



INTERNATIONAL
HELLENIC
UNIVERSITY

DEPARTMENT OF INDUSTRIAL ENGINEERING AND MANAGEMENT

Πειραματικός χαρακτηρισμός
υπερπυκνωτών σε διάφορες
θερμοκρασίες

Experimental characterisation of
supercapacitors in multiple temperatures

Πιτλόγλου Γρηγόριος

Επιβλέπων καθηγητής: Μιχάλης Κιζήρογλου

Θεσσαλονίκη 2025

Abstract

Supercapacitors are an energy storage system with a unique structure and remarkable characteristics such as low ESR, high power density, and long cycle life. However, the temperature at which they operate is a limiting factor in their overall performance, as it affects their structural materials, including the porous electrodes and the electrolyte. In this dissertation, a characterization system was developed using accessible materials, enabling the testing of various supercapacitor models in a temperature-controlled environment, with the goal of deriving conclusions regarding their performance.

Περίληψη

Οι υπερπυκνωτές αποτελούν ένα μέσο αποθήκευσης ενέργειας με ιδιαίτερη δομή και με αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά όπως χαμηλή ESR, υψηλές τιμές πυκνότητας ισχύος και και μεγάλη διάρκεια ζωής. Ωστόσο η θερμοκρασία στην οποία καλούνται να λειτουργήσουν αποτελεί κατασταλτικό παράγοντα στην γενικότερη απόδοση τους καθώς επηρεάζει δομικά υλικά τους όπως τα πορώδη ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει κατασκευαστεί ένα σύστημα χαρακτηρισμού με προσβάσιμα υλικά που δίνει την δυνατότητα να δοκιμαστούν διάφορα μοντέλα υπερπυκνωτών σε ελεγχόμενο περιβάλλον θερμοκρασίας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την απόδοση τους.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της διπλωματικής εργασίας μου, κ.Κιζήρογλου για την καθοδήγηση και την συνέπεια που επέδειξε καθόλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας μου.

Table of Contents

1	Εισαγωγή	6
1.1	Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής εργασίας	6
1.2	Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας	6
1.3	Μεθοδολογία	6
1.4	Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας	6
2	Θεωρητικό Υπόβαθρο	8
2.1	Ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλού στρώματος.....	8
2.2	Ψευδοπυκνωτές	9
2.3	Υβριδικοί υπερπυκνωτές.....	9
2.4	Είδη Ηλεκτροδίων.....	10
2.4.1	Ενεργός Άνθρακας.....	10
2.4.2	Νανοσωλήνες άνθρακα	10
2.4.3	Αγώγιμα πολυμερή	11
2.5	Είδη Ηλεκτρολυτών.....	11
2.5.1	Οργανικοί ηλεκτρολύτες	11
2.5.2	Υδατικοί ηλεκτρολύτες	12
2.5.3	Ηλεκτρολύτες ιοντικών υγρών	12
2.6	Σύγκριση υπερπυκνωτών με μπαταρίες	12
2.6.1	Μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου	12
2.6.2	Ενεργειακή πυκνότητα.....	12
2.6.3	Πυκνότητα ισχύος	13
2.6.4	Διάρκεια ζωής	13
3	Τεχνικά χαρακτηριστικά υλικών	14
3.1	Ο μικροϋπολογιστής Arduino Nano	14
3.2	DS18B20.....	15
3.3	ADS1115.....	16
3.4	Relay module	17
3.5	Thermoelectric cooler (TEC)	18
3.5.1	Θερμοηλεκτρική γεννήτρια.....	18
3.5.2	Θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier – TEC1-07103.....	19
3.6	Εξηλασμένη πολυστερίνη	20
4	Ανάπτυξη συστήματος χαρακτηρισμού	21
4.1	Εισαγωγή	21
4.2	Στόχοι συστήματος	21
4.3	Επιθυμητή λειτουργία.....	22
4.4	Σχεδίαση ηλεκτρικού κυκλώματος.....	23

4.5	Δομική περιγραφή	25
4.6	Ενδεικτικός χαρακτηρισμός λειτουργίας	27
4.7	Συμπέρασμα	30
5	<i>Πειράματα και αποτελέσματα</i>	31
5.1	Φόρτιση και εκφόρτιση σε διάφορες θερμοκρασίες.....	31
5.2	Αυτοεκφόρτιση	38
6	<i>Συμπεράσματα</i>	43
7	<i>Βιβλιογραφία</i>	44

1 Εισαγωγή

1.1 Επιστημονική περιοχή της διπλωματικής εργασίας

Η έρευνα που πραγματοποιείται στην παρούσα διπλωματική αφορά τους υπερπυκνωτές. Πιο συγκεκριμένα, γίνονται αναφορές σε συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως πυκνωτές και μπαταρίες, κατασκευάζεται ένα σύστημα χαρακτηρισμού υπερπυκνωτών και εξάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους υπό διάφορες θερμοκρασίες. Για την κατανόηση και την υλοποίηση των παραπάνω ήταν αναγκαία η διείσδυση σ' ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών περιοχών, όπως η χημεία για την κατανόηση της μεθόδου συγκομιδής ενέργειας των υπερπυκνωτών, η ηλεκτρονική για την υλοποίηση του συστήματος μέτρησης και ο προγραμματισμός για τον συντονισμό των αισθητήρων του συστήματος με τον μικροελεγκτή.

Το σύστημα που αναπτύχθηκε αποτελεί μια αξιόπιστη διάταξη χαρακτηρισμού με προσβάσιμα υλικά και είναι αρκετά κατανοητή για τον αναγνώστη αλλά ταυτόχρονα έχει την δυνατότητα να προσφέρει αξιόπιστα αποτελέσματα για την συμπεριφορά ενός υπερπυκνωτή.

1.2 Σκοπός και συνεισφορά της διπλωματικής εργασίας

Αποτελεί στόχο η ολοκληρωμένη κατασκευή ενός συστήματος χαρακτηρισμού υπερπυκνωτών που έχει την δυνατότητα να προσφέρει ένα περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και ταυτόχρονη καταγραφή δεδομένων τάσης και θερμοκρασίας.

Τα αποτελέσματα που θα προκύψουν έχουν σκοπό να αναδείξουν την σταθερότητα και την αξιοπιστία, ενδεχομένως και τρωτά σημεία, που έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν οι υπερπυκνωτές σε διάφορα επίπεδα θερμοκρασίας.

1.3 Μεθοδολογία

Η κατανόηση της αρχής λειτουργίας και της δομής που χαρίζουν τις αξιοσημείωτες ιδιότητες στους υπερπυκνωτές ήταν το πρώτο στάδιο στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας καθώς αποτελούν την βάση για την μελέτη του συστήματος χαρακτηρισμού. Έπειτα, σχεδιάστηκε το σύστημα χαρακτηρισμού και πραγματοποιήθηκαν αρχικές μετρήσεις με τα υλικά που επιλέχθηκαν την δεδομένη στιγμή. Στη συνέχεια, ύστερα από τις μελέτες των πρώτων πειραμάτων επιλέχθηκαν τα τελικά υλικά και κολλήθηκαν σε διάτρητη πλακέτα. Τέλος, πραγματοποιήθηκε η πειραματική φάση της διπλωματικής και εξήχθησαν τα ανάλογα συμπεράσματα.

1.4 Διάρθρωση της διπλωματικής εργασίας

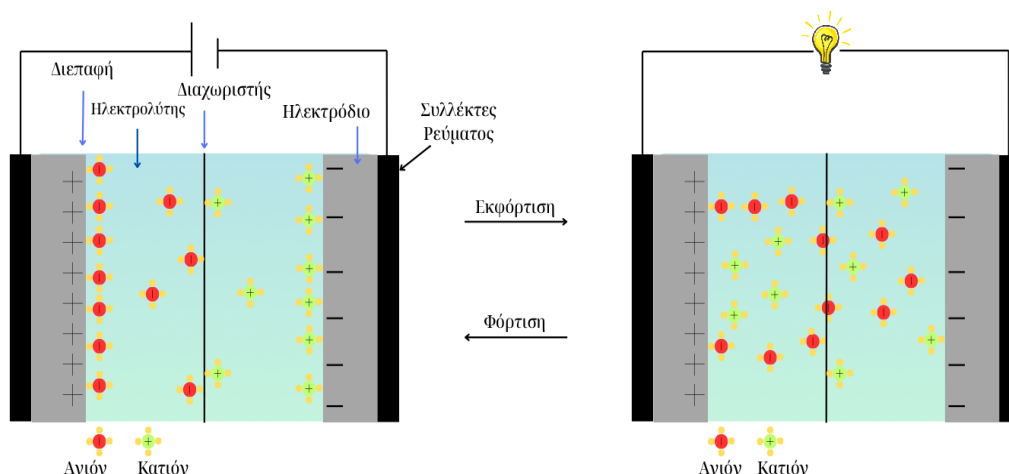
Στο πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής αναφέρεται συμπεριληπτικά ο σκοπός και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της διπλωματικής. Στο δεύτερο

κεφάλαιο γίνεται μια θεωρητική ανάλυση των υπερπυκνωτών και της δομής τους, αναφέροντας και μερικά από τα πιο δημοφιλή υλικά κατασκευής τους, ενώ συμπεριλαμβάνεται και μια σύγκριση με τις μπαταρίες. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται μια εκτεταμένη αναφορά στα τεχνικά χαρακτηριστικά των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του συστήματος. Στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται σε βάθος ο σχεδιασμός και η κατασκευή του συστήματος. Στη συνέχεια, στο πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιούνται μερικά πειράματα ενώ στο έκτο και τελευταίο κεφάλαιο εξάγονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας.

2 Θεωρητικό Υπόβαθρο

2.1 Ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλού στρώματος

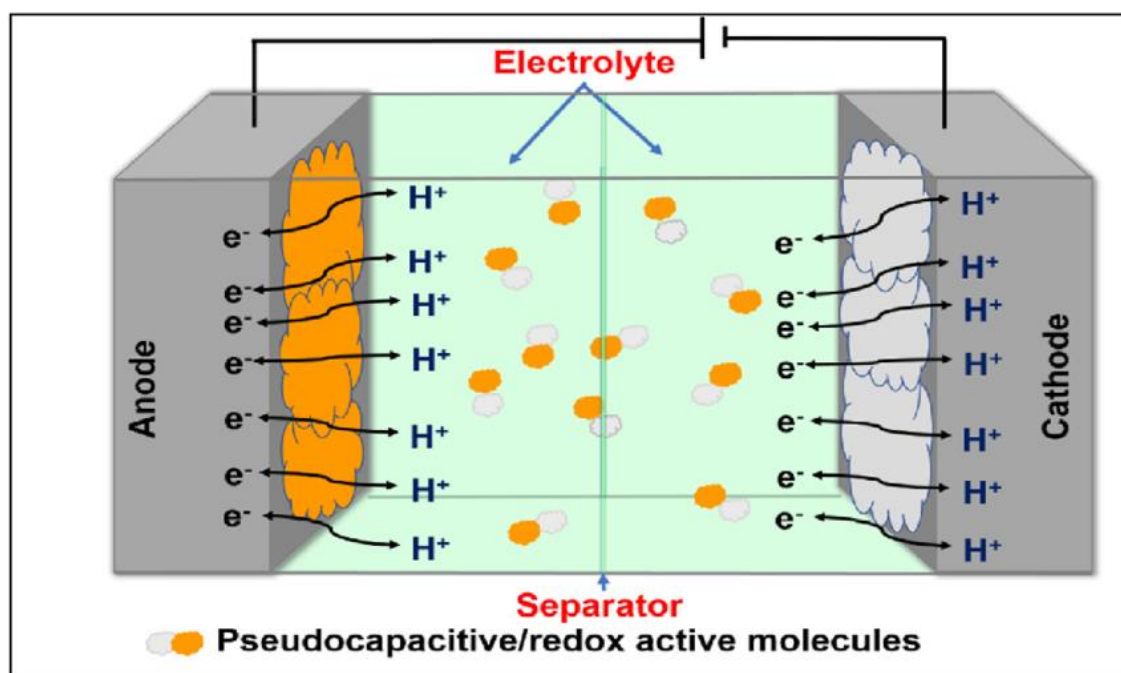
Όταν βυθίζουμε ένα ηλεκτρόδιο σ' έναν ηλεκτρολύτη και εφαρμόσουμε τάση στο ηλεκτρόδιο τότε σχηματίζεται ένα διπλό στρώμα φορτίου στην οριακή επιφάνεια του, αυτό το φαινόμενο επιστρατεύουν για την λειτουργία τους οι ηλεκτρικοί πυκνωτές διπλού στρώματος (electric double layer capacitor – EDLC) ή αλλιώς υπερπυκνωτές [1]. Οι υπερπυκνωτές παρουσιάζουν παρόμοια διάταξη με του συμβατικούς πυκνωτές. Αποτελούνται από ηλεκτρόδια κολλημένα σε μεταλλικούς συλλέκτες ρεύματος και έναν διαχωριστή ενδιάμεσα αυτών στον ηλεκτρολύτη που επιτρέπει την μεταφορά ιόντων και ταυτόχρονα αποτρέπει το βραχυκύκλωμα. Με σκοπό την εξουδετέρωση του φορτίου στα ηλεκτρόδια, αντίθετα φορτισμένα ιόντα με δυνατότητα εκρόφησης μετακινούνται από τον ηλεκτρολύτη ανάλογα με το φορτίο του ηλεκτροδίου και προσροφούνται στην επιφάνεια, με αποτέλεσμα την αποθήκευση φορτίου ηλεκτροστατικά. Είναι δεδομένο πως δεν υπάρχει καμία μεταφορά φορτίου στην οριακή επιφάνεια ή αλλιώς διεπαφή μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίου, οπότε το ηλεκτρικό πεδίο που προκύπτει απ' την πόλωση ευθύνεται για την χωρητικότητα που παρουσιάζουν οι υπερπύκνωτες και μπορούμε να το χαρακτηρίσουμε φαινόμενο πραγματικής χωρητικότητας [2]. Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο Σχήμα 2-1 όπως και η αντίστροφη διαδικασία που συμβαίνει όταν εφαρμόσουμε φορτίο στα άκρα του υπερπυκνωτή [3]. Χαρακτηριστικό των υπερπυκνωτών είναι τα ηλεκτρόδια του που κατασκευάζονται από πορώδη υλικά προσδίδοντας τους ένα πολύ μεγαλύτερο εμβαδόν και σε συνδυασμό με το πολύ μικρότερο σε πάχος διηλεκτρικό η χωρητικότητα τους είναι αρκετά μεγαλύτερη από αυτή των συμβατικών πυκνωτών [4].



Σχήμα 2-1: Αναπαράσταση λειτουργίας EDLC.

2.2 Ψευδοπυκνωτές

Παράλληλα με τους EDLCs, υπάρχουν οι ψευδοπυκνωτές. Παρουσιάζουν την ίδια δομή με χαρακτηριστική διάφορα ότι τα ηλεκτρόδια τους δεν είναι κατασκευασμένα μόνο από ηλεκτροχημικά αδρανή υλικά αλλά και από ενεργά, στα πορώδη στρώματα των οποίων λαμβάνουν χώρο ηλεκτροστατικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, στα ενεργά υλικά του ηλεκτροδίου, όπως για παράδειγμα τα αγώγιμα πολυμερή, προκύπτει διαχωρισμός φορτίου στην διεπαφή ηλεκτροδίου και ηλεκτρολύτη καθώς πραγματοποιούνται αντιδράσεις οξειδοαναγωγής αναστρέψιμες ή μη αναστρέψιμες και χάρη στα ιόντα που είτε προσροφώνται είτε απορροφώνται από την επιφάνεια του ηλεκτρολύτη, εμφανίζεται το φαινόμενο της ψευδοχωρητικότητας [4]. Μια αναλυτική παρουσίαση της δομής παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-2. Η χωρητικότητα που αναφέρθηκε είναι μεγαλύτερη από αυτή των EDLCs καθώς με την συμβολή των αντιδράσεων οξειδοαναγωγής, η αποθήκευση φορτίου πραγματοποιείται σ' όλο το υλικό του ηλεκτροδίου και όχι μόνο στην επιφάνεια του [5]. Ωστόσο, παρουσιάζουν μικρότερη διάρκεια ζωής καθώς οι οξειδοαναγωγικές δραστηριότητες φθείρουν τα υλικά των ηλεκτροδίων [6].



Σχήμα 2-2: Η δομή ενός ψευδοπυκνωτή και οι οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια του (Πηγή: Xuli Chen, Rajib Paul and Liming Dai, National Science Review, 2017 [7]).

2.3 Υβριδικοί υπερπυκνωτές

Παρόμοια με τα προαναφερθέντα είδη υπερπυκνωτών, οι υβριδικοί υπερπυκνωτές αποτελούνται από τα ίδια στοιχεία: ηλεκτρόδια, ηλεκτρολύτη και διαχωριστή, ωστόσο, τα ηλεκτρόδια διαφέρουν το ένα από το άλλο. Πιο, συγκεκριμένα, αποτελούνται από ένα ηλεκτρικό διπλό στρώμα και από ένα οξειδοαναγωγικό ή τύπου μπαταρίας.

Χρησιμοποιώντας διαφορετικά είδη ηλεκτροδίων αποκτούν ταυτόχρονα Φαρανταϊκή (Faradaic) χωρητικότητα αλλά και χωρητικότητα του ηλεκτρικού διπλού στρώματος, χαρίζοντας τους μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα αλλά και μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και διάρκεια ζωής [8].

