
**ΑΛΕΞΑΝΔΡΕΙΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ
ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ**
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ Τ.Ε.



**ΑΝΤΙΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΜΠΑΤΑΡΙΑΣ
ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΕΣ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΩΝ
ΘΕΟΔΩΡΙΔΗ ΓΡΗΓΟΡΙΟΥ
ΚΥΝΑΤΙΔΗ ΟΔΥΣΣΕΑ**

Επιβλέπων: Κοσμάνης Θεόδωρος, Αναπληρωτής καθηγητής

ΣΙΝΔΟΣ, 2018

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία και τα συμπεράσματά της, σε οποιαδήποτε μορφή, αποτελούν συνιδιοκτησία του Τμήματος Μηχανολόγων Οχημάτων του Αλεξάνδρειου Τ.Ε.Ι. Θεσσαλονίκης και του/των φοιτητή/ών. Οι προαναφερόμενοι διατηρούν το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης και αναπαραγωγής (τμηματικά ή συνολικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να αναφέρεται ο τίτλος, ο συγγραφέας, ο επιβλέπων και το Τμήμα του ΑΤΕΙΘ.

Η έγκριση της παρούσας Πτυχιακής Εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Οχημάτων δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι δηλώνουμε υπεύθυνα ότι η παρούσα Πτυχιακή Εργασία είναι εξ' ολοκλήρου δικό μας έργο και συγγράφηκε ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανολόγων Οχημάτων.

Δηλώνουμε υπεύθυνα ότι κατά τη συγγραφή ακολουθήσαμε την πρότυπα ακαδημαϊκή δεοντολογία αποφυγής λογοκλοπής και έχουμε αποφύγει οποιαδήποτε ενέργεια που συνιστά παράπτωμα λογοκλοπής.

Ο/Η ΦΟΙΤ.....

Ο/Η ΦΟΙΤ.....

(Ολογράφως)

(Ολογράφως)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Σίνδος, ___ / ___ / 20___

Σίνδος, ___ / ___ / 20___

Περιεχόμενα

Εισαγωγή.....	1
Σύστημα φόρτισης Μ.Ε.Κ. – Γεννήτρια	2
Εισαγωγή	2
Εναλλακτήρας (Γεννήτρια Εναλλασσόμενου ρεύματος)	3
Δομή εναλλακτήρα	4
Βασικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές	10
Ηλεκτρικά φορτία οχήματος.....	11
Επιλογή του εναλλακτήρα	13
Βαθμός απόδοσης	15
Σύστημα εκκίνησης Μ.Ε.Κ. – Εκκινητής	18
Εισαγωγή	18
Εκκινητής	19
Ισχύς εκκινητή	20
Σύμπλεξη	21
Κατάταξη	22
Ηλεκτρομαγνήτης εκκινητή – ρελέ εκκίνησης.....	23
Φάσεις λειτουργίας εκκινητή μέσου τύπου της Bosch.....	26
Εκκίνηση ΜΕΚ.....	27
Υπερπυκνωτές.....	29
Λίγα λόγια για τους πυκνωτές.....	29
Τι είναι ο πυκνωτής	29
Αρχή λειτουργίας.....	29

Χαρακτηριστικά μεγέθη των πυκνωτών.....	30
Είδη πυκνωτών	32
Υπερπυκνωτής.....	34
Τι είναι ο υπερπυκνωτής.....	34
Λίγη ιστορία για τον υπερπυκνωτή	35
Κατηγορίες υπερπυκνωτών	36
Φαινόμενο διπλού στρώματος	37
Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα υπερπυκνωτών συγκριτικά με μπαταρίες	40
Σύγκριση υπερπυκνωτών και μπαταριών	44
Είδη υπερπυκνωτών εμπορίου.....	47
Πεδίο εφαρμογών	59
Πειραματική διάταξη	66
Σκοπός εργασίας.....	66
Υλικά/εξαρτήματα.....	68
Υπολογισμοί	70
Θεωρητικοί υπολογισμοί	70
Είδη πειραμάτων.....	75
Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία λαμπτήρων.....	75
Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία εκκινητή με μεταβαλλόμενη αντίσταση.....	87
Συμπεράσματα/Αποτελέσματα πειραμάτων.....	95
Βιβλιογραφία.....	96
Εικόνες	101

Εισαγωγή

Το θέμα που πραγματεύεται η συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία είναι η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας στο όχημα, με την χρήση υπερπυκνωτών. Με την πρόοδο της τεχνολογίας στον κλάδο του οχήματος, τα αυτοκίνητα γίνονται πιο “έξυπνα” και πιο ασφαλή, με συνέπεια όμως την αύξηση της πολυπλοκότητας των ηλεκτρικών συστημάτων και τον περιορισμό του διαθέσιμου χώρου του οχήματος, λόγω της στοχευμένης κατασκευής των δομικών στοιχείων του για βελτίωση της παθητικής ασφάλειας. Στόχος αυτής της συγκεκριμένης πτυχιακής εργασίας, είναι να προταθεί μια αποδοτικότερη, πιο φιλική στο περιβάλλον και πιο ευέλικτη στη χωροδιάταξη λύση σε αντικατάσταση του συσσωρευτή του οχήματος. Λόγω της φύσης των υπερπυκνωτών θεωρούνται ικανοί αντικαταστάτες του συσσωρευτή του οχήματος, διότι επιτελούν με την ίδια και καλύτερη απόδοση τον κύριο σκοπό του συσσωρευτή, δηλαδή τη εκκίνηση της μηχανής εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ). Επιπλέον, με τη χρήση υπερπυκνωτών, είναι δυνατόν να βελτιωθεί η λειτουργία ορισμένων διεργασιών του οχήματος, όπως το σύστημα Start/Stop και η συσσώρευση/απόδοση ενέργειας από την αναγεννητική πέδηση. Η τεχνολογία αυτή είναι καινοτόμα και έχει βρει ελάχιστη εφαρμογή στο χώρο της αυτοκίνησης, κυρίως στον κλάδο των συμβατικών οχημάτων και υβριδικών αγωνιστικών σχετικά με τις προαναφερθείσες χρήσεις, όπως επίσης και σε μέσα μαζικής μεταφοράς (τρένα, λεωφορεία). Στην παρούσα χρονική στιγμή, η τεχνολογία των υπερπυκνωτών είναι ακόμα σε πρωταρχικό στάδιο αλλά βαίνει σε ραγδαία εξέλιξη, με αποτέλεσμα να αρθούν οι οικονομικές και λειτουργικές δυσκολίες που αντιμετωπίζονται. Μέσα από την έρευνα του συγκεκριμένου θέματος, διαπιστώθηκε ότι υπάρχουν προοπτικές εξέλιξης και χρήσης των υπερπυκνωτών ως συσσωρευτές ηλεκτρικού ρεύματος στο συμβατικό όχημα. Η πτυχιακή εργασία εκτελέσθηκε στο εργαστήριο ηλεκτρονικών συστημάτων, υπό την επίβλεψη του αναπληρωτή καθηγητή κ. Θεόδωρου Κοσμάνη. Οι δυσκολίες που αντιμετωπίστηκαν, ήταν κυρίως οικονομικής φύσεως, λόγω της υψηλής τιμής των εξαρτημάτων που αγοράστηκαν για την επίτευξη πειραμάτων.

