



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ

ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Διπλωματική Εργασία

ΔΙΑΤΑΞΗ ΕΠΙΤΗΡΗΣΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΣΥΣΣΩΡΕΥΤΩΝ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΑΝΤΩΝΙΑΔΗΣ

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Β. Χριστοφόρου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή στις 29 Φεβρουαρίου 2024

.....
Ευάγγελος Χριστοφόρου
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Ιωάννης Γκόνος,
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Χρήστος Χριστοδούλου,
Επίκουρος Καθηγητής
ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

.....

Δημήτριος Κ. Αντωνιάδης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Δημήτριος Αντωνιάδης, 2024.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ' ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Η έρευνα της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας επικεντρώνεται στις μπαταρίες και τους συσσωρευτές και ειδικά στα θέματα υγείας και ασφάλειας αυτών. Αρχικά γίνεται μια επεξήγηση της δομής και του τρόπου λειτουργίας μιας μπαταρίας, ενώ αναλύονται διεξοδικά κάποια χαρακτηριστικά μεγέθη που συνδέονται με αυτή. Έπειτα γίνεται μια αναφορά στα προβλήματα υγείας που μπορεί να αντιμετωπίσει μια μπαταρία και στις τεχνικές ανίχνευσης αυτών. Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη αναφορά σε ορισμένα ηλεκτρονικά ισχύος που χρησιμεύουν στην κατασκευή κυκλωμάτων επιτήρησης υγείας των μπαταριών. Κατόπιν, παρουσιάζεται η προσομοίωση του πειραματικού κυκλώματος και αναλύονται τα αποτελέσματα μέτρησης της εμπέδησης μιας μπαταρίας. Τέλος, παρατίθενται τα συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική εργασία.

Λέξεις Κλειδιά :

Συσσωρευτές, Κατάσταση υγείας μπαταριών, Εσωτερική αντίσταση, Εμπέδηση, Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Εμπέδησης.

Abstract

The research of this particular thesis focuses on batteries and accumulators, specifically addressing issues related to their health and safety. Initially, an explanation of the structure and operation of a battery is provided, along with a detailed analysis of some characteristics associated with it. Subsequently, there is a reference to the health problems that a battery may face and the techniques for detecting them. Then, a brief mention is made of some power electronics used in the construction of monitoring circuits for battery health. Following that, the simulation of the experimental circuit is presented, and the measurement results of the impedance of a battery are analyzed. Finally, conclusions and proposals for future work are outlined.

Key words :

Accumulators, Batteries State of Health, Internal Resistance, Impedance, Electrochemical Impedance Spectroscopy.

Ευχαριστίες

Οφείλω ένα τεράστιο ευχαριστώ στον καθηγητή μου, κύριο Ευάγγελο Χριστοφόρου, αρχικά για την εμπιστοσύνη του αλλά κυρίως για την ανυπολόγιστη υποστήριξη και την βοήθεια που μου παρείχε, καθώς και για την αστείρευτη υπομονή που επέδειξε.

Θέλω να ευχαριστήσω επίσης τους υποψήφιους διδάκτορες Σπύρο Κουτρομπά και Σπύρο Αγγελόπουλο για την καθοδήγησή τους, τις συμβουλές τους και την άμεση ανταπόκρισή τους κάθε φορά που τους είχα ανάγκη.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω του φίλους μου και την οικογένειά μου για την στήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα.

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή	1
1.1 Εισαγωγή στις μπαταρίες	1
1.1.1 Κατηγορίες στοιχείων-μπαταριών	2
1.2 Δομή Στοιχείου	3
1.3 Αρχή λειτουργίας στοιχείων.....	5
1.3.1 Εκφόρτιση	5
1.3.2 Φόρτιση.....	7
1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη	8
1.4.1 Χωρητικότητα.....	8
1.4.1.1 Θεωρητική Χωρητικότητα	9
1.4.1.2 Πραγματική Χωρητικότητα	9
1.4.1.3 Διαθέσιμη Χωρητικότητα.....	10
1.4.1.4 Ονομαστική Χωρητικότητα	10
1.4.2 C-Rate	10
1.4.3 Θεωρητική Ενέργεια	11
1.4.4 Ειδική ενέργεια και πυκνότητα ενέργειας.....	11
1.4.5 Κατάσταση φόρτισης-State of Charge (SoC).....	12
1.4.6 Κύκλος ζωής	12
1.4.7 Βάθος εκφόρτισης-Depth of Discharge (DoD)	13
1.4.8 Αποδοχή Φόρτισης.....	13
1.4.9 Κατάσταση Υγείας-State of Health (SoH)	13
1.4.9.1 Δείκτης χωρητικότητας	14
1.4.9.2 Δείκτης εσωτερικής αντίστασης	14
1.4.9.3 Δείκτης αριθμού εναπομείναντων κύκλων.....	14
2 Επίβλεψη υγείας μπαταριών	17
2.1 Προβλήματα υγείας των μπαταριών	17
2.1.1 Γήρανση.....	17
2.1.2 Θερμοκρασία	18
2.1.3 Υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση.....	19
2.1.4 Υψηλό ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης.....	20
2.2 Κατάσταση λειτουργίας (State of Function – SoF)	20
2.3 Τεχνικές επιτήρησης υγείας των μπαταριών	21
2.3.1 Πειραματικές μέθοδοι	21
2.3.1.1 Μέτρηση εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας	21

2.3.1.2 Μέτρηση εμπέδησης της μπαταρίας	23
2.3.1.3 Επίπεδα ενέργειας της μπαταρίας	27
2.3.2 Μέθοδοι μοντελοποίησης	27
2.3.2.1 Φίλτρα Kalman	28
2.3.2.2 Φίλτρα ελαχίστων τετραγώνων	28
2.3.2.3 Μοντέλο Thevenin	28
2.3.2.4 Μοντέλο Randles.....	30
2.3.3 Μέθοδοι μηχανικής μάθησης	31
2.3.3.1 Μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine – SVM)	32
2.3.3.2 Αλγόριθμοι Ασαφούς Λογικής	33
3 Ηλεκτρονικά ισχύος	35
3.1 Δίοδος Ισχύος	35
3.1.1 Χαρακτηριστική ρεύματος - τάσης.....	35
3.1.1.1 Ιδανική δίοδος.....	35
3.1.1.2 Πραγματική δίοδος	36
3.1.2 Δίοδος Zener	38
3.2 Διπολικό τρανζίστορ – Bipolar Junction Transistor (BJT)	39
3.2.1 Περιοχές λειτουργίας	40
3.2.1.1 Ενεργός περιοχή λειτουργίας.....	40
3.2.1.2 Περιοχή κορεσμού	41
3.2.1.3 Περιοχή αποκοπής	42
3.3 Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου- MOSFET	43
3.3.1 Περιοχές λειτουργίας	44
3.3.1.1 Περιοχή κορεσμού	45
3.3.1.2 Περιοχή τριόδου	45
3.3.1.3 Περιοχή αποκοπής	46
4 Πειραματικό κύκλωμα	49
4.1 Κύκλωμα εκφόρτισης του συσσωρευτή.....	49
4.1.1 Ψηφιακό ποτενσιόμετρο	50
4.1.2 Αντλίες ρεύματος	52
4.1.3 Διακόπτης.....	53
4.2 Κύκλωμα φόρτισης του συσσωρευτή	54
4.3 Γεννήτρια παραγωγής σήματος	54
4.4 Διατάξεις μέτρησης	55
4.4.1 Καταμέτρηση σήματος εισόδου $i(t)$	56
4.4.2 Καταμέτρηση σήματος εξόδου $u(t)$	57
4.5 Μοντέλο συσσωρευτή.....	58

5 Αποτελέσματα προσομοίωσης	61
6 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία	69
Βιβλιογραφία	71

1 Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή στις μπαταρίες

Στην σημερινή εποχή, η ηλεκτρική ενέργεια έχει πρωταγωνιστικό ρόλο. Η χρησιμότητά της σε διάφορες εκφάνσεις της καθημερινότητάς είναι αδιαμφισβήτητη. Μεταξύ άλλων, μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε φως, θέρμανση ή σε μηχανικό έργο ενώ ταυτόχρονα πληθώρα συσκευών και εφαρμογών λειτουργούν χάρη σε αυτή. Προκύπτει επομένως η πολύ σημαντική ανάγκη για δυνατότητα αποθήκευσής της και χρήσης της όποτε απαιτηθεί. Γενικά, για να μπορέσει να αποθηκευτεί αποτελεσματικά η ηλεκτρική ενέργεια, είναι απαραίτητο να μετατραπεί σε άλλης μορφής ενέργεια. Την αρχή αυτή εκμεταλλεύονται οι μπαταρίες.

Μπαταρία ονομάζεται μία ηλεκτροχημική συσκευή που διατηρεί αποθηκευμένη στα ενεργά συστατικά της χημική ενέργεια και την αποδίδει σε μορφή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξωτερικά συστήματα. Η μετατροπή της αποθηκευμένης χημικής ενέργειας γίνεται μέσω των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων της οξείδωσης και της αναγωγής στα συστατικά της μπαταρίας.

Η βασική ηλεκτροχημική μονάδα μιας μπαταρίας ονομάζεται στοιχείο. Συγκεκριμένα, το στοιχείο είναι αυτό που παρέχει την ηλεκτρική ενέργεια μέσω των αντιδράσεων που πραγματοποιούνται στα χημικώς δραστικά υλικά του ή αλλιώς τα ενεργά υλικά. Κάθε μπαταρία μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο στοιχείο ή από ένα σύνολο στοιχείων, συνδεδεμένων παράλληλα ή/και σε σειρά, ούτως ώστε να παρέχονται η επιθυμητή τάση και ρεύμα εξόδου στις διάφορες εφαρμογές.

Η γεωμετρία και το μέγεθος των μπαταριών και των στοιχείων ποικίλλουν. Ο μικρότερος τύπος μπαταρίας είναι αυτός του στοιχείου-κουμπιού. Αποτελείται από ένα και μόνο στοιχείο το οποίο περιβάλλεται από ένα δοχείο σε σχήμα δίσκου. Οι πιο διάσημες είναι οι κυλινδρικές μπαταρίες, όπου ένα στοιχείο ορθογωνίου σχήματος περιστοιχίζεται από ένα κυλινδρικό κέλυφος. Επίσης διαδεδομένες είναι οι πρισματικές μπαταρίες που αποτελούνται από αρκετά στρώματα στοιχείων τοποθετημένων μέσα σε άκαμπτα μεταλλικά δοχεία.



Σχήμα 1: Κυλινδρική και πρισματική μπαταρία [1].

1.1.1 Κατηγορίες στοιχείων-μπαταριών

Οι μπαταρίες και τα στοιχεία χωρίζονται σε δύο κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται αποτελεσματικά ή όχι. Οι μπαταρίες που είναι σχεδιασμένες να μετατρέπουν την χημική τους ενέργεια σε ηλεκτρική μόνο μία φορά ονομάζονται πρωτεύουσες, ενώ οι μπαταρίες που έχουν την ικανότητα να αντιστρέψουν την μετατροπή ενέργειας και να επαναφορτιστούν ονομάζονται δευτερεύουσες.

Οι πρωτεύουσες μπαταρίες αποτελούν μια φθηνή, αξιόπιστη και προσιτή πηγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρησιμοποιούνται σε αναρίθμητες καθημερινές εφαρμογές. Έχουν καλή διάρκεια ζωής και δεν χρειάζονται κάποια ιδιαίτερη συντήρηση. Χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα ενέργειας για χαμηλό προς μέτριο ρυθμό εκφόρτισης με αποτέλεσμα να είναι συνήθως αρκετά ελαφριές και μικρές σε μέγεθος. Τα σχήματα και τα μεγέθη τους ποικίλλουν ανάλογα με την εφαρμογή. Επειδή οι πρωτεύουσες μπαταρίες δεν μπορούν να επαναφορτιστούν αποτελεσματικά πρέπει να ανακυκλώνονται μετά την πλήρη αποφόρτισή τους. Ορισμένες διαδεδομένες πρωτεύουσες μπαταρίες είναι οι μπαταρίες ψευδαργύρου - άνθρακα, οι αλκαλικές μπαταρίες μαγγανίου και οι μπαταρίες λιθίου.

Οι δευτερεύουσες μπαταρίες χαρακτηρίζονται από την ικανότητά τους να επαναφορτίζονται όταν τις διαρρέει ρεύμα αντίθετης φοράς από το ρεύμα εκφόρτισης. Οι μπαταρίες αυτές ονομάζονται και συσσωρευτές καθώς κατά την φόρτισή τους συσσωρεύουν και αποθηκεύουν ενέργεια. Λόγω αυτής της ιδιότητας

μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως δευτερεύουσες πηγές ενέργειας, καλύπτοντας την ενεργειακή ζήτηση του εκάστοτε φορτίου σε περιπτώσεις που μία κύρια πηγή ενέργειας δεν μπορεί να ανταπεξέλθει. Φυσικά, οι συσσωρευτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως κύριες πηγές ενέργειας, με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούνται οι πρωτεύουσες μπαταρίες, με την διαφορά ότι μετά την εκφόρτισή τους δεν απορρίπτονται αλλά επαναφορτίζονται. Βασικά χαρακτηριστικά των συσσωρευτών είναι η υψηλή πυκνότητα ισχύος, οι επίπεδες καμπύλες εκφόρτισης και η καλή απόδοση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Σε αντίθεση με τις πρωτεύουσες μπαταρίες παρουσιάζουν χαμηλή πυκνότητα ενέργειας και δεν είναι ικανές παραμείνουν φορτισμένες για μεγάλα χρονικά διαστήματα όταν αποθηκεύονται. Λόγω των απαιτήσεων για αποτελεσματική επανάληψη της διαδικασίας φόρτισης-εκφόρτισης, ούτως ώστε μετά από κάθε κύκλο οι συσσωρευτές να επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, δεν υπάρχουν πολλά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή τους. Μερικοί διαδεδομένοι συσσωρευτές είναι οι συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, οι ρυθμιζόμενοι με βαλβίδα συσσωρευτές μολύβδου-οξέος, οι συσσωρευτές νικελίου-καδμίου, οι συσσωρευτές νικελίου-ψευδαργύρου και οι συσσωρευτές λιθίου.

1.2 Δομή στοιχείων

Η δομή κάθε στοιχείου αποτελείται από τρία βασικά μέρη : δύο ηλεκτρόδια που συνδέονται με τους ακροδέκτες του κάθε στοιχείου και τον ηλεκτρολύτη που περικλείει τα ηλεκτρόδια.

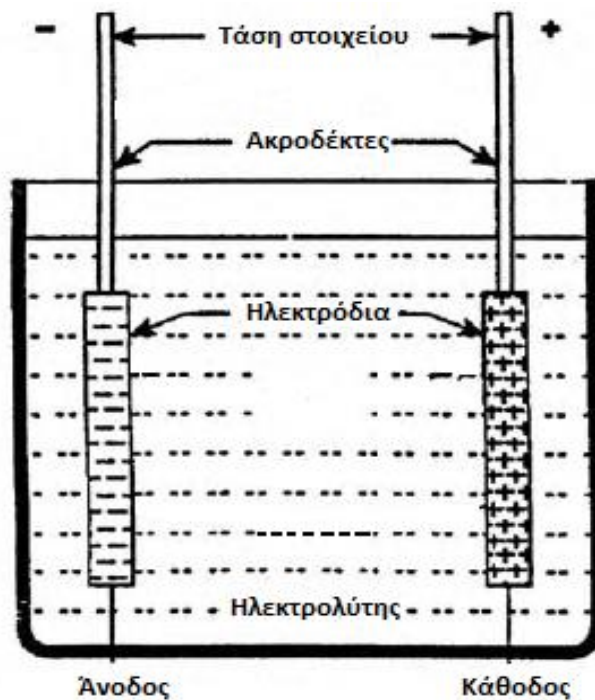
Άνοδος ορίζεται ως το ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται η αντίδραση της οξειδωσης, κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από το ηλεκτρόδιο προς το εξωτερικό κύκλωμα [2]. Επομένως, κατά την συμβατική φορά, θεωρούμε ότι το ρεύμα εισέρχεται στην μπαταρία μέσω της ανόδου. Κατά την εκφόρτιση του στοιχείου η άνοδος ταυτίζεται με το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη του στοιχείου , ενώ κατά την φόρτιση ταυτίζεται με το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη.

Η κάθοδος είναι το ηλεκτρόδιο στο οποίο πραγματοποιείται η αντίδραση της αναγωγής, κατά την οποία δεσμεύονται ηλεκτρόνια στο ηλεκτρόδιο από το εξωτερικό κύκλωμα [2]. Κατά την συμβατική φορά το ρεύμα εξέρχεται από την μπαταρία μέσω της καθόδου. Κατά την εκφόρτιση του στοιχείου η κάθοδος ταυτίζεται με το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη, ενώ κατά την φόρτιση ταυτίζεται με το ηλεκτρόδιο που συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη του στοιχείου.

Με βάση τα παραπάνω γίνεται αντιληπτό πως τα υλικά της ανόδου οφείλουν να είναι αναγωγικά, ούτως ώστε κατά την οξείδωσή τους να προσφέρουν ηλεκτρόνια και να προκαλούν την αναγωγή στην κάθοδο. Αντίστοιχα, τα υλικά της καθόδου είναι οξειδωτικά και κατά την αναγωγή δεσμεύουν ηλεκτρόνια και προκαλούν οξείδωση στην άνοδο.

Ο ηλεκτρολύτης είναι το υλικό μέσα στο οποίο βρίσκονται βυθισμένα τα ηλεκτρόδια εντός του στοιχείου. Είναι υπεύθυνος για την μεταφορά φορτίου με την μορφή ιόντων ανάμεσα στα ηλεκτρόδια. Επομένως σημαντικό να είναι καλός ιοντικός αγωγός, αλλά ταυτόχρονα πρέπει να μην επιτρέπει την μεταφορά ηλεκτρονίων έτσι ώστε να αποτρέπεται το εσωτερικό βραχυκύκλωμα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Ο ηλεκτρολύτης είναι συνήθως υγρός διαλύτης όπως το νερό, και περιέχει διάφορα διαλυμένα άλατα και οξέα που ενισχύουν την ιοντική του αγωγιμότητα. Πολλές μπαταρίες ωστόσο διαθέτουν ηλεκτρολύτες στερεάς μορφής, οι οποίοι εμφανίζουν τις ίδιες ιδιότητες με τους υγρούς σε συνθήκες λειτουργίας της μπαταρίας [2].

Πολλές φορές ανάμεσα στην άνοδο και την κάθοδο παρεμβάλλεται ένας διαχωριστής που κρατά τα δύο ηλεκτρόδια απομακρυσμένα, ούτως ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος βραχυκυκλώματος στο εσωτερικό του στοιχείου. Ο ηλεκτρολύτης ωστόσο μπορεί να διαπερνάει τον διαχωριστή, προκειμένου να διατηρηθεί ο σχηματισμός του ιοντικού αγωγού μεταξύ των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 2: Δομή στοιχείου [3].

1.3 Αρχή λειτουργίας στοιχείων

Οι χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα στοιχεία της μπαταρίας είναι αυτές που εξασφαλίζουν την μετατροπή της ενέργειας από χημική σε ηλεκτρική και αντιστρόφως. Οι αντιδράσεις αυτές λαμβάνουν χώρα στα δύο ηλεκτρόδια των στοιχείων και είναι υπεύθυνες για την δημιουργία του ρεύματος που παρέχει ή δέχεται η μπαταρία.

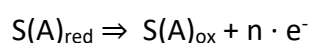
1.3.1 Εκφόρτιση

Η διαδικασία της εκφόρτισης συμβαίνει όταν η μπαταρία συνδέεται με ένα εξωτερικό κύκλωμα και λειτουργεί ως πηγή ενέργειας για κάποιο φορτίο. Τότε πραγματοποιείται στην άνοδο η αντίδραση της οξείδωσης κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από τα ενεργά υλικά της ανόδου στον αρνητικό ακροδέκτη της μπαταρίας και από εκεί στο εξωτερικό κύκλωμα. Αυτά καταλήγουν

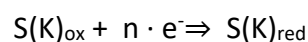
στον θετικό ακροδέκτη ο οποίος είναι συνδεδεμένος με την κάθοδο. Τα ενεργά υλικά της καθόδου δεσμεύουν αυτά τα ηλεκτρόνια με την αντίδραση της αναγωγής. Ταυτόχρονα, γίνεται μεταφορά ανιόντων από την κάθοδο στην άνοδο και κατιόντων από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του ηλεκτρολύτη.

Αν θεωρήσουμε λοιπόν τα αναγωγικά υλικά $S(A)_{red}$ της ανόδου και τα οξειδωτικά υλικά $S(K)_{ox}$ της καθόδου, τότε οι παραπάνω αντιδράσεις που γίνονται κατά την εκφόρτιση της μπαταρίας περιγράφονται από τις παρακάτω σχέσεις [3].

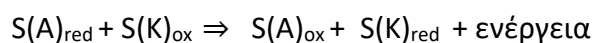
Στην άνοδο έχουμε οξείδωση των αναγωγικών υλικών και απελευθέρωση ηλεκτρονίων :



Στη κάθοδο έχουμε αναγωγή των οξειδωτικών υλικών και δέσμευση ηλεκτρονίων :



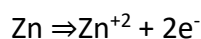
Συνολικά λοιπόν, η αντίδραση που περιγράφει την εκφόρτιση ενός στοιχείου είναι η παρακάτω :



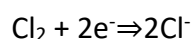
Προφανώς, όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο, η ενέργεια δέσμευσης των υλικών μετά την εκφόρτιση είναι μικρότερη από την ενέργεια δέσμευσης πριν την εκφόρτιση. Η διαφορά αυτή αναπαριστά την ενέργεια που προσφέρει το στοιχείο στο εξωτερικό κύκλωμα καθώς και τις θερμικές απώλειες.

Για παράδειγμα, σε ένα στοιχείο χλωριούχου ψευδαργύρου $ZnCl_2$, η αντίδραση κατά την εκφόρτιση είναι η παρακάτω [2] :

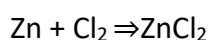
Στην άνοδο του στοιχείου πραγματοποιείται οξείδωση :

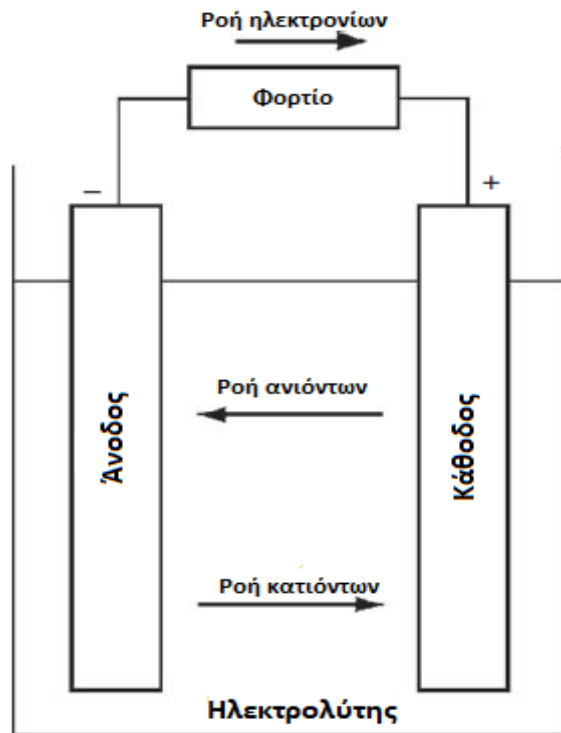


Στη κάθοδο του στοιχείου πραγματοποιείται αναγωγή :



Και συνολικά :





Σχήμα 3: Διαδικασία εκφόρτισης [2].