2.4 Είδη Ηλεκτροδίων

Τα υλικά των ηλεκτροδίων αποτελούν σημαντικό παράγοντα στην απόδοση του υπερπυκνωτή καθώς από αυτά κρίνονται σημαντικά χαρακτηριστικά όπως: υψηλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα, ο έλεγχος του μεγέθους των πόρων, θερμική και χημική σταθερότητα, μεγάλης έκτασης ειδική επιφάνεια και χαμηλές δαπάνες [9].

2.4.1 Ενεργός Άνθρακας

Με αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά όπως το χαμηλό κόστος και το υψηλό πορώδες ο ενεργός άνθρακας είναι το υλικό που χρησιμοποιείται κατά κόρον για την κατασκευή ηλεκτροδίων. Η κατασκευή του απαιτεί δύο βήματα με το πρώτο να είναι η απανθράκωση του πλούσιου σε άνθρακα οργανικού προδρόμου σε κάρβουνο υπό αδρανές περιβάλλον και το δεύτερο βήμα αφορά την ενεργοποίηση του άνθρακα με σκοπό να αναπτυχθούν οι εσωτερικοί πόροι του υλικού σε μεγαλύτερο βαθμό και να παραχθεί ενεργός άνθρακας [10]. Η ενεργοποίηση διαχωρίζεται σε δύο είδη την θερμική και την ειδική. Η θερμική ενεργοποίηση απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες 700 °C με 1100 °C και ταυτόχρονα, περιβάλλον που υφίστανται οξειδωτικά αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα, ενώ, η χημική σε χαμηλότερες θερμοκρασίες με αναγκαία την παρουσία στοιχείων αφυδάτωσης όπως το φωσφορικό οξύ [11]. Οι παραπάνω διαδικασίες καθώς και μερικά άλλα χαρακτηριστικά που τις συνοδεύουν όπως η ποσότητα ενεργοποιητικού παράγοντα και η επιλογή βιομάζας ως προδρόμου του άνθρακα καθορίζουν την έκταση του πορώδους και της ειδικής επιφάνειας ωστόσο, απαιτούν λεπτό χειρισμό και εξισορρόπηση καθώς δημιουργούνται μη επιθυμητές συνθήκες όπως το υψηλό πορώδες που δεν επιτρέπει την προσκόλληση μικρότερων ηλεκτρολυτικών ιόντων και ταυτόχρονα, οδηγεί σε χαμηλότερη αγωγιμότητα περιορίζοντας έτσι την πυκνότητα δύναμης [3].

2.4.2 Νανοσωλήνες άνθρακα

Οι νανοσωλήνες σχηματίζονται από το τύλιγμα σε μορφή σωλήνα ενός φύλλου άνθρακα αν αναφερόμαστε σε single-walled carbon nanotube (SWCNT), ενώ αν τύλιχθουν γύρω απ' αυτό επιπλέον φύλλα σχηματίζεται ένας νανοσωλήνας άνθρακα πολλαπλών τοιχωμάτων multi-wall carbon nanotube (MWCNT), έχουν συνήθως τα άκρα τους καλυμμένα από φουλερένιου τύπου διατάξεις και το μήκος τους κυμαίνεται από νανόμετρα μέχρι μερικά εκατοστά. Οι συνηθέστεροι μέθοδοι παραγωγής είναι η εκκένωση τόξου, η εξάχνωση με laser και η χημική απόθεση ατμών (CVD). Οι μέθοδοι εκκένωσης τόξου και εξάχνωσης λέιζερ παρότι αποτελούν αποτελεσματικές τεχνικές παραγωγής και παράγουν ικανοποιητικά αποτελέσματα δεν χρησιμοποιούνται τόσο συχνά καθώς η εξάχνωση με λέιζερ δεν δίνει την δυνατότητα μαζικής παραγωγής και η εκκένωση τόξου δεν παράγει αρκετά καθαρό προϊόν. Στην μέθοδο CVD που αποτελεί

την πιο συχνή μέθοδο παραγωγής, χρησιμοποιούνται ως πηγές ατόμων άνθρακα αέρια όπως το μονοξείδιο του άνθρακα τα οποία θερμαίνονται σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 800 °C -1000 °C βαθμούς χρησιμοποιώντας ως καταλύτες της καύσης μεταβατικά μέταλλα πυροδοτώντας έτσι την ανάπτυξη των νανοσωλήνων. Οι νανοσωλήνες αποτελούν εξαιρετικό υλικό ως ηλεκτρόδιο καθώς η καλή αγωγιμότητα και η εύκολη πρόσβαση στην επιφάνεια χαρίζουν αξιοσημείωτη δυνατότητα μεταφοράς υψηλής ισχύος ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν επαρκή στήριξη στα ενεργά υλικά χάρη στην υψηλή μηχανική αντοχή τους [3].

2.4.3 Αγωγή πολυμερή

Οι συζυγείς διπλού και οι εναλλάξ μονοί δεσμοί στην αλυσίδα του πολυμερούς είναι το βασικό χαρακτηριστικό των αγωγικών πολυμερών που τους χαρίζει αγωγιμότητα, καθώς απεντοπίζονται ηλεκτρόνια τύπου-π κατά μήκος της πολυμερικής αλυσίδας. Ωστόσο, εκτός απ' το φορτίο που φέρουν τα ηλεκτρόνια, φορτίο φέρουν και τα ιόντα καθώς τα αγωγή πολυμερή υποβάλλονται σε αντιδράσεις οξειδοαναγωγής στην διεπαφή ηλεκτρολύτη-πολυμερούς προκαλώντας την κίνηση των ιόντων εσωτερικά και εξωτερικά της μήτρας του πολυμερούς, διαδικασία γνωστή ως ντοπάρισμα, προσδίδοντας ιοντική αγωγιμότητα. Μερικά παραδείγματα αγωγικών πολυμερών που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι η πολυανιλίνη (PANI), η πολυπυρολλή (PPy) και το πολυθειοφαίνιο (PTh) [12]. Τα αγωγή πολυμερή αποτελούν κατάλληλα υλικά για ηλεκτρόδια υπερπυκνωτών καθώς ξεχωρίζουν από άλλα υλικά με χαρακτηριστικά όπως καλύτερη χημική κινητική από όλα τα ψευδοχωρητικά υλικά, χαμηλό κόστος παραγωγής και χάρη στην υψηλή πυκνότητα φορτίου, υψηλή πυκνότητα δύναμης και ενέργειας [3].

2.5 Είδη Ηλεκτρολυτών

Η διευκόλυνση της μεταφοράς των ιόντων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια των υπερπυκνωτών ανέρχεται στην απόδοση του εκάστοτε ηλεκτρολύτη καθώς αποτελεί τον βασικό ιοντικό αγωγό. Οι ηλεκτρολύτες απαιτείται να έχουν υψηλή ιοντική αγωγιμότητα, μειώνοντας έτσι την εσωτερική αντίσταση των υπερπυκνωτών, ανοχή στον χρόνο που τους προσδίδει η ηλεκτροχημική και χημική σταθερότητα και ευρύ φάσμα θερμοκρασίας λειτουργίας [13].

2.5.1 Οργανικοί ηλεκτρολύτες

Οι οργανικοί ηλεκτρολύτες αποτελούν το πιο εμπορικό είδος ηλεκτρολύτη καθώς το φάσμα της τάσης λειτουργίας τους χαρακτηρίζεται ως υψηλό, συγκεκριμένα 2.5 - 2.8V, βελτιώνοντας σημαντικά την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος ενώ ταυτόχρονα μειώνει το κόστος τους. Για την λειτουργία των EDLCs χρησιμοποιούνται οργανικοί ηλεκτρολύτες που είναι βασισμένοι σε αγωγή άλατα ενώ οργανικοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται για τους ψευδοπυκνωτές που τα υλικά των ηλεκτροδίων τους είναι αγωγή πολυμερή, οξείδια του μετάλλου και άλλα με την ιδιαιτερότητα πως

αποτελούνται από ιόντα λιθίου με σκοπό την διευκόλυνση της παρεμβολής και της απεμπλοκής των ιόντων χάρη στο μικρότερο μέγεθος τους [14].

2.5.2 Υδατικοί ηλεκτρολύτες

Σε αντίθεση με τους οργανικούς ηλεκτρολύτες που είναι εξαιρετικά εμπορικοί, οι υδατικοί λόγω της αρκετά μικρότερης πυκνότητας ενέργειας, δεν είναι δημοφιλείς. Ωστόσο, αποτελούν τους ηλεκτρολύτες που η οι ερευνητές έχουν αφιερώσει τον περισσότερο χρόνο για να τους αναλύσουν καθώς χάρη στο χαμηλό κόστος και την δυνατότητα διαχείριση του σε συνθήκες που δεν είναι αυστηρές, διευκολύνουν την γενικότερη κατασκευή τους. Χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα ισοδύναμης αντίστασης σειράς και πιο αποδοτική μεταφορά φορτίου, καθώς η αγωγιμότητα τους είναι σε αρκετά υψηλά επίπεδα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα είδη ηλεκτρολυτών. Συνήθως οι υδατικού ηλεκτρολύτες ομαδοποιούνται σε τρεις κατηγορίες: αλκαλικοί, όξινοι και ουδέτεροι με σημαντικά παραδείγματα το θειικό οξύ, το υδροξείδιο του καλίου και το θειϊκό νάτριο [13].

2.5.3 Ηλεκτρολύτες ιοντικών υγρών

Ιοντικά υγρά ονομάζονται τα άλατα που παράγονται από ιόντα με σημείο τήξης κάτω από 100 °C. Με ιδιότητες όπως εύκολη προσαρμογή των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων τους ανάλογα τις ανάγκες της εφαρμογής, καμία δυνατότητα καύσης, θερμική και ηλεκτροχημική σταθερότητα και υψηλό φάσμα λειτουργικής τάσης άνω των 3 V, αποτελούν εναλλακτική επιλογή στους ηλεκτρολύτες. Παραδείγματα ιοντικών υγρών για εφαρμογές υπερπυκνωτών αποτελούν αμμώνια, ιμιδαζόλικά και φωσφορικά κατιόντα [15].

2.6 Σύγκριση υπερπυκνωτών με μπαταρίες

2.6.1 Μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου

Θεμελιώδης διαφορά ανάμεσα στον υπερπυκνωτές και στις μπαταρίες είναι ο μηχανισμός αποθήκευσης φορτίου με τις μπαταρίες να αποθηκεύουν φορτίο μέσω Φαρανταϊκών διεργασιών και οι υπερπυκνωτές μέσω μη Φαρανταϊκών διεργασιών. Πιο συγκεκριμένα, οι υπερπυκνωτές, με εξαίρεση του ψεύδοπυκνωτές που αποκτούν κάποια ποσότητα φορτίου μέσω Φαρανταϊκών διεργασιών, αποκτούν το φορτίο τους ηλεκτροστατικά χάρη στην προσρόφηση των ιόντων του ηλεκτρολύτη στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου χωρίς να καμία μεταφορά ηλεκτρονίων ανάμεσα τους ενώ οι μπαταρίες μετατρέπουν την διαθέσιμη χημική ενέργεια τους σε ηλεκτρική μέσω Φαρανταϊκών διεργασιών, οξειδωσης και αναγωγής που λαμβάνουν χώρο στην διεπαφή ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίου, απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια [16].

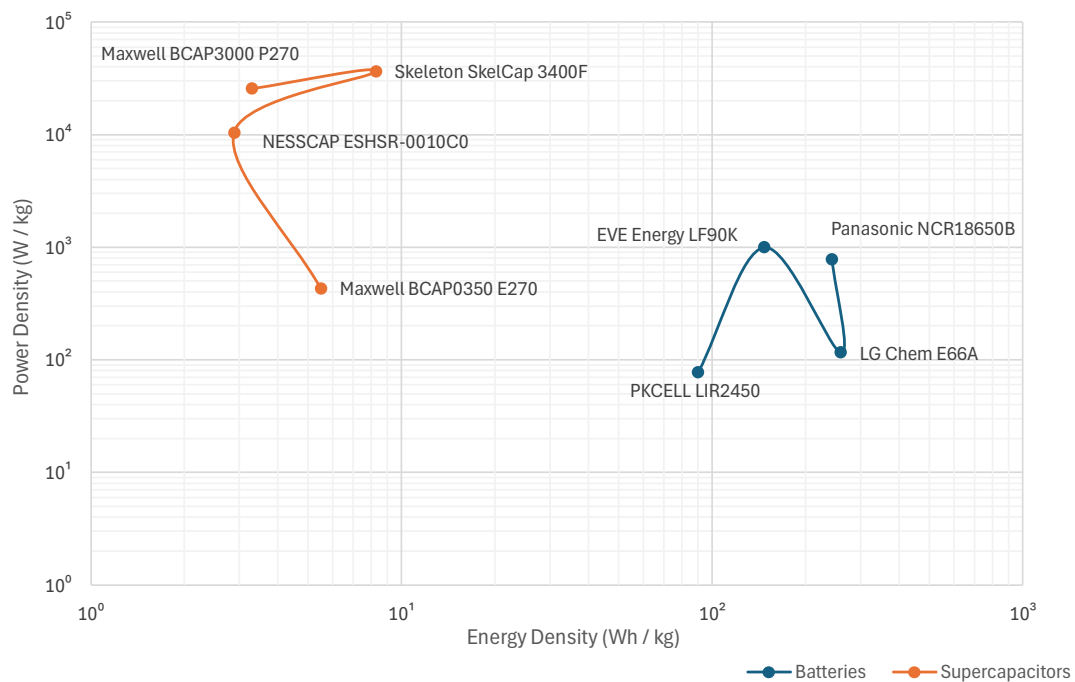
2.6.2 Ενεργειακή πυκνότητα

Οι μπαταρίες συνήθως κατά την οξειδοαναγωγή λαμβάνουν 2 με 3 ηλεκτρόνια ανά άτομο ηλεκτροχημικά ενεργού υλικού ενώ οι υπερπυκνωτές στην ενεργή επιφάνεια των ηλεκτροδίων τους λαμβάνουν περίπου 0.1 με 0.2 ηλεκτρόνια ανά άτομο [15].

Αποτέλεσμα των προηγούμενων είναι τα διάφορα είδη μπαταρίας να κατέχουν ενεργειακές της τάξεως των 30-120 Wh/kg ενώ οι υπερπυκνωτές 3-15 Wh/kg [17].

2.6.3 Πυκνότητα ισχύος

Η πυκνότητα ισχύος προκύπτει σε σημαντικό βαθμό από την ποσότητα ρεύματος που μεταφέρεται ανά μονάδα όγκου του ενεργού υλικού όταν εφαρμόζεται φορτίο [15]. Ωστόσο, η ποσότητα ρεύματος στην μπαταρία περιορίζεται σημαντικά λόγω της ωμικής αντίστασης και της αντίστασης πόλωσης με αποτέλεσμα η πυκνότητα ισχύος να περιορίζεται στα 100-500 W/kg. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές λόγω της ηλεκτροστατικής φύσης του φορτίου τους και της μεγάλης επιφάνειας των ηλεκτροδίων τους, δεν περιορίζεται η πυκνότητα του ρεύματος κατά την διάρκεια της φόρτισης και της εκφόρτισης, με την πυκνότητα ισχύος εν τέλει να αγγίζει τα μερικά kW/kg [16]. Στο Σχήμα 2-3 παρουσιάζεται μία σύγκριση των πυκνотήτων ενέργειας και ισχύος των υπερπυκνωτών και των μπαταριών.



Σχήμα 2-3: Διάγραμμα σύγκρισης πυκνότητας ισχύος και πυκνότητας ενέργειας ενδεικτικών μοντέλων μπαταριών και υπερπυκνωτών.

2.6.4 Διάρκεια ζωής

Οι Φαρανταϊκές διεργασίες στα ηλεκτρόδια των μπαταριών επιφέρουν μη αναστρέψιμες φθορές περιορίζοντας τους κύκλους φόρτισης στο όριο των χιλιάδων ανάλογα τον τύπο τους, ωστόσο, οι υπερπυκνωτές καθώς δεν βασίζονται σε χημικές διεργασίες για την απόκτηση του φορτίου τους, δεν φθείρονται με αποτέλεσμα οι κύκλοι φόρτισης τους να πλησιάζουν την τάξη των 10⁵ - 10⁶ [15].

