

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών  
Μηχανικών



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics  
Engineering

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Διαδίκτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in  
Internetworked Electronic Systems

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Πειραματική Μελέτη Ηλεκτρομαγνητικών Παρεμβολών σε μη  
Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Γκερνάνης Θεόδωρος, ΑΜ: 0027

Επιβλέπων: Σαββαΐδης Στυλιανός, Καθηγητής

ΑΙΓΑΛΕΩ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2018

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών  
Μηχανικών



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics  
Engineering

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Διαδικτυωμένα Ηλεκτρονικά Συστήματα

Master of Science in  
Internetworked Electronic Systems

## MSc Thesis

# Experimental Electromagnetic Interference Susceptibility Study for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)



Student: Gernanis Theodore, Registration Number: 0027

MSc Thesis Supervisor: Savvaidis Stylianos, Professor

ATHENS-EGALEO, SEPTEMBER 2018

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) έχει πλέον επεκταθεί σε τέτοιο βαθμό που εύλογα δημιουργείται ένα ενδιαφέρον για τη μελέτη επιμέρους λειτουργικών πτυχών τους όπως αυτό της Ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) Ατρωσίας τους. Η μελέτη των επιπτώσεων από την έκθεση των UAV σε ακτινοβολούμενα ΗΜ σήματα παρεμβολών αποκτά ενδιαφέρον είτε αυτό γίνεται από τη σκοπιά της προστασίας των UAV διότι αποτελούν τμήμα μία ευρύτερης κρίσιμης υποδομής (Critical Infrastructure, CI) είτε αυτό γίνεται από την σκοπιά της εξουδετέρωσής τους με ΗΜ μέσα εφόσον αποτελούν δυνητική απειλή για μία κρίσιμη υποδομή.

Στο προαναφερόμενο πλαίσιο, η προτεινόμενη διπλωματική εργασία σκοπεύει να διεξάγει μία καμπάνια μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) σε περιβάλλον ανηχοϊκού θαλάμου προκειμένου να εντοπιστούν οι επιπτώσεις σε εμπορικά UAV από την έκθεση σε ΗΜ ακτινοβολία καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σύζευξης (coupling path) ανάμεσα στα ακτινοβολούμενα σήματα παρεμβολής και τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα των UAV.

### **ΛΕΞΕΙΣ – ΚΛΕΙΔΙΑ:**

Ανηχοϊκός Θάλαμος, Γεννητρια Παλμών, Ηλεκτρομαγνητική Τρομοκρατία, ΜΕΕΟ, Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα, Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή, Υψηλής-Ισχύος Ηλεκτρομαγνητικά.

## **ABSTRACT**

The use of Unmanned Aerial Vehicles(UAV's) has expanded to such grade that it is reasonable to arise an interest for studying their Electromagnetic Susceptibility. The study of the exposure effects of the UAV to a radiated electromagnetic signal has high interest either having as a target the protection of the UAV's cause they are a part of a wider Critical Infrastructure(CI) or having as a target their neutralization with electromagnetic means if they are a threat.

In the above-mentioned frame, the focus of this thesis is conduct multiple electromagnetic compatibility measurements in anechoic chambers environment in order to detect the consequences to commercial UAV's caused by the exposure to EM radiation and define the characteristics of the coupling path of the radiated signals and the electronic subsystems of the UAV's.

### **KEYWORDS:**

Drone, EM Terrorism, Intentional Electromagnetic Interference, IEMI, Unmanned Aerial Vehicles High-Power Electromagnetics, Anechoic chamber.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή Στυλιανό Σαββαΐδη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθώς και για την δυνατότητα που μου έδωσε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία κάτω από την καθοδήγηση του.

Επιπρόσθετα θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Σταθόπουλο Νικόλαο για την διάθεση που επέδειξε, τον χρόνο που αφιέρωσε και τις γνώσεις που μου μετέδωσε κατά την προσπάθεια μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και κυρίως την οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη τους σε κάθε μου βήμα.

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

CI	:	Critical Infrastructure
EMC	:	ElectroMagnetic Compatbility
EMI	:	ElectroMagnetic Interference
GPS	:	Global Positioning System
HPEM	:	High Power ElectroMagnetics
IEMI	:	Inentional ElectroMagnetic Interference
PRF	:	Pulse repetitive Frequency
RF	:	Radio Frequency
UAV	:	Unmanned Aerial Vehicles
HM	:	Ηλεκτρομαγνητική
MEEO	:	Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα
ΣΗΠ	:	Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή
ΥΤΗΜ	:	Υψηλής Τάσης Ηλεκτρομαγνητικά

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	3
ABSTRACT .....	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ-ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ-ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	9
ΕΙΣΑΓΩΓΗ:.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:.....	12
1.1. Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου .....	12
1.2. Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (Intentional Electromagnetic Interference) .....	13
1.3. Υψηλής-Τάσης Ηλεκτρομαγνητικά - ΥΤΗΜ (High-Power Electromagnetics, HPEM) .....	14
1.4. Τι είναι τα ΜΕΕΟ, πώς επηρεάζουν τη ζωή μας, και πώς επηρεάζονται αυτά από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. ....	16
Στρατιωτικές εφαρμογές UAVs.....	16
Εφαρμογές Τεχνικών Έργων .....	18
ΜΕΕΟ και Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές .....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μεθοδολογία της έρευνας .....	27
1.1. Πειραματική Διάταξη .....	27
1.1.1. Εξοπλισμός .....	27
Drone.....	28
Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Turnigy 9x.....	30
Μονάδα GPS δέκτη.....	32
Ηλεκτρονικοί Ελεγκτές Ταχύτητας .....	32
Τροφοδοσία – Μπαταρία Λιθίου Πολυμερούς.....	34
Γεννήτρια Παλμών.....	34
PRF.....	38
FID FPG 20-1 PM.....	38
Κεραία .....	38
Ανηχοϊκός Θάλαμος.....	39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:.....	41
1.2. Σκοπός και Αντικείμενο των Πειραμάτων .....	41
1.3. Πειράματα και Αποτελέσματα.....	41
Μετρήσεις χωρίς άλλα παθητικά στοιχεία.....	50
Δημιουργία Fault Codes .....	50
Επόμενα πειράματα και αποτελέσματα.....	55
1.4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση .....	57
Γκρίζα Ζώνη.....	58
1.5. Συμπεράσματα – Προτάσεις.....	62
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ .....	64
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι .....	66
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ.....	70
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ.....	77
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙV .....	85



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές[18].....	14
Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό όπλο Stupor[19].....	25
Εικόνα 3: Ηλεκτρομαγνητικό Όπλο Rex-1 Kalashnikov[21].....	26
Εικόνα 4: Τοπολογία του ανηχοϊκού θαλάμου που χρησιμοποιήθηκε.....	27
Εικόνα 5: Σχηματική παράσταση τετρακοπτέρου .....	28
Εικόνα 6: Μονάδα τροφοδοσίας .....	30
Εικόνα 7: Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Turnigy 9x(receiver)[22].....	31
Εικόνα 8: Τηλεχειριστήριο Turnigy 9x(transmitter)[23] .....	31
Εικόνα 9: Δέκτης GPS NEO-6M[24].....	32
Εικόνα 10: Κύκλος Ελεγκτή Ταχύτητας .....	33
Εικόνα 11: Τροφοδοτικό ελεγκτή ταχύτητας Turnigy PLUSH-12A[25] .....	33
Εικόνα 12: Μπαταρία λιθίου[16].....	34
Εικόνα 13: Αισθητήρας Montena SFE-5G[31] .....	34
Εικόνα 14: Montena Ultra Broadband Balun 3.5 GHz (BL3-5G)[26]. .....	35
Εικόνα 15: Optical transmission network (tx/rx units) [27] .....	35
Εικόνα 16: Οπτική ίνα[27].....	36
Εικόνα 17: 30 dB SMA εξασθενητής[28].....	36
Εικόνα 18: Τοπολογία συστήματος μέτρησης .....	36
Εικόνα 19: Παλμογράφος RTO-1044 Rohde & Schwartz[29] .....	37
Εικόνα 20: Γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A[30].....	37
Εικόνα 21: Γεννήτρια Υψηλής Τάσης FID FPD 20-1 PM.....	38
Εικόνα 22: ETS-Lindgren 3106B UWB Antenna[32] .....	39
Εικόνα 23: Κάτοψη ανηχοϊκού θαλάμου .....	40
Εικόνα 24: Εσωτερικό και εξωτερικό ανηχοϊκού θαλάμου .....	40
Εικόνα 25: Τα 4 setup του drone .....	43
Εικόνα 26: Παλμός εξόδου από τον FID στη μέγιστη θέση(MAX).....	44
Εικόνα 27: Παλμός εξόδου από τον FID στη μεσαία θέση(MAX/2).....	44
Εικόνα 28: Παλμός εξόδου από τον FID στη ελάχιστη θέση(MIN).....	45
Εικόνα 29: Mission Planner γράφηματα εντολών Pitch, Roll, Yaw.....	46
Εικόνα 30: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's σε κατάσταση ηρεμίας .....	48
Εικόνα 31: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's σε πατώντας γκάζι(throttle) ..	48

Εικόνα 32: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's μετά την έκθεση σε ακτινοβολία .....	49
Εικόνα 33: Fault Codes .....	50
Εικόνα 34: Παλμός του throttle(γκάζι) σε κατάσταση ηρεμίας .....	54
Εικόνα 35: Παλμός του throttle(γκάζι) με εντολή από το τηλεχειριστήριο .....	54
Εικόνα 36: Παλμός του throttle(γκάζι) μετά την έκθεση σε ακτινοβολία.....	55
Εικόνα 37: Βαθμονόμηση του ποτενσιομέτρου του FID .....	56
Εικόνα 38: Sum of Eincident by Fault Code .....	57
Εικόνα 39: Ζώνη μεικτών αποτελεσμάτων .....	58
Εικόνα 41: Γραφική παράσταση όλων των ιστογραμμάτων .....	61

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ:**

Η χρήση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων (Unmanned Aerial Vehicles, UAV) έχει πλέον επεκταθεί σε τέτοιο βαθμό που εύλογα δημιουργείται ένα ενδιαφέρον για τη μελέτη επιμέρους λειτουργικών πτυχών τους όπως αυτό της Ηλεκτρομαγνητικής (ΗΜ) Ατρωσίας τους. Η μελέτη των επιπτώσεων από την έκθεση των UAV σε ακτινοβολούμενα ΗΜ σήματα παρεμβολών αποκτά ενδιαφέρον είτε αυτό γίνεται από την σκοπιά της προστασίας των UAV διότι αποτελούν τμήμα μιας ευρύτερης κρίσιμης υποδομής (Critical Infrastructure, CI) είτε αυτό γίνεται από την σκοπιά της εξουδετέρωσης τους με ΗΜ μέσα εφόσον αποτελούν δυνητική απειλή για μία κρίσιμη υποδομή.

Στο προαναφερόμενο πλαίσιο, στη διπλωματική εργασία θα διεξαχθεί μία καμπάνια μετρήσεων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας (EMC) σε περιβάλλον ανηχοϊκού θαλάμου προκειμένου να εντοπιστούν οι επιπτώσεις σε εμπορικά UAV από την έκθεση σε ΗΜ ακτινοβολία καθώς και τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της σύζευξης (coupling path) ανάμεσα στα ακτινοβολούμενα σήματα παρεμβολής και στα ηλεκτρονικά υποσυστήματα των UAV.

Στο Κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας περιλαμβάνεται η γενικότερη περιγραφή του αντικειμένου της, αναλύονται επίσης τα ερωτήματα στα οποία επιχειρούνται να δοθούν απαντήσεις, περιγράφεται της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε για τα πειράματα και η γενική δομή και οργάνωση της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 αναφέρονται προηγούμενα σχετικά πειράματα όπως επίσης και τα γενικά αποτελέσματά τους.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύονται η τοπολογία, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα των πειραμάτων που έγιναν στο πλαίσιο της εργασίας, όπως επίσης και αναφορά σχολίων μελλοντικών ενεργειών.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1:

### *1.1. Θεωρητικό πλαίσιο του θέματος – Ανασκόπηση του πεδίου*

Ο πρωτεύων σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να απαντηθούν τα ακόλουθα τρία ερωτήματα:

- Πρώτο ερώτημα είναι το αν είναι εφικτό να προκληθεί παρεμβολή, σύγχυση, καταστροφή σε ένα Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα, ΜΕΕΟ (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)
- Στην περίπτωση που αυτό είναι εφικτό, κάτω από ποιες συνθήκες μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτό
- Αφού είναι εφικτό και έχουμε βρει τις συνθήκες έτσι ώστε να έχουμε επαναληψιμότητα ποιο είναι το κρίσιμο εξάρτημα που επηρεάζουμε στο UAV το οποίο είναι ευπαθές στην έκθεση σε ακτινοβολία

Για να απαντηθούν αυτά τα ερωτήματα αρχικά θα πρέπει να κάνουμε μια επισκόπηση για το τί είναι Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (Intentional Electromagnetic Interference) καθώς και μια επισκόπηση στα Υψηλής-Τάσης Ηλεκτρομαγνητικά (High-Power Electromagnetics, HPM) αλλά και μια αναφορά για το τι είναι τα UAV, πώς επηρεάζουν τη ζωή μας αλλά και το πώς επηρεάζονται αυτά από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Ένα UAV είναι ένα σημαντικό κομμάτι αεροναυτικών συστημάτων που χρησιμοποιείται ευρέως για στρατιωτικές εφαρμογές αλλά για εφαρμογές για τους πολίτες (drone). Ένα UAV πρέπει να συνάδει με τα στάνταρ της ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας και να εγγυάται ότι μπορεί να προσαρμοστεί στο ηλεκτρομαγνητικό περιβάλλον. Στα πειράματα που θα πραγματοποιήσουμε θα δοκιμάσουμε την Ηλεκτρομαγνητική Ατρωσία ενός UAV (drone) χρησιμοποιώντας ως ηλεκτρομαγνητική παρεμβολή (IEMI) έναν HPEMP.

Ο όρος Υψηλής-Ισχύος Ηλεκτρομαγνητικά (High-Power Electromagnetics, HPEM) χρησιμοποιείται για πολλά χρόνια και περιγράφει μία σειρά μεταβαλλόμενων ηλεκτρομαγνητικών περιβαλλόντων, όπου το μέγιστο (peak) του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου μπορεί να γίνει έντονο. Παραδείγματα είναι το πεδίο που μπορεί να δημιουργηθεί από έναν κεραυνό, ο ηλεκτρομαγνητικός παλμός που δημιουργείται μετά από μια πυρηνική έκρηξη κ. ά. Σε αυτή τη κατηγορία έχουν δημιουργηθεί και δύο νέοι όροι: η Ηλεκτρομαγνητική Τρομοκρατία (EM Terrorism) και η Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή, ΣΗΠ (Intentional Electromagnetic Interference, IEMI).

Οι IEMI είναι ένας αυξανόμενος κίνδυνος για ηλεκτρονικά συστήματα, όπως τα UAV, τα οποία χρησιμοποιούνται στην καθημερινή ζωή. Τον Φεβρουάριο του 1999 σε ένα workshop που πραγματοποιήθηκε στο Zurich EMC Symposium η επιστημονική

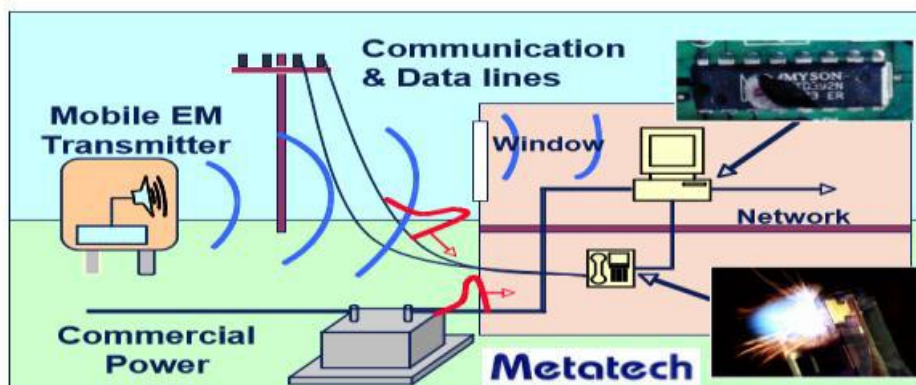
κοινότητα αποφάσισε να ορίσει τα IEMI ως: «Σκόπιμη κακόβουλη παραγωγή ηλεκτρομαγνητικής παρεμβολής χρησιμοποιώντας θόρυβο ή σήματα σε ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα, έχοντας ως αποτέλεσμα την παρεμβολή, τη σύγχυση, ή την καταστροφή αυτών των συστημάτων για τρομοκρατικούς και εγκληματικούς σκοπούς»[1].

Κάνοντας μια ανασκόπηση στο παρελθόν μπορούμε να βρούμε αρκετές περιπτώσεις που προκλήθηκε ζημιά σε στρατιωτικά ηλεκτρονικά συστήματα, σε συστήματα της αυτοκινητοβιομηχανίας και σε ιατρικά συστήματα. Το 1967 το αμερικάνικο πλοίο USS Forrestal ενεπλάκη σε μια από τις χειρότερες περιπτώσεις IEMI που έχουν καταγραφεί. Κατά την προσγείωση ενός μαχητικού, το αεροσκάφος εκτέθηκε στο ραντάρ του πλοίου και έριξε τα πυρομαχικά του σε ένα άλλο οπλισμένο και γεμάτο(fully fueled) το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την έκρηξη και πολλές απώλειες. Προβλήματα με EMI υπήρχαν ακόμα και στα ABS των αυτοκινήτων, όταν πρωτοδημιουργήθηκαν, καθώς στους αυτοκινητόδρομους της Γερμανίας τα αυτοκίνητα φρέναραν όταν περνούσαν μπροστά από κοντινούς πομπούς. Προβλήματα έχουν υπάρξει ακόμα και στην Ιατρική βιομηχανία όπου ένα 93 χρονών θύμα καρδιακής προσβολής απεβίωσε όταν η συνδεδεμένη οθόνη και ο απινιδωτής έσβηναν κάθε φορά που χρησιμοποιούταν ο ραδιοπομπός του ασθενοφόρου.[2]

Πέραν αυτών των αρνητικών επιπτώσεων των IEMI θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά όπως για παράδειγμα από τον στρατό, που ένα HPEM περιβάλλον θα μπορούσε να στοχεύσει ένα εχθρικό σύστημα αποτρέποντας έτσι χάκερς, κακοποιούς και τρομοκράτες.

### ***1.2. Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (Intentional Electromagnetic Interference)***

Σκόπιμη Ηλεκτρομαγνητική Παρεμβολή (ΣΗΠ) (Intentional Electromagnetic Interference - IEMI) είναι η σκόπιμη χρήση διαφόρων ηλεκτρομαγνητικών πηγών για την δημιουργία παρεμβολών (ή μόνιμης βλάβης) σε ένα σύστημα. Πρέπει αρχικά να γίνει αναφορά σε διάφορα συμβάντα, τα οποία είχαν σαν αποτέλεσμα απώλειες ζωών, υλικές, χρηματικές ή και δημοσίων σχέσεων, που οφείλονται σε τυχαίες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές [17] και τα οποία ήταν έξω από τις έως τότε εμπειρίες με τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που επηρέαζαν συστήματα σε περιπτώσεις πυρηνικών εκρήξεων στην ατμόσφαιρα (NEMP) και Υψηλής Ενέργειας Μικροκύματα (High-Power Microwaves - HPM). Μετά από αυτό πολλοί ερευνητικοί οργανισμοί επικεντρώθηκαν στα αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας σε στρατιωτικά συστήματα όπως αεροσκάφη, πλοία και συστήματα επικοινωνιών.



Εικόνα 1: Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές[18]

Ωστόσο από τα τέλη του 1990 ο στόχος των ερευνών έχει κατά κάποιο βαθμό μετατοπιστεί. Αυτή η μετατόπιση στην έρευνα οφείλεται περισσότερο στο πλήθος των ευαίσθητων και εξελιγμένων ηλεκτρονικών συστημάτων τα οποία έχουν εμπορική εφαρμογή σε κρίσιμες πολιτικές υποδομές αλλά και σε συστήματα που περιλαμβάνονται σε αντικείμενα καθημερινής χρήσης τα οποία μέσα από την διαδικασία σμίκρυνσής τους έχουν γίνει πολύ πιο ευαίσθητα σε παρεμβολές.

Οπότε έχει σημασία η έρευνα πάνω στις απειλές που μπορεί να υπάρχουν για διάφορα πολιτικά συστήματα από την ΣΗΠ με συμβατικές μεθόδους Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας υπό το φως της ύπαρξης ανθρώπινης σκοπιμότητας πίσω από τις παρεμβολές αυτές. Η έρευνα των ΣΗΠ περιλαμβάνει ζητήματα όπως:

- Συζεύξεις προστασίας από ηλεκτρομαγνητικά πεδία (είτε άμεσα από ένα μερικώς μονωμένο εξωτερικό είτε διηλεκτρικά) ή σε καλωδιώσεις.
- Επίπεδα ανοσίας και Ατρωσίας των συστημάτων σε διάφορες περιπτώσεις (γιατί χάλασε;)
- Υιοθέτηση υπάρχοντων μεθόδων ηλεκτρομαγνητικής συμβατότητας για την προστασία π.χ. ενάντια σε παρεμβολές υψηλής συχνότητας ή ευρέως φάσματος.
- Ανάλυση του ανάλυση επιπέδου απειλής συστημάτων για τον καθορισμό της αναγκαίας προστασίας (κόστους/ωφέλειας και κρισιμότητας του συστήματος)

### 1.3. Υψηλής-Τάσης Ηλεκτρομαγνητικά - ΥΤΗΜ (*High-Power Electromagnetics, HPEM*)

Οι Υψηλής Τάσης Ηλεκτρομαγνητικοί - ΥΤΗΜ (High power electromagnetic - HPEM) παλμοί είναι μία νέα απειλή που εμφανίστηκε τις τελευταίες δεκαετίες λόγω της ανάπτυξης νέων και βελτιωμένων γεννητριών παλμών (που υπάρχουν διαθέσιμες στο εμπόριο) αλλά και της διαθεσιμότητας εξαρτημάτων τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την συναρμολόγηση ΥΤΗΜ συσκευών και όπλων.

Τα ΥΤΗΜ είναι ένα υψηλής ενέργειας περιβάλλον το οποίο μπορεί να είναι και βασισμένο σε πυκνωτές με επίπεδα τάσης που υπερβαίνουν τα 100 V και ακτινοβολούμενο με επίπεδα που υπερβαίνουν τα 100 V/m (υψηλό συγκρινόμενο με τα συνηθισμένα υψηλά επίπεδα Ηλεκτρομαγνητικής Συμβατότητας τα οποία είναι στο επίπεδο των μερικών δεκάδων V/m).

Το τυπικό ΥΤΗΜ περιβάλλον είναι πολύ ευαίσθητο στην απόσταση μεταξύ της πηγής και του σημείου μέτρησης. Τα ΥΤΗΜ περιβάλλοντα μπορεί να είναι:

- 1) Ακτινοβολούμενα ή μεταδιδόμενα, που σημαίνει ότι μεταδίδονται είτε μέσω αγωγών είτε ακτινοβολούνται.
- 2) Ένας απλός παλμός που αποτελείται από πολλούς κύκλους μίας συχνότητας σε ένα στενής δέσμης έντονο σήμα με ευέλικτη συχνότητα. Αυτό πολλές φορές καλείται υψηλής τάσης μικροκύματα.
- 3) Μία εκτόνωση που περιλαμβάνει πολλούς παλμούς, με κάθε παλμό να περιλαμβάνει πολλούς κύκλους μίας απλής συχνότητας.
- 4) Μια ευρύτατου φάσματος εκτόνωση (συχνότητας από δεκάδες MHz έως αρκετά GHz). Αυτό καλείται πολλές φορές Παλμοί Υψηλής Τάσης.
- 5) Μία δέσμη παλμών ευρύ φάσματος (υψηλής τάσης).

Τα δύο κύρια χαρακτηριστικά συχνότητας που λαμβάνονται υπόψιν στα ΥΤΗΜ είναι τα στενής ζώνης υψηλής ισχύος μικροκύματα (HPM) με μία συχνότητα συνήθως στο εύρος από 1-10GHz και τα ευρυζωνικά (UWB) που έχουν χρόνο ανόδου 0,1ns και πλάτος παλμού περίπου 1ns. Τη στιγμή μια πηγή UWB διαδίδει την ηλεκτρομαγνητική ενέργεια που παράγεται σε ευρύ φάσμα, συγκριτικά με μία στενής ζώνης HPM πηγή η οποία συγκεντρώνει την ενέργεια σε περίπου μια συχνότητα, αυτή η πηγή έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να χρησιμοποιηθεί ως μέσο διαταραχής, καθώς κάθε μέρος της συχνότητας συγκεντρώνει μόνο μικρό μέρος της συνολικής διαθέσιμης ενέργειας, αλλά καλύπτει μεγαλύτερο φάσμα. Με αποτέλεσμα να μην απαιτείται να διοχετεύσεις-κατευθύνεις την πηγή προς το σύστημα θύμα. Οι HPM πηγές χρησιμοποιούνται περισσότερο για σκοπούς καταστροφής τη στιγμή που η ενέργεια τοποθετείται σε μία ζώνη, το οποίο όμως πρέπει να προσαρμοστεί στις ευάλωτες συχνότητες του θύματος(συχνότητα λειτουργίας και/ή συχνότητα συντονισμού).

#### *1.4. Τι είναι τα ΜΕΕΟ, πώς επηρεάζουν τη ζωή μας, και πώς επηρεάζονται αυτά από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.*

**Μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα** (Unmanned Aerial Vehicle - UAV, Unmanned Aerial System - UAS ή Remotely Piloted Aircraft System - RPAS), ονομάζονται τα κάθε είδους ιπτάμενα οχήματα που δεν έχουν χειριστή στην άτρακτό τους, αλλά πραγματοποιούν πτήσεις είτε αυτόνομα είτε μέσω τηλεκατεύθυνσης. Οι προαναφερθείσες ονομασίες αναφέρονται στους ορισμούς που κατά καιρούς έχουν δοθεί για την περιγραφή αυτών των οχημάτων. Ο όρος UAV περιγράφει μόνο το χωρίς χειριστή αεροσκάφος. Ο όρος UAS περιλαμβάνει όλες τις συσκευές, το προσωπικό και τις διαδικασίες οι οποίες χρησιμοποιούνται προκειμένου το μη επανδρωμένο αεροσκάφος να θεωρείται ως ολοκληρωμένο σύστημα. Τέλος, ο όρος RPAS καθιερώθηκε σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και με την ανάγκη όλες οι πτήσεις μη επανδρωμένων αεροσκαφών να έχουν τουλάχιστον έναν επιβλέποντα πιλότο στο έδαφος. Τα μη επανδρωμένα ιπτάμενα οχήματα συνήθως έχουν τη μορφή μικρού αεροπλάνου ή ελικοπτέρου με έναν ή περισσότερους κινητήρες και έλικες συντονισμένους για πλήρως ελεγχόμενη πτήση από ειδικό πρόγραμμα ή χειριστήριο εδάφους [3].

Τα ΜΕΕΟ (UAV) έχουν βρει ένα ευρύτατο πεδίο εφαρμογών στην σύγχρονη ζωή που περιλαμβάνουν στρατιωτικές εφαρμογές, διασκέδαση, επικοινωνία, μεταφορές, έρευνα και διάσωση, παρακολούθηση περιβάλλοντος, παρακολούθηση πανίδας, επιτήρηση φυλασσόμενων περιοχών και πολλά άλλα. Στο πλαίσιο τις εργασίας αυτής γίνεται στην συνέχεια μία αναλυτικότερη αναφορά σε στρατιωτικές εφαρμογές και σε εφαρμογές που αφορούν μεγάλα τεχνικά έργα.

#### **Στρατιωτικές εφαρμογές UAVs**

Με τον όρο «Μη Επανδρωμένα Οχήματα» αναφερόμαστε σε κάθε τύπο οχήματος που κινείται στον αέρα, στην επιφάνεια και υπό τη θάλασσα, χωρίς να είναι επανδρωμένα, αυτόνομα με προγραμματισμό ή τηλεκατευθυνόμενα, όπως τα UAVs και Remotely Piloted Vehicles αντίστοιχα. Τα πλέον γνωστά σε μας «μη επανδρωμένα οχήματα» είναι τα RPVs και τα UAVs ή Drones όπως συνολικά ονομάζονται.

