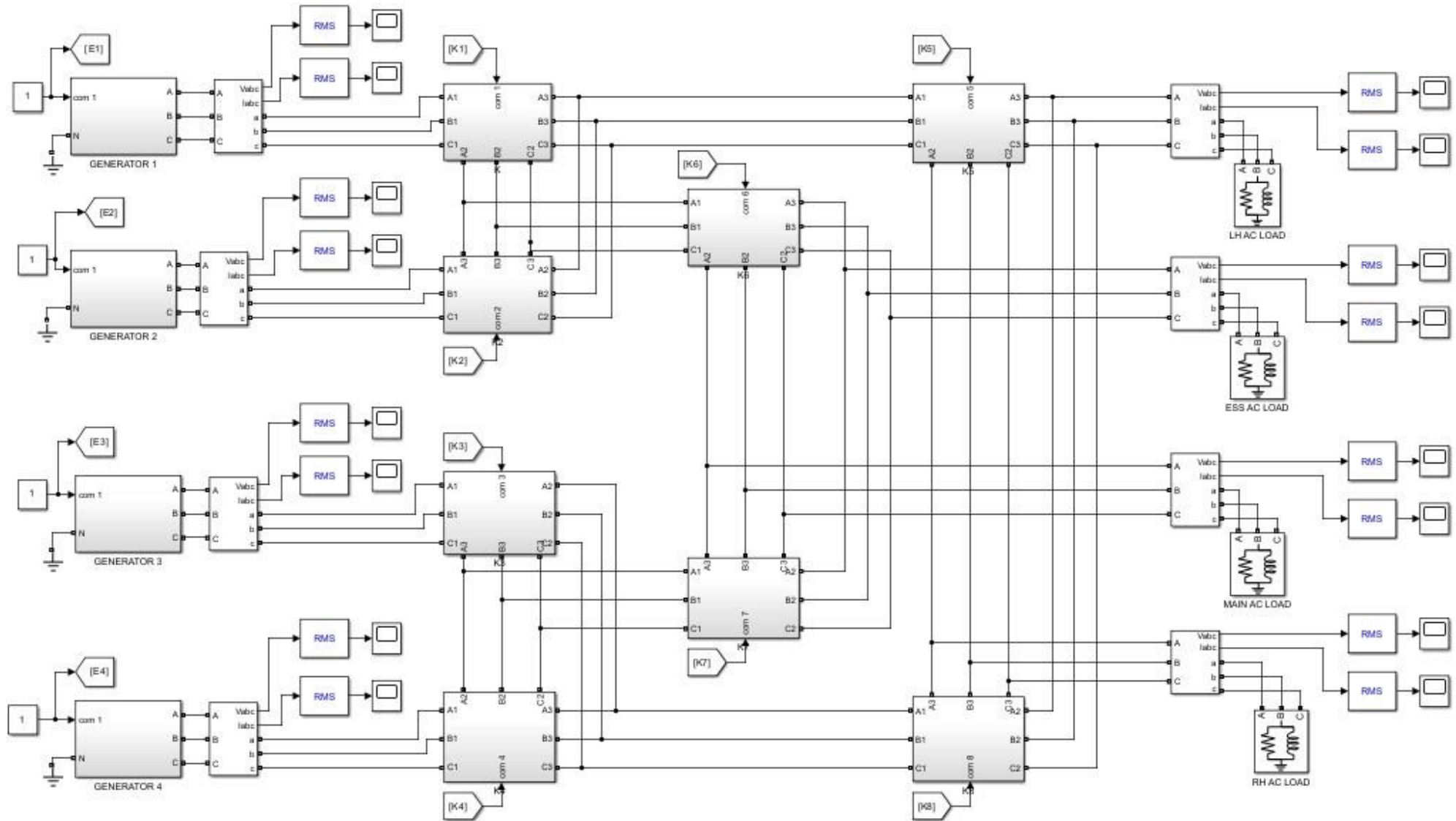
Εικόνα 9.8: Λογικό κύκλωμα ελέγχου ρελέ ισχύος K1-K8 στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Το κύκλωμα της εικόνας 9.8 ομαδοποιήθηκε και αποτελεί το υποσύστημα της εικόνας 9.9 παρακάτω:



Εικόνα 9.9: Απεικόνιση του υποσυστήματος ελέγχου των ρελέ ισχύος στο προγραμματιστικό πακέτο MATLAB.

Στη συνέχεια το κύκλωμα περιλαμβάνει τα φορτία, τα οποία συνδέονται στις μάρκες εναλλασσόμενου ρεύματος. Σε αυτήν την προσομοίωση τα φορτία τόσο του εναλλασσόμενου ρεύματος, αλλά όσο και του συνεχούς παρουσιάζονται ως τριφασικά συμμετρικά φορτία, όπως αυτά φαίνονται από το επίπεδο των γεννητριών. Τα φορτία αυτά έχουν λάβει της αντίστοιχες τιμές πραγματικής και άεργου ισχύος, οι οποίες υπολογίστηκαν στον ενεργειακό ισολογισμό που πραγματοποιήθηκε στο αεροπλάνο. Στην εικόνα 9.10 φαίνεται το συνολικό κύκλωμα του αεροπλάνου, το οποίο υλοποιήθηκε στο προγραμματιστικό πακέτο του MATLAB.



Εικόνα 9.10: Κύκλωμα ηλεκτρικού συστήματος αεροπλάνου στο προγραμματιστικό πακέτο του MATLAB

Πριν την εκτέλεση της προσομοίωσης είναι αναγκαίο ο ορισμός της τάσης E_f της κάθε σύγχρονης γεννήτριας, ώστε με βάση το φορτίο που πρόκειται να τροφοδοτήσει και βάση της εσωτερικής συνθέτης αντίστασης η τάση V_φ στα άκρα της κάθε γεννήτριας να λαμβάνει τιμή ίση με 200V.

Οι παρακάτω υπολογισμοί αφορούν την περίπτωση που όλες οι γεννήτριες του αεροπλάνου βρίσκονται σε λειτουργία και η κάθε γεννήτρια τροφοδοτεί τον ζυγό της. Τα φορτία που λαμβάνονται υπόψη είναι αυτά που υπολογίστηκαν στον ενεργειακό ισολογισμό και αφορούν την κατάσταση πτήσης.

- **Γεννήτρια Νο1**

Πραγματική ισχύς $P_{G.1}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό LH AC: **22143,3 W**

Άεργος ισχύς $Q_{G.1}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό LH AC: **3550,7 VAr**

$$S_{G.1} = \sqrt{P_{G.1}^2 + Q_{G.1}^2} = \sqrt{22143.3^2 + 3550.7^2} = \mathbf{22426,2 VA} \quad (\text{σχέση 9.30})$$

$$S_{G.1} = \sqrt{3} \cdot V_\varphi \cdot I_\alpha \Rightarrow I_\alpha = \frac{S_{G.1}}{\sqrt{3} \cdot V_\varphi} = \frac{22426,2}{\sqrt{3} \cdot 200} = \mathbf{64,74 A} \quad (\text{σχέση 9.31})$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{G.1}}{S_{G.1}} = \frac{22143,3}{22426,2} = \mathbf{0,987} \quad (\text{σχέση 9.32})$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,987) = \mathbf{9,25^\circ} \quad (\text{σχέση 9.33})$$

$$\begin{aligned} \widehat{E}_f &= \widehat{V}_\varphi + jX_\varphi \cdot \widehat{I}_\alpha + R_\alpha \cdot \widehat{I}_\alpha = 115 \angle 0^\circ + 1,4 \angle 90^\circ \cdot 64,74 \angle -9,25^\circ + 0,21 \angle 0^\circ \cdot 64,74 \angle -9,25^\circ \\ &= 115 \angle 0^\circ + 90,64 \angle 80,75^\circ + 13,6 \angle -9,25^\circ = 115 + 14,6 + j89,5 + 13,4 - j2,2 \\ &= 143 + j87,3 = \mathbf{167 \angle 31,5^\circ V} \quad (\text{σχέση 9.34}) \end{aligned}$$

$$E_f(\text{πολικό}) = \sqrt{3} \angle 30^\circ \cdot 167 \angle 31,5^\circ = \mathbf{289,9 \angle 61,5^\circ} \quad (\text{σχέση 9.35})$$

- **Γεννήτρια Νο2**

Πραγματική ισχύς $P_{G.2}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό ESS AC: **15819,7 W**

Άεργος ισχύς $Q_{G.2}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό ESS AC: **9243,4 VAr**

$$S_{G.1} = \sqrt{P_{G.2}^2 + Q_{G.2}^2} = \sqrt{15819,7^2 + 9243,4^2} = \mathbf{18321,6 VA} \quad (\text{σχέση 9.36})$$

$$S_{G.2} = \sqrt{3} \cdot V_{\varphi} \cdot I_{\alpha} \Rightarrow I_{\alpha} = \frac{S_{G.1}}{\sqrt{3} \cdot V_{\varphi}} = \frac{18321,6}{\sqrt{3} \cdot 200} = \mathbf{52,9 A} \quad (\text{σχέση 9.37})$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{G.2}}{S_{G.2}} = \frac{15819,7}{18321,6} = \mathbf{0,863} \quad (\text{σχέση 9.38})$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,863) = \mathbf{30,3^{\circ}} \quad (\text{σχέση 9.39})$$

$$\begin{aligned} \widehat{E}_f &= \widehat{V}_{\varphi} + jX_{\varphi} \cdot \widehat{I}_a + R_a \cdot \widehat{I}_a = 115^{\angle 0^{\circ}} + 1,4^{\angle 90^{\circ}} \cdot 52,9^{\angle -30,3^{\circ}} + 0,21^{\angle 0^{\circ}} \cdot 52,9^{\angle -30,3^{\circ}} \\ &= 115^{\angle 0^{\circ}} + 74,06^{\angle 59,7^{\circ}} + 11,11^{\angle -30,3^{\circ}} \\ &= 115 + 37,54 + j64,25 + 9,59 - j5,61 = 162,13 + j58,64 \\ &= \mathbf{172^{\angle 19,8^{\circ}} V} \quad (\text{σχέση 9.40}) \end{aligned}$$

$$E_f(\text{πολικό}) = \sqrt{3}^{\angle 30^{\circ}} \cdot 172^{\angle 19,8^{\circ}} = \mathbf{298,14^{\angle 59,8^{\circ}}} \quad (\text{σχέση 9.41})$$