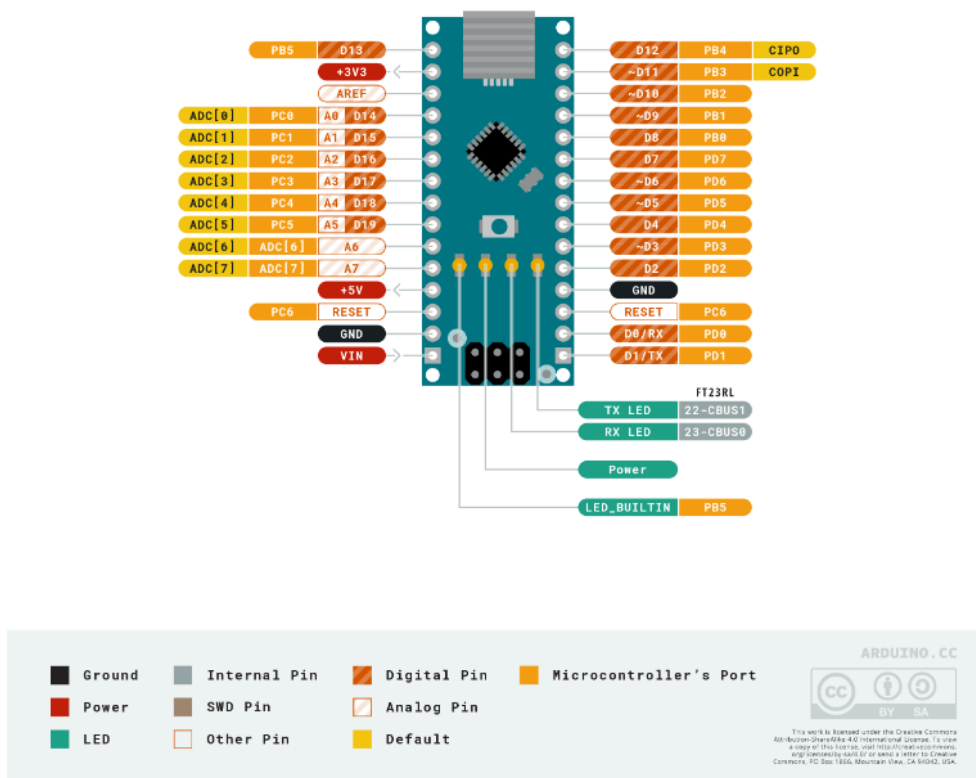
3 Τεχνικά χαρακτηριστικά υλικών

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο γίνεται μια αναλυτική παρουσίαση των τεχνικών χαρακτηριστικών και των ιδιοτήτων των υλικών και των συστημάτων που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη του συστήματος χαρακτηρισμού. Πιο συγκεκριμένα, παρατίθενται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του μικροϋπολογιστή, του μετατροπέα αναλογικού σήματος σε ψηφιακό, του αισθητήρα θερμοκρασίας, του ρελέ, του θερμοηλεκτρικού στοιχείου και του θερμομονωτικού υλικού.

3.1 Ο μικροϋπολογιστής Arduino Nano

Ο Arduino Nano είναι ένας μικρού μεγέθους μικροϋπολογιστής, ιδιαίτερα φιλικός για εφαρμογές προτυποποίησης σε breadboard. Ως μικροελεγκτή χρησιμοποιεί τον ATmega328 με ταχύτητα ρολογιού 16 MHz, 20 ψηφιακές εισόδους ή εξόδους, 8 αναλογικές εισόδους και μια θύρα mini-USB.

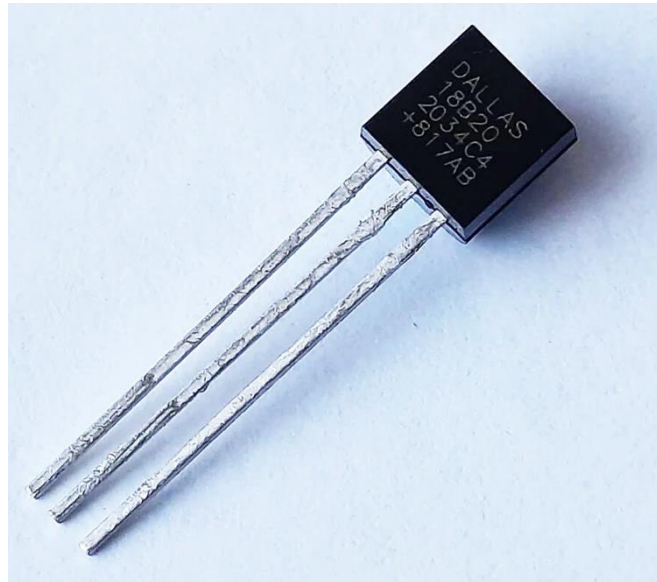
Πιο αναλυτικά, ο ATmega328 είναι ένας μικροελεγκτής υψηλής απόδοσης, ωστόσο, με χαμηλή κατανάλωση. Η Flash μνήμη του είναι της τάξεως των 32 kB με τα 2 kB εξ αυτών να είναι δεσμευμένα από τον bootloader, 2 kB εσωτερική SRAM, 1 kB EEPROM και 32 x 8 bit καταχωρητές γενικής χρήσης. Συνολικά έχει 20 ψηφιακές εισόδους/εξόδους εκ των οποίων οι 8 είναι και αναλογικοί, επίσης, υποστηρίζουν ADC (μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό). Ταυτόχρονα, υποστηρίζει διάφορα σειριακά πρωτόκολλα επικοινωνία όπως UART TTL, I2C και SPI. Τροφοδοτείται από την θύρα mini-USB αλλιώς από εξωτερική τροφοδοσία 7-15 V δίχως εξομάλυνση στο pin 30 ή 5 V με εξομάλυνση στο pin 27 [18].



Σχήμα 3-1: Ένα αναλυτικό διάγραμμα όλων των λειτουργιών των ακροδεκτών του Arduino Nano (Πηγή:<https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf> [18]).

3.2 DS18B20

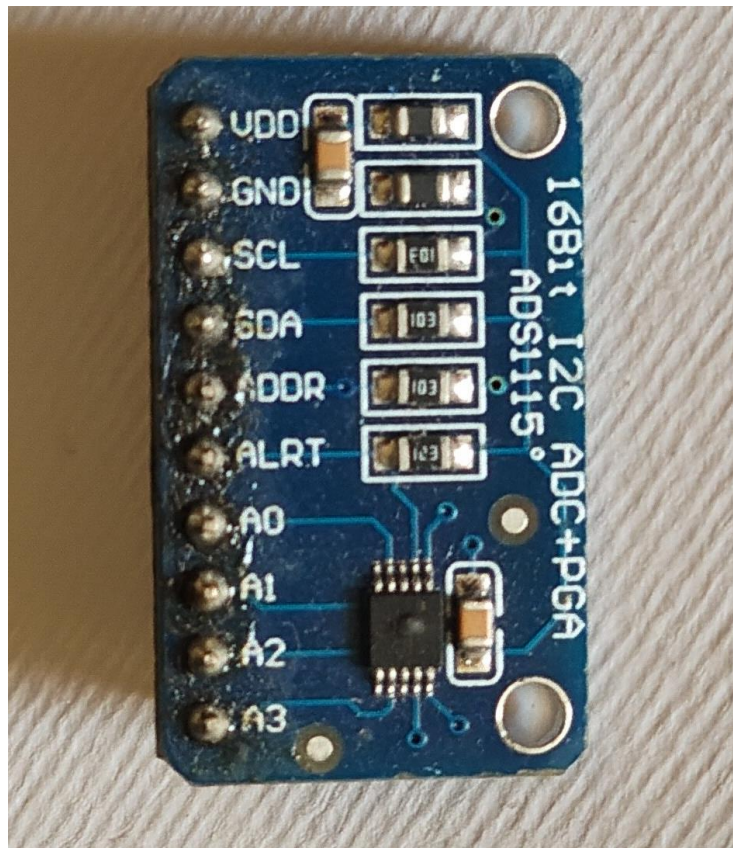
Ο DS18B20 αποτελεί ένα ψηφιακό θερμόμετρο με δυνατότητα ρύθμισης της ανάλυσης μέτρησης που κυμαίνεται από 9 bit έως 12 bit και προσφέρει ακρίβεια $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ για θερμοκρασίες από -10°C έως $+85^{\circ}\text{C}$ ενώ οι μέγιστες μετρήσεις του οροθετούνται στους -55°C έως τους 125°C . Η επικοινωνία του με τον μικροελεγκτή γίνεται μέσω μίας μόνο γραμμής δεδομένων ενώ ταυτόχρονα προσφέρεται η επιλογή σε εφαρμογές που απαιτούν εξοικονόμηση πόρων να λειτουργεί χωρίς την χρήση εξωτερικής τροφοδοσίας. Ταυτόχρονα, κάθε αισθητήρας έχει τον δικό του 64 bit κωδικό προσφέροντας την δυνατότητα σε ένα μικροελεγκτή να διαχειριστεί πολλούς DS18B20 την ίδια στιγμή από μία μόνο γραμμή δεδομένων. Αποτελεί ιδανική επιλογή για εφαρμογές όπως θερμόμετρα, συστήματα μέτρησης υψηλής ευαισθησίας και βιομηχανικές εφαρμογές [19].



Σχήμα 3-2: Ο αισθητήρας DS18B20 (Πηγή: [https://www.scorpiotechnology.com.au/microcontrollers/temperature-sensor-ds18b20\[20\]](https://www.scorpiotechnology.com.au/microcontrollers/temperature-sensor-ds18b20[20])).

3.3 ADS1115

Ο ADS1115 αποτελεί έναν delta-sigma ($\Delta\Sigma$) Analog to digital converter και ανήκει στην οικογένεια των ADS111x της Texas Instruments με χαρακτηριστικά το μικρό μέγεθος, ανάλυση των 16 bit και χαμηλή ισχύ. Ο πυρήνας $\Delta\Sigma$ ADC συνοδεύεται από εσωτερική τροφοδοσία αναφοράς, κρυσταλλικό ταλαντωτή και διεπαφή μέσω σειριακού πρωτοκόλλου I2C. Επίσης, ο ADS1115 ενσωματώνει και προγραμματιζόμενο ενισχυτή κέρδους (PGA) που προσφέρει ένα φάσμα τάσης εισόδου ± 256 mV έως ± 6.144 V και προγραμματιζόμενο ψηφιακό συγκριτή. Είναι ικανός να πραγματοποιήσει δειγματοληψίες έως 860 δείγματα το δευτερόλεπτο (860 SPS) και διαθέτει πολυπλέκτη εισόδου που επιτρέπει δύο διαφορετικές ή τέσσερις single-end μετρήσεις ταυτόχρονα. Τροφοδοτείται με τάσεις από 2 V έως και 5.5 V με την κατανάλωση του να αγγίζει τα 150 μ A. Είναι ιδανικός για παρακολούθηση τάσης και ρεύματος μπαταρίας, συσκευές μετρήσεως θερμοκρασίας και αυτοματισμούς εργοστασίων [21].



Σχήμα 3-3: Ο αισθητήρας ADS1115.

3.4 Relay module

Το ρελέ είναι μια ηλεκτρομηχανική συσκευή που δίνει την δυνατότητα σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν μικροϋπολογιστές με χαμηλή τάση στις εξόδους τους να χειρίζονται εφαρμογές υψηλού φορτίου και τάσης χάρη στην γαλβανική απομόνωση που φέρει ο μηχανισμός τους. Το συγκεκριμένο αποτελεί ένα module καθώς εκτός από το ρελέ στην πλακέτα υπάρχουν ταυτόχρονα ένα τρανζίστορ και μια διόδος, το τρανζίστορ χρησιμοποιείται για να ενισχύσει το ρεύμα που παρέχουν οι έξοδοι του μικροϋπολογιστή καθώς δεν είναι αρκετό για το πηνίο και η διόδος προστατεύει από τα ρεύματα επιστροφής που επιφέρει η ενεργοποίηση και η απενεργοποίηση του πηνίου. Επίσης, διαθέτει optocoupler που δίνει την δυνατότητα να απομονωθεί η τροφοδοσία του ρελέ από τις επαφές. Έχει τρεις επαφές μία κανονικά ανοιχτή, μια κανονικά κλειστή και την κοινή. Η τάση τροφοδοσίας του κυμαίνεται από 3.75 V μέχρι τα 6 V, το πηνίο καταναλώνει 70 mA και μπορεί να χειριστεί τάσεις έως 250 V AC ή 30 V DC με μέγιστο ρεύμα τα 10 A [22].

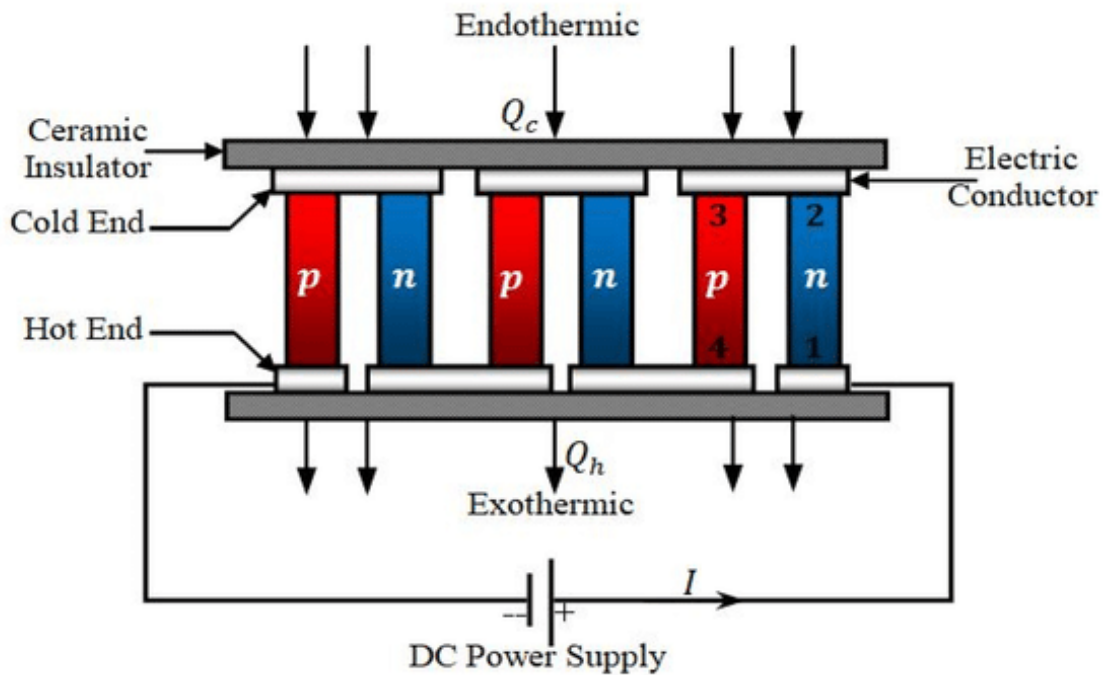


Σχήμα 3-4: Το relay module που χρησιμοποιείται για τις ανάγκες της διπλωματικής.φσ

3.5 Thermoelectric cooler (TEC)

3.5.1 Θερμοηλεκτρική γεννήτρια

Οι θερμοηλεκτρικές συσκευές βασίζονται από ημιαγωγούς στερεάς κατάστασης που έχουν την δυνατότητα να δέχονται τάση ως είσοδο και να την μετατρέπουν σε μια διαφορά θερμοκρασίας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εφαρμογές που είτε απαιτούν στοιχεία θέρμανσης ή στοιχεία ψύξης, ωστόσο έχουν και την δυνατότητα λαμβάνοντας θερμοκρασία ως είσοδο να την μετατρέπουν σε συνεχές ρεύμα. Πιο συγκριμένα, βασίζονται στο θερμοηλεκτρικό φαινόμενο όπου θερμαίνοντας την μία πλευρά και ψύχοντας την άλλη πλευρά από ένα μέταλλο προσδίδεται στα ηλεκτρόνια της ζεστής πλευράς ενέργεια να κινηθούν πιο γρήγορα προς την κρύα πλευρά απ' ότι το αντίστροφο με αποτέλεσμα η κρύα πλευρά να είναι αρνητικά φορτισμένη και η ζεστή θετικά. Ωστόσο, καθώς το παραγόμενο ρεύμα είναι εξαιρετικά μικρό, το απλό μέταλλο αντικαταστάθηκε από ημιαγωγούς που ακολουθούν την ίδια αρχή λειτουργίας με πολύ μεγαλύτερη απόδοση.



Σχήμα 3-5: Αναπαράσταση λειτουργίας ενός θερμοηλεκτρικού στοιχείου (Πηγή: A. Kherkhar, Case Studies in Thermal Engineering, 2022 [23]).

Η θερμοηλεκτρική γεννήτρια έχει τρεις βασικές λειτουργίες την ψύξη, την θέρμανση και την παραγωγή ισχύος. Στην ψύξη θερμοηλεκτρικά στοιχεία τύπου p και τύπου n που εναλλάσσονται είναι συνδεδεμένα ηλεκτρικά σε σειρά μεταξύ τους ενώ ταυτόχρονα είναι θερμικά συνδεδεμένα παράλληλα και καθώς το ρεύμα περνάει ψύχεται η μία πλευρά σύμφωνα με το φαινόμενο Peltier, με το αντίστροφο να συμβαίνει αν αντιστρέψεις την πολικότητα. Στην λειτουργία παραγωγής ισχύος, εφαρμόζοντας θερμότητα από εξωτερική πηγή παράγεται ρεύμα ανάλογο της διαφοράς θερμοκρασίας που υφίσταται [24].

3.5.2 Θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier – TEC1-07103

Το TEC1-01703 είναι ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier που λειτουργεί με μέγιστη τάση τα 8.5 V μέγιστο ρεύμα τα 3.3 A. Η μέγιστη διαφορά θερμοκρασίας που μπορούν να έχουν η επιφάνειες του είναι 68 °C ενώ η μέγιστη θερμότητα που μπορεί να απάγει από την θερμή πλευρά υπό ιδανικές συνθήκες είναι 18 W. Οι διαστάσεις του είναι 30mm x 30mm x 4.7mm [25].



Σχήμα 3-6: Η θερμοηλεκτρικό στοιχείο που χρησιμοποιείται στην πειραματική διάταξη.

3.6 Εξηλασμένη πολυστερίνη

Η εξηλασμένη πολυστερίνη είναι ένα θερμομονωτικό υλικό που κυκλοφορεί στην αγορά σε μορφή πλάκας, έχει ως βάση την πολυστερίνη και παράγεται με την μέθοδο της εξέλασης. Κύρια χαρακτηριστικά του αποτελούν η μονωτική του ικανότητα χάρη στην παγίδευση του αέρα στις κλειστές κυψελίδες του και το γεγονός πως δεν απορροφάει νερό [26].