Η ιστορία των προαναφερόμενων συστημάτων ξεκινά πριν περίπου 40 έτη, όταν οι ΗΠΑ προχώρησαν στην εξέλιξη των ιπταμένων στόχων των Targets drones. Κατά τη διάρκεια του πολέμου στο Βιετνάμ οι ΗΠΑ χρησιμοποίησαν επιτυχώς ένα UAV το «Lightning Bug», σε αποστολές τακτικής αναγνώρισης, το οποίο πραγματοποίησε 3.000 εξόδους. Πέραν του πολέμου του Βιετνάμ, RPVs και UAVs χρησιμοποιήθηκαν επιτυχώς κατά τη διάρκεια του πολέμου στην Κοιλιάδα Bekaa του Λιβάνου από το Ισραήλ, όπου αυτά παρείχαν πληροφορίες, έρευνα και αναγνώριση, συνεγείροντας άσκοπα και αποκαλύπτοντας τη διάταξη A/A αμύνης των Σύρων. Επίσης κατά τη διάρκεια του



1<sup>ο</sup> πολέμου στο Iraq (Operation Iraqi Freedom), στη Βοσνία, στο Κόσσοβο, στο Αφγανιστάν και στο 2<sup>ο</sup> πόλεμο στο Iraq.

Η αξία των «μη επανδρωμένων οχημάτων» αναγνωρίστηκε σε στρατηγικό και τακτικό επίπεδο και με τη βοήθεια της τεχνολογίας τόσο στις ΗΠΑ, όσο και στην Ευρώπη προχώρησε η έρευνα και ανάπτυξη τέτοιων οχημάτων, ώστε σήμερα αυτά να καλύπτουν μία τεράστια ποικιλία δυνατοτήτων κινήσεως-πτήσεως και αποστολών.

Οι σημερινές τάσεις οδηγούν, στην ενσωμάτωση των «Μη Επανδρωμένων Οχημάτων», μαζί με επανδρωμένα μέσα και παράλληλα με αυτά, τα οποία ομού θα επιχειρούν σε σαφώς διαχωρισμένες περιοχές, για αποφυγή αμοιβαίων παρεμβολών και απαιτούν πλήρως αξιόπιστα «Μη Επανδρωμένα Οχήματα» για πολεμικές επιχειρήσεις και ειρηνευτικές αποστολές που να καλύπτουν :

- α. Μικρά, μεσαία και μεγάλα ύψη πτήσεως, μακράς, μεσαίας και μικρής ακτίνας δράσεως.
- β. Να μεταφέρουν κατάλληλα όπλα για προσβολές ποικίλης μορφής στόχων.
- γ. Να επιχειρούν σε κατοικημένους τόπους.
- δ. Να εκτελούν πληροφοριακές επιχειρήσεις (Information Ops) ή δικτυοκεντρικές (Net Centrik).
- ε. Να δύνανται να εκτελούν αποστολές συλλογής πληροφοριών, έρευνας, αναγνώρισης, να ενεργούν για εντοπισμό στόχων και εκτίμηση ζημιών, αποστολές SIGINT (Signal Intelligence)-COMINT (Communication Intelligence), ELINT (Electronic Intelligence).

Ήδη η συνεχιζόμενη ανάπτυξη των στρατηγικών και τακτικών, μη επανδρωμένων οχημάτων, ακολουθεί την τάση δημιουργίας οχημάτων πολλαπλών ρόλων και αποστολών. Έτσι θα δούμε στο μέλλον Στρατηγικά UAVs, μεγαλύτερου μεγέθους, μεγαλύτερης εμβέλειας, αξιόπιστα και με μεγαλύτερες δυνατότητες μεταφοράς φορτίου, ενώ παράλληλα, η ανάπτυξη μικρό και mini UAVs θα δώσει μικρότερα σε μέγεθος οχήματα, φθηνότερα και υψηλών δυνατοτήτων.

Πλέον των επιχειρησιακών ή πολεμικών UAVs, οι απαιτήσεις έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη UAVs, ή μη επανδρωμένων οχημάτων για :

- α. Εφαρμογές του πολιτικού ή εμπορικού τομέα (π.χ. έλεγχος πυρκαγιών).
- β. Εφαρμογές αστυνόμευσης και ενίσχυσης του νόμου.
- γ. Επιχειρήσεις ασφαλείας και κατά της τρομοκρατίας.
- δ. Ασφάλεια του θαλασσίου περιβάλλοντος.
- ε. Επιχειρήσεις Έρευνας και Διάσωσης.

Είναι γεγονός ότι ενώ αναφερόμαστε εξ αρχής στα «Μη Επανδρωμένα Οχήματα», εν συνεχεία, αναφέρονται τα Drones. Τούτο έγινε διότι ο τομέας αυτός παρουσιάζει τη μεγαλύτερη, αλματώδη μπορούμε να πούμε ανάπτυξη, με θεαματικά αποτελέσματα, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι για εφαρμογές ξηράς ή θαλάσσης δεν έχουν αρχίσει έρευνες

ή και ανάπτυξη πρωτοτύπων, που ακόμη βρίσκονται στο στάδιο των δοκιμών. Επί παραδείγματι μπορούμε να αναφέρουμε, σύστημα διάνοιξης διαδρόμων σε ναρκοπέδιο ή στρώσης ναρκοπεδίου, συστήματος αυτοπροστασίας T/Θ, εγκαταστάσεων ή μη επανδρωμένα υποβρύχια UUV ικανά για ένα ευρύ πεδίο αποστολών παράλιων επιχειρήσεων.

Τα συστήματα αυτά στο μέλλον και με τη συνεχιζόμενη ανάπτυξή τους, θα επιφέρουν σημαντικές αλλαγές στη δομή, οργάνωση, σύνθεση των Ενόπλων Δυνάμεων και των Δυνάμεων Ασφαλείας, στη σχεδίαση και εκτέλεση επιχειρήσεων, θα έχουν επιπτώσεις στα οικονομικά μεγέθη, και θα προσφέρουν οικονομία στο ανθρώπινο δυναμικό, ενώ είναι σίγουρο ότι θα δύνανται να δράσουν σε περιβάλλον που είναι απαγορευτικό για τον άνθρωπο.

Τίθεται λοιπόν εύλογα το ερώτημα:

- Υπάρχει τρόπος αντιμετώπισης των Μη Επανδρωμένων Οχημάτων π.χ. UAVs,

Η απάντηση εκ μέρους μας είναι ΝΑΙ γιατί κατά τη φιλοσοφική σκέψη «Η δράση δημιουργεί αντίδραση» [4].

### **Εφαρμογές Τεχνικών Έργων**

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορες εφαρμογές, αλλά δεν είναι τόσο διαδεδομένη η χρήση τους στον κλάδο των τεχνικών έργων, ενώ θα μπορούσαν να βελτιώσουν τη διαδικασία κατασκευής σε διάφορα επίπεδα.

Τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα, ευρύτερα γνωστά ως “drones” είναι συστήματα, που μπορούν να πετάξουν με απομακρυσμένο ελεγχόμενο χειρισμό ή ακόμα και αυτόνομα. Είναι μια πτητική μηχανή που μπορεί να φέρει συσκευή – αισθητήρα για την απόκτηση πρωτογενών δεδομένων καθιστώντας τα ιδανικά για τη διαχείριση των τεχνικών έργων. Μία από τις πιο σημαντικές εφαρμογές των οχημάτων αυτών είναι η διεξαγωγή οπτικών επιθεωρήσεων τεχνικών έργων, καθώς και η παροχή δεδομένων για παραγωγή χαρτογραφικών δεδομένων μεγάλης έκτασης σε σύντομο χρόνο. Σε έρευνα [5] πραγματοποιήθηκε συλλογή δεδομένων με τη βοήθεια οχήματος drone σε εργοτάξια που κατασκευάζουν μεγάλα έργα, όπως αυτοκινητόδρομους (Ιόνια & Ολύμπια Οδό), και συλλογή δεδομένων από αποθεσιοθαλάμους αδρανών υλικών με σκοπό την έρευνα εφαρμογών των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων από εταιρίες διαχείρισης έργων.

Ακολούθησε αναλυτική παρουσίαση των καινοτόμων εφαρμογών, ώστε να γίνει αντιληπτό σε τι βαθμό τα μη επανδρωμένα εναέρια οχήματα συμβάλουν στη διαχείριση των τεχνικών έργων. Εφαρμογές, όπως: η παρακολούθηση προόδου έργου, οι αποτυπώσεις υψηλής ακρίβειας (2D/3D), ο υπολογισμός όγκων, οι επιθεωρήσεις τεχνικών έργων όπως κτίρια, γέφυρες, δίκτυα υψηλής τάσης, σιδηροδρομικές μεταφορές, ενεργειακών εγκαταστάσεων, αλλά και η συμβολή στην

ασφάλεια των έργων είναι κάποιες εφαρμογές των οχημάτων στην διαχείριση των τεχνικών έργων.

Συμπεραίνεται ότι παράγοντες όπως: η αύξηση της παραγωγικότητας, η ταχύτητα παράδοσης, η μείωση του κόστους, αλλά και η ασφάλεια του προσωπικού, που ανακύπτουν στην διαχείριση τεχνικών έργων, μπορούν να αντιμετωπιστούν με την αξιοποίηση των μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων.

Τα ΜΕΕΟ Οχήματα αναφέρονται ποικιλοτρόπως ως: Οχήματα ελεγχόμενα από απόσταση (RPV – Remotely Piloted Vehicle), Αεροπλάνα ελεγχόμενα από απόσταση (ROA – Remotely Operated Aircraft), Αεροπλάνα χειριζόμενα από απόσταση (RPA – Remotely Piloted Aircraft) ή μη Επανδρωμένα Εναέρια Οχήματα (UAV – Unmanned Vehicle Systems), αλλά είναι ευρύτερα γνωστά ως Drones [6].

Τα οχήματα αυτά ελέγχονται από απόσταση, είναι ημιαυτόνομα, αυτόνομα ή συνδυασμός των δύο προηγούμενων τεχνικών. Αν συγκρίνουμε ένα μη επανδρωμένο εναέριο όχημα π.χ. ένα Drone με ένα αεροπλάνο που το χειρίζεται πιλότος, είναι ξεκάθαρο ότι η κύρια διαφορά που χαρακτηρίζει τα δύο αυτά συστήματα είναι η παρουσία του πιλότου, ο οποίος είναι και ο χειριστής του αεροπλάνου. Αυτό βέβαια δεν πρέπει να συγχέεται με την άποψη ότι ένα ΜΕΕΟ πετά μόνο του με αυτοματοποιημένο τρόπο. Σε πολλές περιπτώσεις πρέπει να τονιστεί ότι οι τεχνικοί που είναι υπεύθυνοι για ένα ΜΕΕΟ το οποίο επιθεωρεί ένα τεχνικό έργο, μπορεί να είναι περισσότεροι από το πλήρωμα ενός συμβατικού αεροσκάφους [9].

Στην έρευνα μελετήθηκαν οι μέθοδοι, η υλικοτεχνική υποδομή και οι τεχνικές, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στα τεχνικά έργα. Με πραγματικά δεδομένα από εργοτάξια που σήμερα κατασκευάζουν μεγάλα έργα, κυρίως σε αυτοκινητόδρομους (Ιόνια και Ολύμπια οδό) και με δεδομένα που δημιουργήθηκαν εξ' αρχής για το σκοπό της μελέτης σε αποθεσιοθαλάμους αδρανών υλικών με την βοήθεια drone καθώς και με δεδομένα και εφαρμογές που αναζητήθηκαν από εταιρίες διαχείρισης έργων του εξωτερικού, έγινε αναλυτική μελέτη των καινοτόμων εφαρμογών που παρέχουν ΜΕΕΟ, ώστε να γίνει κατανοητή η συμβολή τους στη διαχείριση των τεχνικών έργων.

Οι μηχανικοί αξιοποιούν τα ΜΕΕΟ σε μια ευρεία απόψεις από ένα αίθριο χώρο ή άλλες περιοχές της ποικιλία εφαρμογών για την διαχείριση των τεχνικών υποδομής που δεν είναι εφικτό να παρθούν με έργων. Η ευελιξία των εναέριων οχημάτων στη διαχείριση των τεχνικών έργων οφείλεται κυρίως στην πρακτική ικανότητα που έχουν να αποτυπώνουν ένα τεχνικό έργο από απόσταση και μάλιστα από σχετικά μικρό ύψος από το έδαφος σε σχέση με άλλα εναέρια μέσα. Ενώ ουσιαστικά τα οχήματα δεν μπορούν να αντικαταστήσουν τον μηχανικό για κάθε εργασία που αφορά το τεχνικό έργο, μπορούν και παρέχουν ένα ευρύ φάσμα συμπληρωματικών δεδομένων για ποικίλες εργασίες που γίνονται σε αυτό. Στην ουσία, τα ΜΕΕΟ αποτελούν ένα εργαλείο που βοηθά στην εξοικονόμηση χρόνου στις εργασίες του μηχανικού ή επιτρέπουν κάποιες επικίνδυνες, για την σωματική ακεραιότητα του προσωπικού, εργασίες να εκτελούνται από θέσεις που απέχουν από το επικίνδυνο σημείο. Η πιο κοινή αξιοποίηση

των ΜΕΕΟ στη διαχείριση τεχνικών έργων συμπεραίνεται ότι είναι οι αεροφωτογραφίες [8]. Αυτό γίνεται συνήθως για να διαπιστωθεί η πρόοδος που έχει συντελεστεί στο τεχνικό έργο. Ενώ δεν προβλέπεται επί της ουσίας κάποιο πρωτόκολλο υποχρεωτικής παρακολούθησης της προόδου ενός τεχνικού έργου, ενδεχομένως απαιτήσεις από την σύμβαση κατασκευής του, να επιβάλλουν την περιοδική λήψη φωτογραφιών. Οι φωτογραφίες αυτές συχνά αποκτώνται σε τακτά χρονικά διαστήματα δημιουργώντας μια βάση δεδομένων με τα καινοτόμα λογισμικά παρακολούθησης προόδου έργου που έχουν αναπτυχθεί. Τα ΜΕΕΟ μπορούν να παρέχουν μία συνολική καταγραφή της εξέλιξης του τεχνικού έργου με σημαντικά χαμηλό κόστος έναντι των συμβατικών εναλλακτικών λύσεων που περιλαμβάνουν την χρήση αεροσκαφών ή ελικοπτέρων. μιας περιοχής μελέτης.

Τα ΜΕΕΟ προσφέρουν επίσης το πλεονέκτημα ότι είναι σε θέση να καταγράψουν μια συγκεκριμένη εργασία κατά τη φάση της κατασκευής σε σύντομο χρονικό διάστημα, κάτι που ένα συμβατικό αεροπλάνο/ελικόπτερο δεν θα μπορούσε να την αποτυπώσει χωρίς προηγούμενο σχεδιασμό. Ορισμένοι μηχανικοί στα πλαίσια της προώθησης ενός τεχνικού έργου συχνά ψάχνουν για ένα μοναδικό τρόπο να παρουσιάσουν ένα έργο σε πιθανούς αγοραστές, μισθωτές ή στο κοινό. Τα ΜΕΕΟ μπορεί να πετάξουν πάνω από ένα έργο και να παρέχουν μια μοναδική προοπτική απεικόνισης του. Επιπλέον, μέσα σε μια εγκατάσταση μπορούν να παρέχουν φωτογραφικές απόψεις από ένα αίθριο χώρο ή άλλες περιοχές της υποδομής που δεν είναι εφικτό να παρθούν με τυποποιημένες τεχνικές επίγειας φωτογράφισης ή βίντεοσκόπησης.

Τα ΜΕΕΟ, επομένως, μπορούν να διαφοροποιήσουν τις απόψεις επίδοξων αγοραστών, επενδυτών ή του κοινού για ένα έργο ύστερα από μια προοπτική προβολή του και να αυξήσουν το κύρος και την αξιοπιστία των κατασκευαστικών εταιρειών. Επιτόπιες επισκέψεις σε μια προτεινόμενη περιοχή ενός έργου αποτελούν βασικό στοιχείο που βοηθά στην εκτίμηση του κόστους του έργου. Οι επιτόπιες αυτές επισκέψεις είναι χρονοβόρες για τους μηχανικούς, που έχουν ως σκοπό την εκτίμηση του κόστους των τεχνικών έργων. Εμπόδια κατά τη διαδρομή, όπως φράχτες και τάφροι, δύσβατες περιοχές μπορεί να αποτρέψουν τα οχήματα των μηχανικών να οδεύσουν σε όλα τα τμήματα μιας περιοχής μελέτης, έτσι απαιτούν πολύωρες περιπατητικές διαδρομές από το συνεργείο των μηχανικών. Τα ΜΕΕΟ μπορούν να πετάξουν προφανώς πολύ πιο γρήγορα από ό,τι το συνεργείο των μηχανικών αποκτώντας σε σύντομο χρονικό διάστημα αεροφωτογραφίες και βίντεο καλύπτοντας το σύνολο της περιοχής μελέτης ή ενός τεχνικού έργου π.χ. μίας γέφυρας. Αυτά τα εναέρια οχήματα έχουν το πλεονέκτημα να πετούν κοντά στο έδαφος και να επιθεωρούν το χώρο της κατασκευής του έργου, για οποιαδήποτε πιθανά ζητήματα που επηρεάζουν την πρόοδο της κατασκευής όπως π.χ. η πυκνότητα της βλάστησης. Υπάρχουν βέβαια και περιπτώσεις, που χρειάζεται να γίνει εκτίμηση της επισκευής σε μια στέγη κτηρίου. Κάποια είδη στεγών όπως π.χ. στέγες σχιστόλιθου είναι ευαίσθητες σε πιέσεις και θρυμματίζονται εύκολα, επομένως δεν είναι εύκολο να προσεγγιστούν

από συνεργεία επισκευής. Στέγες, επίσης, με απότομες κλίσεις δεν θεωρούνται ασφαλείς για επιθεώρηση από συνεργεία μηχανικών. Σε άλλες περιπτώσεις, η πρόσβαση σε ένα ορισμένο τμήμα της στέγης μπορεί να είναι προβληματική και χρονοβόρα και να απαιτεί ειδικό εξοπλισμό (π.χ. μηχανική σκάλα). Επομένως, οι μηχανικοί μπορούν να χρησιμοποιήσουν ένα MEEO με όφελος την ασφάλεια και την εξοικονόμηση χρόνου στην εργασία της επιθεώρησης τέτοιων έργων.

Τα MEEO μπορούν να βοηθήσουν σε ορισμένες κατασκευαστικές εργασίες στο εργοτάξιο [6]. Τα εναέρια οχήματα δεν περιορίζεται μόνο στην επιθεώρηση εκτενών εργασιών από απόσταση στο εργοτάξιο. Η χρήση τους σε συνδυασμό με φωτογραμμετρικούς μεθόδους μπορεί να βοηθήσει τους μηχανικούς να παράγουν ψηφιακά μοντέλα εδάφους, κτηματολογικά διαγράμματα, αποτυπώσεις, ογκομετρήσεις αδρανών υλικών και εμβαδομετρήσεις μεγάλων εκτάσεων. Σε περιπτώσεις φυσικών καταστροφών όπως π.χ. το ξέσπασμα μιας πυρκαγιάς στο εργοτάξιο ένα MEEO θα ήταν σε θέση να εκτιμήσει με ακρίβεια τη ζημιά της πυρκαγιάς και ο μηχανικός να επεξεργαστεί την πληροφορία που θα συλλέξει το εναέριο όχημα, ώστε να εκτιμήσει την ζημιά που έχει προκληθεί γρήγορα και με ασφάλεια. Τα MEEO μπορούν να εξοπλιστούν με θερμικές κάμερες και να καταγράψουν τη ροή της θερμότητας και με αυτόν τον τρόπο να επιλυθούν ζητήματα που σχετίζονται με μονώσεις οροφής ή σωληνώσεων σε τεχνικές κατασκευές [9]. Οι θερμικές κάμερες καταγράφουν τις διάφορες θερμοκρασίες των αντικειμένων. Έτσι μια ζημιά στη μόνωση σε ένα κτήριο θα εμφανίζεται ως ένα «hot spot» λόγω της αυξημένης θερμοκρασίας. Αντικείμενα, όπως οι τοίχοι είναι συνήθως εύκολο να επιθεωρηθούν από έναν μηχανικό που βρίσκεται στο έδαφος κάνοντας χρήση ενός MEEO. Τέτοια οχήματα εξοπλισμένα με θερμικές κάμερες μπορούν να παρέχει άμεσα επόπτευση της στέγης. Η χρήση θερμικών καμερών μπορεί να βοηθήσει στο εντοπισμό διαρροών νερού σε τεχνικές υποδομές.

Συχνά σε πολλά εργοτάξια τεχνικών έργων προκύπτουν θέματα ασφαλείας. Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους ορισμένων τεχνικών έργων, τα εργοτάξια είναι ιδιαίτερα δύσκολο να φρουρούνται επαρκώς κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι άνθρωποι και τα οχήματα εκπέμπουν «υπογραφές θερμότητας» σε σύγκριση με το περιβάλλον τους.

Ένα MEEO εξοπλισμένο με μία θερμική κάμερα νυκτός μπορεί να βοηθήσει στο εντοπισμό πιθανόν δολιοφθορών ή και κλοπών εντός του εργοταξίου. Κατά τη διάρκεια της νύχτας, η φρουρά ασφαλείας του εργοταξίου μπορεί με τη βοήθεια ενός MEEO να εντοπίσει αυτές τις κακόβουλες ενέργειες καταγράφοντας την υπογραφή θερμότητας από ένα πρόσφατα σταθμευμένο όχημα έξω από το φράχτη ασφαλείας ή από έναν εισβολέα μέσα στον εργοταξιακό χώρο, το εναέριο όχημα βοηθά άμεσα τη δύναμη ασφαλείας του έργου να αποτρέψει τέτοιου είδους πιθανά προβλήματα.

Η Επισκόπηση ενός τεχνικού έργου από τον αέρα μπορεί να βοηθήσει τους μηχανικούς να εντοπίσουν εύκολα περιορισμούς της παραγωγικότητας που διαφορετικά δεν θα είναι εύκολα αντιληπτοί από το έδαφος. Εναέρια επιθεώρηση του εξοπλισμού, των υλικών και της ροής των μηχανημάτων μπορούν να συμβάλουν στην ορθή διαχείριση

του έργου και στην βελτίωση της παραγωγικότητας. Η επιθεώρηση του προσωπικού και των εργασιών που γίνονται από το έδαφος μπορεί να οδηγήσει σε εκνευρισμό, άγχος και λάθη κατά τη φάση της κατασκευής.

Η προοπτική χρήσης ενός ΜΕΕΟ με κάμερα και με τηλεσκοπικές (ζουμ) δυνατότητες μπορεί να βοηθήσει στην εξάλειψη ψυχοσωματικών ζητημάτων. Μπορεί όμως να προκύψουν τέτοια ζητήματα και από τη χρήση των εναέριων οχημάτων. Ωστόσο, θα πρέπει να εξηγηθεί στο προσωπικό του έργου ότι ο στόχος είναι η βελτίωση της διαχείρισης του έργου. Δεν προκύπτει υπαιτιότητα των εργαζομένων εάν, για παράδειγμα, στη περιοχή κατασκευής του έργου παρουσιάζονται γεωτεχνικά προβλήματα, που παρεμποδίζουν την παραγωγικότητα.

Σε εργοτάξια τεχνικών έργων προκύπτουν ορισμένες κατασκευαστικές απαιτήσεις, συμπεριλαμβανομένων εκείνων που προκύπτουν από τα θέματα καθυστέρησης λόγω κακών καιρικών συνθηκών, εργασιακών παρεμβολών καθώς και περιορισμών και τεχνικών προβλημάτων που ανακύπτουν στην περιοχή εκτέλεσης του έργου. Αεροφωτογραφίες που λαμβάνονται κατά τη φάση κατασκευής των τεχνικών έργων μπορούν να τεκμηριώσουν τα αίτια καθυστέρησης και να στηρίξουν ή να αντικρούσουν αξιώσεις περαιτέρω χρηματοδότησης του έργου. Οι αεροφωτογραφίες μπορεί συχνά να απεικονίζουν αυτά τα ζητήματα με ενισχυμένη ευκρίνεια σε σύγκριση με επίγειες φωτογραφίες. Η αεροφωτογραφία από ΜΕΕΟ είναι άμεσα διαθέσιμη στο μηχανικό, ο οποίος δεν μπορεί να βασιστεί στην παροχή πληροφορίας από συμβατικό αεροπλάνο ή ελικόπτερο και που μπορεί να περάσουν μέρες ή και εβδομάδες μέχρι αποκτηθεί. Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος των καθυστέρησης του τεχνικού έργου, το κόστος εργασιών με τη χρήση ΜΕΕΟ παρέχει ένα σημαντικό όφελος στην απόδειξη μιας ενδεχόμενης απαίτησης του έργου.

Η μοντελοποίηση κτηριακών πληροφοριών αποτελεί πλέον τμήμα της κατασκευαστικής βιομηχανίας και θεωρείται πολύ χρήσιμη τεχνολογία σε όλες τις φάσεις ενός κατασκευαστικού έργου. Εμφανίζει την ικανότητα να δίνει καθαρές και δυναμικές τρισδιάστατες οπτικοποιήσεις και απεικονίσεις της προόδου των εργασιών της κατασκευής. Η τεχνική αυτή παίζει σημαντικό ρόλο στην αποφυγή καθυστέρησης και στην διαχείριση του έργου. Η χρήση ΜΕΕΟ σε συνδυασμό με την μοντελοποίηση κτηριακών πληροφοριών θεωρείται ως μια εναλλακτική διαδικασία που επιτρέπει την αποτελεσματική απόκτηση δεδομένων ακριβείας, που συμβάλλουν στην ορθή απεικόνιση της προόδου των εργασιών κατά τη διάρκεια της φάσης της κατασκευής του έργου [10]. Επομένως, βελτιώνεται η διαχείριση του έργου, αποκτάται ένα μεγάλο πλήθος δεδομένων που αφορούν την κατασκευή και αποθηκεύεται αρχειακό υλικό, που συνοδεύει την κατασκευή και χρησιμοποιείται σε οποιαδήποτε φάση της κατασκευής, ώστε να διορθώσει λάθη και να προλάβει καθυστερήσεις. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται πλέον και την ευρεία χρήση έξυπνων κινητών συσκευών με σκοπό να διεξάγει μια μοντέρνα και πιο αποτελεσματική διαχείριση των έργων υποδομής

Τα ΜΕΕΟ αποτελούν ένα εναλλακτικό χρήσιμο εργαλείο για την διαχείριση των τεχνικών έργων με εφαρμογές όπως οπτικές επιθεωρήσεις σε δύσβατα τμήματα του τεχνικού έργου με στόχο την αύξηση της ασφάλειας των μηχανικών και των εργατών και μείωση του κόστους των εργασιών, θερμογραφικούς ελέγχους σε τεχνικές κατασκευές για οπτικοποίηση βλαβών, έλεγχος των μονώσεων κτηρίων, επιθεωρήσεις ρωγμών στις κατασκευές, επιθεωρήσεις σε δίκτυα κοινής ωφέλειας, φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα, τεχνικούς ελέγχους και επιμετρήσεις σε μεγάλα τεχνικά έργα, συγκέντρωση δεδομένων για μοντελοποίηση κτηριακών πληροφοριών και δεδομένων για τη κατασκευή ψηφιακών μοντέλων εδάφους. Η περαιτέρω χρήση των ΜΕΕΟ θα είναι προς όφελος των αναδόχων μηχανικών, του εργατικού δυναμικού των έργων, και των δημοσίων υπηρεσιών. Ο ανάδοχος θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει ένα ΜΕΕΟ εξοπλισμένο με μια φωτογραφική μηχανή υπέρυθρης ακτινοβολίας για να παρακολουθεί το αποτύπωμα θερμότητας μιας κατασκευής. Ένα όχημα με μια κανονική φωτογραφική μηχανή θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί από τον ανάδοχο για την διαχείριση του έργου στο εργοτάξιο. Δημοτικοί υπάλληλοι θα μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν ΜΕΕΟ για να ελέγξουν τα εργοτάξια προκειμένου να απαντήσουν σε τυχόν καταγγελίες που τους γίνονται από δημότες αλλά και να ελέγξουν τον εμβαδόν που καταλαμβάνεται στους κοινόχρηστους χώρους. Αυτή η πρακτική μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για έργα που έχουν ήδη ολοκληρωθεί, ώστε να ελεγχθεί κατά πόσον έχουν εφαρμοστεί οι προδιαγραφές του έργου. Ειδικόι μηχανικοί/σύμβουλοι, χειριστές των οχημάτων θα μπορούσαν να διενεργούν επιθεωρήσεις, όταν ο ανάδοχος δεν αισθάνεται ότι η εμπειρογνομosύνη του είναι επαρκής για μια συγκεκριμένη περίπτωση. Ο σύμβουλος/μηχανικός προσφέρει τη γνώμη ενός εξωτερικού εμπειρογνώμονα. Οι έλεγχοι που πραγματοποιεί ένας εμπειρογνώμονας θα μπορούσαν να γίνουν με τη χρήση ενός ΜΕΕΟ.

