



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**Μελέτη ηλεκτρικού συστήματος και πέδησης  
αεροσκαφών νέας γενιάς**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

του

**ΑΠΟΣΤΟΛΟΥ ΦΙΛΙΠΠΙΔΗ**

**Επιβλέπων :** Νικόλαος Μ. Μανουσάκης  
Επ. Καθηγητής ΠΑ.Δ.Α.

Αθήνα, Νοέμβριος 2019

# Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο – Εισαγωγή</b> .....	17
1.1 Αεροσκάφος ιστορική αναδρομή.....	17
1.2 Δυναμική της πτήσης.....	18
1.3 Δυνάμεις κατά τη πτήση και έλεγχος τους .....	21
1.4 Σύγχρονα αεροσκάφη, “More Electric Aircraft” .....	22
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο - Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε αεροσκάφη</b> .....	25
2.1 Πρόοδος στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το 19ο αιώνα.....	25
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο - Τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των αεροσκαφών</b> .....	29
3.1 CSD/IDG Generating System .....	29
3.2 VSCF Generating System.....	29
3.3 VF Generating System.....	29
3.4 Auxiliary Power Unit (APU) .....	29
3.5 Emergency Power Source .....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο - Συστήματα διανομής ισχύος αεροσκαφών</b> .....	31
4.1 Συμβατικά αεροσκάφη .....	31
<b>4.2 More Electric Aircraft (Περισσότερο Ηλεκτρικό Αεροσκάφος)</b> .....	33
4.3 Σύγχρονα Αεροσκάφη MEA.....	35
4.4 Ηλεκτρικά φορτία στο αεροσκάφος .....	38
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο - Μηχανές, Γεννήτριες</b> .....	43
5.1 Είδη γεννητριών.....	43
5.2 Variable Frequency Generator.....	45
5.3 Variable speed constant frequency (VSCF) Gen .....	46
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο - Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (EPS) και ηλεκτρονικά ισχύος</b> ....	49
6.1 Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας (EPS) σταθερής συχνότητας (CF) .....	49
6.2 Ηλεκτρονικά ισχύος σε EPS σταθερής συχνότητας .....	50
6.3 Δομή EPS μεταβλητής συχνότητας (VF) .....	51
6.4 Ηλεκτρονικά ισχύος σε EPS μεταβλητής συχνότητας.....	52
6.5 EPS αεροσκάφους υψηλής τάσης- High Voltage AC- (HVAC) .....	54
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7ο - Αρμονικές</b> .....	57
7.1 Δημιουργία αρμονικών .....	57
7.2 Αρμονικές και συντελεστές ισχύος για διαφορετικούς ανορθωτές .....	58
7.3 Επιδόσεις συστήματος ηλεκτρικής ισχύος αεροσκάφους (VSCF) με ενεργά .....	63
φίλτρα ισχύος .....	63
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8ο - Μπαταρίες, Batteries</b> .....	75
8.1 Μπαταρίες αεροσκαφών .....	75
8.2 Μπαταρίες μολύβδου-οξέος .....	76

8.3 Μπαταρίες νικελίου καδμίου.....	78
8.4 Μπαταρίες λιθίου.....	78
8.5 Μπαταρίες αεροσκαφών (γενικά).....	79
8.6 Ιστορικό του συστήματος μπαταριών αεροσκαφών .....	80
8.7 Αξιολόγηση του συστήματος μπαταριών .....	82
8.7.1 Ειδική ενέργεια και ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα.....	82
8.7.2 Ειδική ισχύς .....	83
8.7.3 Επίδραση της θερμοκρασίας.....	83
8.8 Εξέλιξη και αρχιτεκτονική διανομής ισχύος του αεροσκάφους ΜΕΑ .....	86
8.9 Προφίλ φορτίων μπαταρίας σε ΜΕΑ .....	89
8.10 Παραγοντική ανάλυση κόστους και βάρους σε σύστημα μπαταριών Li-Ion .....	89
NI-CD σε σχέση με το ΜΕΑ .....	89
8.11 Ανάλυση κόστους και συντελεστή βάρους της μπαταρίας.....	90
8.11.1 Τυπική μπαταρία ιόντων λιθίου σε τυχαίο αεροσκάφος ΜΕΑ .....	91
8.11.2 Τυπική μπαταρία Ni-Cd σε τυχαίο αεροσκάφος ΜΕΑ .....	92
8.12 Ανάλυση κόστους για φορτιστή, περίβλημα και κυκλώματα ανίχνευσης των.....	95
μπαταριών LI-ION και NI-CD .....	95
8.12.2 Δοχείο / περίβλημα της μπαταρίας .....	98
8.12.3 Αισθητήρες, κυκλώματα, ζυγοί μεταφοράς .....	98
8.13 BMS και θέματα ασφαλείας που συνδέονται με μπαταρίες LI-ION .....	99
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9<sup>ο</sup> - Σύστημα πέδησης αεροσκαφών ΜΕΑ .....</b>	<b>103</b>
9.1 Ιστορική αναδρομή.....	103
9.2 Ταξινόμηση των συστημάτων πέδησης του αεροσκάφους.....	105
9.2.1 Δισκόφρενα αεροσκάφους.....	105
9.2.2 Αντιστροφείς ώσης .....	107
9.2.3 Σύστημα Anti-skid .....	108
9.2.4 Αλεξίπτωτο σταθεροποίησης.....	109
9.4 Ηλεκτρικό σύστημα πέδησης πολιτικών αεροσκαφών.....	112
9.5 Έρευνα για το ηλεκτρικό σύστημα φρένων των πολιτικών αεροσκαφών.....	115
9.6 Διάταξη ηλεκτρικών φρένων .....	118
9.7 Τεστ ηλεκτρικών φρένων σε σύγκριση με τα υδραυλικά.....	120
9.8 Συμπεράσματα .....	122

