



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

# ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

---

Προτοντούάρι Σαμί

A.M.: HN07609

Επιβλέπων: Χριστοφορίδης Γεώργιος, Καθηγητής  
Συνεπιβλέπων: Φιλίππιδης Σταύρος, Υποψήφιος Διδάκτωρ

*(Υπογραφή)*

.....

**Προτοντούάρι Σαμί**

Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Τ.Ε., Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας

© 2022 – All rights reserved

---

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ένα μικρού μεγέθους σύστημα SMES για ερευνητικούς σκοπούς βρίσκεται επί του παρόντος υπό ανάπτυξη από το Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. Το σύστημα είναι κατασκευασμένο με ένα πηνίο τηγανίτας (SPC) χρησιμοποιώντας ταινία REBCO μήκους 100 μέτρων. Το πρώτο βήμα που έγινε για την ανάπτυξή του ήταν η βελτιστοποίηση της γεωμετρίας του πηνίου, καθώς το διαθέσιμο μήκος του υπεραγωγού είναι σταθερό. Με βάση τις διαστάσεις του πηνίου, επιλέχθηκε η θέση του πηνίου μέσα στον θάλαμο κενού και σχεδιάστηκε το σύστημα ψύξης.

Από εκεί και έπειτα, στην παρούσα εργασία, σχεδιάζεται και κατασκευάζεται ένα μετρητικό σύστημα χρησιμοποιώντας έναν μικροελεγκτή τύπου Raspberry Pi, τη γλώσσα προγραμματισμού Python, και μία μετρητική κάρτα. Πραγματοποιείται ένα πείραμα για να γίνουν αρχικές μετρήσεις και να επαληθευτεί η ύπαρξη υπεραγωγιμότητας στο πηνίο. Δύο αναλογικοί σε ψηφιακοί μετατροπείς ADS1115 που συνδέονται στο Raspberry Pi χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της τάσης μεταξύ των καλωδίων ρεύματος, και των εξόδων των δύο αισθητήρων για την μέτρηση του μαγνητικού πεδίου.

**Λέξεις Κλειδιά:** SMES, Μετρητικό σύστημα

---

## ABSTRACT

A small-scale SMES system for research purposes is currently under development by the University of Western Macedonia. The system is built with a pancake coil (SPC) using 100m of REBCO tape. The first step taken in its development was to optimize the coil geometry, since the available length of the superconductor is fixed. Based on the dimensions of the coil, the location of the coil inside the vacuum chamber was chosen and the cooling system was designed.

Also, in the present work, a measurement system is designed and manufactured using a Raspberry Pi type microcontroller, the Python programming language, and a measurement card. An experiment is performed to make initial measurements and verify the existence of superconductivity in the coil. Two ADS1115 analog-to-digital converters connected to the Raspberry Pi are used to measure the temperature, the voltage between the power wires, and the outputs of the two sensors to measure the magnetic field.

**Keywords:** SMES, Measurement System

---

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κύριο Χριστοφορίδη Γεώργιο, που μου έδωσε την δυνατότητα να εκπονήσω την διπλωματική αυτή, και κυρίως τον υποψήφιο διδάκτορα κύριο Φιλίππιδη Σταύρο, για τον διαρκή του αγώνα και ζήλο που έδειξε, έτσι ώστε να παραδώσω την παρούσα εργασία, ολοκληρωμένη και σωστή.

# ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη.....	3
Abstract .....	4
Ευχαριστίες .....	5
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ .....	6
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ .....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ .....	8
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: Εισαγωγή Στα Συστήματα SMES .....	9
1.1 Αποθήκευση ενέργειας.....	9
1.2 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας .....	10
2.1 Κρυογονικός σχεδιασμός.....	13
2.2 Κρυογονικές Ιδιότητες Υλικών .....	16
2.3 Θερμομόνωση και μεταφορά θερμότητας.....	17
2.3.1 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή .....	17
2.3.2 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή.....	18
2.3.3 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας.....	19
Κεφάλαιο 2: Διάταξη Υπεραγώγιμη μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας Π.Δ.Μ. ....	23
2.1 Αρχή λειτουργίας και βασική τοπολογία.....	23
2.2 Το σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας .....	24
2.2.1 Ο θάλαμος κενού και ο κρυοστάτης Cryodyne 350-CP .....	25
2.2.2 Οι υπεραγώγιμες ταινίες (RE)BCO Type-SCS12050-AP .....	26
2.2.3 Το θερμόμετρο TG120-PL .....	28
Κεφάλαιο 3: Σχεδίαση μετρητικού συστήματος .....	29
3.1 Εισαγωγή στους μικροκοντρόλερ raspberry pi (RPi).....	29
3.3 Χαρακτηριστικά των Raspberry PI .....	31
3.4 Η πλακέτα DAQc2Plate .....	32
3.4.1 Αναλογικοί είσοδοι.....	34
3.4.2 Εντολές χρήσης κάρτας στη γλώσσα python .....	35
3.5 Σχεδίαση μετρητικού συστήματος.....	38
Κεφάλαιο 4: Αρχικές μετρήσεις .....	41
Βιβλιογραφία.....	44

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα ένταξης SMES σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.	13
Εικόνα 2: Το άνω τμήμα του κρυστάτη στόχου υγρού υδρογόνου SLAC E158	16
Εικόνα 3: Η θέση υποστήριξης για την κρυστομονάδα ILC	18
Εικόνα 4: Εκπομπές τυπικών υλικών κρυστάτη	21
Εικόνα 5: Το σύστημα MLI για τους κρυστατικούς μαγνήτες μεγάλου επιταχυντή αδρονίων (LHC).	21
Εικόνα 6: Παραδείγματα σωστής εγκατάστασης MLI για γωνίες (α), βήματα (β), διεισδύσεις (γ) και επικαλύψεις (δ)	22
Εικόνα 7: Διάταξη εργαστηριακού συστήματος υπεραγωγίμης αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιεί κρυστοκεφαλή και εναλλάκτη/συμπιεστή για ψύξη	24
Εικόνα 8: Σχέδιο κρυστάτη	26
Εικόνα 9: Δομή ταινίας SCS12050-YBCO της εταιρείας Superpower.	27
Εικόνα 10. Διαστάσεις θερμομέτρου TG-120PL	28
Εικόνα 11. Raspberry Pi με 1 HAT (αριστερά), και 4 HAT (δεξιά)	30
Εικόνα 12. Η πλακέτα DAQc2Plate	34
Εικόνα 13. Σχήμα μιας αναλογικής εισόδου	35
Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής προγράμματος μέτρησης Python	39
Εικόνα 15. Κύκλωμα μετρητικού συστήματος	40
Εικόνα 16. Διάταξη SMES του Π.Δ.Μ.	41
Εικόνα 17. Η καμπύλη ψύξης και η υπεραγωγιμότητα που συλλέγονται από τους αισθητήρες hall	42

---

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά ταινίας SCS12050 .....	27
Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά των Raspberry PI.....	32
Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά πλακέτας DAQc2 .....	34



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SMES

## 1.1 Αποθήκευση ενέργειας

Η χρήση της αποθήκευσης ενέργειας για τη συμπλήρωση του φορτίου βάσης ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει από καιρό αναγνωριστεί ως μια ελκυστική μέθοδος για τη **βελτίωση της ποιότητας του δικτύου μεταφοράς και διανομής**. Κατά τη διάρκεια των περιόδων χαμηλού φορτίου, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί και στη συνέχεια να ανακτηθεί κατά τη διάρκεια συνθηκών υψηλής “ζήτησης”, ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες. Εκτός από αυτή την εφαρμογή συμπλήρωσης του φορτίου, η αποθήκευση ενέργειας, με τα κατάλληλα χαρακτηριστικά, μπορεί να παρέχει οφέλη στο σύστημα για τη βελτίωση της σταθερότητας της τάσης, τον έλεγχο της συχνότητας, την αντιστάθμιση της άεργου ισχύος και την παροχή ισχύος ταχείας απόκρισης κατά τη διάρκεια στιγμιαίων σφαλμάτων ή πλήρων διακοπών ισχύος. Υπάρχει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια, η αποθήκευση αντλούμενου αερίου, οι μπαταρίες κλπ., που χρησιμεύουν ανάλογα με γεωγραφικούς, περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες.

Η πρακτική χρήση της αποθήκευσης ενέργειας είναι βιώσιμη μόνο εάν η χρησιμοποιούμενη μέθοδος είναι αποδοτική οικονομικά και συμβατή με τους περιβαλλοντικούς και οργανωτικούς περιορισμούς. Ορισμένες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας χρησιμοποιούν βοηθητικές γεννήτριες ώστε να συμπληρώνουν την παραγωγή τους σε φορτίο βάσης και θέτουν τις μονάδες αυτές σε αδράνεια κατά τη διάρκεια συνθηκών χαμηλού φορτίου, υπό την προϋπόθεση ότι οι γεννήτριες είναι διαθέσιμες και επιτρέπονται οι πρόσθετες εκπομπές. Η ανανεώσιμη ενέργεια, από πηγές όπως τα ηλιακά φωτοβολταϊκά (Φ/Β) στοιχεία και οι ανεμογεννήτριες, μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί, αλλά αυτές οι πηγές υπόκεινται σε διακοπές λειτουργίας. Η ενέργεια είναι διαθέσιμη μόνο όταν υπάρχει επαρκές ηλιακό φως ή όταν φυσάει άνεμος. Η διαθεσιμότητα αποτελεσματικών και οικονομικά αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας επιτρέπει στις δημόσιες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας να κατανέμουν γεωγραφικά τη δυνατότητα παροχής ισχύος αιχμής, μειώνοντας έτσι το φορτίο στην υφιστάμενη ικανότητα παραγωγής και μεταφοράς. Τα εν λόγω συστήματα αποθήκευσης μπορούν να εγκατασταθούν σε σταθμούς παραγωγής ενέργειας, “σε υποσταθμούς”, ή να εγκατασταθούν απευθείας στις εγκαταστάσεις ενός χρήστη υψηλού φορτίου ισχύος. Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας που εμπλέκουν άμεσα την υπεραγωγιμότητα διακρίνονται σε δύο κατηγορίες: την αποθήκευση ενέργειας με υπεραγωγία πηνία (SMES) και την αποθήκευση ενέργειας μέσω σφονδύλων αδράνειας (FES) ή αλλιώς ηλεκτρομηχανική αποθήκευση.

---

## 1.2 Υπεραγώγιμη αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας

Η ιδέα της χρήσης μεγάλων μαγνητών για την αποθήκευση ενέργειας προκύπτει άμεσα από την έκφραση που περιγράφει την ενέργεια που αποθηκεύεται στο μαγνητικό πεδίο ενός πηνίου, η οποία είναι με:  $E(J)=1/2*L*I^2$ , όπου το L είναι ο συντελεστής αυτεπαγωγής σε henrys (H) και I είναι το ρεύμα εκφρασμένο σε αμπέρ. Η ενέργεια για μια διάταξη SMES, εξαρτάται επομένως, από την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος πολύ υψηλής έντασης. Αυτή η απαίτηση της ικανότητας μεταφοράς ρεύματος υψηλής έντασης αποτελεί επίσης μηχανικό περιορισμό για τον υπεραγώγιμο μαγνήτη, διότι, στην περιέλιξη παράγεται μεγάλη μηχανική δύναμη λόγω της δύναμης Lorentz που παράγεται από τα ρεύματα που διατρέχουν τον αγωγό. Σε ένα πηνίο, η δύναμη αυτή παράγει μια ακτινική πίεση προς τα έξω που είναι κάθετη στα διανύσματα τόσο του ρεύματος όσο και του μαγνητικού πεδίου. Στην πράξη, για ένα πηνίο με μικρό λόγο διαστάσεων, δηλαδή διάμετρος/ύψος, εμφανίζεται μια πρόσθετη αξονική δύναμη η οποία δρα με τρόπο που ουσιαστικά μικραίνει ή συμπιέζει το σωληνοειδές. Εάν υποθέσουμε ότι πρόκειται για έναν ελεύθερο μαγνήτη, δηλαδή ότι η δομική στήριξη δεν μετριάζεται από το περιβάλλον του, μπορεί να αποδειχθεί ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται σε έναν μαγνήτη ανά μονάδα μάζας του μαγνήτη είναι ανάλογη της εφελκυστικής δύναμης του αγωγού διαιρούμενη με τη μέση πυκνότητα του μαγνήτη. Η δακτυλιοειδής τάση που παράγεται από τη μαγνητική πίεση λόγω της δύναμης Lorentz αποτελεί συνεπώς έναν πρωταρχικό μηχανικό περιορισμό για έναν σωληνοειδή μαγνήτη, ο οποίος τελικά περιορίζει το μαγνητικό πεδίο που μπορεί να παραχθεί, πρακτικά σε τιμές γύρω στα 25T. Εκτός από τη δακτυλιοειδή τάση, ο μαγνήτης πρέπει επίσης να σχεδιάζεται για να αντέχει θερμικά φορτία κατά τη διάρκεια όλων των τρόπων λειτουργίας, όπως θερμική συστολή/διαστολή, μεταβατική ή παλμική λειτουργία κ.λπ. Το υπεραγώγιμο καλώδιο πρέπει επίσης να έχει κάποια μηχανική ικανότητα, καθώς ορισμένα από τα φορτία μεταφέρονται σε αυτό, και όχι στο μαδρίνο που το στηρίζει. Μέρος της πρόκλησης για έναν επιτυχημένο σχεδιασμό SMES είναι η επινόηση ενός μηχανικού συστήματος υποστήριξης που ελαχιστοποιεί τα φορτία που επιβάλλονται στον υπεραγωγό κατά τη διάρκεια όλων των τρόπων λειτουργίας. Τα υψηλά φορτία που επιβάλλονται στον υπεραγωγό θα μπορούσαν να υποβαθμίσουν την ικανότητα μεταφοράς ρεύματος και στην πραγματικότητα να οδηγήσουν σε καταστροφική αστοχία λόγω ρήξης ή θραύσης των υπεραγώγιμων νημάτων. Ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός υπεραγώγιμου καλωδίου μεταφοράς ρεύματος υψηλής έντασης για έναν μαγνήτη SMES εξετάζεται στο. Η παρούσα έκθεση παρουσιάζει μια τυπική προσέγγιση για την ικανοποίηση των ηλεκτρικών, θερμικών και μηχανικών απαιτήσεων ενός υπεραγώγιμου καλωδίου μεταφοράς ρεύματος υψηλής έντασης σε έναν πραγματικό μαγνήτη ταχείας εκφόρτισης SMES.