Σύστημα φόρτισης Μ.Ε.Κ. – Γεννήτρια

Εισαγωγή

Το κύριο εξάρτημα του συστήματος φόρτισης του οχήματος είναι η γεννήτρια. Η γεννήτρια είναι μια διάταξη που μετατρέπει την μηχανική ισχύ (προερχόμενη από τον κινητήρα) σε ηλεκτρική. Σκοπός της είναι να παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές κατά τη λειτουργία του κινητήρα εσωτερικής καύσης, καθώς επίσης και να φορτίζει τον συσσωρευτή ηλεκτρικής ενέργειας (μπαταρία). Οι γεννήτριες των οχημάτων χωρίζονται σε δύο είδη:

- Γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (ή αλλιώς δυναμό).
- Γεννήτριες τριφασικού ρεύματος (ή αλλιώς εναλλακτήρες).

Οι γεννήτριες συνεχούς ρεύματος (Εικόνα 1) έχουν ξεπεραστεί και δεν χρησιμοποιούνται πλέον σε οχήματα (από τα τέλη της δεκαετίας του '70 γίνεται η χρήση εναλλακτήρων). Ο λόγος είναι η χαμηλή ισχύς της στις χαμηλές στροφές του κινητήρα, η συνεχής συντήρηση λόγω της φθοράς των ψηκτρών, ο μεγάλος όγκος και βάρος τους.

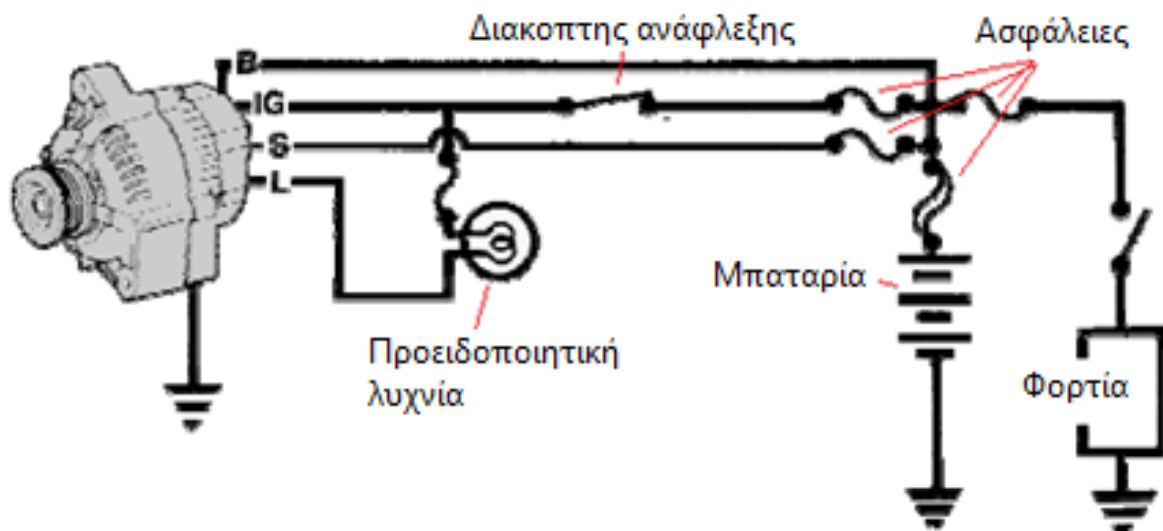


Εικόνα 1- Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος [1]

Στα σύγχρονα αυτοκίνητα η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται ραγδαία. Τα παλαιάς τεχνολογίας οχήματα με τα βασικά ηλεκτρικά συστήματα είχαν μια κατανάλωση από 150 έως 250 Watt ενώ ένα σύγχρονο συμβατικό I.X μπορεί να έχει κατανάλωση από 400 έως και 2000 Watt. Αυτό οφείλεται στην αύξηση της χρήσης ηλεκτρονικών συστημάτων (συστήματα έγχυσης, αισθητήρες-ενεργοποιητές, ηλεκτρονική ανάφλεξη, μονάδες ελέγχου κ.α.) και ηλεκτρικών βοηθητικών συστημάτων (ηλεκτρικά παράθυρα-καθρέφτες, θερμαινόμενα καθίσματα, πρόσθετοι ανεμιστήρες κλιματισμού κ.α.). Με την αντικατάσταση του “δυναμό” με τον εναλλακτήρα, οι απαιτήσεις ενός σύγχρονου οχήματος σε ηλεκτρική ενέργεια ικανοποιούνται επαρκώς. Εν κατακλείδι, στα σύγχρονα οχήματα γίνεται αποκλειστικά χρήση εναλλακτών, οπότε είναι άσκοπο και χρονοβόρο να αναλυθεί μια ξεπερασμένη και χωρίς εφαρμογή τεχνολογία στη συγκεκριμένη πτυχιακή εργασία.

Εναλλακτήρας (Γεννήτρια Εναλλασσόμενου ρεύματος)

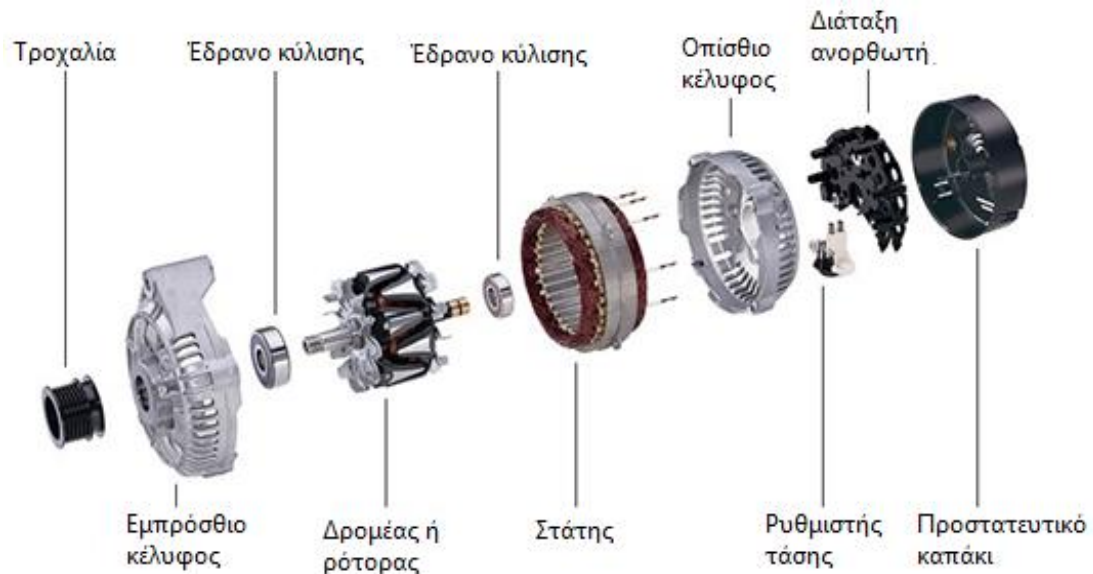
Η έξοδος ενός εναλλακτήρα είναι συνεχές ρεύμα (DC), ωστόσο αρχικά παράγεται εναλλασσόμενο ρεύμα (AC) και στην συνέχεια μετατρέπεται σε συνεχές για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού συστήματος και της μπαταρίας. Ένα απλό σχέδιο για το σύστημα φόρτισης παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 2).