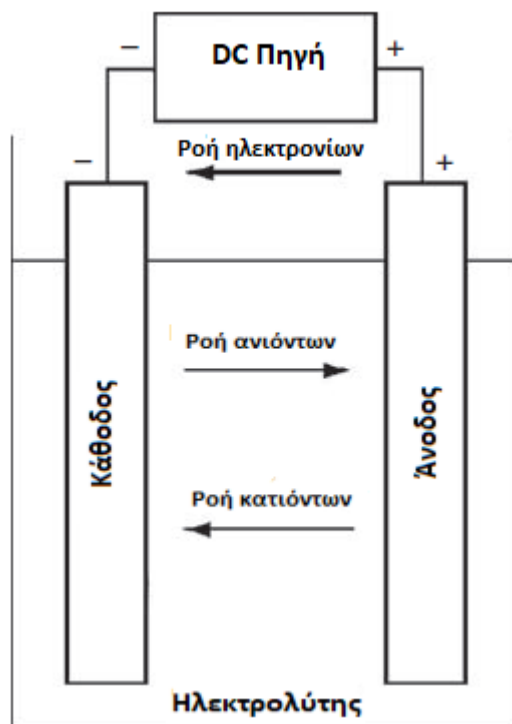
1.3.2 Φόρτιση

Η διαδικασία της φόρτισης μπορεί να γίνει αποτελεσματικά μόνο στα δευτερεύοντα στοιχεία. Προκειμένου να φορτιστεί ένα στοιχείο θα πρέπει να συνδεθεί με εξωτερική πηγή ενέργειας με τέτοιο τρόπο ώστε η φορά του ρεύματος να αντιστραφεί σε σχέση με την φορά της εκφόρτισης. Ταυτόχρονα, αντιστρέφονται και οι αντιδράσεις στα ηλεκτρόδια. Πλέον η οξείδωση πραγματοποιείται στο ηλεκτρόδιο που είναι συνδεδεμένο στον θετικό ακροδέκτη, ενώ η αναγωγή σε αυτό που συνδέεται με τον αρνητικό ακροδέκτη. Έτσι, κατά την διάρκεια της φόρτισης θεωρούμε πως η άνοδος και η κάθοδος έχουν αντιστραφεί. Ο ρόλος του ηλεκτρολύτη παραμένει ίδιος.

Η συνολική αντίδραση κατά την φόρτιση της μπαταρίας μπορεί να περιγραφεί από την παρακάτω εξίσωση [3]:



Φαίνεται λοιπόν ξεκάθαρα πως η φόρτιση αποτελεί απλά αντιστροφή των αντιδράσεων των ηλεκτροδίων.



Σχήμα 4: Διαδικασία φόρτισης [2].

1.4 Χαρακτηριστικά μεγέθη

Κάθε στοιχείο, και επομένως μπαταρία, χαρακτηρίζεται από ορισμένα πολύ σημαντικά μεγέθη, όπως η χωρητικότητα, η θεωρητική ενέργεια, το C-Rate, η κατάσταση φόρτισης, η κατάσταση υγείας. Τα μεγέθη αυτά δίνουν πληροφορίες για τις δυνατότητες κάθε στοιχείου και είναι χρήσιμα για σύγκριση μεταξύ συσσωρευτών και για επιλογή του κατάλληλου για την εκάστοτε εφαρμογή.

1.4.1 Χωρητικότητα

Η χωρητικότητα μίας μπαταρίας γενικά καθορίζεται από το πλήθος των ενεργών υλικών που υπάρχουν στα στοιχεία της. Αυτά τα ενεργά υλικά βρίσκονται

συγκεντρωμένα στα ηλεκτρόδια της μπαταρίας και συμμετέχουν στις χημικές αντιδράσεις. Η χωρητικότητα μπορεί να ερμηνευθεί και ως η συνολική ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου που απορρέει από τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις, είτε κατά την φόρτιση ή κατά την εκφόρτιση. Η μονάδα μέτρησης της χωρητικότητας της μπαταρίας είναι τα Ah (αμπερ-ώρα, Ampere-hours). Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η χωρητικότητα της μπαταρίας εκφράζεται από την παρακάτω σχέση [8]:

$$\text{Χωρητικότητα} = \int_0^t i dt$$

Πρακτικά υπάρχουν διάφοροι τύποι χωρητικότητας που χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία των μπαταριών. Οι τύποι αυτοί διαφέρουν κυρίως στις συνθήκες υπό τις οποίες γίνεται η μέτρηση της μπαταρίας.

1.4.1.1 Θεωρητική χωρητικότητα

Η θεωρητική χωρητικότητα είναι η συνολική χωρητικότητα που μία καινούργια μπαταρία μπορεί να αποδώσει υπό συγκεκριμένες ιδεατές συνθήκες. Η μέτρηση της θεωρητικής χωρητικότητας προϋποθέτει πως η μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη, λειτουργεί σε ελεγχόμενη θερμοκρασία και η εκφόρτισή της γίνεται υπό σταθερή προκαθορισμένη ένταση ρεύματος μέχρι η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας να φτάσει σε μία καθορισμένη τιμή (τάση τερματισμού εκφόρτισης).

1.4.1.2 Πραγματική χωρητικότητα

Όταν οι συνθήκες λειτουργίας διαφέρουν από τις πρότυπες, η χωρητικότητα αλλάζει. Αν για παράδειγμα η μπαταρία εκφορτίζεται με μεγαλύτερη ένταση ρεύματος από την πρότυπη, η μέτρηση της χωρητικότητας θα δώσει μικρότερη τιμή από την θεωρητική. Επομένως η πραγματική χωρητικότητα αφορά την εκφόρτιση της μπαταρίας υπό μη ιδεατές συνθήκες μέχρις ότου η τάση στους ακροδέκτες της φτάσει την καθορισμένη τιμή τερματισμού εκφόρτισης.

1.4.1.3 Διαθέσιμη χωρητικότητα

Η διαθέσιμη χωρητικότητα αφορά το ποσοστό της πραγματικής χωρητικότητας που μπορεί μία καινούργια πλήρως φορτισμένη μπαταρία να αποδώσει όταν η τάση τερματισμού εκφόρτισης έχει διαφορετική τιμή από την πρότυπη.

1.4.1.4 Ονομαστική χωρητικότητα

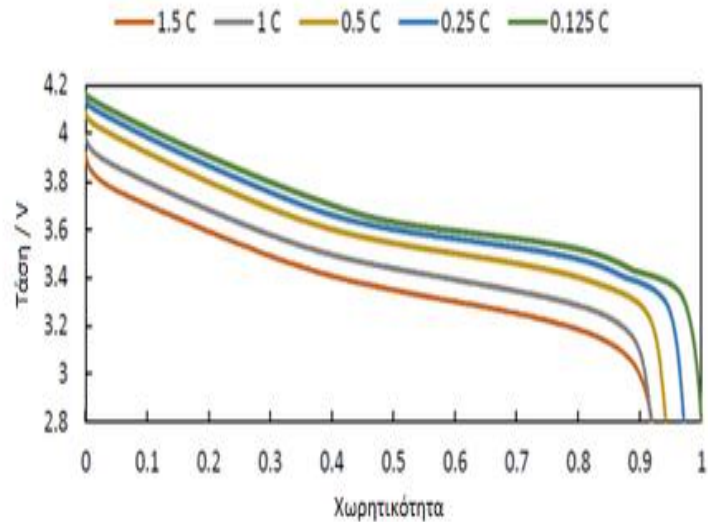
Ονομαστική χωρητικότητα ορίζεται ως η ελάχιστη αναμενόμενη χωρητικότητα που μια καινούργια μπαταρία μπορεί να αποδώσει κάτω από τις πρότυπες συνθήκες λειτουργίας.

1.4.2 C-Rate

Ως C-rate ορίζεται ο ρυθμός εκφόρτισης ή φόρτισης της μπαταρίας που είναι αριθμητικά ίσος με τα Αμπερ-ώρα της ονομαστικής της χωρητικότητας. Η μονάδα μέτρησης του C-rate είναι τα A (Αμπέρ - Ampere). Αν για παράδειγμα μία μπαταρία έχει ονομαστική χωρητικότητα 2.4 Ah, τότε 1 C-rate είναι ίσο με 2.4 A.

Το μέγεθος του C-rate διευκολύνει την μελέτη της συμπεριφοράς των μπαταριών κατά την φόρτισή τους. Συγκεκριμένα έχει δειχθεί πως η συμπεριφορά των στοιχείων είναι παρόμοια όταν φορτίζονται με ίσο C-rate, ανεξαρτήτως της τιμής της χωρητικότητάς τους [2]. Δηλαδή μία μπαταρία των 6 Ah που φορτίζεται με ρεύμα έντασης 3 A (επομένως ίσο με 0.5C) θα έχει παρόμοια συμπεριφορά με μία μπαταρία 2.4 Ah που φορτίζεται με 1.2 A.

Όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, όταν ο ρυθμός εκφόρτισης είναι χαμηλός, η πραγματική χωρητικότητα ενός στοιχείου αυξάνεται και επομένως μπορεί να προσφέρει περισσότερη ενέργεια από όταν ο ρυθμός εκφόρτισης είναι υψηλός.



Σχήμα 5: Χωρητικότητα ανά ρυθμό εκφόρτισης (C-rate) μπαταρίας λιθίου [5].

1.4.3 Θεωρητική ενέργεια

Η θεωρητική ενέργεια είναι ένας εναλλακτικός τρόπος για να περιγραφεί η χωρητικότητα ενός στοιχείου. Η θεωρητική ενέργεια προκύπτει από το γινόμενο της τάσης των ακροδεκτών της μπαταρίας με την χωρητικότητά της. Επομένως μετριέται σε Wh (βατώρες - Watt hours). Η τιμή της θεωρητικής ενέργειας είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να δώσει ένα συγκεκριμένο ηλεκτροχημικό σύστημα.

Η θεωρητική ενέργεια καθορίζεται από τους τύπους των ενεργών υλικών του ηλεκτροχημικού συστήματος καθώς διαμορφώνουν την τάση εξόδου του, και από την ποσότητα των ενεργών υλικών που συμμετέχουν στις αντιδράσεις.

1.4.4 Ειδική ενέργεια και πυκνότητα ενέργειας

Η πραγματική ενέργεια που μπορεί να προσφέρει μία μπαταρία σε σχέση με το βάρος της ονομάζεται ειδική ενέργεια. Αποτελεί ένα κλάσμα της θεωρητικής ενέργειας καθώς σε μία μπαταρία εκτός από τα ενεργά της υλικά υπάρχουν συστατικά όπως ο διαχωριστής των ηλεκτροδίων, που δεν συμμετέχουν στις

αντιδράσεις και αυξάνουν τον όγκο και το βάρος της μπαταρίας. Επίσης τα υλικά μιας μπαταρίας δεν διαθέτουν στοιχειομετρική ισορροπία. Ταυτόχρονα μία μπαταρία δεν μπορεί να εκφορτιστεί μέχρι να φτάσει σε μηδενική τάση εξόδου, με αποτέλεσμα να προσφέρει λιγότερα Ah. Η ειδική ενέργεια μετριέται σε Wh/Kg .

Πολλές φορές χρησιμοποιείται και ο όρος πυκνότητα ενέργειας, που ορίζεται ως η ενέργεια του συστήματος ως προς τον όγκο του. Είναι λοιπόν έννοια παρόμοια με την ειδική ενέργεια και μετριέται σε Wh/L.

Οι δύο αυτοί όροι χρησιμοποιούνται για βαρυμετρικές ή ογκομετρικές μετρήσεις αντίστοιχα.

1.4.5 Κατάσταση φόρτισης – State of Charge (SoC)

Η κατάσταση φόρτισης ορίζεται ως το ποσοστό του κλάσματος της εναπομείνουσας πραγματικής χωρητικότητας της μπαταρίας προς την ονομαστική της χωρητικότητα. Με άλλα λόγια, αναπαριστά τον λόγο της αποθηκευμένης ενέργειας της μπαταρίας μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή προς την μέγιστη συνολική ενέργεια που μπορεί να αποθηκεύσει όταν είναι πλήρως φορτισμένη.

Όταν λοιπόν μία μπαταρία είναι πλήρως φορτισμένη τότε το SoC είναι ίσο με 100% και όταν είναι αφόρτιστη το SoC είναι 0%.

Το συγκεκριμένο μέγεθος συνδέεται με την εκτίμηση της κατάστασης υγείας μιας μπαταρίας, καθώς και με την ασφάλεια των εφαρμογών που τροφοδοτούνται από την εκάστοτε μπαταρία.

1.4.6 Κύκλος ζωής

Μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία πρέπει να μπορεί να εκφορτίζεται πλήρως και να ξανά φορτίζεται στο 100% του SoC πολλές φορές κατά την διάρκεια της ζωής της και να συνεχίζει να παρέχει την ονομαστική της χωρητικότητα στις διάφορες εφαρμογές. Ο κύκλος ζωής της μπαταρίας εκτιμά ακριβώς αυτή την ικανότητα.

1.4.7 Βάθος εκφόρτισης – Depth of Discharge (DoD)

Το βάθος της εκφόρτισης ορίζεται ως το ποσοστό του κλάσματος της χωρητικότητας που έχει αποδοθεί από την μπαταρία κατά την εκφόρτιση προς την πραγματική της χωρητικότητα. Είναι ένα μέγεθος συμπληρωματικό της κατάστασης φόρτισης, και επομένως ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$\text{DoD} = 100\% - \text{SoC}$$

1.4.8 Αποδοχή φόρτισης

Η αποδοχή φόρτισης είναι ένα ποσοστό που εκφράζει το κατά πόσο εύκολα μία μπαταρία ή ένα στοιχείο μπορούν να φορτιστούν. Αν για παράδειγμα μία μπαταρία έχει ποσοστό αποδοχής φόρτισης 90%, τότε για κάθε 1 Ah χωρητικότητας που τροφοδοτείται το φορτίο, τα 0,9 Ah θα μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν αργότερα. Το μέγεθος αυτό επηρεάζεται από την θερμοκρασία του στοιχείου, τον ρυθμό φόρτισης, την γήρανση της μπαταρίας, την μέθοδο φόρτισης και την κατάσταση φόρτισης (SoC).

1.4.9 Κατάσταση υγείας – State of Health (SoH)

Η κατάσταση υγείας της μπαταρίας χρησιμοποιείται ως το μέγεθος που παρουσιάζει την κατάσταση της μπαταρίας ή του στοιχείου σε σχέση με τις ιδεατές συνθήκες της. Εκφράζεται ως ποσοστό και θεωρητικά μία καινούργια μπαταρία που μόλις έχει κατασκευαστεί έχει SoH ίσο με 100%, το οποίο με την χρήση μειώνεται. Φυσικά αυτό το ποσοστό πρακτικά δεν εμφανίζεται συχνά, λόγω της περίπλοκης δομής των μπαταριών.

Δεν υπάρχει μοναδικός ορισμός της κατάστασης υγείας μίας μπαταρίας και κάθε κατασκευαστής επιλέγει ανάλογα με την εφαρμογή στην οποία απευθύνεται το προϊόν του. Δείκτες για την κατάσταση υγείας μπορεί να είναι η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, η οποία αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου, η εμπέδηση της

μπαταρίας και η χωρητικότητα. Για παράδειγμα, στις μπαταρίες λιθίου, η κατάσταση υγείας ορίζεται από την χωρητικότητα, την εσωτερική αντίσταση, την τάση στους ακροδέκτες και τον αριθμό των εναπομενόντων κύκλων φόρτισης – εκφόρτισης [6].

1.4.9.1 Δείκτης χωρητικότητας

Ένας από τους πιο χρήσιμους δείκτες για την κατάσταση υγείας μια μπαταρίας είναι ο δείκτης της εναπομείνουσας χωρητικότητας. Βάσει αυτού του δείκτη, η κατάσταση υγείας της μπαταρίας ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης πραγματικής χωρητικότητας Q_r προς την ονομαστική χωρητικότητα Q_n [5] :

$$SoH = \frac{Q_r}{Q_n} \times 100\%$$

1.4.9.2 Δείκτης εσωτερικής αντίστασης

Σημαντικός δείκτης για την μέτρηση της υγείας της μπαταρίας είναι το μέγιστο ρεύμα φόρτισης και εκφόρτισης. Οι τιμές αυτές των ρευμάτων επηρεάζονται άμεσα από την εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, η οποία με την πάροδο του χρόνου συνεχώς αυξάνεται. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μελέτη [7], όταν η εσωτερική αντίσταση μια μπαταρίας λιθίου φτάσει στο 160% της αρχικής της τιμής, η μπαταρία αχρηστεύεται. Βάσει του δείκτη εσωτερικής αντίστασης, η κατάσταση υγείας ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς της εσωτερικής αντίστασης R_{end} της μπαταρίας στο τέλος της ζωής της με την εσωτερική αντίσταση R που παρουσιάζει την στιγμή της μέτρησης η μπαταρία προς την διαφορά της R_{end} με την εσωτερική αντίσταση R_{new} που παρουσιάζει η μπαταρία στην αρχή της ζωής της [5] :

$$SoH = \frac{R_{end} - R}{R_{end} - R_{new}} \times 100\%$$

1.4.9.3 Δείκτης αριθμού εναπομείναντων κύκλων

Σε πολλές περιπτώσεις είναι απαραίτητο να παρέχονται πληροφορίες για τον αναμενόμενο αριθμό κύκλων φόρτισης εκφόρτισης που μπορεί να παρέχει μία επαναφορτιζόμενη μπαταρία. Βάσει του συγκεκριμένου δείκτη, η κατάσταση υγείας της μπαταρίας ορίζεται ως ο λόγος των εναπομείναντων κύκλων C_r προς τους συνολικούς κύκλους C_t φόρτισης εκφόρτισης [5] :

$$SoH = \frac{C_r}{C_t} \times 100\%$$

2 Επίβλεψη υγείας μπαταριών

Μία μπαταρία κατά την διάρκεια της ζωής της μπορεί να παρουσιάσει διάφορα προβλήματα που θα επηρεάσουν σε σημαντικό βαθμό της απόδοσή της, θέτοντας σε σοβαρό κίνδυνο την εκάστοτε εφαρμογή που τροφοδοτεί. Είναι απαραίτητη λοιπόν η ανάπτυξη τεχνολογιών που θα μπορούν να αναγνωρίζουν αυτά τα προβλήματα εγκαίρως και αν είναι δυνατόν, να τα αντιμετωπίζουν πριν προκληθεί κάποια σημαντική βλάβη. Ακόμα είναι σημαντικό να αναγνωριστούν οι παράγοντες που μπορεί να οδηγήσουν στην δημιουργία αυτών των προβλημάτων.

2.1 Προβλήματα υγείας των μπαταριών

Τα προβλήματα υγείας των μπαταριών κατηγοριοποιούνται σε δύο επίπεδα. Το πρώτο είναι το επίπεδο στοιχείου, και αφορά τα προβλήματα που εμφανίζονται στην δομική μονάδα της μπαταρίας. Τέτοια προβλήματα μπορεί να είναι η εξάλειψη των ενεργών υλικών από τα ηλεκτρόδια, χημικές διαβρώσεις στα υλικά του στοιχείου, αυξήσεις στην εσωτερική αντίσταση ή/και την εμπέδηση της μπαταρίας.

Το δεύτερο επίπεδο είναι το επίπεδο του συστήματος. Τα προβλήματα σε επίπεδο συστήματος προκαλούνται κυρίως από τις περίπλοκες ηλεκτροχημικές διαδικασίες και τις συνθήκες λειτουργίας των μπαταριών, όπως η υψηλές θερμοκρασίες, τα υψηλά ρεύματα εκφόρτισης ή φόρτισης, η υπερβολική εκφόρτιση και η φόρτιση άνω του αναμενόμενου.

Παρακάτω παρουσιάζονται μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατάσταση υγείας των μπαταριών.

2.1.1 Γήρανση

Η γήρανση ενός στοιχείου μπορεί να προκαλέσει μη αντιστρέψιμα προβλήματα στα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη, των δύο ηλεκτροδίων και άλλων δομικών

συστατικών του στοιχείου. Οι διαδικασίες που συντελούνται κατά την γήρανση χωρίζονται με την σειρά τους σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη περιλαμβάνει διαδικασίες που οδηγούν στην σταδιακή αποδόμηση των χημικών συστατικών του στοιχείου. Οι διαδικασίες αυτές είναι σχετικά εύκολο να παρακολουθηθούν και επομένως να προβλεφθούν και να αντιμετωπιστούν εγκαίρως. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει διαδικασίες που είναι απρόβλεπτες και δεν μπορούν να παρατηρηθούν. Ο μόνος τρόπος να γίνουν αντιληπτές είναι η μέτρηση των αποτελεσμάτων τους. Ένα παράδειγμα μιας τέτοιας διαδικασίας είναι η δημιουργία συνθηκών βραχυκυκλώματος στον ηλεκτρολύτη.

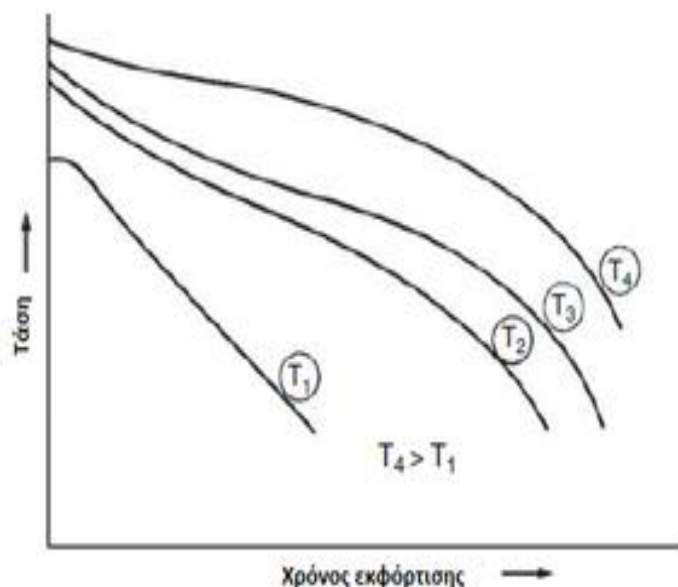
2.1.2 Θερμοκρασία

Σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την υγεία των μπαταριών είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, τόσο κατά την αποθήκευσή τους, όσο και κατά την λειτουργία τους.

Συγκεκριμένα, στις μπαταρίες λιθίου η λειτουργία τους σε αυξημένη θερμοκρασία περιβάλλοντος οδηγεί σε μείωση χωρητικότητας, απόδοσης ηλεκτροδίων ανόδου και καθόδου και ταυτόχρονα σε αύξηση της εσωτερικής αντίστασης και της εμπέδησης [8]. Ταυτόχρονα αύξηση της θερμοκρασίας μπορεί να προκαλέσει οξείδωση του ηλεκτρολύτη και απελευθέρωση αερίων, τα οποία μπορούν να προκαλέσουν σοβαρά ατυχήματα [5].

Ομοίως, χαμηλές θερμοκρασίες επίσης οδηγούν σε αύξηση της εσωτερικής αντίστασης των μπαταριών καθώς και σε μείωση της χωρητικότητας και της τάσης τους.

Στο παρακάτω χαρακτηριστικό σχήμα, αποτυπώνεται η επίδραση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος κατά την εκφόρτιση μιας μπαταρίας στην χωρητικότητά της και την τάση των ακροδεκτών της [2]. Θεωρείται πως η θερμοκρασία T_1 είναι η χαμηλότερη, ενώ η T_4 η μεγαλύτερη.



Σχήμα 6: Η εκφόρτιση μιας μπαταρίας σε διαφορετικά φορτία και θερμοκρασίες T_1-T_4 [2].

2.1.3 Υπερφόρτιση και υπερ-εκφόρτιση

Ακόμα ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει αρνητικά την υγεία της μπαταρίας είναι το φαινόμενο της υπερφόρτισης αλλά και της πολύ μεγάλης εκφόρτισης.

Κατά την υπερφόρτιση, η χωρητικότητα της μπαταρίας μειώνεται ραγδαία, τα φαινόμενα γήρανσης γίνονται γρήγορα πιο αισθητά ενώ η ευστάθεια των υλικών χειροτερεύει με αποτέλεσμα να τίθενται ζητήματα ασφαλείας. Σε μπαταρίες λιθίου που εργαστηριακά υπεβλήθησαν σε υπερφόρτιση παρατηρήθηκε μεταξύ άλλων απότομη αύξηση της θερμοκρασίας, απελευθέρωση αερίων και τελικά σε ανάφλεξη της μπαταρίας [12].