---

Μετά την επίδειξη των υπεραγώγιμων μαγνητών υψηλού πεδίου στις αρχές της δεκαετίας του 1960, σε μαγνητικά πεδία 10T και άνω, η αποθήκευση μαγνητικής ενέργειας εξετάστηκε αμέσως, αλλά η πρόοδος στην κατασκευή ενός υπεραγώγιμου καλωδίου ονομαστικού ρεύματος 10kA ήταν απαραίτητη για να μπορέσουν να συνεχιστούν σοβαρά προγράμματα ανάπτυξης. Μετά την ανάπτυξη καλωδίων ρεύματος υψηλής έντασης στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ξεκίνησαν σημαντικά προγράμματα για το SMES, τα οποία συνεχίστηκαν μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1980. Το πρωταρχικό ενδιαφέρον των πρώτων SMES στρεφόταν στην ημερήσια αποθήκευση για την εξισορρόπηση του φορτίου και στην ανάγκη για μια παλμική πηγή ισχύος για την επαγωγή ρεύματος στο πλάσμα των συσκευών σύντηξης Tokamak. Η προσπάθεια ανάπτυξης SMES κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου επικεντρώθηκε κυρίως στις ΗΠΑ και την Ιαπωνία. Το σημαντικότερο επίτευγμα στις ΗΠΑ κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου ήταν η κατασκευή και η επιτυχής δοκιμή στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας Bonneville ενός SMES 30MJ για την απόσβεση ταλαντώσεων χαμηλής συχνότητας στη σύνδεση μεταξύ δύο γραμμών μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος που εκτείνεται από τον βορειοδυτικό Ειρηνικό στη νότια Καλιφόρνια. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, το ενδιαφέρον για την τεχνολογία SMES μετατοπίστηκε στην θεωρητική σχεδίαση ενός πολύ μεγάλου μαγνήτη 20 MWh (72 GJ) που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί τόσο για ημερήσια αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας όσο και ως πηγή ενέργειας για οπλικά συστήματα του στρατού των ΗΠΑ.

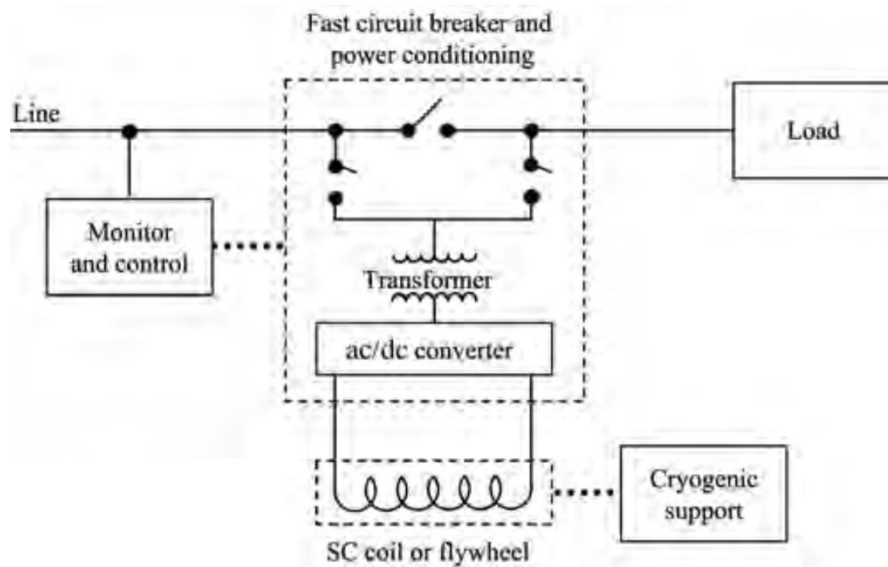
Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ένα "σύστημα SMES" περιλαμβάνει τον μαγνήτη, δηλαδή το υπεραγώγιμο πηνίο, ένα αρκετά εξελιγμένο σύστημα ελέγχου ισχύος (Power Conditioning System PCS) και, ένα ψυκτικό σύστημα κλειστού κύκλου. Το σύστημα SMES διασυνδέεται επίσης με πρόσθετους προστατευτικούς διακόπτες και ένα σύστημα ελέγχου για προστασία και απομόνωση σε περίπτωση βλάβης του ψυκτικού συστήματος. Ένα σχηματικό διάγραμμα ενός τυπικού συστήματος SMES, όπως είναι εγκατεστημένο σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, παρουσιάζεται στο σχήμα 1. Καθώς ο μαγνήτης λειτουργεί με συνεχές ρεύμα, ένα τυπικό σύστημα SMES διαθέτει συνήθως μετατροπέα ac-dc. Το ειδικό σύστημα PCS αντιμετωπίζει τον μαγνήτη SC είτε ως πηγή σταθερής τάσης, όπως μια μπαταρία, είτε ως πηγή σταθερού ρεύματος. Ο συνολικός χρόνος απόκρισης για το SMES εξαρτάται έτσι από το PCS και τον σχετικό μηχανισμό ελέγχου, ο οποίος είναι συνήθως αρκετά γρήγορος και επιτρέπει σε ένα σύστημα SMES να επιδειξει απόκριση υψηλής ταχύτητας με ικανότητα της τάξης του ενός κύκλου περίπου 10ms. Το σχηματικό διάγραμμα συστήματος SMES στο σχήμα 1 δεν περιλαμβάνει διακόπτη συνεχούς ρεύματος στον μαγνήτη SC. Η χρήση μόνιμου διακόπτη ρεύματος θα επέτρεπε χαμηλότερες απώλειες κατά τη διάρκεια μη χρήσης ή

---

αδράνειας, αλλά θα μπορούσε ενδεχομένως να θέσει σε κίνδυνο την ικανότητα ταχείας απόκρισης σε παροδικά συμβάντα που συμβαίνουν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Συνεπώς, η εφαρμογή ενός διακόπτη μόνιμου ρεύματος σε ένα σύστημα SMES θα πρέπει να εξετάζεται κατά περίπτωση, με τον απαιτούμενο χρόνο απόκρισης του συστήματος SMES να καθορίζει την απόφαση.

Η προσπάθεια αποθήκευσης ενέργειας στην Ιαπωνία και την Ευρώπη από τη δεκαετία του 1970 έως τη δεκαετία του 1980 ήταν αρκετά εκτεταμένη με τη συμμετοχή των περισσότερων μεγάλων εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή των Hitachi, Mitsubishi, Toshiba, Siemens, ABB κ.λπ. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου κατασκευάστηκε ένας αριθμός πρωτότυπων μονάδων SMES με χρήση υπεραγωγίσιμων υλικών χαμηλής θερμοκρασίας (LTS). Στην Ιαπωνία, η Hitachi κατασκεύασε και δοκίμασε ένα SMES 5MJ το 1986, το οποίο συνδέθηκε στη γραμμή ισχύος 6,6 kV του Hitachi Works για να βελτιώσει τη σταθερότητα της γραμμής μεταφοράς. Η Chubu Electric και η Hitachi, το 1989, μελέτησαν και ανέπτυξαν από κοινού ένα σύστημα SMES 1MJ για να αξιολογήσουν τον τρόπο με τον οποίο ένα SMES θα μπορούσε να παρέχει σταθερότητα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια, η σημαντικότερη προσπάθεια σχετικά με τα SMES στην Ιαπωνία πραγματοποιήθηκε στο ιαπωνικό Διεθνές Κέντρο Τεχνολογίας Υπεραγωγιμότητας (ISTEC). Το ISTEC διεξήγαγε αρχικά μια "Μελέτη σκοπιμότητας", η οποία οδήγησε στον λεπτομερή σχεδιασμό και την κατασκευή ενός SMES μικρής κλίμακας, με χρήση της τρέχουσας τεχνολογίας LTS, με διαμόρφωση τοροειδούς γεωμετρίας, η οποία θα συνεισφέρει στις μελλοντικές προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης για μεγαλύτερα συστήματα SMES. Η κατασκευή και η δοκιμή ενός SMES μικρής κλίμακας, το οποίο είναι περισσότερο εφαρμόσιμο στη σταθεροποίηση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, αντιμετωπίζει επίσης πολλά από τα μείζονα τεχνικά ζητήματα, όπως οι απώλειες εναλλασσόμενου ρεύματος και η ψύξη. Το ISTEC με τη χορηγία του MITI ξεκίνησε, το 1991, το σχεδιασμό και την αξιολόγηση μιας πιλοτικής μονάδας SMES μικρής κλίμακας με ονομαστική ισχύ 100kWh/20MW. Σε αυτό το πρόγραμμα, υπό την καθοδήγηση του ISTEC, συμμετείχαν η Toshiba ως κύριος κατασκευαστής του μαγνήτη, η Electric Power Development Corporation για το σύστημα ισχύος και διάφορες επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας, με την Chubu Electric ως κύριο ηγούμενο. Η σχεδιαστική προσέγγιση για το σύστημα ISTEC (100kWh/20MW) είναι ένας τοροειδής μαγνήτης με εξωτερική διάμετρο 12m. Η Toshiba κατασκεύασε και δοκίμασε ένα "πρότυπο" πηνίο με την ίδια διάμετρο που προοριζόταν για την πιλοτική μονάδα της, αλλά χρησιμοποιώντας το μισό μήκος υπεραγωγίσιμων ταινιών. Το πρότυπο πηνίο κατασκευάστηκε από Nb-Ti, και φορτίστηκε με

ρεύμα εντάσεως 40,53kA, δηλαδή σημαντικά υψηλότερο από το ονομαστικό ρεύμα των 20 kA που σχεδιάστηκε η πιλοτική εγκατάσταση.



Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα ένταξης SMES σε ένα ηλεκτρικό δίκτυο.

Σχεδόν όλες οι σημερινές εφαρμογές SMES στην Ευρώπη εμπίπτουν στη γενική κατηγορία της ποιότητας ισχύος. Τα μεγέθη αποθήκευσης κυμαίνονται από 0,2 έως 5 MJ με παροχή ισχύος έως μερικά MW για ένα δευτερόλεπτο.

## 2.1 Κρυογονικός σχεδιασμός

Ο επιτυχής κρυογονικός σχεδιασμός εξαρτάται από την εις βάθος κατανόηση των απαιτήσεων του εξαρτήματος που σχεδιάζεται. Οι κρυοστάτες έχουν συνήθως ένα σύνολο κοινών απαιτήσεων, οι οποίες δεν μπορούν να πληρούνται όλες ταυτόχρονα στον ίδιο βαθμό. Ο προσδιορισμός των απαιτήσεων ενός κρυοστάτη και ο καθορισμός των πιο σημαντικών είναι το βασικότερο βήμα για έναν επιτυχημένο σχεδιασμό. Παρακάτω ακολουθούν οι απαιτήσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στο σχεδιασμό κρυοστατών:

### 1. Θερμοκρασίες λειτουργίας και επιτρεπόμενο θερμικό φορτίο.

Δεδομένου ότι ο σκοπός ενός κρυοστάτη είναι να διατηρεί το σύστημα σε χαμηλή θερμοκρασία, ο καθορισμός των θερμοκρασιών λειτουργίας και το επιτρεπόμενο θερμικό φορτίο στις θερμοκρασίες αυτές είναι γενικά μερικές από τις πρώτες απαιτήσεις που ορίζονται. Οι απαιτήσεις αυτές καθορίζουν διάφορες πτυχές του προκύπτοντος σχεδιασμού, όπως: επιλογή υλικών, σχεδιασμός του συστήματος θερμομόνωσης, κόστος, πολυπλοκότητα και μέγεθος. Υπάρχουν ορισμένα λεπτά σημεία σε αυτές τις απαιτήσεις. Μια σημαντική διάκριση είναι αυτή μεταξύ στατικής θερμικής διαρροής και δυναμικού θερμικού φορτίου. Η στατική

---

διαρροή θερμότητας αναφέρεται στη θερμότητα που εισέρχεται στον κρυστάτη από το εξωτερικό περιβάλλον. Σε πολλούς κρυστάτες, αυτή είναι η μόνη ή η κύρια πηγή θερμότητας που θερμαίνει το υπό ψύξη υλικό/κατασκευή. Σε άλλους κρυστάτες μπορεί να υπάρχει πρόσθετο θερμικό φορτίο στις κρυογονικές θερμοκρασίες που προέρχεται από τη λειτουργία του ίδιου του συστήματος που τοποθετείται στο εσωτερικό του κρυστάτη. Η παραγόμενη θερμοκρασία των εν λόγω θερμικών φορτίων συνήθως μεταβάλλεται με το χρόνο και συνεπώς είναι δυναμικά. Παραδείγματα τέτοιων θερμικών φορτίων περιλαμβάνουν τη θέρμανση των τοιχωμάτων της κοιλότητας σε υπεραγώγιμα συστήματα ραδιοσυχνοτήτων και τη θερμότητα που εναποτίθεται από δέσμες σωματιδίων σε κρυστάτες για μαγνητικό συντονισμό. Τα δυναμικά θερμικά φορτία μπορεί να είναι τα κυρίαρχα θερμικά φορτία στον κρυστάτη, γεγονός που μπορεί να επηρεάσει τις σχεδιαστικές επιλογές που γίνονται στο σύστημα θερμομόνωσης του κρυστάτη.

Οι κρυστάτες αποτελούν συχνά μέρος ενός ευρύτερου κρυογονικού συστήματος. Τα επιτρεπόμενα θερμικά φορτία και οι θερμοκρασίες λειτουργίας πρέπει να συνάδουν με τις ανάγκες του ευρύτερου συστήματος. Τα επιτρεπόμενα θερμικά φορτία σε έναν κρυστάτη μπορεί επίσης να σχετίζονται με τον αριθμό των κρυστατών στο σύστημα. Ένα σύστημα με μεγάλο αριθμό κρυστατών, όπως ο LHC ή ο Διεθνής Γραμμικός Επιταχυντής (ILC), μπορεί να απαιτεί μικρότερο θερμικό φορτίο ανά κρυστάτη για να διατηρηθεί το συνολικό κρυογονικό σύστημα σε λογικό μέγεθος. Τέτοια συστήματα καταβάλλουν πρόσθετη προσπάθεια για τη μείωση του θερμικού φορτίου κάθε κρυστάτη.

## **2. Ευθυγράμμιση και κραδασμοί.**

Ανάλογα με την εφαρμογή, ορισμένοι κρυστάτες έχουν απαιτήσεις σχετικά με την ευθυγράμμιση του κρυογονικού εξοπλισμού που περιέχουν ή έχουν όρια στις επιτρεπόμενες δονήσεις τους. Οι απαιτήσεις ευθυγράμμισης μπορεί να είναι αρκετά αυστηρές. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των κρυομονάδων TESLA, οι μαγνήτες έπρεπε να διατηρούν ευθυγράμμιση  $\pm 0,25$  mm σε σχέση με την ονομαστική τιμή τους.