Εικόνα 2 - Σύστημα φόρτισης [2]

Δομή εναλλακτήρα

Τα βασικά εξαρτήματα ενός εναλλακτήρα φαίνονται στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 3).



Εικόνα 3 - Βασικά εξαρτήματα εναλλακτήρα [3]

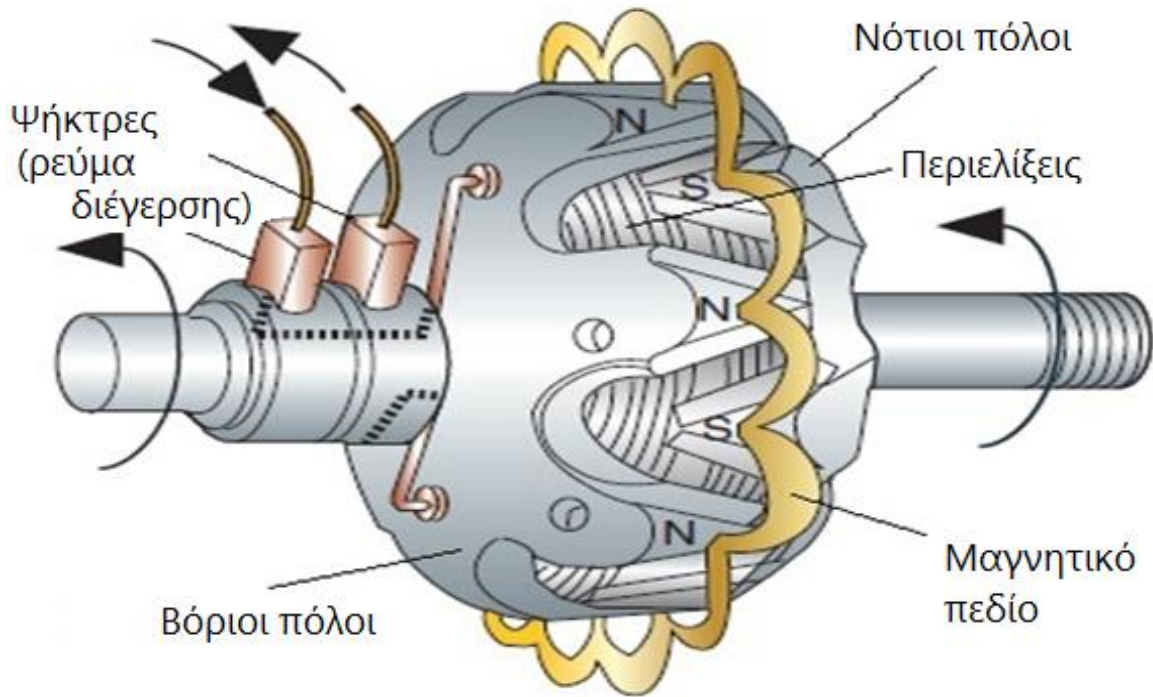
Δρομέας ή ρότορας

Ο δρομέας είναι τύπου προεκτεινόμενων πόλων. Ένας κοινός δρομέας περιλαμβάνει 12 πόλους (6 ζεύγη πόλων). Η περιέλιξη και οι πόλοι εδράζονται στον άξονα του δρομέα. Τα άκρα της περιέλιξης της διέγερσης συνδέονται με δύο δακτυλίους, οι οποίοι είναι μονωμένοι από τον άξονα (Εικόνα 4). Όταν (μέσω των δακτυλίων ολίσθησης ψηκτρών) υπάρχει διέλευση



Εικόνα 4 – Δρομέας [4]

ρεύματος στις περιελίξεις του ρότορα (πηνίο), παράγεται ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Τα “δάκτυλα” στο ένα κομμάτι πόλου δίνουν νότιους πόλους (S, South), και τα “δάκτυλα” στο άλλο κομμάτι δίνουν βόρειους πόλους (N, North). Το τελικό αποτέλεσμα είναι ένα πλήθος πόλων που εναλλάσσονται σε βόρειους και νότιους (Εικόνα 5). Όσο μεγαλύτερο το ρεύμα το

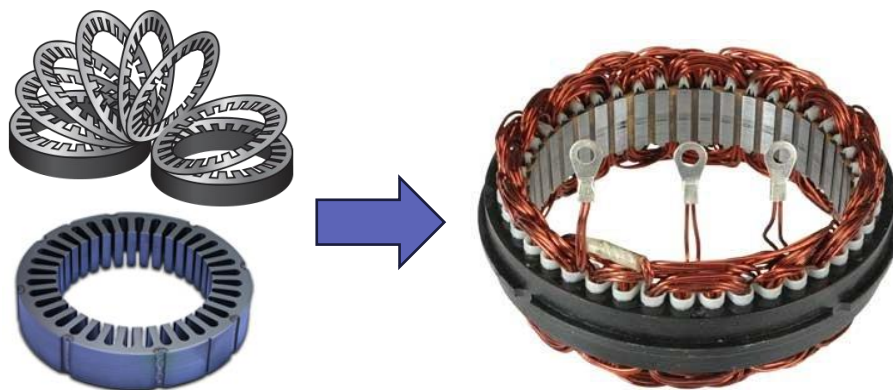


Εικόνα 5 - Πόλοι δρομέα [5]

οποίο διέρχεται από την περιέλιξη, τόσο πιο ισχυρό το μαγνητικό πεδίο και κατά συνέπεια τόσο μεγαλύτερη η τάση που παράγεται.