### **ΜΕΕΟ και Ηλεκτρομαγνητικές Παρεμβολές**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, τα ΜΕΕΟ βρίσκουν πολλές και διάφορες εφαρμογές στην σύγχρονη ζωή. Κάθε περιοχή εφαρμογής περιλαμβάνει και διάφορες απειλές για την σωστή λειτουργία τους. Παρ' όλα αυτά όλες οι περιοχές έχουν μία κοινή απειλή η οποία καλείται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και η οποία αποτελεί πρόβλημα όλων των κατασκευαστών ΜΕΕΟ.

Τα ΜΕΕΟ χρησιμοποιούν διάφορα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου, από τα οποία το πιο σημαντικό είναι ο ελεγκτής πτήσης. Ο ελεγκτής πτήσης ενσωματώνει συχνά ηλεκτρονικές υποομάδες που εκτελούν διάφορες λειτουργίες. Αυτά είναι όργανα καθορισμού πορείας, προσανατολισμού, γυροσκόπια, επιταχυνσιόμετρα, βαρόμετρα, μαγνητόμετρα, κάμερες, μικρόφωνα κλπ. Η συνύπαρξη τόσων πολλών και διαφορετικών ηλεκτρονικών συστημάτων σε πολύ περιορισμένο χώρο, όπως επίσης και η ανάγκη συνεχούς και αδιάλειπτης επικοινωνίας με τον χειριστή, καθιστούν τα ΜΕΕΟ ευάλωτα σε ηθελημένες ή τυχαίες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.

Για την μελέτη της ασφάλειας και αξιοπιστίας των MEEO σε διάφορα ηλεκτρομαγνητικά περιβάλλοντα αναπτύχθηκε σε εργαστήριο ένα σύστημα συνεχούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Με την χρήση του συστήματος αυτού έγιναν διάφορα πειράματα για τον έλεγχο της επίδρασης της ακτινοβολίας πάνω στην σύνδεση ανταλλαγής δεδομένων των MEEO. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι η σύνδεση ανταλλαγής δεδομένων των MEEO επηρεάζεται από τις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές και σε ορισμένες συχνότητες δεν μπορεί να λειτουργήσει. Η σύνδεση ανταλλαγής δεδομένων των MEEO μεταπίπτει σε κατάσταση απώλειας, που σημαίνει ότι η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ του MEEO και του εξοπλισμού του χειριστή του δεν είναι εφικτή. Επιπλέον, διαφορετικές τιμές πόλωσης του ακτινοβολούμενου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου οδηγεί σε διαφορετικές τιμές του επιπέδου του ηλεκτρικού πεδίου για το οποίο υπάρχει απώλεια σύνδεσης ανταλλαγής δεδομένων. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραμάτων έδειξε ότι το κανάλι της ενεργειακής ζεύξης ανάμεσα στα συστήματα ανταλλαγής δεδομένων του MEEO και της συνεχούς ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αποτελεί επίσης μία «κερκόπορτα» της ασφάλειας της σύζευξης [11].

Τα MEEO χρειάζεται να λειτουργούν σε ανοικτές περιοχές στις οποίες μπορεί να βρίσκονται και άλλες συσκευές οι οποίες μπορεί να δημιουργήσουν ενοχλητικά ηλεκτρομαγνητικά σήματα. Με τον τρόπο αυτό δημιουργούνται ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές που μπορούν να επηρεάσουν όχι μόνο τα συστήματα επικοινωνιών και ανταλλαγής δεδομένων αλλά και τα εσωτερικά ηλεκτρονικά συστήματα του MEEO. Όλες οι περιπτώσεις μπορούν να προκαλέσουν την πτώση του οχήματος. Σε σχέση με αυτές τις απειλές, ένα όχημα δοκιμάστηκε σε εργαστηριακές συνθήκες για να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητά του. Το πείραμα έγινε σε εργαστήριο του Πανεπιστημίου Tomas Bata στο Zlín. Το εργαστήριο περιλάμβανε ανηχοϊκό θάλαμο με ειδικές κεραίες που μπορούν να δημιουργήσουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Χρησιμοποιήθηκε ακτινοβολία που προσομοίαζε τα χαρακτηριστικά άλλων πιθανών πηγών ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών. Οι μετρήσεις έγιναν για αποστάσεις από ένα έως τρία μέτρα για διάφορες περιπτώσεις που μπορεί να παρουσιαστούν στην πραγματικότητα και σκοπό είχαν τον καθορισμό των επιπέδων ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας [12].

Έχουν γίνει επίσης δοκιμές ηλεκτρομαγνητικής ευαισθησίας MEEO με την χρήση συνεχούς ακτινοβολίας. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ακόμη και όταν το ακτινοβολούμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι μικρότερο από 1V/m, η σύνδεση ανταλλαγής δεδομένων των MEEO επηρεάζεται όταν η συχνότητα της συνεχούς ακτινοβολίας είναι ίδια ή πολύ κοντά στην συχνότητα της επικοινωνιακής σύνδεσης. Ορισμένες συχνότητες ευαισθησίας, όπως 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 της λειτουργικής συχνότητας, που οδηγούν σε διακοπή της επικοινωνιακής σύνδεσης δημιουργούνται λόγω αρμονικών που παράγονται από μη γραμμικές μονάδες π.χ. ενισχυτής, του συστήματος παραγωγής συνεχούς κύματος ακτινοβολίας [13].



Όπως γίνεται εμφανές από τα προηγούμενα πειράματα και έρευνες, η ευαισθησία των ΜΕΕΟ στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές είναι δεδομένη και ταυτόχρονα αρκετά μεγάλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία, για στρατιωτικές εφαρμογές, όπλων για την κατάρριψη τους. Το πρόπλασμα ενός νέου ηλεκτρομαγνητικού όπλου παρουσιάστηκε στο Διεθνές Στρατιωτικό και Τεχνικό Φόρουμ Army 2017 που διεξάγεται στα περίχωρα της Μόσχας. Σύμφωνα με τους σχεδιαστές του, το “Stupor” μπορεί να “παραλύει” κάθε drone σε οπτική επαφή, εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητικούς παλμούς που παρεμβαίνουν στις συχνότητες μέσω των οποίων παίρνουν εντολές από τον χειριστή τους με αποτέλεσμα την απώλεια ελέγχου και την συντριβή τους.



Εικόνα 2: Ηλεκτρομαγνητικό όπλο Stupor[19]

Όπως ανέφερε ο εκπρόσωπος του Κέντρου Έρευνας και Δοκιμών Ρομποτικής του ρωσικού υπουργείου Άμυνας, το νέο όπλο δεν μπλοκάρει μόνο τα κανάλια ναυτιλίας και μετάδοσης εντολών των μη επανδρωμένων αεροχημάτων (UAV) αλλά και τις φωτογραφικές κάμερες/βίντεο που λειτουργούν εντός του ηλεκτρο-οπτικού φάσματος συχνοτήτων που επηρεάζει το “Stupor”. Η εμβέλεια του όπλου φθάνει τα 2 χλμ ενώ καλύπτει μια ακτίνα 20 μοιρών, **ωστόσο δεν θα πρέπει να “στοχεύει” ανθρώπους ή ζώα, επανδρωμένα αεροσκάφη και οχήματα.**

Η ρωσική εταιρία κατασκευής όπλων Kalashnikov παρουσίασε επίσης το anti-drone όπλο REX-1 στην έκθεση International Military-Technical Forum ‘Army 2017’.



**Εικόνα 3: Ηλεκτρομαγνητικό Όπλο Rex-1 Kalashnikov[21]**

Το Rex-1 είναι μια μη θανατηφόρος συσκευή που λειτουργεί αποσπώντας τη σύνδεση μεταξύ ενός τετρακόπτερου και του ελεγκτή του, καθώς και μπλοκαρίσματος δορυφορικών συστημάτων εντοπισμού θέσης, σημάτων GSM και Wi-Fi.

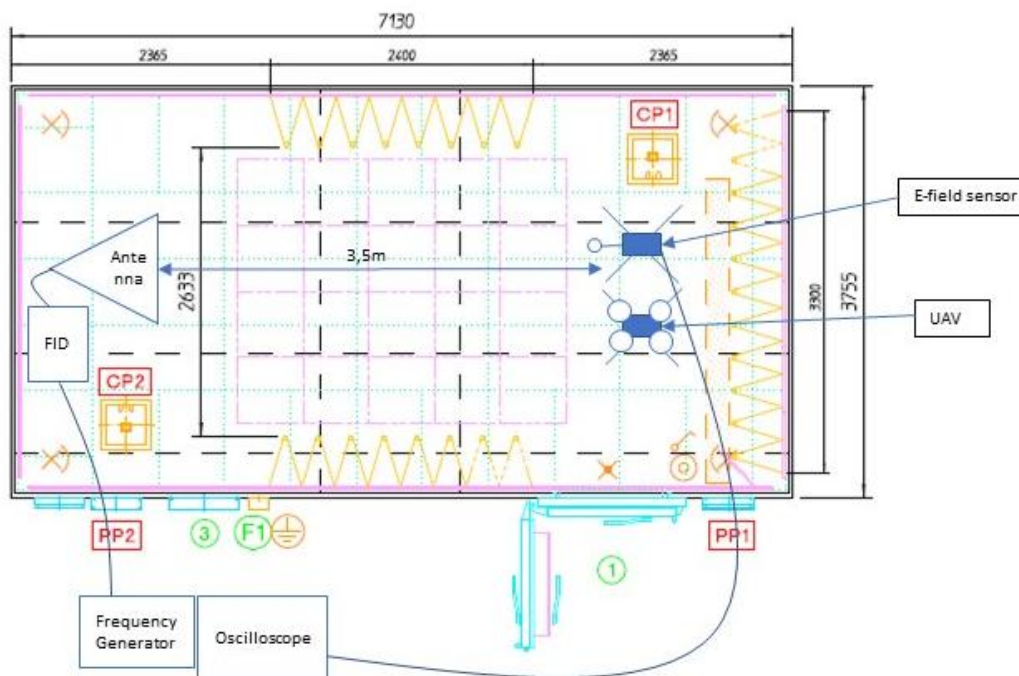
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Μεθοδολογία της έρευνας

Η παρούσα εργασία είναι μία πειραματική έρευνα πάνω στις επιδράσεις που έχει ένα ασύρματο RF κύμα σε ένα μη επανδρωμένο όχημα που βρίσκεται σε λειτουργία. Για την ολοκλήρωση των πειραμάτων θα χρησιμοποιηθεί ένα τετρακόπτερο (drone) το οποίο θα είναι σε λειτουργία μέσα σε έναν ανηχοϊκό θάλαμο.

Το drone αυτό θα το «χτυπάμε» με έναν παλμό, του οποίου μπορούμε να αλλάζουμε την τάση του αλλά και τον ρυθμό στην συχνότητα με τον οποίο η γεννήτρια τον παράγει.

### 1.1. Πειραματική Διάταξη

Τα πειράματα έγιναν στον ανηχοϊκό θάλαμο του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής Β Πανεπιστημιούπολη. Η τελική τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίηση των πειραμάτων δίνεται στο παρακάτω σχήμα:

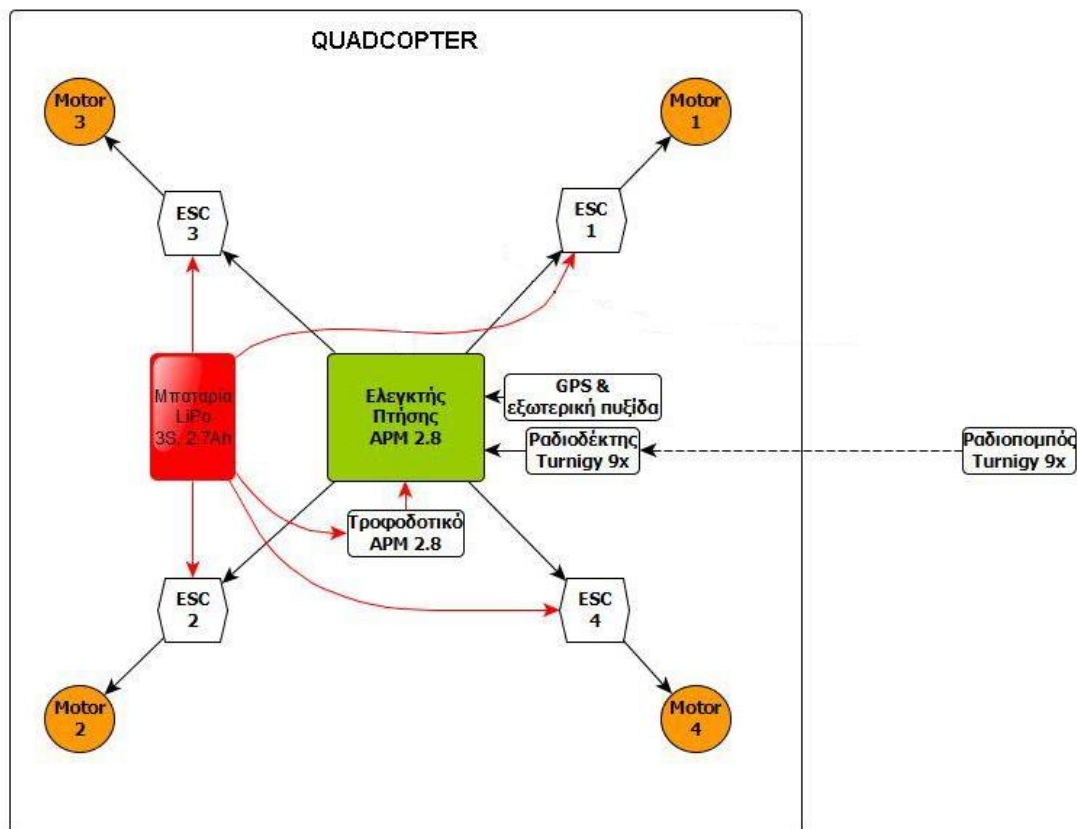


Εικόνα 4: Τοπολογία του ανηχοϊκού θαλάμου που χρησιμοποιήθηκε

#### 1.1.1. Εξοπλισμός

Ακολουθεί στην συνέχεια μία αναλυτικότερη παρουσίαση όλου του του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων.

## Drone



Εικόνα 5: Σχηματική παράσταση τετρακοπτέρου

Το απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα του τετρακοπτέρου το οποίο χρησιμοποιήθηκε.

Χρησιμοποιούνται δύο ηλεκτρικές πλατφόρμες στο δικό μας τετρακόπτερο. Η πρώτη είναι ο εγκέφαλος του οχήματος, εφόσον ενεργοποιεί κατάλληλα τα υποσυστήματα υψηλής ισχύος του οχήματος, δηλαδή τους κινητήρες και τους ηλεκτρονικούς ελεγκτές ταχύτητας. Ονομάζεται Ardupilot Mega, ή APM έκδοση 2.8. Πρόκειται για μια τροποποιημένη έκδοση της πασίγνωστης πλατφόρμας Arduino, που αρχικώς αναπτύχθηκε για ένα πανεπιστημιακό project για έλεγχο μικρών μη επανδρωμένων εναέριων οχημάτων.

Για τον προγραμματισμό του ελέγχου πτήσης, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Mission Planner της ArduPilot. Αυτό είναι ένα προϊόν ανοικτού κώδικα το οποίο φορτώνεται στον ελεγκτή πτήσης, βοηθάει στο στήσιμο και την διαμόρφωση του UAV και ταυτόχρονα επιτρέπει την δημιουργία αρχείων δεδομένων πτήσης. Τα δεδομένα των αρχείων αυτών χρησιμοποιήθηκαν στην ανάλυση των αποτελεσμάτων της σειράς των πειραμάτων.

Η δεύτερη ηλεκτρονική πλατφόρμα που χρησιμοποιήθηκε είναι ο δέκτης της ραδιοεπικοινωνίας (R/C) το Turnigy 9x Rx. Ο ραδιοδέκτης λειτουργεί στα 2,4GHz και λαμβάνει τα σήματα από τον αντίστοιχο πομπό που ελέγχει ο χειριστής και το

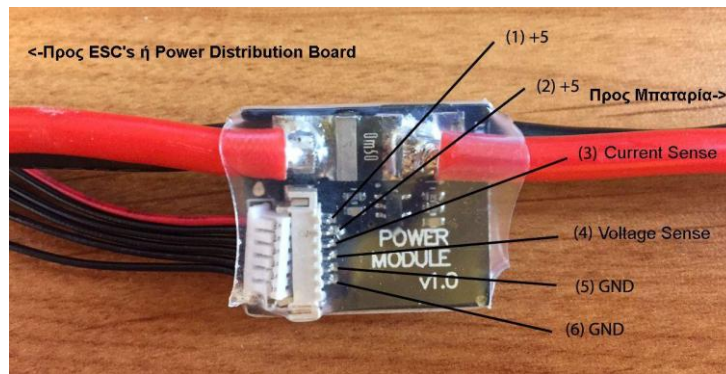
κατευθύνει στο APM. Τα σήματα αυτά τελικά θα χρησιμοποιηθούν από τον ελεγκτή πτήσης για τον καθορισμό της πορείας του αεροσκάφους.

Ο ελεγκτής πτήσης που επιλέξαμε APM 2.8 είναι ένας κλώνος του Arducopter Mega 2.6 της εταιρείας 3D Robotics. Όλα τα χαρακτηριστικά είναι τα ίδια εκτός από κάποιες μετατροπές στην τοποθεσία κάποιων βραχυκυκλωτήρων και στην θύρα υποδοχής της μονάδας GPS + εξωτερική πυξίδα.

Οι προδιαγραφές του APM είναι οι ακόλουθες:

- 3-αξόνων γυροσκόπιο και επιταχυνσιόμετρο στη μονάδα 6DOF(Degrees of Freedom) MPU-6000 της Universe. Εσωτερικά η μονάδα διαθέτει επεξεργαστή DMP Sensor Fusion, ο οποίος συγχωνεύει τις τιμές του επιταχυνσιόμετρου και του γυροσκοπίου παράγοντας τιμές με τα πλεονεκτήματα και των δύο, αλλά χωρίς τα μειονεκτήματα κανενός.
- 3-αξόνων μαγνητόμετρο, το οποίο θα απενεργοποιηθεί μετακινώντας έναν βραχυκυκλωτήρα. Θα χρησιμοποιηθεί το εξωτερικό μαγνητόμετρο που βρίσκεται μαζί με τη μονάδα δέκτη GPS απομακρυσμένο από υψηλά ρεύματα και επαγόμενο θόρυβο.
- Υψηλής ακρίβειας βαρόμετρο MS5611-01BA03 της Measurement Specialties. Πρόκειται για αισθητήρα πίεσης που μπορεί να ανιχνεύσει το υψόμετρο στηριζόμενο στην ατμοσφαιρική πίεση του περιβάλλοντος.
- Επεξεργαστική μονάδα ATMEGA2560. Είναι ο μικροελεγκτής του ελεγκτή πτήσης. Τα χαρακτηριστικά του συνοπτικά είναι: επεξεργαστής 8-bit AVR, αρχιτεκτονικής RISC, 256kbytes Flash, 16Mhz συχνότητα λειτουργίας, μονάδες επικοινωνίας SPI, TWI(I2C), UART, πολλαπλά κανάλια ADC, PWM, ρολόι πραγματικού χρόνου κ.α.
- 4MB Data Flash chip για αυτόματη καταγραφή δεδομένων πτήσης (data logging).
- ATMEGA32U-2 chip για συνδεσιμότητα με USB.
- LP2985-3.3 Low Dropout ρυθμιστής τάσης.
- Έχει προστεθεί πυκνωτής τανταλίου 47uF για το φιλτράρισμα υψίσυχων παρεμβολών αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος.
- Σε αντίθεση με το APM 2.6 οι υποδοχές του GPS και της εξωτερικής πυξίδας έχουν τοποθετηθεί δίπλα-δίπλα επιτρέποντας ευκολότερες συνδέσεις.

Ο ελεγκτής πτήσης απαιτεί τροφοδοσία στα 5V, 2A για τον εαυτό του. Επειδή όμως συνδέουμε και άλλες συσκευές σε αυτό, οι απαιτήσεις του ρεύματος αυξάνονται. Σε πλήρη φόρτο, με όλες τις εξωτερικές συσκευές συνδεδεμένες απαιτούνται έως και 30mA.



**Εικόνα 6: Μονάδα τροφοδοσίας**

Για αυτό το λόγο τροφοδοτούμε τον APM με την dedicated μονάδα τροφοδοσίας που τον συνοδεύει, το APM Power Module που παρέχει εξομαλυμένη τάση 5,37V και ρεύμα έως 2.25A.

Το APM διαθέτει επίσης τρία ενδεικτικά LED ανάλογα με την δραστηριότητα που εκτελεί κάθε φορά[14]:

- Το κόκκινο LED A όταν είναι σταθερά αναμμένο σημαίνει ότι το τετρακόπτερο είναι οπλισμένο. Όταν αναβοσβήνει διαδοχικά με μία μόνο λάμψη(single blink) το σκάφος είναι αφοπλισμένο, ενώ όταν αναβοσβήνει με διπλή λάμψη(double blink) οι κινητήρες δεν μπορούν να περιστραφούν λόγω μη πληρότητας διάφορων προϋποθέσεων
- Το κίτρινο LED B αναβοσβήνει κατά τη διάρκεια της βαθμονόμησης ή όταν έχει ενεργοποιηθεί ο τρόπος πτήσης(flight mode) Autotune.
- Το μπλε LED C αφορά, το GPS. Όταν είναι σταθερά αναμμένο ο δέκτης GPS έχει την καλύτερη λήψη στίγματος 3D-fix, όταν αναβοσβήνει το στίγμα δεν είναι ακριβές 2D-fix ενώ όταν δεν ανάβει καθόλου τότε δεν υπάρχει GPS μονάδα εγκατεστημένη ή υπάρχει αλλά δυσλειτουργεί.

Θα δούμε και αργότερα ότι οι ενδείξεις των LED ήταν από τους παράγοντες που βοήθησαν στην συνέχεια των πειραμάτων μας.

### **Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Turnigy 9x**

Ο τηλεχειρισμός ενός μη επανδρωμένου οχήματος πραγματοποιείται με το σύστημα ραδιοεπικοινωνίας το οποίο μπορεί να λειτουργήσει σε διάφορες συχνότητες, στην δική μας περίπτωση είναι στα 2,4Ghz. Πρόκειται για μια συμβατική επικοινωνία ραδιοκυμάτων RF. Το σύστημα 9x της Turnigy είναι πλήρως παραμετροποιήσιμο σε λογισμικό και υλισμικό και έχει δυνατότητες αναπήδησης συχνότητας (frequency hopping), το οποίο το κάνει ανθεκτικό σε εξωτερικές παρεμβολές. Με την διασπορά φάσματος αναπήδησης συχνότητας(FHSS) το ραδιοκύμα εκπέμπεται σε φαινομενικά ψευδοτυχαία αλληλουχία συχνοτήτων, αναπηδώντας από τη μια συχνότητα στην άλλη ανά σταθερά χρονικά διαστήματα. Ο αλγόριθμος που γεννά την ψευδοτυχαία αναπήδηση συχνοτήτων είναι γνωστός και από τον πομπό και από τον δέκτη.





**Εικόνα 7: Σύστημα Ραδιοεπικοινωνίας Turnigy 9x(receiver)[22]**

Κάνοντας μια συγκεκριμένη ακολουθία χρησιμοποιώντας το τηλεχειριστήριο του πομπού μπορούμε να συγχρονίσουμε τον πομπό με τον δέκτη (bind) και κατά συνέπεια να οπλίσουμε το όχημα μας.



**Εικόνα 8: Τηλεχειριστήριο Turnigy 9x(transmitter)[23]**

Στο σύστημα Turnigy 9x η πληροφορία μεταδίδεται ψηφιακά χρησιμοποιώντας διαμόρφωση θέσης παλμού(PPM). Οι παλμοί των καναλιών μεταφέρονται σειριακά και αρκεί σε κάθε κύκλο να μεταβάλλεται το duty cycle του παλμού για να γίνει η διάκριση για την ένταση του εκάστοτε καναλιού. Ο ραδιοδέκτης PPM πρέπει να είναι συγχρονισμένος με το ίδιο ρολόι του πομπού. Σε κάθε κύκλο επαναλαμβάνεται νέα σειρά παλμών σε κάθε κανάλι. Ο δέκτης αντιλαμβάνεται το τέλος του κύκλου όταν λάβει έναν καθορισμένο αρνητικό παλμό. Ο δέκτης αποδιαμορφώνει το σήμα, ξεχωρίζει τον λαμβανόμενο παλμό για κάθε κανάλι, τον αποκωδικοποιεί και τελικά προωθεί

αναλογικό σήμα διαμορφωμένο κατά εύρος παλμού(Pulse Width Modulation-PWM)[15] στον ελεγκτή πτήσης.

### Μονάδα GPS δέκτη

Χρησιμοποιούμε την μονάδα δέκτη GPS NEO-6M της Ublox η οποία επικοινωνεί με τον ελεγκτή πτήσης μέσω μιας διεπαφής UART. Η μονάδα δέχεται 5V τάση από το APM, αλλά λειτουργεί με 3V αφού περάσει από έναν LDO ρυθμιστή τάσης. Επίσης η μονάδα έχει και πυξίδα που στα αρχικά πειράματα μας χρησιμοποιήσαμε αντί αυτής που έχει εσωτερικά ο ελεγκτής πτήσης.



**Εικόνα 9: Δέκτης GPS NEO-6M[24]**

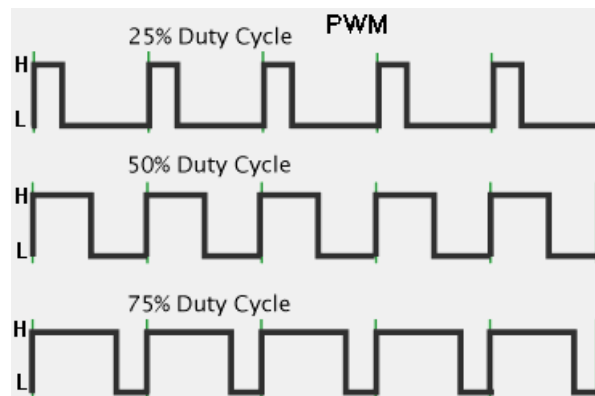
Στα πρώτα μας πειράματα χρησιμοποιήθηκε το GPS, ο λόγος είναι ότι το πρόγραμμα Mission Planner(το οποίο θα αναλύσουμε αργότερα) απαιτεί GPS έτσι ώστε τα data logs να έχουν time stamp. Το κάναμε έτσι ώστε να μπορούμε να γνωρίζουμε ακριβώς την στιγμή που εκθέτουμε το όχημα μας σε ακτινοβολία. Αργότερα το GPS αφαιρέθηκε καθώς, όπως παρατηρήθηκε, δεν ήταν κρίσιμος παράγοντας για την υλοποίηση των πειραμάτων.

### Ηλεκτρονικοί Ελεγκτές Ταχύτητας

Ο ηλεκτρονικός ελεγκτής ταχύτητας (Electronic Speed Controllers-ESC's) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα ισχύος που χρησιμοποιείται για να μεταβάλει την ταχύτητα και την κατεύθυνση των κινητήρων του εναέριου οχήματος. Τα ESC's χρησιμοποιούνται συχνά σε ηλεκτρικώς τροφοδοτούμενα ραδιοελεγχόμενα μοντέλα, όπως τα UAV drones, με την πλειονότητα τους να προσφέρουν τριφασική παροχή ισχύος για τους τριφασικούς κινητήρες χωρίς βούρτσα (brushless) που οδηγούν. Ένα ESC μεταφράζει το λαμβανόμενο σήμα πληροφορίας σε ρυθμό μεταγωγής των τρανζίστορ επίδρασης πεδίου που διαθέτει(FET). Τα περισσότερα πλέον ESC δομούνται με FET's αφού είναι πιο αποδοτικά. Ο ρυθμός μεταγωγής των τρανζίστορ ποικίλλει αλλά σε γενικές γραμμές όσο υψηλότερος είναι, τόσο λιγότερη ποσότητα ισχύος σπαταλάται ως θερμότητα.



Ρυθμοί μεταγωγής μεταξύ 1000 και 5000Hz είναι συχνοί και αποδεκτοί για τις περισσότερες εφαρμογές. Η γρήγορη μεταγωγή των τρανζίστορ παράγει έξοδο, τριφασικού AC σήματος με την τεχνική PWM. Η PWM είναι τεχνική μετατροπής ψηφιακού σήματος σε αναλογικό. Τα σήματα διαμορφωμένα κατά εύρος παλμού μεταβάλλουν τον κύκλο καθήκοντος(Duty Cycle) του ρεύματος που παράγουν από τους κινητήρες ανάλογα με το duty cycle του PWM σήματος της πληροφορίας που λαμβάνουν από τον ελεγκτή πτήσης. Όσο μεγαλύτερο το Duty Cycle τόσο περισσότερη ισχύς καταναλώνεται.