Στην υπερβολική εκφόρτιση είναι πιθανό να δημιουργηθεί εσωτερικό βραχυκύκλωμα στην μπαταρία. Το βάθος εκφόρτισης και η πιθανότητα βραχυκυκλώματος συνδέονται από μη γραμμική σχέση. Σε μελέτη σε μπαταρίες λιθίου βρέθηκε πως η υπερβολική εκφόρτιση κάτω από το όριο της τάσης αποκοπής, οδήγησε σε βραχυκύκλωμα, καταστρέφοντας τον εσωτερικό μηχανισμό της μπαταρίας [5].

2.1.4 Υψηλά ρεύματα φόρτισης και εκφόρτισης

Όπως φάνηκε και στο σχήμα 5, μεγαλύτερα C-Rates κατά την εκφόρτιση οδηγούν σε δραστική μείωση της πραγματικής χωρητικότητας μιας μπαταρίας. Ειδικά στις μπαταρίες λιθίου, οι οποίες είναι πολύ διαδεδομένες αλλά δεν παρουσιάζουν ικανοποιητική εικόνα στην πυκνότητα ενέργειας και ως εκ τούτου δεν μπορούν να υποστηρίξουν μεγάλα ρεύματα για μεγάλο χρονικό διάστημα [5].

Ταυτόχρονα, αύξηση της τιμής των ρευμάτων οδηγεί σε μεγαλύτερη αύξηση της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας, που με την σειρά της μπορεί να προκαλέσει απώλειες ισχύος και φυσικά ανεπιθύμητη αύξηση θερμοκρασίας.

2.2 Κατάσταση λειτουργίας (State of Function – SoF)

Τα συστήματα διαχείρισης και παρακολούθησης υγείας των μπαταριών οφείλουν να διατηρούν ένα αρχείο χαρακτηριστικών που δείχνουν τον βαθμό χρήσης μίας μπαταρίας. Αυτά τα χαρακτηριστικά μπορεί να είναι ο αριθμός των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης που έχουν ήδη πραγματοποιηθεί, η πραγματική χωρητικότητα, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας.

Όμως, αν κάποιο από αυτά τα μεγέθη βρίσκεται σε οριακή τιμή, τα τελικά συμπεράσματα για την κατάσταση της μπαταρίας θα επηρεαστούν. Αν για παράδειγμα η εσωτερική αντίσταση ενός στοιχείου είναι υψηλή, ενώ η μέτρηση της χωρητικότητας είναι καλή, τα συμπεράσματα για την κατάσταση υγείας της μπαταρίας μπορεί να είναι λανθασμένα.

Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, χρησιμοποιείται η κατάσταση λειτουργίας (SoF). Η κατάσταση λειτουργίας δείχνει την επίδοσης μιας μπαταρίας που βρίσκεται σε λειτουργία σε σχέση με τις απαιτήσεις ισχύος της εκάστοτε εφαρμογής. Ένας από τους τρόπους να προσδιοριστεί η συγκεκριμένη κατάσταση είναι να υπολογιστεί ο λόγος εναπομείνουσας ισχύος που μπορεί να προσφέρει η μπαταρία προς την μέγιστη ισχύ που μπορεί να αποθηκευτεί σε αυτήν.

2.3 Τεχνικές επιτήρησης υγείας των μπαταριών

Η σωστή και αποτελεσματική επιτήρηση υγείας των στοιχείων και των μπαταριών παρουσιάζει σοβαρές δυσκολίες και προκλήσεις, καθώς οι εσωτερικές διεργασίες και χημικές αντιδράσεις των στοιχείων δεν μπορούν να μετρηθούν με ακρίβεια από κάποιον εξωτερικό παρατηρητή. Ταυτόχρονα η μπαταρία είναι ένα μη γραμμικό και χρονικά μεταβλητό σύστημα, της οποίας οι βασικές παράμετροι, οι οποίες επηρεάζουν τον τρόπο λειτουργίας και απόδοσής τους, αλλάζουν δυναμικά από τις συνθήκες του περιβάλλοντος λειτουργίας. Μία τέτοια παράμετρος που έχει καταλυτικό ρόλο στην λειτουργία των μπαταριών είναι η θερμοκρασία.

Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις και τεχνικές για την σωστή επίβλεψη των καταστάσεων της μπαταρίας. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες :

- Πειραματικές μέθοδοι
- Μέθοδοι μοντελοποίησης
- Μέθοδοι μηχανικής μάθησης

2.3.1 Πειραματικές μέθοδοι

Οι πειραματικές μέθοδοι συνήθως απαιτούν ειδικό εξοπλισμό και συνθήκες εργαστηρίου προκειμένου να πραγματοποιηθούν επιτυχώς. Σκοπός τους είναι η καταγραφή δεδομένων και μετρήσεων και η εξαγωγή συμπερασμάτων για την λειτουργία των στοιχείων και των μπαταριών. Ορισμένες από αυτές τις μεθόδους παρουσιάζονται εδώ.

2.3.1.1 Μέτρηση εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας

Η εσωτερική αντίσταση μιας μπαταρίας είναι ένας σημαντικός δείκτης για την κατάσταση υγείας της και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοσή της.

Συγκεκριμένα είναι υπεύθυνη για την πτώση τάσης που εμφανίζεται στους ακροδέκτες μιας μπαταρίας όταν συνδεθεί σε αυτή κάποιο εξωτερικό φορτίο. Η εσωτερική αντίσταση σχηματίζει πρακτικά έναν διαιρέτη τάσης με το εκάστοτε φορτίο. Έτσι, όσο μεγαλύτερο είναι το ρεύμα που παρέχει η μπαταρία, τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση τάσης σε σχέση με την τάση των ακροδεκτών της σε κατάσταση ανοιχτού κυκλώματος.

Η εσωτερική αντίσταση θεωρείται ωμική και δεν έχει σταθερό μέτρο, ενώ η τιμή της επηρεάζεται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η κατάσταση φόρτισης και το ρεύμα φόρτισης εκφόρτισης. Δεν πρέπει να συγχέεται με την εμπέδηση της μπαταρίας.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της εσωτερικής αντίστασης είναι ο παλμός ρεύματος. Βασίζεται στον νόμο του Ohm και υπολογίζει την εσωτερική αντίσταση μετρώντας την πτώση τάσης της μπαταρίας για ένα συγκεκριμένο ρεύμα εκφόρτισης. Θεωρώντας, για συγκεκριμένες τιμές θερμοκρασίας T και κατάσταση φόρτισης SoC , ως OCV την τάση ανοιχτού κυκλώματος, V_b την τάση της μπαταρίας και I_b το ρεύμα της μπαταρίας, τότε η εσωτερική αντίσταση r θα υπολογιστεί βάση του τύπου [10] :

$$r(SoC,T) = \frac{OCV(SoC,T) - V_b(SoC,T)}{I_b(SoC,T)}$$

Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ικανοποιητική ακρίβεια αλλά είναι ευαίσθητη στον θόρυβο των αισθητήρων. Για αυτό είναι κατάλληλη κυρίως σε στατικές μετρήσεις σε συνθήκες εργαστηρίου.

Ένας εναλλακτικός τρόπος μέτρησης αξιοποιεί τον νόμο του Joule και μετράει την ενέργεια που χάνεται λόγω της αντίστασης σε μορφή θερμότητας. Συγκεκριμένα αξιοποιεί τον παρακάτω τύπο [11]:

$$\frac{dQ_j}{dt} = I_b^2 \cdot r$$

,όπου το $Q_j(t)$ αναπαριστά την θερμότητα που παράγει η μπαταρία. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι επίσης πολύ ικανοποιητική, αλλά αρκετά ακριβή.

Τέλος, όπως θα φανεί και παρακάτω, το μέγεθος της εσωτερικής αντίστασης της μπαταρίας μπορεί να μετρηθεί και από την Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Εμπέδησης - ΗΦΕ (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS).

2.3.1.2 Μέτρηση εμπέδησης της μπαταρίας

Η σύνθετη αντίσταση ή εμπέδηση είναι η επέκταση του όρου της αντίστασης στα εναλλασσόμενα κυκλώματα. Συγκεκριμένα η εμπέδηση είναι ένας μιγαδικός αριθμός, του οποίου το πραγματικό μέρος αναπαριστά την ωμική αντίσταση ενός στοιχείου, ενώ το φανταστικό του μέρος αναπαριστά την επαγωγική του αντίδραση. Επομένως, για ένα κυκλωματικό στοιχείο, η εμπέδηση είναι [2]:

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = \frac{E}{I}(\omega) \angle -\varphi(1)$$

, όπου $E(\omega)$ η πτώση τάσης στα άκρα του στοιχείου, $I(\omega)$ η ένταση που διαπερνά το στοιχείο και φ η διαφορά φάσης της τάσης και της έντασης.

Τα σημαντικότερα κυκλωματικά στοιχεία που λαμβάνονται υπ' όψιν κατά την ανάλυση της εμπέδησης μιας μπαταρίας είναι τα παρακάτω :

- Ωμική αντίσταση R : $Z_R = R$
- Αυτεπαγωγή – Πηνίο L : $Z_L = j\omega L$, όπου ω η συχνότητα του εναλλασσόμενου ρεύματος.
- Χωρητικότητα – Πυκνωτής C : $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$, όπου ω η συχνότητα της εναλλασσόμενης τάσης.
- Στοιχείο σταθερής φάσης Q : $Z_Q = \frac{1}{Q(j\omega)^\alpha}$
- Εμπέδηση Warburg W : $\frac{1}{Y(j\omega)^{\frac{1}{2}}}$

Το στοιχείο σταθερής φάσης χρησιμοποιείται ως μία γενίκευση του πυκνωτή. Συγκεκριμένα, για $\alpha = 1$, το στοιχείο σταθερής φάσης αναπαριστά έναν ιδεατό πυκνωτή. Είναι πολύ χρήσιμο για την μοντελοποίηση του φαινομένου της

χωρητικότητας διπλού στρώματος που εμφανίζεται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και τον ηλεκτρολύτη. Τέλος, αν στο στοιχείο σταθερής φάσης δοθεί η τιμή $\alpha = 0$, τότε αυτό αναπαριστά μια κλασική ωμική αντίσταση.

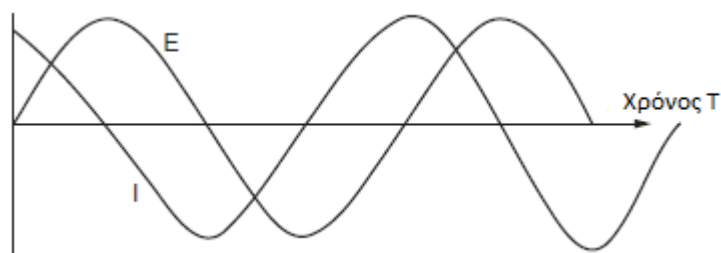
Επιπρόσθετα, η εμπέδηση Warburg είναι μέγεθος που χρησιμοποιείται στην μοντελοποίηση των μπαταριών, προκειμένου να δοθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις προσομοιώσεις. Όπως αναλύεται και παρακάτω, η χρήση της είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στο μοντέλο του Randles.

Στα στοιχεία, η εμπέδηση εμφανίζεται κυρίως λόγω χωρητικών φαινομένων στην διεπαφή ηλεκτροδίων και ηλεκτρολύτη. Η εμπέδηση αυτή τείνει να αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου. Είναι ένας σημαντικός δείκτης για την κατάσταση υγείας της μπαταρίας, καθώς και η μέτρησή της μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για την κατάσταση υγείας του ηλεκτροχημικού συστήματος και συγκεκριμένα για τις διεργασίες στα ηλεκτρόδια. Για τον λόγο αυτό, σημαντικό βάρος των ερευνών έχει επικεντρωθεί σε αποτελεσματικές μεθόδους μέτρησης της εμπέδησης, τόσο εργαστηριακά, όσο και στο πεδίο.

Η πιο διαδεδομένη μέθοδος μέτρησης της εμπέδησης ενός στοιχείου είναι η Ηλεκτροχημική Φασματοσκοπία Εμπέδησης - ΗΦΕ (Electrochemical Impedance Spectroscopy – EIS). Υπάρχουν 2 μέθοδοι για την πραγματοποίηση της Ηλεκτροχημικής Φασματοσκοπίας : η γαλβανοστατική και η ποτενσιοστατική.

Στη ποτενσιοστατική μέθοδο ένα μικρό (της τάξης των 5-10mV) εναλλασσόμενο ημιτονοειδές σήμα τάσης υπερτίθεται σε μία πεπερασμένη DC τάση ή ακόμα και στην τάση ανοιχτού κυκλώματος της μπαταρίας. Γίνονται μετρήσεις σε ένα μεγάλο εύρος συχνοτήτων, συνήθως ανάμεσα στα 0.01 Hz έως το 1 Mhz.

Τα εναλλασσόμενα σήματα τάσης και έντασης εξόδου που θα μετρηθούν θα έχουν μεταξύ τους διαφορά στο πλάτος και διαφορά στην φάση. Η διαφορά φάσης οφείλεται στην επαγωγική αντίδραση της μπαταρίας. Αν δηλαδή η εμπέδηση της μπαταρίας ήταν αποκλειστικά ωμική, η τάση και η ένταση εξόδου θα ήταν συμφασικές. Ένα παράδειγμα της εικόνας εξόδου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα, όπου αποτυπώνεται και η διαφορά φάσης :



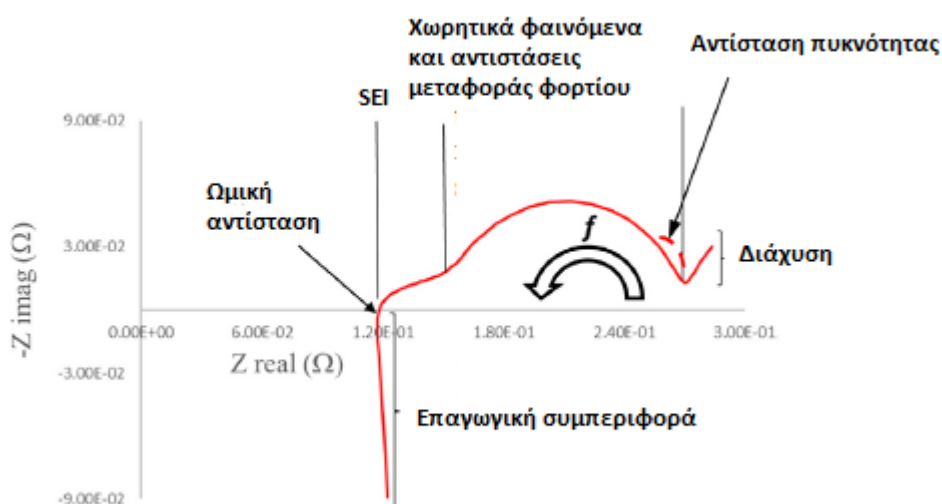
Σχήμα 7: Σήματα τάσης E και έντασης I εξόδου της ΗΦΕ[2]

Επομένως, βάση του ορισμού (1) που δόθηκε πιο πάνω, μπορεί να υπολογιστεί εύκολα η εμπέδηση και βάση αυτής να εκτιμηθεί η κατάσταση υγείας της μπαταρίας.

Αντίστοιχα, στη γαλβανοστατική μέθοδο το σήμα εισόδου είναι ένα αντίστοιχα μικρό (της τάξης των mA) σήμα ρεύματος, ενώ το σήμα εξόδου που μετριέται είναι το σήμα τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας. Η υπόλοιπη διαδικασία μέτρησης είναι παρόμοια.

Από αυτές τις δύο μεθόδους, καταλληλότερη για τις μπαταρίες έχει κριθεί η γαλβανοστατική, καθώς με αυτή την μέθοδο η τάση της μπαταρίας και η κατάσταση φόρτισής της δεν επηρεάζονται σημαντικά. Αντιθέτως, στη ποτενσιοστατική μέθοδο, ακόμα και ένα μικρό σφάλμα της τάξης του 1 mV μπορεί να οδηγήσει σε απροσδόκητα ψηλό ρεύμα και να επηρεάσει την κατάσταση φόρτισης της μετρούμενης μπαταρίας [13].

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο φάσμα συχνοτήτων μπορούν να αποτυπωθούν με το διάγραμμα Nyquist. Ο κάθετος άξονας στο διάγραμμα Nyquist αναπαριστά το φανταστικό μέρος της εμπέδησης ενώ ο οριζόντιος το πραγματικό, συναρτήσσει της συχνότητας ω . Ένα ιδεατό διάγραμμα Nyquist θα πρέπει να παρουσιάζει μηδενικό θόρυβο, να μπορεί να επαναληφθεί με ακρίβεια και να αποτυπώνει πέντε διακριτά σημεία, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές διεργασίες της μπαταρίας. Στο παρακάτω σχήμα, φαίνεται ένα ιδεατό διάγραμμα Nyquist μπαταρίας λιθίου:



Σχήμα 8: Διάγραμμα Nyquist μπαταρίας λιθίου [13]

Στο διάγραμμα του σχήματος 8, φαίνονται πέντε διακριτές περιοχές :

- Η πρώτη περιοχή αριστερά αναπαριστά την επαγωγική συμπεριφορά της μπαταρίας και αντιστοιχεί στις υψηλότερες συχνότητες. Όπως είναι φανερό, στην περιοχή αυτή το μέτρο του φανταστικού μέρους της εμπέδησης αυξάνεται ραγδαία, ενώ το πραγματικό μέρος μένει σχετικά σταθερό.
- Στο σημείο τομής του διαγράμματος με τον άξονα των πραγματικών αριθμών αναπαρίσταται η ωμική αντίσταση της μπαταρίας, όπως ξεκάθαρα φαίνεται από τον τύπο (1), όταν μηδενίσουμε το φανταστικό μέρος.
- Το αμέσως επόμενο κομμάτι του διαγράμματος σχετίζεται με την συμπαγή διεπαφή ηλεκτρολύτη (Solid Electrolyte Interface – SEI) με το ηλεκτρόδιο γραφίτη της μπαταρίας λιθίου.
- Έπειτα, στην περιοχή της καμπύλης αναπαρίστανται τα χωρητικά φαινόμενα διπλής στρώσης που εμφανίζονται μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων. Ταυτόχρονα, στην ίδια περιοχή αποτυπώνεται η αντίσταση μεταφοράς φορτίου στα ηλεκτρόδια. Μερικές φορές, στην ίδια περιοχή αποτυπώνεται η εμπέδηση πυκνότητας των ηλεκτροδίων. Η εμπέδηση αυτή σχετίζεται με φαινόμενα μεταφοράς φορτίων μέσω των ενεργών υλικών.

- Τέλος, στις χαμηλότερες συχνότητες, αναπαρίσταται η περιοχή της διάχυσης.

Φυσικά, πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι οι πέντε αυτές διακριτές περιοχές δεν εμφανίζονται απαραίτητα με τόσο διακριτό τρόπο στα πραγματικά πειράματα.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ο ακριβής προσδιορισμός των φαινομένων γήρανσης στην μπαταρία, ενώ τα μειονεκτήματά της είναι ότι απαιτεί μεγάλο χρονικό διάστημα για να πραγματοποιηθούν οι μετρήσεις σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και ότι χρειάζεται σχετικά σταθερό εργαστηριακό περιβάλλον, προκειμένου να μειωθεί ο θόρυβος.

2.3.1.3 Επίπεδα ενέργειας της μπαταρίας

Η χωρητικότητα είναι ένα μέγεθος το οποίο μειώνεται σημαντικά με την γήρανση της μπαταρίας. Επομένως η μείωση χωρητικότητά της είναι επίσης καλός δείκτης για την κατάσταση υγείας της μπαταρίας, καθώς καταδεικνύει την συνολική μείωση ενέργειας που μπορεί μία μπαταρία να αποθηκεύσει. Ένας τρόπος να μετρηθεί η χωρητικότητα είναι η πραγματοποίηση πολλών κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης μέχρις ότου η μπαταρία αχρηστευτεί. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί η σχέση μεταξύ της χωρητικότητας της μπαταρίας και της τάσης των ακροδεκτών της. Όμως αυτή η μέθοδος μπορεί να δώσει στοιχεία κατά την διάρκεια λειτουργίας μια μπαταρίας.

2.3.2 Μέθοδοι μοντελοποίησης

Λόγω της δυσκολίας παρακολούθησης και καταγραφής των περίπλοκων ηλεκτροχημικών διαδικασιών που συμβαίνουν στις μπαταρίες και τα στοιχεία δημιουργήθηκε η ανάγκη ανάπτυξης ισοδύναμων μοντέλων. Τα μοντέλα αυτά συνήθως βασίζονται στις μεταβλητές εκείνες που είναι εύκολο να μετρηθούν, όπως για παράδειγμα η τάση, το ρεύμα, η εσωτερική αντίσταση της μπαταρίας, η θερμοκρασία της μπαταρίας και του περιβάλλοντος λειτουργίας και ο χρόνος λειτουργίας. Μέσω αυτών των μεθόδων μπορούν να αποφευχθούν ο θόρυβος στις

μετρήσεις, τα σφάλματα λόγω της απρόβλεπτης συμπεριφοράς των μπαταριών και επομένως να παραχθούν ακριβή συμπεράσματα για την υγεία της μπαταρίας.

2.3.2.1 Φίλτρα Kalman

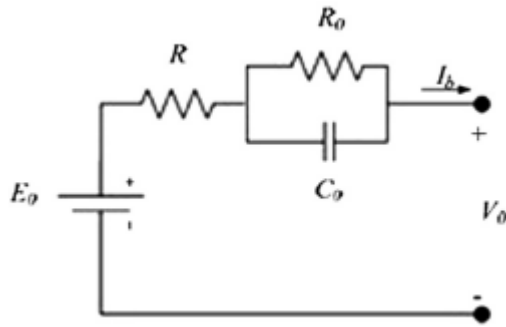
Μία κοινή βάση για την δημιουργία μοντέλων για την επισκόπηση της κατάστασης υγείας των μπαταριών είναι τα προσαρμοστικά φίλτρα. Πολλοί διαφορετικοί προσαρμοστικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστούν σε πραγματικό χρόνο παράμετροι διαφορετικών ισοδύναμων κυκλωμάτων μπαταριών. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να προσδιοριστεί τόσο η κατάσταση υγείας της μπαταρίας, όσο και η κατάσταση φόρτισής της. Ειδικά τα μοντέλα που βασίζονται στα φίλτρα Kalman τυγχάνουν ευρείας αποδοχής. Παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου βρίσκεται στην αναφορά [13], όπου χρησιμοποιείται αλγόριθμος Kalman προκειμένου να προσδιοριστεί η εσωτερική αντίσταση και η κατάσταση υγείας της μπαταρίας.

2.3.2.2 Φίλτρα ελαχίστων τετραγώνων

Όπως και με τα φίλτρα Kalman, έτσι και εδώ υπάρχουν πολλοί προσαρμοστικοί αλγόριθμοι που βασίζονται στα φίλτρα ελαχίστων τετραγώνων. Οι αλγόριθμοι αυτοί εξασφαλίζουν ακρίβεια, ενώ η εφαρμογή τους είναι αρκετά εύκολη. Ιδιαίτερη αξία έχει η αναφορά στον αλγόριθμο Αναδρομικών Ελαχίστων Τετραγώνων (Recursive Least Square – RLS), ο οποίος μπορεί να δώσει μία ακριβή εκτίμηση παραμέτρων που συνδέονται με τις καταστάσεις της μπαταρίας.