- Γεννήτρια N03

Πραγματική ισχύς $P_{G.3}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό MAIN AC: **13853,7 W**

Αεργος ισχύς $Q_{G.3}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό MAIN AC: **7943,7 VAr**

$$S_{G.3} = \sqrt{P_{G.3}^2 + Q_{G.3}^2} = \sqrt{13853,7^2 + 7943,7^2} = \mathbf{15969 VA} \quad (\text{σχέση 9.42})$$

$$S_{G.3} = \sqrt{3} \cdot V_{\varphi} \cdot I_{\alpha} \Rightarrow I_{\alpha} = \frac{S_{G.1}}{\sqrt{3} \cdot V_{\varphi}} = \frac{15969}{\sqrt{3} \cdot 200} = \mathbf{46,1 A} \quad (\text{σχέση 9.43})$$

$$\cos \varphi = \frac{P_{G.3}}{S_{G.3}} = \frac{13853,7}{15969} = \mathbf{0,867} \quad (\text{σχέση 9.44})$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,867) = \mathbf{29,83^{\circ}} \quad (\text{σχέση 9.45})$$

$$\begin{aligned} E_f &= V_{\varphi} + jX_{\varphi} \cdot I_a + R_a \cdot I_a = 115^{\angle 0^{\circ}} + 1,4^{\angle 90^{\circ}} \cdot 46,1^{\angle -29,83^{\circ}} + 0,21^{\angle 0^{\circ}} \cdot 46,1^{\angle -29,83^{\circ}} \\ &= 115^{\angle 0^{\circ}} + 64,54^{\angle 60,12^{\circ}} + 9,68^{\angle -29,83^{\circ}} \\ &= 115 + 32,15 + j55,96 + 8,39 - j4,82 = 155,54 + j51,14 \\ &= \mathbf{163,7^{\angle 18,2^{\circ}} V} \quad (\text{σχέση 9.46}) \end{aligned}$$

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αεροσκαφών: Αρχές λειτουργίας & προσομοίωση

$$E_f(\text{πολικό}) = \sqrt{3}^{\angle 30^\circ} \cdot 163,7^{\angle 18,2^\circ} = \mathbf{283,5^{\angle 48,2^\circ}} \quad (\text{σχέση 9.47})$$

- **Γεννήτρια N₀₄**

Πραγματική ισχύς $P_{G.4}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό RH AC: **14428,2 W**

Άεργος ισχύς $Q_{G.4}$ συνδεδεμένου φορτίου στον ζυγό RH AC: **1725,1 VAr**

$$S_{G.4} = \sqrt{P_{G.4}^2 + Q_{G.4}^2} = \sqrt{14428,2^2 + 1725,1^2} = \mathbf{14530,9 VA} \quad (\text{σχέση 9.48})$$

$$S_{G.4} = \sqrt{3} \cdot V_\varphi \cdot I_\alpha \Rightarrow I_\alpha = \frac{S_{G.4}}{\sqrt{3} \cdot V_\varphi} = \frac{14530,9}{\sqrt{3} \cdot 200} = \mathbf{41,9 A} \quad (\text{σχέση 9.49})$$

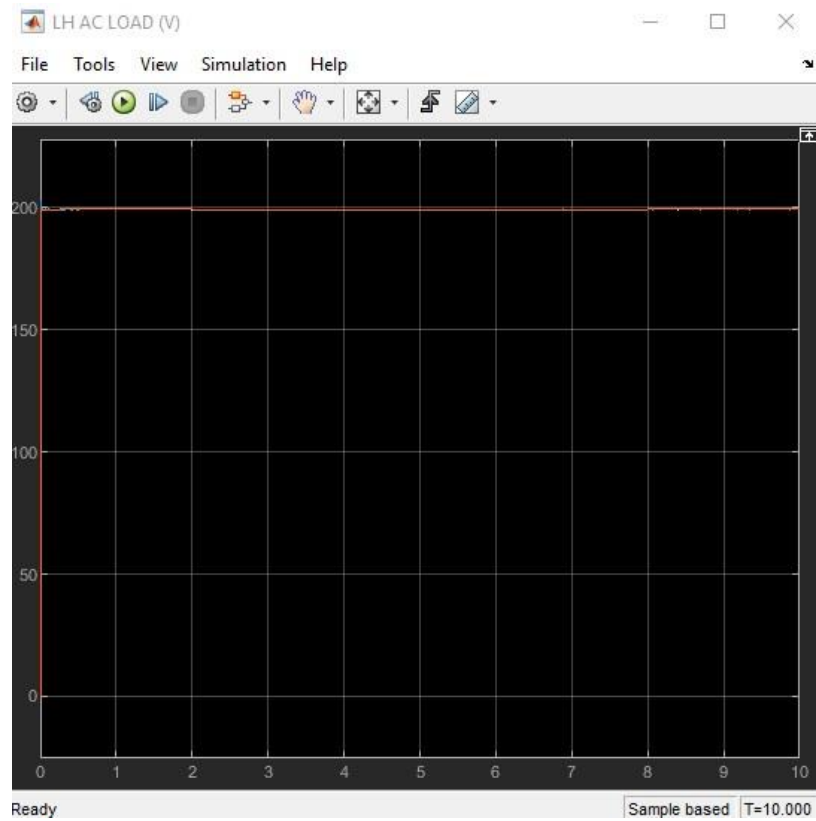
$$\cos \varphi = \frac{P_{G.4}}{S_{G.4}} = \frac{14428,2}{14530,9} = \mathbf{0,993} \quad (\text{σχέση 9.50})$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,992) = \mathbf{6,82^\circ} \quad (\text{σχέση 9.51})$$

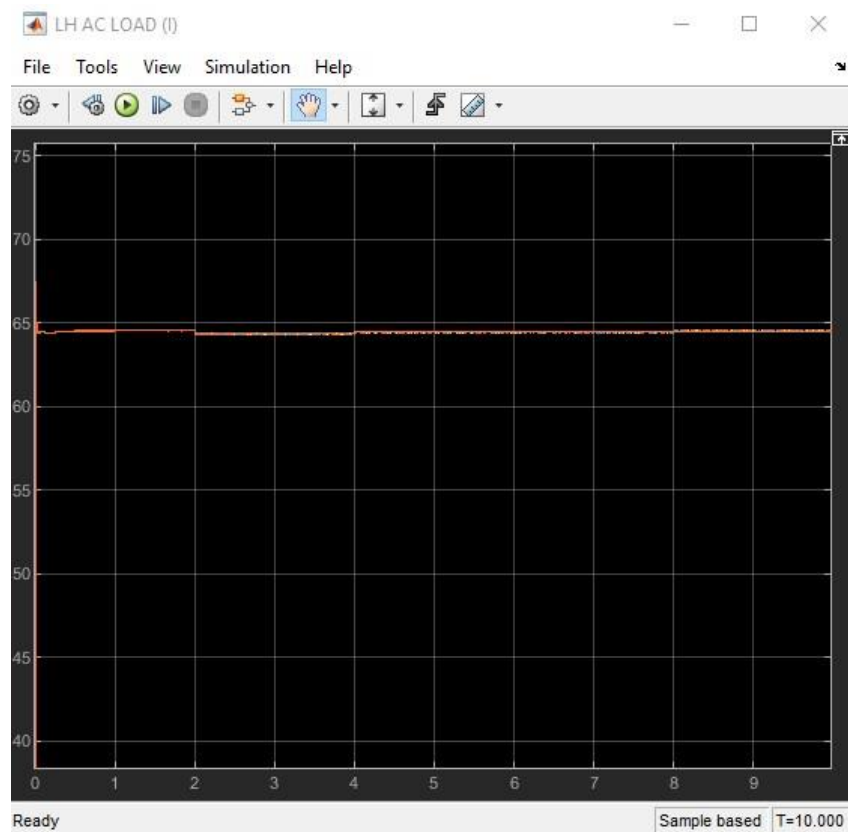
$$\begin{aligned} E_f &= V_\varphi + jX_\varphi \cdot I_\alpha + R_\alpha \cdot I_\alpha = 115^{\angle 0^\circ} + 1,4^{\angle 90^\circ} \cdot 41,9^{\angle -6,82^\circ} + 0,21^{\angle 0^\circ} \cdot 41,9^{\angle -6,82^\circ} \\ &= 115^{\angle 0^\circ} + 58,66^{\angle 82,75^\circ} + 8,8^{\angle -6,82^\circ} = 115 + 7,4 + j58,19 + 8,73 - j1,11 \\ &= 130,7 + j57,27 = \mathbf{142,7^{\angle 23,66^\circ} V} \quad (\text{σχέση 9.52}) \end{aligned}$$

$$E_f(\text{πολικό}) = \sqrt{3}^{\angle 30^\circ} \cdot 143,01^{\angle 23,66^\circ} = \mathbf{247,2^{\angle 53,66^\circ} V} \quad (\text{σχέση 9.53})$$