Εικόνα 10: Κύκλος Ελεγκτή Ταχύτητας

Οι ηλεκτρονικοί ελεγκτές ταχύτητας τροφοδοτούνται απευθείας από την μπαταρία, όχι από τον APM.



Εικόνα 11: Τροφοδοτικό ελεγκτή ταχύτητας Turnigy PLUSH-12A[25]

Ο συγκεκριμένος ελεγκτής ταχύτητας παρέχει τρία Alert Tones:

1. Η τάση εισαγωγής είναι αφύσικη. Το ESC ξεκινάει να ελέγχει την τάση όταν συνδεθεί η μπαταρία, αν η τάση δεν είναι εντός των φυσιολογικών ορίων, ακούγεται ηχητική ένδειξη: "μπιπ-μπιπ-, μπιπ-μπιπ-" με απόκλιση χρόνου 1s.
2. Το σήμα του γκαζιού(throttle) είναι αφύσικο: Όταν το ESC δεν μπορεί να ανιχνεύσει κανονικό σήμα γκαζιού, ακούγεται η ακόλουθη ηχητική ένδειξη: "μπιπ-, μπιπ-, μπιπ-" με απόκλιση χρόνου 2sec
3. Ο μοχλός του γκαζιού(throttle stick) δεν είναι στην κάτω(κανονική) θέση: Όταν ο μοχλός του γκαζιού δεν είναι στην κάτω(χαμηλότερη) θέση, ακούγεται μια ταχύς ηχητική ένδειξη : "μπιπ-,μπιπ-,μπιπ-" με απόκλιση χρόνου 0,25sec.

Θα δούμε και αργότερα ότι οι παραπάνω ηχητικές ενδείξεις έπαιξαν σημαντικό παράγοντα για την πορεία των πειραμάτων.

### Τροφοδοσία – Μπαταρία Λιθίου Πολυμερούς

Για την τροφοδοσία του UAV χρησιμοποιήθηκε μπαταρία λιθίου πολυμερούς LiPo της Turnigy [16]:



Εικόνα 12: Μπαταρία λιθίου[16]

Η οποία όμως αργότερα αντικαταστάθηκε από DC τροφοδοτικό έτσι ώστε να τροφοδοτούμε συνεχόμενα το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα.

### Γεννήτρια Παλμών

Για την υλοποίηση των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω εξαρτήματα:

#### Montena SFE3-5G

Οι συσκευές για την μέτρηση του ηλεκτρικού πεδίου που χρησιμοποιήθηκε είναι ο αισθητήρας πεδίου SFE3-5G ο οποίος είναι σχεδιασμένος για την μέτρηση γρήγορων παλμικών πεδίων. Χρησιμοποιούνται αισθητήρες για την μέτρηση ηλεκτρικού πεδίου(D-dot) αλλά και για την μέτρηση του μαγνητικού(B-dot). Επειδή οι αισθητήρες είναι παθητικοί, δεν απαιτείται ούτε εξωτερική ούτε εσωτερική τροφοδοσία. Παθητικοί ολοκληρωτές και ειδικά καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν επιπρόσθετα. Οι αισθητήρες αυτού του είδους μπορούν να συνδεθούν απευθείας σε είσοδο υψηλής αντίστασης ενός γρήγορου παλμογράφου μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου και ενός παθητικού ολοκληρωτή ή μπορούν να συνδεθούν μέσω ενός αναλογικού συνδέσμου οπτικής ίνας. Οπτική ίνα πρέπει να χρησιμοποιηθεί αν η απόσταση του αισθητήρα και των μετρητικών οργάνων είναι αρκετά μεγάλη.



Εικόνα 13: Αισθητήρας Montena SFE-5G[31]

Εμείς στο πείραμα μας χρησιμοποιήσαμε D-dot αισθητήρα ηλεκτρικού πεδίου εξοπλισμένο με ένα μετασχηματιστή BL3-5G balun για την άθροιση και των σημάτων

των δύο κεραιών του αισθητήρα και έναν ολοκληρωτή έτσι ώστε το μέγιστο πλάτος του σήματος εισόδου του οπτικού μετασχηματιστή να είναι μικρότερο των 316mV.



**Εικόνα 14: Montena Ultra Broadband Balun 3.5 GHz (BL3-5G)[26].**

Το σήμα εξόδου του balun οδηγείται στον παλμογράφο έτσι ώστε να μπορούμε να το καταγράψουμε και να το μελετήσουμε. Για την αποφυγή σύζευξης των καλωδίων μετάδοσης με το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, χρησιμοποιούμε ένα οπτικό σύστημα μετάδοσης. Στις παρακάτω εικόνες βλέπουμε το πομπό και τον δέκτη του οπτικού συστήματος, αλλά και την οπτική ίνα που χρησιμοποιήθηκε. Ο οπτικός σύνδεσμος είναι σχεδιασμένος για την μετάδοση αναλογικών ηλεκτρικών σημάτων της τάξης των 200Hz έως και 3,5GHz. Το σήμα μετατρέπεται σε αναλογικό οπτικό σήμα από την συσκευή του εκπομπού και αποστέλλεται στον οπτικό δέκτη μέσω της οπτικής ίνας. Και ο πομπός και ο δέκτης είναι θωρακισμένοι άρα είναι προστατευμένοι από το εκπεμπόμενο ηλεκτρομαγνητικό κύμα.



**Εικόνα 15: Optical transmission network (tx/rx units) [27]**



Εικόνα 16: Οπτική ίνα[27]

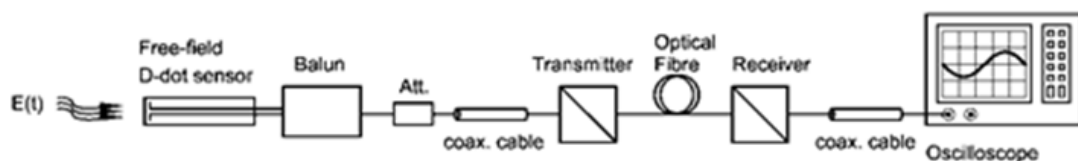
Λόγω του περιορισμού που έχει ο εκπομπός όσο αφορά το σήμα εισόδου που δέχεται χρησιμοποιήθηκαν εξασθεניתές χαμηλής τάσης για να τον προστατέψουν. Η παρακάτω εικόνα δείχνει έναν 30dB SMA εξασθεניתή που συνδέθηκε στην είσοδο του εκπομπού του οπτικού συστήματος με σκοπό να καταπιέσει το σήμα εισόδου. Ανάλογα με το πλάτος του εκπεμπόμενου παλμού χρησιμοποιήθηκαν και εξασθεניתές των 10 και 20dB.



Εικόνα 17: 30 dB SMA εξασθενητής[28]

Το μήκος της οπτικής ίνας που χρησιμοποιήθηκε είναι 50m και ο οπτικός δέκτης έχει έξοδο SMA για την σύνδεση μας με τον παλμογράφο.

Η ολοκληρωμένη τοπολογία του Montena E-field συστήματος μέτρησης που χρησιμοποιήθηκε είναι το παρακάτω



Εικόνα 18: Τοπολογία συστήματος μέτρησης

Για την μέτρηση του παλμού και την δημιουργία του ιστογράμματος χρησιμοποιήθηκε ο παλμογράφος RTO-1044 της Rohde & Schwartz.



Εικόνα 19: Παλμογράφος RTO-1044 Rohde & Schwartz[29]

για την παραγωγή των παλμών χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A η οποία συνοπτικά έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:



Εικόνα 20: Γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A[30]

Agilent 33220A	Specifications
Waveform	Pulse
Frequency Range	500 MHz to 5 MHz
Pulse Width	20 ns minimum
Edge Time	< 13 ns
Overshoot	< 2%
Jitter	300 ps + 0.1 ppm of period
Burst Type	Counted, Gated, Infinite
Internal Burst Period	1 μs to 500 s
Output Connector	BNC female 50 Ω
Power Consumption	50 VA max
Weight	3.4 kg
Dimensions (W, H, D)	261.1 mm x 103.8 mm x 303.2 mm

## PRF

### FID FPG 20-1 PM

Στην παρακάτω εικόνα βλέπουμε την FID FPG 20-1 PM γεννήτρια υψηλής-τάσης που χρησιμοποιήθηκε σε συνδυασμό με την ETS-Lindgren 3106B UWB κεραία για την υλοποίηση των πειραμάτων. Η γεννήτρια παράγει έναν παλμό με μέγιστο πλάτος 20kV και χρόνο ανόδου 120ps-130ps.



Εικόνα 21: Γεννήτρια Υψηλής Τάσης FID FPG 20-1 PM

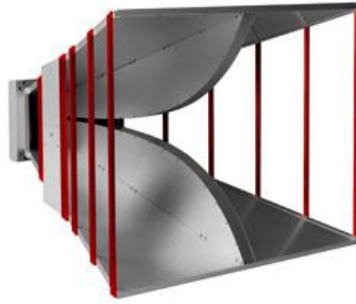
Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του FID δίνονται στον παρακάτω πίνακα

Feature	Value
Maximum amplitude into 50 Ω	20 kV
Output connector	FC26
Rise time	120-130 ps
Pulse duration at 50%	3 ns
Triggering	Internal and external 100 Hz – 1 kHz
Input power	AC 100-240 V

### Κεραία

#### ETS-Lindgren 3106B UWB Antenna

Η ETS-Lindgren 3106B κεραία ακτινοβολεί το σήμα που παράγεται την γεννήτρια παλμών υψηλής τάσης (HVPG). Αυτή η κεραία έχει σχεδιαστεί για να παράγει μεγάλα ηλεκτρομαγνητικά πεδία με σχετικά ισχύ εισόδου παρέχοντας έτσι υψηλό κέρδος. Η κεραία παράγει μια μονο-λοβική ακτινοβολία κάτω από το εύρος συχνότητας που καλύπτει το οποίο είναι από τα 200MHz έως και τα 2.5GHz. Το κέρδος της κεραίας για απόσταση ενός μέτρου είναι μεγαλύτερο των 10dB.



**Εικόνα 22: ETS-Lindgren 3106B UWB Antenna[32]**

Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά της κεραίας δίνονται στον παρακάτω πίνακα:

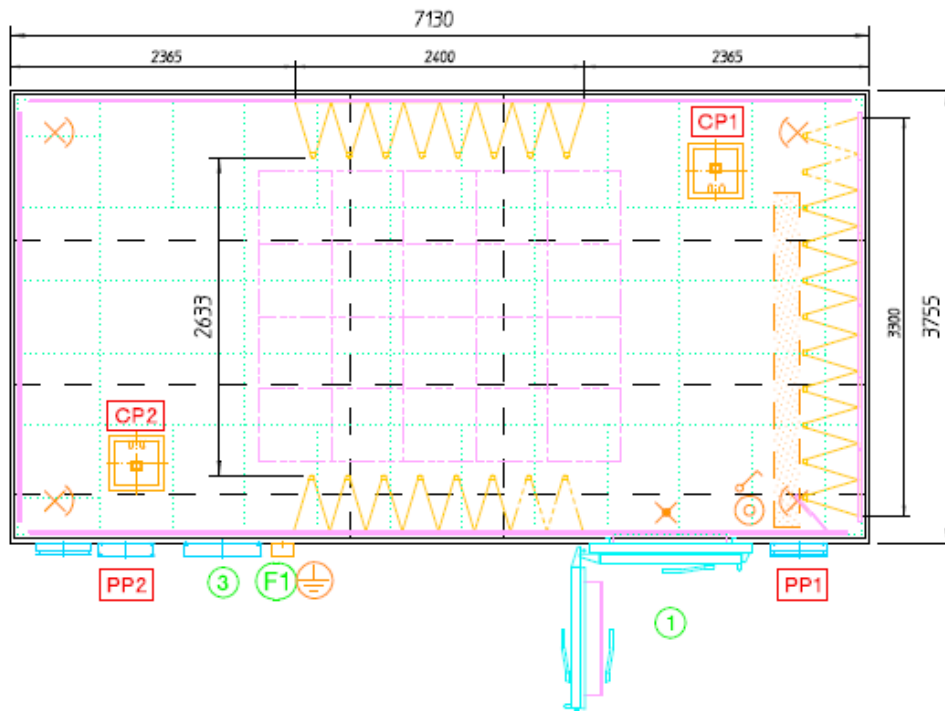
Feature	Value
Maximum amplitude into 50 Ω	1.6 kW
VSWR	1.6:1 max
Bandwidth	200MHz to 2.5 GHz

### **Ανηχοϊκός Θάλαμος**

Οι Ανηχοϊκοί Θάλαμοι Ραδιοσυχνοτήτων (RF Anechoic Chambers) διαθέτουν στα τοιχώματά τους επικαλύψεις από υλικά τα οποία απορροφούν τις εκπεμπόμενες ακτινοβολίες (RAM : Radiation Absorbent Materials). Στο εσωτερικό τους μπορούν να πραγματοποιηθούν πειράματα πάνω σε κεραίες και ραντάρ, σε μοντέλα οχημάτων υπό κλίμακα, ή ακόμα και σε οχήματα κανονικών διαστάσεων, εφόσον βέβαια το επιτρέπει το μέγεθος του θαλάμου. Συνήθως οι Θάλαμοι Ραδιοσυχνοτήτων μπορούν να λειτουργήσουν έως ένα βαθμό και ως Ακουστικοί Ανηχοϊκοί Θάλαμοι, εμφανίζοντας περιορισμένες ηχομονωτικές και ηχοαπορροφητικές ιδιότητες.

Όλα τα πειράματα έλαβαν μέρος στο Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Β Πανεπιστημιούπολης καθώς διαθέτει τον παρακάτω ανηχοϊκό θάλαμο.





Εικόνα 23: Κάτοψη ανηχοϊκού θαλάμου



Εικόνα 24: Εσωτερικό και εξωτερικό ανηχοϊκού θαλάμου



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:

### 1.2. Σκοπός και Αντικείμενο των Πειραμάτων

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τα πειράματα που έχουν γίνει έως τώρα στοχεύουν κυρίως στο να μάθουν τις επιπτώσεις που έχει ένα RF σήμα σε μία ηλεκτρονική συσκευή (είτε αυτή είναι ένας υπολογιστής, είτε ένα μικροελεγκτής). Μέχρι τώρα δεν έχουν γίνει δοκιμές σε ιπτάμενα μη επανδρωμένα οχήματα. Πέραν αυτού, στις έως τώρα εργασίες η επίδραση του RF κύματος υλοποιείται κατά κύριο λόγο καλωδιακά.

Ο πρωτεύον λοιπόν σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να ελεγχθεί πειραματικά η επίδραση ενός ασύρματου RF κύματος σε ένα Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα και ταυτόχρονα να απαντηθούν τα ακόλουθα τρία ερωτήματα:

- I. Πρώτο ερώτημα είναι το αν είναι εφικτό να προκληθεί παρεμβολή, σύγχυση, καταστροφή σε ένα Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (Unmanned Aerial Vehicle, UAV)
- II. Στην περίπτωση που αυτό είναι εφικτό, κάτω από ποιες συνθήκες μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτό
- III. Αφού είναι εφικτό και έχουμε βρει τις συνθήκες έτσι ώστε να έχουμε επαναληψιμότητα ποιο είναι το κρίσιμο εξάρτημα που επηρεάζουμε στο UAV το οποίο είναι ευπαθές στην έκθεση σε ακτινοβολία

### 1.3. Πειράματα και Αποτελέσματα

Τα πειράματα που αποτέλεσαν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, έγιναν με την τοποθέτηση του τετρακοπτέρου μέσα σε ανηχοϊκό θάλαμο. Όπως επίσης προαναφέραμε, το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον προγραμματισμό του ελεγκτή πτήσης APM 2.8 και για τη βαθμονόμηση των αισθητήρων του είναι το Mission Planner. Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκε το Mission Planner είναι η ευκολία της χρήσης του αλλά κυρίως η δυνατότητα που μας παρέχει να καταβάζουμε data logs για περαιτέρω ανάλυση.

Στο αρχικό στάδιο της εργασίας έγινε μία σειρά πειραμάτων τα οποία είχαν την εξής ακολουθία:

- a) Αρχικά το UAV έπρεπε να βρίσκεται εκτός ανηχοϊκού θαλάμου έτσι ώστε να βρει ένδειξη GPS. Ο λόγος που το κάναμε αυτό ήταν ότι το Mission Planner για να πάρει time stamp (να αντιστοιχήσει τον χρόνο πτήσης με τον πραγματικό χρόνο) πρέπει να έχει ένδειξη GPS. Αυτό είναι αναγκαίο έτσι ώστε να είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε ακριβώς την χρονική στιγμή που εκπέμπουμε ακτινοβολία στο UAV για να βγάλουμε αργότερα ασφαλή αποτελέσματα από την ανάλυση των δεδομένων.

- b) Αφού το UAV είχε πάρει time stamp το τοποθετούσαμε εντός ανηχοϊκού θαλάμου απέναντι από την κεραία εκπομπής και ρυθμίζαμε τον FID FPG 20-1 PM έτσι ώστε να έχουμε την έξοδο του παλμού που επιθυμούμε.
- c) Μετά την σφράγιση του ανηχοϊκού θαλάμου (και για λόγους ασφαλείας), γινόταν η ρύθμιση στην γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A έτσι ώστε να έχουμε τετραγωνικό παλμό καθώς και η ρύθμιση της συχνότητας επαναληψιμότητας του παλμού PRF (Pulse Repetition Frequency)
- d) Ακτινοβολούσαμε για χρονική διάρκεια 10 δευτερολέπτων το UAV ενώ παράλληλα παίρναμε screenshot του παλμού που εκπέμπαμε χρησιμοποιώντας τον παλμογράφο RTO-1044 της Rohde & Schwartz.
- e) Κλείναμε την γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A για να σταματήσει η εκπομπή, ανοίγαμε τον ανηχοϊκό θάλαμο
- f) Το Drone έβγαινε από τον θάλαμο και στην συνέχεια κατεβάζαμε το data log file που είχε καταγράψει μέχρι εκείνη τη στιγμή για περαιτέρω ανάλυση.

Στα αρχική σειρά των 53 πειράματων που πραγματοποιήσαμε, το Drone ήταν πλήρως εξοπλισμένο με όλα τα περιφερειακά του ηλεκτρικά συστήματα δηλαδή με το GPS NEO-6M το RF module της Turnigy και τα τέσσερα τροφοδοτικά ελεγκτή ταχύτητας για τους τέσσερις κινητήρες.

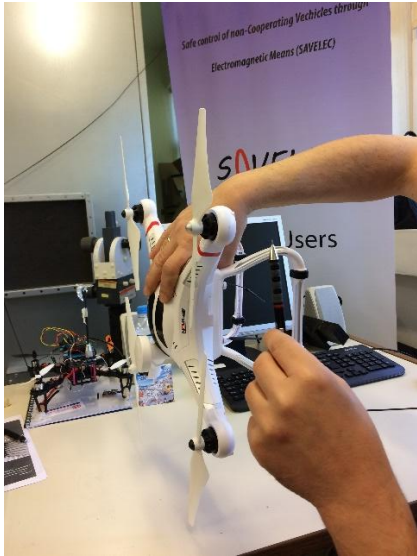
Το Drone είχε σταθερή απόσταση από την κεραία 3,5m και το τοποθετούσαμε με τέσσερα διαφορετικά setup έτσι ώστε να το ακτινοβολούμε με όλες τις πολώσεις τα setup φαίνονται στις παρακάτω εικόνες:



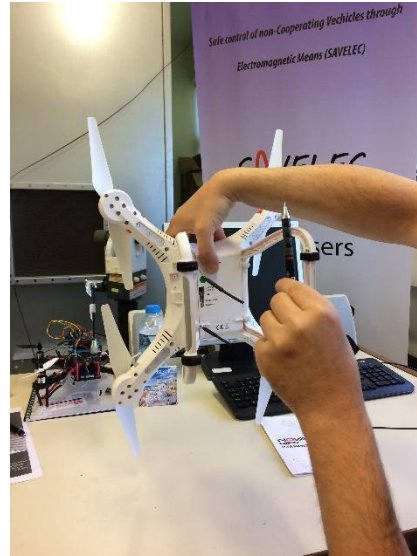
Setup A



Setup B



Setup C

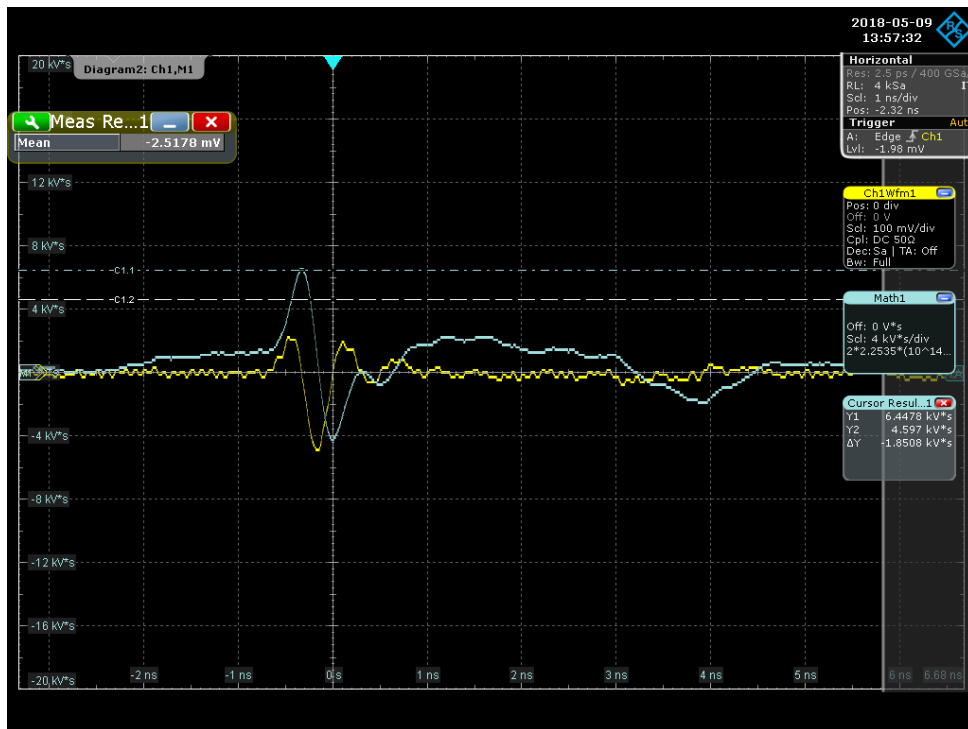


Setup D

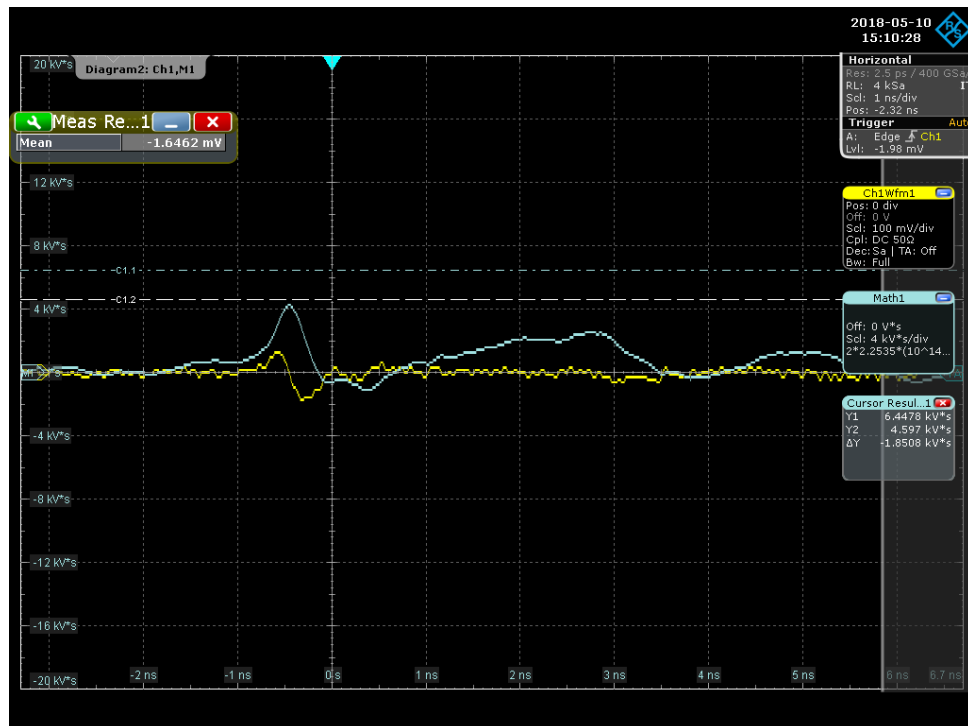
### Εικόνα 25: Τα 4 setup του drone

Οι δοκιμές έγιναν ρυθμίζοντας την γεννήτρια κυματομορφών Agilent 33220A έτσι ώστε να έχουμε παλμική κυματομορφή εξόδου και έγιναν δοκιμές για PRF 100Hz, 500Hz και 1000Hz.