2.3.2.3 Μοντέλο Thevenin

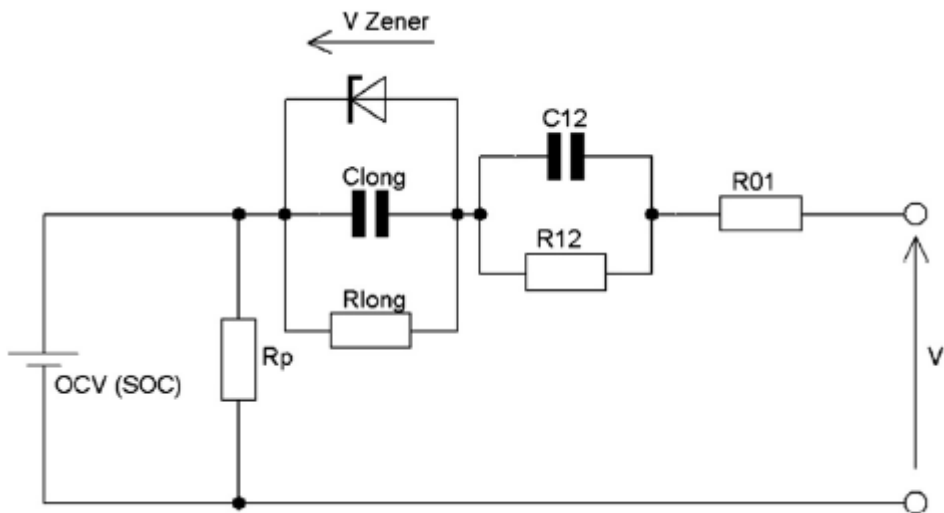
Το μοντέλο Thevenin δημιουργήθηκε προκειμένου να υπάρξει ένα σχετικά απλό ηλεκτρικό κύκλωμα που να προσομοιώνει την δυναμική συμπεριφορά των μπαταριών. Το μοντέλο αυτό παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :



Σχήμα 9: Κύκλωμα μοντέλου Thevenin[14]

Όπως φαίνεται και από το σχήμα 9, το μοντέλο Thevenin περιλαμβάνει μία ωμική αντίσταση R σε σειρά με έναν πυκνωτή που βρίσκεται παράλληλα σε μία δεύτερη αντίσταση, ενώ θεωρεί την τάση ανοιχτού κυκλώματος E_0 σταθερή. Το παραπάνω κύκλωμα είναι ικανό να προβλέψει την μεταβατική κατάσταση της μπαταρίας σε περίπτωση αλλαγής στο φορτίο, και επομένως επιτρέπει την περιγραφή ορισμένων δυναμικών συνθηκών.

Όμως το παραπάνω απλοποιημένο μοντέλο παρουσιάζει αρκετά μειονεκτήματα, καθώς δεν είναι σε θέση να περιγράψει με ακρίβεια πιο σύνθετες λειτουργίες της μπαταρίας. Για αυτό τον λόγο αργότερα προτάθηκε μία βελτιωμένη έκδοση του κυκλώματος, η οποία παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα :

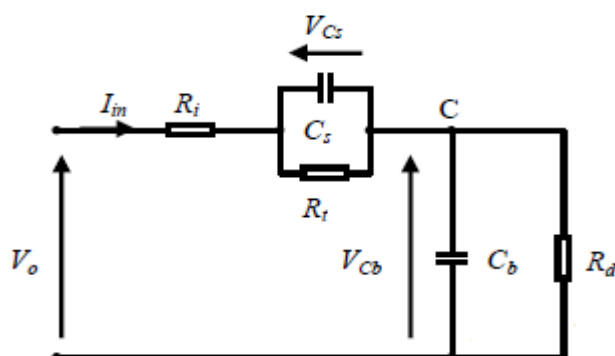


Σχήμα 10: Βελτιωμένο κύκλωμα μοντέλου Thevenin[14]

Η βελτιωμένη έκδοση του κυκλώματος φαίνεται να αναπαριστά καλύτερα τα μεταβατικά φαινόμενα και βοηθάει σημαντικά στον προσδιορισμό παραμέτρων όπως η εσωτερική αντίσταση.

2.3.2.4 Μοντέλο Randles

Πάρα πολύ διαδεδομένο είναι το κυκλωματικό μοντέλο του Randles που εμφανίζεται στο παρακάτω σχήμα. Το μοντέλο αυτό, που αναπτύχθηκε πρώτη φορά το 1947, αποτυπώνει με μεγάλη ακρίβεια τις ηλεκτροχημικές διαδικασίες του στοιχείου και μπορεί να δώσει μια πολύ καλή προσέγγιση για την κατάσταση υγείας και την εμπέδηση των μπαταριών.



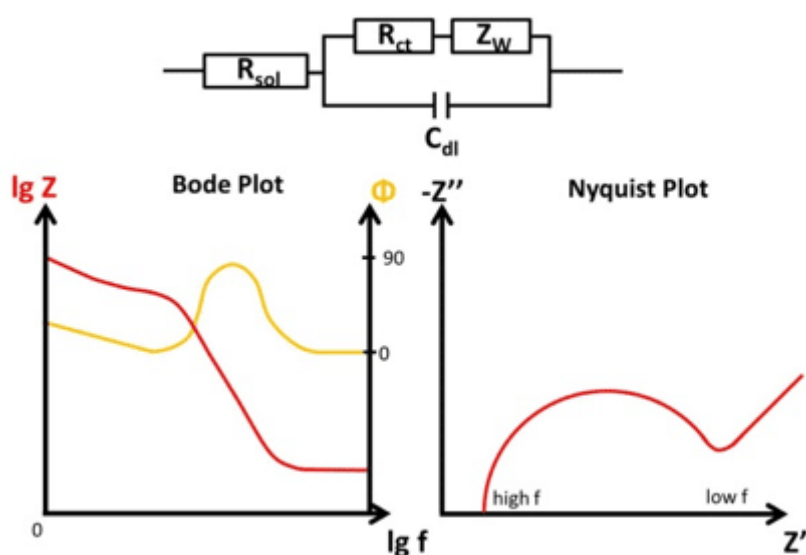
Σχήμα 11: Ισοδύναμο κύκλωμα Randles [17]

Το ισοδύναμο αυτό μοντέλο αποτελείται από τα παρακάτω στοιχεία :

- Την ωμική αντίσταση R_d , που προσομοιώνει την αυτοεκφόρτιση της μπαταρίας.
- Τον πυκνωτή C_b , που έχει τον ρόλο της αποθήκευσης του κυρίως φορτίου της μπαταρίας.
- Μία αντίσταση R_t , συνδεδεμένη παράλληλα με έναν πυκνωτή C_s που προσομοιώνουν παροδικές επιδράσεις που οφείλονται στην μετακίνηση ιόντων στον ηλεκτρολύτη.
- Μία αντίσταση R_i , που αναπαριστά την εσωτερική αντίσταση των ακροδεκτών της μπαταρίας.

Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσομοιώσει διάφορες καταστάσεις λειτουργίας και υγείας της μπαταρίας, αφού για παράδειγμα η τάση στους ακροδέκτες του πυκνωτή C_b μπορεί να θεωρηθεί ένας καλός δείκτης για την κατάσταση φόρτισης. Ταυτόχρονα, επειδή ακριβώς ο πυκνωτής C_b αναπαριστά την χωρητικότητα της μπαταρίας, μια μείωση της τιμής του θα μπορούσε να ερμηνευθεί ως μεταβολή στην κατάσταση υγείας της μπαταρίας.

Στην ηλεκτροχημική φασματοσκοπία εμπέδησης, χρησιμοποιείται πολύ το συγκεκριμένο μοντέλο, καθώς παρουσιάζει μια καλή προσέγγιση της πραγματικής εμπέδησης. Συνήθως, στο μοντέλο προστίθεται σε σειρά με την αντίσταση R_e η σύνθετη αντίσταση Warburg. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων που δίνει το συγκεκριμένο μοντέλο.



Σχήμα 12: Μετρήσεις ισοδύναμου κυκλώματος Randles [15]

2.3.3 Μέθοδοι μηχανικής μάθησης

Αυτές οι μέθοδοι αποτελούν έναν συνδυασμό μεταξύ των πειραματικών μεθόδων και των μοντέλων. Οι αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης εκπαιδεύονται

χρησιμοποιώντας δεδομένα και μετρήσεις από τις πειραματικές μεθόδους και τα κυκλωματικά μοντέλα.

2.3.3.1 Μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης (Support Vector Machine – SVM)

Οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης αποτελούν μία μέθοδο μηχανικής μάθησης που βρίσκει κυρίως εφαρμογή σε δυαδικά προβλήματα ταξινόμησης και αναδρομής. Η βασική ιδέα είναι πως δεδομένου ενός δείγματος εκπαίδευσης, η μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης κατασκευάζει ένα υπερεπίπεδο ως επιφάνεια απόφασης με τρόπο ώστε το περιθώριο διαχωρισμού μεταξύ θετικών και αρνητικών παραδειγμάτων να μεγιστοποιείται.

Στην περίπτωση μη γραμμικών διαχωρίσιμων προτύπων, τα άγνωστα σημεία του συνόλου εκπαίδευσης ταξινομούνται σύμφωνα με την πλευρά του υπερεπιπέδου στην οποία βρίσκονται.

Για παράδειγμα, έστω δείγμα N σημείων $\{x_k, y_k\}$ με διανύσματα εισόδου $x_k \in \mathbb{R}^n$ και τιμές εξόδου $y_k \in \mathbb{R}^n$. Τότε ο σκοπός είναι να εκτιμηθεί το μοντέλο της μορφής :

$$y = w^T \cdot \beta(x) + s$$

,όπου $\beta(x)$ είναι η αντιστοίχιση σε ένα υπερεπίπεδο, το w είναι ένα προσαρμόσιμο διάνυσμα βαρών και s είναι μία πόλωση.

Στις περιπτώσεις εφαρμογής των παραπάνω στα συστήματα ελέγχου και επιτήρησης των μπαταριών, είναι σημαντικός ο τρόπος που θα διατυπωθούν οι παράμετροι των μπαταριών στους παραπάνω τύπους. Για παράδειγμα, για να χρησιμοποιηθεί η μηχανή διανυσμάτων υποστήριξης για την εκτίμηση της κατάστασης φόρτισης μιας μπαταρίας πρέπει να μοντελοποιηθούν τα μη γραμμικά δυναμικά χαρακτηριστικά της μπαταρίας κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση.

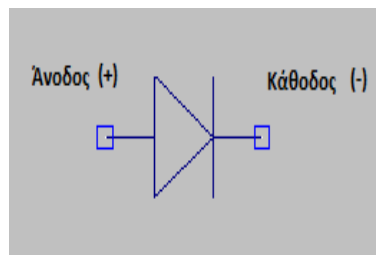
2.3.3.2 Αλγόριθμοι ασαφούς λογικής

Οι αλγόριθμοι ασαφούς λογικής είναι ικανοί να δώσουν σαφή συμπεράσματα από ένα σύνολο περίπλοκων ή μη απόλυτα καθορισμένων δεδομένων εισόδου. Επιπλέον, η μέθοδος των συνόλων ασαφούς λογικής είναι ικανή να κατηγοριοποιήσει σε ασαφή σύνολα όπως “ Φορτισμένη μπαταρία “ και “Αφόρτιστη μπαταρία “ συγκεκριμένες τιμές και παραμέτρους , όπως για παράδειγμα την SoC = 40%. Επομένως, λειτουργώντας αφαιρετικά, οι αλγόριθμοι ασαφούς λογικής που τροφοδοτούνται από δεδομένα πειραματικών μετρήσεων και πραγματικών εφαρμογών μπορούν να οδηγήσουν σε ακριβείς εκτιμήσεις σημαντικών παραμέτρων των μπαταριών.

3 Ηλεκτρονικά ισχύος

3.1 Δίοδος ισχύος

Η δίοδος αποτελεί ένα από τα απλούστερα και πιο σημαντικά μη γραμμικά ημιαγωγικά κυκλωματικά στοιχεία. Είναι ένα στοιχείο δύο στρωμάτων, ενός στρώματος τύπου n και ενός στρώματος τύπου p . Αποτελείται από δύο ακροδέκτες, την άνοδο και την κάθοδο. Βρίσκει εφαρμογή σε αναρίθμητα κυκλώματα, μεταξύ των οποίων οι παράλληλοι σταθεροποιητές τάσης, οι αντιστροφείς ισχύος (DC–AC) και οι μη ελεγχόμενοι ανορθωτές (AC– DC). Το κυκλωματικό της σύμβολο παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα.



Σχήμα 13: Κυκλωματικό σύμβολο διόδου του προγράμματος LTSpice

3.1.1 Χαρακτηριστική ρεύματος – τάσης

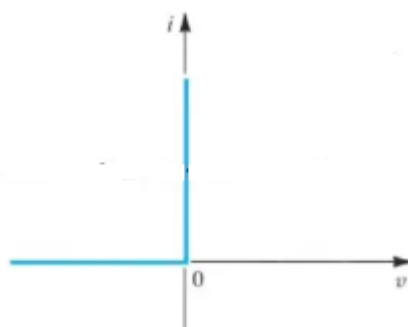
3.1.1.1 Ιδανική δίοδος

Η ιδανική δίοδος χαρακτηρίζεται από δύο καταστάσεις λειτουργίας : την κατάσταση αγωγής όπου και συμπεριφέρεται ως βραχυκύκλωμα, και την κατάσταση αποκοπής, όπου συμπεριφέρεται ως ανοιχτός διακόπτης.

Όταν βρίσκεται στην κατάσταση αγωγής, η δίοδος είναι ορθά πολωμένη. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο έρχεται από την άνοδο και φεύγει από την κάθοδο της διόδου. Αν η δίοδος είναι ιδανική, οι δύο ακροδέκτες της

θεωρούνται βραχυκυκλωμένοι, και επομένως η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου είναι μηδενική.

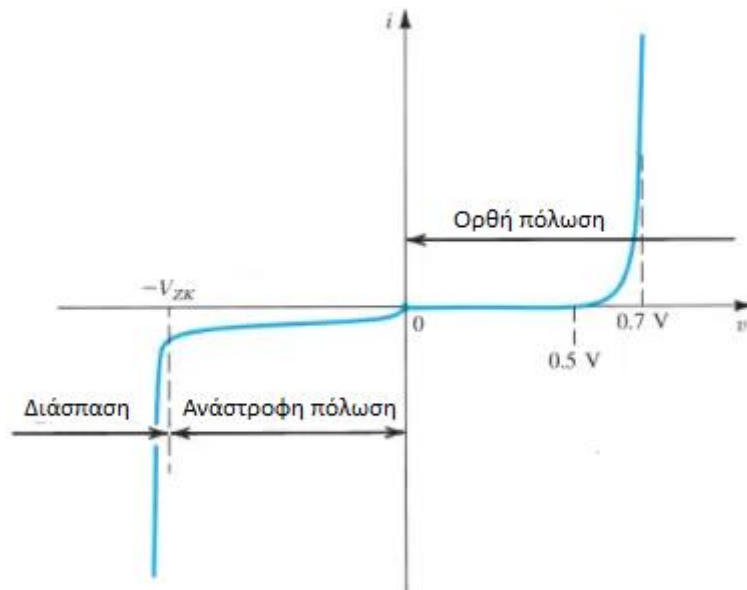
Όταν βρίσκεται στην κατάσταση αποκοπής, η διόδος είναι ανάστροφα πολωμένη. Αυτό σημαίνει πως η τάση του ακροδέκτη της ανόδου είναι μικρότερη από αυτήν της καθόδου. Αν η διόδος είναι ιδανική, το ρεύμα που την διαπερνάει είναι μηδενικό και άρα συμπεριφέρεται ως ανοιχτό κύκλωμα.



Σχήμα 14: Χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης ιδανικής διόδου[16]

3.1.1.2 Πραγματική διόδος

Στην πραγματικότητα, καμία διόδος δεν μπορεί να παρουσιάσει ακριβώς την χαρακτηριστική ρεύματος τάσης του σχήματος 11. Η πραγματική χαρακτηριστική παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα, από όπου προκύπτουν ορισμένα πολύ χρήσιμα συμπεράσματα :



Σχήμα 15: Χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης πραγματικής διόδου[16]

Αρχικά, φαίνεται πως στην ορθή πόλωση η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου δεν είναι μηδενική. Αντιθέτως, η αγωγή δεν ξεκινάει παρά μόνο όταν η πτώση τάσης μεταξύ ανόδου και καθόδου φτάσει μία μικρή θετική τιμή, συνήθως γύρω στα 0.5V. Η τάση αυτή ονομάζεται τάση έναρξης αγωγής. Όταν η πτώση τάσης στους ακροδέκτες της διόδου ξεπεράσει την τάση αγωγής, τότε αρχίζει να άγεται το ρεύμα. Σημαντικό είναι το γεγονός πως η πτώση τάσης περιορίζεται σε μία τιμή κοντά στα 0.7V . Επομένως στις πραγματικές διόδους σε κατάσταση αγωγής, πάντα θεωρείται ότι υπάρχει μία πτώση τάσης από την άνοδο στην κάθοδο, της οποίας η τιμή συνήθως προσεγγιστικά είναι 0.7V.

Αντίστοιχα στην ανάστροφη πόλωση φαίνεται πως το ρεύμα που διαρρέει την δίοδο δεν είναι μηδενικό, αλλά εξαιρετικά πολύ μικρό. Το ρεύμα αυτό ονομάζεται ρεύμα κορεσμού και συνήθως είναι της τάξης των nA. Το ρεύμα κορεσμού εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της διόδου, καθώς και από την θερμοκρασία.

Στο σχήμα, εκτός από τις δύο περιοχές της ορθής και της ανάστροφης πόλωσης, εμφανίζεται και μία τρίτη περιοχή, η περιοχή διάσπασης. Όταν η πτώση τάσης σε μία ανάστροφα πολωμένη δίοδο φτάσει μία συγκεκριμένη τάση κατωφλίου, την τάση διάσπασης V_{ZK} , τότε ξεκινά πάλι να άγει. Αυτή την φορά ωστόσο

το ρεύμα έχει ανάστροφη φορά, καθώς εισέρχεται από την κάθοδο και εξέρχεται από την άνοδο της διόδου. Η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου στην περιοχή διάσπασης παραμένει σχετικά σταθερή.

Αυτή η πολύ σημαντική ιδιότητα των διόδων αξιοποιείται σε κυκλώματα σταθεροποίησης τάσης, όπου ανεξαρτήτως του ρεύματος που διέρχεται από την διόδο, η τάση στα άκρα της παραμένει σταθερή και ίση με την τάση διάσπασης.

3.1.2 Δίοδοι Zener

Οι δίοδοι Zener ή δίοδοι διάσπασης κατασκευάζονται έτσι ώστε να λειτουργούν στην περιοχή διάσπασης. Σε αντίθεση με τις κοινές διόδους, το ρεύμα στην διόδο Zener ρέει από την κάθοδο προς την άνοδο, ενώ προφανώς η τάση της καθόδου είναι υψηλότερη από εκείνη της ανόδου. Η χαρακτηριστική ρεύματος τάσης είναι όμοια με αυτή του σχήματος 12. Στις διόδους Zener η τάση διάσπασης V_{zk} αντιστοιχεί σε μία συγκεκριμένη τιμή ρεύματος I_z . Αν η τιμή του ρεύματος μεταβληθεί, έστω κατά ΔI , τότε αποδεικνύεται πως η πτώση τάσης στα άκρα της διόδου Zener θα μεταβληθεί κατά :

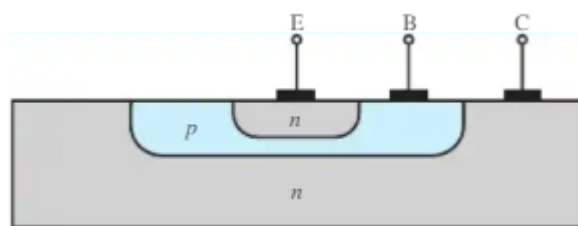
$$\Delta V = r_z \cdot \Delta I_z$$

,όπου r_z η δυναμική αντίσταση της Zener. Η αντίσταση αυτή αλλάζει σημαντικά ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας της διόδου. Συνήθως η τιμή της είναι μικρή, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται όσο το δυνατόν καλύτερα η σταθερότητα της πτώσης τάσης στα άκρα της διόδου. Αυτός είναι και ο λόγος που οι δίοδοι Zener χρησιμοποιούνται κατά κόρον σε κυκλώματα παράλληλων σταθεροποιητών τάσης.

3.2 Διπολικό τρανζίστορ – Bipolar Junction Transistor (BJT)

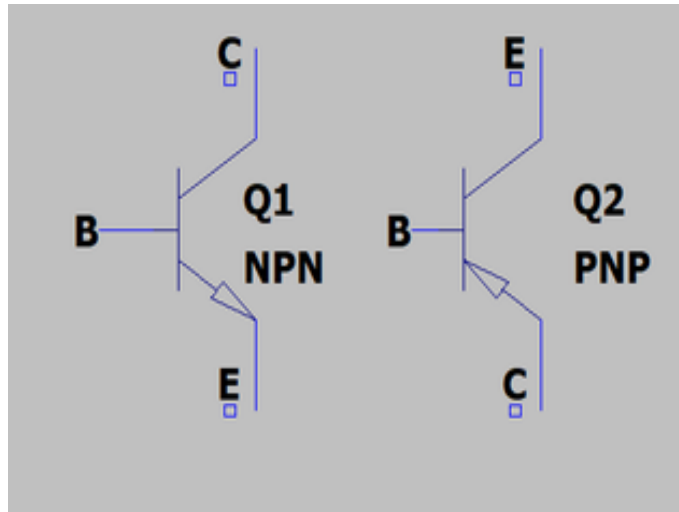
Το διπολικό τρανζίστορ ή τρανζίστορ επαφής BJT ιστορικά ήταν ο πρώτος ημιαγωγός που χρησιμοποιήθηκε σαν στοιχείο ενίσχυσης. Η εφεύρεσή του έφερε την μετάβαση από την εποχή των λυχνιών κενού στην εποχή των τρανζίστορ και σηματοδότησε την αρχή μιας τεχνολογικής επανάστασης.

Κάθε διπολικό τρανζίστορ αποτελείται από τρεις περιοχές ημιαγωγικών υλικών. Αναλόγως του τύπου των υλικών αυτών, τα διπολικά τρανζίστορ χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Τα τρανζίστορ που αποτελούνται από μία περιοχή p-τύπου η οποία βρίσκεται ανάμεσα από δύο περιοχές n-τύπου ονομάζονται npn τρανζίστορ. Αντίστοιχα, τα τρανζίστορ pnp αποτελούνται από δύο περιοχές p-τύπου που περιβάλλουν μία n-τύπου. Κάθε μία από αυτές τις περιοχές συνδέεται με έναν ακροδέκτη : τον εκπομπό (emitter) E, τη βάση (base) B και τον συλλέκτη (collector) C. Στο παρακάτω σχήματα παρουσιάζονται μια απλοποιημένη απεικόνιση της δομής ενός διπολικού τρανζίστορ npn.



Σχήμα 16: Δομή ενός npn BJT τρανζίστορ[16]

Το κυκλωματικό σύμβολο και των δύο κατηγοριών BJT παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 17: Κυκλωματικά σύμβολα BJT τρανζίστορ προγράμματος LTSpice

3.2.1 Περιοχές λειτουργίας

Κάθε διπολικό τρανζίστορ διαθέτει δύο ενώσεις pn. Η πρώτη είναι αυτής της βάσης και του εκπομπού BE για τα npn (αντίστοιχα εκπομπού βάσης EB για τα pnp) και η δεύτερη της βάσης και του συλλέκτη BC (συλλέκτη βάσης CB για τα pnp). Αναλόγως της πόλωσης που εφαρμόζεται σε αυτές τις ενώσεις, το τρανζίστορ μπορεί να βρεθεί σε τρεις περιοχές λειτουργίας : στην ενεργό περιοχή, στην περιοχή αποκοπής και στην περιοχή κορεσμού.

3.2.1.1 Ενεργός περιοχή λειτουργίας

Τα διπολικά τρανζίστορ που βρίσκονται στην ενεργό περιοχή λειτουργίας χρησιμοποιούνται ως ενισχυτές. Για να βρεθεί το τρανζίστορ στην ενεργό περιοχή, πρέπει η ένωση BE να είναι ορθά πολωμένη (δηλαδή το δυναμικό της περιοχής τύπου p να είναι υψηλότερο από το δυναμικό της περιοχής τύπου n) και η ένωση CB να είναι ανάστροφα πολωμένη. Η αρχή αυτή ισχύει και για τα δύο είδη των διπολικών τρανζίστορ. Το μόνο που αλλάζει είναι η φορά των ρευμάτων και οι πολικότητες μεταξύ των ακροδεκτών.