4 Ανάπτυξη συστήματος χαρακτηρισμού

4.1 Εισαγωγή

Για τις ανάγκες της διπλωματικής που αφορούν τον πειραματικό χαρακτηρισμό διάφορων μοντέλων υπερπυκνωτών σε διάφορες θερμοκρασίες διαμορφώθηκε ένα σύστημα χαρακτηρισμού που είχε ως στόχο την παρακολούθηση της φόρτισης και της εκφόρτισης υπό συνθήκες μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας με όσο το δυνατότερο μεγαλύτερη ακρίβεια αλλά διατηρώντας ταυτόχρονα την μεγάλη προσβασιμότητα των υλικών που απαιτούνται δίνοντας την μέγιστη δυνατότητα αναπαραγωγής του από τον αναγνώστη.

Το παρόν κεφάλαιο περιγράφει την σχεδίαση και την υλοποίηση του συστήματος, την σκέψη και τις ανάγκες που οδήγησαν στην επιλογή των υλικών αλλά και στην υλοποίηση της κατασκευής. Για την μέγιστη κατανόηση του συστήματος είναι ανάγκη να χωριστεί σε δύο υποσυστήματα. Το σύστημα φόρτισης-εκφόρτισης και καταγραφής αλλά και το σύστημα ψύξης και θέρμανσης τους.

Το σύστημα φόρτισης-εκφόρτισης και καταγραφής βασίζεται στην επεξεργασία και την ανάλυση δεδομένων τάσης αλλά και θερμοκρασίας. Την γενικότερη ανάλυση και τον συγχρονισμό λειτουργίας των διάφορων αισθητήρων αναλαμβάνει ο Arduino Nano, την μετατροπή των αναλογικών σημάτων ο ADS1115 και την καταγραφή θερμοκρασίας ο DS18B20.

Το σύστημα ψύξης και θέρμανσης αποτελείται από ένα θερμοηλεκτρικό στοιχείο Peltier που αναλαμβάνει την ψύξη και την θέρμανση του εκάστοτε υπερπυκνωτή αλλά και ενός θερμομονωτικού φελιζόλ που αποτρέπει την μεταβολή της θερμοκρασίας από οποιοδήποτε εξωγενή παράγοντα.

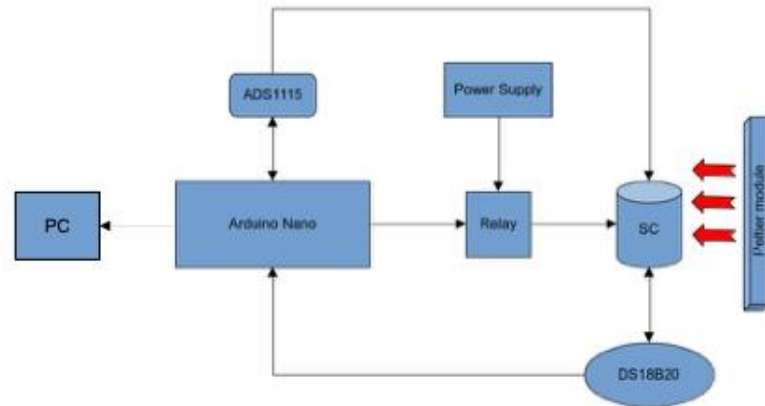
4.2 Στόχοι συστήματος

Το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να παρέχει τις παρακάτω δυνατότητες στο πλαίσιο των πειραμάτων:

- Ελεγχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση υπερπυκνωτών με μέγιστο όριο τα 5 V με δυνατότητα εναλλαγής σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή με την συμβολή ενός ρελέ και του Arduino Nano.
- Θέρμανση και ψύξη διάφορων μοντέλων υπερπυκνωτών, λαμβάνοντας υπόψιν τις προδιαγραφές αντοχής των υλικών τους, σε ένα εύρος θερμοκρασίας που κυμαίνεται από 0 °C μέχρι 50 °C, ενώ ταυτόχρονα η οποιαδήποτε μεταβολή να παραμένει σταθερή και να μην επηρεάζεται από εξωτερικές συνθήκες.
- Ακριβής και αξιόπιστη καταγραφή τάσης για οποιαδήποτε χρονική στιγμή.
- Μόνιμη καταγραφή θερμοκρασίας καθόλη την διάρκεια των πειραμάτων.
- Δυνατότητα αυτοματοποιημένων και επαναλαμβανόμενων μετρήσεων με την μέγιστη δυνατή ακρίβεια κατά την διάρκεια των εναλλαγών με βάση τα δεδομένα θερμοκρασίας και τάσης.

- Εξαγωγή δεδομένων μέσω σειριακής θύρας σε μορφή που επιτρέπει την εύκολη επεξεργασία τους μέσω προγραμμάτων επεξεργασίας δεδομένων με σκοπό τον σχεδιασμό διαγραμμάτων για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν χαρακτηριστικά των υπερπυκνωτών.

Στο Σχήμα 4-1 παρουσιάζεται ένα block διάγραμμα που περιγράφει το σύστημα χαρακτηρισμού.



Σχήμα 4-1: Block διάγραμμα του συστήματος χαρακτηρισμού.

4.3 Επιθυμητή λειτουργία

Το παρόν σύστημα είναι σχεδιασμένο με σκοπό να φορτίζει και να εκφορτίζει τα διάφορα μοντέλα υπερπυκνωτών, με πλήρη έλεγχο και κύκλους φόρτισης σχεδιασμένους ανάλογα τις ανάγκες του πειράματος, υπό διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας. Πιο συγκεκριμένα, κατά την διάρκεια των πειραμάτων ο μικροϋπολογιστής θα πρέπει να ελέγχει το διακοπτικό υλικό που είτε συνδέει τον υπερπυκνωτή με το τροφοδοτικό για φόρτιση είτε με το φορτίο για εκφόρτιση. Ταυτόχρονα, το θερμοηλεκτρικό στοιχείο ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής να θερμαίνει ή να ψύχει τους υπερπυκνωτές με το θερμομονωτικό υλικό να διατηρεί σταθερή οποιαδήποτε μεταβολή. Θα πρέπει τα δεδομένα των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που αφορούν την τάση και τον χρόνο να καταγράφονται και να εξάγονται μέσω τις σειριακής θύρας. Ταυτόχρονα, πρέπει να καταγράφονται τα δεδομένα θερμοκρασίας.

Για τις παραπάνω λειτουργίες είναι ανάγκη η τήρηση μερικών προδιαγραφών όπως:

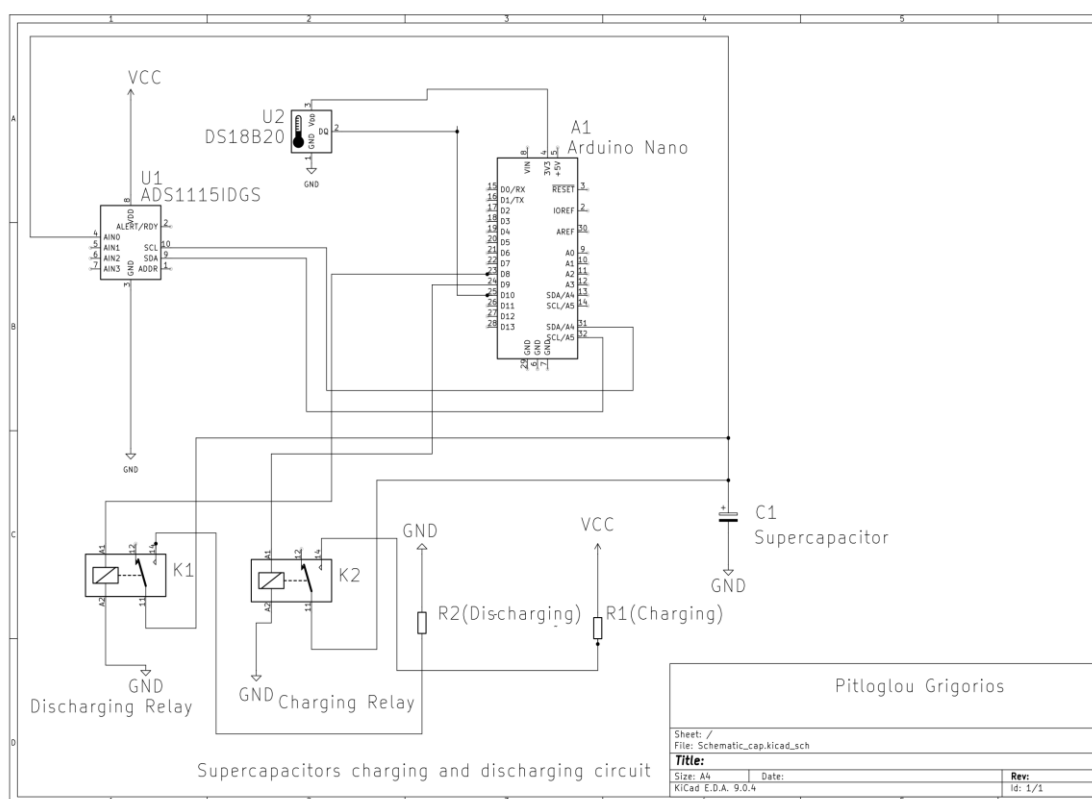
- Σταθερή πηγή τάσης με μέγιστο όριο τα 5 V.
- Εύρος θερμοκρασίας 0 °C – 50 °C.
- Τάση αναφοράς ADC Converter $\geq 5V$ για μέγιστη ακρίβεια στις μετρήσεις.
- Ανάλυση ADC Converter = 16 bit για δυνατότητα ανάγνωσης της τάξεως των μV .
- Ρυθμός δειγματοληψίας τουλάχιστον μία μέτρηση το δευτερόλεπτο (1 Hz).

4.4 Σχεδίαση ηλεκτρικού κυκλώματος

Τα υλικά του συστήματος επιλέχθηκαν με γνώμονα την απόδοση, την ακρίβεια και την ευκολία διεπαφής με τον Arduino. Αναλυτικότερα:

- Ο Arduino Nano επιλέχθηκε καθώς παρέχει όλα τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά για τις ανάγκες των πειραμάτων διατηρώντας μικρό όγκο, φιλικό σχεδιασμό για κόλληση σε διάτρητη πλακέτα και ταυτόχρονα διατηρεί πολύ χαμηλό κόστος.
- Ο ADS1115 επιλέχθηκε καθώς ο ενσωματωμένος ADC converter του Arduino Nano είναι χαμηλότερης ανάλυσης 10 bit ενώ του ADS1115 16 bit δίνοντας την δυνατότητα για μετρήσεις μεγαλύτερης ακρίβειας ενώ ταυτόχρονα η τάση αναφοράς του Arduino είναι επιρρεπής σε θόρυβο.
- Ο DS18B20 επιλέχθηκε καθώς είναι ψηφιακός αισθητήρας, δεν απαιτεί μετατροπή αναλογικού σήματος όπως LM35, ενώ ταυτόχρονα προσφέρει μεγάλο εύρος και ακρίβεια στις μετρήσεις του.
- Τα ρελέ επιλέχθηκαν για να προσφέρουν διακοπτική ικανότητα στο κύκλωμα, η διεπαφή τους με τον Arduino είναι αρκετά εύκολη καθώς απαιτούν σήμα τάσης 5 V, η ταχύτητα σκανδαλισμού τους είναι επαρκής για τις απαιτήσεις του συστήματος ενώ επίσης το κόστος τους είναι χαμηλό.
- Το στοιχείο Peltier επιλέχθηκε καθώς προσφέρει ψύξη και θέρμανση που απαιτούνται για τις ανάγκες του πειράματος, έχει μικρό όγκο και είναι εύκολο στον χειρισμό του.
- Για τις ανάγκες του πειράματος χρησιμοποιούνται δύο τροφοδοτικά, ένα που παρέχει σταθερή τάση στο ρελέ και στον ADS1115 για σταθερή τάση αναφοράς κι ένα τροφοδοτικό με περιορισμό ρεύματος για τον έλεγχο λειτουργίας του θερμοηλεκτρικού στοιχείου Peltier.

Ακολουθεί ένα αναλυτικό σχεδιάγραμμα στο Σχήμα 4-2 όπου φαίνονται οι συνδέσεις του ηλεκτρικού κυκλώματος.



Σχήμα 4-2: Σχηματικό κυκλώματος πειραματικής διάταξης.

Ο Arduino Nano τροφοδοτείται μέσω USB ενώ στα ρελέ και στον ADS1115 παρέχεται τάση μέσω εξωτερικής τροφοδοσίας.

Ο ADS1115 έχει συνδεδεμένους τους ακροδέκτες SCL και SDA στους ακροδέκτες A4 και A5 του Arduino αντίστοιχα. Ο ακροδέκτης A0 που είναι το κανάλι του αναλογικού σήματος είναι συνδεδεμένο στο θετικό ακροδέκτη του υπερπυκνωτή.

Στον DS18B20 η τροφοδοσία του συνδέεται στα 3.3V του Arduino ενώ το σήμα του είναι συνδεδεμένο στον ακροδέκτη D10.

Το ρελέ K1 λαμβάνει σήμα από τον ακροδέκτη D8. Η επαφή COM είναι συνδεδεμένη στον θετικό ακροδέκτη του υπερπυκνωτή ενώ η επαφή NO είναι συνδεδεμένη με το φορτίο εκφόρτισης με σκοπό τον έλεγχο του ρυθμού εκφόρτισης και του περιορισμού της τιμής του ρεύματος.

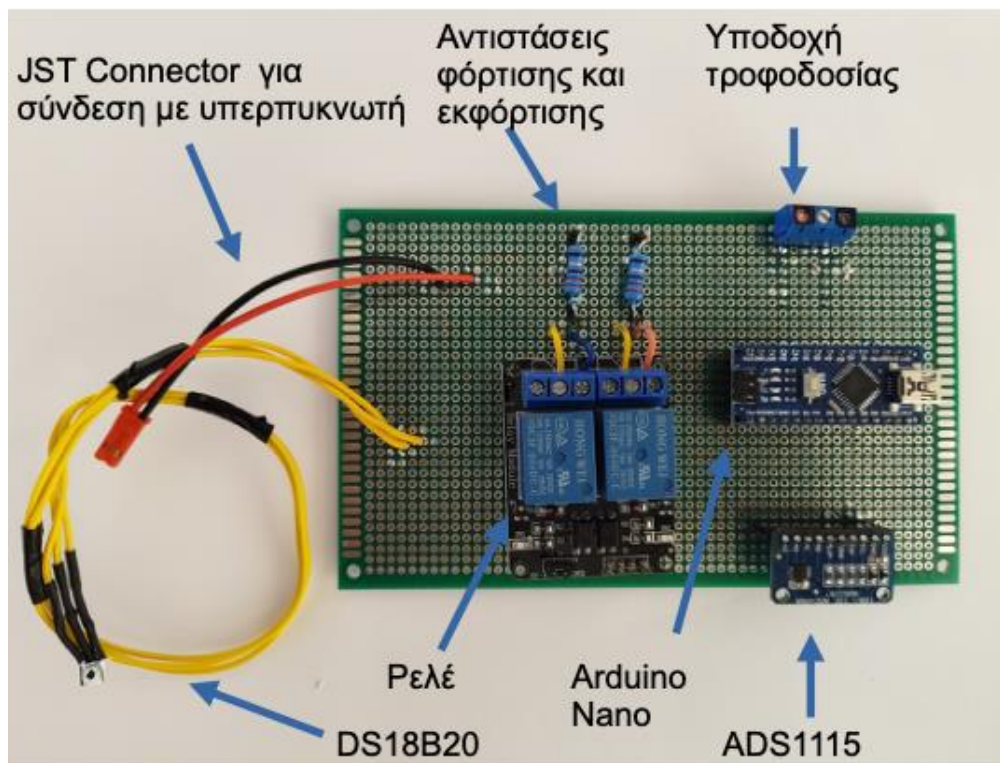
Το ρελέ K2 λαμβάνει σήμα από τον ακροδέκτη D9. Η επαφή COM είναι συνδεδεμένη στον θετικό ακροδέκτη του υπερπυκνωτή ενώ η επαφή NC είναι συνδεδεμένη στο τροφοδοτικό μέσω μια αντίστασης σε σειρά για τον έλεγχο του ρυθμού φόρτισης και τον περιορισμό της τιμής του ρεύματος.

Ο αρνητικός ακροδέκτης του υπερπυκνωτή είναι συνδεδεμένος στην γείωση ενώ ο θετικός ανάλογα με ποιο ρελέ λειτουργεί είναι συνδεδεμένος με το φορτίο ή με το τροφοδοτικό.

Να σημειωθεί πως το τροφοδοτικό και ο Arduino είναι συνδεδεμένα σε κοινή γείωση.

Σχετικά με το σύστημα ψύξης και θέρμανσης το στοιχείο Peltier είναι συνδεδεμένο απευθείας στο τροφοδοτικό με τον περιορισμό ρεύματος και ανάλογα με την πολικότητα του αλλάζει από ψύξη σε θέρμανση η επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τον υπερπυκνωτή.

Τα υλικά του ηλεκτρικού κυκλώματος έχουν κολληθεί σε διάτρητη πλακέτα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3, όπου επιπλέον έχει κολληθεί ένας κόνεκτορας JST με διάμετρο καλωδίου 22 AWG στην θέση του υπερπυκνωτή για ευκολία σύνδεσης με τον υπερπυκνωτή που θα βρίσκεται στο φελιζόλ και μία κλέμπα όπου παρέχεται η τάση για το κύκλωμα. Επίσης έχει γίνει προέκταση των ακροδεκτών του DS18B20 με καλώδιο με σκοπό την φορητότητα του αισθητήρα.