## **3. Ασφάλεια.**

Οι απαιτήσεις ασφάλειας, συμπεριλαμβανομένων των μέγιστων αποδεκτών αστοχιών, θα πρέπει να προσδιορίζονται κατά την έναρξη του σχεδιασμού και να λαμβάνονται υπόψη από την αρχή τυχόν επιπτώσεις στο σχεδιασμό. Η εκ των υστέρων προσαρμογή ενός σχεδιασμού ώστε να πληροί τις απαιτήσεις ασφαλείας μπορεί να είναι πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα. Ειδικότερα, ζητήματα που οφείλονται σε υπερπίεση και εξαιρισμό ως αποτέλεσμα αστοχιών κενού ή σωληνώσεων μπορεί να απαιτήσουν σημαντική προσπάθεια σχεδιασμού.

## **4. Επιτρεπόμενο μέγεθος και βάρος.**

---

Αυτά είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τους κρυοστάτες που θα τοποθετηθούν είτε στο διάστημα είτε σε κινούμενα μέσα όπως νταλίκες.

**5. Ποσότητα και τύπος των απαιτούμενων οργάνων που θα συνδεθούν στον κρυοστάτη**

**6. Αριθμός διόδων τροφοδοσίας για όργανα, ισχύ, για εξωτερικούς χειριστές, οπτικά παράθυρα και κρυογονικές γραμμές.**

**7. Ευκολία πρόσβασης στα εξαρτήματα του κρυοστάτη**

**8. Ύπαρξη ιονίζουσας ακτινοβολίας ή μαγνητικών πεδίων**

Αυτό θα επηρεάσει τις επιλογές υλικού και οργάνων.

**9. Πρόσθετες απαιτήσεις υλικού**

Ορισμένοι κρυοστάτες έχουν πρόσθετες ιδιαίτερες απαιτήσεις υλικών. Για παράδειγμα, ο κρυοστάτης Cryogenic Dark Matter Search (Κεφ. 8) απαιτεί τη χρήση υλικών χωρίς ραδιενέργεια για την αποφυγή λανθασμένων σημάτων. Αυτό περιορίζει σημαντικά τις επιλογές υλικών.

**10. Υφιστάμενες απαιτήσεις κανονιστικού κώδικα**

Αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν κώδικες για δοχεία πίεσης ή κώδικες που σχετίζονται με εύφλεκτα υλικά.

**11. Αναμενόμενη διάρκεια ζωής του κρυοστάτη**

**12. Αριθμός απαιτούμενων κρυοστατών**

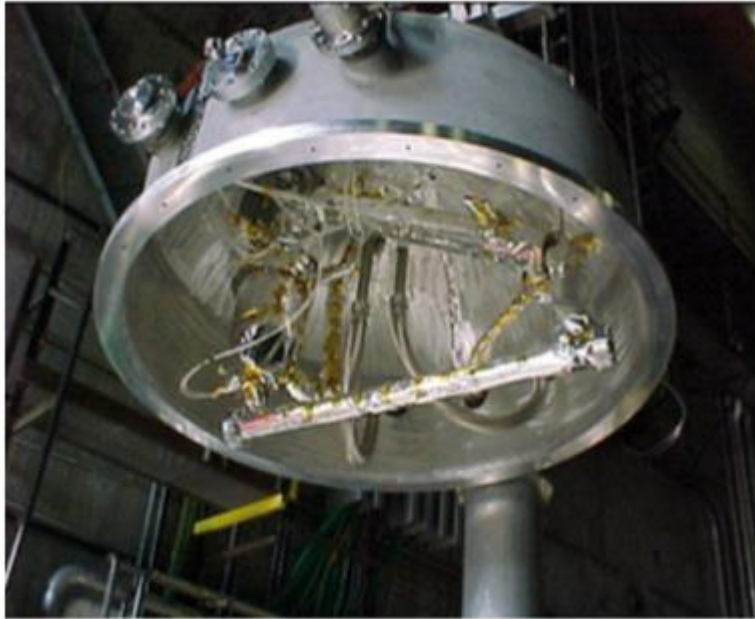
Πρόκειται για έναν μοναδικό κρυοστάτη ή θα είναι μαζικής παραγωγής; Σε κάθε περίπτωση μπορεί να γίνουν διαφορετικές επιλογές σχεδιασμού.

**13. Όρια κόστους και χρονοδιαγράμματος**

Αυτά πρέπει να είναι γνωστά και να λαμβάνονται υπόψη στην αρχή του σχεδιασμού. Όλοι οι σχεδιασμοί περιλαμβάνουν συμβιβασμούς και είναι εξαιρετικά απίθανο να μπορούν να ικανοποιηθούν εξίσου όλες οι απαιτήσεις του κρυοστάτη. Το ζητούμενο είναι να ιεραρχηθούν σωστά οι απαιτήσεις προκειμένου να δημιουργηθεί ένας βέλτιστος σχεδιασμός. Στο σχήμα 2 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης. Το διάγραμμα δείχνει τον κρυοστάτη E158 με στόχο το υγρό υδρογόνο που λειτουργεί στο SLAC National Accelerator Lab. Αυτός ο κρυοστάτης περιείχε έναν βρόχο κυκλοφορούντος LH2 που λειτουργούσε στους 20 K. Μια δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας σκεδάστηκε από το LH2 στο πλαίσιο ενός πειράματος θεμελιώδους φυσικής. Η παρουσία της δέσμης είχε δύο σημαντικά αποτελέσματα: ο κρυοστάτης εκτέθηκε σε ένα περιβάλλον εξαιρετικά υψηλής ιονίζουσας ακτινοβολίας και η δέσμη εναπόθεσε περίπου 900 W θερμότητας στον LH2 των 20 K. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα δύο σημαντικές σχεδιαστικές επιλογές. Πρώτον, για τον κρυοστάτη επιλέχθηκαν υλικά όπως η πολυστρωματική μόνωση με βάση την ταινία κάπτον και η κεραμική ηλεκτρική μόνωση που

---

αντέχουν σε υψηλές δόσεις ακτινοβολίας. Δεύτερον, δεδομένων των υψηλών δυναμικών θερμικών φορτίων από τη δέσμη, δεν χρησιμοποιήθηκαν ακριβές τεχνικές για τη μείωση του στατικού θερμικού φορτίου, όπως ενεργά ψυχόμενες θερμικές ασπίδες ακτινοβολίας.



Εικόνα 2: Το άνω τμήμα του κρυοστάτη στόχου υγρού υδρογόνου SLAC E158

## **2.2 Κρυογονικές Ιδιότητες Υλικών**

Η επιλογή των κατάλληλων υλικών είναι μια σημαντική πτυχή του σχεδιασμού του κρυοστάτη. Πολλά υλικά είναι ακατάλληλα για χρήση σε κρυογονικές θερμοκρασίες και οι ιδιότητες των υλικών μπορούν να αλλάξουν σημαντικά μεταξύ της θερμοκρασίας δωματίου και των κρυογονικών θερμοκρασιών. Οι αστοχίες στους κρυοστάτες μπορούν συχνά να αποδοθούν στη χρήση ακατάλληλων υλικών ή στη μη συνεκτίμηση της μεταβολής των ιδιοτήτων των υλικών ως συνάρτηση της θερμοκρασίας. Τα ακόλουθα υλικά είναι κατάλληλα για χρήση σε κρυογονικές θερμοκρασίες:

- Ωστενιτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες π.χ. 304, 304L, 316, 321
- Κράματα αλουμινίου π.χ. 6061, 6063, 1100
- Χαλκός π.χ. OFHC, ETP και φωσφορούχος αποξειδωμένοι
- Ορείχαλκος
- Πλαστικά ενισχυμένα με ίνες, όπως G-10 και G-11
- Teflon (ανάλογα με την εφαρμογή)
- Νιόβιο και τιτάνιο (χρησιμοποιούνται συχνά σε υπεραγώγιμα συστήματα RF)
- Invar (κράμα Ni/Fe) χρήσιμο για την κατασκευή ροδέλας λόγω του χαμηλότερου συντελεστή διαστολής του.
- Ίνδιο (χρησιμοποιείται ως υλικό στεγανωτικού δακτυλίου)



- 
- Karton και Mylar (χρησιμοποιούνται σε πολυστρωματική μόνωση και ως ηλεκτρική μόνωση)
  - Χαλαζίας (χρησιμοποιείται στα παράθυρα)

Ορισμένα υλικά ακατάλληλα για χρήση σε κρυογονικές θερμοκρασίες είναι:

- Μαρτενσιτικοί ανοξειδωτοι χάλυβες - περνούν από όλκιμη σε εύθραυστη μετάβαση όταν ψύχονται.
- Χυτοσίδηρος - επίσης γίνεται εύθραυστος
- Χάλυβες άνθρακα - επίσης γίνονται εύθραυστοι. Μερικές φορές χρησιμοποιούνται σε δοχεία κενού 300 K, αλλά πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε τα σπασίματα στις κρυογονικές γραμμές να μην προκαλέσουν ψύξη και αστοχία των δοχείων κενού.
- Καουτσούκ και τα περισσότερα πλαστικά.

### **2.3 Θερμομόνωση και μεταφορά θερμότητας**

Η πρωταρχική λειτουργία της κρυοστάτη είναι, προφανώς, να διατηρεί τον εξοπλισμό στο εσωτερικό του σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη συστημάτων θερμικής μόνωσης που εμποδίζουν τη θερμότητα από το εξωτερικό περιβάλλον να φτάσει στον κρυογονικό εξοπλισμό. Αν και δεν υπάρχει τέλειο σύστημα μόνωσης, οι σωστά σχεδιασμένοι κρυοστάτες μπορούν να μειώσουν τη διαρροή θερμότητας σε πολύ χαμηλά επίπεδα, ακόμη και  $\mu\text{W}$ . Αυτό επιτυγχάνεται με τη διακοπή των τριών μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας εντός του κρυοστάτη: αγωγιμότητα, συναγωγή και ακτινοβολία

#### **2.3.1 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας με αγωγή**

Η εξίσωση θερμικής αγωγιμότητας Fourier

$$Q = -G(\theta_1 - \theta_2)$$

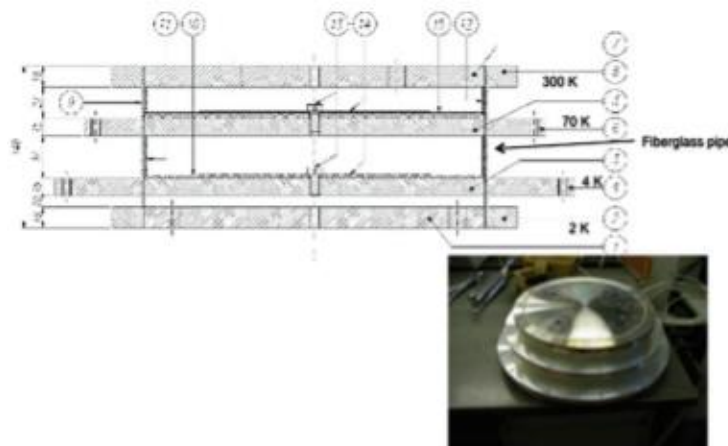
όπου  $Q$  είναι η συνολική θερμότητα που μεταφέρεται μέσω αγωγιμότητας και ο Συντελεστής Γεωμετρίας ( $G$ ) δίνεται από τη σχέση:

$$G = \frac{1}{\int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{\lambda(x)}}$$

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η θερμότητα που μεταφέρεται με αγωγή είναι ανάλογη της διαφοράς θερμοκρασίας, της θερμικής αγωγιμότητας και της διατομής της διαδρομής αγωγής και αντιστρόφως ανάλογη του μήκους της διαδρομής αγωγής. Έτσι, η διαρροή θερμότητας με αγωγή μπορεί να μειωθεί με τη χρήση υλικών χαμηλής θερμικής αγωγιμότητας, τη μείωση της διατομής της διαδρομής αγωγής και την αύξηση του μήκους της διαδρομής αγωγής. Ένας άλλος τρόπος για να μειωθεί η διαρροή θερμότητας με αγωγή είναι να αναχαιτιστεί η

θερμότητα σε μια ενδιάμεση θερμοκρασία. Αυτό μειώνει τη διαφορά θερμοκρασίας και συνεπώς τις απώλειες θερμότητας στο σημείο με τη χαμηλότερη θερμοκρασία. Η θερμότητα που διοχετεύεται από υψηλότερες θερμοκρασίες προς την χαμηλότερη εξακολουθεί να πρέπει να απομακρυνθεί, αλλά είναι θερμοδυναμικά πιο αποδοτικό να απομακρύνεται η θερμότητα σε υψηλότερη θερμοκρασία.

Στο Σχήμα 3. παρουσιάζεται ο τρόπος στήριξης που αναπτύχθηκε για τον μαγνήτη για χρήση στην κρυομονάδα TESLA (πλέον ILC). Ο σχεδιασμός αυτός μειώνει τη διαρροή θερμότητας με αγωγή μέσω των αρχών που περιγράφηκαν παραπάνω. Οι πλάκες που δημιουργούν τη βάση κατασκευάστηκαν από κυλίνδρους G-10 χαμηλής αγωγιμότητας με μικρή επιφάνεια διατομής. Επιπλέον, ενεργές ψύκτρες, δηλαδή σημεία όπου ψύχονται σε διαφορετική θερμοκρασία από την τελική, εγκαταστάθηκαν στα επίπεδα των 77 K και των 4 K. Ως αποτέλεσμα, ο στύλος μεταφέρει μόνο 0,03 W θερμότητας μεταξύ θερμοκρασίας δωματίου και 2 K σε απόσταση 140 mm, ενώ εξακολουθεί να είναι σε θέση να υποστηρίξει φορτίο 50 kN.



Εικόνα 3: Η θέση υποστήριξης για την κρυομονάδα ILC

### **2.3.2 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας με συναγωγή**

Η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή είναι αυτή που προκαλείται όταν ένα ρευστό κινείται γύρω από ένα στερεό σώμα. Αυτός ο τρόπος μεταφοράς θερμότητας εξαλείφεται στους περισσότερους κρυοστάτες χρησιμοποιώντας ένα θάλαμο κενού για το διαχωρισμό του ψυχρού και του θερμού τμήματος του κρυοστάτη. Με τον τρόπο αυτό απομακρύνεται κάθε ρευστό που μπορεί να μεταφέρει θερμότητα μέσω συναγωγής. Η χρήση ενός τέτοιου θαλάμου κενού ήταν βασικό χαρακτηριστικό του αρχικού κρυοστάτη υγρού υδρογόνου που σχεδίασε ο James Dewar.