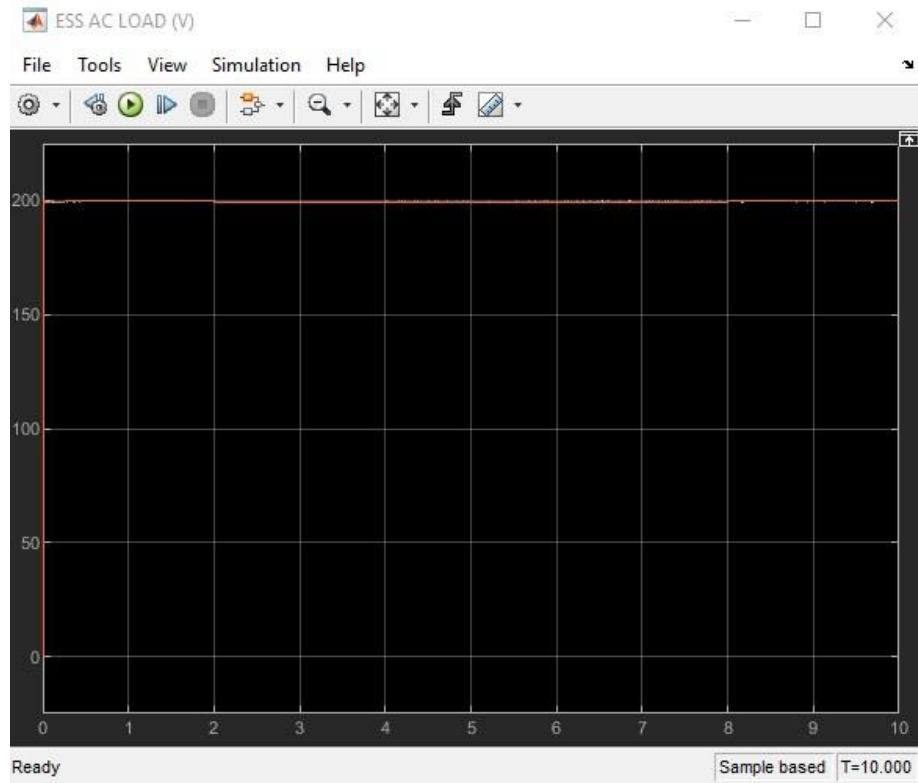
Με χρήση των αποτελεσμάτων των παραπάνω θεωρητικών υπολογισμών ρυθμίστηκαν οι επαγόμενες τάσεις E_f της κάθε γεννήτριας. Τα αποτελέσματα τα οποία ελήφθησαν μετά την προσομοίωση του ηλεκτρικού κυκλώματος του αεροπλάνου επαληθεύουν τις αναπτυσσόμενες τάσεις και ρεύματα λειτουργίας της κάθε γεννήτριας. Οι γραφικές παραστάσεις των αποτελεσμάτων φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.



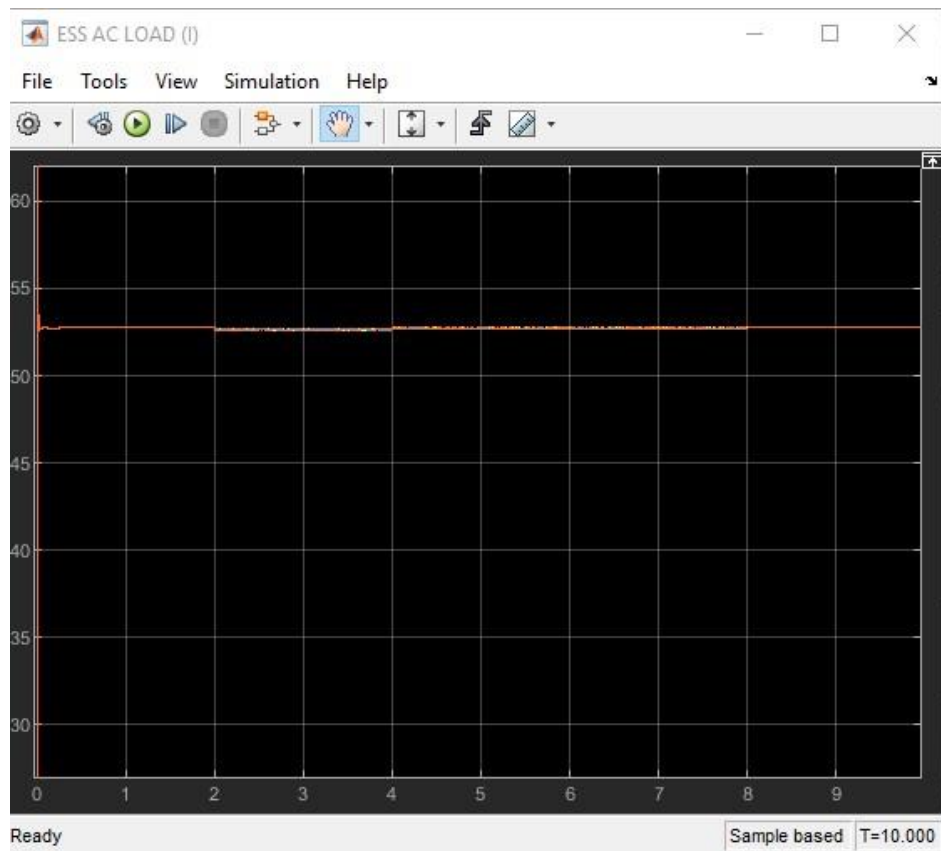
Εικόνα 9.11: Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό LH AC.



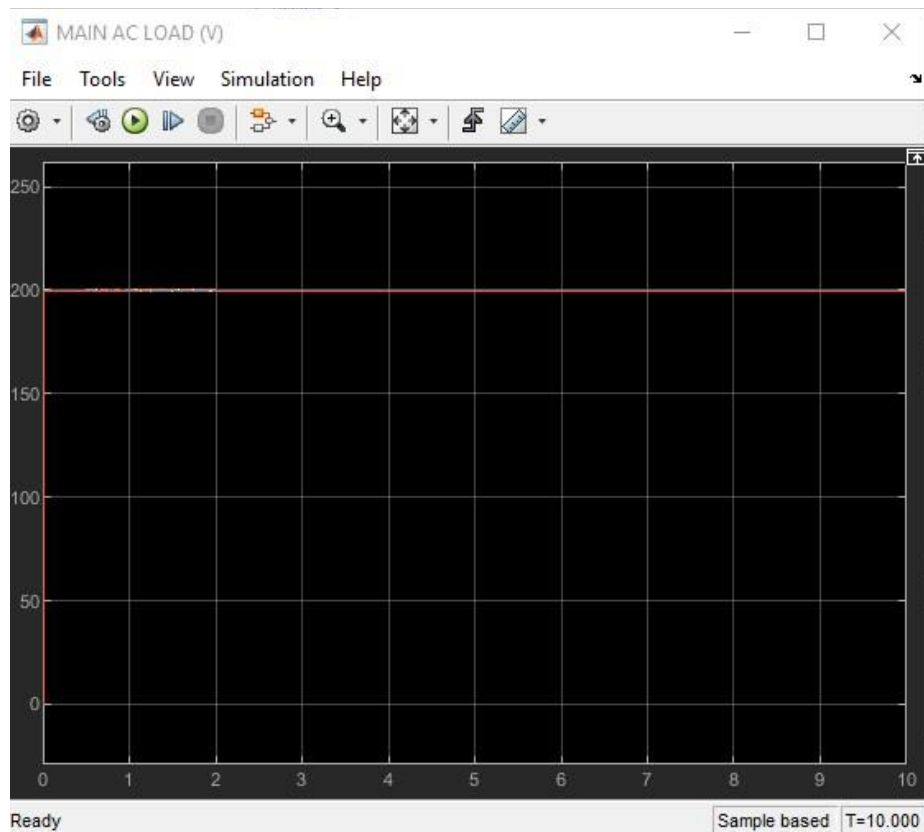
Εικόνα 9.12: Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό LH AC.



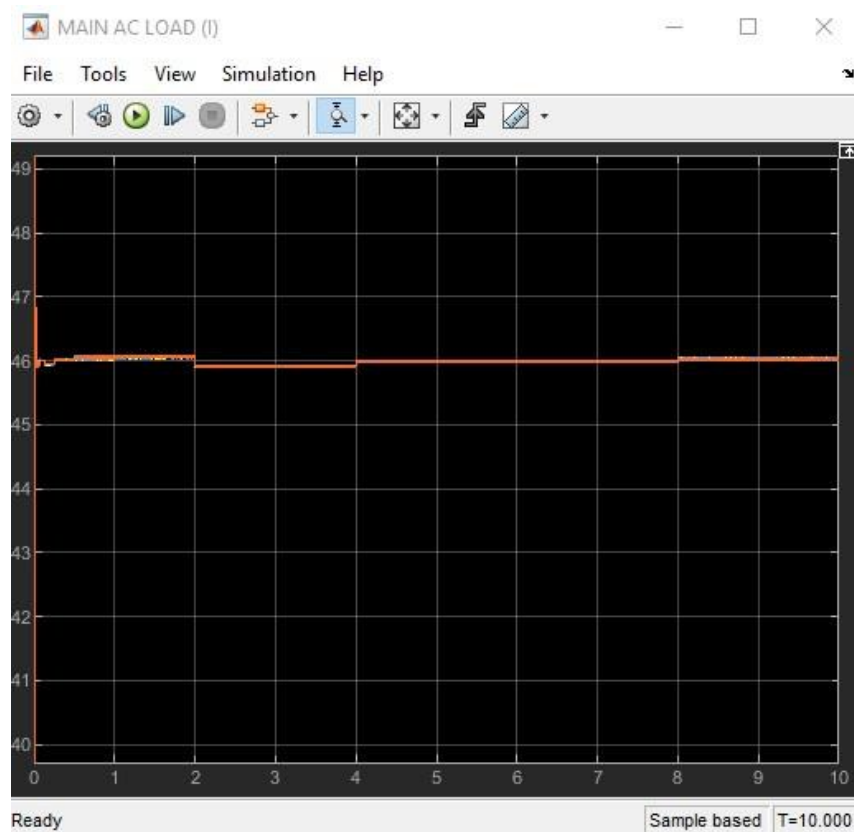
Εικόνα 9.13: Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό ESS AC