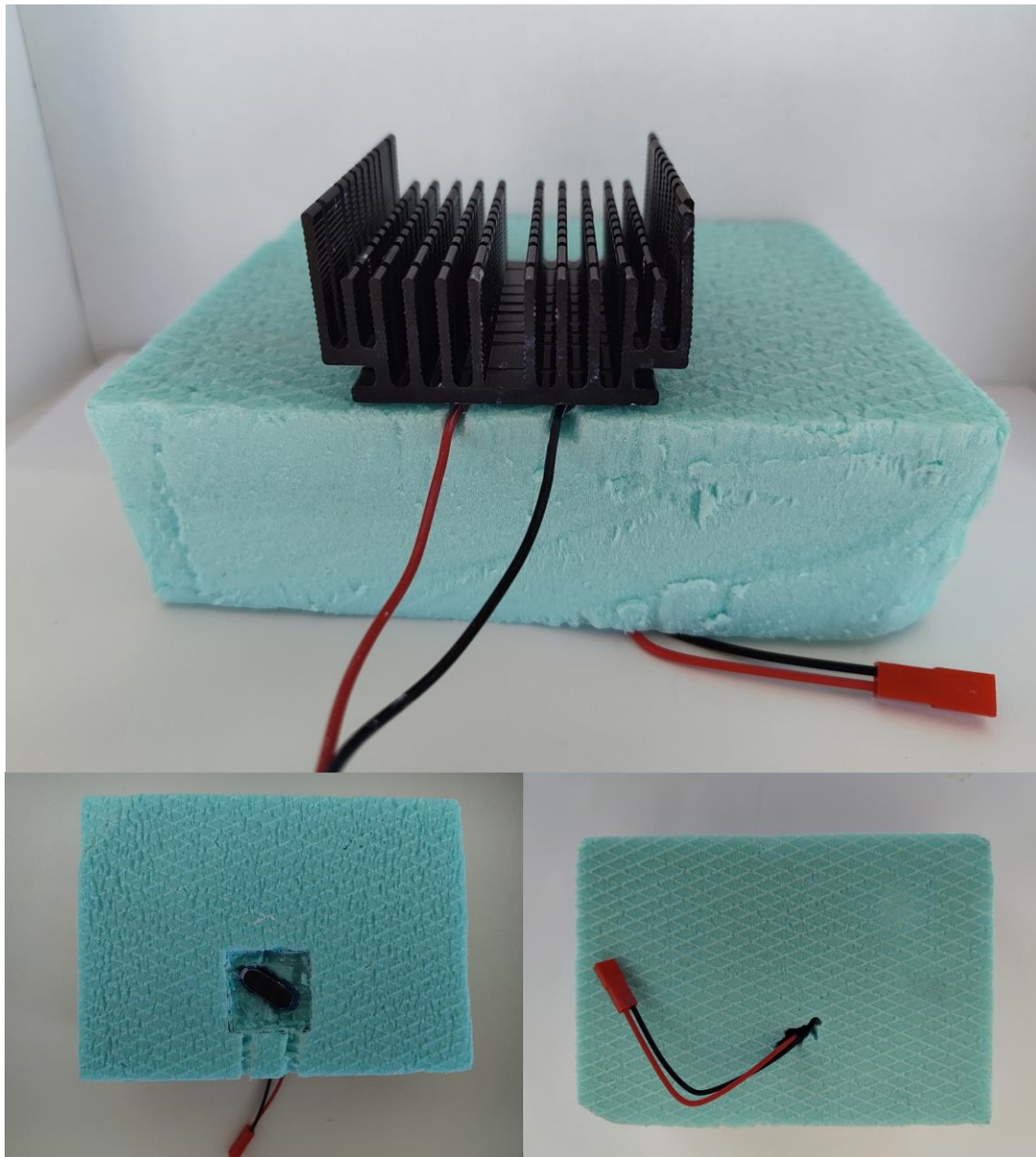
Σχήμα 4-3: Το κύκλωμα σε διάτρητη πλακέτα.

4.5 Δομική περιγραφή

Η δομική περιγραφή αφορά το σύστημα ψύξης της πειραματικής διάταξης και περιλαμβάνει την εξηλασμένη πολυστερίνη, το στοιχείο Peltier και τον αισθητήρα θερμοκρασίας. Στην πάνω πλευρά του φελιζόλ έχει χαραχτεί ένα πλαίσιο 30mm x 30mm όπου χωράει ακριβώς το θερμοηλεκτρικό στοιχείο και πάνω του σε άμεση θερμική επαφή μέσω θερμοαγώγιμης κρέμας υπάρχει μια ψύκτρα η οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στην λειτουργία ψύξης καθώς απάγει θερμότητα από την άλλη πλευρά του θερμοηλεκτρικού στοιχείου δίνοντας το περιθώριο να πέτυχει χαμηλότερες θερμοκρασίες. Το βάθος του πλαισίου είναι σχεδόν 5mm όσο το πάχος του στοιχείου Peltier.

Ακριβώς κάτω από το θερμοηλεκτρικό στοιχείο βρίσκεται ο υπερπυκνωτής όπου για λόγους στήριξης και θερμομόνωσης είναι σφηνωμένος μέσα στο φελιζόλ μαζί με τον αισθητήρα θερμοκρασίας σε θερμική επαφή μαζί του με θερμοαγώγιμη κρέμα, χωρίς καμία επαφή με το στοιχείο Peltier, για μεγίστη ακρίβεια στις μετρήσεις του. Με αυτή την σχεδίαση το θερμοηλεκτρικό στοιχείο έρχεται σε άμεση επαφή με θερμοαγώγιμη κρέμα με τον υπερπυκνωτή προσδίδοντας έτσι την μέγιστη δυνατή μεταφορά θερμοκρασίας.

Οι ακροδέκτες του υπερπυκνωτή είναι κολλημένοι σε έναν συνδετήρα JST θηλυκό για ευκολία σύνδεσης με το κύκλωμα φόρτισης-εκφόρτισης και περνάν κάτω από το φελιζόλ ενώ οι ακροδέκτες του αισθητήρα θερμοκρασίας είναι κολλημένοι απευθείας πάνω στην πλακέτα. Στο Σχήμα 4-4 έχει τοποθετηθεί στο πάνω μέρος του φελιζόλ η ψήκτρα με το θερμοηλεκτρικό στοιχείο ενώ μέσα στο φελιζόλ βρίσκεται ο υπερπυκνωτής.



Σχήμα 4-4: Στο πάνω σχήμα φαίνεται πως εφαρμόζει η ψύκτρα με το θερμοηλεκτρικό στοιχείο στην εσοχή του φελιζόλ ενώ στα κάτω φαίνονται η πάνω και η κάτω όψη του.

Με την παραπάνω δομή το σύστημα είναι ικανό να πετύχει ένα εύρος θερμοκρασίας από 0 °C έως 50 °C, ωστόσο για θερμοκρασίες κάτω των 5° C είναι αναγκαία η τοποθέτηση ενός 12 V ανεμιστήρα πάνω στην ψύκτρα για να συμβάλλει στην απαγωγή θερμότητας.

4.6 Ενδεικτικός χαρακτηρισμός λειτουργίας

Όλα τα υλικά που αναφέρθηκαν κατέχουν την δική τους θέση στον σύστημα και επιτελούν συγκεκριμένο σκοπό συμβάλλοντας στο τελικό αποτέλεσμα. Ο Arduino Nano είναι προγραμματισμένος ανάλογα με τις ανάγκες του πειράματος να ελέγχει τις επαφές των ρελέ κυρίως με γνώμονα τον χρόνο και την θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, όταν τα ρελέ δεν λαμβάνουν κανένα σήμα ο υπερπυκνωτής παραμένει

σε μια κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, δεν φορτίζεται ούτε εκφορτίζεται. Όταν λαμβάνει σήμα το ρελέ φόρτισης μέσω της ΝΟ που είναι συνδεδεμένη με το τροφοδοτικό ο υπερπυκνωτής φορτίζεται υπό καθεστώς σταθερής τάσης. Στην περίπτωση εκφόρτισης το ρελέ φόρτισης πρέπει πάντα να σταματάει να λαμβάνει σήμα διότι δεν επιτρέπεται να δουλεύουν τα δύο ρελέ ταυτόχρονα καθώς δημιουργείται μεγάλο ρεύμα και παράγονται ασαφείς μετρήσεις. Καθόλη την διάρκεια των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης λαμβάνονται δεδομένα που αφορούν την τάση και την διάρκεια των κύκλων μέσω της σειριακής θύρας, ακόμη και στην κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνονται δεδομένα θερμοκρασίας από τον αισθητήρα DS18B20. Το θερμοηλεκτρικό στοιχείο ανάλογα με την ισχύ που του παρέχεται και ανάλογα με τις ανάγκες της εφαρμογής ψύχει ή θερμαίνει τον υπερπυκνωτή ο οποίος παραμένει σφηνωμένος μέσα στο θερμομονωτικό υλικό για όλη την διάρκεια των κύκλων φόρτισης-εκφόρτισης.

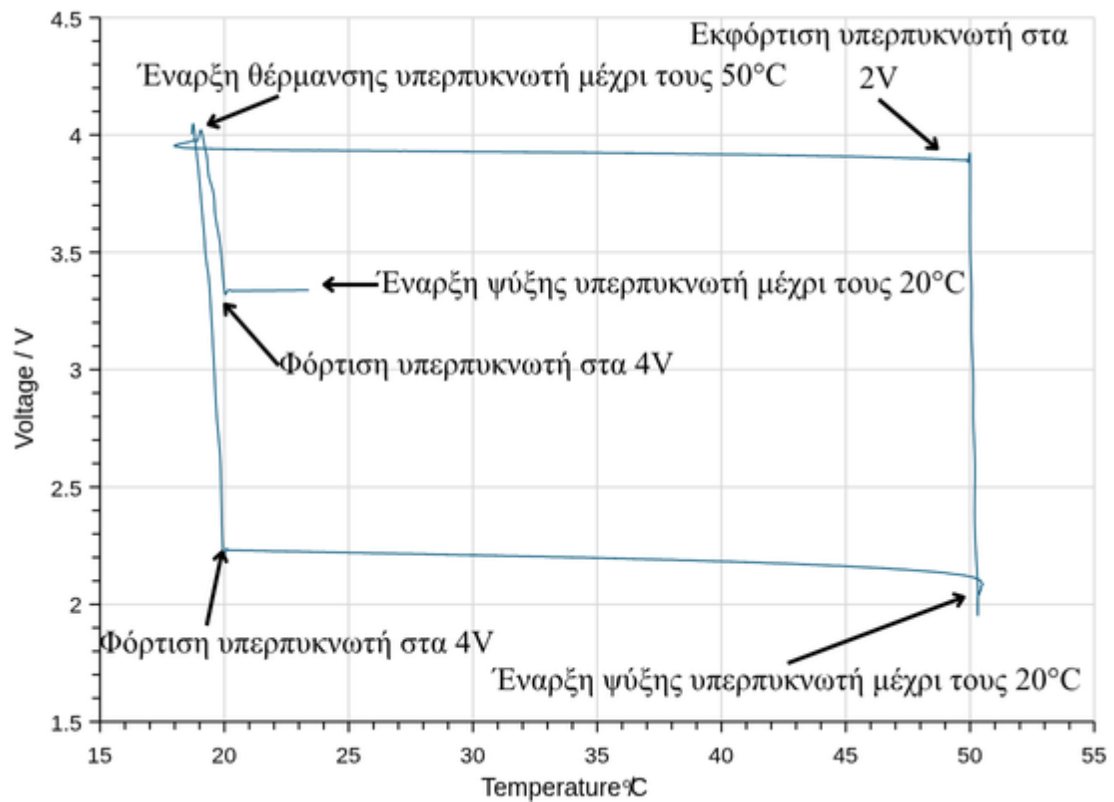
Ακολουθεί ένας ενδεικτικός κύκλος φόρτισης όπου ο Arduino έχει προγραμματιστεί ως εξής:

- Αναμονή για ανάνγνωση 20 °C από τον αισθητήρα θερμοκρασίας
- Φορτίζεται ο υπερπυκνωτής σε θερμοκρασία 20 °C στα 4 V
- Ο υπερπυκνωτής μένει σε ανοιχτό κύκλωμα και μεταβαίνει η θερμοκρασία στους 50 °C.
- Εκφορτίζεται ο υπερπυκνωτής στα 2 V στους 50 °C.
- Αναμονή για 20 °C και έπειτα φόρτιση στα 4 V.

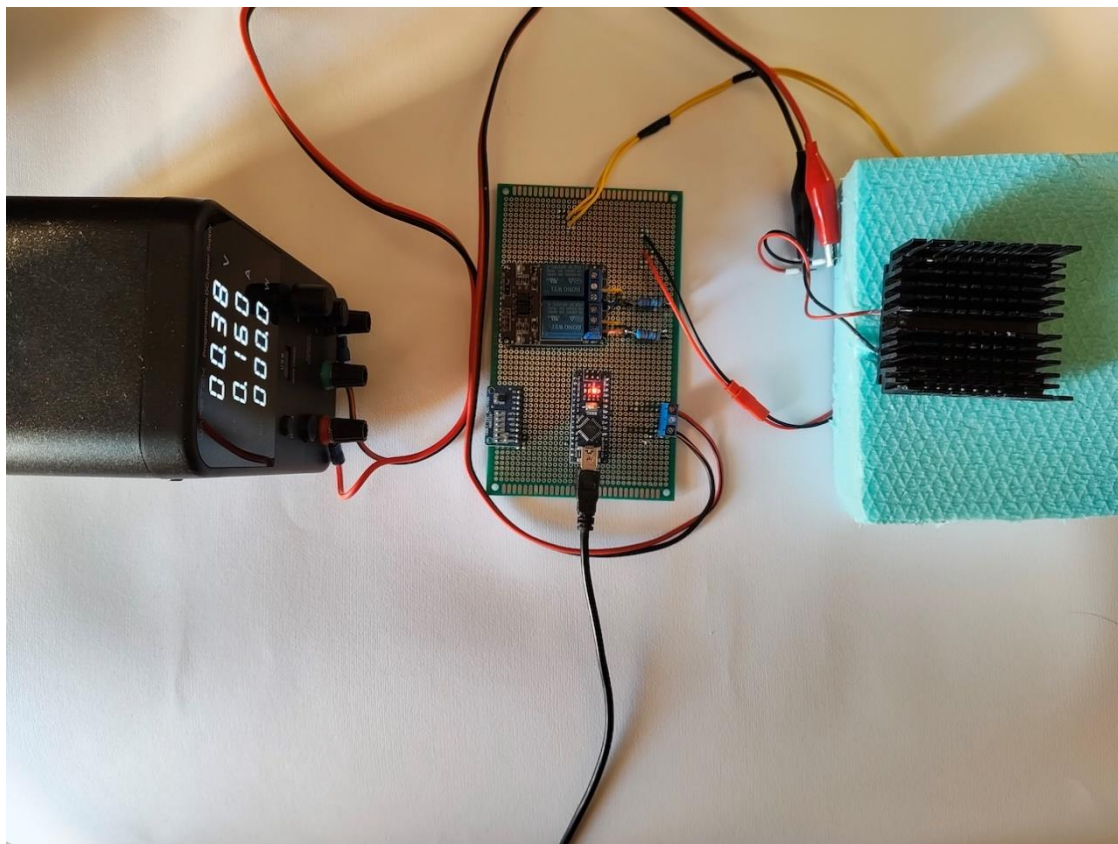
Ο Arduino μόλις διαβάσει θερμοκρασία 20 °C ενεργοποιεί το ρελέ φόρτισης και φορτίζει τον υπερπυκνωτή στα 4 V όπου και σταματάει να δίνει σήμα στο ρελέ περνώντας σε μια κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος. Μόλις διαβάσει θερμοκρασία 50°C ενεργοποιεί το ρελέ εκφόρτισης και η τάση πέφτει στα 2 V. Τέλος, μόλις διαβάσει 20 °C επιστρέφει στα 4 V.

Η ισχύς που παρέχεται στο θερμοηλεκτρικό στοιχείο για τις μεταβολές ελέγχεται χειροκίνητα από το τροφοδοτικό γι' αυτό υπάρχουν μικρές αποκλίσεις αφού έχουν καταγραφεί οι θερμοκρασίες εναλλαγής.

Η παραπάνω διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 4-5 όπου έχει σχεδιαστεί ένα διάγραμμα V-T από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν από την παραπάνω διαδικασία, ενώ στο Σχήμα 4-6 φαίνεται το σύστημα χαρακτηρισμού.



Σχήμα 4-5: Το διάγραμμα V-T που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 4-6: Το σύστημα χαρακτηρισμού κατά την διάρκεια του ενδεικτικού πειράματος.

4.7 Συμπέρασμα

Όπως έχει σχεδιαστεί το σύστημα είναι ικανό να πετύχει τους στόχους που έχουν τεθεί για την πειραματική φάση της διπλωματικής εργασίας καθώς δίνει την δυνατότητα να πραγματοποιηθούν διάφορα σενάρια πειραμάτων σ' ένα περιβάλλον μεταβαλλόμενης θερμοκρασίας που μπορεί να οδηγήσουν σε σημαντικά συμπεράσματα για την συμπεριφορά τους.