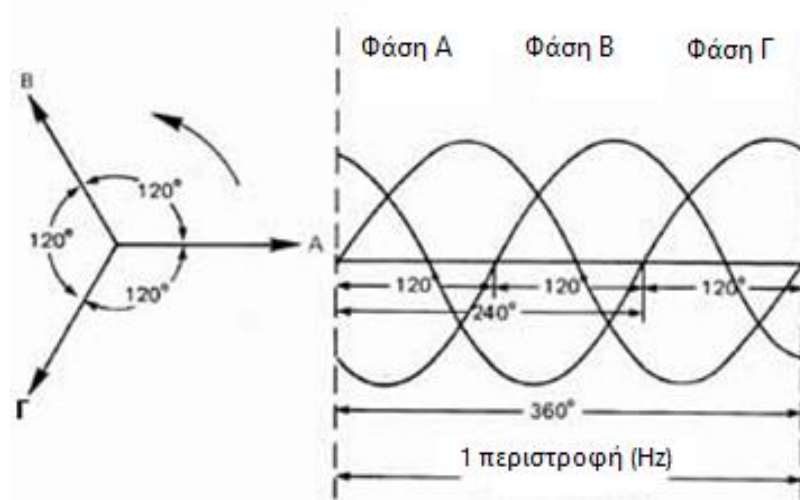
Στάτης

Ένας κοινός στάτης κατασκευάζεται με τρεις ομάδες τυλιγμάτων (πηνίων) που τοποθετούνται επάνω σε σιδερένιο πλαίσιο με μορφή φύλλων (Εικόνα 6). Οι περιελίξεις



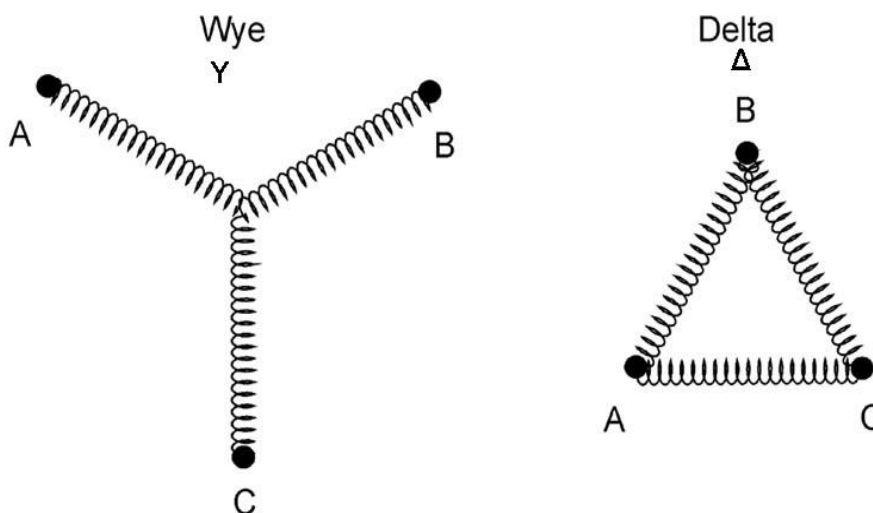
Εικόνα 6- Σιδερένιο πλαίσιο γυμνό (αριστερά) & στάτης με τυλίγματα (δεξιά) [6][7][8]

πραγματοποιούνται με χάλκινο αγωγό ο οποίος είναι μονωμένος με επίστρωση ρητίνης. Τα τυλίγματα είναι τρία και η έξοδος από το κάθε ένα από αυτά έχει το ίδιο ημιτονοειδές σχήμα, όπως επίσης και μία διαφορά φάσης 120° . Ο συνδυασμός αυτών των τριών φάσεων δίνει μια ομάδα αλληλεπικαλυπτόμενων ρευμάτων που ονομάζονται τριφασικό ρεύμα (Εικόνα 7). Στη



Εικόνα 7- Τριφασικό ρεύμα [9]

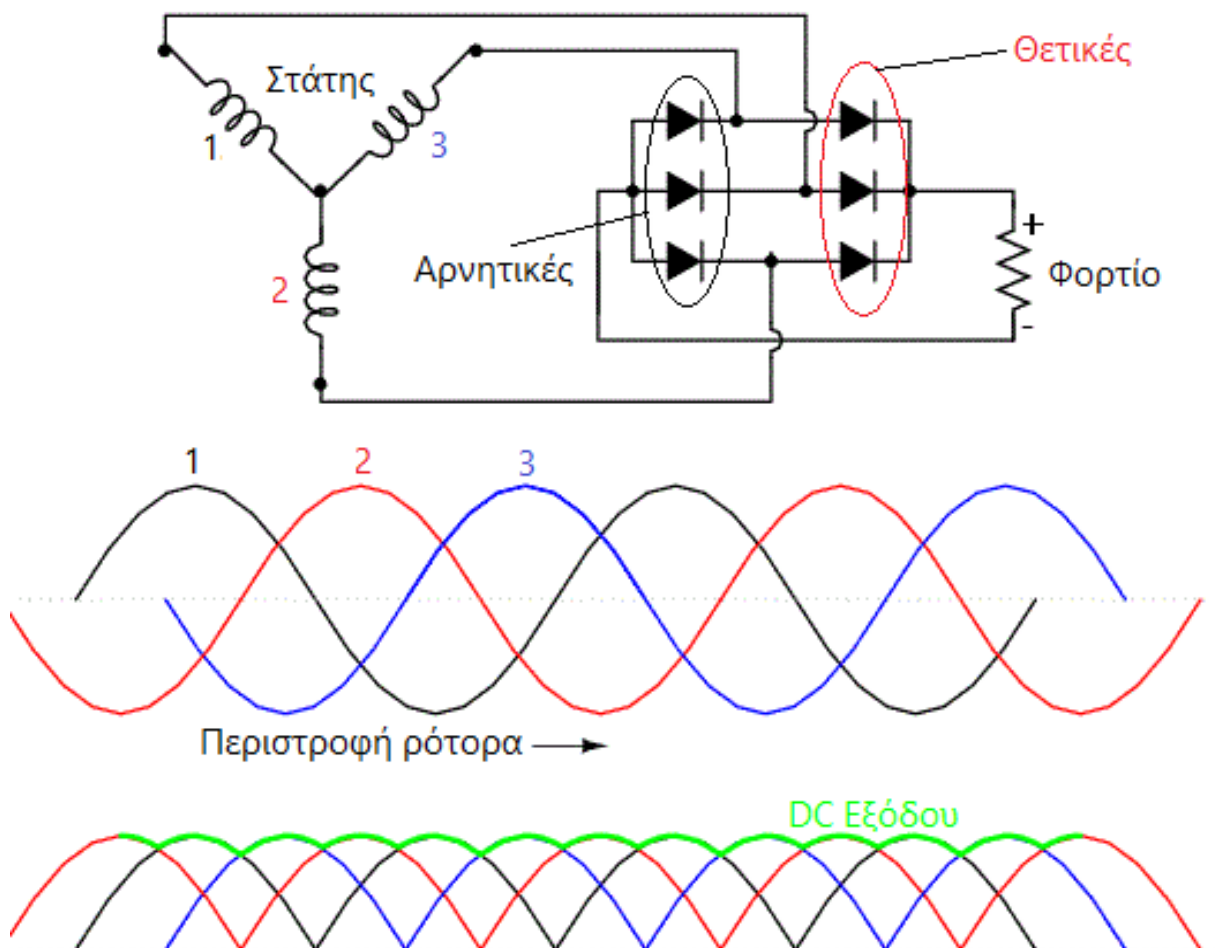
συνέχεια το τριφασικό ρεύμα μετατρέπεται με την βοήθεια της ανορθωτικής διάταξης σε συνεχές ρεύμα (DC) για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο ηλεκτρικό και ηλεκτρονικό σύστημα του οχήματος. Οι τρεις ομάδες πηνίων στον στάτη συνδέονται είτε σε σχήμα Υ (αστέρα) είτε σε σχήμα Δ (τρίγωνο) όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 8. Η σύνδεση με αστέρα χρησιμοποιείται σε εναλλακτήρες όπου απαιτείται μεγάλη τάση εξόδου με μικρή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα του εναλλακτήρα (φορτηγά, συστήματα με ονομαστική τάση 24 V). Τα τυλίγματα του στάτη με σύνδεση τριγώνου χρησιμοποιούνται όταν απαιτείται ρεύμα μεγάλης έντασης στην έξοδο του εναλλακτήρα.