Συμβολίζοντας ως I_C το ρεύμα που διέρχεται από τον ακροδέκτη του συλλέκτη, I_B το ρεύμα που διέρχεται από τον ακροδέκτη της βάσης και ως I_E το ρεύμα που διέρχεται από τον ακροδέκτη του εκπομπού, στην ενεργό περιοχή λειτουργίας ισχύει η παρακάτω σχέση :

$$I_E = I_B + I_C$$

Το κέρδος ρεύματος κοινού εκπομπού β ορίζεται ως :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Το ρεύμα βάσης I_B είναι πολύ μικρότερο από το ρεύμα του συλλέκτη I_C . Επομένως, η τιμή του κέρδους κοινού εκπομπού κυμαίνεται σε σχετικά ψηλές τιμές. Συγκεκριμένα το β έχει μια τιμή που συνήθως βρίσκεται μεταξύ 10 – 200. Οι τιμές των ρευμάτων είναι μεταβάλλονται εκθετικά ανάλογα της τάσης μεταξύ των ακροδεκτών βάσης και εκπομπού V_{BE} .

3.2.1.2 Περιοχή κορεσμού

Τα διπολικά τρανζίστορ που χρησιμοποιούνται ως διακόπτες λειτουργούν στις περιοχές κορεσμού και αποκοπής. Προκειμένου να βρεθεί ένα τρανζίστορ στην περιοχή κορεσμού θα πρέπει και οι δύο ενώσεις pn να είναι ορθά πολωμένες. Τότε το τρανζίστορ θεωρείται πως λειτουργεί σαν κλειστός διακόπτης, δηλαδή βρίσκεται στην κατάσταση ON.

Στην περιοχή κορεσμού, το ρεύμα του συλλέκτη μειώνεται ενώ αντίστοιχα το ρεύμα βάσης αυξάνεται. Ο λόγος των ρευμάτων αυτών μειώνεται με την αύξηση της τάσης μεταξύ βάσης και συλλέκτη και είναι πάντα μικρότερος ή το πολύ ίσος από το κέρδος ρεύματος κοινού εκπομπού β που ορίστηκε προηγουμένως. Το νέο αυτό

β_{forced} , που ονομάζεται επιβαλλόμενο β , ορίζεται από την παρακάτω σχέση, όταν το τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή κορεσμού :

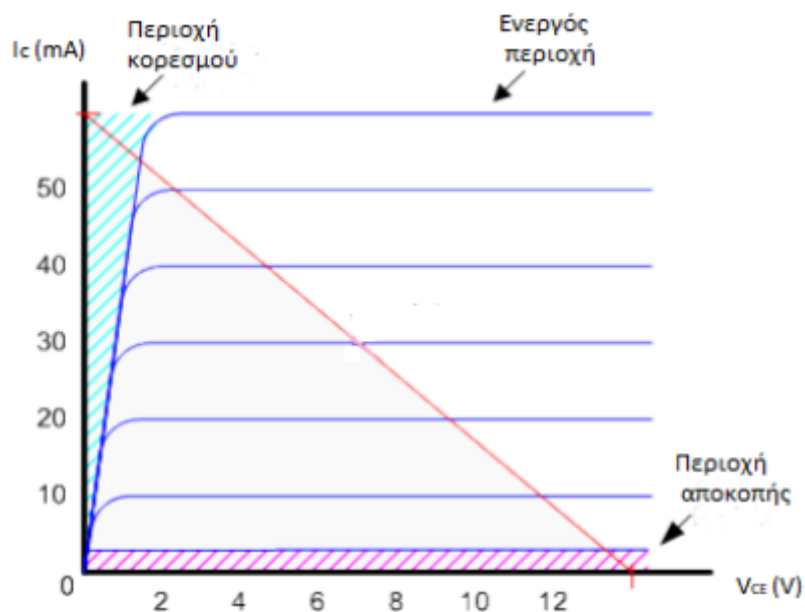
$$\beta_{\text{forced}} = \frac{I_C}{I_B}$$

3.2.1.3 Περιοχή αποκοπής

Ένα διπολικό τρανζίστορ βρίσκεται στην περιοχή αποκοπής του όταν και οι δύο ενώσεις r_n του είναι ανάστροφα πολωμένες. Σε αυτή την περίπτωση δεν υπάρχει ροή ρεύματος και το τρανζίστορ λειτουργεί σαν ανοιχτός διακόπτης, δηλαδή βρίσκεται στην κατάσταση OFF.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η χαρακτηριστική $I_C - V_{CE}$ ενός διπολικού τρανζίστορ, στην οποία αποτυπώνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας.

Χαρακτηριστικό είναι πως στο διπολικό τρανζίστορ το ρεύμα βάσης είναι αυτό που ελέγχει την ροή του ρεύματος στον συλλέκτη και επομένως την κατάσταση αγωγής του τρανζίστορ. Για αυτό το λόγο, το τρανζίστορ BJT ονομάζεται και ημιαγωγός ρεύματος.



Σχήμα 18: Χαρακτηριστική ρεύματος- τάσης διπολικού τρανζίστορ για διάφορες τιμές ρεύματος βάσης I_B [1]

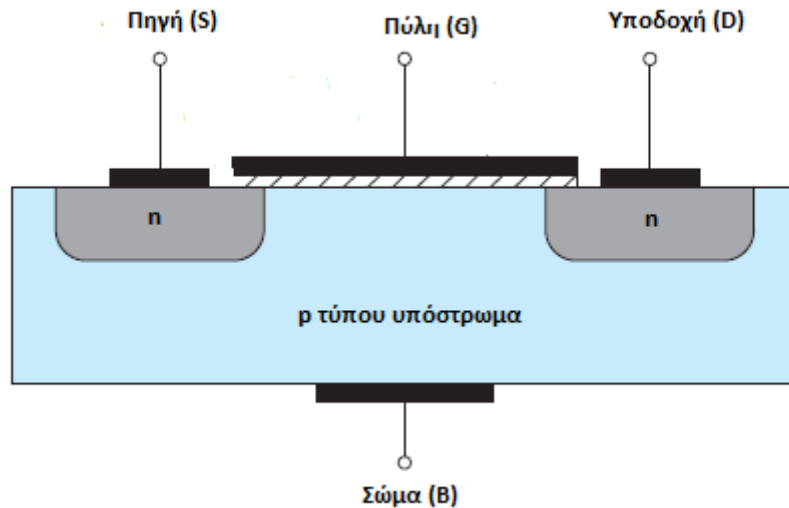
3.3 Τρανζίστορ επίδρασης πεδίου – MOSFET

Το τρανζίστορ επίδρασης πεδίου μετάλλου-οξειδίου-ημιαγωγού (metal oxide semiconductor field effect transistor – MOSFET), αποτελεί σήμερα το δημοφιλέστερο ηλεκτρονικό στοιχείο. Σε σχέση με το BJT, τα MOSFET μπορούν να έχουν πολύ μικρότερο μέγεθος, απαιτούν λιγότερη ισχύ για την λειτουργία τους και η διαδικασία κατασκευής τους είναι αρκετά απλή.

Όπως και με τα BJT, τα MOSFET χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες : τα MOSFET πύκνωσης n καναλιού (nMOS) και τα MOSFET πύκνωσης p καναλιού (pMOS). Τα nMOS είναι τα δημοφιλέστερα εκ των δύο και για αυτό η δική τους δομή θα αναλυθεί παρακάτω. Άλλωστε, η δομή των pMOS είναι παρόμοια.

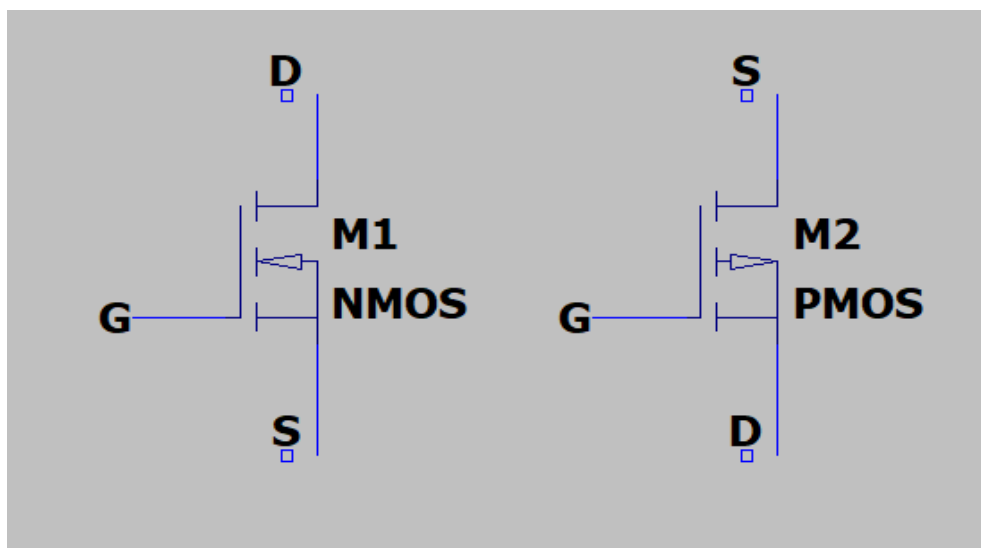
Ένα nMOS αποτελείται από ένα μεγάλο υπόστρωμα μονοκρυσταλλικού πυριτίου p τύπου και δύο περιοχές υψηλής νόθευσης n τύπου. Στην επιφάνεια ανάμεσα από τις δύο αυτές περιοχές τοποθετείται ένα λεπτό στρώμα διοξειδίου του πυριτίου, που παρουσιάζει πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες. Στο στρώμα τοποθετείται μια μεταλλική επιφάνεια και ένας ακροδέκτης, ο ακροδέκτης πύλης (Gate) G. Αντίστοιχα, στις δύο περιοχές νόθευσης τοποθετούνται δύο ακροδέκτες, ο ακροδέκτης πηγής (Source) S και ο ακροδέκτης υποδοχής (Drain) D. Τέλος, μερικές φορές, μπορεί να υπάρξει ακόμα ένας ακροδέκτης στο υπόστρωμα τύπου p, ο ακροδέκτης σώματος (Body) B, του οποίου όμως η επίδραση πολλές φορές θεωρείται αμελητέα και για αυτό δεν λαμβάνεται υπόψιν.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται απλοποιημένη η δομή ενός nMOS, όπου διακρίνονται οι τέσσερις ακροδέκτες, η περιοχή υποστρώματος τύπου p και οι περιοχές νόθευσης n.



Σχήμα 19: Δομή ενός nMOS[16]

Τα κυκλωματικά σύμβολα των MOSFET, παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 20: Κυκλωματικά σύμβολα των MOSFET στο πρόγραμμα LTSpice

3.3.1 Περιοχές λειτουργίας

Όπως και στο BJT, τα MOSFET χαρακτηρίζονται επίσης από τρεις περιοχές λειτουργίας : την περιοχή τριόδου, την περιοχή κορεσμού και την περιοχή αποκοπής. Παρακάτω θα γίνει ανάλυση της λειτουργίας των nMOS. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν τα pMOS.

3.3.1.1 Περιοχή κορεσμού

Τα MOSFET που λειτουργούν στην συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιούνται κυρίως ως ενισχυτές, ενώ παρουσιάζουν μη γραμμική συμπεριφορά. Για να μπορέσει να λειτουργήσει στην συγκεκριμένη περιοχή ένα nMOS, θα πρέπει η τάση της υποδοχής να είναι πολύ μεγαλύτερη από την τάση της πηγής, ούτως ώστε η u_{DS} να ξεπεράσει την τάση υπεροδήγησης V_{ov} , η οποία ορίζεται ως :

$$V_{ov} = u_{GS} - V_t$$

Όπου u_{GS} η τάση μεταξύ πύλης και πηγής, ενώ V_t ονομάζεται η τάση κατωφλίου του MOSFET και ορίζεται από τον κατασκευαστή.

Ισοδύναμα, για να βρεθεί το nMOS στη συγκεκριμένη περιοχή, θα πρέπει να ισχύει η σχέση :

$$u_{GD} < V_t$$

Δηλαδή η τάση μεταξύ πύλης και υποδοχής να είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου.

Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα που διασχίζει το nMOS παραμένει σχετικά σταθερό και η τιμή του εξαρτάται από την διαφορά τάσης μεταξύ πύλης και πηγής, ενώ η τάση μεταξύ υποδοχής και πηγής μπορεί να αυξάνεται.

3.3.1.2 Περιοχή τριόδου

Τα MOSFET που λειτουργούν στην συγκεκριμένη περιοχή χρησιμοποιούνται κυρίως ως διακόπτες και παρουσιάζουν σχετικά γραμμική συμπεριφορά.

Για να βρεθεί ένα nMOS στη συγκεκριμένη περιοχή λειτουργίας θα πρέπει η τάση της πύλης να είναι αρκετά μεγαλύτερη από την τάση της υποδοχής, ούτως ώστε η u_{GD} να ξεπεράσει την τάση κατωφλίου V_t , και επομένως να ισχύει :

$$u_{GD} > V_t$$

ή ισοδύναμα η τάση της υποδοχής με την τάση της πηγής να έχουν πολύ μικρή διαφορά, ούτως ώστε να ισχύει :

$$u_{DS} < V_{OV}$$

Στην περίπτωση αυτή, το MOSFET συμπεριφέρεται ως μικρή ωμική αντίσταση και επομένως το ρεύμα που διαρρέει την υποδοχή συνδέεται γραμμικά με την τάση στους ακροδέκτες υποδοχής και πηγής.

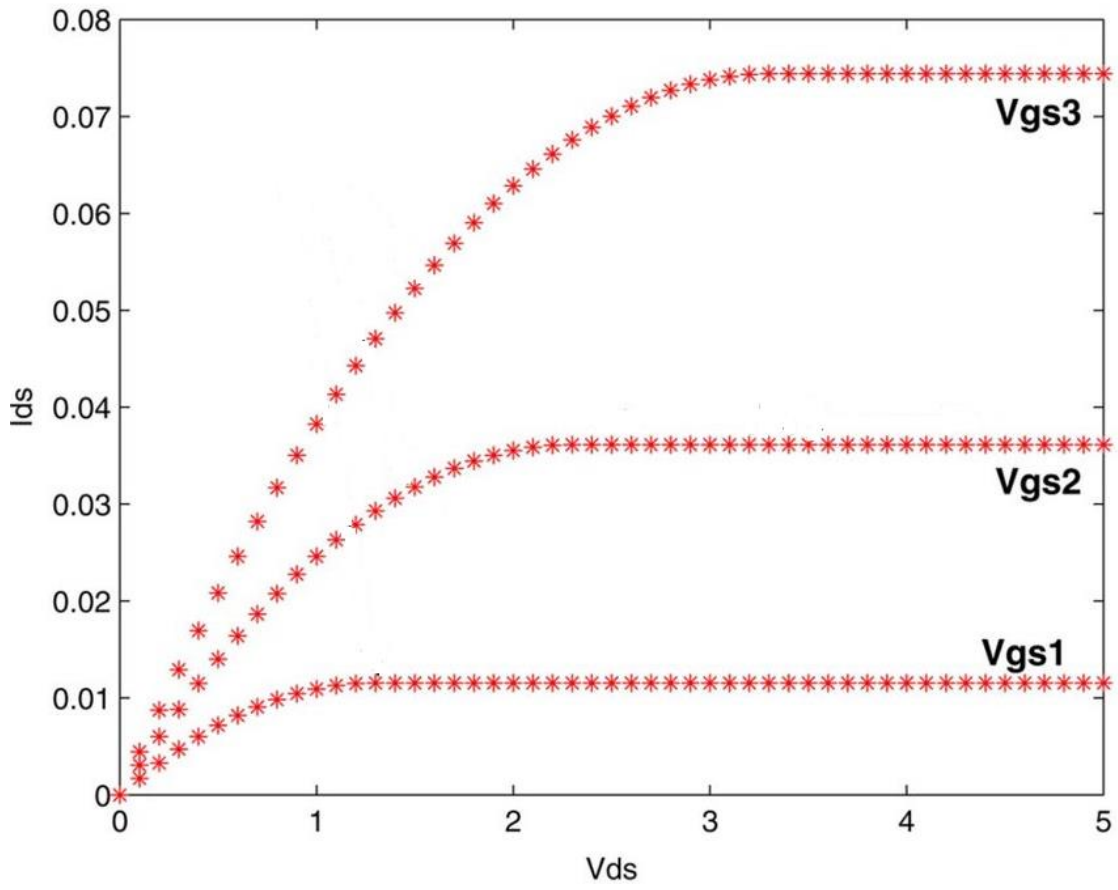
3.3.1.3 Περιοχή αποκοπής

Τα MOSFET σε αυτή την περιοχή λειτουργίας χρησιμοποιούνται ως ανοιχτοί διακόπτες. Έρχονται σε αυτή την κατάσταση όταν η διαφορά της τάσης πύλης και της τάσης πηγής είναι μικρότερη της τάσης κατωφλίου. Όταν συμβαίνει αυτό, το ρεύμα που διέρχεται από την υποδοχή είναι μηδενικό, δηλαδή $i_D = 0$ A.

Παρακάτω παρουσιάζεται η χαρακτηριστική του ρεύματος i_D που διασχίζει το nMOS και της διαφοράς τάσης μεταξύ των ακροδεκτών υποδοχής και πηγής. Στο διάγραμμα αυτό φαίνονται οι τρεις περιοχές λειτουργίας ενός nMOS, ενώ παράλληλα εξετάζεται η τιμή του ρεύματος υποδοχής για διαφορετικές τιμές της τάσης u_{GS} στη περιοχή κορεσμού.

Συγκεκριμένα, στο παρακάτω σχήμα ισχύει [17]:

$$u_{GS3} > u_{GS2} > u_{GS1}$$



Σχήμα 21: Χαρακτηριστική $i_{ds} - u_{ds}$ για ένα nMOS [17]

4 Πειραματικό κύκλωμα

Στόχος της προσομοίωσης είναι η ανάλυση της εμπέδησης ενός συσσωρευτή μέσω της ηλεκτροχημικής φασματοσκοπίας. Σκοπός του κυκλώματος είναι να φορτίζει και να εκφορτίζει τον συσσωρευτή με αυτόματο τρόπο. Παράλληλα, ανάμεσα στους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης για σύντομο χρονικό διάστημα η μπαταρία θα απομονώνεται και ένα ημιτονοειδές σήμα έντασης, συχνότητας από 0.01HZ έως 1MHZ, θα παράγεται και θα οδηγείται στον συσσωρευτή. Κατά την διάρκεια αυτού του χρονικού διαστήματος μετριέται η τάση στους ακροδέκτες της μπαταρίας και γίνεται ανάλυση των δεδομένων.

Θεωρήθηκε πως ο συσσωρευτής έχει ονομαστική τάση 14.5 V.

Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό ανάλυσης κυκλωμάτων LTSpice.

Η διάταξη που κατασκευάστηκε περιλαμβάνει :

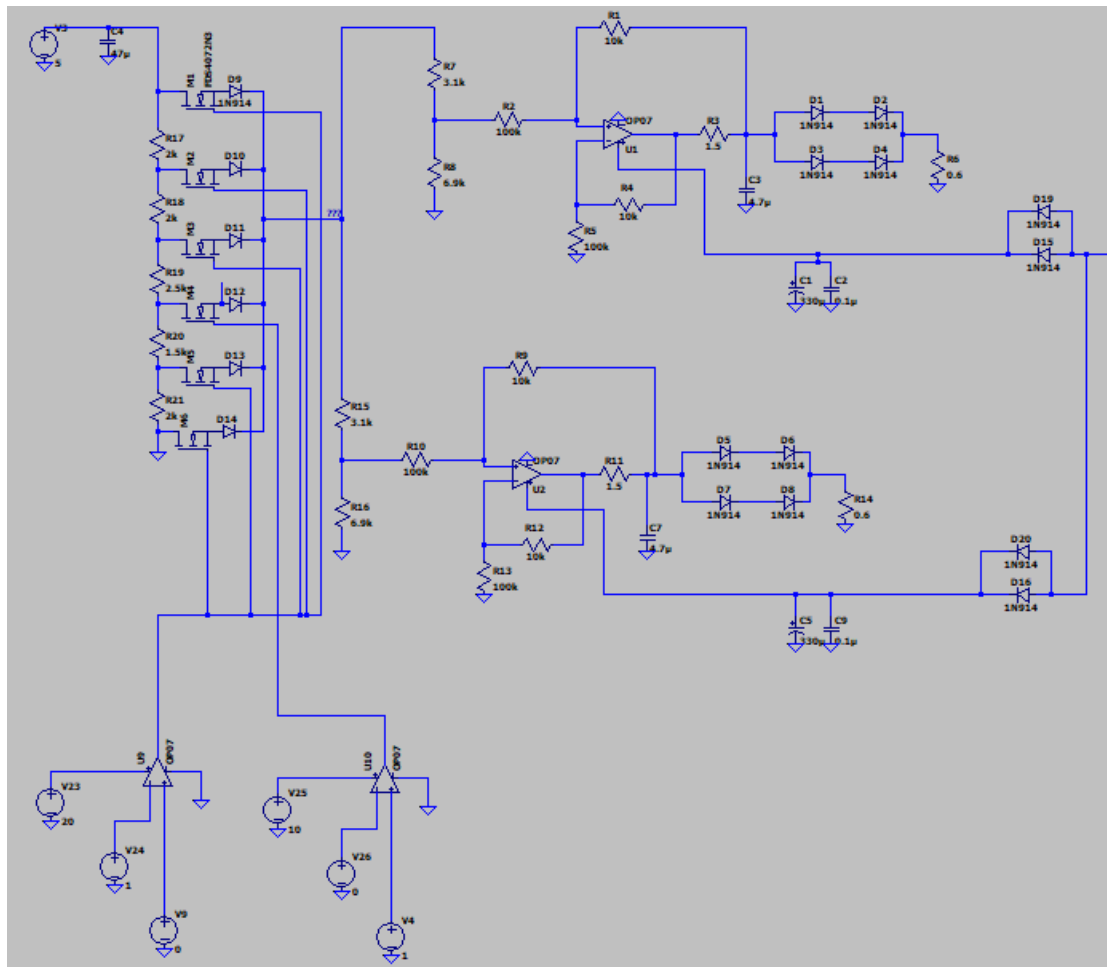
- Μοντέλο συσσωρευτή
- Κύκλωμα εκφόρτισης του συσσωρευτή
- Κύκλωμα φόρτισης συσσωρευτή
- Γεννήτρια παραγωγής σήματος
- Διατάξεις μέτρησης

4.1 Κύκλωμα εκφόρτισης του συσσωρευτή

Αρχικός στόχος ήταν να πραγματοποιείται εκφόρτιση του συσσωρευτή με δύο διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά ο συσσωρευτής θα εκφορτιζόταν με γρήγορο ρυθμό, ενώ μόλις η τάση στους ακροδέκτες του έπεφτε κάτω από μία τάση κατωφλίου, ο ρυθμός εκφόρτισης θα γινόταν αργός.

Η ένταση του ρεύματος κατά τους δύο ρυθμούς εκφόρτισης πρέπει να διατηρείται σταθερή, για αυτό και επιλέχθηκε λύση περιοριστή ρεύματος (current

limiter). Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το συνολικό κύκλωμα εκφόρτισης που συνδέεται μέσω διακόπτη με την μπαταρία :



Σχήμα 22: Κύκλωμα εκφόρτισης συσσωρευτή στο LTSpice

Ακολουθεί η ανάλυση των επιμέρους τμημάτων του κυκλώματος.