5 Πειράματα και αποτελέσματα

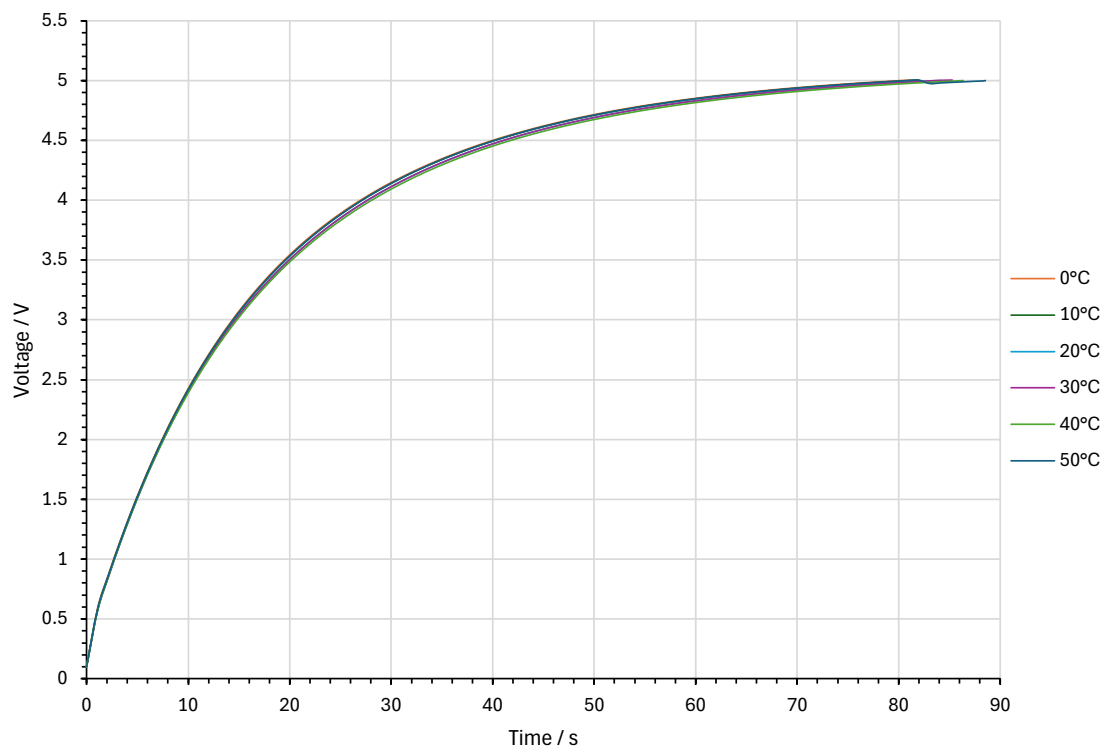
Για την ενότητα των πειραμάτων επιλέχθηκαν τρία μοντέλα υπερπυκνωτών και στην συνέχεια πραγματοποιήθηκαν κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης και μακροχρόνιες εκφορτίσεις υπό διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν την χωρητικότητα, την αυτοεκφόρτιση και την γενικότερη συμπεριφορά τους. Τα μοντέλα υπερπυκνωτών που επιλέχθηκαν παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Κατασκευαστής	Μοντέλο	Χωρητικότητα (F)	Τάση λειτουργίας (Volt)	Αντίσταση ESR (mΩ) @ 1kHz	Θερμοκρασία λειτουργίας (°C)	Ανοχή Χωρητικότητας
KYOCERA AVX	SCMR22G105SRBA0	1	7.5	350	-40°C – 65°C	+30%, -10%
KYOCERA AVX	SCMT22D505SRBB0	5	5.4	100	-40°C – 65°C	+30%, -10%
(PowerStor) Super Capacitors	PHV-5R4V474-R	0.47	5.4	400	-40°C – 65°C	+30%, -10%

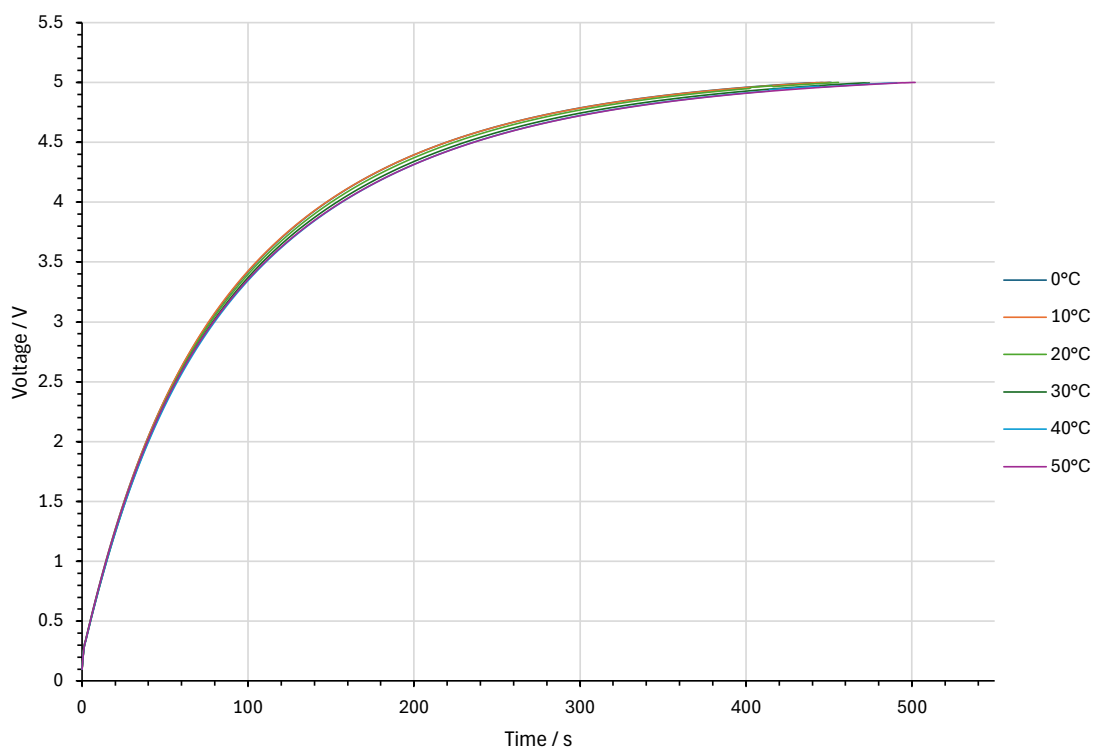
Πίνακας 5-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά υπερπυκνωτών που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διαδικασία.

5.1 Φόρτιση και εκφόρτιση σε διάφορες θερμοκρασίες

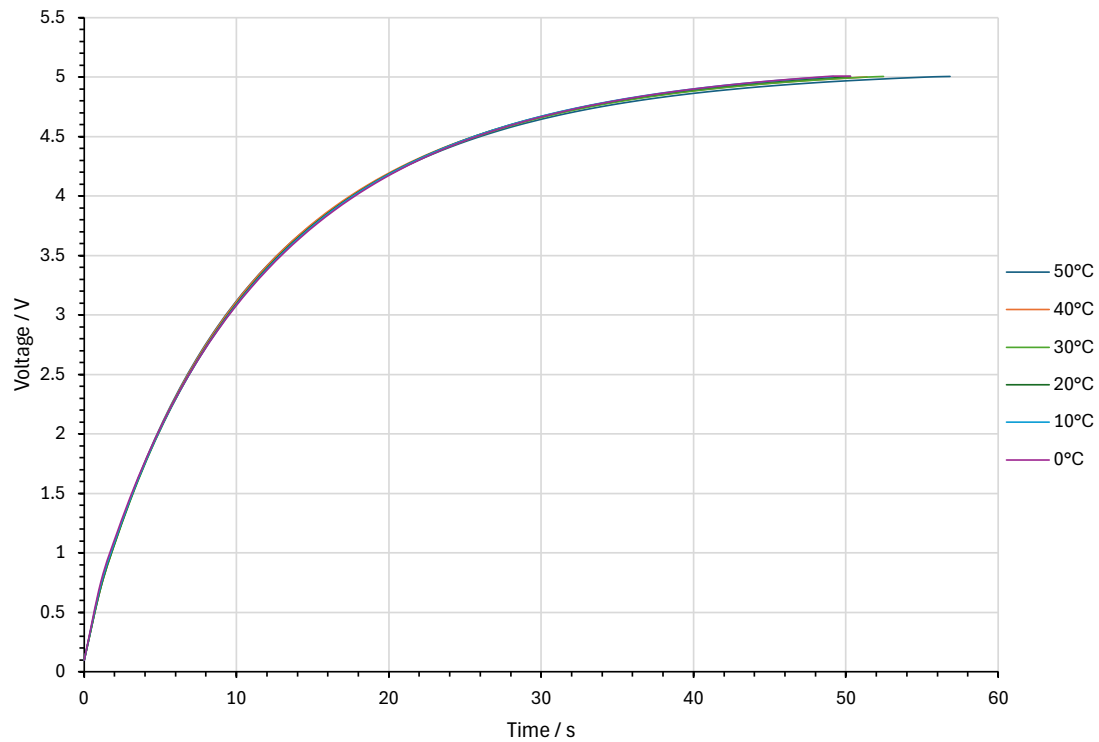
Στο παρόν πείραμα πραγματοποιούνται φορτίσεις και εκφορτίσεις των υπερπυκνωτών στις παρακάτω θερμοκρασίες : 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C με ανοχή ± 1 °C. Ο Arduino έχει προγραμματιστεί να σταματάει την φόρτιση στα 5V και την εκφόρτιση στα 0.1 V ενώ η δειγματοληψία γίνεται ανά 1s. Πιο συγκεκριμένα, ενεργοποιείται το ρελέ φόρτισης, φορτίζεται ο υπερπυκνωτής στα 5 V και κατευθείαν απενεργοποιείται το ρελέ φόρτισης και ενεργοποιείται το ρελέ εκφόρτισης που βραχυκυκλώνει τον υπερπυκνωτή μέσω της αντίστασης. Για αντίσταση έχει επιλεγθεί αντίσταση 22 Ω 2.5W και ακρίβειας 1% που έχει μετρηθεί με το πολύμετρο UNI-T UT131C καθώς προσφέρει ικανοποιητικό χρόνο φόρτισης και εκφόρτισης με σκοπό την καλύτερη ανάλυση στα γραφήματα. Για μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις και αποφυγή θορύβου έχουν πραγματοποιηθεί 5 κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης και έχει ληφθεί ο μέσος όρος των τάσεων που καταγράφηκαν για κάθε δευτερόλεπτο. Στα Σχήματα 5-1, 5-2, 5-3 παρουσιάζονται οι καμπύλες φόρτισης των τριών μοντέλων για τις θερμοκρασίες που αναφέρθηκαν ενώ στα Σχήματα 5-4, 5-5, 5-6 παρουσιάζονται οι καμπύλες εκφόρτισης.



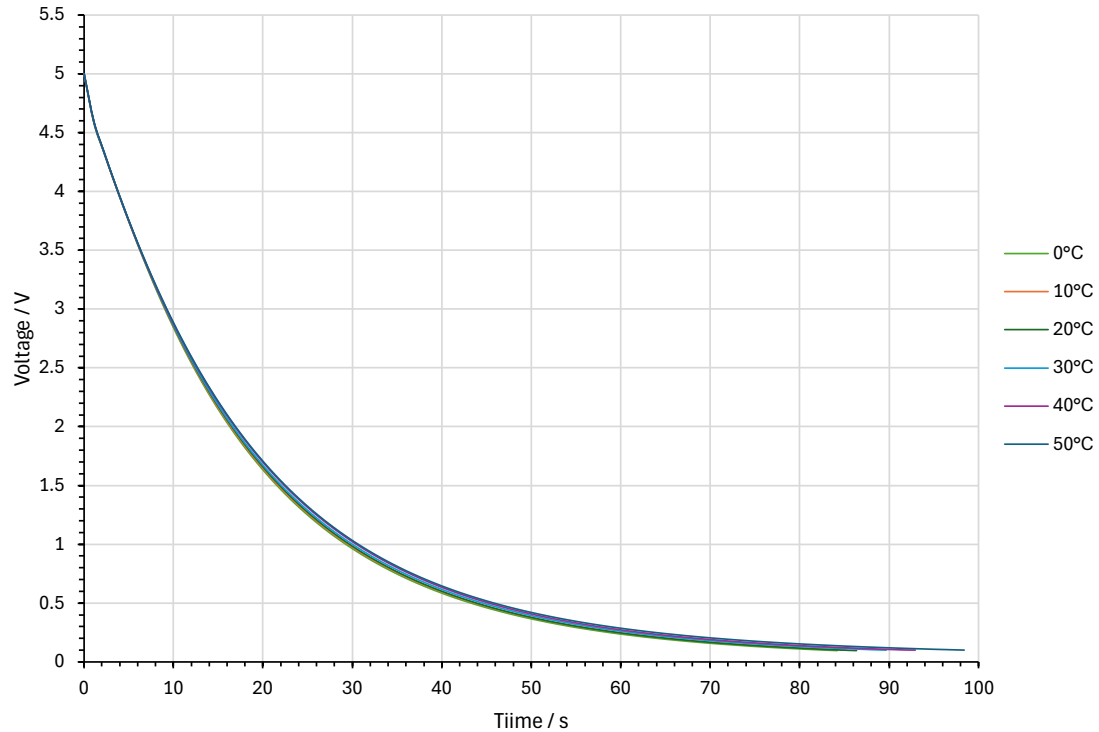
Σχήμα 5-1: Διάγραμμα V-t φόρτισης του υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMR22G105SRBA0 1 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.



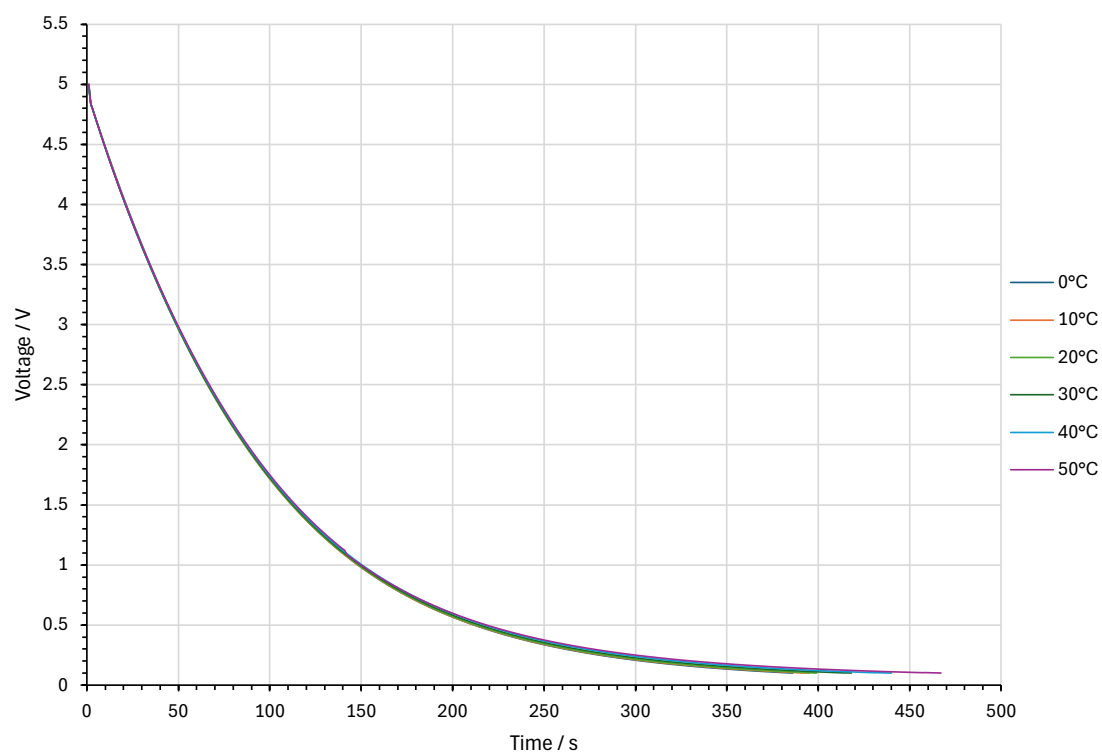
Σχήμα 5-2: Διάγραμμα V-t φόρτισης υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMT22D505SRBB0 5 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.