Γενικά, η τιμή της πίεσης ίση με περίπου  $10^{-6}$  millibar ή λιγότερο είναι επαρκές κενό ώστε να η μεταφορά θερμότητας με συναγωγή. Οι κρυοστάτες, ιδίως εκείνοι που λειτουργούν

---

κάτω από 77 K, μπορούν να μειώσουν τη πίεση έως  $10^{-8}$  millibar ή λιγότερο όταν είναι παγωμένοι. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η χρήση θαλάμων κενού δεν είναι δυνατή ή πρακτικά εφικτή και χρησιμοποιούνται άλλες τεχνικές, όπως η μόνωση με αφρό.

### 2.3.3 Μείωση της μεταφοράς θερμότητας μέσω ακτινοβολίας

Όλες οι επιφάνειες με θερμοκρασία διαφορετική του απόλυτου μηδέν εκπέμπουν θερμότητα ως ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Τούτη η θερμική ακτινοβολία είναι συνήθως η μεγαλύτερη πηγή διαρροής θερμότητας σε έναν κρυοστάτη. Υπάρχουν πολλές τεχνικές για τη μείωση της θερμικής διαρροής ακτινοβολίας. Τούτες οι τεχνικές προκύπτουν από την εξίσωση που διέπει την εξιδανικευμένη (σε παράλληλες πλάκες, επιφανειακές εκπομπές ίσες και συντελεστής εκπομπής  $<1$ ) μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία:

$$q = \frac{\epsilon}{(N+1) * 2} \sigma (T_H^4 - T_L^4) \quad \text{Εξίσωση (1.4)}$$

όπου  $q$  είναι η μεταφερόμενη θερμότητα σε  $W/m^2$ ,  $\epsilon$  είναι ο συντελεστής εκπομπής των επιφανειών,  $\sigma$  είναι η σταθερά Stefan-Boltzmann ( $5,67 \times 10^{-8} W/(K^4 m^2)$ ), και  $N$  είναι ο αριθμός των μη ψυχόμενων ασπίδων ακτινοβολίας μεταξύ της επιφάνειας υψηλής θερμοκρασίας ( $T_H$ ) και της επιφάνειας χαμηλής θερμοκρασίας ( $T_L$ ). Με βάση την εξίσωση 1.4, η διαρροή θερμότητας μπορεί να μειωθεί με τη μείωση του συντελεστή εκπομπής της επιφάνειας, την προσθήκη μη ψυχόμενων ασπίδων ακτινοβολίας μεταξύ των επιφανειών υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας και τη μείωση της θερμοκρασίας της επιφάνειας υψηλής θερμοκρασίας.

Η θερμοκρασία της επιφάνειας υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να μειωθεί με την παρεμβολή μιας ενεργά ψυχόμενης ασπίδας ακτινοβολίας χαμηλότερης θερμοκρασίας μεταξύ της επιφάνειας θερμοκρασίας δωματίου (300 K) και της επιφάνειας χαμηλότερης θερμοκρασίας. Εάν χρησιμοποιήσουμε την Εξ. 1.4 υποθέτοντας συντελεστή εκπομπής 0,2 και μη ύπαρξη μη ψυχόμενων ασπίδων ( $N = 0$ ), η διαρροή θερμότητας μεταξύ μιας επιφάνειας 300 και 4,2 K είναι  $46 W/m^2$ . Εάν η θερμότερη επιφάνεια που ακτινοβολεί προς την επιφάνεια των 4,2 K γίνει 77 K, τότε η διαρροή θερμότητας μειώνεται σε  $0,2 W/m^2$ . Η χρήση ενεργά ψυχόμενων ασπίδων θερμικής ακτινοβολίας είναι πολύ συνηθισμένη και παρατηρείται στις περισσότερες κατασκευές.

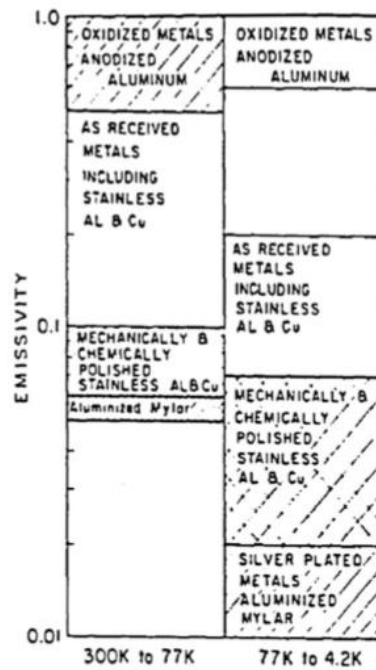
Οι ενεργά ψυχόμενες ασπίδες μπορούν να ψύχονται με ψυχρούς ατμούς που προέρχονται από μια κρυογονική δεξαμενή, με ψυχρό υγρό που προέρχεται από μια ψυκτική μονάδα και με αγωγή ψύξης από ένα μικρό κρυοψύκτη βιδωμένο στην ασπίδα.

Στο σχήμα 4 παρουσιάζονται οι συντελεστές εκπομπών μερικών τυπικών υλικών που χρησιμοποιούνται σε κρυοστάτες. Κατά τον υπολογισμό της θερμικής διαρροής ακτινοβολίας

---

πρέπει να δίνεται προσοχή ώστε να μην υποεκτιμάται η τιμή του συντελεστή εκπομπής. Πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η πιθανότητα θαμπώματος ή οξείδωσης της επιφάνειας που μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο συντελεστή εκπομπής. Η επαργύρωση μιας επιφάνειας ή η επικάλυψη της επιφάνειας με ταινία υψηλής ανακλαστικότητας βοηθάει στη μείωση της ικανότητας εκπομπής, αλλά μπορεί να είναι δαπανηρή και γενικά γίνεται μόνο όταν είναι επιθυμητή η απολύτως ελάχιστη διαρροή θερμότητας ακτινοβολίας ή όταν δεν υπάρχει χώρος για πολυστρωματική μόνωση.

Ο δεύτερος, παθητικός τρόπος μείωσης της διαρροής θερμότητας, είναι η χρήση παθητικών μη-ψυχόμενων ασπίδων για την παρεμπόδιση της οπτικής επαφής μεταξύ της ψυχρής και της θερμής επιφάνειας. Τούτο πραγματοποιείται με την πολυστρωματική μόνωση (Multi-layer Insulation) (MLI), που μερικές φορές ονομάζεται υπερμόνωση. Η MLI αποτελείται από πολλά στρώματα λεπτού αλουμινένιου Mylar ή μερικές φορές αλουμινένιου Karton που τοποθετούνται στον κενό χώρο μεταξύ της θερμής και της ψυχρής επιφάνειας. Τα πολλά στρώματα χρησιμοποιούνται ώστε να μειώνεται η θερμική αγωγιμότητα μεταξύ των διαδοχικών στρωμάτων. Αυτό γίνεται συνήθως με την τοποθέτηση ενός μη αγωγικού πλέγματος ή χαρτιού μεταξύ των φύλλων αλουμινίου Mylar ή σε ορισμένες περιπτώσεις με την αλουμινοποίηση μόνο της μιας πλευράς του Mylar και στη συνέχεια με το τσαλάκωμα των φύλλων ώστε να υπάρχουν μόνο σημειακές επαφές μεταξύ τους. Δεδομένου ότι το MLI καθιστά τον όρο N στην Εξ. 1.4 μεγάλο, η επίδρασή του στη θερμική διαρροή θερμότητας λόγω ακτινοβολίας είναι εντυπωσιακή. Ως εκ τούτου, σχεδόν όλες οι κατασκευές χρησιμοποιούν MLI στο σχεδιασμό τους. Στο Σχήμα 5 παρουσιάζεται ένα παράδειγμα MLI από τον κρυοστάτη μαγνήτη του Μεγάλου Επιταχυντή Αδρονίων (LHC).



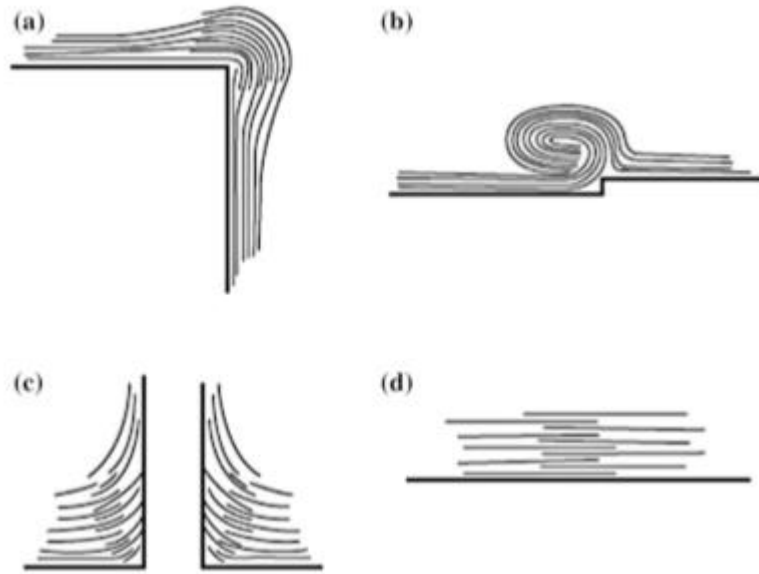
Εικόνα 4: Εκπομπές τυπικών υλικών κρυοστάτη



Εικόνα 5: Το σύστημα MLI για τους κρυοστατικούς μαγνήτες μεγάλου επιταχυντή αδρονίων (LHC).

Υπάρχουν ορισμένες προειδοποιήσεις σχετικά με τη χρήση του MLI. Πρέπει να δοθεί προσοχή ώστε να μην συσκευάζεται το MLI πολύ σφιχτά στον κενό χώρο, διότι, με τον τρόπο αυτό, αυξάνονται οι απώλειες αγωγής, μειώνοντας το όφελος του MLI.

Επίσης, το MLI δεν πρέπει να συνδέεται μεταξύ ενός από τα θερμότερα σώματα με ένα από τα ψυχρότερα. Διότι με αυτόν τον τρόπο, το MLI δρα ως θερμική γέφυρα για τη θερμότητα. Είναι επίσης σημαντικό να επικαλύπτονται τα στρώματα του MLI στις ραφές, ώστε όταν το MLI συρρικνώνεται κατά την ψύξη, να μην ανοίγει ένα κενό που επιτρέπει στη θερμή επιφάνεια να βλέπει απευθείας την ψυχρή επιφάνεια κάτω από το MLI. Το σχήμα 6 απεικονίζει τον κατάλληλο τρόπο αντιμετώπισης αυτών των ζητημάτων. Έχουν γίνει λεπτομερείς αναλύσεις και μετρήσεις ειδικών σχεδίων MLI και πρόσθετες πληροφορίες μπορούν να βρεθούν στα βιβλία που χρησιμοποιούνται ως αναφορές.



Εικόνα 6: Παραδείγματα σωστής εγκατάστασης MLI για γωνίες ( $\alpha$ ), βήματα ( $\beta$ ), διεισδύσεις ( $\gamma$ ) και επικαλύψεις ( $\delta$ )

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΔΙΑΤΑΞΗ ΥΠΕΡΑΓΩΓΙΜΗ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ Π.Δ.Μ.

Σε αυτό το κεφάλαιο, αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος SMES, όπως τα μέρη που αποτελείται, η αρχή λειτουργίας του και ο τρόπος που συνδέεται. Έπειτα, παρουσιάζεται το σύστημα υπεραγωγίμης αποθήκευσης του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας.

### *2.1 Αρχή λειτουργίας και βασική τοπολογία*

Ως συσκευές, τα συστήματα υπεραγωγίμης αποθήκευσης ενέργειας χρησιμοποιούν μια σχετικά απλή ιδέα. Αποθηκεύουν ενέργεια με τη μορφή μαγνητικού πεδίου χρησιμοποιώντας έναν υπεραγωγίμο αγωγό που έχει ψυχθεί σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία. Αυτή η ισχύς μπορεί στη συνέχεια να τροφοδοτηθεί σε ένα κύκλωμα ή φορτίο. Ένα υπεραγωγίμο σύστημα αποθήκευσης μαγνητικής ενέργειας ή SMES μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μαγνητική ενέργεια που αποθηκεύεται. Απαιτεί μια συσκευή ψύξης, όπως θάλαμο και κρυοστάτη, καθώς και ένα σύστημα ρύθμισης ισχύος που ονομάζεται ηλεκτρονικά ισχύος. Αυτό συνδυάζεται με ένα σύστημα ελέγχου που ονομάζεται ελεγκτής, το οποίο παρακολουθεί το σύστημα ώστε να αποτρέψει την υπέρβαση των κρίσιμων τιμών.

Πριν την ανακάλυψη των υπεραγωγών υψηλής θερμοκρασίας, όλα τα SMES χρησιμοποιούσαν υπεραγωγούς χαμηλής θερμοκρασίας και συνεπώς χρειαζόνταν υγρό ήλιο για την ψύξη τους. Τα HTS SMES (υψηλής θερμοκρασίας) μπορούν να χρησιμοποιήσουν υγρό άζωτο για τη ψύξη τους, το οποίο είναι σχετικά ευκολότερο (εξαιρώντας την επικινδυνότητα του χειρισμού του), ωστόσο έχει το αρνητικό ότι η αποθηκευμένη ενέργεια είναι μεγαλύτερη στις χαμηλές θερμοκρασίες, και το άζωτο έχει υψηλή θερμοκρασία.