4.1.1 Ψηφιακό ποτενσιόμετρο

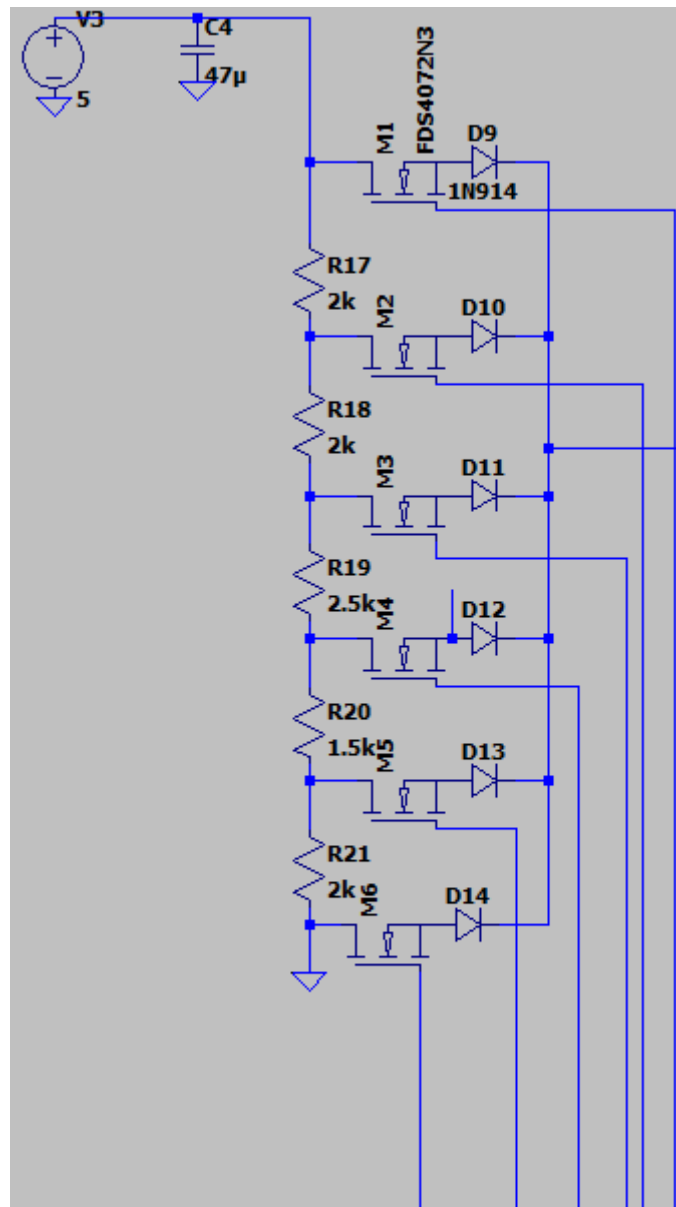
Το πρώτο κομμάτι του κυκλώματος εκφόρτισης από τα αριστερά είναι το ψηφιακό ποτενσιόμετρο. Αποτελείται από έναν ρυθμιστή τάσης με έξοδο 5V, ο οποίος εδώ αναπαρίσταται από ισοδύναμης τάσης πηγή και ένα σύνολο πέντε αντιστάσεων συνδεδεμένων σε σειρά. Ανάμεσα από τις αντιστάσεις αυτές βρίσκονται

λογικά Nmos, που λειτουργούν ως διακόπτες και των οποίων η τάση της πύλης ελέγχεται με την βοήθεια μικροελεγκτή.

Προκειμένου να ενισχυθεί το σήμα ελέγχου του εκάστοτε nMOS, τοποθετείται ανάμεσα στην θύρα εξόδου του μικροελεγκτή και τον ακροδέκτη πύλης του nMOS ένας ενισχυτής σήματος.

Η τιμή της αντίστασης στο ψηφιακό ποτενσιόμετρο ελέγχει τον ρυθμό εκφόρτισης του συσσωρευτή και τον προσαρμόζει στα επιθυμητά επίπεδα, αναλόγως της τάσης στους ακροδέκτες του.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται αναλυτικά :



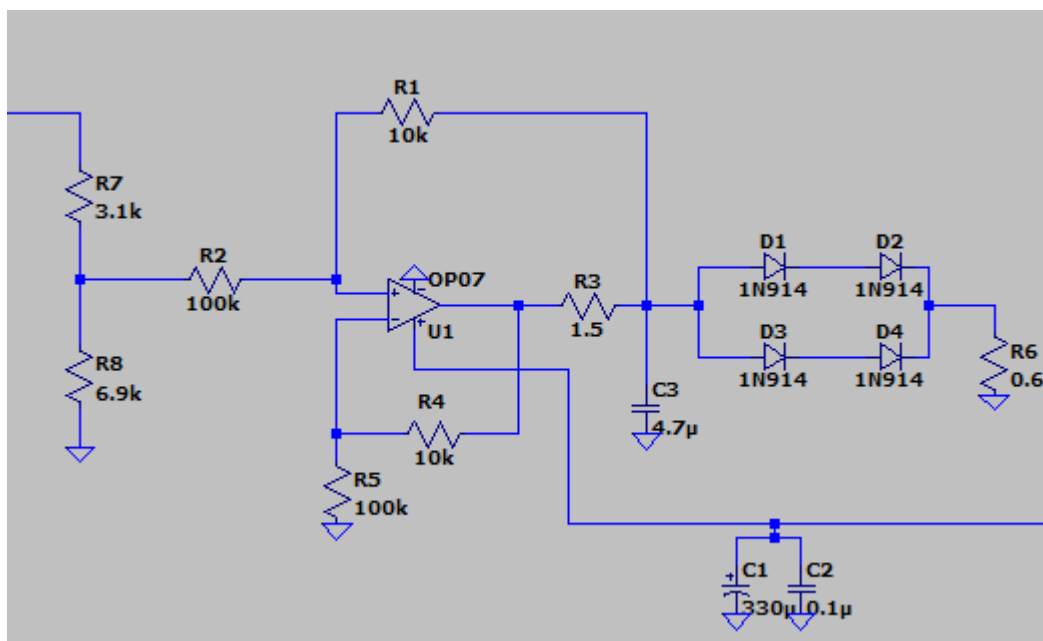
Σχήμα 23: Ψηφιακό ποτενσιόμετρο στο LTSpice

4.1.2 Αντλίες ρεύματος

Στο αμέσως επόμενο στάδιο ακολουθούν δύο διαιρέτες τάσεις, οι οποίοι συνδέονται σε δύο ίδιες αντλίες ρεύματος Howland. Οι συγκεκριμένες αντλίες ρεύματος αποτελούνται από έναν τελεστικό ενισχυτή και μία ισορροπημένη γέφυρα αντιστάσεων η κάθε μία και μπορούν να παρέχουν στο φορτίο σταθερό ρεύμα εξόδου ανεξαρτήτως της τάσης στην είσοδό τους. Η τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών γίνεται από την μπαταρία.

Τέλος, στην έξοδο του εκάστοτε τελεστικού ενισχυτή συνδέεται, μέσω διόδων συνδεδεμένων σε σειρά, μια αντίσταση ισχύος 50W για την κατανάλωση ισχύος.

Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζεται αναλυτικά μία εκ των δύο αντλιών ρεύματος και η έξοδός της. Επίσης φαίνονται οι παράλληλοι πυκνωτές που χρησιμοποιήθηκαν για να σταθεροποιούν την τροφοδοσία των τελεστικών ενισχυτών.

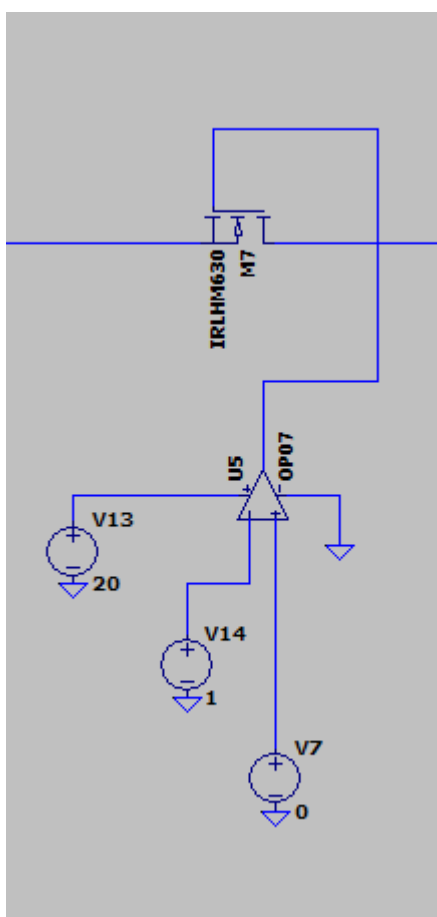


Σχήμα 24: Αντλία ρεύματος Howland στο LTSpice

4.1.3 Διακόπτης

Τέλος, το κύκλωμα εκφόρτισης συνδέεται με το υπόλοιπο κύκλωμα μέσω ενός λογικού nMOS που λειτουργεί ως διακόπτης. Έτσι, όταν η τάση του συσσωρευτή πέσει κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή, ο διακόπτης ανοίγει και το κύκλωμα εκφόρτισης απομονώνεται από την μπαταρία.

Ο διακόπτης αυτός ελέγχεται από μικροελεγκτή τύπου Arduino ή ESP32 και επομένως για να αποκόψει αποτελεσματικά το κύκλωμα παρεμβάλλεται συγκριτής, ούτως ώστε το σήμα στην πύλη του nMOS να ενισχυθεί.

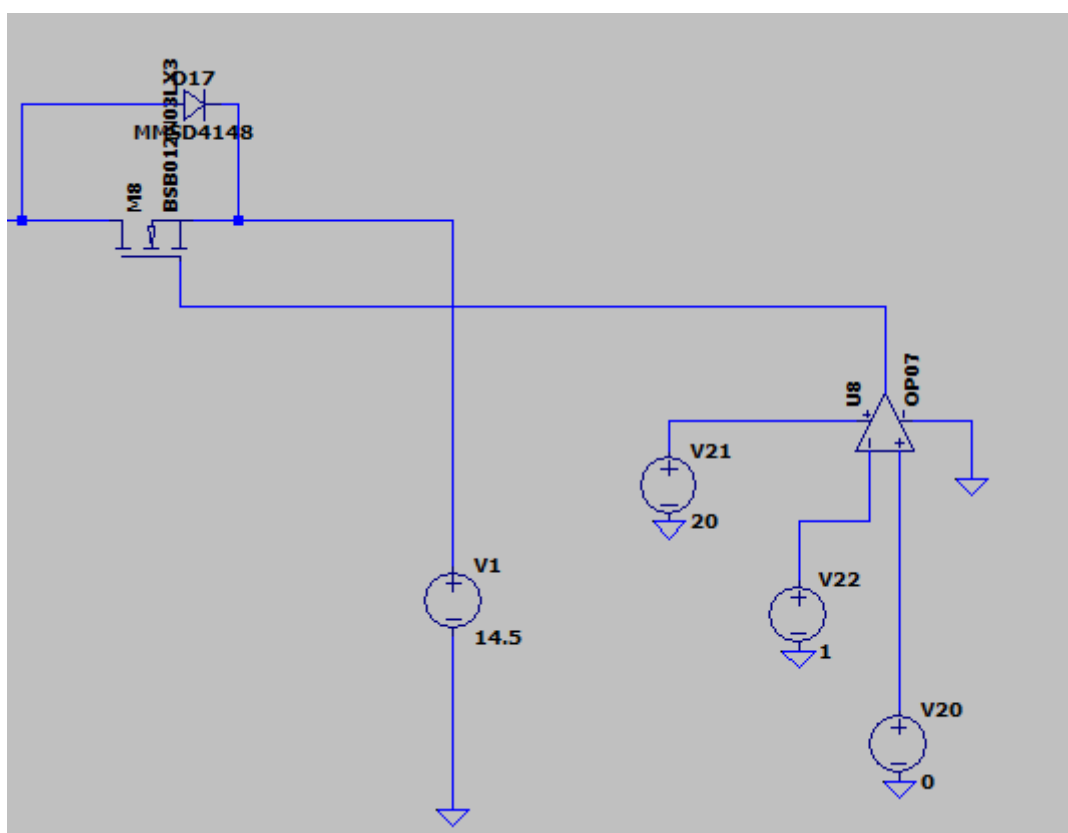


Σχήμα 25: Διακόπτης φορτίου (ανοικτός) LTSpice

4.2 Κύκλωμα φόρτισης του συσσωρευτή

Για την φόρτιση του συσσωρευτή χρησιμοποιείται μια απλή πηγή τάσης, συνδεδεμένη στο υπόλοιπο κύκλωμα μέσω λογικού nMOS. Το nMOS αυτό ελέγχεται από μικροελεγκτή, του οποίου το σήμα ελέγχου ενισχύεται από έναν συγκριτή.

Η φόρτιση πραγματοποιείται αφού αποσυνδεθεί το κύκλωμα εκφόρτισης από το δίκτυο.



Σχήμα 26: Τροφοδοτικό και διακόπτης LTSpice

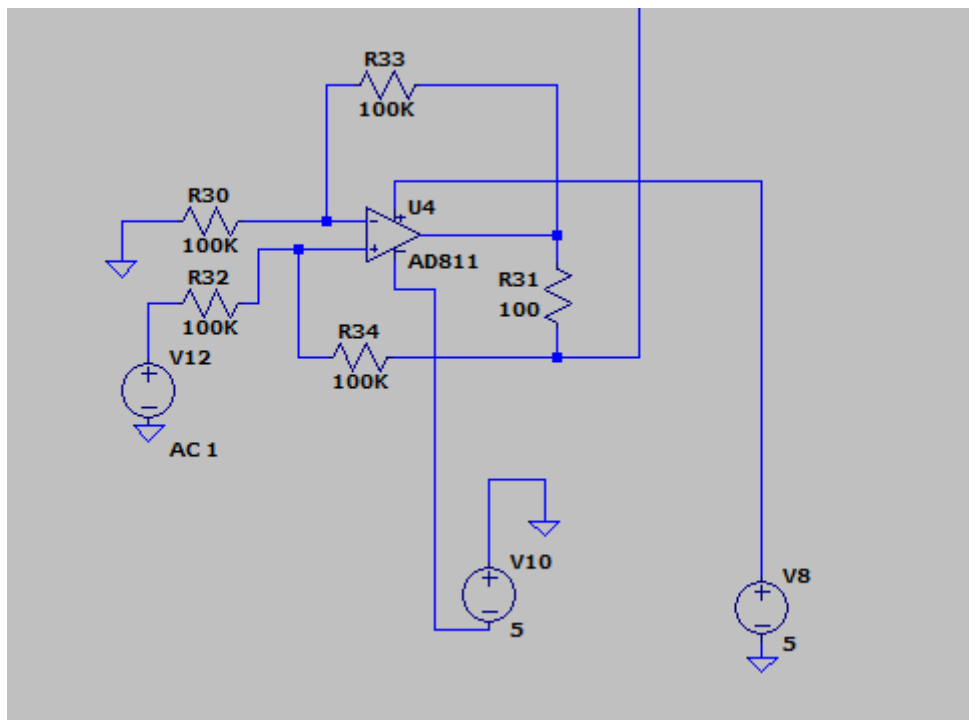
4.3 Γεννήτρια παραγωγής σήματος

Το επόμενο στάδιο του κυκλώματος είναι η γεννήτρια παραγωγής σήματος. Στόχος της διάταξης είναι να οδηγήσει στην μπαταρία ένα μικρό ημιτονοειδές σήμα ρεύματος, $i(t)$ και να μετρήσει την απόκριση που θα προκύψει στους ακροδέκτες.

Η παραγωγή του μικρού ημιτονοειδούς σήματος γίνεται από γεννήτρια (Direct Digital Synthesis) DDS και χρησιμοποιείται αντλία ρεύματος για να προσαρμοστεί το σήμα στο κατάλληλο πλάτος.

Η γεννήτρια συνδέεται στο κύκλωμα μέσω λογικού nMOS, που λειτουργεί ως διακόπτης.

Στο παρακάτω σχήμα η γεννήτρια DDS αποτυπώνεται ως AC πηγή τάσης.



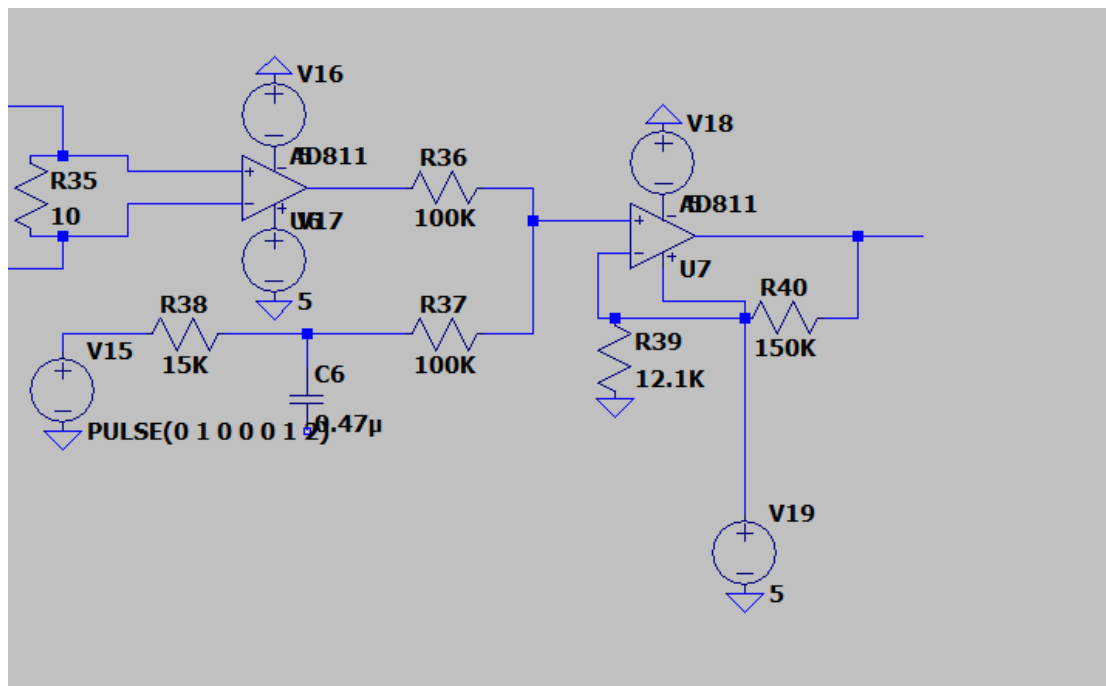
Σχήμα 27: Γεννήτρια DDS και αντλία ρεύματος LTSpice

4.4 Διατάξεις μέτρησης

Για την μέτρηση των ημιτονοειδών σημάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικά κυκλώματα. Το πρώτο χρησιμοποιήθηκε για την καταμέτρηση του σήματος εισόδου $i(t)$ και το δεύτερο για την καταμέτρηση του σήματος τάσης $u(t)$ στους ακροδέκτες του συσσωρευτή.

4.4.1 Καταμέτρηση σήματος εισόδου $i(t)$

Η παρακάτω διάταξη χρησιμοποιήθηκε για την καταμέτρηση του σήματος εισόδου $i(t)$.



Σχήμα 28: Κύκλωμα μέτρησης $i(t)$ LTSpice

Το ρεύμα εισόδου $i(t)$ διέρχεται από την αντίσταση R35 και προκαλεί στα άκρα της πτώση τάσης. Η πτώση τάσης ανιχνεύεται από τον συγκριτή, το κέρδος του οποίου μπορεί να οριστεί από εξωτερικό αντιστάση.

Στο σήμα εξόδου του συγκριτή υπερτίθεται σε μια DC συνιστώσα που δημιουργείται από παλμό PWM και βαθυπερατό φίλτρο συχνότητας αποκοπής στα 22.5 HZ. Στόχος του συγκεκριμένου βήματος είναι να ανεβάσουμε την μέση τιμή του σήματος. Το κέρδος που προσφέρει το συγκεκριμένο κομμάτι στο σήμα λαμβάνεται υπόψιν στις μετρήσεις.

Στο τελικό στάδιο, το σήμα ενισχύεται από έναν τελεστικό ενισχυτή μη αναστρέφουσας συνδεσμολογίας κέρδους :

$$A = 1 + R40/R39 = 13.5$$

Το ενισχυμένο σήμα διαβάζεται από τον μικροελεγκτή.

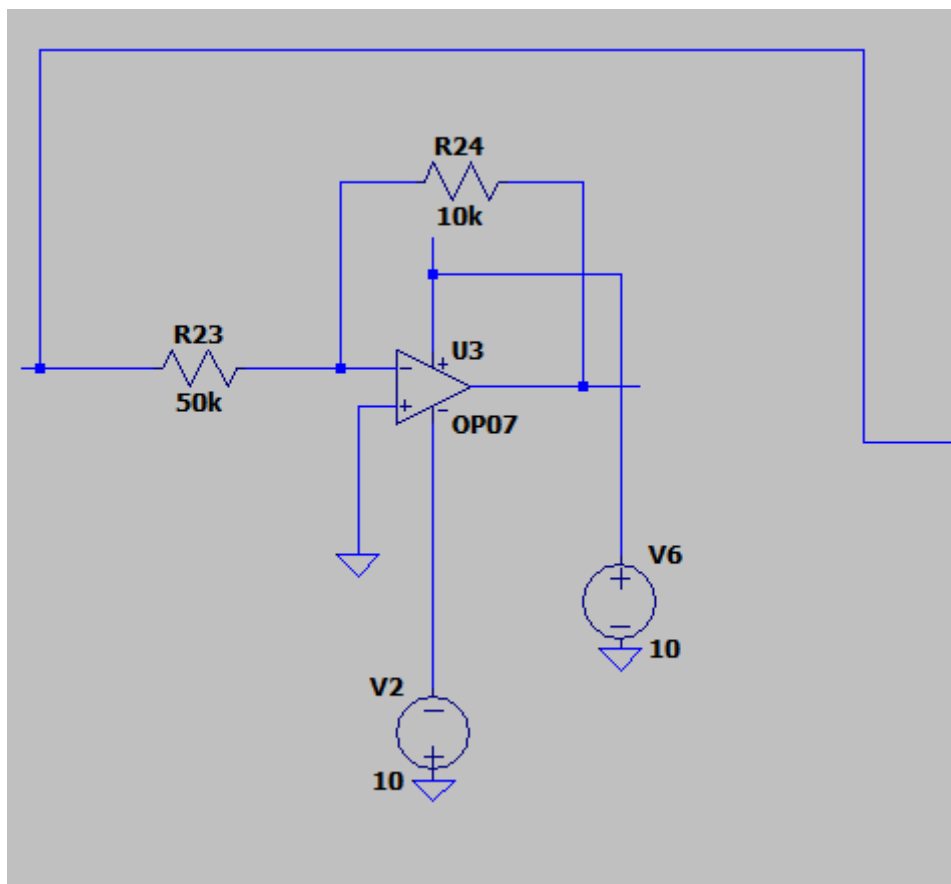
4.4.2 Καταμέτρηση σήματος εξόδου $u(t)$

Το σήμα τάσης στους ακροδέκτες της μπαταρίας μετριέται με χρήση τελεστικού ενισχυτή, ο οποίος στόχο έχει να υποβιβάσει την DC συνιστώσα ούτως ώστε να μπορέσει να γίνει η μέτρηση από τον μικροελεγκτή.

Χρησιμοποιήθηκε αναστρέφουσα συνδεσμολογία με κέρδος :

$$A = - R24/R23 = - 0.2$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο εν λόγω ενισχυτής. Το στάδιο αυτό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της τάσης του συσσωρευτή γενικά, προκειμένου να καθοριστεί ο ρυθμός εκφόρτισης στο φορτίο ή να συνδεθεί ο φορτιστής.