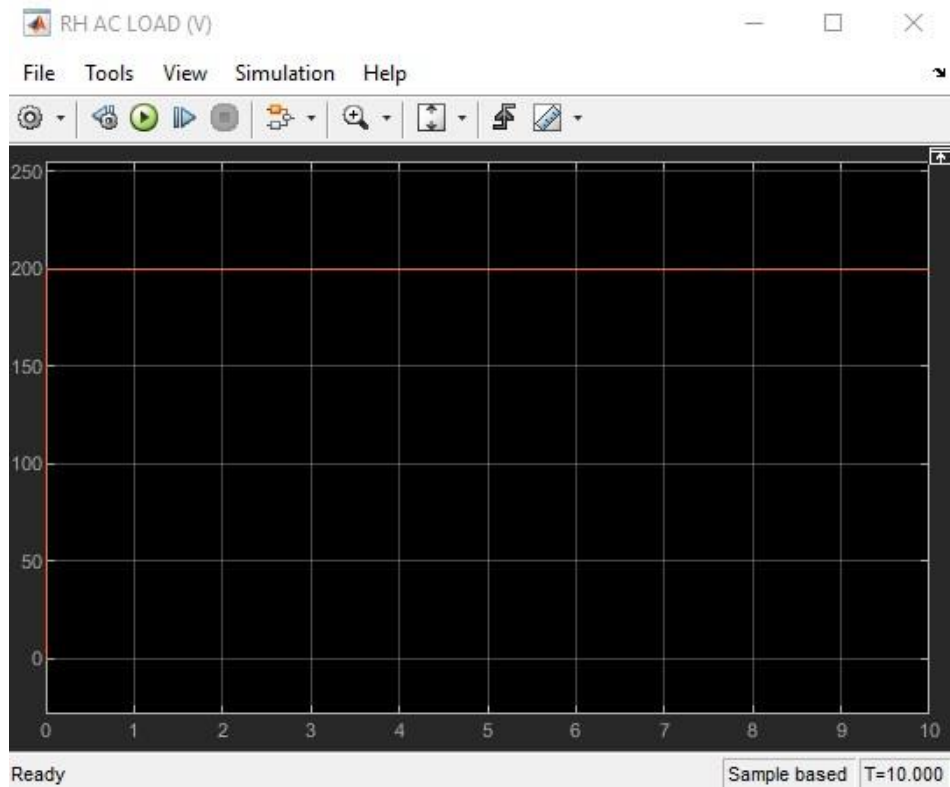
Εικόνα 9.14: Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό ESS AC.



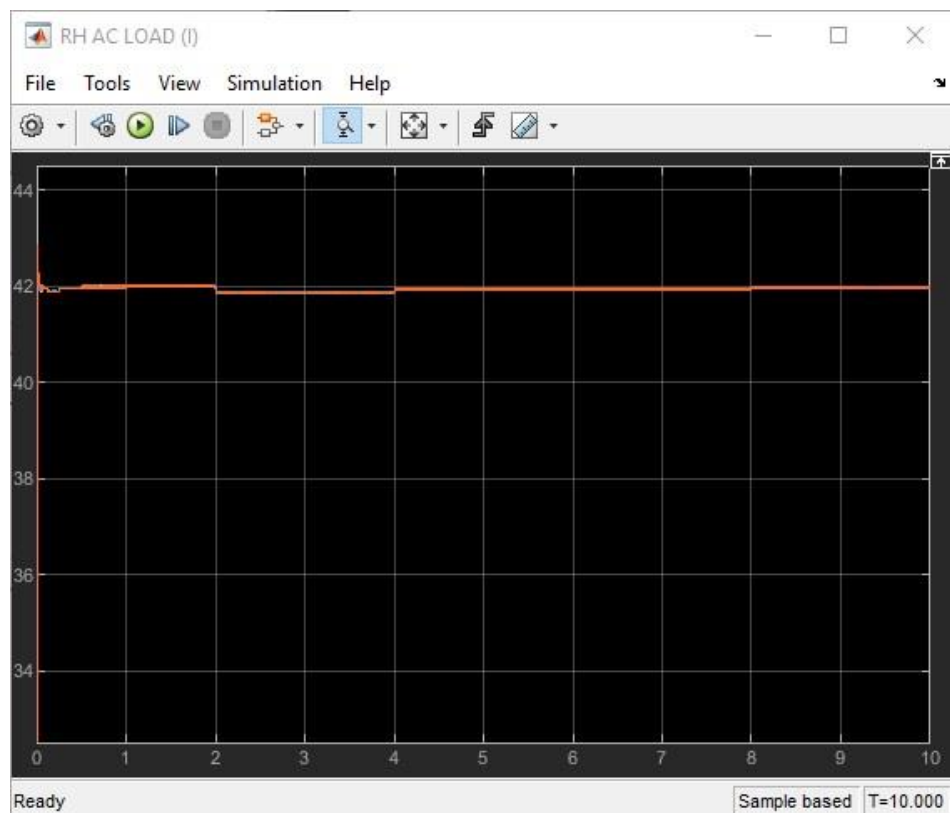
Εικόνα 9.15: Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό MAIN AC.



Εικόνα 9.16: Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό MAIN AC.



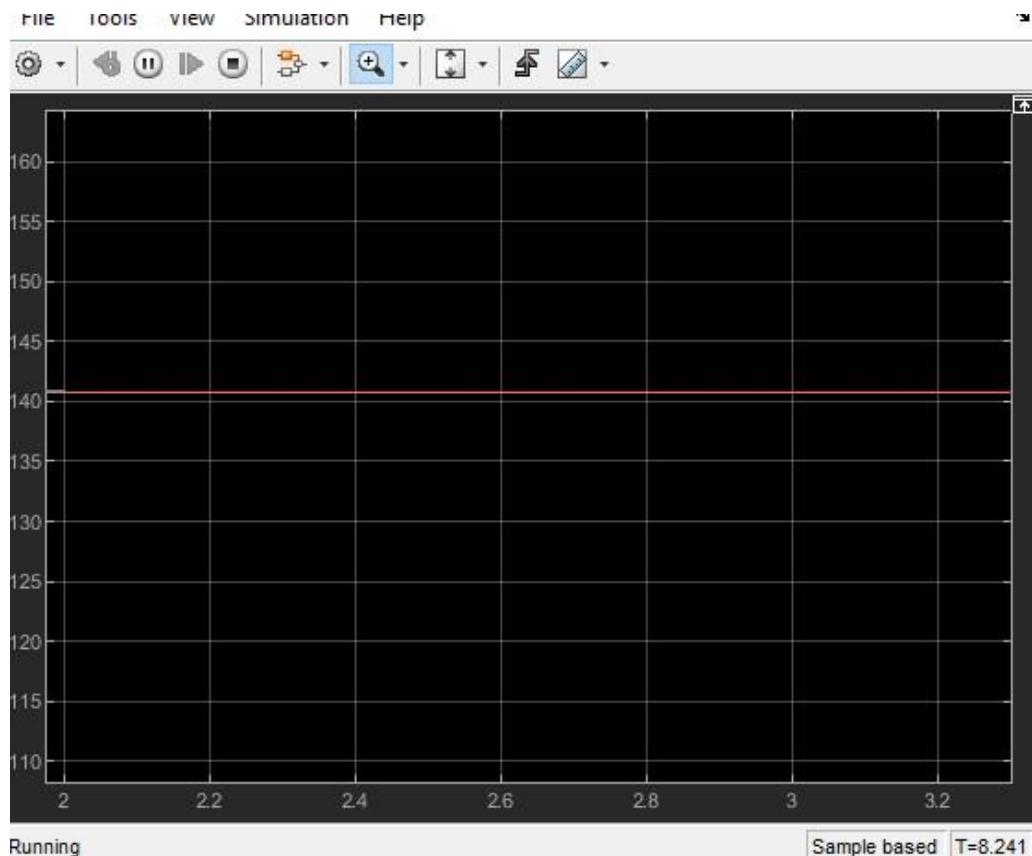
Εικόνα 9.17: Γραφική παράσταση πολικής τάσης στον ζυγό RH AC.



Εικόνα 9.18: Γραφική παράσταση ρεύματος στον ζυγό RH AC.

Όταν κατά την διάρκεια λειτουργίας του αεροπλάνου μια γεννήτρια παρουσιάσει βλάβη τότε είναι αναγκαίο να αποσυνδεθεί από τον ζυγό, το οποίο τροφοδοτεί. Στην περίπτωση αυτή το ζυγό, τον οποίο τροφοδοτούσε η συγκεκριμένη γεννήτρια αναλαμβάνει να τον τροφοδοτήσει άλλη γεννήτρια που παραμένει σε λειτουργία. Η επιλογή αυτή γίνεται αυτόματα από το σύστημα όπως φαίνεται στον πίνακα 9.1 μέσω των ρελέ ισχύος.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση θα επιλεγεί να παρουσιάσει βλάβη η γεννήτρια No3, η οποία υπό κανονικές συνθήκες τροφοδοτεί τον ζυγό MAIN AC. Μετά την βλάβη τα φορτία του ζυγού MAIN AC θα αναλάβει να τα τροφοδοτήσει η γεννήτρια No4 όπως φαίνεται στον πίνακα 9.1. Η γραφική παράσταση της τάσης στα άκρα της γεννήτριας No4 αλλά ταυτόχρονα και στους ζυγούς MAIN AC και RH AC φαίνεται στην εικόνα 9.19 παρακάτω.



Εικόνα 9.19 : Πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας No4 μετά από την απώλεια της γεννήτριας No3.

Όπως παρατηρείται η τάση V_{ϕ} στα άκρα της No4 γεννήτριας παρουσιάζει σημαντική πτώση τάσης με την αποσύνδεση της γεννήτριας No3 και την αύξηση του φορτίου (MAIN AC & RH AC). Για τον λόγο αυτό είναι απαραίτητο ο επαναπροσδιορισμός της επαγόμενης τάσης E_f για τα νέα δεδομένα που επικρατούν. Οι υπολογισμοί αυτοί για την γεννήτρια No 4 φαίνονται παρακάτω:

Πραγματική ισχύς $P_{G.4}'$ συνδεδεμένου φορτίου στους ζυγούς MAIN & RH AC: **28281,9 W**

Άεργος ισχύς $Q_{G.4}'$ συνδεδεμένου φορτίου στους ζυγούς MAIN & RH AC: **9668,8VAr**

$$S_{G.4}' = \sqrt{P_{G.4}'^2 + Q_{G.4}'^2} = \sqrt{28281,9^2 + 9668,8^2} = \mathbf{29889 VA} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.54)$$

$$S'_{G.4} = \sqrt{3} \cdot V_{\varphi} \cdot I_{\alpha} \Rightarrow I_{\alpha}' = \frac{S_{G.4}'}{\sqrt{3} \cdot V_{\varphi}} = \frac{29889}{\sqrt{3} \cdot 200} = \mathbf{86,3 A} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.55)$$