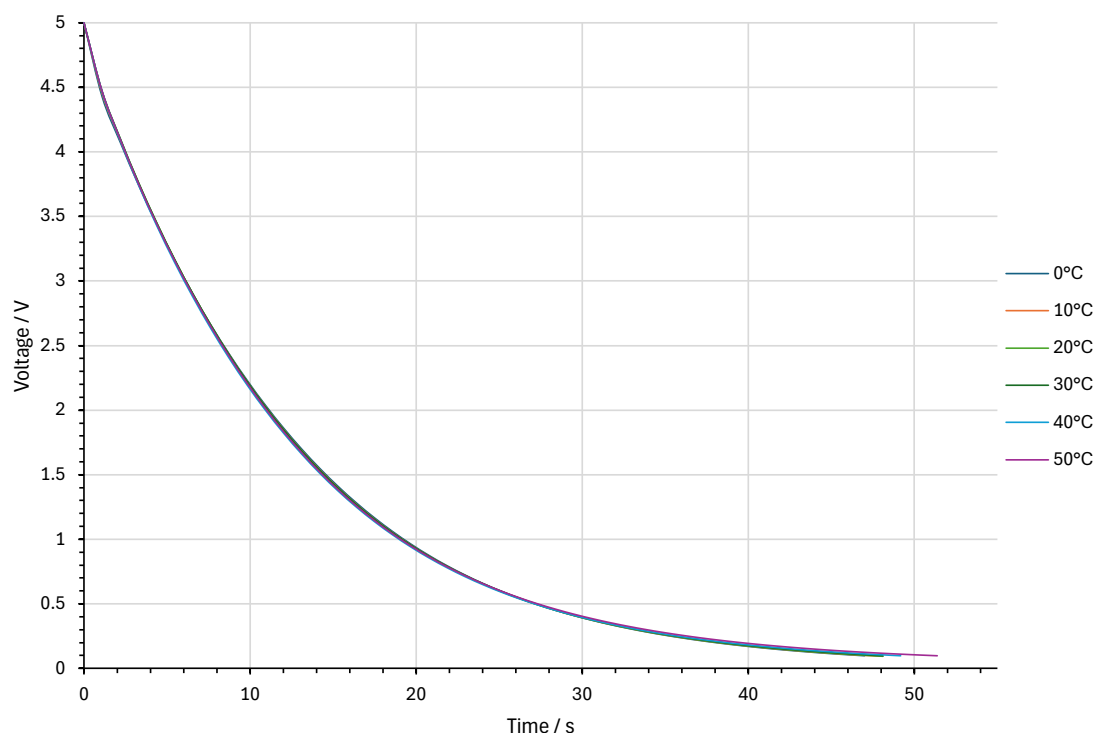
Σχήμα 5-3: Διάγραμμα V-t φόρτισης υπερπυκνωτή PowerStor PHV-5R4V474-R 0.47 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-4: Διάγραμμα V-t εκφόρτισης υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMR22G105SRBA0 1 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-5: Διάγραμμα V-t εκφόρτισης υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMT22D505SRBB0 5 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-6: Διάγραμμα V-t εκφόρτισης υπερπυκνωτή PowerStor PHV-5R4V474-R 0.47 F για τις διάφορες θερμοκρασίες.

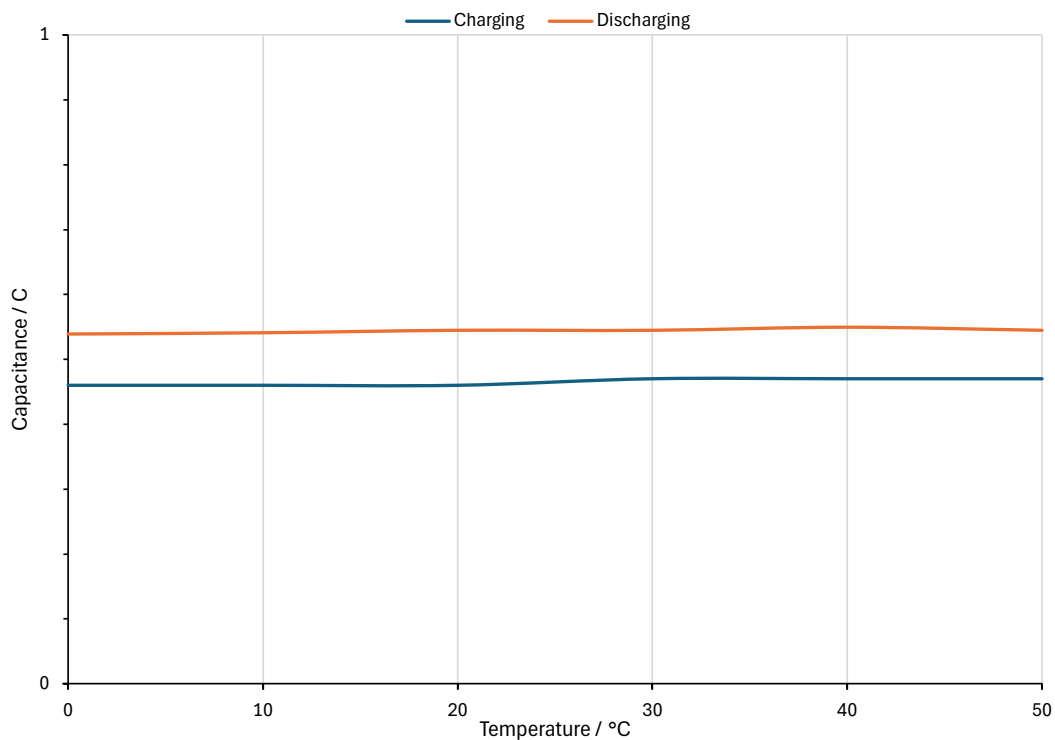
Σχετικά με τα διαγράμματα φόρτισης παρατηρούμε πως και οι τρεις πυκνωτές ακολουθούν την καμπύλη της εκθετικής συνάρτησης και δεν υπάρχει κάποια διαφοροποίηση μεταξύ των μετρήσεων για όλες τις θερμοκρασίες εκτός από τον χρόνο που χρειάζονται για να φτάσουν τα 5V που οφείλεται στην επιρροή της θερμοκρασίας στα υλικά του υπερπυκνωτή. Πιο συγκεκριμένα οι υψηλότερες θερμοκρασίες οδηγούν σε ταχύτερη προσρόφιση των ιόντων στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου καθώς ευνοείται η κινητικότητα τους με αποτέλεσμα την αυξημένη αποθήκευση φορτίου σε αντίθεση με τις χαμηλές θερμοκρασίες όπου η κινητικότητα των ιόντων περιορίζεται και μειώνεται η απόδοση του υπερπυκνωτή [27]. Στα διαγράμματα εκφόρτισης παρατηρείται ακριβώς η ίδια συμπεριφορά με τα διαγράμματα φόρτισης.

Από τις παραπάνω μετρήσεις έγινε προσπάθεια να προσδιορισθεί η χωρητικότητα που παρουσιάζει ο υπερπυκνωτής μέσω της πειραματικής διαδικασίας. Για την εξαγωγή της χωρητικότητας χρησιμοποιήθηκε η εξίσωση της σταθεράς χρόνου ενός ιδανικού RC κυκλώματος που δίνεται από την εξίσωση 5.1, όπου C είναι χωρητικότητα και R η συνολική αντίσταση του κυκλώματος. Πρέπει να σημειωθεί πως η ισοδύναμη αντίσταση σειράς (ESR) δεν συμπεριλήφθηκε στον υπολογισμό της αντίστασης καθώς είναι της τάξεως των millivolts και επομένως η επίδραση της στην συνολική αντίσταση του κυκλώματος μπορεί να παραληφθεί. Σχετικά με την σταθερά χρόνου, σε ένα RC κύκλωμα η σταθερά χρόνου αντιπροσωπεύει τον χρόνο όπου η τάση αγγίζει το 63.2% της τελικής τιμής του πυκνωτή στην φάση της φόρτισης ενώ στην φάση της εκφόρτισης αντιπροσωπεύει το 36.8% της αρχικής τιμής. Για τα πειράματα της παρούσας

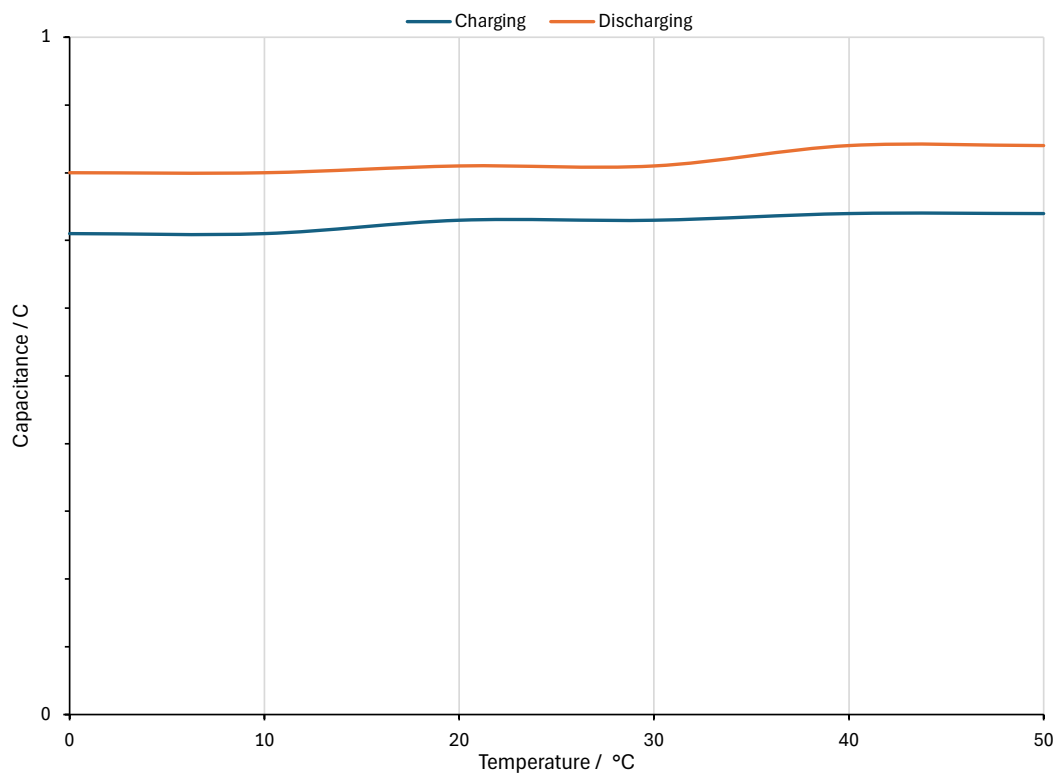
διπλωματικής που η τελική και αρχική τάση είναι 5V η σταθερά χρόνου ισούται με 3.16V για την φόρτιση και 1.84V για την εκφόρτιση αντίστοιχα.

$$\tau = R \times C \quad (5.1)$$

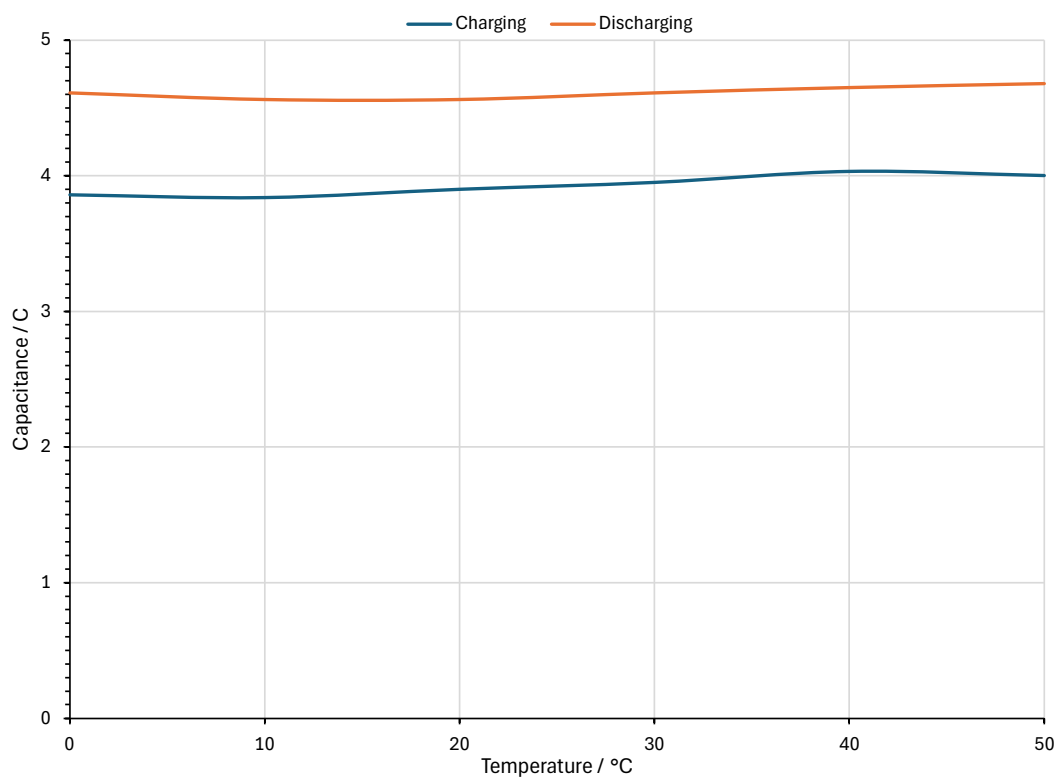
Στα παρακάτω Σχήματα 5-7, 5-8, 5-9 σχεδιάστηκε η χωρητικότητα σε συνάρτηση με τις διάφορες θερμοκρασίας που προέκυψε από την φόρτιση αλλά και από την εκφόρτιση των υπερπυκνωτών. Επίσης, να σημειωθεί πως η σταθερά χρόνου που επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της χωρητικότητας έχει περιθώριο σφάλματος ± 0.5 s καθώς η δειγματοληψία γίνεται ανά 1s και είναι πιθανόν η τιμή της σταθεράς χρόνου να βρίσκεται περίπου 0.5s πριν ή μετά την μέτρηση.



Σχήμα 5-7: Διάγραμμα C-T για φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα του υπερπυκνωτή PowerStor PHV-5R4V474-R 0.47 F.



Σχήμα 5-8: : Διάγραμμα C-T για φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα του υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMR22G105SRBA0 1F.

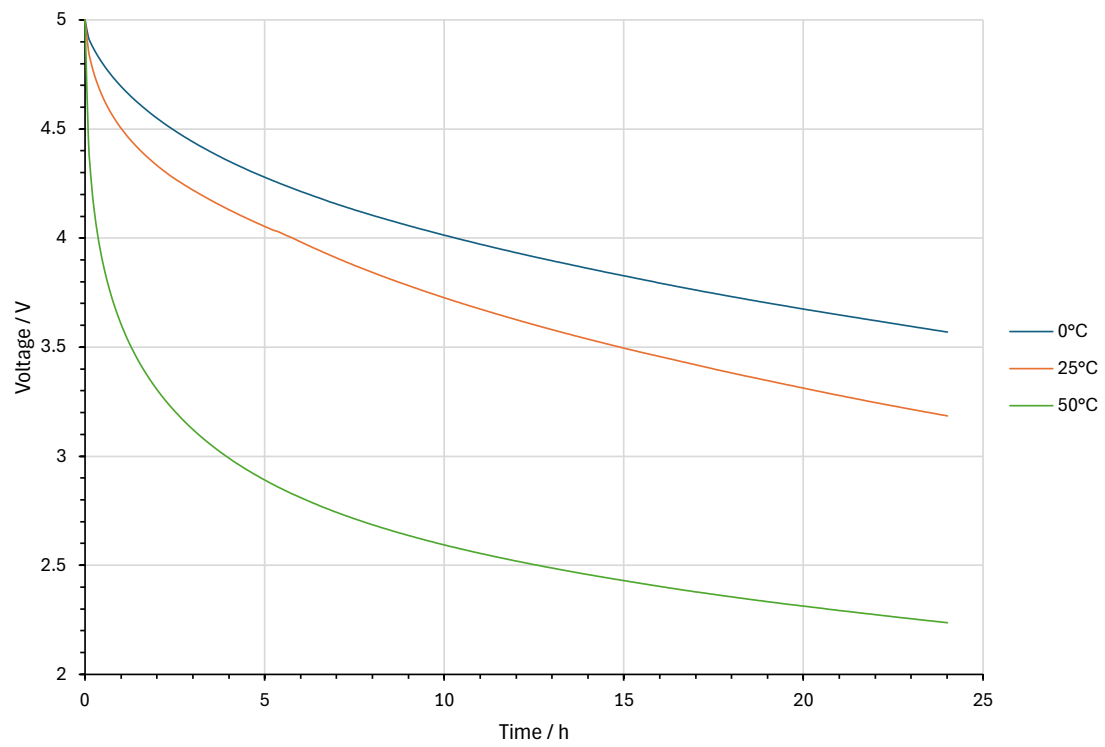


Σχήμα 5-9: Διάγραμμα C-T για φόρτιση και εκφόρτιση αντίστοιχα του υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMT22D505SRBB0 5F.