Εικόνα 8 - Σύνδεση Υ (αστέρας) και Δ (τρίγωνο) [10]

Ανορθωτής

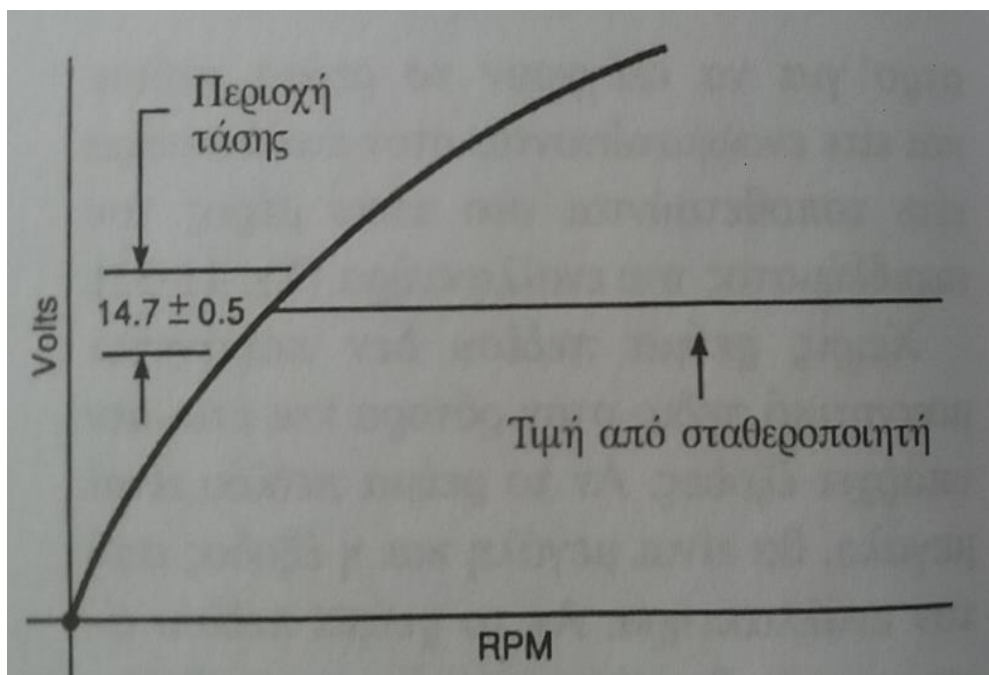
Σκοπός του ανορθωτή είναι η μετατροπή του εναλλασσόμενου ρεύματος (που παράγεται στον στάτη) σε συνεχές, για την λειτουργία του ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού συστήματος. Η ανόρθωση (ή μετατροπή) του τριφασικού ρεύματος (εναλλασσόμενη τάση σε συνεχές τάση) που παράγεται από τον στάτη πραγματοποιείται με διόδους. Η διάδος όπως είναι γνωστό επιτρέπει την διέλευση ρεύματος μόνο προς μία κατεύθυνση (ορθή πόλωση διόδου). Για την ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης του στάτη, συνήθως χρησιμοποιούνται 6 διόδοι (Εικόνα 9). Κάθε διάδος συνδέεται ηλεκτρικά με έναν από τους ακροδέκτες του στάτη και είτε με τη γη είτε με τον θετικό ακροδέκτη του εναλλακτήρα. Για κάθε παλμό εναλλασσόμενης τάσης στο πηνίο του στάτη παράγεται ένας παλμός συνεχούς τάσης. Το συνεχές ρεύμα εξόδου είναι γνωστό σαν παλλόμενο συνεχές ρεύμα πλήρους κύματος.



Εικόνα 9 - Ανόρθωση τριφασικού ρεύματος σε συνεχές με 6 διόδους

Ρυθμιστής τάσης

Η ιδιότητα του ρυθμιστή τάσης είναι να διατηρεί την τάση της γεννήτριας (σχεδόν) σταθερή σε όλες τις στροφές και τις περιπτώσεις φορτίου, στην αναγκαία τιμή, έτσι ώστε οι καταναλωτές να μην είναι εκτεθειμένοι σε αυξομειώσεις τάσης. Στο Διάγραμμα 1 παρουσιάζεται ένα διάγραμμα τάσης γεννήτριας – Σ.Α.Λ.. Παρατηρείται ότι ο ρυθμιστής διατηρεί την τάση σταθερή σε ορισμένο πεδίο, διότι χωρίς ρυθμιστή τάσης, με την αύξηση στροφών, θα αυξανόταν η τάση εξόδου. Ο ρυθμιστής είναι κατασκευασμένος με τέτοιον τρόπο,



Διάγραμμα 1 - Περιορισμός τάσης εξόδου από τον ρυθμιστή τάσης [11]

έτσι ώστε στα συστήματα των 12 V να παρέχει τάση γεννήτριας περίπου 14.7 V και στα συστήματα των 24 V περίπου 28 V. Στην Εικόνα 10 παρουσιάζονται δύο διαφορετικοί ρυθμιστές. Ο ένας (αριστερά) είναι ενιαίος με την θήκη για τις ψήκτρες και ο δεύτερος είναι χωρίς την θήκη (συνδέεται με καλώδια στις ψήκτρες). Οι ακροδέκτες του συμβολίζονται με :

- D+ : Ρεύμα που έρχεται από τις θετικές διόδους.
- D- : Ρεύμα που φεύγει προς την γείωση.
- DF (ή FLD σε ορισμένες περιπτώσεις): Διέγερση. Από εκεί εισέρχεται το ρεύμα στο τύλιγμα μέσω των ψηκτρών.