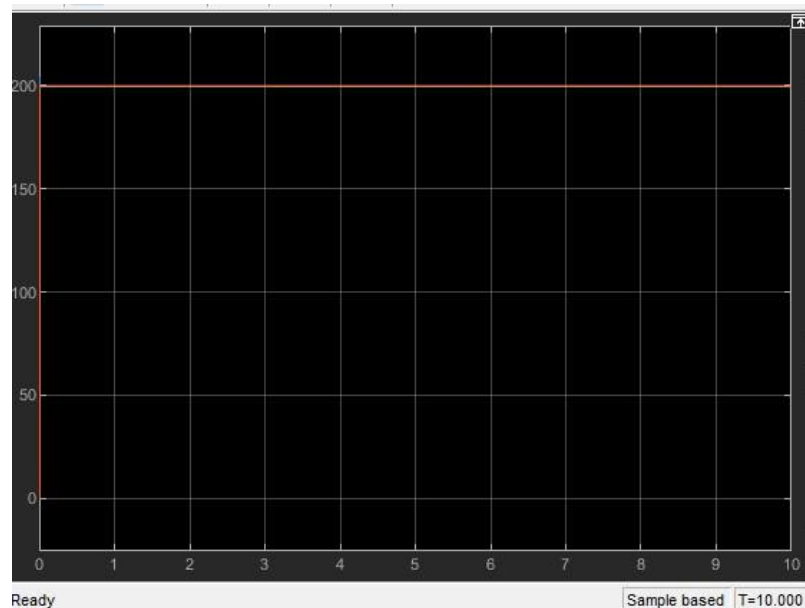
$$\cos \varphi = \frac{P_{G.4}'}{S_{G.4}'} = \frac{28281,9}{29889} = \mathbf{0,946} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.56)$$

$$\varphi = \cos^{-1}(0,946) = \mathbf{18,9^{\circ}} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.57)$$

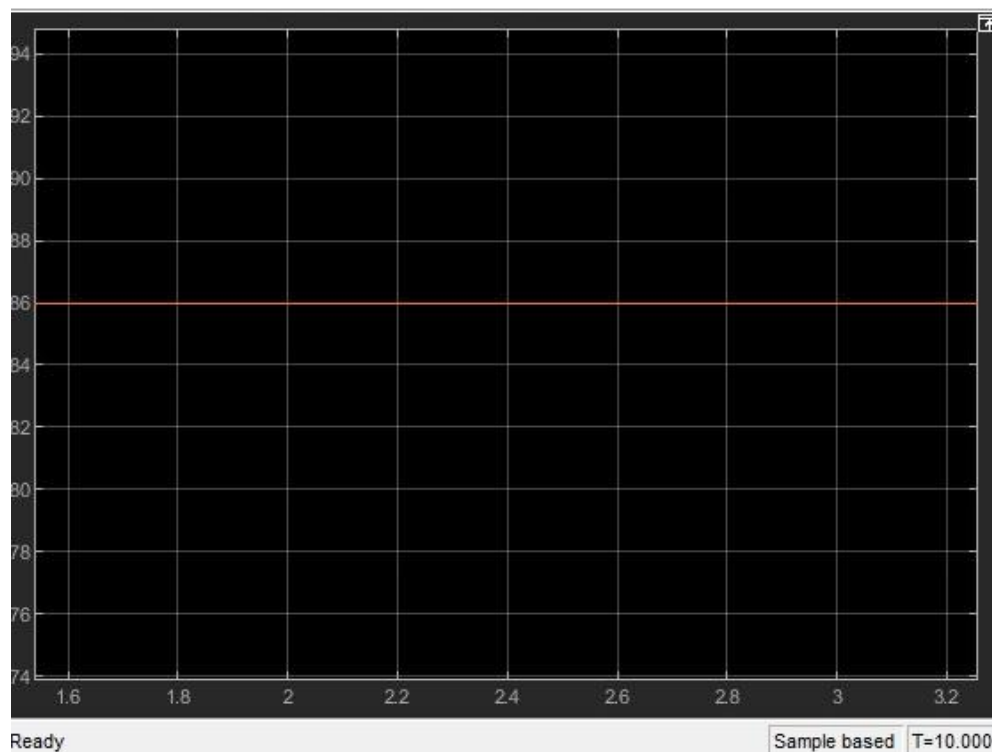
$$\begin{aligned} E_f' &= V_{\varphi} + jX_{\varphi} \cdot I_{\alpha}' + R_{\alpha} \cdot I_{\alpha}' = 115^{\angle 0^{\circ}} + 1,4^{\angle 90^{\circ}} \cdot 86,3^{\angle -18,9^{\circ}} + 0,21^{\angle 0^{\circ}} \cdot 86,3^{\angle -18,9^{\circ}} \\ &= 115^{\angle 0^{\circ}} + 120,8^{\angle 71,1^{\circ}} + 18,1^{\angle -18,9^{\circ}} = 115 + 39,13 + j114,3 + 17,12 - j5,87 \\ &= 171,25 + j108,43 = \mathbf{202,7^{\angle 32,3^{\circ}} V} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.58) \end{aligned}$$

$$E_f'(\text{πολικό}) = \sqrt{3}^{\angle 30^{\circ}} \cdot 202,7^{\angle 32,3^{\circ}} = \mathbf{351,1^{\angle 62,3^{\circ}} V} \quad (\sigma\chi\acute{\epsilon}\sigma\eta \ 9.59)$$

Η γραφική παράσταση της πολικής τάσης και του ρεύματος I_{α} της γεννήτριας Νο4 μετά την απώλεια της γεννήτριας Νο3 και την αύξηση του φορτίου φαίνεται στις εικόνες 9.20 και 9.21.



Εικόνα 9.20: Γραφική παράσταση πολική τάση στα άκρα της γεννήτριας Νο4 μετά την διόρθωση της επαγόμενης τάσης E_f' (πολικό).



Εικόνα 9.21: Γραφική παράσταση ρεύματος I_a στη γεννήτρια Νο4 μετά την διόρθωση της επαγόμενης τάσης E_f' (πολικό).

Όπως γίνεται αντιληπτό από την παραπάνω προσημείωση με κάθε μεταβολή του φορτίου κάθε γεννήτριας είναι αναγκαίο να γίνεται επαναπροσδιορισμός της επαγόμενης τάσης E_f της γεννήτριας ώστε η τάση V_ϕ στα άκρα της και ταυτόχρονα στα άκρα του φορτίου να παραμένει σταθερή και ίση με 200V. Η ρύθμιση της επαγόμενης τάσης E_f της γεννήτριας γίνεται με της ρύθμιση του ρεύματος διέγερσης I_f όπως περιγράφεται στην ενότητα 2.4.1.

Κατά την διάρκεια της λειτουργίας ενός αεροπλάνου το φορτίο των γεννητριών μεταβάλλεται συνεχώς. Συνεπώς είναι απαραίτητο η επαγόμενη τάση να επαναπροσδιορίζεται συνεχώς μέσω του ρεύματος διέγερσης. Κάτι τέτοιο δεν είναι εφικτό να γίνει με την παρεμβολή ανθρώπινου παράγοντα κατά την διάρκεια της λειτουργίας ενός αεροπλάνου. Για τον λόγο αυτό σημαντικό ρόλο σε ένα αεροπλάνο έχει η μονάδα ελέγχου γεννήτριας (Generator Control Unit – GCU), η οποία είναι υπεύθυνη στην αυτόματη ρύθμιση της διέγερσης της γεννήτριας με την μεταβολή του φορτίου.

9.5 Συμπεράσματα

Με την ανάλυση του δικτύου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συγκεκριμένου μεταγωγικού αεροπλάνου διαπιστώνονται τα εξής:

Αρχικά κάθε σύγχρονη γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτεί συγκεκριμένους ζυγούς σε κατάσταση κανονικής λειτουργίας. Παρόλα αυτά έχουν σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε σε περίπτωση ανάγκης να είναι ικανές να τροφοδοτήσουν περισσότερους από έναν ζυγό. Η ικανότητα αυτή εξαρτάται από την ονομαστική ισχύ της κάθε γεννήτριας. Όπως διαπιστώθηκε και από τον ενεργειακό ισολογισμό επαρκεί να τροφοδοτήσει τους πιθανούς συνδυασμούς που μπορεί να προκύψουν.

Στην συνέχεια με την προσημείωση που πραγματοποιήθηκε με το προγραμματιστικό πακέτου του Matlab έγινε αντιληπτό σε πραγματικό χρόνο ότι η συμπεριφορά της σύγχρονης γεννήτριας δεν παραμένει σταθερή. Αντίθετα μεταβάλλεται και εξαρτάται από το είδος και το μέγεθος του φορτίου που πρόκειται να τροφοδοτήσει.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10^ο : Τελικά Συμπεράσματα και Περιοχές για Περαιτέρω Έρευνα

10.3 Γενικά συμπεράσματα

Από την πρωτοεμφάνιση του ανθρώπου στη γη, η ανάγκη του για μετακίνηση σε διαφορετικά μέρη ήταν έντονη. Οι βασικότεροι λόγοι ήταν η ανταλλαγή προϊόντων. Με το πέρασμα των ετών οι μετακινήσεις αυτές αυξήθηκαν σε μεγάλο βαθμό και από τα μέσα του 20^{ου} αιώνα η ανάγκη της γρήγορης μετακίνησης στα διάφορα αυτά μέρη έγινε ακόμα εντονότερη. Το μέσο με το οποίο ήταν ικανό να επιτευχθεί αυτός ο στόχος ήταν το αεροπλάνο. Για τον λόγο δαπανήθηκαν αρκετοί διαθέσιμοι πόροι στην μελέτη, ανάπτυξη και εφαρμογή των διάφορων τεχνολογιών της εποχής ώστε η κατάκτηση του αέρα να πάρει «σάρκα και οστά».

Από εκείνη την χρονική περίοδο και μετά τις πρώτες επιτυχίες διαπιστώθηκε ότι το αεροπλάνο θα αποτελούσε μελλοντικά ένα από τα βασικότερα μέσα μετακίνησης καθώς και ταχείας μεταφοράς προϊόντων.