Όταν το πηνίο φορτώσει, το ρεύμα πέφτει σχετικά αργά ανάλογα με την αντίσταση του σημείου σύνδεσης των άκρων του. Συνήθως αυτή η αντίσταση είναι μικρότερη των  $10^{-10}\Omega$  και η ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Η αποθηκευμένη ενέργεια στο πηνίο ενός SMES δίνεται από τον τύπο:

$$E = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

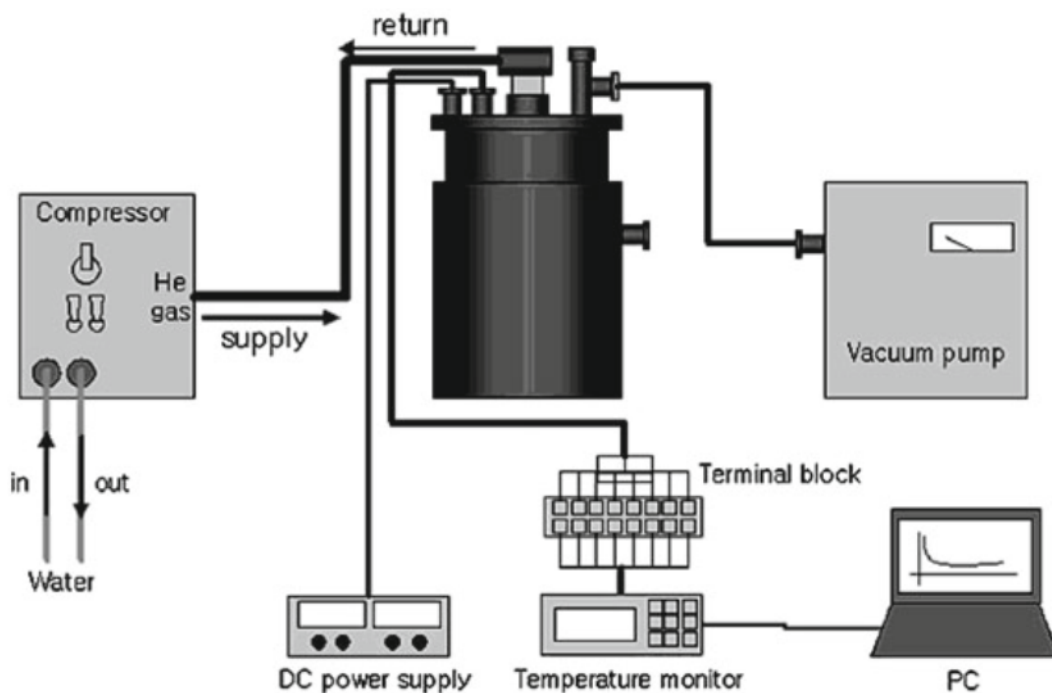
Όπου:

$E$ : η ενέργεια σε Joule (J)

$L$ : Ο συντελεστής αυτεπαγωγής του πηνίου σε Henry (H)

$I$ : Η Ένταση του ρεύματος σε Ampere (A)

Στην εικόνα 7, παρουσιάζεται σχηματικά μία διάταξη ενός SMES το οποίο χρησιμοποιεί έναν συμπιεστή και μία κρυοκεφαλή ώστε να ψύξει το πηνίο, όπως και αυτό του Π.Δ.Μ.



Εικόνα 7: Διάταξη εργαστηριακού συστήματος υπεραγωγίμης αποθήκευσης ενέργειας που χρησιμοποιεί κρυοκεφαλή και εναλλάκτη/συμπιεστή για ψύξη

## 2.2 Το σύστημα υπεραγωγίμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας

Το εργαστήριο Ηλεκτρικής Ισχύος του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας διαθέτει πλήρη εξοπλισμό για χρήση σε πειράματα υπεραγωγίμης αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτό το



---

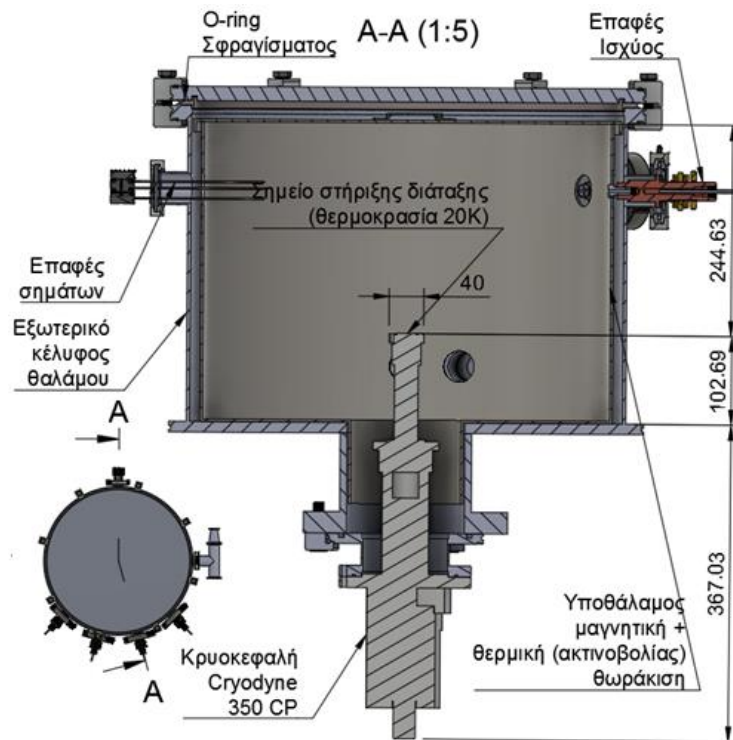
κεφάλαιο, θα αναλυθούν τα χαρακτηριστικά κάθε εξαρτήματός του. Ο εξοπλισμός αποτελείται από:

- i. Το θάλαμο κενού και τα παρελκόμενά του.
- ii. Κρυοκεφαλή υγρού ηλίου Cryodyne 350 CP
- iii. Συμπιεστή για την ψύξη και κυκλοφορία του υγρού ηλίου τύπου 8200 της εταιρείας Brooks
- iv. Αντλία κενού VARIAN
- v. Ηλεκτρονικό φορτίο DC Chroma model 63203
- vi. Αισθητήρες μέτρησης θερμοκρασίας έως -270C και κενού
- vii. Υπεραγώγιμη ταινία (RE)BCO Type-SCS12050-AP της εταιρείας Superpower, 100 m

### **2.2.1 Ο θάλαμος κενού και ο κρυοστάτης Cryodyne 350-CP**

Η ψύξη του πηνίου επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας έναν κρυοψύκτη δύο σταδίων τύπου Cryodyne 350 CP από την CTI cryogenics, ο οποίος είναι βιδωμένος στο κάτω μέρος ενός θαλάμου κενού όπως απεικονίζεται στην εικόνα 8. Ο κρυοψύκτης συνδέεται με έναν συμπιεστή 8200 από την Brooks max και η ισχύς ψύξης εξόδου του είναι 4 W στους 20 K στο δεύτερο στάδιο και 20 W στους 77 K στο πρώτο στάδιο ταυτόχρονα.

Τοποθετημένες γύρω από τον θάλαμο κενού υπάρχουν 6 προεξοχές στις οποίες είναι τοποθετημένες συγκολλημένες ανοξειδωτες βάσεις τύπου KF40 ιδανικών προϊόντων κενού. Στις τέσσερις βάσεις του τύπου KF-40, που βρίσκονται στο μπροστινό μέρος του θαλάμου, τοποθετούνται χάλκινες υγρόψυκτες επαφές ισχύος με ονομαστικά χαρακτηριστικά 1000 A στα 50 V για να χρησιμεύουν ως καλώδια ρεύματος. Οι δύο τελευταίες ατσάλινες βάσεις χρησιμοποιούνται για την αντλία κενού και για μια θύρα οργάνων, αντίστοιχα.



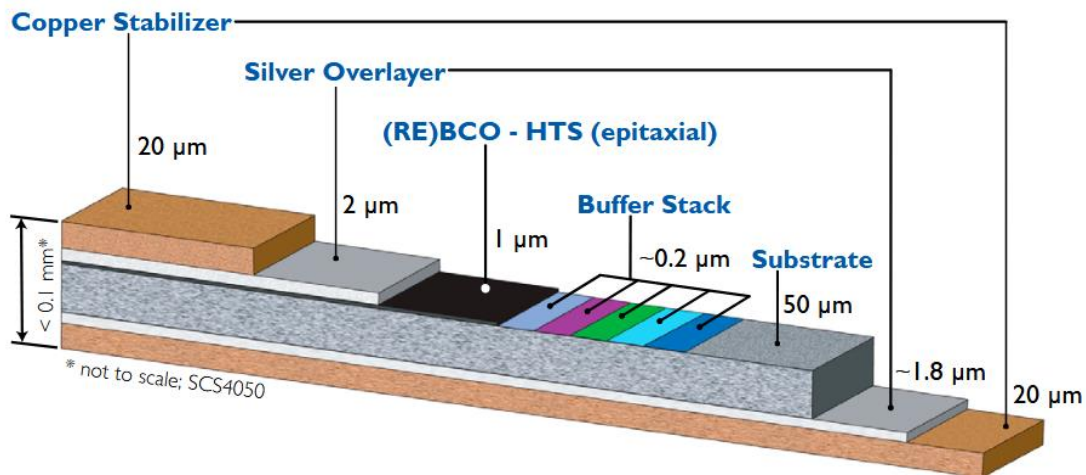
Εικόνα 8: Σχέδιο κρυοστάτη

### 2.2.2 Οι υπεραγώγιμες ταινίες (RE)BCO Type-SCS12050-AP

Το υπεραγώγιμο πηνίο που θα χρησιμοποιήσουμε για την αποθήκευση ενέργειας είναι κατασκευασμένο από αγωγούς ταινίας της εταιρείας Superpower, τύπου SCS12050, από υλικό σπάνια γαίας –βαρίου –χαλκού –οξυγόνου. Επειδή η σπάνια γαία είναι το ύτριο, η ταινία μπορεί να ονομάζεται YBCO αντί του (RE)BCO.

Για την κατασκευή της ταινίας χρησιμοποιείται τεχνική εναπόθεσης λεπτών υμενίων με σκοπό την αύξηση της αντόχης του υπεραγωγίμου στρώματος.

Η δομή της ταινίας φαίνεται στο σχήμα 9. Το πάχος του υπεραγώγιμου στρώματος είναι 1μm. Για υψηλή μηχανική αντοχή και ηλεκτρική αντίσταση χρησιμοποιείται υπόστρωμα μη μαγνητικό Hastelloy, από κράμα δέκα μετάλλων.



Εικόνα 9: Δομή ταινίας SCS12050-YBCO της εταιρείας Superpower.

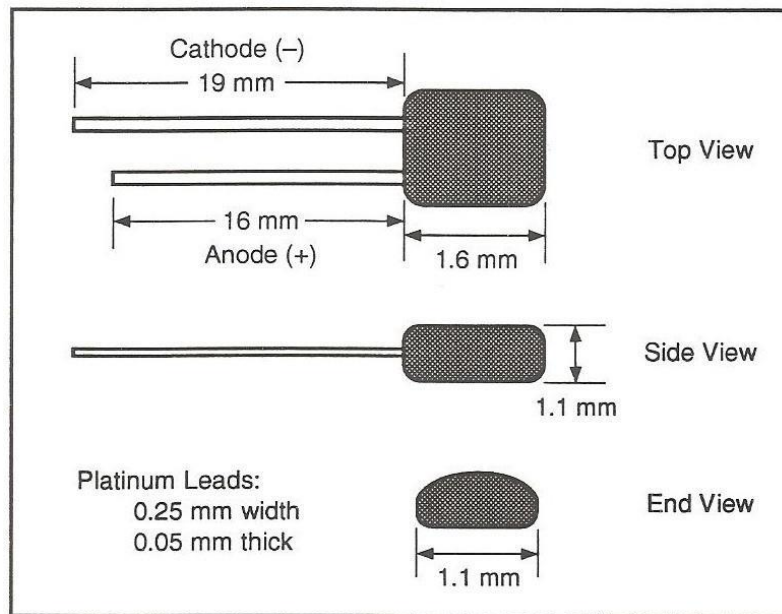
Για να είναι δυνατή η συγκόλληση επαφών/καλωδιών για τη τροφοδότηση του ρεύματος και για μειωμένη αντίσταση στις χαμηλές θερμοκρασίες, τα δύο εξωτερικά στρώματα είναι χάλκινα. Για την αποφυγή ηλεκτρικών τόξων οι γωνίες των στρωμάτων του χαλκού είναι στρογγυλεμένες. Η ταινία έχει συνολικό πάχος 0.1mm, και πλάτος 12mm. Τα χαρακτηριστικά της ταινίας όπως δίνονται από την εταιρεία, βρίσκονται στον επόμενο πίνακα και διαγράμματα:

Μέγεθος	Ταινία SCS12050	Σχόλιο
Ελάχιστο κρίσιμο ρεύμα $I_c$	240 A	DC
Πλάτος	12 mm	
Συνολικό πάχος ταινίας	0.1 mm	
Πάχος στρωμάτων χαλκού	0.04 mm	
Κρίσιμη εφελκυστική τάση	> 550 MPa	Στους 77K
Ειδική αντίσταση υποστρώματος	125 mΩ cm	
Ομοιομορφία κρίσιμου ρεύματος $I_c$	± 10%	Δίδεται αποδεικτικό κατά την αγορά με μετρήσεις

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά ταινίας SCS12050

### 2.2.3 Το θερμόμετρο TG120-PL

Σε όλα τα πειράματα που θα συμβούν στο θάλαμο είναι σημαντικό να μετράται η θερμοκρασία συναρτήσει των υπολοίπων μεγεθών του πειράματος. Για το σκοπό αυτό, στη διάταξη χρησιμοποιείται ένα θερμόμετρο διόδου τύπου TG120-PL της εταιρείας Lakeshore. Το θερμόμετρο είναι πολύ μικρό σε μέγεθος, και οι διαστάσεις του δίνονται παρακάτω:



Εικόνα 10. Διαστάσεις θερμομέτρου TG-120PL

Για τη χρήση του θερμομέτρου, ο κατασκευαστής του παρέχει την κατάλληλη συνδεσμολογία και τη βαθμονόμηση του. Το θερμόμετρο συνδέεται σε μία πηγή ρεύματος που παρέχει σταθερά 10 $\mu$ A μέσω του θερμομέτρου.

Οι ακροδέκτες του θερμομέτρου είναι κατασκευασμένοι από πλατίνα και υπάρχουν τρεις παράγοντες που πρέπει να προσέχουμε για την τοποθέτηση του. Αυτοί είναι: η σωστή τοποθέτηση του αισθητήρα, η σωστή συγκόλληση των ακροδεκτών και η σωστή θερμική συγκράτηση των ακροδεκτών. Το σημείο τοποθέτησης του αισθητήρα πρέπει να καθαριστεί με ένα διαλύτη όπως η ασετόνη και μετέπειτα να ξεπλυθεί με ισοπροπυλική αλκόολη.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΜΕΤΡΗΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Στο παρόν κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά του μετρητικού εξοπλισμού που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα πτυχιακή, και η συνδεσμολογία του μετρητικού συστήματος που θα κατασκευαστεί, και έπειτα διεξάγεται ένα πείραμα, ώστε να επιβεβαιωθεί η λειτουργία της κατασκευασμένης μετρητικής διάταξης.