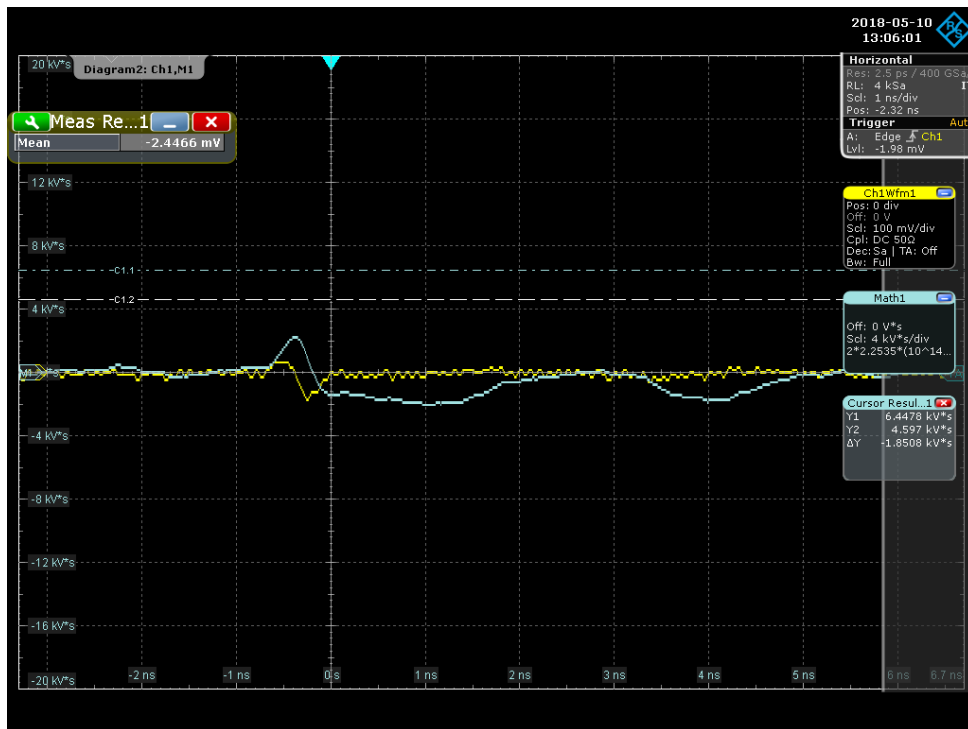
Οι παλμοί που χρησιμοποιήσαμε για την πραγματοποίηση των πειραμάτων αντιστοιχούσαν στη χαμηλότερη, τη μεσαία και τη μέγιστη θέση του ποτενσιόμετρου του FID FPG 20-1 PM τις οποίες μπορούμε να δούμε αναλυτικά τα μεγέθη τους από τα screenshot που πήραμε από τον παλμογράφο RTO-1044 της Rohde & Schwartz:



Εικόνα 26: Παλμός εξόδου από τον FID στη μέγιστη θέση(MAX)



Εικόνα 27: Παλμός εξόδου από τον FID στη μεσαία θέση(MAX/2)



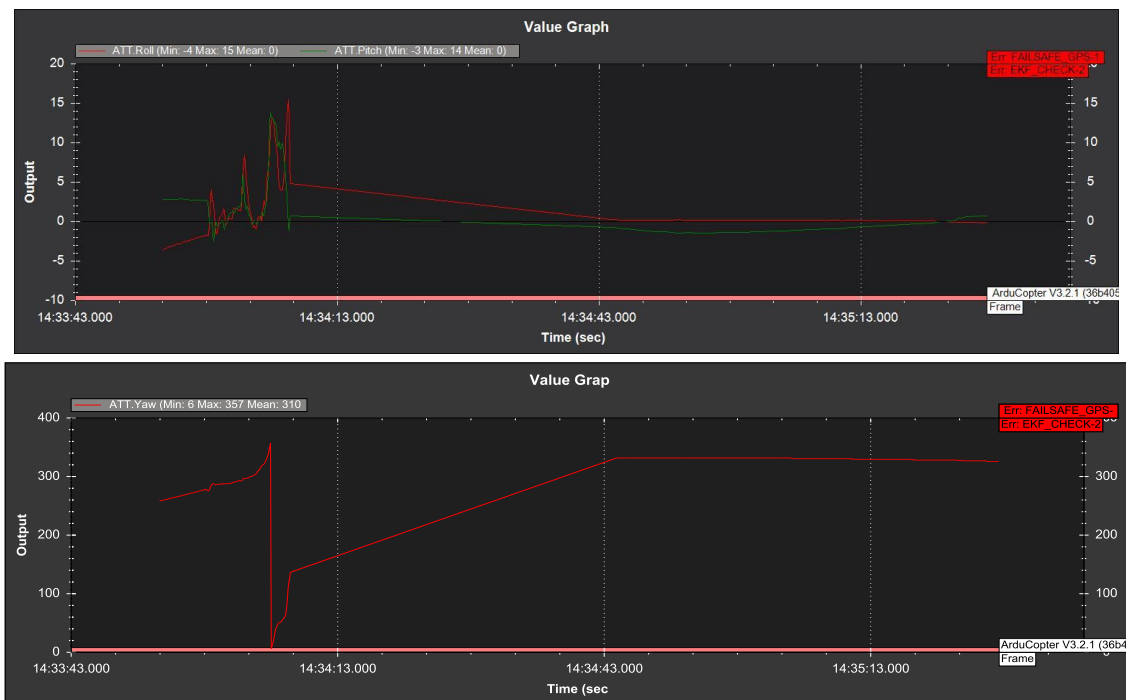
Εικόνα 28: Παλμός εξόδου από τον FID στη ελάχιστη θέση(MIN)

Τα συμπεράσματα που βγήκαν από αυτή τη σειρά των πειραμάτων είναι τα εξής:

- Αρχικά όντως μπορούσαμε να ρίξουμε το drone
- Δεν παρουσιάστηκε κάποια ιδιαίτερη διαφορά όσον αφορά την πόλωση. Αυτό οφείλεται στο ότι ο παλμός που ακτινοβολούμε είναι πολύ μεγάλος έτσι ώστε να επηρεάσει η πόλωση το τελικό αποτέλεσμα, δηλαδή το σβήσιμο του drone, τουλάχιστον στην απόσταση των 3.5m που μας δίνει την δυνατότητα ο ανηχοϊκός θάλαμος να έχουμε.
- Επίσης, για τον ίδιο λόγο, το PRF δεν έπαιξε κρίσιμη σημασία. Υπάρχει πιθανότητα σε μεγαλύτερες αποστάσεις, σε εξωτερικό χώρο και με μεγαλύτερο PRF να μπορούμε να επιτύχουμε καλύτερο χρόνο σβήσιματος λόγω της μεγαλύτερης επαναληψιμότητας του παλμού, αλλά αυτό δεν μπορεί να επαληθευτεί από τα τρέχοντα πειράματα.
- Παρατηρήθηκε ότι σε μεγάλους παλμούς, από 8kV και πάνω, υπήρχε απόλυτη επιτυχία στο να σβήσεις το drone, ενώ όσο μειωνόταν το πλάτος του παλμού παρουσιαζόντουσαν διαφορετικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα υπήρξαν περιπτώσεις στις οποίες μετά την ακτινοβολία οι κινητήρες του drone να μην σταματούσαν, αλλά ο χειριστής είχε την δυνατότητα να κάνει πάλι bind το RF module με το τηλεχειριστήριο και να επανεκκινήσει την λειτουργία του Drone κανονικά. Σε άλλες περιπτώσεις αντίστοιχα παρατηρήθηκε ότι αφ' ενός μεν το οι

κινητήρες του Drone συνέχιζαν να λειτουργούν αλλά το Drone δεν μπορούσε να δεχθεί καμία εντολή από το τηλεχειριστήριο του χειριστή.

Για αυτούς τους λόγους το Mission Planner αποδείχτηκε ότι δεν ήταν αρκετό για την συνέχιση των πειραμάτων, καθώς δεν μπορούσαμε μέσω από τα data logs που παίρναμε από αυτό να βγάλουμε σαφή και ασφαλή συμπεράσματα. Για παράδειγμα στην παρακάτω εικόνα που ακολουθεί βλέπουμε το γράφημα που μας δίνει το Mission Planner για τις εντολές pitch, roll και yaw που είναι αντίστοιχα: η εντολή για την κλίση, η εντολή για την περιστροφική κίνηση του drone γύρω από τον οριζόντιο άξονα του και η εντολή για την περιστροφική κίνηση του drone γύρω από τον κάθετο άξονα του:



**Εικόνα 29: Mission Planner γράφηματα εντολών Pitch, Roll, Yaw**

Αρχικά στην γραφική παράσταση βλέπουμε κάποιες έντονες μεταβολές οι οποίες οφείλονται σε αλλαγές της κατάστασης κατά την μεταφορά του drone, το οποίο αρχικά το είχαμε τοποθετήσει έξω για να πάρει time stamp και να ξεκινήσει την καταγραφή, εν συνεχεία μετακινήθηκε στην προκαθορισμένη θέση για να το ακτινοβολήσουμε. Παρατηρούμε ότι μετά την τοποθέτησή του στην αναγκαία θέση, οι γραφικές παραστάσεις εξομαλύνονται και υπάρχει μια κατάσταση ηρεμίας που αντιστοιχεί στο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να βγούμε από τον ανηχοϊκό και να πάρουμε θέση για να αρχίσει η εκπομπή της ακτινοβολίας. Στη συγκεκριμένη καταγραφή το σβήσιμο του drone ήταν ακαριαίο, στο σημείο που τελειώνει η καταγραφή είναι και το σημείο που εκπέμψαμε τον παλμό μεγέθους 8kV και με PRF 1000Hz. Όπως είναι λογικό δεν μπορεί να βγει κάποιο άλλο συμπέρασμα πέραν του ότι έσβησε το drone αλλά και

ακόμη πιο σημαντικό ότι δεν επηρεάσαμε κάποιο περιφερειακό κύκλωμα του αλλά επηρεάσαμε με μεγάλη πιθανότητα το πιο κρίσιμο από όλα: τον APM 2.8.

Αυτή η παραπάνω εικασία αλλά και οι περιορισμοί του Mission Planner ως προς τα δεδομένα που μπορούσαμε να αναλύσουμε μας οδήγησαν σε νέα προσέγγιση του θέματος, η οποία βασίστηκε κυρίως στο hardware.

Μία από τις πιο σημαντικές παρατηρήσεις που έγιναν στην διάρκεια των πειραμάτων, ήταν ότι όταν το Drone έσβηνε ακουγόταν μια ηχητική ειδοποίηση από τους ελεγκτές ταχύτητας των κινητήρων. Όπως προαναφέραμε οι συγκεκριμένοι ελεγκτές εκπέμπουν έναν ηχητικό τόνο σε περίπτωση που το σήμα του καναλιού του γκαζιού (throttle) είναι αφύσικο. Έτσι αρχικά μετρήσαμε το σήμα του throttle που στέλνει ο APM 2.8 στους ελεγκτές ταχύτητας σε κανονική λειτουργία, κατάσταση ηρεμίας, το οποίο είναι ένας παλμός με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

Τάση:  $V_{P_K-P_K} = 530mV$

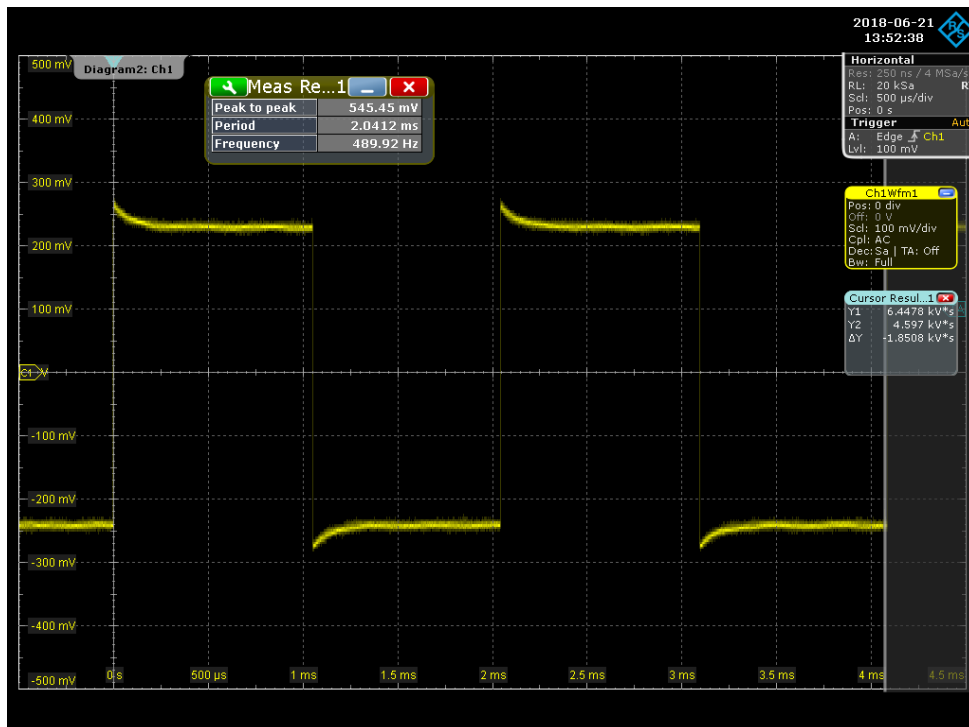
Συχνότητα:  $f = 489.2Hz$

Περίοδο:  $T = 2msec$

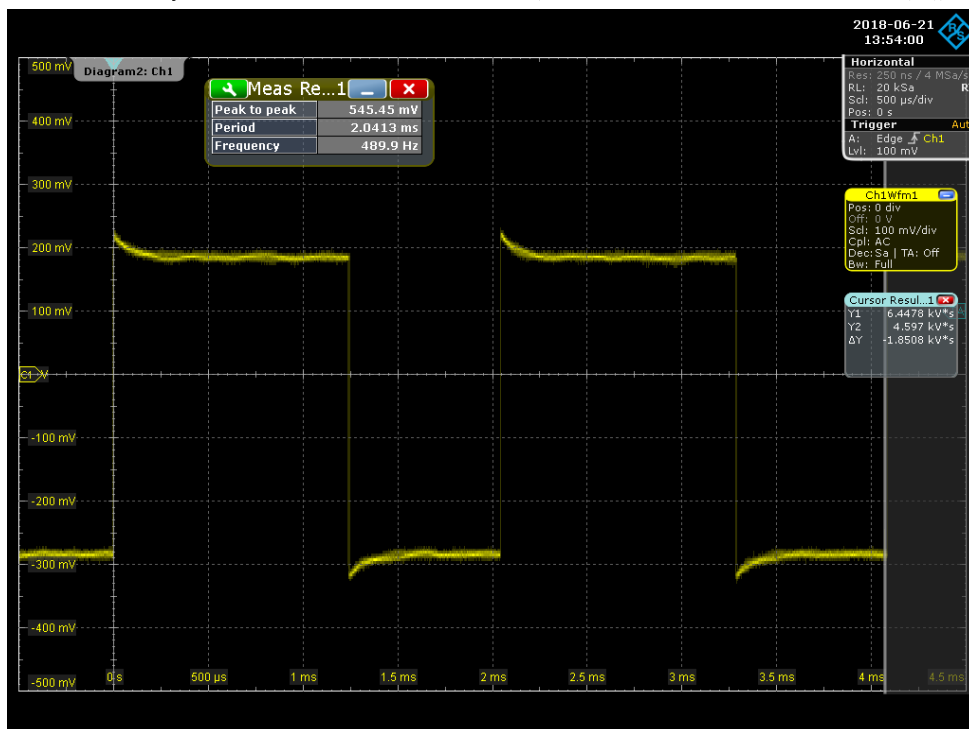
Και στην συνέχεια μετρήσαμε τον παλμό αφού έχουμε ακτινοβολήσει το drone μας, το έχουμε σβήσει και έχει ακουστεί και η ηχητική ειδοποίηση των ελεγκτών ταχύτητας.

Το αποτέλεσμα των μετρήσεων ήταν ότι μετά το επιτυχές σβήσιμο του Drone το σήμα του throttle που στέλνει ο APM 2.8 στους ελεγκτές ταχύτητας ήταν μηδενικό. Αυτή ήταν και η πρώτη σοβαρή ένδειξη ότι ο παλμός με το οποίο ακτινοβολούμε το drone επηρεάζει το κρίσιμότερο στοιχείο του που είναι ο ελεγκτής πτήσης APM 2.8 .



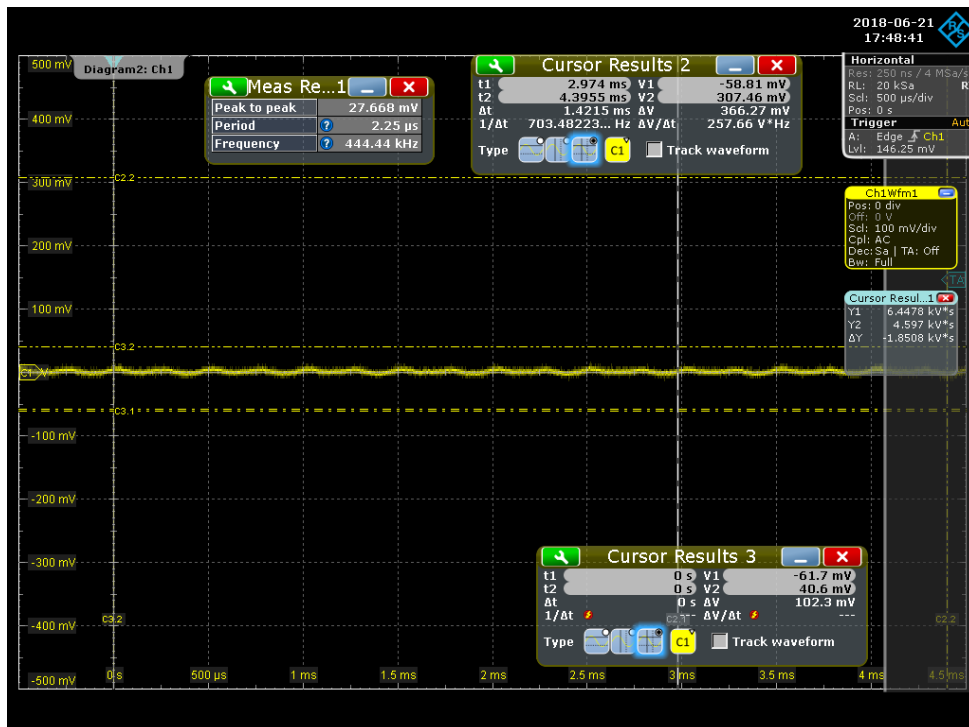


Εικόνα 30: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's σε κατάσταση ηρεμίας



Εικόνα 31: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's σε πατώντας γκάζι (throttle)





Εικόνα 32: Παλμός εισόδου του APM2.8 προς τα ESC's μετά την έκθεση σε ακτινοβολία

Κάποιες γενικότερες παρατηρήσεις σχετικά με τα αποτελέσματα της πρώτης αυτής σειράς πειραμάτων μπορούν να συνοψισθούν στα εξής:

Υπήρξε πείραμα στο οποίο το drone αρχικά αύξησε ταχύτητα και αμέσως μετά έσβησε. Σε κάποιες άλλες περιπτώσεις παρατηρήθηκε αρχικά ένα δυνατό γκάζωμα και μετά σβήσιμο. Σε μία δε από αυτές τα log files ήταν κατεστραμμένα και δεν μπορούσαμε να τα τραβήξουμε. Αναγκαστήκαμε να κάνουμε upload το firmware και clear τα data logs για να μπορέσουμε να συνεχίσουμε τα πειράματα..

Σε άλλες περιπτώσεις παρατηρήθηκε πιθανό jamming (τυχαία αυξομείωση ταχύτητας) και μετά σβήσιμο. Σε μία δε από αυτές που υπήρχε μείωση ταχύτητας είναι πιθανόν να έγινε και μετακίνηση του drone (το βρήκαμε σε άλλη θέση).

Τις περισσότερες από τις φορές που υπήρξε σβήσιμο, είχαμε και ηχητικές ενδείξεις (μπίπ) από τους ελεγκτές των κινητήρων. Σε δύο δε περιπτώσεις οι δύο από τους έλικες δεν λειτουργούσαν.

## Μετρήσεις χωρίς άλλα παθητικά στοιχεία

### Δημιουργία Fault Codes

Η ασάφεια των πρώτων πειραμάτων ως προς τον τρόπο σβήσιματος του drone, οδήγησε στην ανάγκη κωδικοποίησης των σφαλμάτων έτσι ώστε να είναι εφικτή η ομαδοποίηση και η επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Δημιουργήθηκαν οι εξής Κωδικοί Σφαλμάτων (Fault Codes):

- FC0: Περιπτώσεις στις οποίες δεν εντοπίζεται σβήσιμο του drone. Ενώ το έχουμε ακτινοβολήσει, εκείνο συνεχίζει να λειτουργεί κανονικά όπως επίσης και να δέχεται εντολές από το τηλεχειριστήριο.
- FC1: Περιπτώσεις όπου υπάρχει σβήσιμο, οι κινητήρες έχουν σταματήσει να λειτουργούν, ακούγεται ηχητική ειδοποίηση από τους ελεγκτές ταχύτητας (ESC) ότι το κανάλι του throttle έχει μη κανονική τιμή και το drone είναι σε μία κατάσταση όπου δεν μπορεί να δεχθεί καμία εντολή από το τηλεχειριστήριο. Στην κατηγορία αυτή βλαβών εντάσσονται και οι περιπτώσεις που η ζημιά που προκαλούσαμε ήταν τόσο μεγάλη για να επαναλειτουργήσει το drone δεν αρκούσε η επαναφορά της τροφοδοσίας αλλά χρειαζόταν επαναφόρτωση του λογισμικού.
- FC2: Περιπτώσεις όπου το drone έχει σταματήσει, οι κινητήρες του δεν λειτουργούν αλλά δεν ακούγεται ηχητική ειδοποίηση από τους ελεγκτές ταχύτητας (ESC) αλλά ο χειριστής ακολουθώντας την λειτουργία του bind με το RF module μπορούσε να επαναλειτουργήσει το drone.
- FC3: Περιπτώσεις όπου το drone έχει σταματήσει, οι κινητήρες του δεν λειτουργούν αλλά δεν ακούγεται ηχητική ειδοποίηση από τους ελεγκτές ταχύτητας (ESC) αλλά ο χειριστής δεν μπορεί να ακολουθήσει την λειτουργία του bind με το RF module και δεν μπορούσε να επαναλειτουργήσει το drone.
- FC4: Περιπτώσεις όπου οι κινητήρες του drone συνεχίζουν να λειτουργούν (να κινούνται) αλλά το drone δεν δέχεται καμία εντολή. Σε αυτό τον κωδικό λάθους περιλαμβάνονται και όλες οι περιπτώσεις που υπήρχε σταμάτημα του drone αλλά δεν είναι δυνατόν να καθοριστεί ο λόγος.

Συνοπτικά λοιπόν οι Κωδικοί Βλάβης (Fault Codes) είναι οι εξής:

Fault Codes	Description
FC0	No stop
FC1	Engines stop
FC2	No bind
FC3	Stop with bind capability
FC4	Stop/Unspecified

**Εικόνα 33: Fault Codes**

Σαν γενικό σχόλιο από τα επόμενα πειράματα πρέπει να αναφέρουμε ότι φαίνεται τα fault codes FC3, FC2, FC1 να έχουν μια συμπεριφορά αύξουσας δυσκολίας με κριτήριο τον χρόνο έκθεσης.

Κάποια από τα πειράματα παρουσίασαν αποτελέσματα και καταστάσεις οι οποίες διέφεραν από το συνηθισμένο. Στην συνέχεια γίνεται μία αναλυτικότερη περιγραφή των παραμέτρων που ίσχυαν στα πειράματα αυτά όπως επίσης και οι αντίστοιχες ειδικές περιπτώσεις αποτελεσμάτων.

- Σε πείραμα με τις εξής παραμέτρους:

Setup: A  
PRF: 100 Hz  
Eincident: 10 kV  
Einc\_MAX\_long: 12,7-13,13 kV  
Einc\_MAX\_avg(kV): 12,915 kV  
Fault Code: FC3  
Time: 1sec

εδώ ελαχιστοποιήσαμε το χρόνο έκθεσης, δηλ. σταματήσαμε την ακτινοβολία όσο πιο γρήγορα μπορούσαμε από τη στιγμή που έσβησε

- Σε άλλο πείραμα με τις εξής παραμέτρους:

Setup: A  
PRF: 100 Hz  
Eincident: 12 kV  
Einc\_MAX\_long: 13 kV  
Einc\_MAX\_avg(kV): 13 kV  
Fault Code: FC1  
Time: 1sec

Μετά το power on συνέχισε να μην βλέπει τους κινητήρες και χρειάστηκε να ξαναπεράσουμε το software

- Σε δύο πειράματα με κοινές παραμέτρους:

Setup: B  
PRF: 100 Hz  
Eincident: 12 kV  
Einc\_MAX\_long: 13 kV  
Einc\_MAX\_avg(kV): 13 kV

Αλλά με διαφορετικό χρόνο είχαμε για:

- Time: 3 sec -> Fault Code: FC1 με Σφάλμα κινητήρων αλλά αυτή τη φορά με συνεχόμενο κόκκινο λαμπάκι

- Time: 3 sec -> Fault Code: FC3 (ο μικρός χρόνος έκθεσης άλλαξε το αποτέλεσμα)
- Σε πείραμα με παραμέτρους:
  - Setup: C
  - PRF: 100 Hz
  - Eincident: 5-6 kV (8)
  - Einc\_MAX\_long: 5,149 kV
  - Einc\_MAX\_avg(kV): 5,149 kV
  - Fault Code: FC1
  - Time: 1sec

Αλλά με την κόκκινη LED ένδειξη αναμμένη.

- Σε δύο πειράματα με κοινές παραμέτρους:
  - Setup: C
  - PRF: 100 Hz
  - Eincident: 3-4 kV (6)
  - Einc\_MAX\_long: 4,0597-4,4179 kV
  - Einc\_MAX\_avg(kV): 4,2388 kV

Αλλά με διαφορετικό χρόνο είχαμε για:

- Time: 2 sec -> Fault Code: FC2 με το κόκκινο λαμπάκι ανάβει με μεγαλύτερη συχνότητα από ότι στην κανονική λειτουργία.
- Time: 10 sec -> Fault Code: FC5 οι κινητήρες λειτουργούσαν αναμμένο μπλε λαμπάκι και δεν δεχόταν εντολές από το τηλεχειριστήριο και δεν μπορούσε να κάνει arm
- Σε δύο πειράματα με κοινές παραμέτρους:
  - Setup: C
  - PRF: 100 Hz
  - Eincident: 6 kV (9-10)
  - Einc\_MAX\_long: 6,0896 – 6,806 kV
  - Einc\_MAX\_avg(kV): 6,4478 kV

Αλλά με διαφορετικό χρόνο είχαμε:

- Time: 5 sec -> Fault Code: FC4 Συνέχεια αναμμένο το μπλε λαμπάκι. Οι κινητήρες δεν έσβησαν το τηλεχειριστήριο δεν μπορεί να δώσει κάποια εντολή ούτε να κάνει bind
- Time: 5 sec -> Fault Code: FC4 Σταμάτησαν οι κινητήρες κανένα αναμμένο λαμπάκι. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες
- Σε τρία πειράματα με κοινές παραμέτρους:
  - Setup: C

PRF: 100 Hz  
Eincident: 6 kV (9-REPEAT)  
Einc\_MAX\_long: 5,7313 – 6,209 kV  
Einc\_MAX\_avg(kV): 5,97015 kV

Αλλά με διαφορετικό χρόνο είχαμε για:

- Time: 5 sec -> Fault Code: FC4 Αναμμένο μπλε λαμπάκι συνεχόμενα και δεν δέχεται εντολές. Οι κινητήρες δουλεύουν ακόμα
- Time: 3 sec -> Fault Code: FC4 Σταμάτησαν οι κινητήρες κανένα αναμμένο λαμπάκι. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες
- Time: 2 sec -> Fault Code: FC4 Σταμάτησαν οι κινητήρες μπλε αναμμένο λαμπάκι. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες

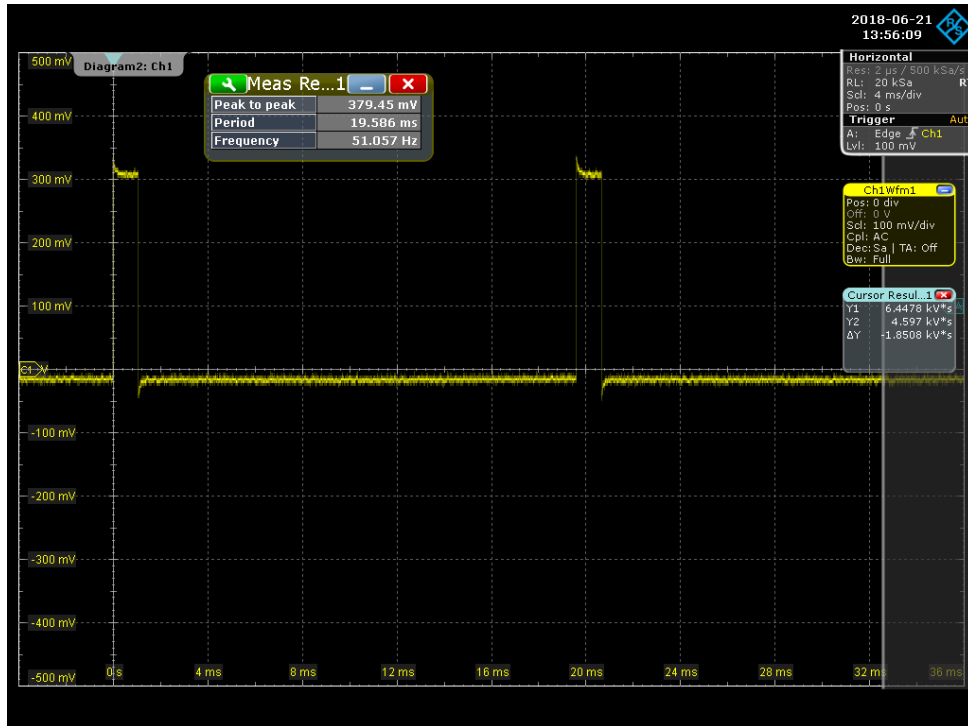
Αξίζει να σημειωθεί ότι σε μια περίπτωση σβησίματος παρατηρήθηκε παρεμβολή και στο RF module.

Το RF module έχει τέσσερα κανάλια εντολών τα οποία πηγαίνουν στον ελεγκτή πτήσης AMP 2.8. Τα κανάλια αυτά είναι:

- Channel1: Pitch
- Channel2: Roll
- Channel3: Yaw
- Channel4: Throttle

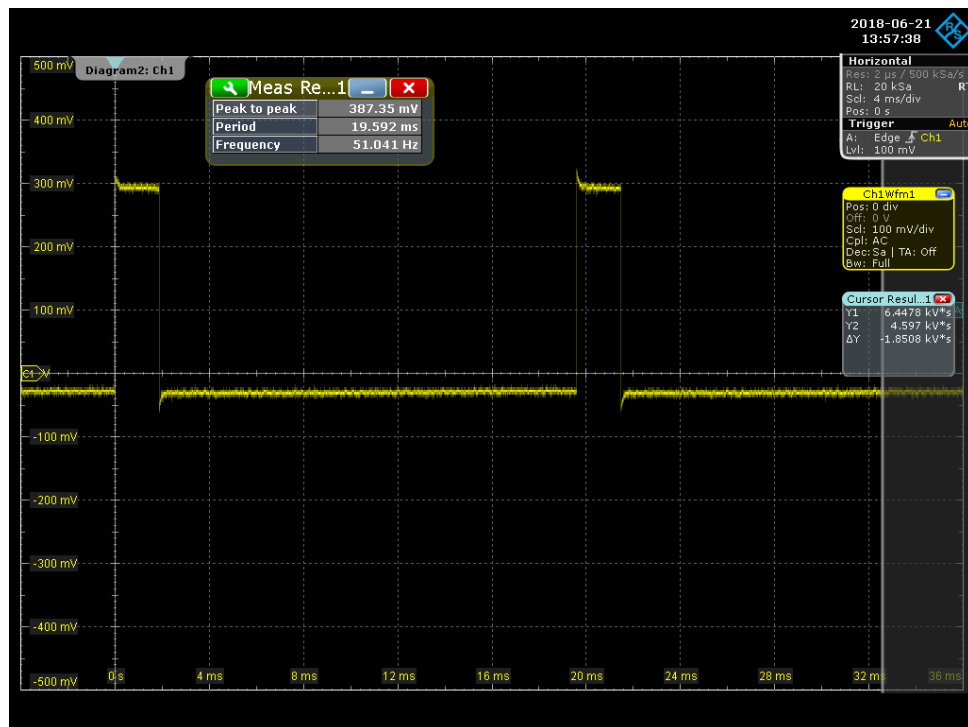
Το κανάλι 2 Channel2 Pitch είναι αυτό που με συγκεκριμένη ακολουθία κάνεις bind.