Ένα αεροπλάνο εκείνης της εποχής αποτελούταν από εξαρτήματα, τα οποία παρουσίαζαν περισσότερο μηχανικές ιδιότητες και σπάνια χρησιμοποιούνταν ηλεκτρικά εξαρτήματα. Αυτό όμως άλλαξε με το πέρασμα των ετών και την εξέλιξη της τεχνολογίας. Τα σύγχρονα αεροσκάφη βασίζονται σε ένα πολύ μεγάλο βαθμό από την ηλεκτρική ενέργεια. Για τον λόγο αυτό πλέον γίνεται λόγος για ένα ηλεκτρομηχανικό αεροπλάνο.

Τα τελευταία χρόνια καθώς η κλιματική αλλαγή επηρεάζει όλο και περισσότερο την ζωή του ανθρώπου και αποτελεί ένα πρόβλημα, το οποίο δύναται να αντιμετωπιστεί στο άμεσο μέλλον οι κατασκευάστριες εταιρίες αεροσκαφών αναπτύσσουν μοντέλα φιλικότερα προς το περιβάλλον.

Τα μοντέλα αυτά βασίζονται στην ηλεκτρική ενέργεια, η οποία έχει αποδειχτεί φιλικότερη προς το περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό η μορφή της ενέργειας, η οποία θα εξακολουθεί να χρησιμοποιείται στο αεροπλάνο για αρκετά χρόνια ακόμα είναι η ηλεκτρική.

Το γεγονός αυτό αποτελεί πρόκληση για τους κατασκευαστές διότι θα πρέπει να επιτευχθεί η τέλεια ισορροπία μεταξύ βάρους (συσσωρευτές) και ενεργειακής επάρκειας όταν γίνεται λόγος για ένα αεροσκάφος αμιγώς ηλεκτρικό. Ένα τέτοιο πιθανό πρόβλημα λύνεται με την πραγματοποίηση ενεργειακών ισολογισμών και προσομοιώσεων ανώτερου επιπέδου ώστε το τελικό αποτέλεσμα τα είναι αντάξιο των προσδοκιών.

Με την ανάπτυξη ενεργειακών ισολογισμών και προσομοιώσεων σε ένα αεροπλάνο γίνεται γνωστή η συμπεριφορά του ηλεκτρικού κυκλώματος τόσο σε κανονική λειτουργία όσο και σε μη κανονική κατάσταση, στην οποία μπορεί να βρεθεί. Τα αποτελέσματα τέτοιων μελετών βοηθούν στην υλοποίηση βελτιώσεων, οι οποίες έχουν ως κύριο γνώμονα ένα ασφαλέστερο αεροπλάνο.

10.4 Περιοχές για περαιτέρω έρευνα

Στην τρέχουσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε η θεωρητική αρχή λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας ενός αεροσκάφους. Επιπλέον παρουσιάστηκε ο ενεργειακός ισολογισμός, ο οποίος περιλάμβανε τρεις διαφορετικές καταστάσεις που μπορεί να βρεθεί το αεροπλάνο. Τέλος με βάση των αποτελεσμάτων του ενεργειακού ισολογισμού αναπτύχθηκε η προσομοίωση του ηλεκτρικού συστήματος του αεροπλάνου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αυτής έδωσε σημαντικές πληροφορίες για την λειτουργία του αεροπλάνου. Παρόλα αυτά υπάρχουν ακόμα περιοχές για περαιτέρω ερευνά και μελέτη, οι οποίες μπορούν να αποδώσουν πληροφορίες σε βαθύτερο επίπεδο, όπως είναι η συμπεριφορά των γεννητριών καθώς και η συμπεριφορά του συνολικού δικτύου του αεροπλάνου. Η μελέτη σε βάθος του ηλεκτρικού κυκλώματος του αεροπλάνου μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση βλαβών που πιθανός θα υπάρξουν καθώς και μελλοντικές αναβαθμίσεις που μπορεί να πραγματοποιηθούν. Οι περιοχές αυτές μπορεί να είναι οι εξής:

- Αρχικά σαν συνέχεια της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να είναι ο υπολογισμός των διατομών των αγωγών κάθε καταναλωτή που βρίσκεται στο αεροπλάνο. Με αυτό τον τρόπο θα εξασφαλίζεται η σωστή τροφοδότηση των καταναλωτών ώστε να αποφευχθούν προβλήματα όπως είναι η υπερθέρμανση των αγωγών καθώς και η πτώση τάσης στα άκρα τους.
- Ένας άλλος υπολογισμός που αφορά τους αγωγούς είναι το προσδιορισμός του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται γύρω τους όταν αυτοί διαρρέονται από ηλεκτρικό ρεύμα. Ο υπολογισμός αυτός θα έδινε λύση σε φαινόμενα που αφορούν παρεμβολές στα συστήματα επικοινωνιών.
- Ένα άλλο σημείο για περαιτέρω έρευνα αποτελεί ο υπολογισμός των αναπτυσσόμενων ρευμάτων κατά την διάρκεια ενός βραχυκυκλώματος. Η συγκεκριμένη μελέτη αποτελεί μια από τις σημαντικότερες διότι παρέχει πληροφορίες για την κατάσταση του ηλεκτρικού συστήματος κατά την διάρκεια μιας αντικανονικής λειτουργίας. Με την γνώση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης μπορούν να προσδιοριστούν οι ασφαλιστικές διατάξεις που θα

χρησιμοποιηθούν, καθώς και οι διατομές των ζυγών ώστε να αντέξουν την καταπόνηση ενός βραχυκυκλώματος.

- Μια περιοχή για περαιτέρω μελέτη αφορά την λειτουργία της γεννήτριας και τον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του ρεύματος διέγερσης και του φορτίου. Επιπλέον η μελέτη των εσωτερικών φαινομένων, τα οποία αναπτύσσονται εντός της γεννήτριας κατά την διάρκεια της κανονικής και μη κανονικής λειτουργίας αποτελούν εξίσου σημαντικό κομμάτι. Με βάση των αποτελεσμάτων αυτών μπορεί να ελέγχεται η καταπόνηση της γεννήτριας και να ορισθεί ο χρόνος μεταξύ των περιοδικών επιθεωρήσεων.

Βιβλιογραφία – Αναφορές – Διαδικτυακές Πηγές

1. Florian Ion Petrescu, Rely Victoria Petrescu : “The Aviation History”, USA 2012.
2. Raymond A. Serway, John W. Jewett : «Φυσική Για Επιστήμονες και Μηχανικούς», εκδόσεις Κλειδάριθμος, 8η έκδοση, 2013
3. Charles I. Hubert P.E : «Ηλεκτρικές Μηχανές Θεωρία, Λειτουργία, Εφαρμογές, Ρυθμίσεις και Έλεγχος», εκδόσεις ΙΩΝ, 2008
4. Stephen J. Chapman : «Ηλεκτρικές Μηχανές», εκδόσεις Τζιόλα, 2010
5. Young and Freedman : “ University Physics”, Pearson Education Inc, 12th edition, 2008
6. Παντελής Μαλατέστας, Μερóπη Τερζή: «Ηλεκτρομηχανικά Συστήματα Μετατροπής Ενέργειας», εκδόσεις Τζιόλα , 2013
7. Χάρης Στ. Δημουλιάς : «Ηλεκτρικές Μηχανές, Σύγχρονες Μηχανές», εκδόσεις Τζιόλα, 2014
8. Βλάχος Γ. Αριστείδης : «Ηλεκτρικές Μηχανές , Τόμος Α», Ίδρυμα Ευγενίδου, 2016
9. Σπύρος Ν. Βασιλακόπουλος : «Ηλεκτρικές Μηχανές», Ίδρυμα Ευγενίδου , 2006
10. Ι.Α. Τεγόπουλος : «Ηλεκτρικές Μηχανές, Μέρος Β», 1986
11. Στέφανος Τουλόγλου, Βαγγέλης Στεργίου : «Ηλεκτρικές Μηχανές Συνεχούς και Εναλλασσόμενου Ρεύματος», εκδόσεις ΙΩΝ, 2009
12. A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans : “Electric Machinery”, Mc Graw Hill, 6th edition, 2003
13. Theodore Wildi : “Electrical Machines, Drives, and Power Systems”, Prentice Hall, 5th edition, 2002
14. Mike Tooley, David Wyatt : “Aircraft Electrical and Electronic Systems – Principles, Operation and Maintenance”, Elsevier Ltd, 2009
15. Ι.Ν Μαρκόπουλος : «Εισαγωγή στην Ηλεκτρομηχανική», εκδόσεις University Studio Press, 1990
16. Παντελής Μαλατέστας : «Ηλεκτρικές Μηχανές» εκδόσεις Τζιόλα, 3η έκδοση, 2015
17. Βλάχος Γ. Αριστείδης : «Ηλεκτρικές Μηχανές , Τόμος Β», Ίδρυμα Ευγενίδου, 2016

18. Albert Malvino, David J. Bates : «Ηλεκτρονική», εκδόσεις Τζιόλα, 7η έκδοση, 2011
19. Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins : «Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Ισχύος», εκδόσεις Τζιόλα, 3η έκδοση, 2010
20. Charles Concordia : “Synchronous Machines, Theory and Performance”, General Electric Company, 1951
21. Mohamed E. EL-Hawary : “Principles of Electric Machines with Power Electronic Applications”, Wiley-Interscience, 2th edition, 2002
22. Thomas K. Eismín : “Aircraft Electricity & Electronics”, International editions, 1994
23. Ian Moir, Allan Seabridge : “Aircraft Systems, Mechanical, Electrical and Avionics Subsystems Integration”, John Wiley & Sons,Ltd, 2008
24. Παντελής Β. Μαλατεστας : «Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», εκδόσεις Τζιόλα, 2η έκδοση, 2016
25. Παύλος Σ Γεωργιλακης : «Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ελληνικά Ακαδημαϊκά Ηλεκτρονικά Συγγράμματα και Βοηθήματα, 2015
26. E.H.J Pallet : “Aircraft Electrical System” , Pearson Education Limited, 3th edition, 1987
27. Αντωνίου Ι. Τσακίρη : «Φωτοτεχνία», 2004
28. Στέφανος Λ. Τραχανάς : «Κβαντομηχανική 1, Θεμελιώδεις Αρχές- Απλά Συστήματα- Δομή της Ύλης» , Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, 2018
29. Νίκος Σταθόπουλος : «Μετρήσεις, Ηλεκτρονικά Συστήματα Μετρήσεων & Αισθητήρια», Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Αράκυνθος, 2017
30. E.H.J Pallet, L.F.E Coombs : “Aircraft Instruments & Integrated Systems”, Pearson Education Limited, 1992
31. Γ. Ι. Τσεκούρας: «Εισαγωγή στις βασικές έννοιες της ηλεκτροτεχνίας», Σημειώσεις ΠΑ.Δ.Α., 2021
32. Ι. Κ. Χατζηγιάου, Γ. Ι. Τσεκούρας: «Θεωρία και Πράξη Ηλεκτρικών Μηχανών – Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή», Σημειώσεις Σ.Ν.Δ.