### 3.1 Εισαγωγή στους μικροκοντρόλερ *raspberry pi* (RPI)

*Το Raspberry Pi είναι ένας μικροελεγκτής σχεδιασμένος να είναι φθηνός, σχεδόν αναλώσιμος υπολογιστής. Το Raspberry Pi δημιουργήθηκε για να κάνει τα παιδιά να ενδιαφέρονται για τον προγραμματισμό. Από την εισαγωγή του το 2012, το Raspberry Pi έχει γίνει η τρίτη με τις περισσότερες πωλήσεις πλατφόρμα υπολογιστών γενικής χρήσης, ακολουθώντας μόνο τους υπολογιστές Microsoft Windows και Apple Macintosh. Υπολογίζεται ότι έως και το 44% των Raspberry Pi's αγοράζονται τώρα από "βιομηχανικούς" πελάτες.*

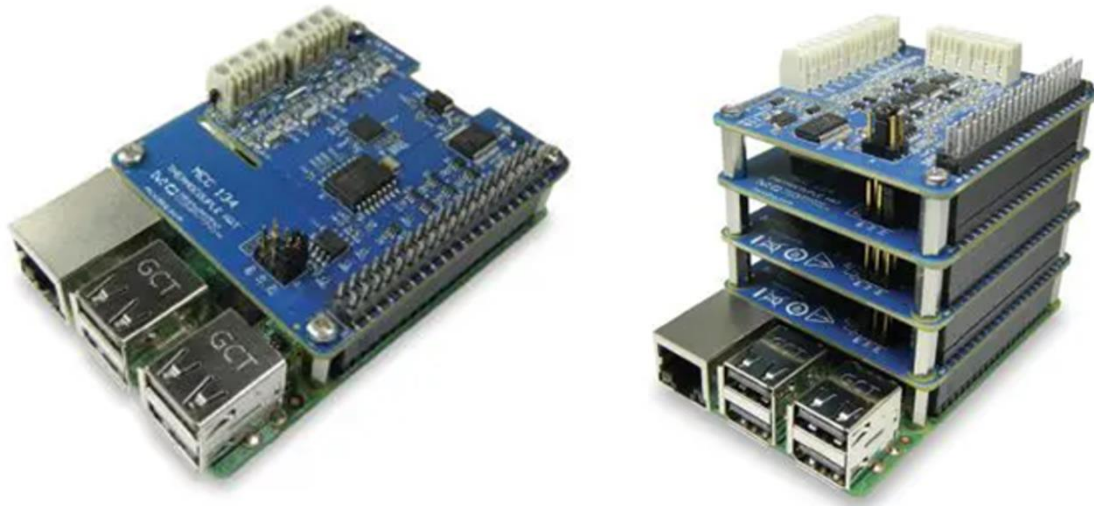
Η τρέχουσα πανδημία βοήθησε επίσης στην ανάπτυξη της αγοράς Raspberry Pi. Με περισσότερους ανθρώπους να εργάζονται από το σπίτι, η ζήτηση για μικρά, φθηνά έργα μηχανικής έχει εκτιναχθεί στα ύψη. Το Raspberry Pi έχει γίνει κατάλληλο για αυτούς τους τύπους εφαρμογών και έχει κάνει τον προγραμματισμό και τη μηχανική ακόμη πιο προσιτή.

Το Raspberry Pi δεν διαθέτει ενσωματωμένες δυνατότητες λήψης μετρήσεων, όπως μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό (ADC analog-to-digital converters), μετατροπείς ψηφιακού σε αναλογικό (DAC digital-to-analog converters) ή ρυθμισμένες ψηφιακές εισόδους και εξόδους (DIO digital inputs and outputs). Ωστόσο, αυτές οι δυνατότητες μπορούν να προστεθούν μέσω των ακροδεκτών GPIO (General Purpose Input/Output, γενικού σκοπού είσοδος/εξόδος) 40 ακίδων. Μια συσκευή που συνδέεται απευθείας στην κεφαλίδα 40 ακίδων και στοιβάζετε στο Raspberry Pi ονομάζεται HAT (Hardware Attached on Top).

*Με τα χρόνια, έχουν δημοσιευτεί σχέδια ανοιχτού κώδικα και μικρές εταιρείες έχουν πουλήσει HAT χαμηλού κόστους για μια ποικιλία εργασιών, συμπεριλαμβανομένης της υποστήριξης για αναλογικές και ψηφιακές εισόδους/εξόδους. Αυτά τα σχέδια και τα προϊόντα είναι επαρκή για την αγορά εκπαίδευσης και χομπίστας/κατασκευαστή, αλλά έχουν κάποιες σοβαρές ελλείψεις για επαγγελματικές εφαρμογές δοκιμών και μετρήσεων. Οι περισσότερες από*

---

αυτές τις συσκευές παρέχονται μερικώς συναρμολογημένες, χωρίς προδιαγραφές ή υποστήριξη προγραμματισμού και χωρίς εγγυήσεις απόδοσης που μπορούν να επιτευχθούν μόνο με μια διεξοδική διαδικασία επικύρωσης της συσκευής.



Εικόνα 11. Raspberry Pi με 1 HAT (αριστερά), και 4 HAT (δεξιά)

Τα DAQ HAT συνδέονται στις ακίδες ενός υπολογιστή Raspberry Pi. Ένα παράδειγμα είναι η σειρά DAQ HAT από την εταιρεία Measurement Computing. Αυτά τα HAT προσφέρουν παρόμοιες προδιαγραφές και ακρίβεια με τα παραδοσιακά προϊόντα DAQ που βασίζονται σε USB και Ethernet από την εταιρεία MCC με ανάλυση έως 24 bit και ρυθμούς δειγματοληψίας έως 100 kS/sec.

Τα DAQ HAT μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε βασικές εφαρμογές με λίγα μόνο κανάλια εισόδου τάσης ή πιο εξελιγμένες εφαρμογές με έως και 64 κανάλια πολλαπλών τύπων σήματος. Έως οκτώ HAT μπορούν να στοιβάζονται σε ένα Raspberry Pi. Τα HAT είναι διαθέσιμα με εισόδους τάσης, εισόδους θερμοστοιχείων, εισόδους αισθητήρων που βασίζονται σε IEPΕ, αναλογικές εξόδους και ψηφιακές εισόδους/εξόδους, επιτρέποντας στους χρήστες να διαμορφώνουν πολυλειτουργικές λύσεις που βασίζονται στο Raspberry Pi.

Τα DAQ HAT συνοδεύονται από βιβλιοθήκες λογισμικού που υποστηρίζουν Python και C/C++ για να διευκολύνουν τη γρήγορη και εύκολη ανάπτυξη. Παρέχεται επίσης ολοκληρωμένη τεκμηρίωση API και υλικού.

### 3.3 Χαρακτηριστικά των Raspberry PI

Το Raspberry Pi 4 Model B είναι το πιο πρόσφατο προϊόν στη δημοφιλή σειρά υπολογιστών Raspberry Pi. Προσφέρει πρωτοποριακές αυξήσεις στην ταχύτητα του επεξεργαστή, την απόδοση πολυμέσων, τη μνήμη και τη συνδεσιμότητα σε σύγκριση με το Raspberry Pi 3 Model B+ της προηγούμενης γενιάς, ενώ διατηρεί συμβατότητα προς τα πίσω και παρόμοια κατανάλωση ενέργειας. Για τον τελικό χρήστη, το Raspberry Pi 4 Model B παρέχει επιδόσεις επιτραπέζιου υπολογιστή συγκρίσιμες με συστήματα PC αρχικού επιπέδου x86.

Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του προϊόντος περιλαμβάνουν έναν τετραπύρρηνο επεξεργαστή 64-bit υψηλής απόδοσης, υποστήριξη διπλής οθόνης σε αναλύσεις έως και 4K μέσω ενός ζεύγους θυρών micro-HDMI, αποκωδικοποίηση βίντεο υλικού έως και 4Kp60, έως 4 GB μνήμης RAM, διπλή ασύρματο LAN ζώνης 2,4/5,0 GHz, Bluetooth 5.0, Gigabit Ethernet, USB 3.0 και δυνατότητα PoE (μέσω ξεχωριστού πρόσθετου PoE HAT).

Το ασύρματο LAN και το Bluetooth διπλής ζώνης διαθέτουν πιστοποίηση συμμόρφωσης αρθρωτών, επιτρέποντας στην πλακέτα να σχεδιαστεί σε τελικά προϊόντα με σημαντικά μειωμένες δοκιμές συμμόρφωσης, βελτιώνοντας τόσο το κόστος όσο και τον χρόνο διάθεσης στην αγορά.

*Τα χαρακτηριστικά του παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:*

Επεξεργαστής:	Broadcom BCM2711, τετραπύρρηνος Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1,5 GHz
Μνήμη:	1 GB, 2 GB ή 4 GB LPDDR4 (ανάλογα με το μοντέλο)
Συνδεσιμότητα:	2,4 GHz και 5,0 GHz IEEE 802.11b/g/n/ac ασύρματο LAN, Bluetooth 5.0, BLE Gigabit Ethernet 2 × θύρες USB 3.0 2 × θύρες USB 2.0.
GPIO:	Τυπική κεφαλίδα GPIO 40 ακίδων

	(πλήρως προς τα πίσω-συμβατό με προηγούμενες πλακέτες)
Βίντεο & Ήχος:	2 × θύρες micro HDMI (υποστηρίζονται έως και 4Kp60) Θύρα οθόνης MIPI DSI 2 λωρίδων Θύρα κάμερας MIPI CSI 2 λωρίδων 4-πολική θύρα στερεοφωνικού ήχου και σύνθετου βίντεο
ΠΟΛΥΜΕΣΑ:	H.265 (αποκωδικοποίηση 4Kp60); H.264 (αποκωδικοποίηση 1080p60, κωδικοποίηση 1080p30); OpenGL ES, γραφικά 3.0
Υποστήριξη κάρτας SD:	Υποδοχή κάρτας Micro SD για φόρτωση λειτουργικού συστήματος και αποθήκευση δεδομένων
Ισχύς εισαγωγής:	5V DC μέσω υποδοχής USB-C (ελάχιστο 3A <sup>1</sup> ) 5V DC μέσω κεφαλίδας GPIO (ελάχιστο 3A <sup>1</sup> ) Τροφοδοσία μέσω Ethernet (PoE) – ενεργοποιημένη (απαιτείται ξεχωριστό PoE HAT)
Περιβάλλον:	Θερμοκρασία λειτουργίας 0–50°C
Διάρκεια ζωής παραγωγής:	Το Raspberry Pi 4 Model B θα παραμείνει στην παραγωγή τουλάχιστον μέχρι τον Ιανουάριο του 2026.

**Πίνακας 2.** Χαρακτηριστικά των Raspberry PI

### 3.4 Η πλακέτα DAQc2Plate

Η λήψη μετρήσεων θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση μίας κάρτας DAQc2Plate. Η κάρτα DAQc2Plate περιλαμβάνει 8 ψηφιακές εξόδους για την οδήγηση εξωτερικών συσκευών όπως ρελέ και LED υψηλού ρεύματος καθώς και οκτώ, 16 bit,  $\pm 12$  volt αναλογικές σε ψηφιακές εισόδους για ακριβείς μετρήσεις θερμοκρασίας, τάσης, υγρασίας και άλλα. Επιπλέον, υπάρχουν οκτώ ψηφιακές εισόδοι, τέσσερις αναλογικές έξοδοι υψηλής ταχύτητας 12 bit



(DAC), δύο διαμορφωτές πλάτους παλμού 10 bit, μια αποκλειστική είσοδος για τη μέτρηση της συχνότητας και οκτώ ενδεικτικές λυχνίες LED γενικής χρήσης. Λόγω της ταχύτητας της πλάκας DAQC2, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βασικός ψηφιακός παλμογράφος ή γεννήτρια λειτουργιών δύο καναλιών. Λόγω της ακρίβειάς του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως επεκτάσιμο καταγραφικό δεδομένων, και, λόγω της ισχύος του, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ελεγκτής διπλού βηματικού κινητήρα. Το λογισμικό γραμμένο στη γλώσσα προγραμματισμού Python, που παρέχει αυτές τις δυνατότητες είναι δωρεάν για λήψη. Το παρακάτω φύλλο δεδομένων περιέχει όλα τα χαρακτηριστικά της πλακέτας:

Τα γενικά χαρακτηριστικά της κάρτας παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα:

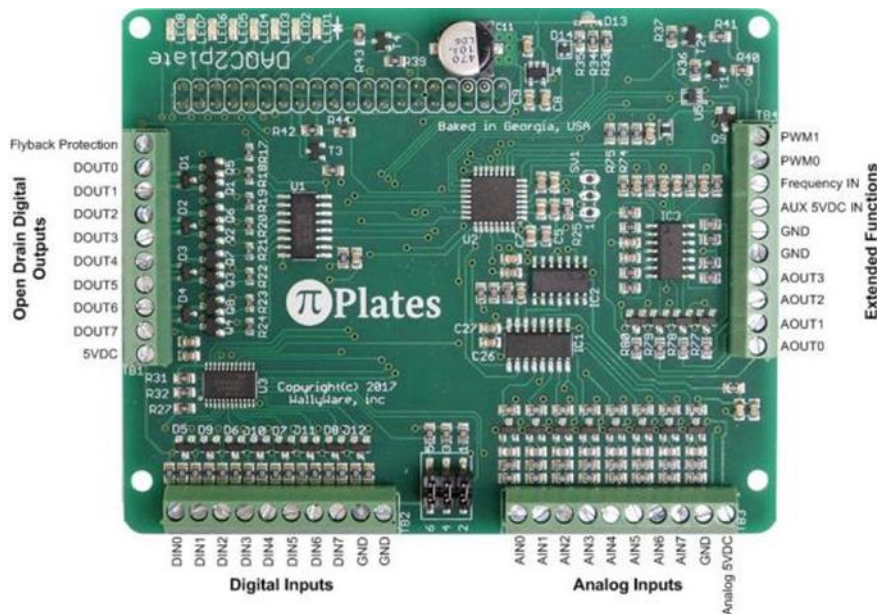
<p><b>Γενικός</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Αποκλειστικός ενσωματωμένος επεξεργαστής</li> <li>• Παρέχει συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο</li> <li>• Επιτρέπει μελλοντικές ενημερώσεις κώδικα</li> <li>• Χρησιμοποιεί τα σήματα SPI, CE1 και δύο αποκλειστικές ακίδες GPIO (16 &amp; 22)<sup>1</sup></li> <li>• Όλες οι δυνατότητες είναι προσβάσιμες μέσω εμπλουτισμένου συνόλου εντολών Python</li> <li>• Έλεγχος με το node-RED χρησιμοποιώντας μια βιβλιοθήκη τρίτου κατασκευαστή</li> <li>• Συμβατό με όλες τις εκδόσεις του Raspberry Pi</li> <li>• Η σχεδίαση επιτρέπει έως και οκτώ πλάκες DAQC να στοιβάζονται μαζί για οκτώ φορές το I/O</li> <li>• Χρησιμοποιεί λιγότερο από 20 mA ρεύματος συνεχούς ρεύματος κατά την αναμονή</li> <li>• Συμμορφώνεται με τις απαιτήσεις ROHS, FCC Part 15 Class A και CE πρότυπα</li> <li>• Όλες οι είσοδοι και έξοδοι προστατεύονται από ESD και υπέρταση</li> <li>• Προστατεύει το Raspberry Pi σας ενώ παρέχει βελτιωμένη είσοδο/έξοδο</li> </ul>	<p><b>Αναλογικοί Είσοδοι</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Οκτώ προστατευμένες είσοδοι</li> <li>• Εύρος εισόδου -12 έως +12V</li> <li>• Ανάλυση 16 bit</li> <li>• Ειδικό κανάλι για τη μέτρηση της τάσης τροφοδοσίας</li> <li>• Εργοστασιακά βαθμονομημένο σε +/- 2 LSB</li> </ul> <p><b>Αναλογικοί Έξοδοι</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Τέσσερις προστατευμένες έξοδοι</li> <li>• Εύρος εξόδου 0 έως 4,096 V</li> <li>• Ανάλυση 12 bit</li> </ul> <p><b>Ψηφιακοί Είσοδοι</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 8 προστατευμένες είσοδοι</li> <li>• Συμβατό με λογικά 3.3 και 5.0</li> <li>• Μπορεί να μετρηθεί ή να προγραμματιστεί για να δημιουργήσει μια διακοπή κατά την αλλαγή</li> </ul> <p><b>Διαμορφωτές πλάτους παλμού</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Δύο προστατευμένες ανεξάρτητες έξοδοι</li> <li>• 10 bit ανάλυσης</li> </ul> <p><b>Βοηθητική ισχύς εισόδου</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Επιτρέπει τη χρήση ισχυρότερου και καλύτερα ρυθμιζόμενου τροφοδοτικού 5VDC</li> <li>• Προστασία αντίστροφης πολικότητας</li> </ul>
--	--