## Περίληψη

Στις μέρες μας αναπτύσσεται μια τάση στη παγκόσμια αγορά αεροσκαφών προς τη κατεύθυνση της έννοιας "Ηλεκτρικό Αεροσκάφος" (MEA), με κύριους στόχους τη μείωση του λειτουργικού κόστους, της χρήσης ορυκτών καυσίμων και των εκπομπών αερίων. Τα ηλεκτρικά συστήματα βοηθούν στην επίτευξη αυτών των στόχων, επειδή είναι εγγενώς λιγότερο επιρρεπή σε αποτυχία απ' ό,τι τα αντίστοιχα μηχανικά, απλούστερα στην χρησιμοποίησή τους ή στην αντικατάστασή τους, παρέχοντας μόνο την απαιτούμενη ισχύ και επιτρέποντας την έξυπνη διαχείριση πηγών ενέργειας με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ενέργειας, βάρους και καυσίμου όπως και την μείωση του χρόνου μη χρησιμοποίησης του αεροπλάνου, το λειτουργικό κόστος και συγχρόνως μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Αυτό απαιτεί μια επανεξέταση της υποδομής ισχύος του αεροσκάφους, με κάθε υποσύστημα να υπόκειται σε έρευνα, συμπεριλαμβανομένης της μπαταρίας και των συστημάτων που συνδέονται μαζί της.

Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας του αεροσκάφους αποτελείται από τον εξοπλισμό μετατροπής ισχύος, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών συσσωρευτών, των μετασχηματιστών, των ανορθωτών και των γεννητριών εδάφους, δηλαδή της εξωτερικής τροφοδοσίας όταν το αεροσκάφος βρίσκεται στο έδαφος.

Το συμβατικό αεροσκάφος χρησιμοποιεί ένα συνδυασμό υδραυλικών, ηλεκτρικών, πνευματικών και μηχανικών συστημάτων μεταφοράς ισχύος.

Η αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ως τεχνολογική ευκαιρία για εγκατάσταση προηγμένων συστημάτων ισχύος στα αεροσκάφη, με βάση τις ταχέως εξελισσόμενες τεχνολογικές εξελίξεις στα ηλεκτρονικά ισχύος, τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ισχύος (πιο ανθεκτικά σε σφάλματα) και τους ενεργοποιητές των πρωτευόντων ηλεκτροκίνητων συστημάτων ελέγχου πτήσης.

Η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος των αεροσκαφών, ειδικά τις τελευταίες δύο δεκαετίες, σε συνδυασμό με την πρόοδο στα υλικά και την τεχνολογία των μπαταριών οδήγησε στην ανάπτυξη μπαταριών υψηλής ενεργειακής πυκνότητας.

**Λέξεις Κλειδιά:** ηλεκτρικό αεροσκάφος, γεννήτριες, ηλεκτρονικά ισχύος, μπαταρίες, σύστημα πέδησης.

## Abstract

There is currently a global push towards the concept of More Electric Aircraft (MEA), with the main objectives being the reduction of operational costs, fuel usage and emissions. Electrical systems aid in achieving these goals by being inherently less prone failure than their mechanical counterparts, simpler to replace or install multiply to satisfy system redundancy requirements, only delivering as much power as needed and allowing intelligent management of energy sources resulting in energy, weight and fuel savings, decreased downtime and operational costs and smaller environmental impact. This requires a rethinking of the aircraft power infrastructure, with every sub-system subject to investigation, including the battery and its associated systems.

Aircraft power distribution system consists of the power conversion equipment, including batteries, transformers, rectifiers and the ground power supplies, namely the external power supply when the aircraft is on the ground.

The conventional aircraft utilizes a combination of hydraulic, electric, pneumatic and mechanical power transfer systems. Increasing use of electric power is seen as the direction of technological opportunity for advanced aircraft power systems based on rapidly evolving technology advancements in power electronics, fault-tolerant electrical power distribution systems and electric driven primary flight control actuator systems.

The increase in the power demand of aircraft, especially in the last two decades, coupled with advancement in battery materials and technology has led to the development of many high energy density batteries.

**Keywords:** electric aircraft, generators, power electronics, batteries, braking system.