Σε κατάσταση ηρεμίας οι παλμού που στέλνει το RF module είναι οι παρακάτω:



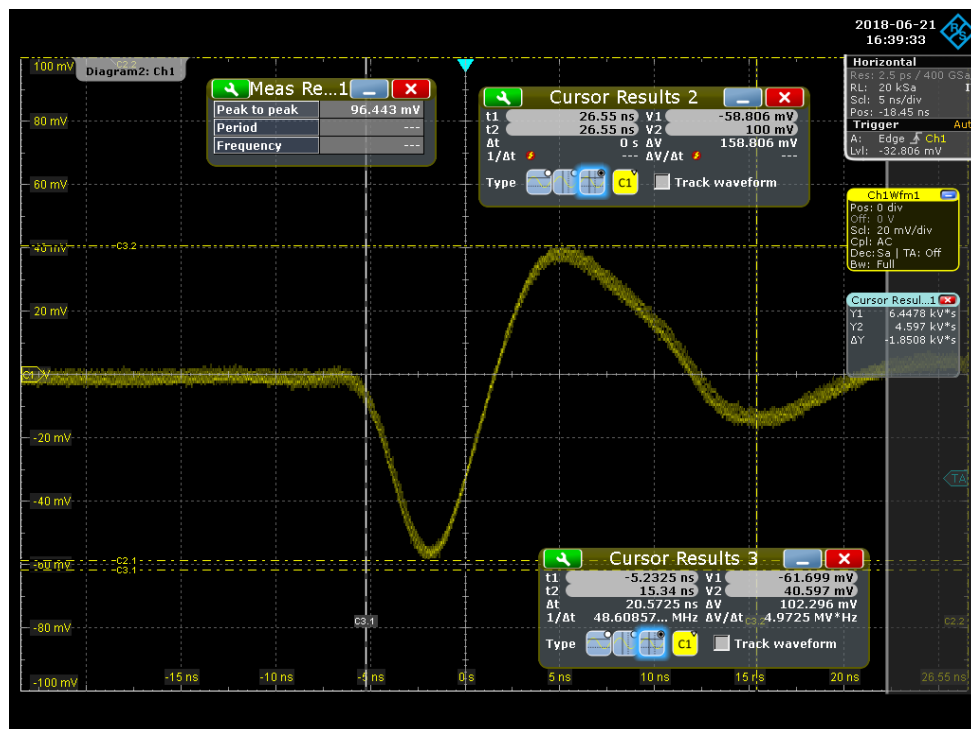
Εικόνα 34: Παλμός του throttle (γκάζι) σε κατάσταση ηρεμίας

Ενώ στις περιπτώσεις που ο χειριστής ανεβάζει τον μοχλό του γκαζιού(throttle) η έξοδος του RF Module προς τον APM2.8 είναι:



Εικόνα 35: Παλμός του throttle (γκάζι) με εντολή από το τηλεχειριστήριο

Μετά την ακτινοβολία ξαναμετρήθηκε το κανάλι και βρήκαμε την παρακάτω κυματομορφή:



Εικόνα 36: Παλμός του throttle (γκάζι) μετά την έκθεση σε ακτινοβολία

Αυτό ήταν μια ισχυρή ένδειξη ότι επηρεάζουμε περιφερειακά στοιχεία του AMP 2.8.

Στην επόμενη όμως σειρά πειραμάτων επικεντρωθήκαμε στον AMP 2.8 ο οποίος είναι και το πιο κρίσιμο ηλεκτρονικό στοιχείο του UAV.

Τα πειράματα δεν χρησιμοποιούσαν το GPS γιατί δεν ήταν κρίσιμο για την λειτουργία του UAV.

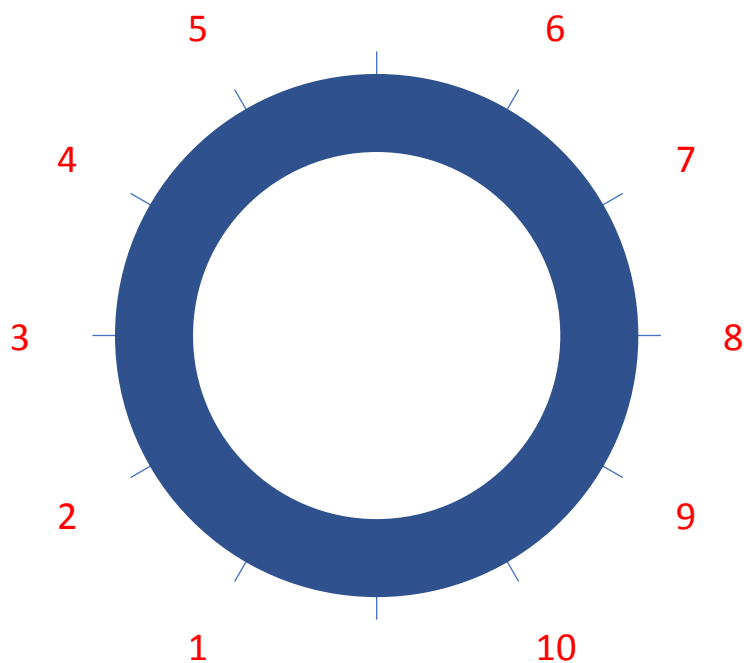
Όπως προαναφέραμε, από όλα τα πειράματα παρατηρήθηκε ότι με τάση μεγαλύτερη από τα 8kV υπήρχε απόλυτη επιτυχία στο σταμάτημα του drone. Όσο μειωνόταν η τάση τόσο μειωνόταν και η συχνότητα επιτυχίας στο σταμάτημα του drone, μέχρι το σημείο που το drone δεν επηρεαζόταν καθόλου από την παρεμβολή.

### Επόμενα πειράματα και αποτελέσματα

Για την υλοποίησή της τελευταίας σειράς των πειραμάτων κρίθηκε απαραίτητο να γίνει βαθμονόμηση(calibration) στο ποτενσιόμετρο του FID έτσι ώστε να γνωρίζουμε ακριβώς την τάση του παλμού μας σε κάθε σημείο/γραμμή του ποτενσιόμετρου του.

Για την βαθμονόμηση του FID για τις τάσεις άνω των 8kV χρησιμοποιήθηκε 40dB εξασθενητής στην έξοδο του αισθητήρα Montena SFE3-5G ενώ δεν χρησιμοποιήθηκε κάποιος εξασθενητής στην έξοδο του FID.

Για τα πειράματα με τιμές κάτω των 8kV χρησιμοποιήθηκε 30dB εξασθενητής στην έξοδο του Montena και 6dB εξασθενητής στην έξοδο του FID.



**Εικόνα 37: Βαθμονόμηση του ποτενσιομέτρου του FID**

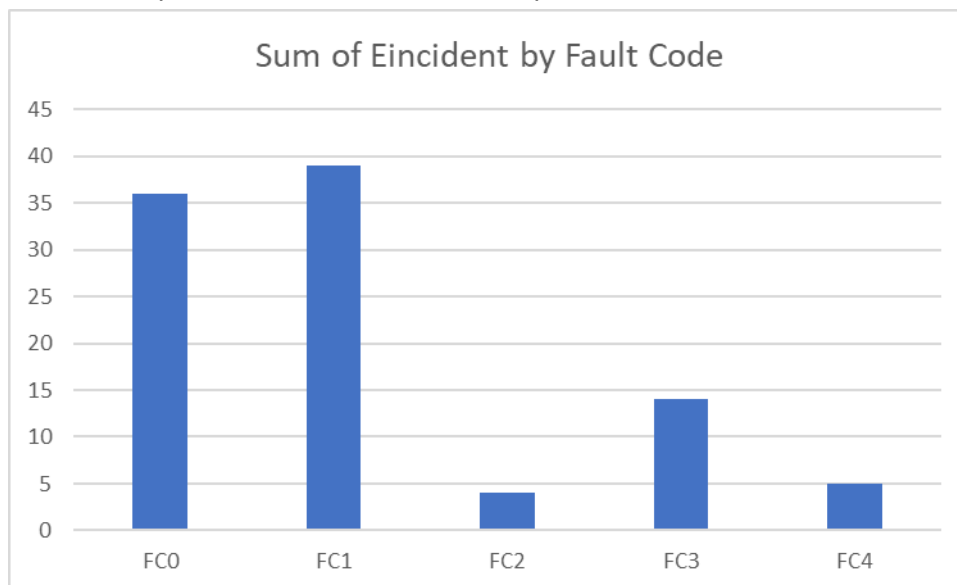
Η τάση των παλμών που μετρήθηκε για κάθε σημείο ξεχωριστά καθώς και οι εξασθενητές που χρησιμοποιήθηκαν φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα:

Θέση	Τάση V(kV)	Attenuator	
		FID	Montena
4	3,97015	6	30
6	4,2388	6	30
7	4,68655	6	30
8	5,194	6	30
8-9	5,4328	6	30
9	5,8707	6	30
10	6,4478	6	30
8	9,8	0	40
10	12,915	0	40
12	13	0	40



Κατά την διάρκεια του calibration του FID παρατηρήθηκε ότι η τιμή εξόδου του FID αλλάζει οπότε οι τιμές που αναφέρονται παραπάνω είναι η μέση τιμή πολλαπλών δοκιμών.

Τα τελικά αποτελέσματα των τελευταίων πειραμάτων είναι τα εξής:



Fault Code	Count of Eincident
FC0	36
FC1	39
FC2	4
FC3	14
FC4	5

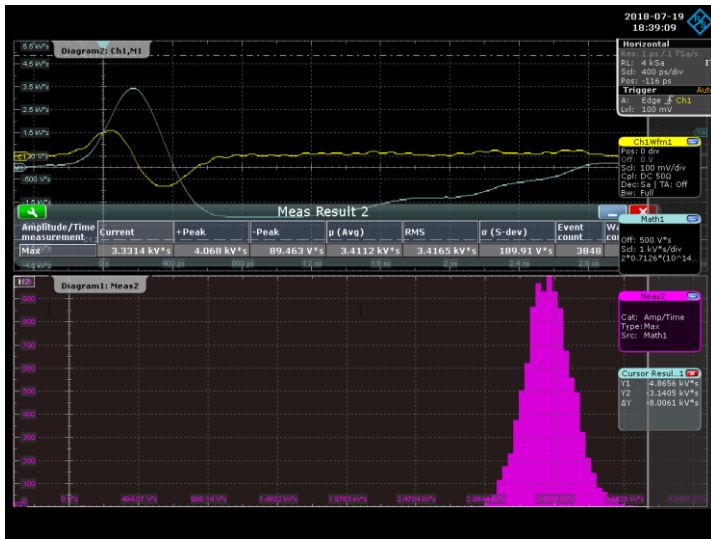
**Εικόνα 38: Sum of Eincident by Fault Code**

#### **1.4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων – Συζήτηση**

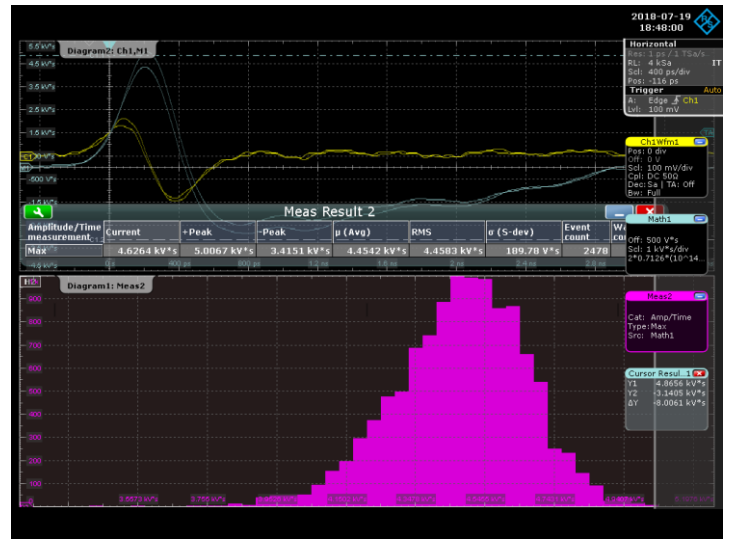
Τα αποτελέσματα ή τα ευρήματα που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, εδώ αναλύονται, σχολιάζονται, κρίνονται και αποτιμώνται. Τονίζονται τα ενδιαφέροντα ή πρωτότυπα σημεία και σχολιάζονται τα αποτελέσματα που ήταν ή δεν ήταν αναμενόμενα. Επίσης συγκρίνονται αν είναι δυνατόν με αντίστοιχα αποτελέσματα άλλων υπάρχουσών ερευνών πάνω στο ίδιο ή ανάλογο αντικείμενο και σχολιάζονται συμπτώσεις και διαφορές. Τέλος επιχειρείται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε πιο γενικό και αφηρημένο επίπεδο, με στόχο την αποτίμηση της συνεισφοράς τους στην ουσία του υπό διερεύνηση θέματος.



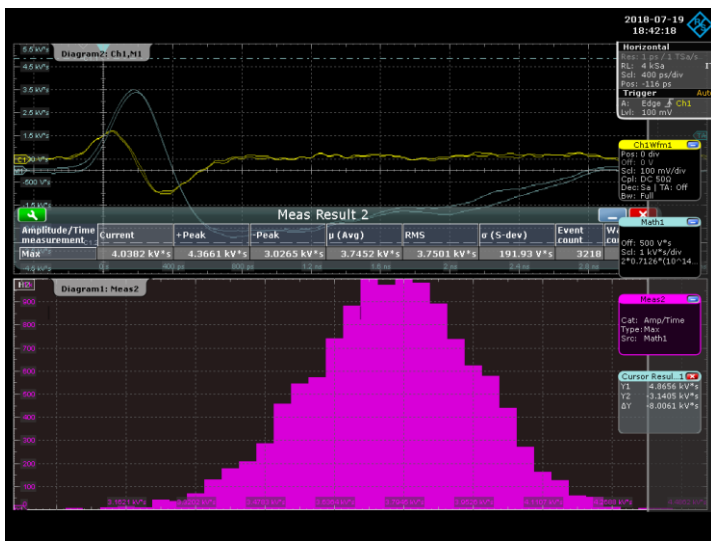
Όπως προαναφέραμε υπήρχαν ενδείξεις ότι η έξοδος του FID φάνηκε να μην είναι σταθερή για την εξήγηση λοιπόν του παραπάνω φαινομένου με την βοήθεια του παλμογράφου δημιουργήσαμε τα ιστογράμματα για τις θέσεις του ποτενσιόμετρου του FID που αφορά αυτές τις τιμές τάσης(4kV-6kV). Συγκεκριμένα πήραμε τα ιστογράμματα για τις θέσεις 4, 6, 7, 8, 9 και 10 του ποτενσιόμετρου για να εξηγήσουμε το φαινόμενο αυτό.



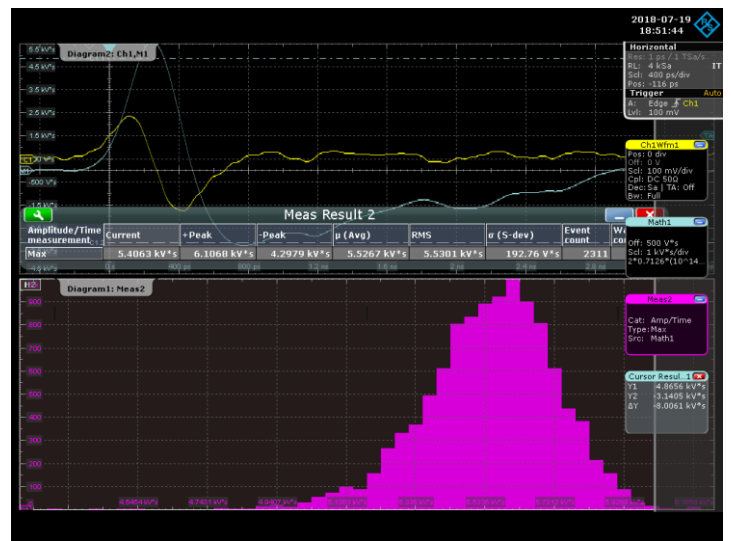
Θέση 4



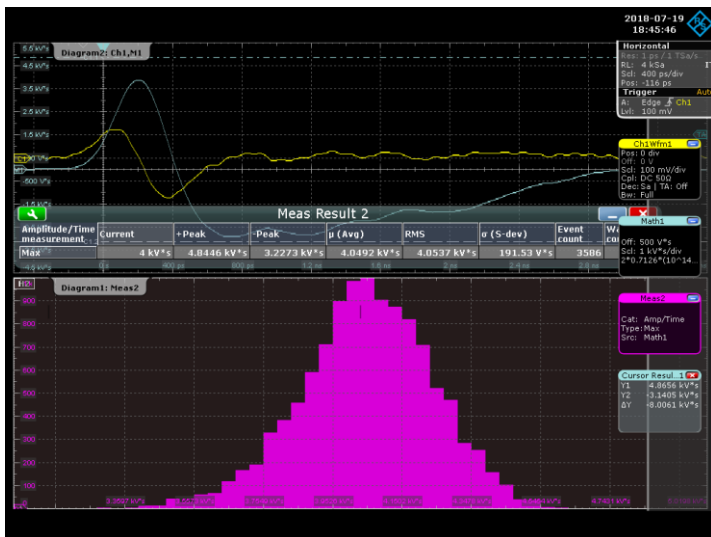
Θέση 8



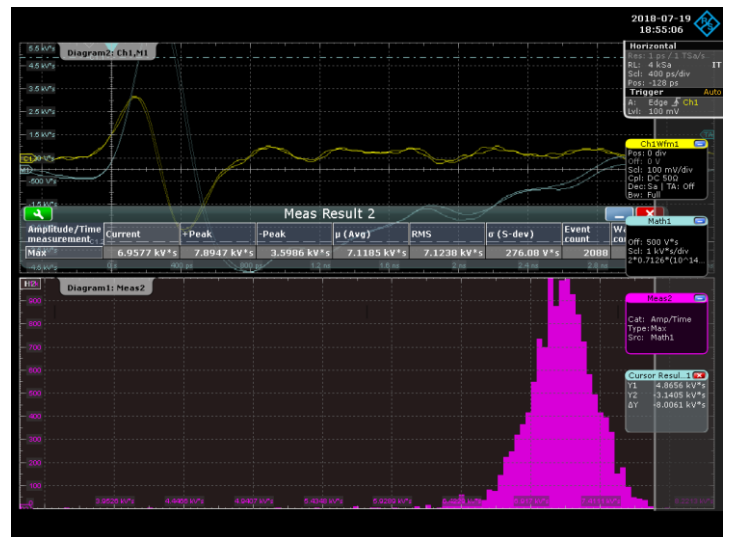
Θέση 6



Θέση 9



Θέση 7



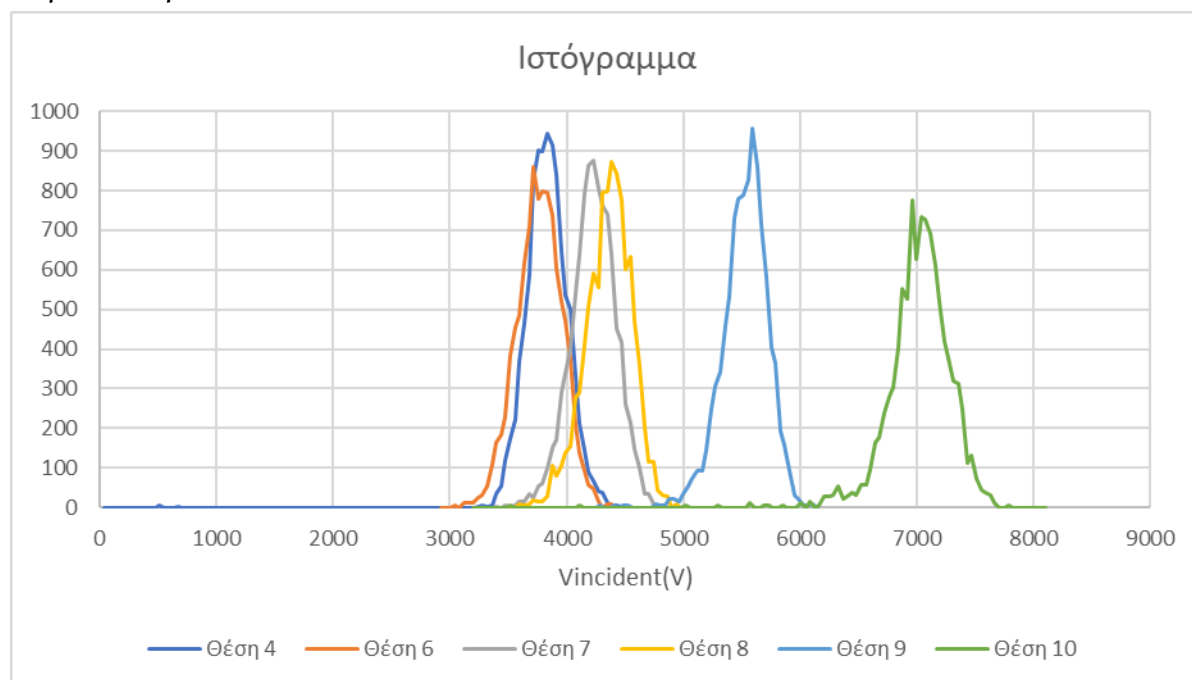
Θέση 10

Ο παλμογράφος μας δίνει τη δυνατότητα να δούμε την μέση τιμή του ιστογράμματος( $\mu$ ), την τιμή Μέσης Τετραγωνικής Ρίζας(RMS), που από τη στιγμή που το σήμα μας δεν έχει DC component η RMS είναι ίση με την τυπική απόκλιση, καθώς και το μέγιστο πλάτος των παλμών(Peak) από τους οποίους έγινε η δειγματοληψία για την δημιουργία των ιστογραμμάτων.

Αναλυτικά τα αποτελέσματα για τις 6 θέσεις:

Θέση FID	$\mu$ (kV)	Vpeak(kV)	RMS(kV)
4	3,4112	4,068	3,4165
6	3,7452	4,3661	3,7501
7	4,0492	4,8446	4,0537
8	4,4542	5,0067	4,4583
9	5,5267	6,1068	5,53013
10	7,1185	7,8947	7,1238

Εξάγοντας τα παραπάνω ιστογράμματα σε ένα αρχείο excel δημιουργούμε την γραφική παράσταση όλων:



**Εικόνα 40: Γραφική παράσταση όλων των ιστογραμμάτων**

Από το παραπάνω γράφημα είναι εμφανές ότι στις μεγάλες θέσεις του ποτενσιόμετρου έχουμε έντονη μεταβολή της τάσης του παλμού. Σε αντίθεση στις τέσσερις χαμηλότερες θέσεις του ποτενσιόμετρου(4, 6, 7, 8) η μία μέτρηση επικαλύπτει την άλλη στα 3,5-4,5kV και παρατηρούμε ότι η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση δεν έχουν μεγάλες διαφορές.

Αυτό εξηγεί τον λόγο που σε αυτές τις θέσεις έχουμε μεικτά αποτελέσματα όσον αφορά το σβήσιμο του εναέριου οχήματος. Ταυτόχρονα περιορίζουμε αυτή τη γκρι ζώνη στα 3,5-4,5kV έτσι μπορούμε να υποθέσουμε ότι σε αυτά τα όρια υπάρχει η μέγιστη τάση παλμού που απαιτείται για την επιτυχή κατάρριψη του (threshold voltage) αλλά πιθανός σε αυτά τα πλάτη παλμών ίσως απαιτείται μεγαλύτερη χρονική έκθεση σε ακτινοβολία.

### *1.5. Συμπεράσματα – Προτάσεις*

Εδώ διατυπώνονται τα συμπεράσματα από την όλη εργασία και διατυπώνονται απαντήσεις στα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν στην Εισαγωγή. Επίσης εδώ προτείνονται και διέξοδοι ή προοπτικές που άνοιξε η παρούσα εργασία αλλά δεν ήταν δυνατόν να ερευνηθούν / καλυφθούν στο πλαίσιο της, άρα προτείνονται ως μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας. Τέλος εδώ εντάσσονται και προτάσεις ή σχέδια που αφορούν την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των αποτελεσμάτων της έρευνας.

Με βάση τα αποτελέσματα των πειραμάτων μπορούμε να πούμε ότι δόθηκαν οι εξής απαντήσεις στα ερωτήματα που αποτελούσαν τον πρωτεύοντα σκοπό αυτής της διπλωματικής εργασίας:

- I. Είναι σαφώς εφικτό να προκληθεί παρεμβολή, σύγχυση και καταστροφή σε ένα Μη Επανδρωμένο Εναέριο Όχημα (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) σε πολλές περιπτώσεις.
- II. Οι περιπτώσεις καταστροφής με 100% επιτυχία εμφανίζονται σε ακτινοβολίες άνω των 6kV.
- III. Το κρίσιμο εξάρτημα που επηρεάζουμε στο UAV το οποίο είναι ευπαθές στην έκθεση σε ακτινοβολία είναι ο ίδιος ο ελεγκτής πτήσης APM 2.8 και υπάρχουν και σοβαρές ενδείξεις ότι πέραν αυτού επηρεάζονται και τα περιφερειακά του ηλεκτρονικά εξαρτήματα.
- IV. Ο χρόνος που εκθέτουμε το μη επανδρωμένο εναέριο όχημα, η συχνότητα εκπομπής των παλμών αλλά και η πόλωση δεν παίζουν κρίσιμο ρόλο για την κατάρριψη του, τουλάχιστον για την απόσταση των 3,5m εντός ανηχοϊκού θαλάμου που έλαβαν μέρος τα πειράματά μας.

Μελλοντικά πειράματα που θα μπορούσαν να υλοποιηθούν είναι τα εξής:

- I. Αρχικά θα μπορούσε να βρεθεί η ακριβής τάση παλμού που απαιτείται για την επιτυχή κατάρριψη του μη επανδρωμένου εναέριου οχήματος. Η γεννήτρια Agilent 33220A δίνει την δυνατότητα να ορίσεις έναν συγκεκριμένο αριθμό παλμών για να εκπέμψει. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσαμε να δημιουργήσουμε ένα ιστόγραμμα γνωρίζοντας τον αριθμό των παλμών με τους οποίους θα ακτινοβολούμε το όχημα μας. Έτσι πιθανώς να βρίσκαμε ακριβώς την τιμή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, αλλά και τον αριθμό των παλμών που απαιτείται για την επιτυχή κατάρριψη του οχήματος μας.

- II. Όπως προαναφέραμε τα πειράματα έλαβαν χώρο σε ανηχοϊκό θάλαμο και σε απόσταση 3,5m. Καλό θα ήταν να διερευνηθεί η συμπεριφορά του παλμού αλλά και του οχήματος στην περίπτωση που η εκπομπή θα γίνει σε ελεύθερο χώρο αλλά και σε μεγαλύτερη απόσταση. Σε αυτή τη περίπτωση παράγοντες όπως η επαναληψιμότητα του παλμού(PRF) αλλά και η πόλωση του, που στα πειράματα της παρούσας εργασίας δεν έπαιξαν κρίσιμο ρόλο, να αποδειχτούν πολύ πιο καταλυτικοί για την επιτυχή κατάρριψη του οχήματος.
- III. Τέλος για να διερευνηθεί ακόμα περισσότερο η επίδραση της ακτινοβολίας πάνω στους μικροεπεξεργαστές, όπως ο ελεγκτής πτήσης APM2.8, θα μπορούσε να προγραμματιστεί από την αρχή ένας τέτοιος μικροεπεξεργαστής, ο οποίος θα έχει την δυνατότητα να βγάζει σφάλματα σε περίπτωση που παρατηρηθεί κάποια επίδραση πάνω σε κρίσιμα στοιχεία του(πχ το ρολόι του).