- Περιλαμβάνει προγραμματιζόμενο RGB LED
- Κάθε πλακέτα DAQC2 είναι 100% ελεγχόμενη και βαθμονομημένη
- Λεπτομερής ηλεκτρονικός οδηγός χρηστών με παραδείγματα
- Διαστάσεις: 100mm μήκος x 80mm πλάτος X 20mm ύψος

#### Ανοίξτε τις Εξόδους Συλλεκτών

- 8 Έξοδοι
- Ενδεικτικές λυχνίες LED σε κάθε έξοδο
- 3A ρεύμα βύθισης για κάθε κανάλι
- Ενσωματωμένη προστασία από το ρεύμα αναστροφής
- Μέγιστη τάση φορτίου 30VDC

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά πλακέτας DAQC2



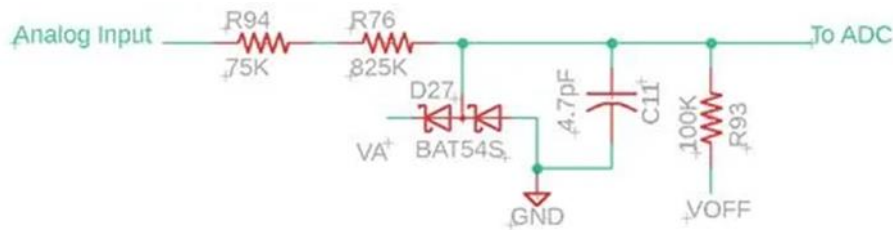
Εικόνα 12. Η πλακέτα DAQC2Plate

#### 3.4.1 Αναλογικοί εισόδου

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται το σχηματικό σχήμα μιας αναλογικής εισόδου. Υπάρχουν μερικά βασικά χαρακτηριστικά που πρέπει να γνωρίζετε:

1. Η αντίσταση εισόδου είναι 1MΩ.

2. Χωρίς είσοδο, ο μετατροπέας A σε D θα επιστρέψει μια κλιμακούμενη τιμή της τάσης περίπου 1,6 V.
3. Επιτρέπει διαφορικές μετρήσεις τάσης χρησιμοποιώντας έναν μονοπολικό μετατροπέα A/D
4. Ο διαιρέτης τάσης μετατρέπει τα +/-12 βολτ σε μια περιοχή από 0 έως 2,4 βολτ
5. Ο πυκνωτής 4,7 pF και οι αντιστάσεις συνθέτουν ένα 1ο χαμηλοπερατό φίλτρο με συχνότητα αποκοπής 376 KHz.



Εικόνα 13. Σχήμα μιας αναλογικής εισόδου

### 3.4.2 Εντολές χρήσης κάρτας στη γλώσσα python

Η κάρτα DAQc2Plate χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού python προκειμένου να ελεγχθεί. Παρακάτω, φαίνονται οι κύριες εντολές που χρησιμοποιούνται για τη λήψη μετρήσεων από αυτή.

#### Λειτουργίες Ψηφιακής Εισόδου

1. **getDINbit(addr,bit)** - επιστροφή τιμής ενός bit **getDINall(addr)** - επιστροφή και των οκτώ bit

**enableDINint(addr, bit, edge)** - ενεργοποιεί τις διακοπές για μια αλλαγή εισόδου στο καθορισμένο bit. Η τιμή "άκρης" μπορεί να είναι 'r' για άνοδο, 'f' για πτώση, 'b' και για τα δύο.

**disableDINint(addr,bit)** - απενεργοποιήστε τις διακοπές στο καθορισμένο bit

**getTEMP(addr,bit,scale)** - μια ειδική λειτουργία για την ανάγνωση ενός αισθητήρα θερμοκρασίας DS18X20 που είναι συνδεδεμένος στην καθορισμένη είσοδο bit. Οι τιμές κλίμακας μπορεί να είναι «c», «f» ή «k» για βαθμούς Κελσίου, Φαρενάιτ ή Κέλβιν. Σημειώστε ότι αυτή η λειτουργία χρειάζεται περίπου 1 δευτερόλεπτο για να ολοκληρωθεί.

#### Λειτουργίες ψηφιακής εξόδου

**setDOUOutbit(addr, bit)** - ορίστε ένα bit

---

**clrDOUOutbit(addr, bit)** - καθαρό μεμονωμένο bit

**toggleDOUOutbit(addr, bit)** - εναλλαγή ενός μόνο bit

**setDOUOutall(addr,byte)** - ορίστε όλα τα bit μία φορά. Η τιμή πρέπει να είναι 172 ή μικρότερη.

#### **Αναλογικές σε Ψηφιακές Λειτουργίες**

**getADC(addr, κανάλι)** - τάση επιστροφής από ένα κανάλι

**getADCall(addr)** - τάση επιστροφής από όλα τα κανάλια

#### **Λειτουργίες μετατροπέα ψηφιακού σε αναλογικό και διαμορφωτή πλάτους παλμών**

**setPWM(addr,channel,value)** - ορίστε τον κύκλο λειτουργίας PWM από 0 έως 1023 (0 έως 100%)

**getPWM(addr, channel)** - επιστροφή τρέχουσας ρύθμισης PWM. **setDAC(addr, channel, value)** - ρυθμίστε την τάση εξόδου DAC στα 0 έως 4,097 βολτ.

**getDAC(addr,channel)** - επιστροφή τάσης εξόδου DAC ρεύματος.

**calDAC(addr)** - βαθμονομήστε τις εξόδους DAC. Χρησιμοποιήστε αυτή τη λειτουργία εάν δεν είστε σίγουροι για την ποιότητα του τροφοδοτικού σας.

#### **Λειτουργίες ελέγχου δίχρωμων LED**

**setLED(addr,color)** - ενεργοποιήστε ένα από τα LED στη συσκευασία δίχρωμων LED

**clrLED(addr,color)** - απενεργοποιήστε ένα από τα LED στη συσκευασία δίχρωμων LED

#### **Υβριδικές Λειτουργίες**

**getRANGE(addr, channel, units)** - διαβάζει την απόσταση από έναν αισθητήρα υπερήχων HC-SR04. Το όρισμα καναλιού καλεί την τιμή του ζεύγους ψηφιακής εισόδου/ψηφιακής εξόδου που απαιτείται για τη διασύνδεση με τον αισθητήρα. Οι μονάδες μπορούν να είναι «ί» για ίντσες ή «c» για εκατοστά.

#### **Λειτουργίες επιπέδου συστήματος**

**getID(addr)** - επιστροφή συμβολοσειράς περιγραφής Pi-Plate

**getFWrev(addr)** - επιστροφή FW αναθεώρησης σε μορφή byte

---

**getHWrev(addr)** - επιστροφή αναθεώρησης HW σε μορφή byte

**getADDR(addr)** - διεύθυνση επιστροφής του pi-plate. Χρησιμοποιείται για ψηφοφορία διαθέσιμων πλακών κατά την ενεργοποίηση.

**intEnable(addr)** - ενεργοποίηση διακοπών από το DAQC. Το GPIO22 θα τραβηχτεί χαμηλά εάν παρουσιαστεί ένα ενεργοποιημένο συμβάν.

**intDisable(addr)** - απενεργοποιεί και διαγράφει όλες τις διακοπές στο DAQC.

**getINTflags(addr)** - επιστρέφει τιμή σημαίας 16 bit και στη συνέχεια διαγράφει όλες τις σημαίες

**INT Poll()** - προσδιορίστε τι Pi-Plates βρίσκονται στη στοίβα καθώς και τις διευθύνσεις τους.

### Λειτουργίες διακόπτη

**getSWstate(addr)** - επιστρέφει την τρέχουσα κατάσταση του ενσωματωμένου διακόπτη. Η τιμή 1 επιστρέφεται όταν ο διακόπτης είναι επάνω και η τιμή 0 επιστρέφεται όταν είναι κάτω.

**enableSWpower(addr)** - το πάτημα του κουμπιού στο ppGPIO θα βραχυκυκλώσει το RPI GPIO23 στο GND και στη συνέχεια θα αφαιρέσει το 5VDC 45 δευτερόλεπτα αργότερα. Σημειώστε ότι αυτή η ρύθμιση αποθηκεύεται σε μη πτητική μνήμη και πρέπει να εκτελεστεί μόνο μία φορά

**disableSWpower(addr)** - απενεργοποιεί τα παραπάνω. Σημειώστε ότι αυτή η ρύθμιση είναι αποθηκευμένη σε μη πτητική μνήμη και πρέπει να εκτελεστεί μόνο μία φορά.

**enableSWint(addr)** - επιτρέπει στο διακόπτη να δημιουργεί διακοπές όταν πατηθεί. Οι καθολικές διακοπές πρέπει να είναι ενεργοποιημένες πριν χρησιμοποιήσετε αυτήν τη λειτουργία.

**disableSWint(addr)** - εμποδίζει τον ενσωματωμένο διακόπτη να δημιουργήσει διακοπή.

### Ορισμοί

Διεύθυνση (addr): Οι πλάκες DAQC έχουν βραχυκυκλωτήρες στον πίνακα που επιτρέπουν τη ρύθμιση της διεύθυνσής τους σε μια τιμή μεταξύ 0 και 7.

---

Τα κανάλια ADC (analog to digital converter-αναλογικός σε ψηφιακός μετατροπέας) μπορούν να είναι από 0 έως 8 για συνολικά 9 κανάλια. Η ανάγνωση του καναλιού 8 θα επιστρέψει την τάση τροφοδοσίας.

Οι τιμές bit DIN (digital input- ψηφιακή είσοδος) μπορεί να είναι από 0 έως 7 για συνολικά 8 bit Οι τιμές bit DOUT (digital output -ψηφιακή έξοδος) μπορεί να είναι από 0 έως 6 για συνολικά 7 bit

Τα κανάλια PWM (pulse width modulator -διαμορφωτής πλάτους παλμού) μπορεί να είναι 0 ή 1 για συνολικά 2 κανάλια. Οι τιμές εξόδου μπορεί να είναι μεταξύ 0 και 1023.

Τα κανάλια DAC (digital to analog converter -μετατροπέας ψηφιακού σε αναλογικό) μπορούν να είναι 0 ή 1 για συνολικά 2 κανάλια. Η τιμή εξόδου μπορεί να είναι μεταξύ 0 και 4,096 βολτ Οι τιμές LED (led) μπορεί να είναι 0 για το κόκκινο LED ή 1 για το πράσινο.

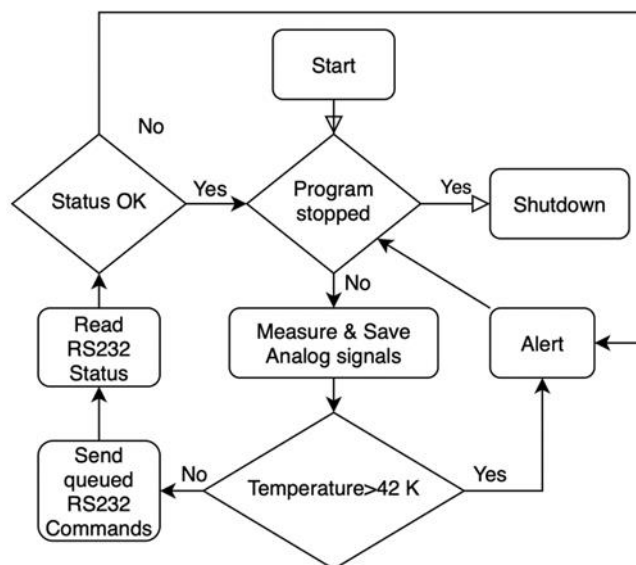
### **3.5 Σχεδίαση μετρητικού συστήματος**

Το σύστημα SMES (αποθήκευσης υπεραγώγιμης μαγνητικής ενέργειας) έχει λειτουργήσει προηγουμένως με τη χρήση κάρτας DAQ και LabVIEW. Σε αυτή την περίπτωση, υλοποιείται ένα πιο βασικό σύστημα που χρησιμοποιεί ένα raspberry pi ως μικροελεγκτή, μετατροπείς αναλογικού σε ψηφιακό σήμα και python. Αυτή η λύση προτιμάται, καθώς η γλώσσα προγραμματισμού επιτρέπει τον ευκολότερο χειρισμό των δεδομένων, και τις επικοινωνίες δικτύου με άλλες συσκευές. Το σχηματικό του συστήματος μέτρησης απεικονίζεται στο Σχ. 15. Το πηνίο είναι κατασκευασμένο ως μη μονωμένη τηγανίτα. Εξαιτίας αυτού, όταν το πηνίο βρίσκεται στην κανονική του κατάσταση, ο ηλεκτρισμός ρέει μέσω των σταθεροποιητικών στρωμάτων χαλκού και επομένως ταξιδεύει μόνο 4 cm χωρίς να παράγει μαγνητικό πεδίο. Όταν το πηνίο βρίσκεται σε υπεραγώγιμη κατάσταση, δηλαδή ψύχεται κάτω από 90 K, ο ηλεκτρισμός διανύει ολόκληρο το μήκος του αγωγού (100m) σε μια σπειροειδή διαδρομή. Σε αυτή την κατάσταση το πηνίο δημιουργεί ένα σημαντικό και επομένως εύκολα μετρούμενο μαγνητικό πεδίο.