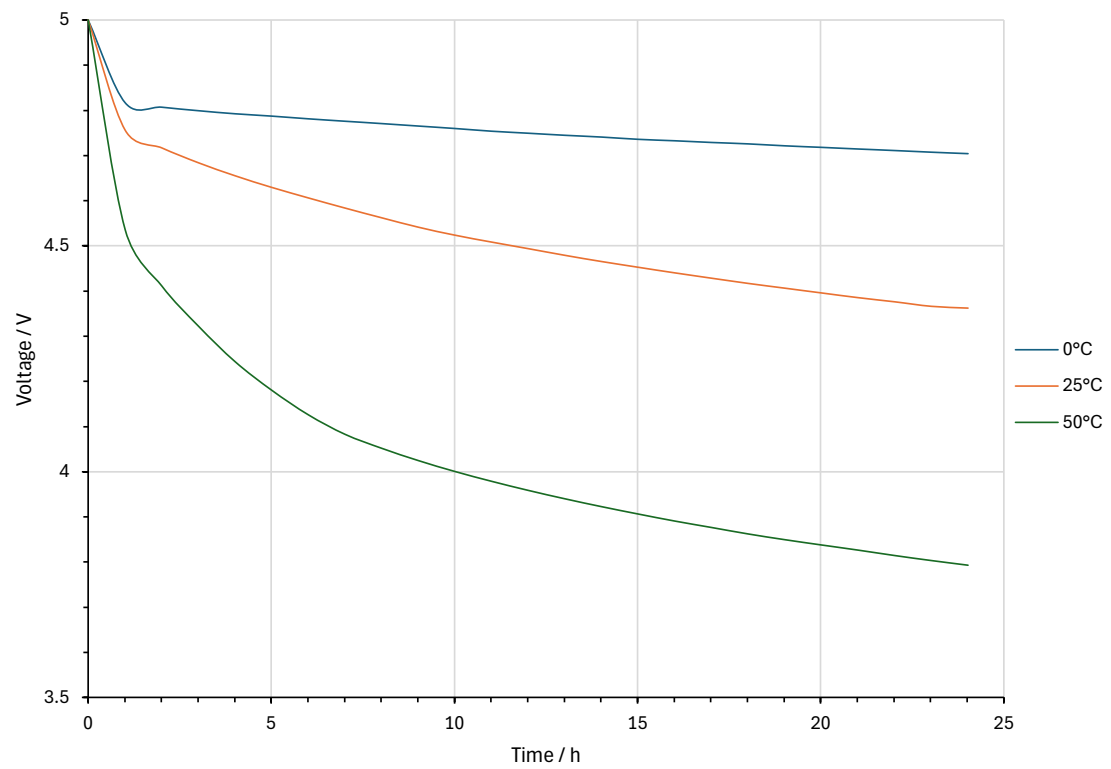
Παρατηρείται στα Σχήματα 5-8 και 5-9 πως οι χωρητικότητες των υπερπυκνωτών των 1 F και 5 F διαφέρουν από τις ονομαστικές χωρητικότητες ενώ στο Σχήμα 5-7 ο υπερπυκνωτής των 0.47 F παρουσιάζει τιμή σχεδόν ίδια με την ονομαστική. Επίσης, οι χωρητικότητες και στους τρεις υπερπυκνωτές διαφοροποιούνται κατά την φόρτιση και της εκφόρτιση καθώς διαφοροποιείται η σταθερά χρόνου. Ωστόσο, δεν παρατηρείται διαφοροποίηση στην χωρητικότητα μεταξύ των θερμοκρασιών και για τους τρεις πυκνωτές. Πρέπει να σημειωθεί πως οι χωρητικότητες που εξάγονται από αυτά τα διαγράμματα είναι προσεγγιστικές καθώς οι υπερπυκνωτές δεν αποτελούν ιδανικούς πυκνωτές που μπορεί να τους χαρακτηρίσει πιστά ένα RC κύκλωμα καθώς η απόδοση τους επηρεάζεται από παράγοντες όπως τα πορώδη ηλεκτρόδια και τους ηλεκτρολύτες που επηρεάζουν την κινητικότητα και την δυνατότητα προσρόφησης και απορρόφησης των ιόντων. Ταυτόχρονα, από τον κατασκευαστή δίνεται ανοχή στην χωρητικότητα που αναγράφεται στον πίνακα 5-1.

5.2 Αυτοεκφόρτιση

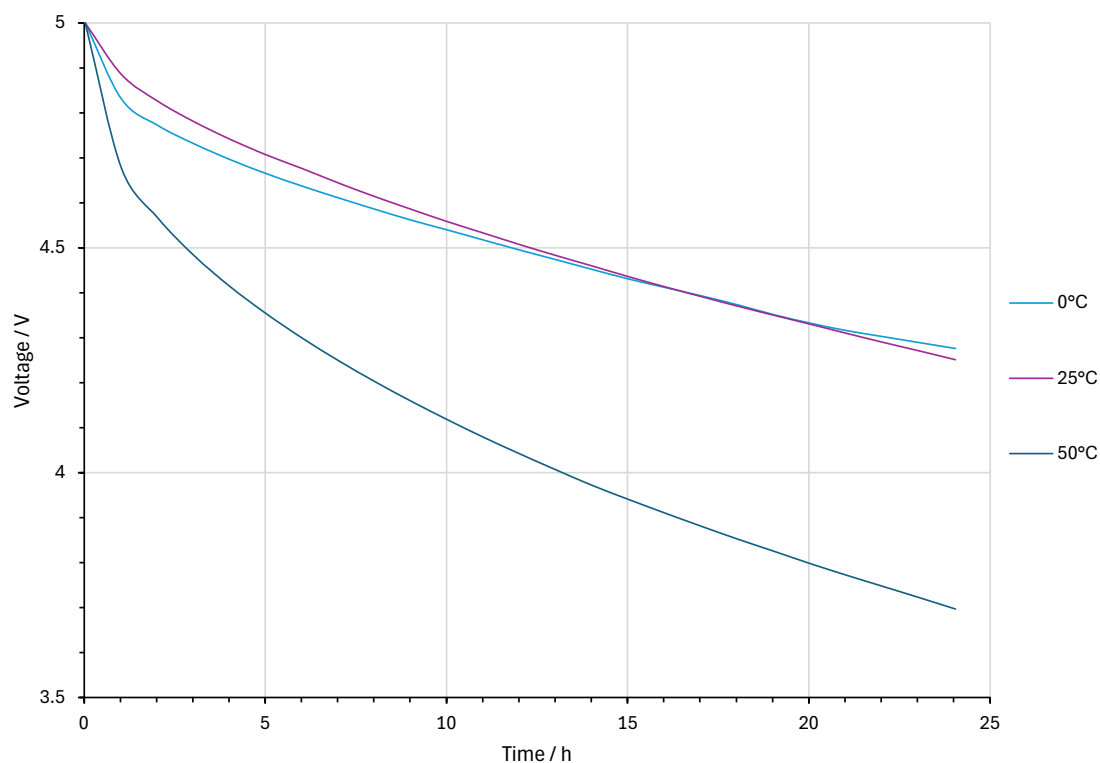
Στο παρόν πείραμα οι υπερπυκνωτές δοκιμάστηκαν ως προς την αυτοεκφόρτισή τους στις παρακάτω θερμοκρασίες: 0 °C, 25 °C, 50 °C. Το σύστημα ρυθμίστηκε με σκοπό να φορτιστεί ο κάθε υπερπυκνωτής στα 5 V και κατευθείαν να προχωρήσει σε ανοιχτό κύκλωμα. Πιο συγκεκριμένα, ακριβώς μετά την φόρτιση τα ρελέ απενεργοποιούνται και ο υπερπυκνωτής παραμένει σε ανοιχτό κύκλωμα για 24 ώρες όπου η δειγματοληψία της τάσης του γίνεται ανά 5 λεπτά. Παρακάτω στα Σχήματα 5-10, 5-11, 5-12 παρουσιάζονται τα διαγράμματα V-t όπου ο σχεδιάστηκε η μετρούμενη τάση ως προς τον χρόνο ενώ στον πίνακα 5-2 μια αναλυτική παρουσίαση των ποσοστών απώλειας φορτίου για τις διάφορες θερμοκρασίες.



Σχήμα 5-10: Διάγραμμα V-t αυτοεκφόρτισης υπερπυκνωτή PowerStor PHV-5R4V474-R 0.47 F.



Σχήμα 5-11: Διάγραμμα V-t αυτοεκφόρτισης υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMR22G105SRBA0 1F.



Σχήμα 5-12: Διάγραμμα V-t αυτοεκφόρτισης υπερπυκνωτή KYOCERA AVX SCMT22D505SRBB0 5F.

Υπερπυκνωτής	0 °C	25 °C	50 °C
0.47F	28.2%	36.4%	55.4%
1F	5.92%	12.8%	24.20%
5F	14.6%	15%	26.25%

Πίνακας 5-2: Ποσοστά απώλειας φορτίου για κάθε θερμοκρασία ύστερα από παραμονή σε ανοιχτό κύκλωμα για 24 ώρες.

Στους EDLC η αυτοεκφόρτιση οφείλεται κυρίως σε τρεις παραμέτρους: ωμικές απώλειες, ανακατανομή φορτίου και παρασιτικές φαρανταϊκές αντιδράσεις. Οι ωμικές απώλειες είναι η εκφόρτιση που λαμβάνει χώρο μέσα τον υπερπυκνωτή μεταξύ των ηλεκτροδίων λόγω ατελειών στην δομή του, οι φαρανταϊκές διεργασίες προκαλούνται λόγω ατελειών στο υλικό του ηλεκτροδίου και τέλος, η ανακατανομή φορτίου συμβαίνει καθώς η τάση που μετριέται αφορά την εξωτερική επιφάνεια του ηλεκτροδίου ωστόσο ύστερα από κάποιο χρονικό διάστημα τα ιόντα μπορούν να προσχωρήσουν πιο μέσα στο ηλεκτρόδιο εμφανίζοντας έτσι μία απώλεια τάσης στις μετρήσεις [28].

Τα πρώτα λεπτά των μετρήσεων παρατηρείται μια απότομη πτώση στην τάση που οφείλεται στην ανακατανομή φορτίου όπου φαίνεται να αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Η πιο σημαντική παρατήρηση είναι η μεγάλη διαφοροποίηση στις απώλειες ανάμεσα στις τρεις θερμοκρασίες. Όσο μεγαλώνει η τιμή της θερμοκρασίας τόσο μεγαλώνει η απώλεια φορτίου κάτι που οφείλεται στην επιρροή που έχει η θερμοκρασία στην κινητικότητα των ιόντων. Η μεγαλύτερη απώλεια καταγράφηκε στον υπερπυκνωτή των 0.47 F κυρίως λόγω χωρητικότητας, ενώ οι πυκνωτές των 1 F και των 5 F φαίνεται να έχουν διατηρήσει σχεδόν τα ίδια επίπεδα τάσης στις θερμοκρασίες 50 °C και 25 °C.

6 Συμπεράσματα

Το σύστημα χαρακτηρισμού που δημιουργήθηκε για την παρούσα διπλωματική έδωσε την δυνατότητα να δοκιμαστούν κάποια μοντέλα υπερπυκνωτών σε διάφορες συνθήκες θερμοκρασίας. Όσον αφορά την χωρητικότητα παρατηρήθηκε πως μένει σχεδόν αμετάβλητη στο φάσμα των θερμοκρασιών που δοκιμάστηκαν, ωστόσο χωρίς να ταυτίζεται με την ονομαστική τάση κάτι που εναπόκειται στην πολύπλοκη δομή των υπερπυκνωτών όπου ένα ισοδύναμο κύκλωμα RC δεν είναι ιδανικό για τον χαρακτηρισμό τους, όπως επίσης μερίδιο έχει και ο διαφορετικός τρόπος εξαγωγής της χωρητικότητας σε σχέση με τις κατασκευάστριες εταιρείες. Σχετικά με την αυτοεκφόρτιση που αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην επιλογή του υπερπυκνωτή ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας παρατηρήθηκε πως η θερμοκρασία αποτελεί σημαντικό ρόλο στο ποσοστό απώλειας τάσης που έχει ο υπερπυκνωτής σε ανοιχτό κύκλωμα.

7 Βιβλιογραφία

- [1] R. Signorelli, D. C. Ku, J. G. Kassakian, and J. E. Schindall, ‘Electrochemical Double-Layer Capacitors Using Carbon Nanotube Electrode Structures’, *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 11, pp. 1837–1847, Nov. 2009, doi: 10.1109/JPROC.2009.2030240.
- [2] A. Muzaffar, M. B. Ahamed, K. Deshmukh, and J. Thirumalai, ‘A review on recent advances in hybrid supercapacitors: Design, fabrication and applications’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 101, pp. 123–145, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.rser.2018.10.026.
- [3] P. Sinha, S. Banerjee, and K. K. Kar, ‘Activated Carbon as Electrode Materials for Supercapacitors’, in *Handbook of Nanocomposite Supercapacitor Materials II*, vol. 302, K. K. Kar, Ed., in Springer Series in Materials Science, vol. 302., Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 113–144. doi: 10.1007/978-3-030-52359-6_5.
- [4] H. A. Khan *et al.*, ‘A comprehensive review on supercapacitors: Their promise to flexibility, high temperature, materials, design, and challenges’, *Energy*, vol. 295, p. 131043, May 2024, doi: 10.1016/j.energy.2024.131043.
- [5] R. B. Choudhary, S. Ansari, and B. Purty, ‘Robust electrochemical performance of polypyrrole (PPy) and polyindole (PIn) based hybrid electrode materials for supercapacitor application: A review’, *Journal of Energy Storage*, vol. 29, p. 101302, June 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101302.
- [6] S. A. Bhat, V. Kumar, S. Kumar, A. E. Atabani, I. Anjum Badruddin, and K.-J. Chae, ‘Supercapacitors production from waste: A new window for sustainable energy and waste management’, *Fuel*, vol. 337, p. 127125, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.fuel.2022.127125.
- [7] X. Chen, R. Paul, and L. Dai, ‘Carbon-based supercapacitors for efficient energy storage’, *National Science Review*, vol. 4, no. 3, pp. 453–489, May 2017, doi: 10.1093/nsr/nwx009.
- [8] L. Zhou, C. Li, X. Liu, Y. Zhu, Y. Wu, and T. Van Ree, ‘Metal oxides in supercapacitors’, in *Metal Oxides in Energy Technologies*, Elsevier, 2018, pp. 169–203. doi: 10.1016/B978-0-12-811167-3.00007-9.
- [9] B. Arumugam, G. Mayakrishnan, S. K. Subburayan Manickavasagam, S. C. Kim, and R. Vanaraj, ‘An Overview of Active Electrode Materials for the Efficient High-Performance Supercapacitor Application’, *Crystals*, vol. 13, no. 7, p. 1118, July 2023, doi: 10.3390/cryst13071118.
- [10] Z. Zhai *et al.*, ‘A review of carbon materials for supercapacitors’, *Materials & Design*, vol. 221, p. 111017, Sept. 2022, doi: 10.1016/j.matdes.2022.111017.
- [11] A. G. Pandolfo and A. F. Hollenkamp, ‘Carbon properties and their role in supercapacitors’, *Journal of Power Sources*, vol. 157, no. 1, pp. 11–27, June 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2006.02.065.
- [12] M. G. Tadesse, A. S. Ahmmed, and J. F. Lübben, ‘Review on Conductive Polymer Composites for Supercapacitor Applications’, *Journal of Composites Science*, vol. 8, no. 2, p. 53, Feb. 2024, doi: 10.3390/jcs8020053.
- [13] J. Lu *et al.*, ‘A review of advanced electrolytes for supercapacitors’, *Journal of Energy Storage*, vol. 103, p. 114338, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.114338.
- [14] M. A. Scibioh and B. Viswanathan, ‘Electrolyte materials for supercapacitors’, in *Materials for Supercapacitor Applications*, Elsevier, 2020, pp. 205–314. doi: 10.1016/B978-0-12-819858-2.00004-4.

- [15] B. Pal, S. Yang, S. Ramesh, V. Thangadurai, and R. Jose, ‘Electrolyte selection for supercapacitive devices: a critical review’, *Nanoscale Adv.*, vol. 1, no. 10, pp. 3807–3835, Oct. 2019, doi: 10.1039/C9NA00374F.
- [16] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors*. Boston, MA: Springer US, 1999. doi: 10.1007/978-1-4757-3058-6.
- [17] P. Yu *et al.*, ‘Battery–supercapacitor hybrid energy storage system for wind power suppression based on the turbulence model of wind speed’, *The Journal of Engineering*, vol. 2018, no. 17, pp. 1922–1929, Nov. 2018, doi: 10.1049/joe.2018.8334.
- [18] ‘A000005-datasheet.pdf’. Accessed: Sept. 11, 2025. [Online]. Available: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- [19] ‘DS18B20 - Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer’.
- [20] Home *et al.*, ‘Temperature Sensor DS18B20’, Scorpio Technology. Accessed: Sept. 20, 2025. [Online]. Available: <https://www.scorpiontechnology.com.au/microcontrollers/temperature-sensor-ds18b20>
- [21] ‘ads1115.pdf?ts=1757530436656&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F’. Accessed: Sept. 11, 2025. [Online]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1115.pdf?ts=1757530436656&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F
- [22] ‘TS0011%20DATASHEET.pdf’. Accessed: Sept. 19, 2025. [Online]. Available: <https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/5773/TS0011%20DATASHEET.pdf>
- [23] A. Kherkhar, Y. Chiba, A. Tlemçani, and H. Mamur, ‘Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach’, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 36, p. 102249, June 2022, doi: 10.1016/j.csite.2022.102249.
- [24] ‘(PDF) A Review on Generation of Electricity using Peltier Module’, *ResearchGate*, Aug. 2025, doi: 10.17577/IJERTV6IS010308.
- [25] ‘PM-30X30-18_DTE.pdf’. Accessed: Sept. 19, 2025. [Online]. Available: https://www.tme.eu/Document/f7815e580e1c2a26d687da561c705958/PM-30X30-18_DTE.pdf
- [26] ‘Εξηλασμένη πολυστερίνη’, *Βικιπαίδεια*. Aug. 23, 2022. Accessed: Sept. 20, 2025. [Online]. Available: https://el.wikipedia.org/w/index.php?title=%CE%95%CE%BE%CE%B7%CE%B%CE%B1%CF%83%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CE%B7_%CF%80%CE%BF%CE%BB%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B5%CF%81%CE%AF%CE%BD%CE%B7&oldid=9632838
- [27] L. Köps, F. A. Kreth, M. Klein, and A. Balducci, ‘An in-depth investigation into the influence of temperature on the electrochemical behavior of electric double-layer capacitors containing ethyl isopropyl sulfone-based electrolytes’, *Journal of Power Sources*, vol. 581, p. 233480, Oct. 2023, doi: 10.1016/j.jpowsour.2023.233480.
- [28] W. Shang *et al.*, ‘Insight into the self-discharge suppression of electrochemical capacitors: Progress and challenges’, *Advanced Powder Materials*, vol. 2, no. 1, p. 100075, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.apmate.2022.100075.