33. Ι. Κ. Χατζηγιάου, Γ. Ι. Τσεκούρας: «Θεωρία και Πράξη Ηλεκτρικών Μηχανών – Κεφάλαιο 2: Μετασχηματιστές», Σημειώσεις Σ.Ν.Δ.
34. Ε.Ν. Πρωτονοτάριος, Κ. Βουρνάς: «Ηλεκτροτεχνικές Εφαρμογές», Εκδόσεις Συμμετρία, 1993
35. Π. Μιχαλόπουλος, Γεώργιος Τσεκούρας: «Εισαγωγή στη MATLAB», Σ.Ν.Δ., Νοέμβριος 2014
36. John Kraus, Daniel Fleisch: «Ηλεκτρομαγνητισμός & Εφαρμογές» εκδόσεις Τζιόλα, 5η έκδοση 2014
37. Στέφανος Ν. Μανιάς: «Ηλεκτρονικά Ισχύος» εκδόσεις Συμεών, 2η έκδοση 201
38. ABB “Switchgear Manual”, 10th edition
39. Σ. Γαντζούδης, Μ. Λαγουδάκος, Α. Μπινιάρης «Ηλεκτρικές Μηχανές», Οργανισμός Εκδόσεων Διδακτικών Βιβλίων
40. <https://engineerlearn.com/what-is-led-types-of-led-application-working-symbol-diagram-construction-complete-details/>
41. <http://connectorselectrical.emilspec.com/MS17793/images.html>
42. <https://www.ecraftsmen.com/portfolio/power-transformer>

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Παρουσίαση του κώδικα που αναπτύχθηκε στο προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab ώστε να παρουσιαστούν οι διάφοροι υπολογισμοί της παρούσας εργασίας.

Κώδικας 1: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της LH AC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.2.

```
clear;
%LH AC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8]; % ορισμός πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [3; 3; 6; 6; 2; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακας στήλη πλήθους
S_on_apor= [2040; 5020; 1545; 3850; 4200; 2400; 932; 1450]; % ορισμός πίνακας στήλη
S ονομαστικό αποροφούμενο
cosf= [1; 1; 1;1; 1; 0.65; 0.54; 0.76]; % ορισμός πίνακας στήλη συνημιτόνου φ

P_on_apor= S_on_apor.*cosf; % υπολογισμός P ονομαστικού αποροφούμενου
Q_on_apor= sqrt((S_on_apor.^2)-(P_on_apor.^2)); % υπολογισμός Q ονομαστικού
αποροφούμενου
P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [3; 3; 6; 6; 0; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών
τροχοδρόμησης
fs_troxo= [1; 0.01; 1; 0.01; 0; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης
Q_leit_troxo= Q_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [3; 3; 6; 6; 0; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N)
καταναλωτών προσγείωσης & απογείωσης
fs_apog_prosg= [1; 0.01; 1; 0.01; 0; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης
Q_leit_apog_prosg= Q_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός Q
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης

N_ptisi= [3; 3; 6; 6; 2; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών
πτήσης
fs_ptisi= [1; 0.05; 1; 0.05; 0.2; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
πτήσης
Q_leit_ptisi= Q_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού LH AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής
ισχύος (P) ζυγού LH AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού LH AC φάση πτήσης
```

```

Sum_Q_leit_troxo= sum(Q_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
LH AC φάση τροχοδρόμησης

Sum_Q_leit_apog_prosg= sum(Q_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος
(Q) ζυγού LH AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_Q_leit_ptisi= sum(Q_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
LH AC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'S_on_apor', 'cosf', 'P_on_apor', 'Q_on_apor', 'P_egkat',
'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo', 'Q_leit_troxo', 'N_apog_prosg',
'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'Q_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi',
'P_leit_ptisi', 'Q_leit_ptisi',};
Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string',};

T=table(i, N, S_on_apor, cosf, P_on_apor, Q_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo,
P_leit_troxo, Q_leit_troxo, N_apog_prosg, fs_apog_prosg,
P_leit_apog_prosg, Q_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi, Q_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo) = %4.1f\nSum_Q_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg =
%4.1f\nSum_Q_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi = %4.1f\nSum_Q_leit_ptisi =
%4.1f\n',Sum_P_leit_troxo,Sum_Q_leit_troxo,Sum_P_leit_apog_prosg,Sum_Q_leit_apog_pros
g,Sum_P_leit_ptisi,Sum_Q_leit_ptisi)
    
```

Κώδικας 2: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της ESS AC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.3.

```

clear;
%ESS AC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22;
23; 24;]; % ορισμός πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [1; 1; 1; 1; 2; 4; 2; 1; 1; 1; 1; 2; 1; 2; 1; 1; 2; 2; 16; 4; 4; 4; 2; 32;]; %
ορισμός πίνακας στήλη πλήθους
S_on_apor= [282; 679; 282; 250; 193; 3450; 2760; 3450; 932; 200; 778; 200; 100; 15;
420; 1768; 70; 4; 8; 14.5; 5.8; 5.9; 38; 0.94;]; % ορισμός πίνακας στήλη S ονομαστικό
αποροφούμενο
cosf= [0.98; 0.98; 0.98; 0.85; 0.85; 0.75; 0.7; 0.7; 0.54; 0.9; 0.9; 0.8; 0.9; 0.38;
0.9; 0.9; 1; 1; 1; 0.35; 0.23; 0.18; 0.88; 1;]; % ορισμός πίνακας στήλη συνημίτονου φ

P_on_apor= S_on_apor.*cosf; % υπολογισμός P ονομαστικού αποροφούμενου
Q_on_apor= sqrt((S_on_apor.^2)-(P_on_apor.^2)); % υπολογισμός Q ονομαστικού
αποροφούμενου
P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [1; 1; 1; 0; 2; 0; 2; 1; 1; 1; 1; 2; 1; 2; 1; 0; 2; 2; 8; 4; 4; 4; 2; 32;];
% ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών τροχοδρόμησης
fs_troxo= [0.05; 0.05; 0.05; 0; 1; 0; 1; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 1; 1;
1; 1; 1; 1;]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης
Q_leit_troxo= Q_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [1; 1; 1; 0; 2; 0; 2; 1; 1; 1; 1; 2; 1; 2; 1; 0; 2; 2; 8; 4; 4; 4; 2;
32;]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών προσγείωσης & απογείωσης
    
```

```

fs_apog_prosg= [0.05; 0.05; 0.05; 0; 1; 0; 1; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης
Q_leit_apog_prosg= Q_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης

N_ptisi= [1; 1; 1; 1; 2; 4; 2; 1; 1; 1; 1; 2; 1; 2; 1; 1; 2; 2; 8; 4; 4; 4; 2; 32]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών πτήσης
fs_ptisi= [0.05; 0.05; 0.05; 1; 1; 0.01; 1; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση πτήσης
Q_leit_ptisi= Q_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P) ζυγού ESS AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P) ζυγού ESS AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P) ζυγού ESS AC φάση πτήσης

Sum_Q_leit_troxo= sum(Q_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού ESS AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_Q_leit_apog_prosg= sum(Q_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού ESS AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_Q_leit_ptisi= sum(Q_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού ESS AC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'S_on_apor', 'cosf', 'P_on_apor', 'Q_on_apor', 'P_egkat', 'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo', 'Q_leit_troxo', 'N_apog_prosg', 'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'Q_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi', 'P_leit_ptisi', 'Q_leit_ptisi',};
Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',};

T=table(i, N, S_on_apor, cosf, P_on_apor, Q_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo, P_leit_troxo, Q_leit_troxo, N_apog_prosg, fs_apog_prosg, P_leit_apog_prosg, Q_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi, Q_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo) = %4.1f\nSum_Q_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_Q_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi = %4.1f\nSum_Q_leit_ptisi = %4.1f\n',Sum_P_leit_troxo,Sum_Q_leit_troxo,Sum_P_leit_apog_prosg,Sum_Q_leit_apog_prosg,Sum_P_leit_ptisi,Sum_Q_leit_ptisi)

```

Κώδικας 3: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της MAIN AC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.4.

```

clear;
%MAIN AC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10]; % ορισμός πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [1; 2; 2; 4; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακας στήλη πλήθους