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ - ΠΗΓΕΣ

1. Zurich EMC Symposium, Feb. 1999.
2. W. A. Radasky, C. E. Baum, and M. W. Wik, "Introduction to the Special Issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)," in *IEEE Trans. on Electromagn. Compat*, vol. 46, no. 3, pp. 314-321, Aug. 2004.
3. [https://el.wikipedia.org/wiki/Μη\\_επανδρωμένο\\_αεροσκάφος](https://el.wikipedia.org/wiki/Μη_επανδρωμένο_αεροσκάφος)
4. ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΣΕΜΙΝΑΡΙΟΥ ΓΙΑ ΤΑ ΜΗ ΕΠΑΝΔΡΩΜΕΝΑ ΟΧΗΜΑΤΑ - ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΝΤΙΜΕΤΡΩΝ Του Αντιστρατήγου ε.α. Σ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΥ
5. Η συμβολή των Μη Επανδρωμένων Εναέριων Οχημάτων στα Τεχνικά Έργα, Β. Δημητρίου – Π. Γιαννόπουλος, Πανεπιστήμιο Πατρών
6. Colomina , I. & Molina, P., 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Τόμος 92, pp. 79-97
7. Eisenbeiß, H., 2009. UAV Photogrammetry. Zurich: ETH ZURICH.
8. Kreimer, B. & Waitte, M., 2014. The Feasibility of Using Small Unmanned Aerial Vehicles for Mapping News Events. New York, Columbia University.
9. Balaras, A. C. & Argiriou, A. A., 2002. Infrared thermography for building diagnostics. *Energy and Buildings*, Issue 34, pp. 171-183.
10. Vacanas, Y., Themistocleous, K., Agapiou, A. & Hadjimitsis, D., 2015. Building Information Modelling (BIM) and Unmanned Aerial
11. Zhang Tao, Chen Yazhou and Cheng Erwei, "Continuous wave radiation effects on UAV data link system," *2013 Cross Strait Quad-Regional Radio Science and Wireless Technology Conference*, Chengdu, 2013, pp. 321-324.
12. V. Mach, S. Kovář, J. Valouch, M. Adánek and R. M. S. Silva, "Threshold levels of electromagnetic susceptibility for unarmed air vehicles," *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL)*, Singapore, 2017, pp. 2483-2488.
13. Y. Chen, D. Zhang, E. Cheng and X. Wang, "Investigation on susceptibility of UAV to radiated IEMI," *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, Singapore, 2018, pp. 718-722.
14. <http://ardupilot.org/copter/docs/common-arduino-board-leds.html>
15. <http://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?t=1261306>
16. [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_56095\\_Turnigy\\_2700mAh\\_3S\\_20C\\_Lipo\\_Pack\\_Suitable\\_for\\_Quantum\\_Nova\\_Phantom\\_QR\\_X350\\_.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_56095_Turnigy_2700mAh_3S_20C_Lipo_Pack_Suitable_for_Quantum_Nova_Phantom_QR_X350_.html)



17. IEC TR 61000-1-5 First edition 2004-11 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-5: General – High power electromagnetic (HPEM) effects on civil systems
18. [https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads\\_ed/local\\_us/web\\_dwl\\_promotion/Radasky\\_UtilityForum\\_Severe\\_EM\\_Threats.pdf](https://www.phoenixcontact.com/assets/downloads_ed/local_us/web_dwl_promotion/Radasky_UtilityForum_Severe_EM_Threats.pdf)
19. <http://tass.com/defense/961402>
20. <http://antikopter.ru/stupor>
21. [https://www.armyrecognition.com/weapons\\_defence\\_industry\\_military\\_technology\\_uk/new\\_russian\\_rex-1\\_anti-drone\\_rifle\\_system\\_ready\\_to\\_be\\_tested.html](https://www.armyrecognition.com/weapons_defence_industry_military_technology_uk/new_russian_rex-1_anti-drone_rifle_system_ready_to_be_tested.html)
22. <https://www.flyingtech.co.uk/electronics/turnigy-9x-24ghz-8ch-receiver-v2>
23. <http://rcgears.co/en/airplane-radio-system/172-turnigy-9x-9ch-transmitter-w-module-8ch-receiver-mode-2-v2-firmware-1000000001587.html>
24. <https://www.rcmoment.com/p-rm1051.html>
25. <http://www.deltawings.fr/en/speed-controllers/106-turnigy-plush-12amp-2a-bec-besc.html>
26. [https://www.montena.com/fileadmin/technology\\_tests/documents/data\\_sheets/Data\\_sheet\\_BL3-5G\\_balun.pdf](https://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/data_sheets/Data_sheet_BL3-5G_balun.pdf)
27. [https://www.montena.com/uploads/media/Data\\_sheet\\_MOL3000\\_analog\\_optical\\_link.pdf](https://www.montena.com/uploads/media/Data_sheet_MOL3000_analog_optical_link.pdf)
28. <https://www.amazon.com/SMA-Attenuator-30dB/dp/B00IFCLTY6>
29. [https://www.rohde-schwarz.com/cz/product/rto1000-productstartpage\\_63493-191808.html](https://www.rohde-schwarz.com/cz/product/rto1000-productstartpage_63493-191808.html)
30. <http://www.transcat.com/keysight-agilent-33220a-used-for-sale-33220a-used-310082>
31. [https://www.montena.com/fileadmin/technology\\_tests/documents/data\\_sheets/Data\\_sheet\\_SF\\_free\\_field\\_sensors.pdf](https://www.montena.com/fileadmin/technology_tests/documents/data_sheets/Data_sheet_SF_free_field_sensors.pdf)
32. <https://interferencetechnology.com/double-ridged-waveguide-horn-antenna-boasts-extended-frequency-range/#>

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

Αναλυτικά αποτελέσματα πειραμάτων και μετρήσεων πρώτης φάσης:

Test Number	setup	R(m)	Vin	PRF(Hz)	sec	Comments
1	A	3,5	Max	100	0:00:05	Αρχικά αύξησε ταχύτητα-σβήσιμο στο τέλος
2	A	3,5	Max	500	0:00:03	Αύξηση ταχύτητας και μετά σβήσιμο
3	A	3,5	Max	1000	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο
4	A	3,5	max/2	100	0:00:43	Παρατηρήθηκε jamming(τυχαία αυξομείωση ταχύτητας) και σβήσιμο
5	A	3,5	max/2	100	0:00:17	3:00:21 μμ ηχητική ειδοποίηση-σβήσιμο
6	A	3,5	max/2	100	0:00:17	3:05:14 πμ ηχητική ειδοποίηση -σβήσιμο
7	A	3,5	max/2	500	0:00:03	Σβήσιμο
8	A	3,5	max/2	1000	0:00:03	Αύξηση ταχύτητας και σβήσιμο. Corrupt log files και δεν μπορούσαμε να τα τραβήξουμε. Κάναμε upload το firmware και clear τα data logs.
9	A	3,5	max/2	1000	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο
10	A	3,5	Min	100	0:00:03	Σβήσιμο
11	A	3,5	Min	500	0:00:13	3:26:36 μμ αύξησε ταχύτητα-σβήσιμο
12	A	3,5	Min	1000	0:00:18	Συνεχόμενες αυξομειώσεις ταχύτητας-σβήσιμο και παρατεταμένη ηχητική ειδοποίηση.και crash error
13	B	3,5	Min	100	0:00:03	Σβήσιμο
14	B	3,5	Min	500	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο
15	B	3,5	Min	1000	0:00:03	Σβήσιμο
16	B	3,5	max/2	100	0:00:03	Σβήσιμο

Test Number	setup	R(m)	Vin	PRF(Hz)	sec	Comments
17	B	3,5	max/2	500	0:00:03	Σβήσιμο
18	B	3,5	max/2	1000	0:00:03	Σβήσιμο
19	B	3,5	Max	100	0:00:03	Σβήσιμο
20	B	3,5	Max	500	0:00:09	14:18:32 μείωση ταχύτητας-σβήσιμο.
21	B	3,5	Max	1000	0:00:43	14:23:48 μπιπ και αλλαγή συμπεριφοράς-σβήσιμο
22	B	3,5	Max	1000	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο
23	C	3,5	Max	100	0:02:21	11:51:29 αύξηση ταχύτητας- πιθανό jamming από 11:53:07 μείωση ταχύτητας και πιθανή αλλαγή θέσης- σβήσιμο. Το drone το βρήκαμε σε άλλη θέση
24	C	3,5	Max	100	0:00:02	Σβήσιμο
25	C	3,5	Max	500	0:00:02	Σβήσιμο
26	C	3,5	Max	1000	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο
27	C	3,5	max/2	100	0:00:03	Σβήσιμο
28	C	3,5	max/2	500	0:00:03	12:49:20 αλλαγή ταχύτητας αρχικά και σβήσιμο
29	C	3,5	max/2	1000	0:00:02	Σβήσιμο-συνεχόμενη ηχητική ένδειξη μετά
30	C	3,5	Min	100	0:00:04	1:00:37 ηχητική ένδειξη και σβήσιμο
31	C	3,5	Min	500	0:00:03	Σβήσιμο
32	C	3,5	Min	1000	0:00:03	Σβήσιμο
33	D	3,5	Min	100	0:00:03	Σβήσιμο
34	D	3,5	Min	500	0:00:03	Σβήσιμο

Test Number	setup	R(m)	Vin	PRF(Hz)	sec	Comments
35	D	3,5	Min	1000	0:00:03	Σβήσιμο-στο ξεκίνημα ήταν σταματημένοι 2 έλικες
36	D	3,5	max/2	100	0:00:03	Σβήσιμο-στο ξεκίνημα ήταν σταματημένοι 2 έλικες
37	D	3,5	max/2	500	0:00:03	Σβήσιμο-μπιπ από το τηλεχειριστήριο από την αρχή
38	D	3,5	max/2	1000	0:00:02	Αύξηση ταχύτητας αρχικά-Σβήσιμο
39	D	3,5	Max	100	0:00:04	Σβήσιμο-συνεχόμενη ηχητική ένδειξη μετά
40	D	3,5	Max	500	0:00:00	Ακαριαίο σβήσιμο-συνεχόμενη ηχητική ένδειξη μετά
41	D	3,5	Max	1000	0:00:00	Αύξηση ταχύτητας και σβήσιμο συνεχόμενη ηχητική ένδειξη μετά
42	A	3,5	max(atten)	100	0:00:13	Συνεχόμενη μείωση ταχύτητας δεν ακούστηκε κάποια ηχητική ένδειξη κατά το σβήσιμο
43	A	3,5	max(atten)	500	0:00:03	Σβήσιμο. Ηχητική ένδειξη ακούστηκε αρκετά αργότερα
44	A	3,5	max(atten)	1000	0:00:05	12:42:55 Αύξησε ταχύτητα. Και 58 έσβησε δεν ακούστηκε ηχητική ένδειξη. 12:44:08 αφαιρέσαμε την μπαταρία
45	A	3,5	max/2(atten)	100	0:00:16	1:10:52 μμ ηχητική ένδειξη. 1:10:54 μμ ηχητική ένδειξη και δεν ακούγονταν οι έλικες 13:11:21 μμ μπιπ
46	A	3,5	max/2(atten)	500	0:01:05	Αύξηση ταχύτητας και συνεχόμενη ηχητική ένδειξη μέχρι το σβήσιμο
47	A	3,5	max/2(atten)	500	0:03:23	1:27:06 μμ ακούστηκε η πρώτη ηχητική ένδειξη 1:27:12 μμ αύξηση ταχύτητας-1:27:37 μμ σταμάτησαν οι έλικες 1:28:30 το βγάλαμε από τον θάλαμο
48	A	3,5	max/2(atten)	1000	0:00:06	1:35:49 μμ ηχητική ένδειξη-σβήσιμο

Test Number	setup	R(m)	Vin	PRF(Hz)	sec	Comments
49	A	3,5	min(atten)	100	0:03:23	στο 1 λεπτό αυξομείωση ταχύτητας στο 1:45 ηχητική ένδειξη και παύση 3:23 σβήσιμο
50	A	3,5	min(atten)	500		13:56:44 ηχητική ένδειξη-αύξηση ταχύτητας 13:58:04 παύση-μείωση ταχύτητας-συνεχόμενη ηχητική ένδειξη-13:57:48 παύση-13:59:50 αύξηση ταχύτητας-14:02:08(αλλαγή σε 1000prf)-14:03:09-παύση-14:03:53(αλλαγή 100prf)-δεν έσβησε
	A	3,5	min(atten)	1000		
51	A	3,5	ΠΑΡΑ 10	100/500/1000	0:02:23	2:17:31 μμ πρώτη ηχητική ένδειξη-σβήσιμο
52	A	3,5	ΠΑΡΑ 5			
53	A	3,5	12 ΕΠΟΜΕΝΗ ΓΡΑΜΜΉ	100		

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙ

Αναλυτικά αποτελέσματα πειραμάτων και μετρήσεων δεύτερης φάσης:

Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
1	A	100	10	12,7-13,13	12,915	FC2	1	
2	A	100	10			FC1	1	
3	A	100	10			FC1	1	
4	A	100	10			FC3	1	εδώ ελαχιστοποιήσαμε το χρόνο έκθεσης, δηλ. σταματήσαμε την ακτινοβολία όσο πιο γρήγορα μπορούσαμε από τη στιγμή που έσβησε
5	A	100	10			FC1	3-4	
6	A	100	10			FC1	3	
7	A	100	10			FC1	3-4	
8	A	100	10			FC1	1,5	
9	A	100	10			FC1	3-4	
10	A	100	10			FC1	1	
11	A	100	12	13	13	FC1	1	μετά το power on συνεχίζει να μην βλέπει τους κινητήρες, χρειάζεται να ξαναπεράσουμε το software

Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
12	B	100	8	9,8	9,8	FC1	1	
13	B	100	8			FC1	1,5	
14	B	100	8			FC1	1	
15	B	100	8			FC1	1,5	
16	B	100	8			FC3	1	Μικρός χρόνος έκθεσης
17	B	100	8			FC1	3	
18	B	100	8			FC1	4	
19	B	100	8			FC1	3	Σφάλμα κινητήρων αλλά αυτή τη φορά με συνεχόμενο κόκκινο λαμπάκι
20	B	100	8			FC1	1	
21	B	100	8			FC1	1	
22	C	100	5-6(8)			5,194	5,194	FC1
23	C	100	5-6(8)	FC1	2-3			
24	C	100	5-6(8)	FC3	3			
25	C	100	5-6(8)	FC1	2			
26	C	100	5-6(8)	FC3	2			
27	C	100	5-6(8)	FC3	2			
28	C	100	5-6(8)	FC1	3-4			
29	C	100	5-6(8)	FC1	1			Σβήσιμο-παρατηρήθηκε ότι η κόκκινη

Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
								ενδεικτική λυχνία παρέμεινε αναμμένη.
30	C	100	5-6(8)			FC2	1,3	
31	C	100	5-6(8)			FC1	1,5	
32	C	100	3-4(4)	3,7612-4,1791	3,97015	FC0		
33	C	100	3-4(4)			FC0		
34	C	100	3-4(4)			FC0		
35	C	100	3-4(4)			FC0		
36	C	100	3-4(4)			FC0		
37	C	100	3-4(4)			FC0		
38	C	100	3-4(4)			FC0		
39	C	100	3-4(4)			FC0		
40	C	100	3-4(4)			FC0		
41	C	100	3-4(4)			FC0		
42	C	100	3-4(6)			4,0597-4,4179	4,2388	FC5
43	C	100	3-4(6)	FC0				
44	C	100	3-4(6)	FC3	5			



Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments		
45	C	100	3-4(6)			FC3	2	Η κόκκινη ενδεικτική λυχνία ανάβει με μεγαλύτερη συχνότητα από ότι στην κανονική λειτουργία.		
46	C	100	3-4(6)			FC2	2			
47	C	100	3-4(6)			FC0				
48	C	100	3-4(6)			FC0				
49	C	100	3-4(6)			FC0				
50	C	100	3-4(6)			FC0				
51	C	100	3-4(6)			FC0				
52	C	100	4(7)			4,4776-4,8955	4,68655		FC0	
53	C	100	4(7)						FC0	
54	C	100	4(7)						FC0	
55	C	100	4(7)						FC0	
56	C	100	4(7)	FC0						
57	C	100	4(7)	FC0						
58	C	100	4(7)	FC0						
59	C	100	4(7)	FC0						
60	C	100	4(7)	FC0						
61	C	100	4(7)	FC0						
62	C	100	?(9)	5,8707	5,8707			FC0		

Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
63	C	100	?(9)			FC3		
64	C	100	?(9)			FC0		
65	C	100	?(9)			FC0		
66	C	100	?(9)			FC0		
67	C	100	?(9)			FC0		
68	C	100	?(9)			FC0		
69	C	100	?(9)			FC0		
70	C	100	?(9)			FC0		
71	C	100	?(9)			FC0		
72	C	100	6(9-10)			6,0896-6,806	6,4478	FC1
73	C	100	6(9-10)	FC4	5			Συνέχεια αναμμένο το μπλε λαμπάκι. Οι κινητήρες δεν έσβησαν το τηλ/ριο δεν μπορεί να δώσει κάποια εντολή ούτε να κάνει bind
74	C	100	6(9-10)	FC1	4			
75	C	100	6(9-10)	FC4	3			Σταμάτησαν οι κινητήρες κανένα αναμμένο λαμπάκι. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες
76	C	100	6(9-10)	FC1	3			

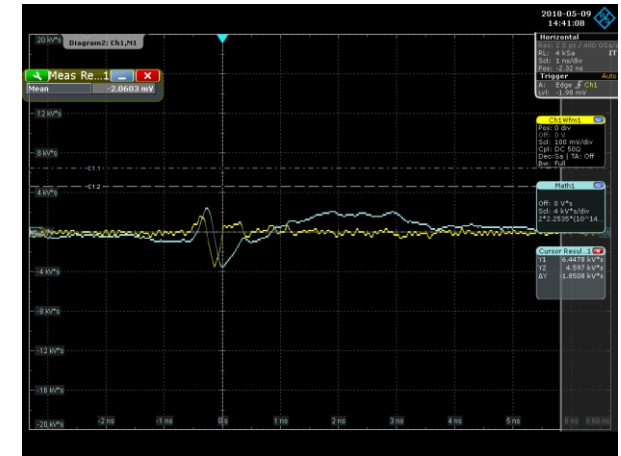
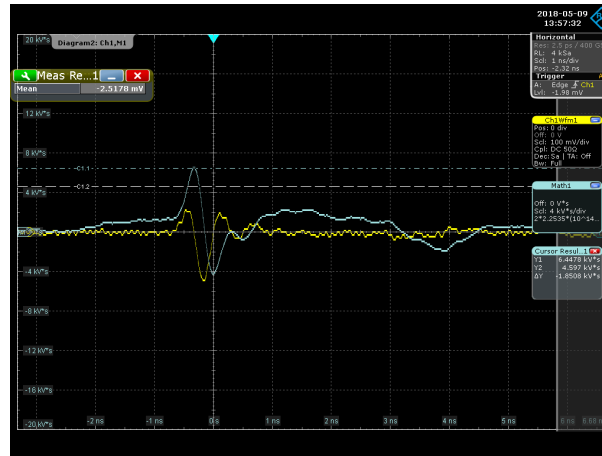
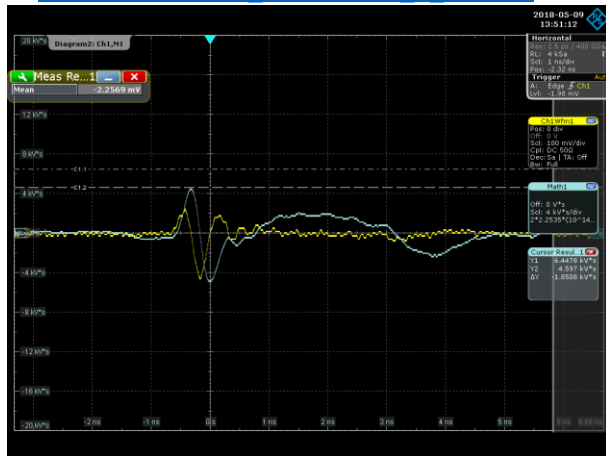
Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
77	C	100	6(9-10)			FC1	2	
78	C	100	6(9-10)			FC1	4	
79	C	100	6(9-10)			FC1	2	
80	C	100	6(9-10)			FC3	4	
81	C	100	6(9-10)			FC1	1	
82	C	100	6(9_REPEAT)			FC2	4	
83	C	100	6(9_REPEAT)			FC1	5	
84	C	100	6(9_REPEAT)			FC1	5	
85	C	100	6(9_REPEAT)			FC4	5	Αναμμένη συνεχόμενα η μπλε led ενδεικτική λυχνία και δεν δέχεται εντολές. Οι κινητήρες δουλεύουν ακόμα
86	C	100	6(9_REPEAT)			FC3	2	
87	C	100	6(9_REPEAT)			FC1	3,5	
88	C	100	6(9_REPEAT)	FC1	2,5			
89	C	100	6(9_REPEAT)	FC1	1,5			
90	C	100	6(9_REPEAT)	FC4	3	Σταμάτησαν οι κινητήρες καμία ενδεικτική λυχνία αναμμένη. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες		

Test Number	Setup	PRF(Hz)	Eincident (kV)	Einc_MAX_long (kV)	Einc_MAX_avg (kV)	Fault Code	Time (sec)	Comments
91	C	100	6(9_REPEAT)			FC4	2	Σταμάτησαν οι κινητήρες μπλε ενδεικτική λυχνία αναμμένη. Δεν μπορεί να κάνει bind δεν ακούγεται κάτι από τους κινητήρες
92	C	100	6(8-9)	5,1343-5,7313	5,4328	FC3	3	
93	C	100	6(8-9)			FC3	3	
94	C	100	6(8-9)			FC1	5	
95	C	100	6(8-9)			FC3	3	
96	C	100	6(8-9)			FC0		
97	C	100	6(8-9)			FC3	3	
98	C	100	6(8-9)			FC1	5	
99	C	100	6(8-9)			FC1		FIRMWARE

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΙΙΙ

### Oscilloscope Scenshots

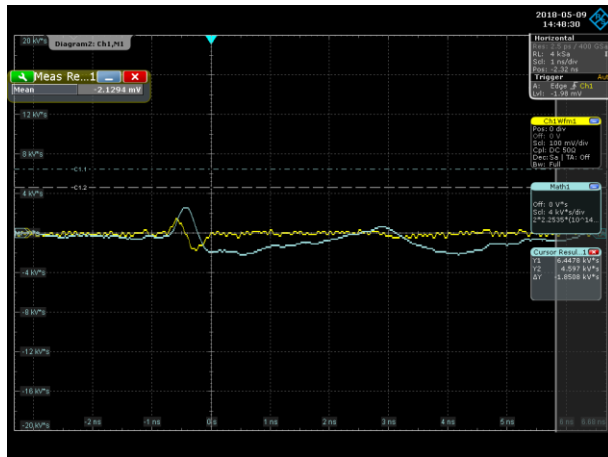
[Test 1 Screenshot 2018-05-09 1 135112](#)



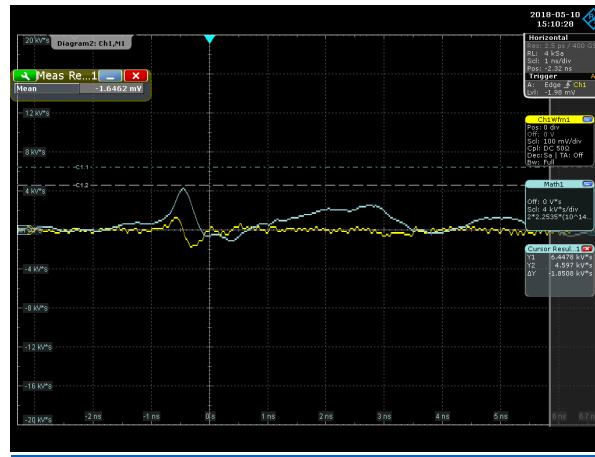
[Test 2 Screenshot 2018-05-09 2 135732](#)

[Test 3 Screenshot 2018-05-09 3 144107](#)

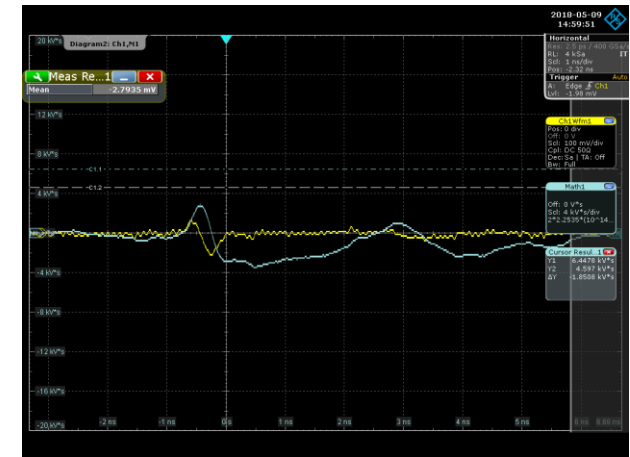
[Test 4 Screenshot 2018-05-09 4 144830](#)



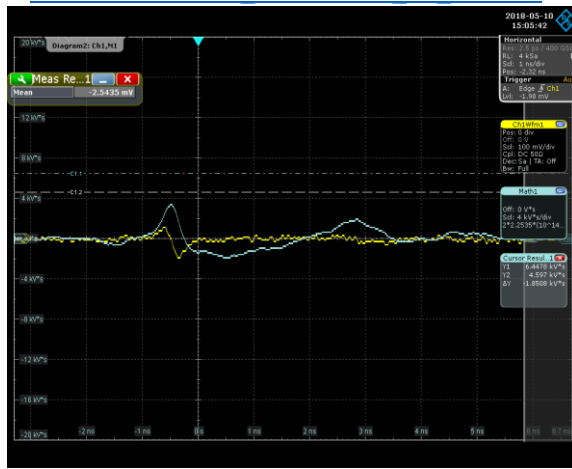
[Test 5 Screenshot 2018-05-10 19 150542](#)



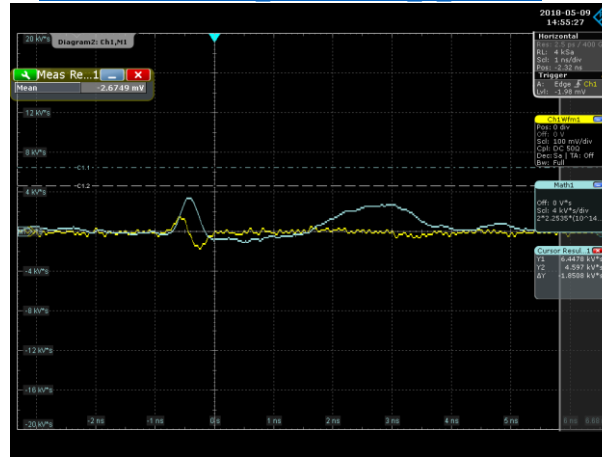
[Test 7 Screenshot 2018-05-09 5 145527](#)



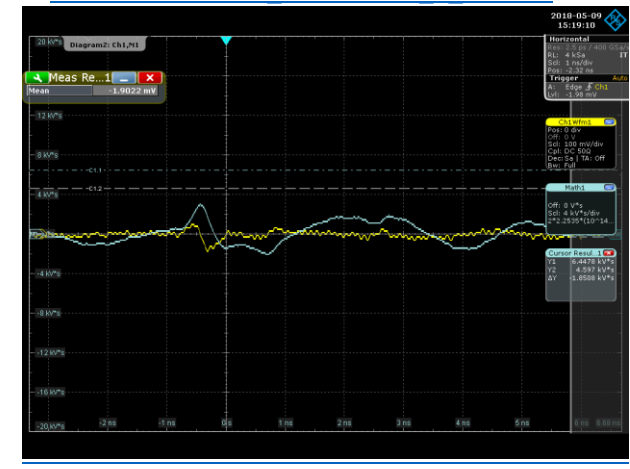
[Test 9 Screenshot 2018-05-09 7 151910](#)



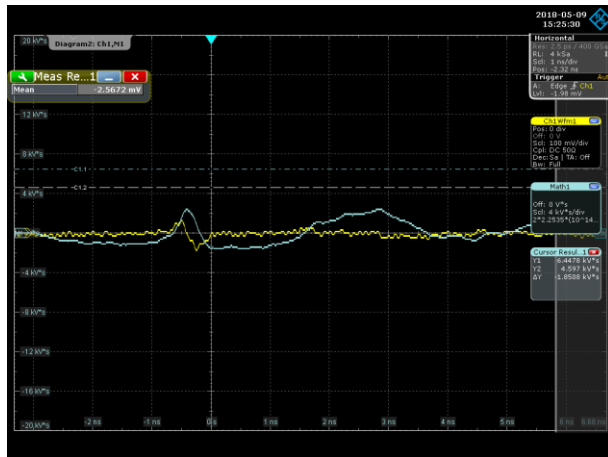
[Test 6 Screenshot 2018-05-10 20 151028](#)