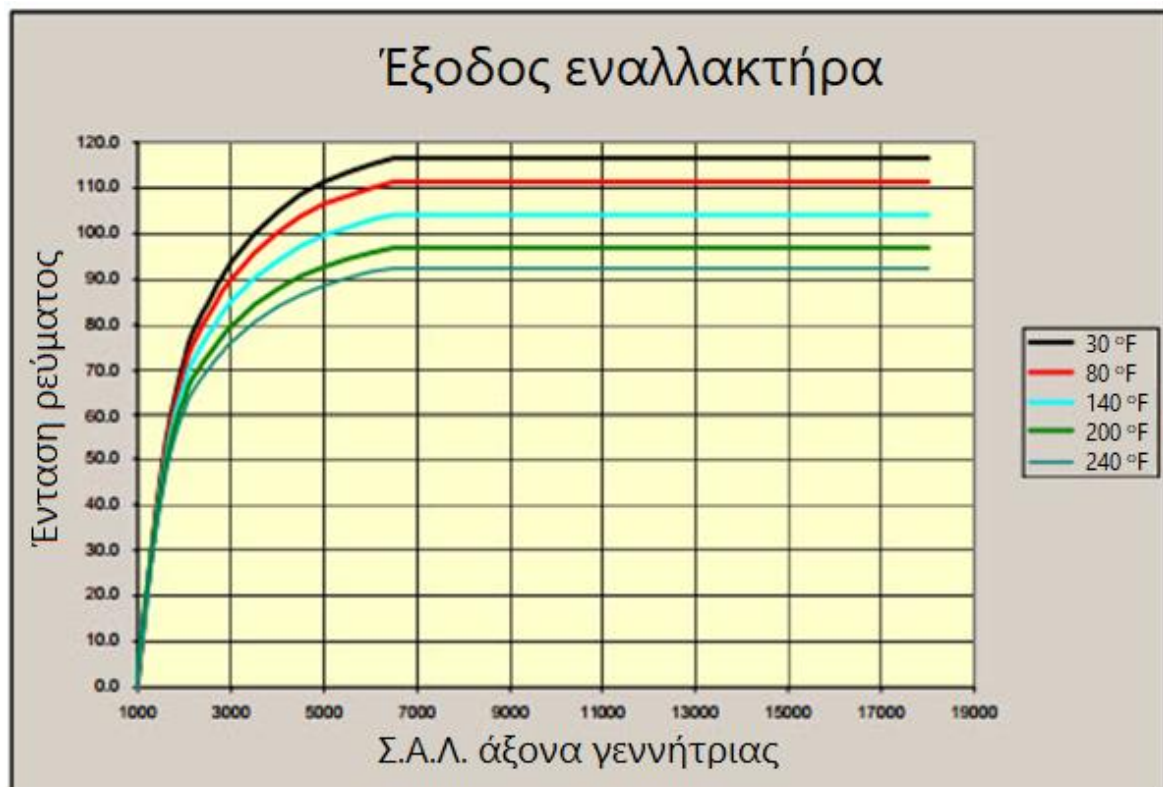


Εικόνα 10 - Τύποι ρυθμιστών τάσης [12][13]

Ο ρυθμιστής τάσης είναι το πιο βασικό κομμάτι του συστήματος φόρτισης. Παρακολουθεί την τάση της μπαταρίας και του ρότορα ταυτόχρονα. Επιπλέον ρυθμίζει το πεδίο (ρεύμα διέγερσης) του ρότορα, ανάλογα με τις παραπάνω τάσεις, για τον έλεγχο της τάσης εξόδου του εναλλακτήρα.

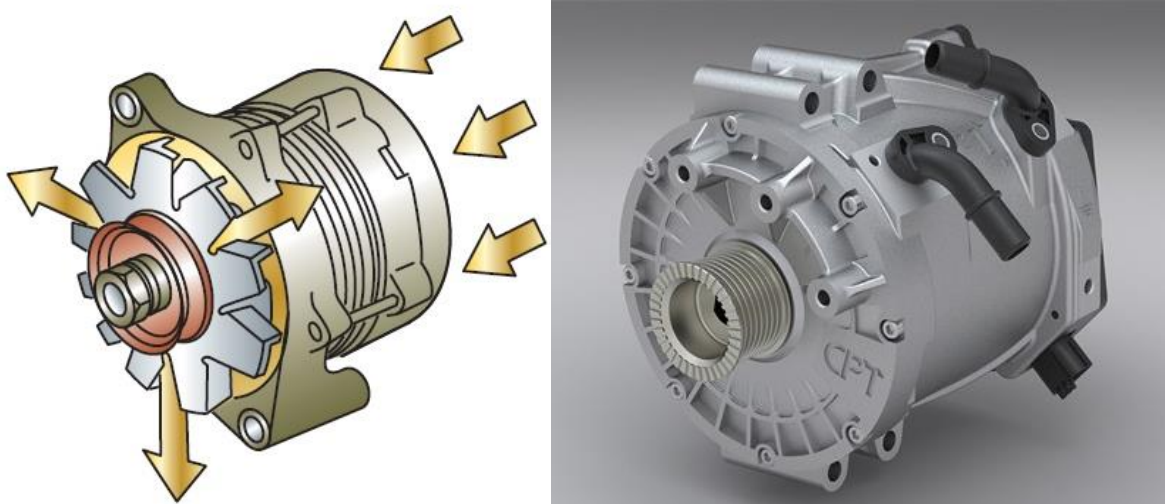
Ψύξη του εναλλακτήρα

Η θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την παραγωγή ρεύματος στη γεννήτρια πρέπει να διαχέεται στο περιβάλλον, για την προστασία της μόνωσης των περιελίξεων και των



Διάγραμμα 2 - Απόδοση εναλλακτήρα σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία [14]

ηλεκτρονικών εξαρτημάτων (δίοδοι) στη γεννήτρια και το ρυθμιστή τάσης. Επιτρεπόμενα όρια θερμοκρασιών είναι από 80 °C έως 120 °C (176 °F έως 248 °F). Στο Διάγραμμα 2, παρουσιάζεται η σχέση της θερμοκρασίας και του ρεύματος εξόδου της γεννήτριας, δηλαδή της απόδοσής της. Όσο αυξάνεται η θερμοκρασία τόσο μειώνεται και η απόδοση της γεννήτριας. Υπάρχουν δύο βασικοί τρόποι (Εικόνα 11) ψύξης του εναλλακτήρα:



Εικόνα 11 – Αερόψυκτος εναλλακτήρας (αριστερά) και υδρόψυκτος εναλλακτήρας (δεξιά) [15][16]

- Ανοιχτού κυκλώματος (Με αέρα, αερόψυκτοι) .
- Κλειστού κυκλώματος (Με λάδι, ελαιόψυκτοι, με νερό ή υδρογόνο, υδρόψυκτοι)

Η ψύξη με αέρα είναι η κυριότερη μέθοδος ψύξης των εναλλακτήρων επειδή είναι απλή (χωρίς πρόσθετα εξαρτήματα) και αρκετά αποτελεσματική. Σε εναλλακτήρες που αποδίδουν μεγάλη ισχύ, η απομάκρυνση της θερμότητας με αέρα δεν αρκεί να επαρκή για την ψύξη τους. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται είτε ψύξη με λάδι είτε με υδρογόνο είτε με νερό.