```

```

S_on_apor= [932; 1450; 1450; 1450; 1450; 1450; 200; 778; 1160; 162]; % ορισμός
πίνακας στήλη S ονομαστικό αποροφούμενο
cosf= [0.54; 0.76; 0.76; 0.76; 0.76; 0.76; 0.9; 0.9; 0.9; 0.98]; % ορισμός πίνακας
στήλη συνημίτονου φ

P_on_apor= S_on_apor.*cosf; % υπολογισμός P ονομαστικού αποροφούμενου
Q_on_apor= sqrt((S_on_apor.^2)-(P_on_apor.^2)); % υπολογισμός Q ονομαστικού
αποροφούμενου

P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [1; 2; 2; 0; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N)
καταναλωτών τροχοδρόμησης
fs_troxo= [1; 1; 1; 0; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης
Q_leit_troxo= Q_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [1; 2; 2; 0; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N)
καταναλωτών προσγείωσης & απογείωσης
fs_apog_prosg= [1; 1; 1; 0; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης
Q_leit_apog_prosg= Q_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός Q
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης

N_ptisi= [1; 2; 2; 4; 1; 1; 1; 1; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N)
καταναλωτών πτήσης
fs_ptisi= [1; 1; 1; 0.2; 1; 1; 0.5; 0.5; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή
λειτουργίας (fs) πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
πτήσης
Q_leit_ptisi= Q_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού MAIN AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής
ισχύος (P) ζυγού MAIN AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού MAIN AC φάση πτήσης

Sum_Q_leit_troxo= sum(Q_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
MAIN AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_Q_leit_apog_prosg= sum(Q_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος
(Q) ζυγού MAIN AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_Q_leit_ptisi= sum(Q_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
MAIN AC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'S_on_apor', 'cosf', 'P_on_apor', 'Q_on_apor', 'P_egkat',
'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo', 'Q_leit_troxo', 'N_apog_prosg',
'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'Q_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi',
'P_leit_ptisi', 'Q_leit_ptisi',};
Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string',};
    
```

```
T=table(i, N, S_on_apor, cosf, P_on_apor, Q_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo,
P_leit_troxo, Q_leit_troxo, N_apog_prosg, fs_apog_prosg,
P_leit_apog_prosg, Q_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi, Q_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo) = %4.1f\nSum_Q_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg =
%4.1f\nSum_Q_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi = %4.1f\nSum_Q_leit_ptisi =
%4.1f\n', Sum_P_leit_troxo, Sum_Q_leit_troxo, Sum_P_leit_apog_prosg, Sum_Q_leit_apog_prosg,
Sum_P_leit_ptisi, Sum_Q_leit_ptisi)
```

Κώδικας 4: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της RH AC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.5

```
clear;
%RH AC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5]; % ορισμός πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [4; 4; 4; 1; 1]; % ορισμός πίνακας στήλη πλήθους
S_on_apor= [2290; 2290; 2290; 930; 1450]; % ορισμός πίνακας στήλη S ονομαστικό
αποροφούμενο
cosf= [1; 1; 1; 0.54; 0.76]; % ορισμός πίνακας στήλη συνημίτονου φ

P_on_apor= S_on_apor.*cosf; % υπολογισμός P ονομαστικού αποροφούμενου
Q_on_apor= sqrt((S_on_apor.^2)-(P_on_apor.^2)); % υπολογισμός Q ονομαστικού
αποροφούμενου
P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [4; 4; 4; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών
τροχοδρόμησης
fs_troxo= [1; 0; 0; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs)
τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης
Q_leit_troxo= Q_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [4; 4; 4; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών
προσγείωσης & απογείωσης
fs_apog_prosg= [1; 0; 0; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs)
προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης
Q_leit_apog_prosg= Q_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός Q
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης

N_ptisi= [4; 4; 4; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών πτήσης
fs_ptisi= [1; 0.2; 0.2; 1; 1]; % ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs)
πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
πτήσης
Q_leit_ptisi= Q_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός Q λειτουργίας για φάση
πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού RH AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής
ισχύος (P) ζυγού RHAC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού RH AC φάση πτήσης
```

```

Sum_Q_leit_troxo= sum(Q_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
RH AC φάση τροχοδρόμησης
Sum_Q_leit_apog_prosg= sum(Q_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος
(Q) ζυγού RH AC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_Q_leit_ptisi= sum(Q_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής άεργου ισχύος (Q) ζυγού
RH AC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'S_on_apor', 'cosf', 'P_on_apor', 'Q_on_apor', 'P_egkat',
'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo', 'Q_leit_troxo', 'N_apog_prosg',
'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'Q_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi',
'P_leit_ptisi', 'Q_leit_ptisi',};

Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string',};

T=table(i, N, S_on_apor, cosf, P_on_apor, Q_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo,
P_leit_troxo, Q_leit_troxo, N_apog_prosg, fs_apog_prosg,
P_leit_apog_prosg, Q_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi, Q_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo) = %4.1f\nSum_Q_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg =
%4.1f\nSum_Q_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi = %4.1f\nSum_Q_leit_ptisi =
%4.1f\n',Sum_P_leit_troxo,Sum_Q_leit_troxo,Sum_P_leit_apog_prosg,Sum_Q_leit_apog_prosg,
Sum_P_leit_ptisi,Sum_Q_leit_ptisi)
    
```

Κώδικας 5: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της ESS DC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.6.

```

clear;
%ESS DC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20; 21; 22;
23;]; % ορισμός πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [1; 4; 3; 6; 4; 4; 1; 16; 14; 2; 6; 1; 4; 4; 2; 2; 2; 3; 4; 2; 4; 16; 22;]; %
ορισμός πίνακας στήλη πλήθους
P_on_apor= [532; 7.6; 4.8; 2.8; 1.4; 16.8; 28; 56; 14; 280; 4.2; 112; 53.2; 148.4;
33.6; 672; 106.4; 14; 14; 140; 42; 5.6; 44.8;]; % ορισμός πίνακας στήλη P ονομαστικό
αποροφούμενο

P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [1; 4; 3; 6; 4; 4; 1; 16; 14; 2; 6; 1; 4; 4; 2; 2; 2; 3; 4; 2; 4; 16; 22;];
% ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών τροχοδρόμησης
fs_troxo= [0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1;]; %
ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [1; 4; 3; 6; 4; 4; 1; 16; 14; 2; 6; 1; 4; 4; 2; 2; 2; 3; 4; 2; 4; 16;
22;]; % ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών προσγείωσης & απογείωσης
fs_apog_prosg= [0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1;]; %
ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης
    
```



```

N_ptisi= [1; 4; 3; 6; 4; 4; 1; 16; 14; 2; 6; 1; 4; 4; 2; 2; 2; 3; 4; 2; 4; 16; 22;];
% ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών πτήσης
fs_ptisi= [1; 1; 1; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1;]; %
ορισμός πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού ESS DC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής
ισχύος (P) ζυγού ESS DC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού ESS DC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'P_on_apor', 'P_egkat', 'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo',
'N_apog_prosg', 'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi',
'P_leit_ptisi',};

Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',};

T=table(i, N, P_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo, P_leit_troxo, N_apog_prosg,
fs_apog_prosg, P_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi =
%4.1f\n',Sum_P_leit_troxo,Sum_P_leit_apog_prosg,Sum_P_leit_ptisi)
    
```

Κώδικας 6: Κώδικας για την υλοποίηση του ενεργειακού ισολογισμού της MAIN DC BUS και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον πίνακα 9.7.

```

clear;
%MAIN DC BUS
i= [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 13; 14; 15; 16; 17; 18; 19;]; % ορισμός
πίνακας στήλη αύξοντα αριθμών
N= [2; 1; 3; 1; 3; 2; 21; 30; 30; 490; 2; 4; 15; 2; 2; 3; 7; 3; 6;]; % ορισμός
πίνακας στήλη πλήθους
P_on_apor= [25.2; 8.4; 8.4; 2.8; 16.8; 112; 22.4; 22.4; 42; 1.1; 168; 56; 22.4; 168;
140; 14; 5.6; 98; 112;]; % ορισμός πίνακας στήλη P ονομαστικό αποροφούμενο

P_egkat= P_on_apor.*N; % υπολογισμός P εγκατεστημένου

N_troxo= [2; 1; 3; 1; 3; 2; 21; 30; 30; 490; 2; 4; 15; 2; 2; 3; 7; 3; 6;]; % ορισμός
πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών τροχοδρόμησης
fs_troxo= [1; 1; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 0; 1; 1; 0; 0; 0; 1; 1; 1; 1; 0;]; % ορισμός
πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) τροχοδρόμησης
P_leit_troxo= P_on_apor.*N_troxo.*fs_troxo; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
τροχοδρόμησης

N_apog_prosg= [2; 1; 3; 1; 3; 2; 21; 30; 30; 490; 2; 4; 15; 2; 2; 3; 7; 3; 6;]; %
ορισμός πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών προσγείωσης & απογείωσης
fs_apog_prosg= [1; 1; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 0; 1; 0; 0; 0; 0; 1; 1; 1; 1; 0;]; % ορισμός
πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) προσγείωσης & απογείωσης
P_leit_apog_prosg= P_on_apor.*N_apog_prosg.*fs_apog_prosg; % υπολογισμός P
λειτουργίας για φάση προσγείωσης & απογείωσης

N_ptisi= [2; 1; 3; 1; 3; 2; 21; 30; 30; 490; 2; 4; 15; 2; 2; 3; 7; 3; 6;]; % ορισμός
πίνακα στήλη πλήθους (N) καταναλωτών πτήσης
    
```

```
fs_ptisi= [0; 1; 1; 1; 0; 1; 1; 0; 1; 1; 0; 0.5; 0.5; 0.2; 1; 1; 1; 1; 1;]; % ορισμός
πίνακα στήλη συντελεστή λειτουργίας (fs) πτήσης
P_leit_ptisi= P_on_apor.*N_ptisi.*fs_ptisi; % υπολογισμός P λειτουργίας για φάση
πτήσης

Sum_P_leit_troxo= sum(P_leit_troxo); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού MAIN DC φάση τροχοδρόμησης
Sum_P_leit_apog_prosg= sum(P_leit_apog_prosg); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής
ισχύος (P) ζυγού MAIN DC φάση απογείωσης & προσγείωσης
Sum_P_leit_ptisi= sum(P_leit_ptisi); % υπολογισμός συνολικής πραγματικής ισχύος (P)
ζυγού MAIN DC φάση πτήσης

varNames={'i', 'N', 'P_on_apor', 'P_egkat', 'N_troxo', 'fs_troxo', 'P_leit_troxo',
'N_apog_prosg', 'fs_apog_prosg', 'P_leit_apog_prosg', 'N_ptisi', 'fs_ptisi',
'P_leit_ptisi',};

Vartypes={'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',
'string', 'string', 'string', 'string', 'string', 'string',};

T=table(i, N, P_on_apor, P_egkat, N_troxo, fs_troxo, P_leit_troxo, N_apog_prosg,
fs_apog_prosg, P_leit_apog_prosg, N_ptisi, fs_ptisi, P_leit_ptisi);
T.Properties.VariableNames = varNames

fprintf('Sum_P_leit_troxo = %4.1f\nSum_P_leit_apog_prosg = %4.1f\nSum_P_leit_ptisi =
%4.1f\n',Sum_P_leit_troxo,Sum_P_leit_apog_prosg,Sum_P_leit_ptisi)
```