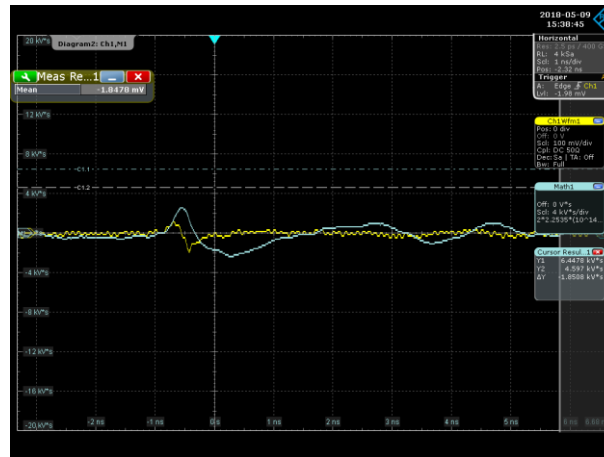
[Test 8 Screenshot 2018-05-09 6 145951](#)



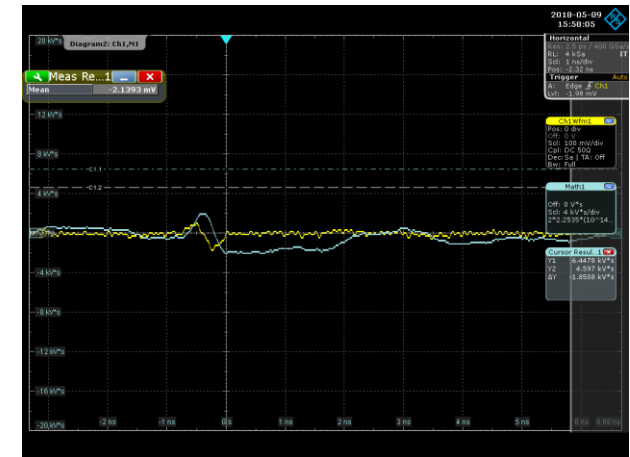
[Test 10 Screenshot 2018-05-09 8 152530](#)



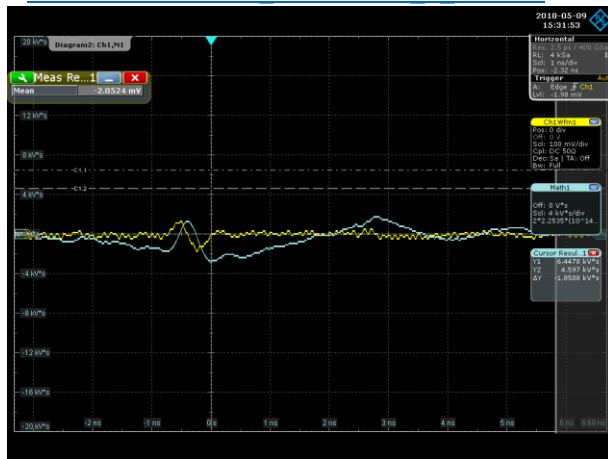
[Test 11 Screenshot 2018-05-09 9 153153](#)



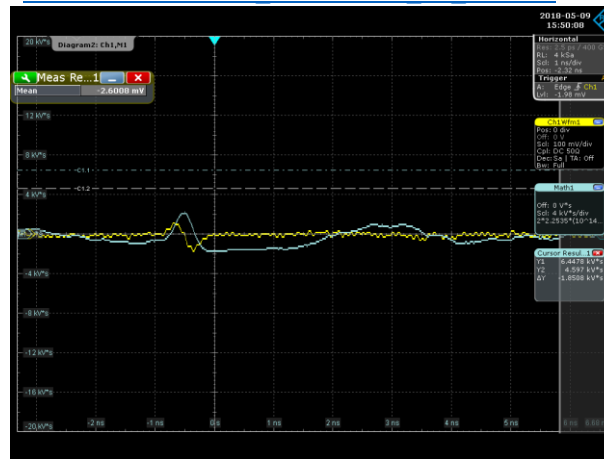
[Test 13 Screenshot 2018-05-09 11 155008](#)



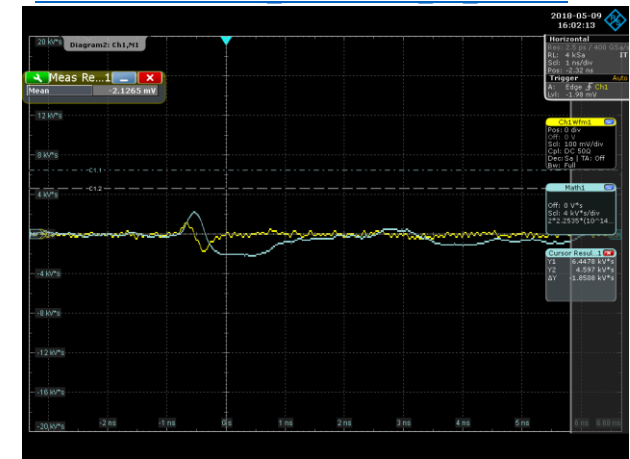
[Test 15 Screenshot 2018-05-09 13 160213](#)



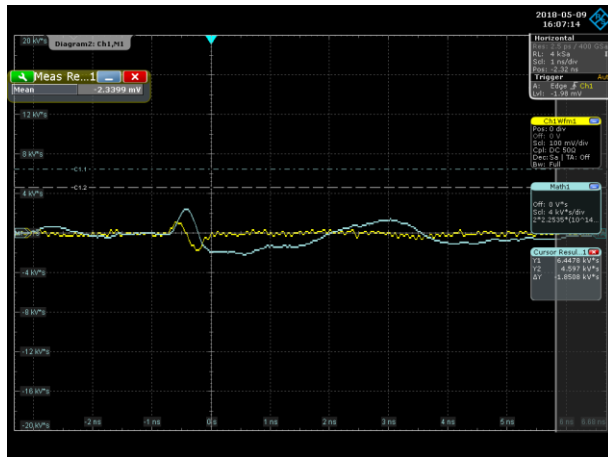
[Test 12 Screenshot 2018-05-09 10 153845](#)



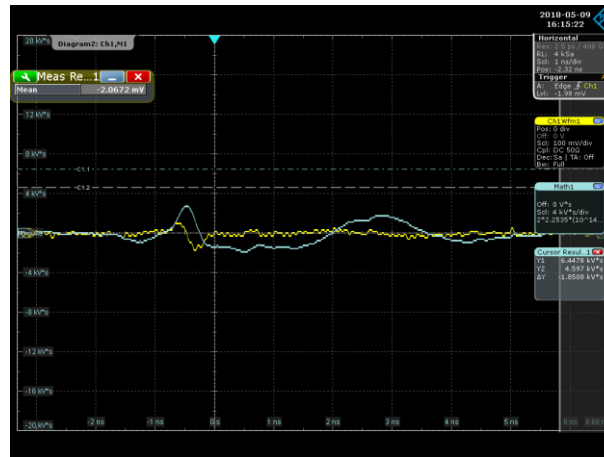
[Test 14 Screenshot 2018-05-09 12 155805](#)



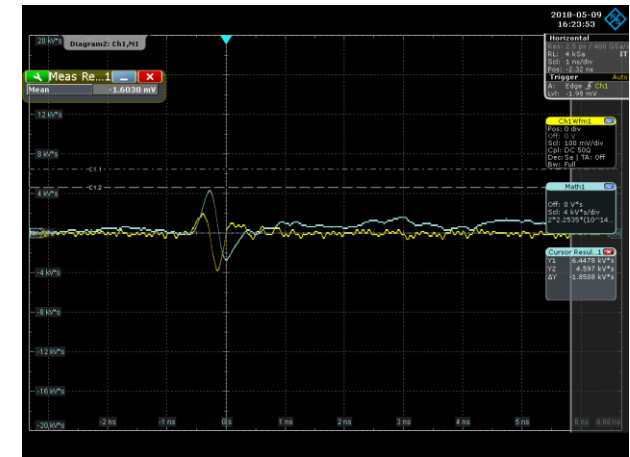
[Test 16 Screenshot 2018-05-09 14 160714](#)



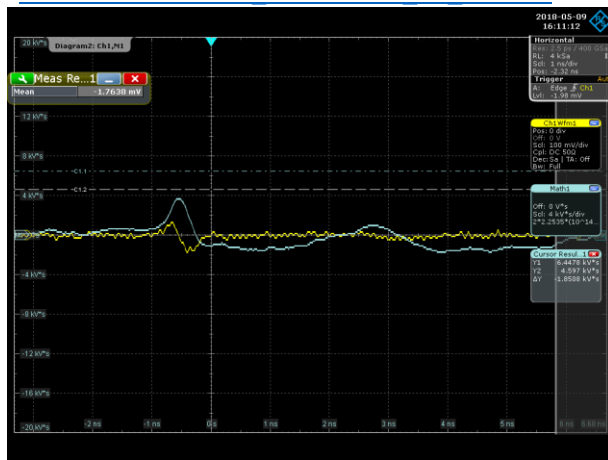
[Test 17 Screenshot 2018-05-09 15 161112](#)



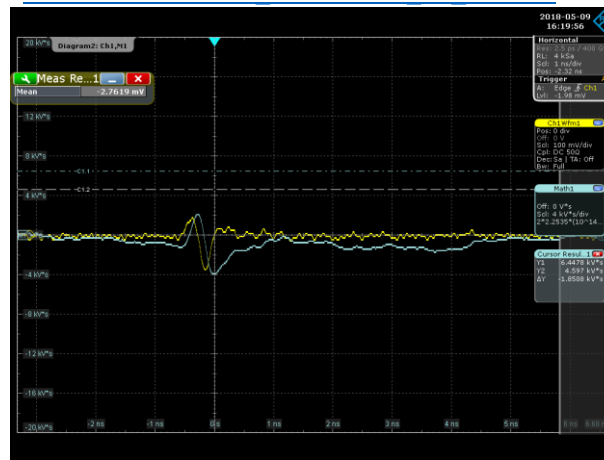
[Test 19 Screenshot 2018-05-09 17 161956](#)



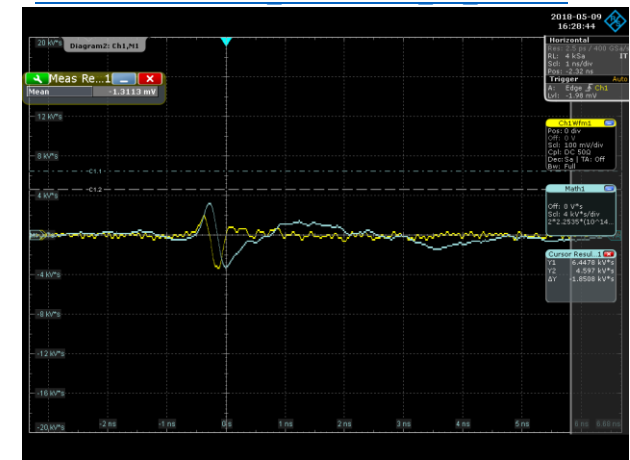
[Test 21 Screenshot 2018-05-09 19 162844](#)



[Test 18 Screenshot 2018-05-09 16 161522](#)

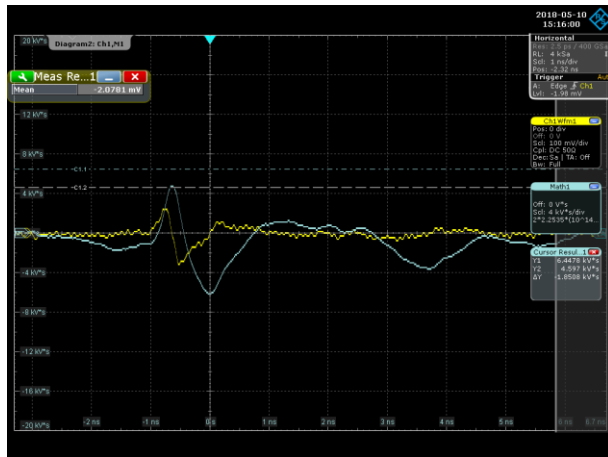


[Test 20 Screenshot 2018-05-09 18 162353](#)

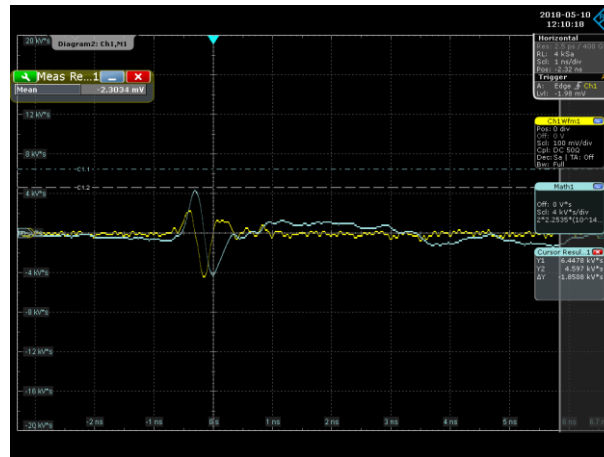


[Test 22 Screenshot 2018-05-10 21 151600](#)

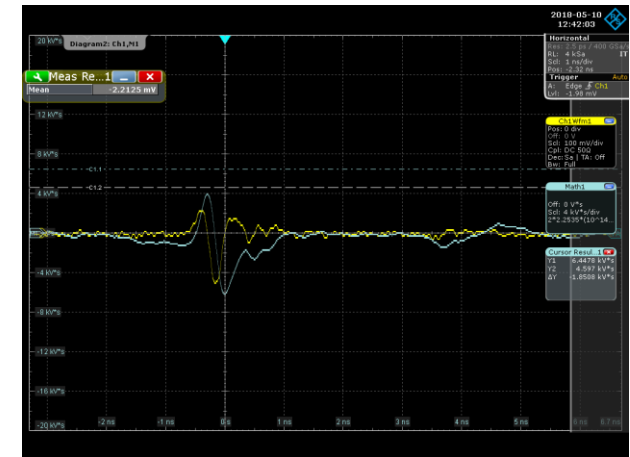




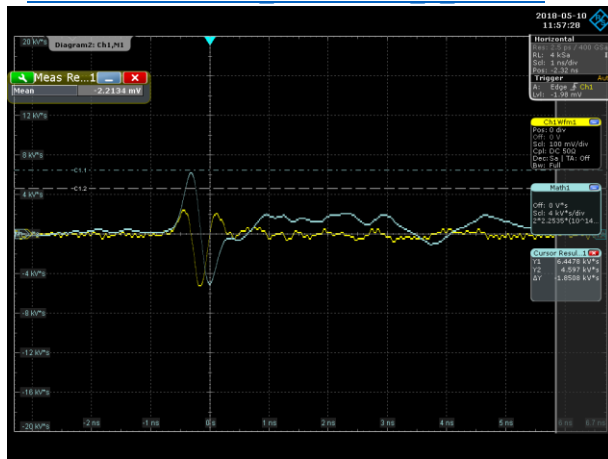
[Test 23 Screenshot 2018-05-10 0 115728](#)



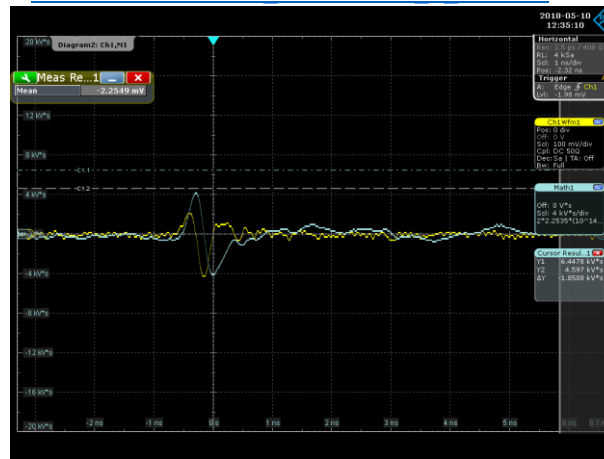
[Test 25 Screenshot 2018-05-10 2 123510](#)



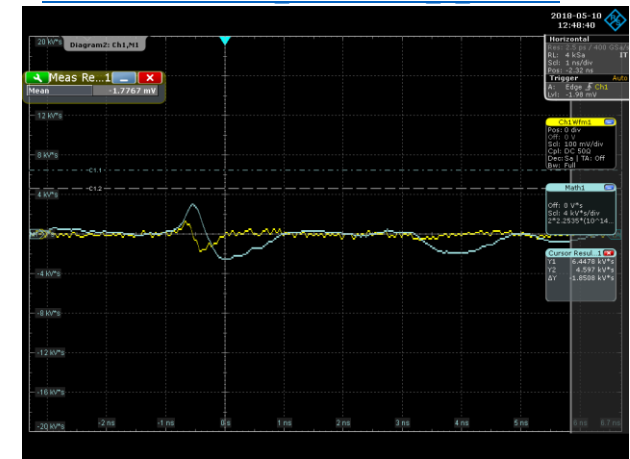
[Test 27 Screenshot 2018-05-10 4 124840](#)



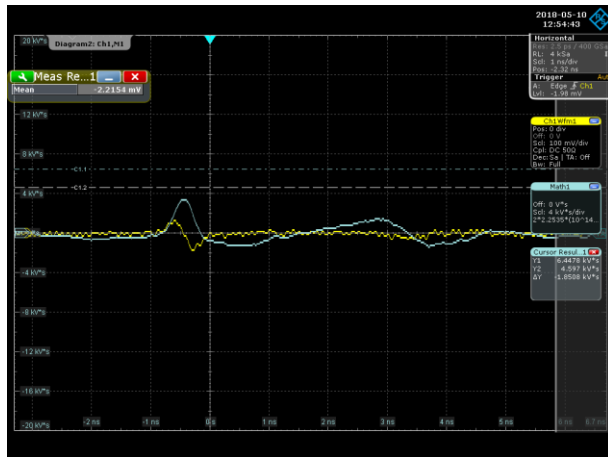
[Test 24 Screenshot 2018-05-10 1 121018](#)



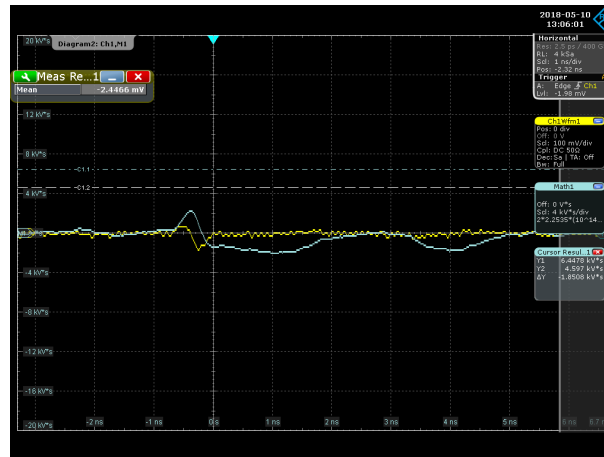
[Test 26 Screenshot 2018-05-10 3 124203](#)



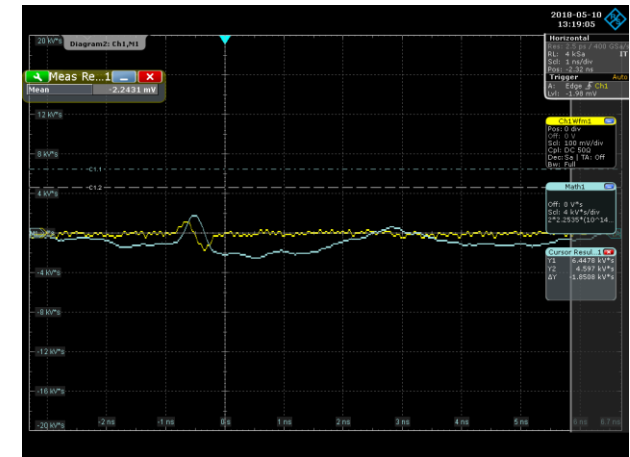
[Test 28 Screenshot 2018-05-10 5 125442](#)



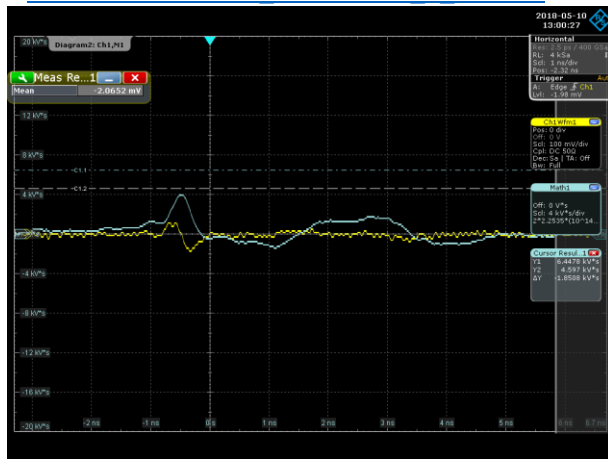
[Test 29 Screenshot 2018-05-10 6 130027](#)



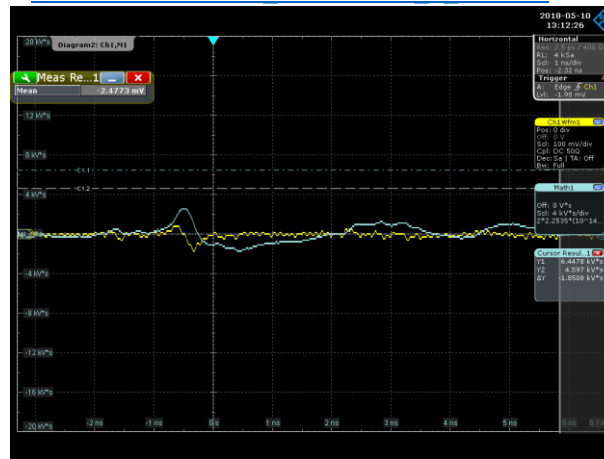
[Test 31 Screenshot 2018-05-10 8 131226](#)



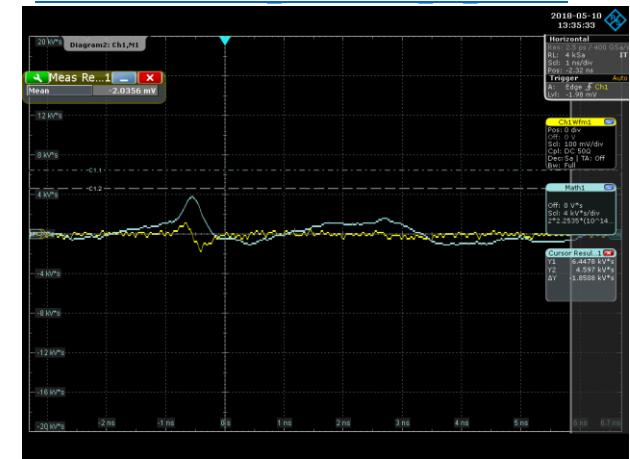
[Test 33 Screenshot 2018-05-10 10 133533](#)



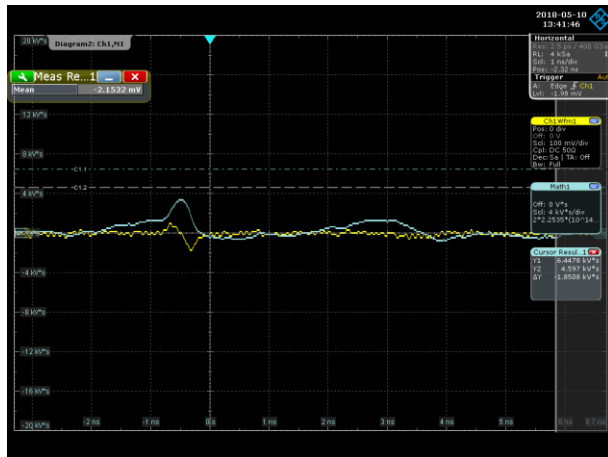
[Test 30 Screenshot 2018-05-10 7 130600](#)



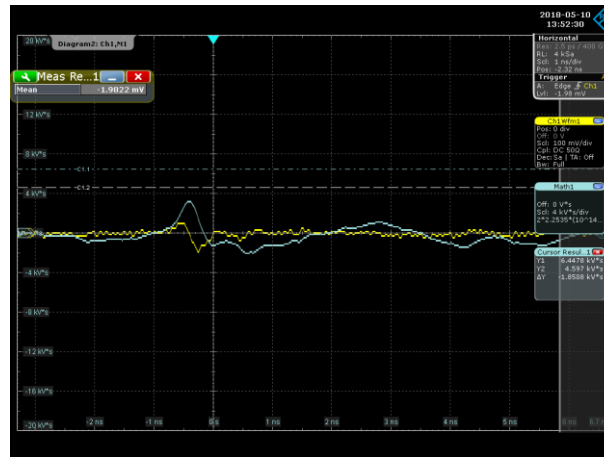
[Test 32 Screenshot 2018-05-10 9 131905](#)



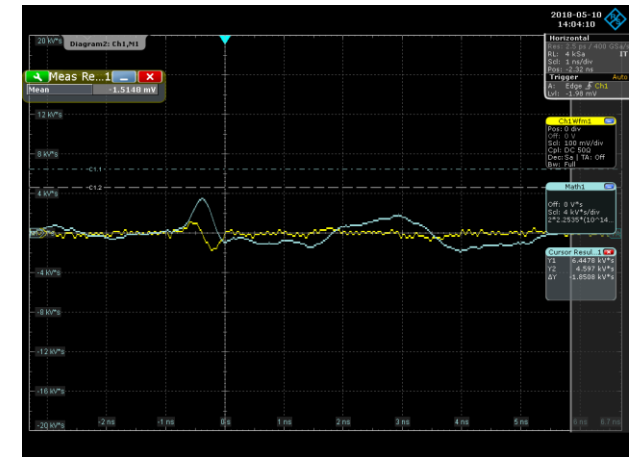
[Test 34 Screenshot 2018-05-10 11 134146](#)



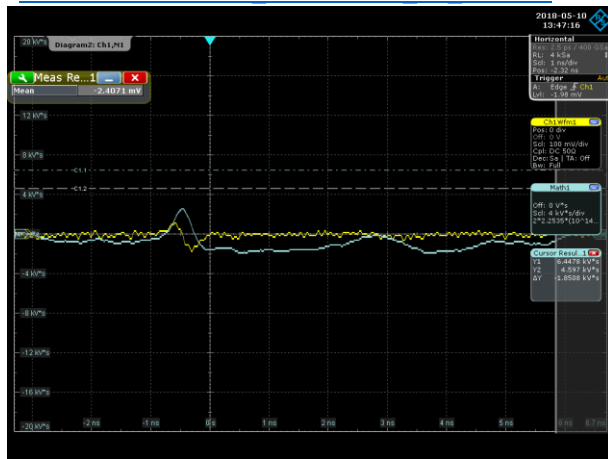
[Test 35 Screenshot 2018-05-10 12 134716](#)



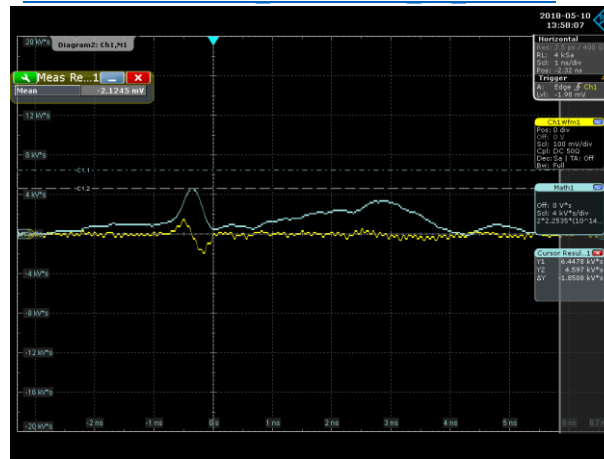
[Test 37 Screenshot 2018-05-10 14 135806](#)



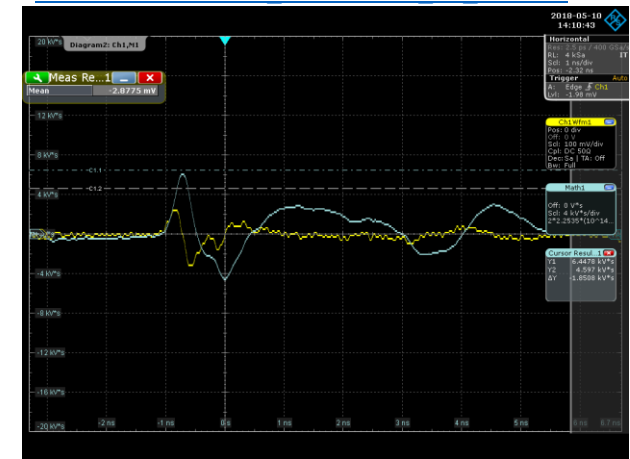
[Test 39 Screenshot 2018-05-10 16 141043](#)



[Test 36 Screenshot 2018-05-10 13 135230](#)



[Test 38 Screenshot 2018-05-10 15 140410](#)



[Test 40 Screenshot 2018-05-10 18 145816](#)



# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ IV

## FID Calibration Oscillator Screenshots