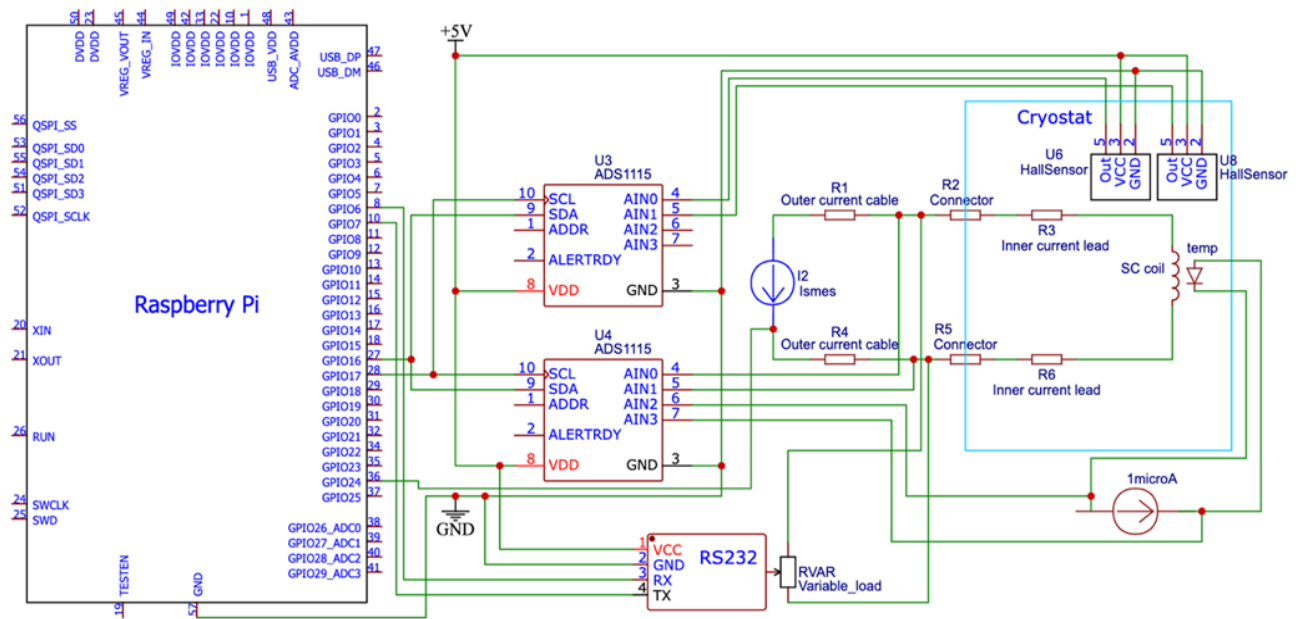
Δύο αναλογικοί σε ψηφιακοί μετατροπείς ADS1115 χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, της τάσης μεταξύ των καλωδίων ρεύματος και των εξόδων των δύο αισθητήρων αίθουσας όπως απεικονίζεται στο σχήμα 10. Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας, χρησιμοποιείται ένα TG-120 PL από τη Lake Shore Cryotronics. Αυτή η μικροσκοπική διάδος τροφοδοτείται από μια πηγή ρεύματος με ρεύμα 1μΑ. Καθώς η θερμοκρασία αλλάζει, η τάση κατά μήκος της διόδου αλλάζει σύμφωνα με ορισμένα σημεία μιας καμπύλης spline που παρέχεται από τον κατασκευαστή. Τα ενδιάμεσα σημεία παρεμβάλλονται γραμμικά.

Για την εκφόρτιση του πηνίου, χρησιμοποιείται ένα προγραμματιζόμενο φορτίο CHROMA 63200 DC. Το φορτίο μπορεί να λειτουργεί με σε σταθερό ρεύμα (CC - constant current), σταθερή αντίσταση (CR - constant resistance), σταθερή τάση (CV - constant voltage) ή σταθερή ισχύ (CP - constant power). Το φορτίο μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας εντολές RS232c, RS485 ή GPIB σύμφωνα με το εγχειρίδιο του κατασκευαστή. Αρχικά, οι εντολές διαμόρφωσης πρέπει να σταλούν για να ορίσετε τον ρυθμό baud, την ισοτιμία και το bit διακοπής και το μήκος των πακέτων. Μετά από αυτό, οι εντολές για την ενεργοποίηση του φορτίου, τη ρύθμιση της λειτουργίας και την ανάγνωση της κατάστασης του φορτίου αποστέλλονται κάθε φορά που εμφανίζεται ο κώδικας.

Το διάγραμμα ροής του Σχ. 14 απεικονίζει το πρόγραμμα python που χρησιμοποιείται για τα συστήματα μετρήσεων που εκτελούνται στο raspberry PI. Αρχικά το κενό δημιουργείται χρησιμοποιώντας μια αντλία κενού. Μόλις το κενό είναι χαμηλότερο από  $10^{-3}$  Atm, το πρόγραμμα python αρχικοποιείται μαζί με τον συμπιεστή. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα αποθηκεύει τη μέτρηση καθενός από τα κανάλια των δύο ADC σε μια βάση δεδομένων που βασίζεται στο mongoDB. Ταυτόχρονα, το πρόγραμμα python ελέγχει εάν η μέτρηση θερμοκρασίας είναι κάτω από 42 K. Εάν ισχύει, επιτρέπει την εγγραφή των εντολών που αποστέλλονται από τον χρήστη στο φορτίο DC και ταυτόχρονα διαβάσει την έξοδο φορτίων DC είτε να επαληθεύσετε την κατάστασή του είτε να κάνετε μέτρηση απευθείας από το φορτίο DC. Ο μικροελεγκτής μπορεί επίσης να ελέγξει την έξοδο του τροφοδοτικού DC.



Εικόνα 14. Διάγραμμα ροής προγράμματος μέτρησης Python



Εικόνα 15. Κύκλωμα μετρητικού συστήματος

Η κάρτα DAQc2Plate συνδέεται πρόσθετα στο Raspberry Pi και χρησιμοποιείται για να ελέγχει τα ψηφιακά pin ενεργοποίηση και απενεργοποίηση συσκευών.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΑΡΧΙΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Στις παρακάτω δύο εικόνες διακρίνονται οι αλλαγές που έγιναν στη διάταξη SMES του Π.Δ.Μ. ώστε να εγκατασταθεί το νέο μετρητικό σύστημα:

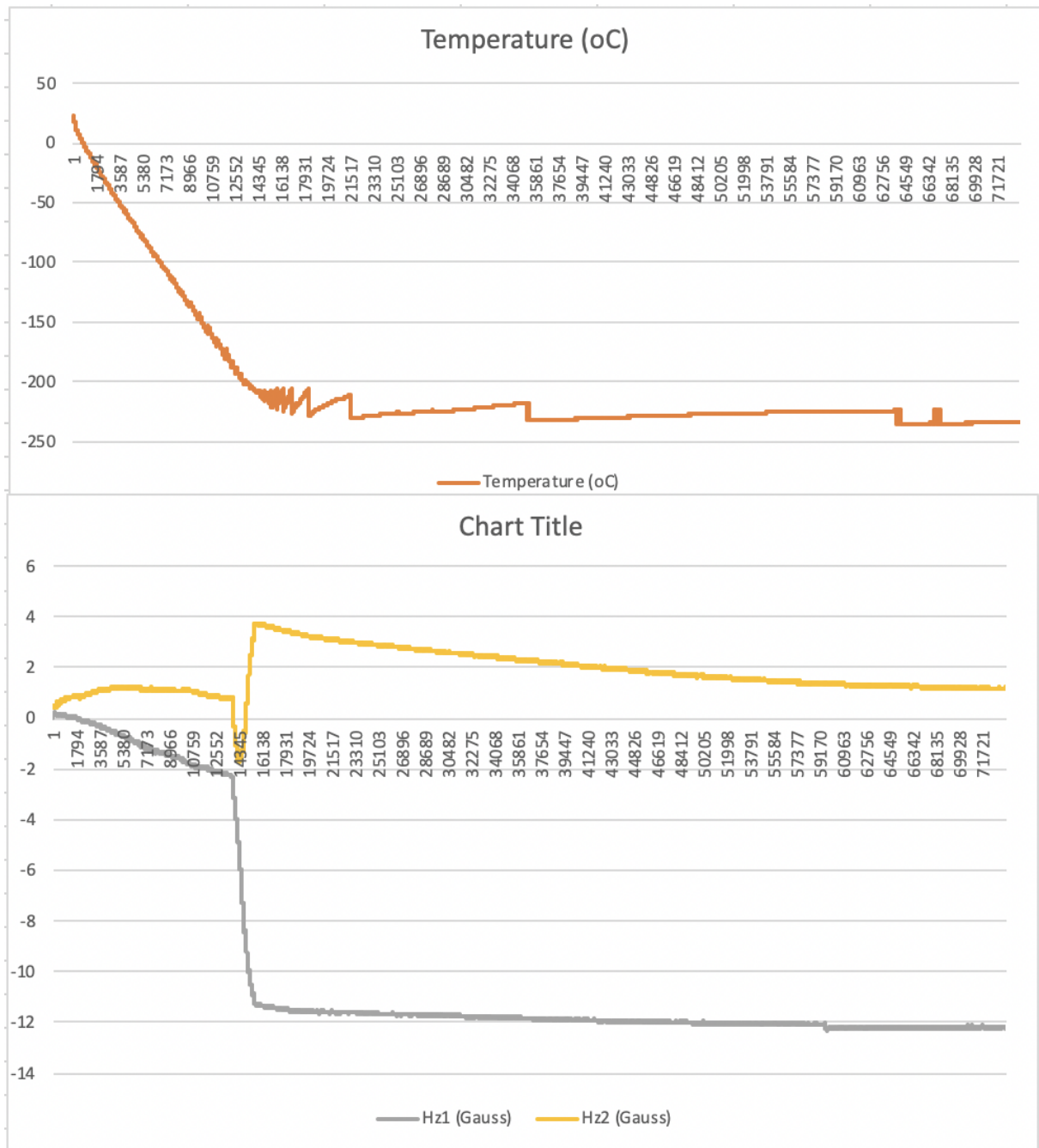


Εικόνα 16. Διάταξη SMES του Π.Δ.Μ.

Τοποθετήθηκε ένα πολύκλωνο καλώδιο το οποίο συνδέει τη διάταξη με τη μετρητική κάρτα που βρίσκεται στο γραφείο, και έγιναν οι απαραίτητες συνδέσεις ώστε να λειτουργήσει το σύστημα. Στην παρούσα πτυχιακή δεν εξετάζεται καθόλου ο κώδικας για τη λήψη μετρήσεων που γράφτηκε στη γλώσσα προγραμματισμού Python.

Το πείραμα αρχικοποιείται με την εκκίνηση του συμπιεστή μαζί με το σύστημα μέτρησης μετά τη δημιουργία του κενού. Ο μαγνήτης αρχίζει να γίνεται υπεραγώγιμος μετά από περίπου 4 ώρες και απαιτεί 16 λεπτά για να γίνει πλήρως υπεραγώγιμος, δηλαδή να ψυχθεί ομοιόμορφα κάτω από τους 92 K. Μετά από αυτό, η θερμοκρασία συνεχίζει να πέφτει και σταθεροποιείται στους 38 K, όπως απεικονίζεται στο Σχ. 17. Αφού ο μαγνήτης φτάσει σε αυτή τη θερμοκρασία, οι εντολές αποστέλλονται χειροκίνητα στο φορτίο συνεχούς ρεύματος και το ρεύμα του τροφοδοτικού απενεργοποιείται, για να επιτρέψει στον μαγνήτη να εκφορτιστεί στο φορτίο. Αυτό το φορτίο DC επιτρέπει μόνο 12W σε σταθερή ισχύ, 0,125 Ω σε λειτουργία

σταθερής αντίστασης, 0,1 V σε λειτουργία σταθερής τάσης ή 0,01 A σε λειτουργία σταθερού ρεύματος. Σε αυτό το πείραμα, το τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος τροφοδοτεί μόνο 2 A ρεύματος και γι' αυτό χρησιμοποιούνται οι ελάχιστες τιμές του φορτίου συνεχούς ρεύματος. Συγκεκριμένα, αποστέλλονται εντολές για τη ρύθμιση του φορτίου σε λειτουργία σταθερής αντίστασης με  $R=125\text{ m}\Omega$ .



Εικονα 17. Η καμπύλη ψύξης και η υπεραγωγιμότητα που συλλέγονται από τους αισθητήρες hall

---

---

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

*Σ. Φιλιππίδης, Μελέτη Προτότυπης Διάταξης Συστήματος Υπεραγωγμης Αποθήκευσης Ενέργειας, 2019.*

*<https://drive.google.com/file/d/1ejvhGD7iWVDQOwQRxDXv6bx31u1CIyuJ/view?usp=sharing>*

*<https://drive.google.com/file/d/1n3n3BGtDaBBq6KCg9bnKVdWMLvXF9bHp/view?usp=sharing>*

*<https://drive.google.com/file/d/1J0i06qKpZ4GWvkwoeSqCn0QGghSYaaFO/view?usp=sharing>*

*[https://drive.google.com/file/d/1BCyWk1UD\\_7a2w6mxDXra\\_zagfuBdmdx1/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1BCyWk1UD_7a2w6mxDXra_zagfuBdmdx1/view?usp=sharing)*

*[https://drive.google.com/file/d/1F\\_iOEvoV5B9F9CUq3eTtYUd5Qw1\\_POy/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/1F_iOEvoV5B9F9CUq3eTtYUd5Qw1_POy/view?usp=sharing)*

*<https://drive.google.com/file/d/153FwWrGnPGn5tcOEy1D7PudO5UxT0uDv/view?usp=sharing>*