Βασικά χαρακτηριστικά και εφαρμογές

Οι παράγοντες που καθορίζουν την τιμή της παραγόμενης τάσης εξόδου από έναν εναλλακτήρα είναι τρεις:

- Η ένταση του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Καθορίζεται από την τιμή της τάσης και του ρεύματος του πεδίου που εφαρμόζεται. Αν η ένταση του μαγνητικού πεδίου αυξηθεί τότε αυξάνονται οι μαγνητικές γραμμές και η τιμή της τάσης που παράγεται.
- Η ταχύτητα περιστροφής του μαγνητικού πεδίου του ρότορα. Αν αυξηθεί η ταχύτητα περιστροφής του ρότορα, τότε αυξάνονται και οι μαγνητικές γραμμές που τέμνονται

από τον αγωγό (στάτη) ανά δευτερόλεπτο, με αποτέλεσμα την αύξηση της τιμής της παραγόμενης τάσης.

→ Το πλήθος (αριθμός) των αγωγών που περιτυλίγονται στον στάτη. Αν αυξηθεί ο αριθμός των περιελίξεων στον στάτη, τότε αυξάνεται και η τιμή της παραγόμενης τάσης.

Τα χαρακτηριστικά μεγέθη ενός εναλλακτήρα είναι:

→ Η τάση λειτουργίας (14 ή 28 V).

→ Η ονομαστική ισχύς σε KW.

→ Η ονομαστική ένταση ρεύματος σε A.

Π.χ. ένα όχημα χρησιμοποιεί τον εναλλακτήρα με τα χαρακτηριστικά της Εικόνας 12.



Εικόνα 12 - Χαρακτηριστικά στοιχεία εναλλακτήρα [17]

→ Η τάση λειτουργίας είναι 14 V.

→ Η ένταση ρεύματος είναι 23 A για την βραδυπορία (ρελαντί) του οχήματος και 55 A για την ονομαστική τιμή.

→ Η παραγόμενη ισχύς είναι: $P = V * A [W]$, άρα :

- $P_{min} = 14 * 23 = 322 W$, και
- $P_{max} = 14 * 55 = 770 W$

Στις περισσότερες γεννήτριες η ισχύς δεν αναγράφεται στα χαρακτηριστικά “ταμπελάκια” και πρέπει να υπολογίζεται. Πολλές φορές, οι γεννήτριες χρειάζονται περισσότερες από 2000 Σ.Α.Λ για την παραγωγή της προκαθορισμένης ισχύος εξόδου.

Ηλεκτρικά φορτία οχήματος

Τα φορτία τα οποία πρέπει να καλύπτει ένας εναλλακτήρας διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

- Συνεχή. Είναι φορτία που επιβαρύνουν τον εναλλακτήρα συνεχώς κατά τη λειτουργία του οχήματος, όπως είναι η ανάφλεξη (για βενζινοκινητήρες) ή το σύστημα έγχυσης καυσίμου.
- Παρατεταμένα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν φορτία τα οποία επιβαρύνουν τον εναλλακτήρα για σημαντικό χρονικό διάστημα, όπως είναι τα φώτα διασταύρωσης ή πορείας (κατά τις νυχτερινές ώρες) ή το ηχοσύστημα.
- Διακοπτόμενα. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκουν φορτία τα οποία ενεργοποιούνται περιστασιακά και ενδεχομένως όχι για μεγάλο χρονικό διάστημα, όπως είναι τα φλας, τα ηλεκτρικά παράθυρα κ.λπ.. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται η μέση τιμή από ορισμένα ενδεικτικά ηλεκτρικά φορτία ενός σύγχρονου οχήματος για σύστημα των 12 V (14 V).

Κατηγορία	Κατανάλωση	Ισχύς (W)	Ένταση ρεύματος (A)
Συνεχή φορτία	Ανάφλεξη	30	2
	Έγχυση καυσίμου	70	5
	Αντλία καυσίμου	70	5
	Όργανα μέτρησης	10	1
Παρατεταμένα φορτία	Πίσω φώτα	30	2
	Φώτα πινακίδας κυκλοφορίας	10	1
	Φώτα διασταύρωσης	200	15
	Φώτα πορείας	160	12
	Φωτισμός ταμπλό	25	2
	Ηχοσύστημα	15	1
Διακοπτόμενα φορτία	Σύστημα θέρμανσης	50	3.5
	Δείκτες κατεύθυνσης (φλάς)	50	3.5
	Φώτα πέδησης	40	3
	Υαλοκαθαριστήρες εμπρός	80	6
	Υαλοκαθαριστήρες πίσω	50	3.5
	Ηλεκτρικά παράθυρα	150	11
	Συμπιεστής A/C	150	11
	Κινητήρας συστήματος θέρμανσης	80	6
	Θέρμανση πίσω παραθύρου	120	9
	Κόρνα	40	3
	Φώτα όπισθεν	40	3
	Βοηθητικές λάμπες	110	8
	Ηλεκτρικοί καθρέπτες	10	1

Πίνακας 1 - Ενδεικτικά ηλεκτρικά φορτία οχήματος

Επιλογή του εναλλακτήρα

Ο εναλλακτήρας στο ρελαντί (700 Σ.Α.Λ. του κινητήρα και 2000 του εναλλακτήρα) θα πρέπει να είναι σε θέση να καλύπτει τα συνεχή και παρατεταμένα φορτία. Στις υπόλοιπες στροφές θα πρέπει να καλύπτει όλα τα είδη φορτίων (συνεχή, παρατεταμένα και διακοπτόμενα), πολλαπλασιαζόμενα όμως με έναν συντελεστή βαρύτητας σ_{β} (0.1-0.3). Αυτό συμβαίνει διότι θεωρείται αδύνατο να συνυπάρξουν ταυτόχρονα όλα τα φορτία που ανήκουν στην τρίτη κατηγορία και μάλιστα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Επίσης το συνολικό ρεύμα που προκύπτει, πολλαπλασιάζεται συνήθως με έναν συντελεστή $\sigma_{μπ} = 1.3-1.5$ για την κάλυψη των απαιτήσεων φόρτισης της μπαταρίας. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρικά φορτία ενός Ι.Χ., είναι:

$$\rightarrow \text{Συνεχή φορτία} = 13 \text{ A}$$

$$\rightarrow \text{Παρατεταμένα φορτία} = 21 \text{ A}$$

$$\rightarrow \text{Διακοπτόμενα φορτία} = 72 \text{ A}$$

Να βρεθούν τα χαρακτηριστικά του εναλλακτήρα που απαιτούνται για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων.