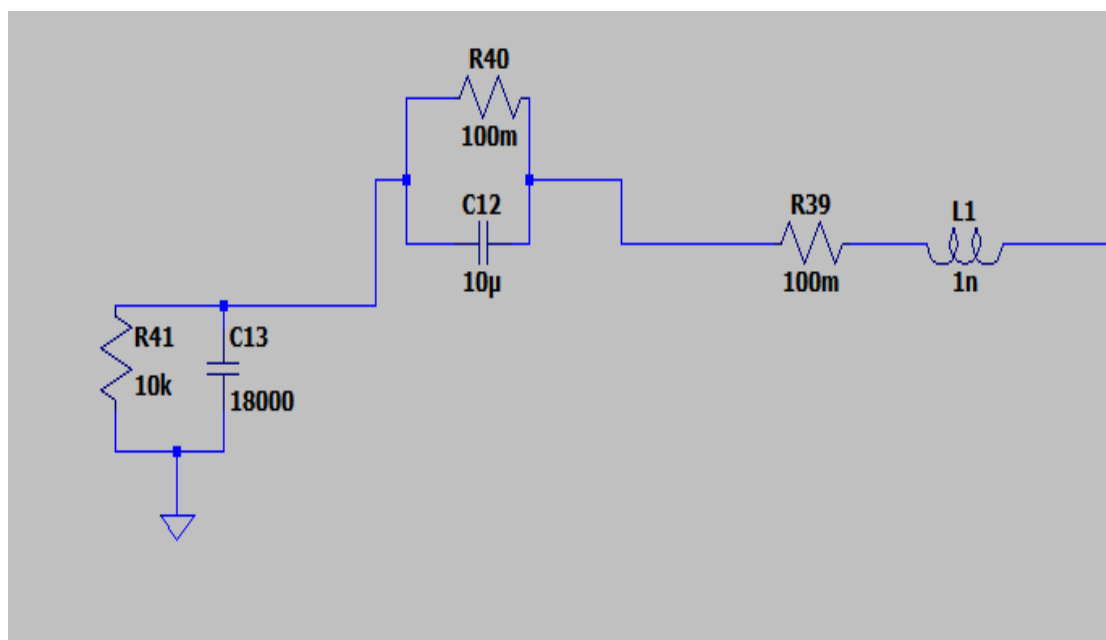


Σχήμα 29: Κύκλωμα μέτρησης $u(t)$ LTSpice

4.5 Μοντέλο συσσωρευτή

Για την μοντελοποίηση του συσσωρευτή επιλέχθηκε το μοντέλο του Randles, καθώς προσομοιώνει με αρκετά καλή ακρίβεια την εμπέδηση ενός συσσωρευτή. Το μοντέλο συνδέθηκε σε σειρά με πηνίο, προκειμένου να αναπαρασταθούν καλύτερα και τα επαγωγικά φαινόμενα.

Το τελικό μοντέλο παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα :



Σχήμα 30: Μοντέλο συσσωρευτή LTSpice

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, η αντίσταση R39 αναπαριστά την ωμική εσωτερική αντίσταση του συσσωρευτή. Η τιμή της αρχικά είναι μικρή, όμως κατά την χρήση και γήρανση της μπαταρίας τείνει να αυξάνεται.

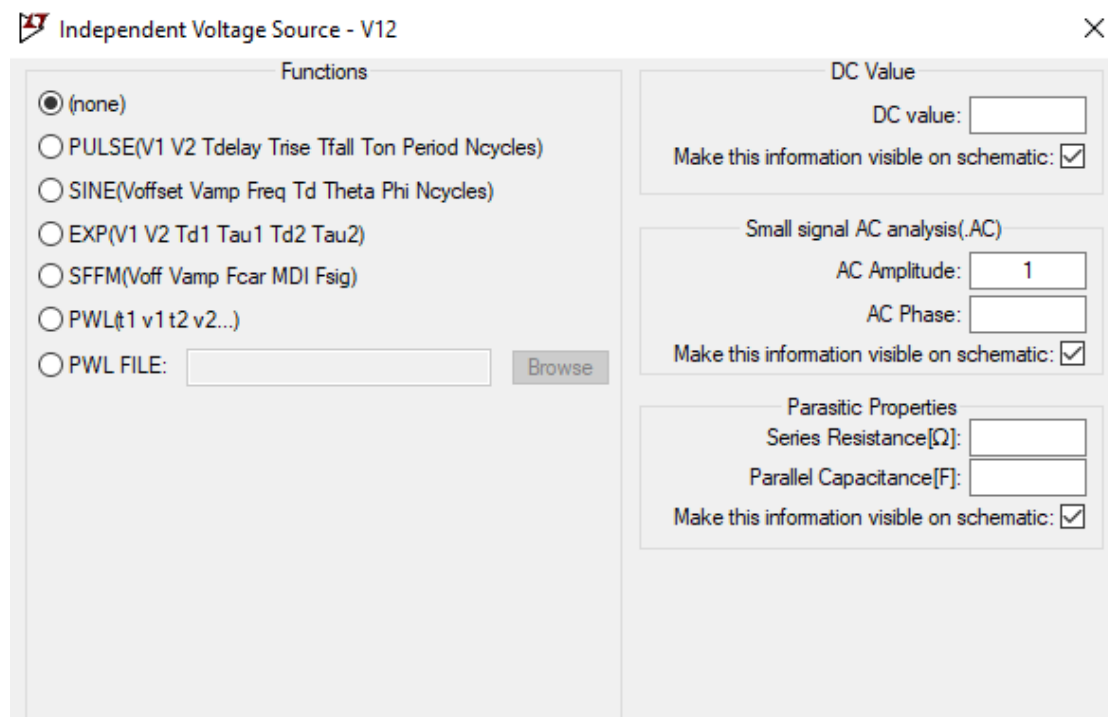
Η αντίσταση R40 και ο πυκνωτής C12 αντιπροσωπεύουν τις παροδικές επιδράσεις στον συσσωρευτή που δημιουργούνται λόγω μετακίνησης ιόντων στον ηλεκτρολύτη. Οι τιμές τους επίσης αλλάζουν κατά την γήρανση.

Η αντίσταση R41 αντιπροσωπεύει την αυτοεκφόρτιση του συσσωρευτή. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της, τόσο μικρότερο το φαινόμενο της αυτοεκφόρτισης. Επομένως, σε μια υγιή μπαταρία, η τιμή της είναι της τάξης των kΩ.

Ο πυκνωτής C13 αντιπροσωπεύει την χωρητικότητα του συσσωρευτή. Η μείωση της τιμής του συγκεκριμένου πυκνωτή αντιπροσωπεύει την μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή κατά την γήρανσή του.

5 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Προκειμένου να μετρηθεί η εμπέδηση της μπαταρίας, έπρεπε να γίνει AC ανάλυση του κυκλώματος. Στο Ltspice για να συμβεί αυτό πρέπει να τοποθετηθεί μία AC πηγή, της οποίας ορίζουμε το πλάτος και την φάση. Η πηγή που χρησιμοποιήθηκε είναι η V12 του σχήματος 27. Οι ρυθμίσεις της φαίνονται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 31: Ρυθμίσεις γεννήτριας LTSpice

Για την AC sweep ανάλυση του κυκλώματος, επιλέχθηκε η λειτουργία AC Analysis. Η ανάλυση θα γίνει στις συχνότητες που ξεκινούν από 1mHz και φτάνουν το 1MHz.

Ορίστηκαν λοιπόν τα παρακάτω μεγέθη :

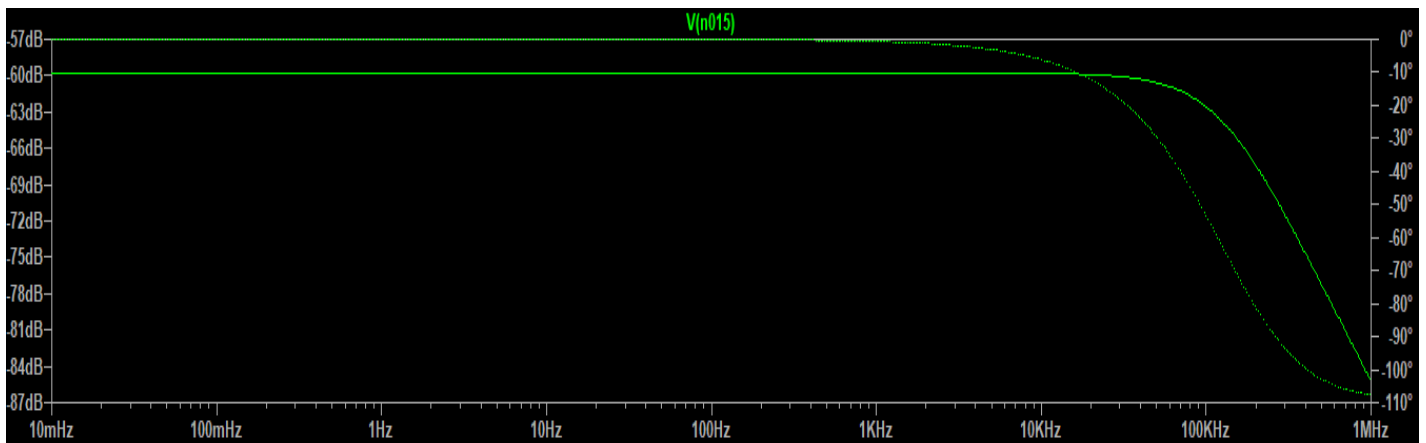
- Type of sweep : Decade
- Numbers of points per decade : 101
- Start frequency : 10mHz
- Stop frequency : 1 MHz

Η πρώτη ανάλυση έγινε για τις τιμές που παρουσιάζονται στο σχήμα 30, όπου και μοντελοποιείται ένας υγιής και καινούργιος συσσωρευτής. Υπολογίστηκαν και

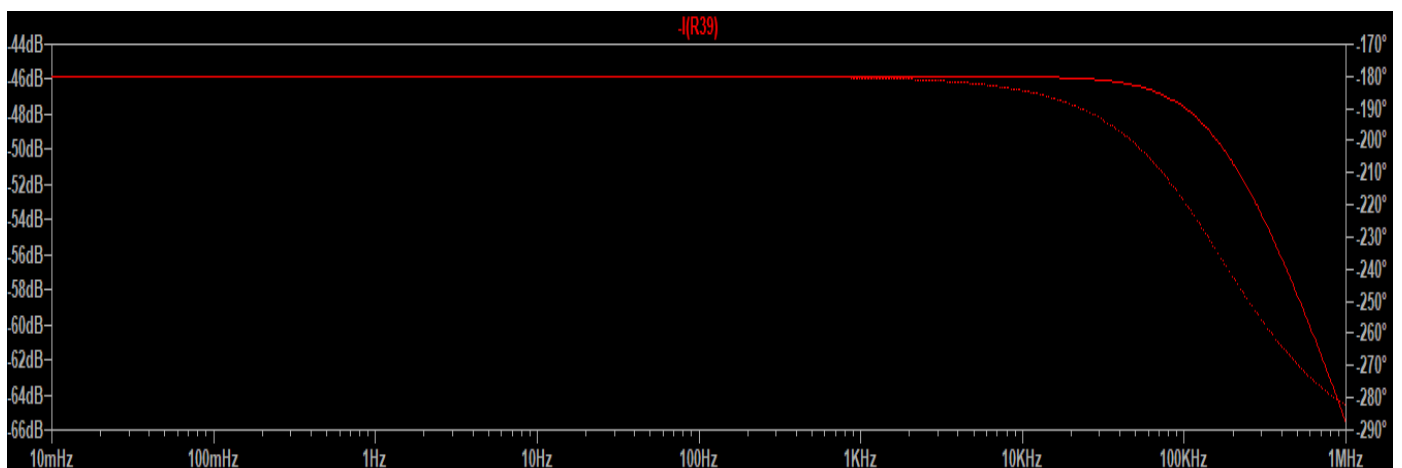
σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα Bode της τάσης των ακροδεκτών του συσσωρευτή, του ρεύματος που τον διαρρέει καθώς και της εμπέδησης, που εμφανίζεται ως λόγος της τάσης προς το ρεύμα.

Για τον υπολογισμό οι διακόπτες που συνδέουν τον συσσωρευτή με το τροφοδοτικό αλλά και με το φορτίο, θεωρούνται ανοιχτοί (δηλαδή τα λογικά nMOS βρίσκονται στην περιοχή αποκοπής).

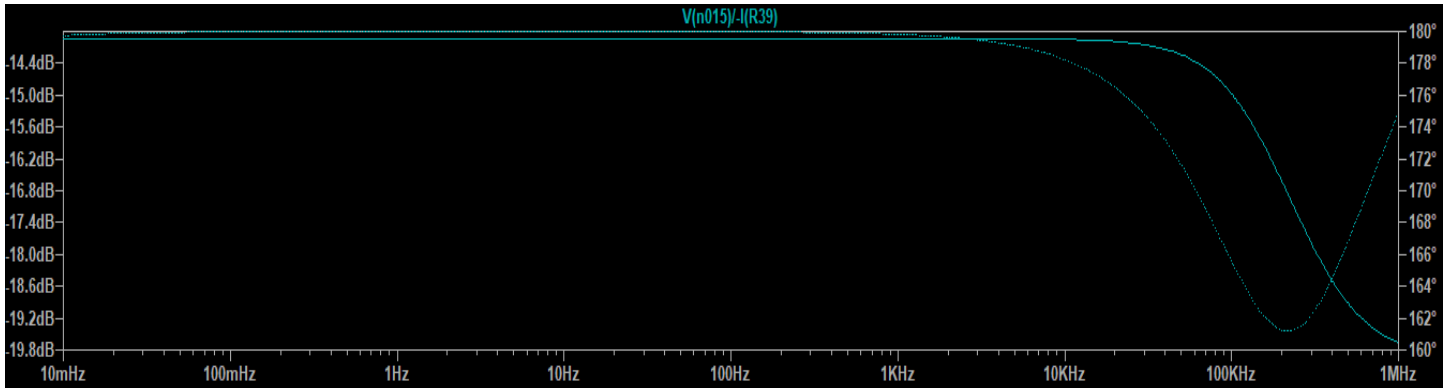
Παρακάτω παρουσιάζονται τα διαγράμματα Bode. Η συνεχής γραμμή αναπαριστά το μέτρο του μεγέθους, με τον άξονα των db στα αριστερά, ενώ η διακεκομμένη γραμμή αναπαριστά την φάση, με τον άξονα των μοιρών στα δεξιά :



Σχήμα 32: Διάγραμμα Bode τάσης V LTSpice

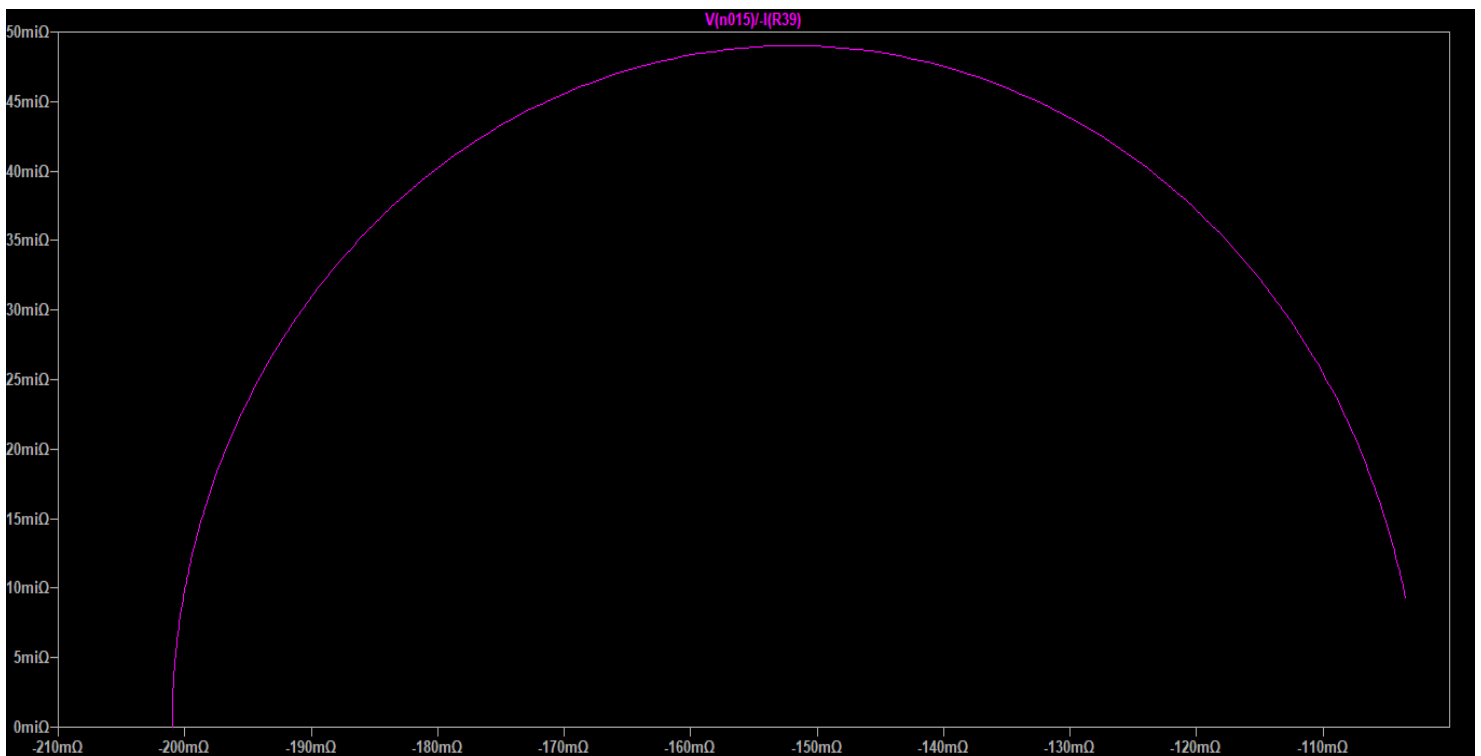


Σχήμα 33: Διάγραμμα Bode έντασης I LTSpice



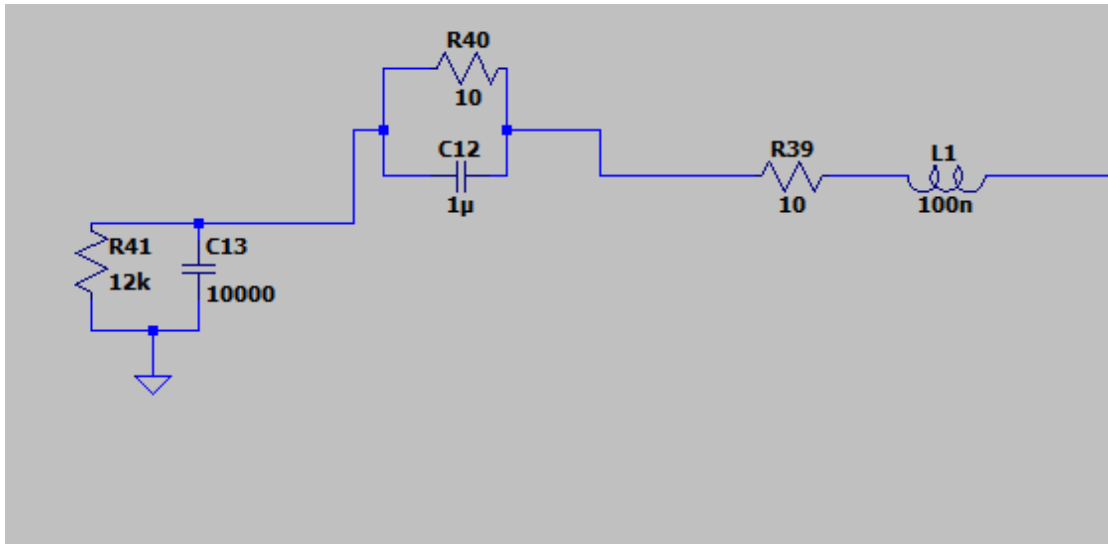
Σχήμα 34: Διάγραμμα Bode εμπέδησης LTSpice

Τέλος, παρουσιάζεται το διάγραμμα Nyquist του μοντέλου :



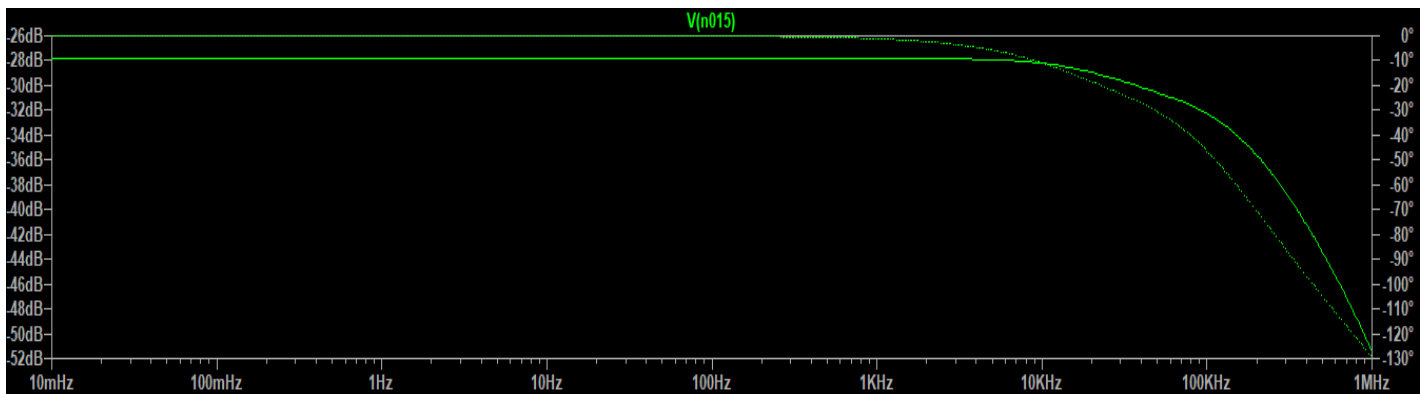
Σχήμα 35: Διάγραμμα Nyquist εμπέδησης LTSpice

Στη συνέχεια, τροποποιήθηκαν οι τιμές των πυκνωτών και της εσωτερικής αντίστασης, για να προσομοιωθούν τα φαινόμενα γήρανσης. Οι νέες τιμές παρουσιάζονται στο παρακάτω σχήμα :

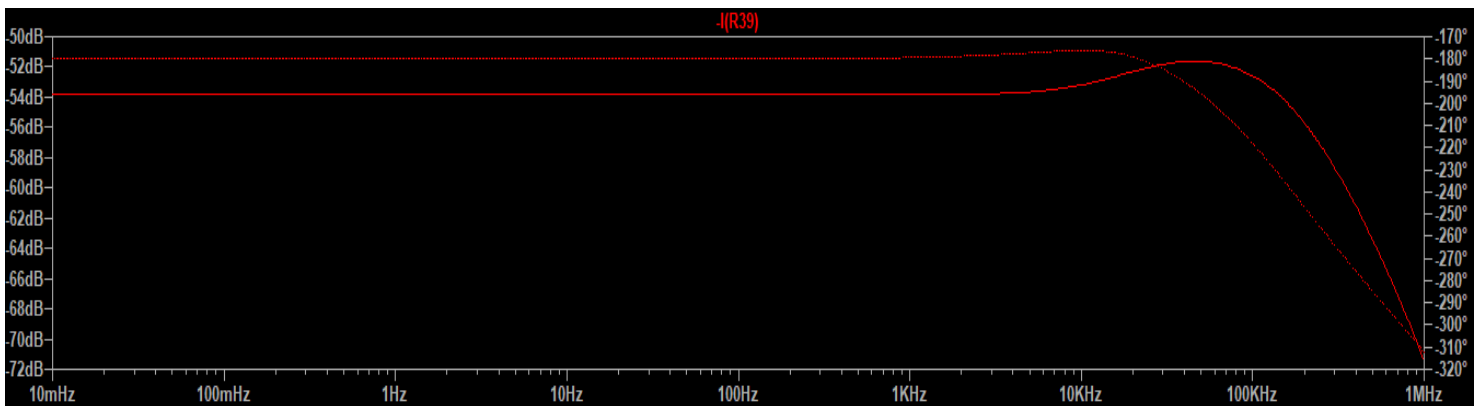


Σχήμα 36: Νέες τιμές στοιχείων μοντέλου συσσωρευτή LTSpice

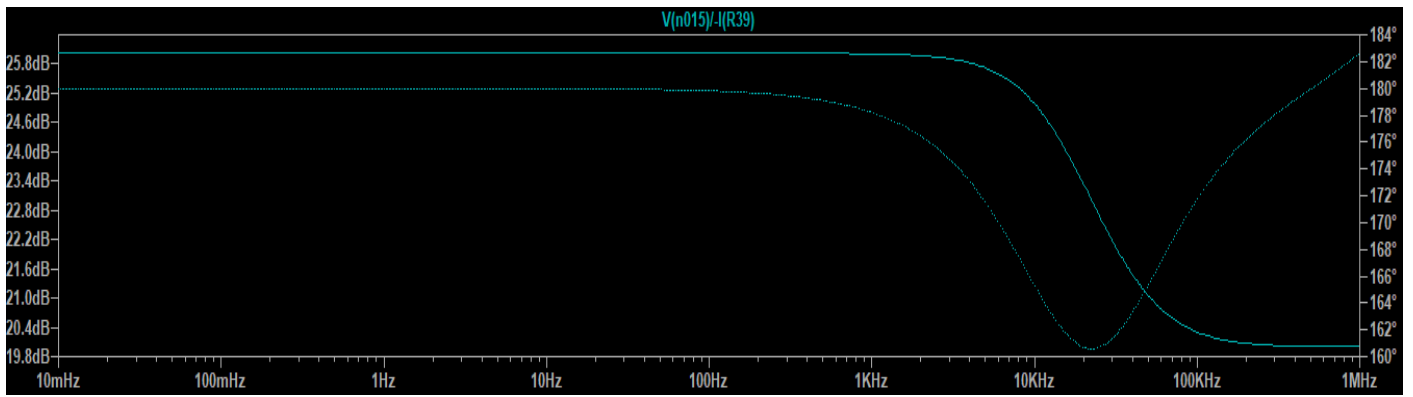
Τα νέα διαγράμματα που προκύπτουν μετά τις αλλαγές είναι τα παρακάτω :



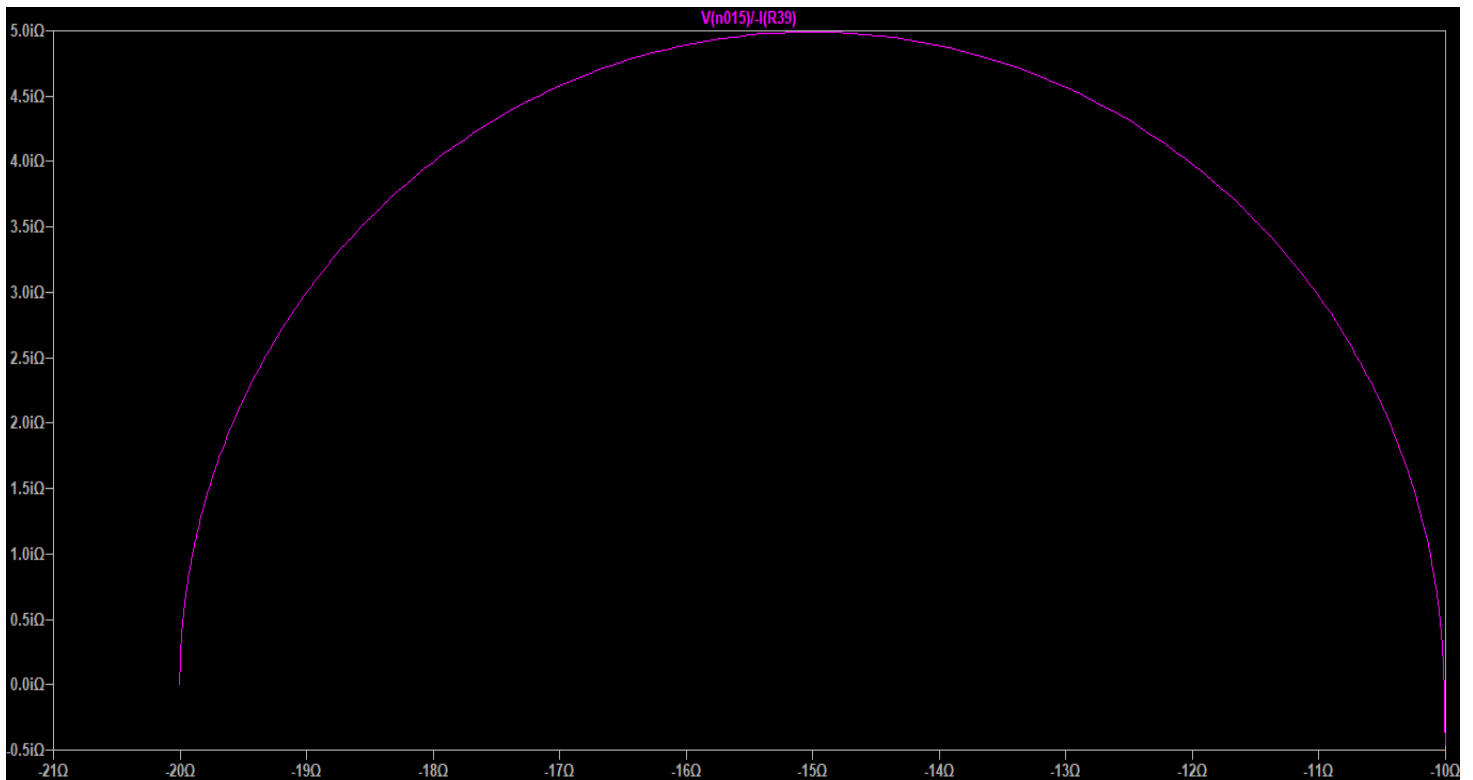
Σχήμα 37: Διάγραμμα Bode τάσης V LTSpice



Σχήμα 38: Διάγραμμα Bode έντασης i LTSpice

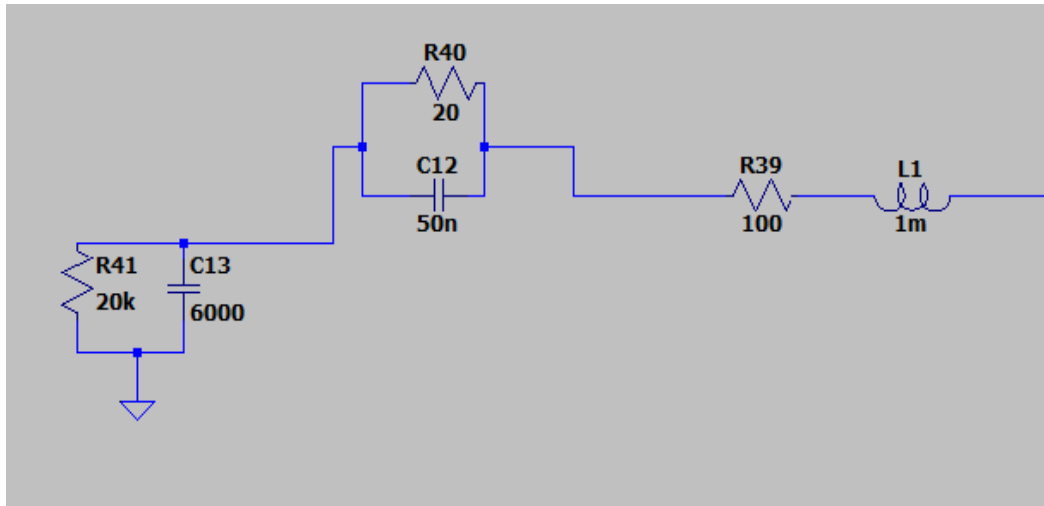


Σχήμα 39: Διάγραμμα Bode εμπέδησης LTSpice



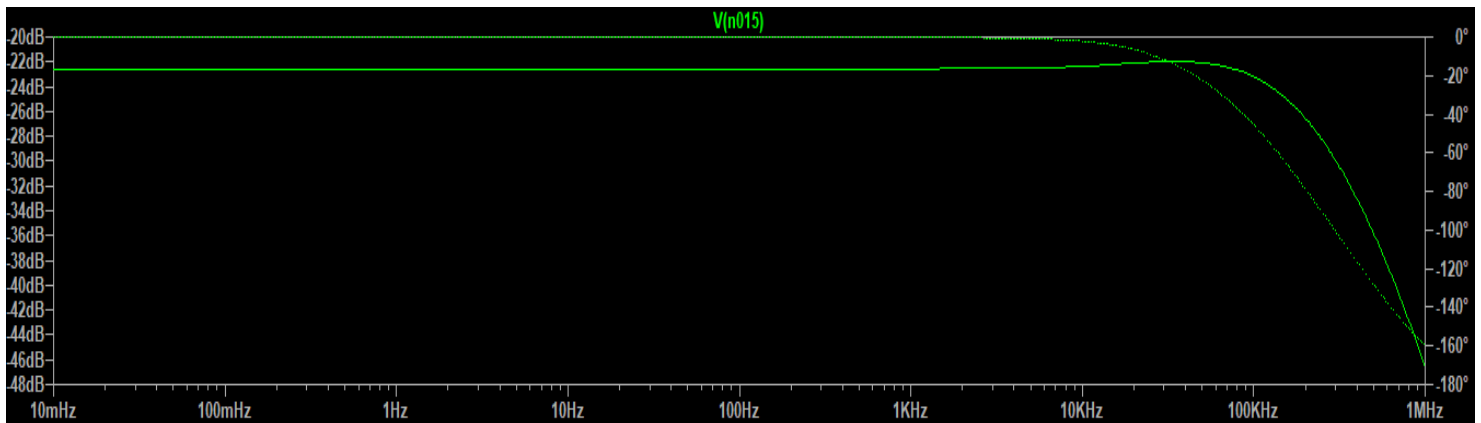
Σχήμα 40: Διάγραμμα Nyquist εμπέδησης LTSpice

Τέλος, αλλάζοντας τις τιμές του μοντέλου ξανά, προσομοιώνεται ένας κατεστραμμένος συσσωρευτής. Οι νέες τιμές παρουσιάζονται στο επόμενο σχήμα.

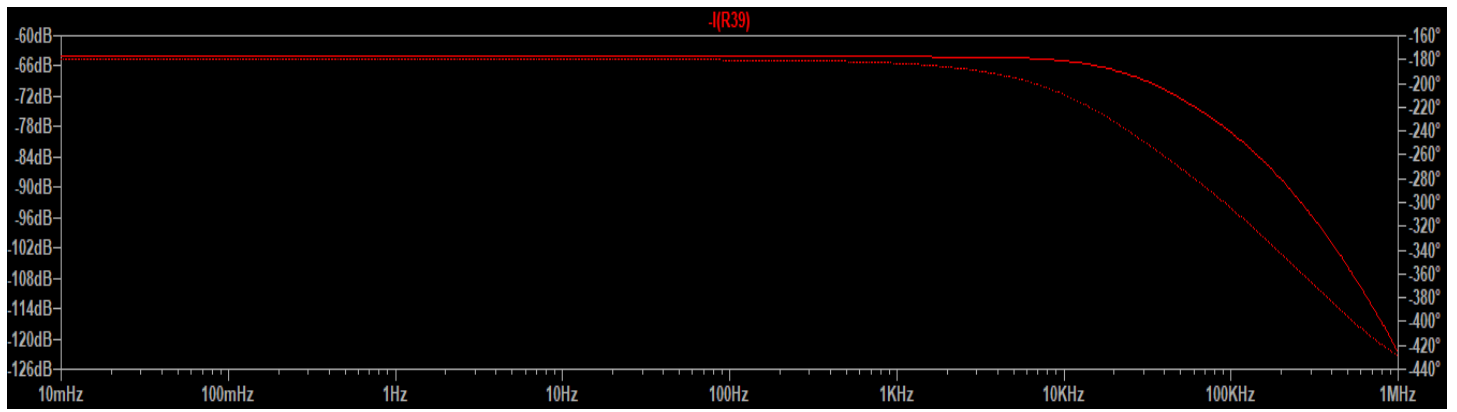


Σχήμα 41: Διάγραμμα Nyquist εμπέδησης LTSpice

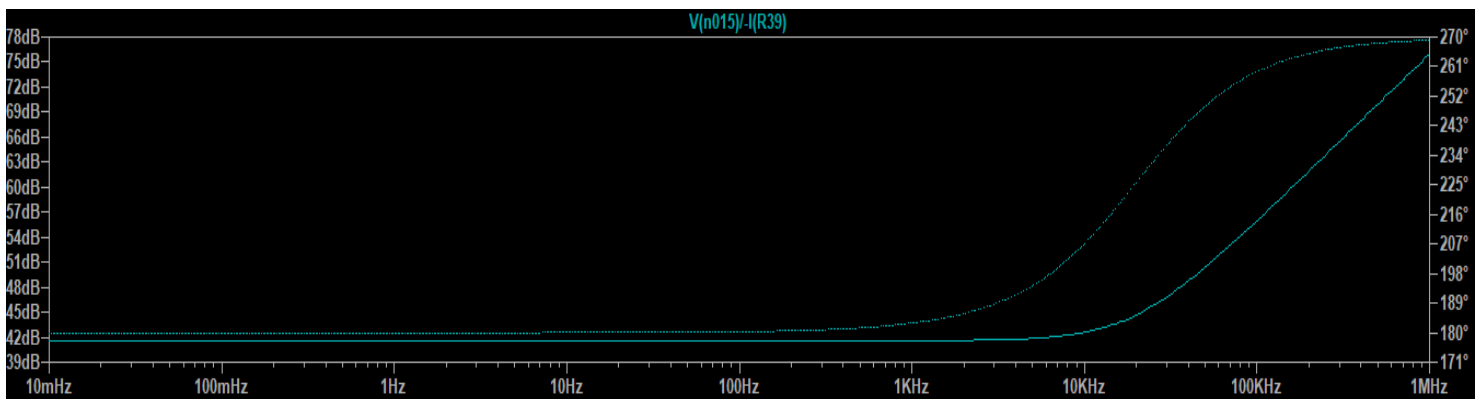
Και τα αντίστοιχα διαγράμματα παρουσιάζονται παρακάτω :



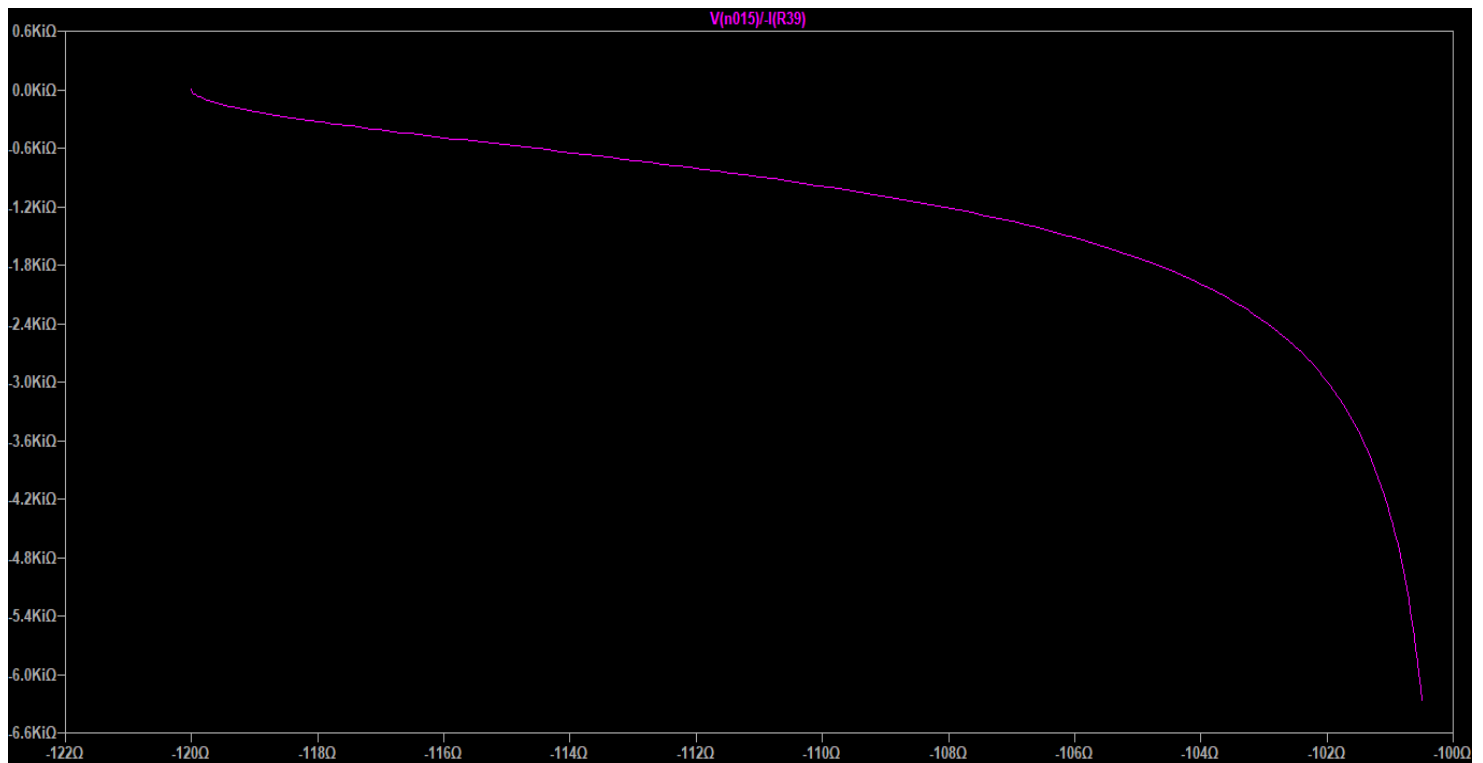
Σχήμα 42: Διάγραμμα Bode τάσης V LTSpice



Σχήμα 43: Διάγραμμα Bode έντασης I LTSpice



Σχήμα 44: Διάγραμμα Bode εμπέδησης LTSpice



Σχήμα 45: Διάγραμμα Nyquist εμπέδησης LTSpice

6 Συμπεράσματα – Μελλοντική εργασία

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εξετάστηκε σε προσομοίωση η εικόνα της εμπέδησης ενός συσσωρευτή. Κατασκευάστηκε ένα κύκλωμα φόρτισης – εκφόρτισης σταθερής ισχύος και πραγματοποιήθηκε AC ανάλυση σε μοντέλο συσσωρευτή για ένα μεγάλο φάσμα συχνοτήτων. Τέλος, εξετάστηκε η μεταβολή της εμπέδησης σε προσομοίωση γήρανσης του συσσωρευτή.

Τα διαγράμματα Bode και Nyquist της εμπέδησης παρουσιάζουν αρκετά όμοια εικόνα με αντίστοιχα διαγράμματα σε εργαστηριακές μελέτες [13].

Συγκεκριμένα, το διάγραμμα Nyquist των σχημάτων (40) και (35) παρουσιάζει ευδιάκριτα την περιοχή της ωμικής αντίστασης, της περιοχής SEI και κυρίως την καμπύλη που οφείλεται στις επιδράσεις λόγω μεταφοράς ιόντων στον ηλεκτρολύτη.

Δεν παρουσιάζεται ευκρινώς η περιοχή που οφείλεται στο επαγωγικό φορτίο στις μεγάλες συχνότητες, ενώ στις μικρές συχνότητες δεν παρουσιάστηκε η περιοχή που οφείλεται στην διάχυση.

Αυτό συμβαίνει διότι στο μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε, δεν τοποθετήθηκε η εμπέδηση Warburg, η οποία αν και δύσκολο να μοντελοποιηθεί στο LTSpice, παρέχει ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια στις μετρήσεις.

Επιπροσθέτως, μελετήθηκε η επίδραση της γήρανσης του συσσωρευτή στην εμπέδησή του. Από την σύγκριση των σχημάτων Nyquist (35) και (40) παρατηρείται η ραγδαία αύξηση του μέτρου της εμπέδησης με την γήρανση του συσσωρευτή, εικόνα που ήταν αναμενόμενη. Στο σχήμα (45), παρουσιάζεται εικόνα πλήρους καταστροφής του συσσωρευτή και τεράστια αύξηση της εμπέδησης.

Παρόμοια εικόνα παρουσιάζουν τα διαγράμματα Bode τάσης και ρεύματος. Συγκρίνοντας τα σχήματα (32) και (37), παρατηρείται σημαντική πτώση του κέρδους της τάσης των ακροδεκτών, από τα 60dB στα 28dB και μεταβολή της συχνότητας γονάτου, από τα περίπου 70kHz στα 30kHz. Στον κατεστραμμένο συσσωρευτή το κέρδος πέφτει στα 20dB, ενώ η συχνότητα γονάτου ανεβαίνει στα 120kHz.

Αντίστοιχα, στα σχήματα (33) και (38), παρατηρείται αύξηση του κέρδους έντασης από τα 46dB στα 54dB, ενώ η συχνότητα γονάτου παραμένει σταθερή.

Για μελλοντική έρευνα στο συγκεκριμένο αντικείμενο, προτείνεται αρχικά η μοντελοποίηση της εμπέδησης Warburg, προκειμένου να αποτυπωθεί η εικόνα της εμπέδησης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Επιπροσθέτως, προτείνεται η μελέτη της συμπεριφοράς περισσότερων μοντέλων συσσωρευτών. Τέλος, προτείνεται ακόμα η πειραματική υλοποίηση της εν λόγω προσομοίωσης για εξαγωγή πραγματικών αποτελεσμάτων κάτω από εργαστηριακές συνθήκες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] “Cylindrical Battery vs Prismatic Battery, What is the difference?” Accessed: Feb. 15, 2024. [Online]. Available: <https://www.ecolithiumbattery.com/cylindrical-battery-vs-prismatic-battery/>
- [2] T. B. Reddy, “LINDEN’S HANDBOOK OF BATTERIES.”
- [3] H. A. (Heinz A. Kiehne, *Battery technology handbook*. Marcel Dekker, 2003.
- [4] Nihal Kularatna, “Rechargeable battery technologies: An electronic engineer’s view point,” in *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier Inc., 2014, pp. 29–61. doi: 10.1016/B978-0-12-407947-2.00002-X.
- [5] J. Kim and J. Kowal, “Development of a Matlab/Simulink Model for Monitoring Cell State-of-Health and State-of-Charge via Impedance of Lithium-Ion Battery Cells,” *Batteries*, vol. 8, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/batteries8020008.
- [6] X. Zhang, Y. Han, and W. Zhang, “A Review of Factors Affecting the Lifespan of Lithium-ion Battery and its Health Estimation Methods,” *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, vol. 22, no. 5. Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, pp. 567–574, Oct. 01, 2021. doi: 10.1007/s42341-021-00357-6.
- [7] University of Michigan--Dearborn., Vehicular Technology Society., IEEE Power Electronics Society., and Institute of Electrical and Electronics Engineers., *5th International IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference : September 7-11, 2009, Dearborn, Michigan, USA*.
- [8] F. Leng, C. M. Tan, and M. Pecht, “Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature,” *Sci Rep*, vol. 5, Aug. 2015, doi: 10.1038/srep12967.
- [9] D. Ouyang, M. Chen, J. Liu, R. Wei, J. Weng, and J. Wang, “Investigation of a commercial lithium-ion battery under overcharge/over-discharge failure conditions,” *RSC Adv*, vol. 8, no. 58, pp. 33414–33424, 2018, doi: 10.1039/C8RA05564E.
- [10] H. Chaoui and H. Gualous, “Online parameter and state estimation of lithium-ion batteries under temperature effects,” *Electric Power Systems Research*, vol. 145, pp. 73–82, Apr. 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2016.12.029.
- [11] H. G. Schweiger *et al.*, “Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells,” *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604–5625, Jun. 2010, doi: 10.3390/s100605604.
- [12] Y. Fernández Pulido, C. Blanco, D. Anseán, V. M. García, F. Ferrero, and M. Valledor, “Determination of suitable parameters for battery analysis by Electrochemical Impedance Spectroscopy,” *Measurement (Lond)*, vol. 106, pp. 1–11, Aug. 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.04.022.
- [13] S. M. Rezvanizani, Z. Liu, Y. Chen, and J. Lee, “Review and recent advances in battery health monitoring and prognostics technologies for electric vehicle (EV) safety and mobility,” *Journal of Power Sources*, vol. 256. Elsevier B.V., pp. 110–124, Jun. 15, 2014. doi: 10.1016/j.jpowsour.2014.01.085.
- [14] C. R. Gould, C. M. Bingham, D. A. Stone, and P. Bentley, “Novel battery model of an all-electric personal rapid transit vehicle to determine State-of-Health through subspace parameter estimation and a Kalman Estimator,” in *SPEEDAM 2008 - International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2008, pp. 1217–1222. doi: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581332.
- [15] Nihal. Kularatna, *DC power supplies : power management and surge protection for power electronic systems*. CRC Press, 2012.
- [16] Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith, *Microelectronic Circuits: Theory And Application*,

- 7Th Edn. 2014.
- [17] A. K. Varma, M. Steer, and P. D. Franzon, "Improving behavioral IO buffer modeling based on IBIS," in *IEEE Transactions on Advanced Packaging*, 2008, pp. 711–721. doi: 10.1109/TADVP.2008.2004995.