Το όχημα είναι Ι.Χ. και έτσι συμπεραίνεται ότι λειτουργεί με σύστημα των 12 V, άρα η ένταση των ρευμάτων είναι υπολογισμένη με τάση 14 V. Στο ρελαντί το όχημα έχει το εξής ηλεκτρικό φορτίο:

$$\text{Φορτία ρελαντί} = \text{Συνεχή φορτία} + \text{Παρατεταμένα φορτία} [A]$$

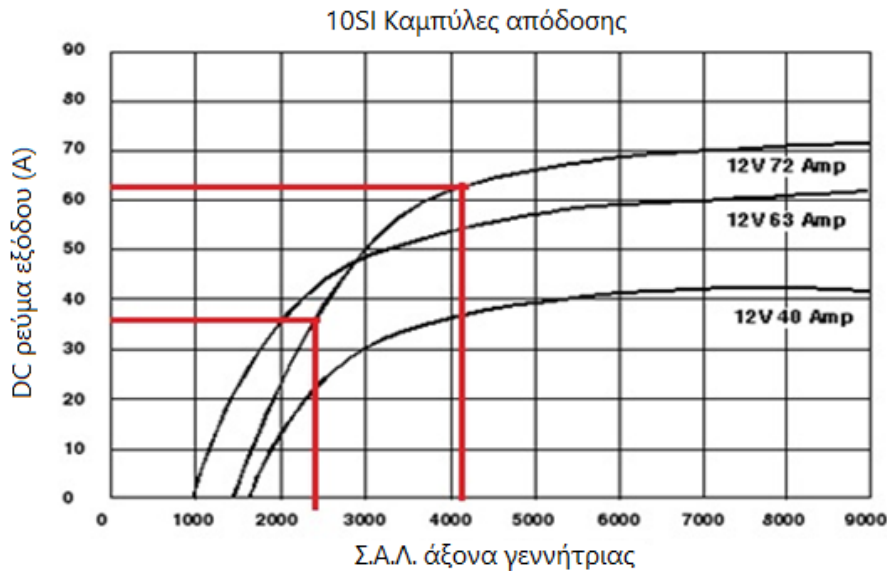
$$I_{\text{ρελαντί}} = 13 + 21 = 34 \text{ A}$$

Στις υπόλοιπες στροφές:

$$I_{\text{ολικό}} = \left(\text{Συνεχή φορτία} + \text{Παρατεταμένα φορτία} + (\text{Διακοπτόμενα φορτία} * \sigma_{\beta}) \right) * \sigma_{μπ} [A]$$

$$I_{\text{ολικό}} = (13 + 21 + (72 * 0.1)) * 1.5 = 61.8 \cong 62 \text{ A}$$

Αφού έγινε ο υπολογισμός των φορτίων, θα πρέπει να γίνει επιλογή από το γράφημα καμπυλών απόδοσης του εναλλακτήρα που θα χρησιμοποιηθεί, για την χρήση της κατάλληλης παραλλαγής, που θα καλύπτει τα φορτία που υπολογίσθηκαν (το 12 V σημαίνει ότι είναι για σύστημα με 12 V τάση λειτουργίας). Η ονομαστική ένταση εξόδου καθορίζεται από τον αριθμό των τυλιγμάτων του δρομέα. Ο εναλλακτήρας που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο 10SI της Delco. Όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3, η πρώτη παραλλαγή δεν είναι κατάλληλη, διότι



Διάγραμμα 3 - Διάγραμμα ρεύματος - στροφών για 3 παραλλαγές του εναλλακτήρα 10SI [18]

αποδίδει μόνο 40 A. Η δεύτερη (63 A) μπορεί να φαίνεται ιδανική ($62.5 < 63$ A) αλλά παρατηρείται ότι το μέγιστο ρεύμα το παράγει σε αρκετά υψηλές στροφές (9000 Σ.Α.Λ.) καθώς επίσης η μέγιστη ένταση ρεύματος που αποδίδει είναι πολύ κοντά σε αυτό που απαιτείται από το όχημα. Αξίζει να επισημανθεί, ότι η γεννήτρια δεν περιστρέφεται με της ίδιες στροφές του κινητήρα. Οι λόγοι μετάδοσης κυμαίνονται από 1:2.5 έως 1:5. Στο ρελαντί ο κινητήρας λειτουργεί στις 700 Σ.Α.Λ. και χρειάζεται 34 A. Στο διάγραμμα παρατηρείται ότι η γεννήτρια τα αποδίδει τα 34 A, περίπου στις 2400 Σ.Α.Λ.. Η σχέση μετάδοσης είναι (N_1 για κινητήριο και N_2 για κινούμενο):

$$I = \frac{N_1}{N_2} = \frac{700}{2400} = 0.29$$

Γνωρίζοντας τη διάμετρο της τροχαλίας του κινητήρα υπολογίζεται η διάμετρος της τροχαλίας της γεννήτριας. Π.χ. αν η διάμετρος της τροχαλίας του κινητήρα είναι 100 mm τότε η διάμετρος της τροχαλίας της γεννήτριας, για να υπάρχει η σχέση μετάδοσης 0.29, θα πρέπει να είναι:

$$I = \frac{N_1}{N_2} = \frac{d_2}{d_1} \Leftrightarrow 0.29 = \frac{X}{100} \Leftrightarrow X = 100 * 0.29 \Leftrightarrow X = 29 \text{ mm}$$

Η διάμετρος της τροχαλίας θα πρέπει να είναι 29 mm. Η γεννήτρια αποδίδει τη μέγιστη απαιτούμενη ένταση ρεύματος περίπου στις 4200 Σ.Α.Λ., άρα ο κινητήρας θα πρέπει να περιστρέφεται με:

$$N_1 = N_2 * I = 4200 * 0.29 = 1218 \text{ Σ.Α.Λ.}$$

Ο κατάλληλος εναλλακτήρας θα έχει χαρακτηριστικά 12 V, 72 A γιατί υπερκαλύπτει τις ανάγκες σε σχέση με την παραλλαγή που αποδίδει 63 A. Ο υπολογισμός της γεννήτριας χρειάζεται μόνο για μη εμπορικά οχήματα (αυτοσχέδια) αφού σε όλα τα εμπορικά οχήματα η γεννήτρια είναι ήδη υπολογισμένη και κωδικοποιημένη από κάθε κατασκευαστή για κάθε όχημα.

Βαθμός απόδοσης

Ο βαθμός απόδοσης επηρεάζεται από :

→ Μηχανικές απώλειες

- Τριβή ψηκτρών και εδράνων
- Ο δακτυλιοειδής ρήτορας και ο ανεμιστήρας ψύξης

→ Ηλεκτρικές απώλειες

- Καλωδιώσεις δρομέα και στάτη
- Ανορθωτική διάταξη
- Ρυθμιστής τάσης

→ Μαγνητικές απώλειες

- Τυλίγματα δρομέα και στάτη

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2) παρατηρείται ότι ανάλογα με της στροφές της γεννήτριας, ποιες απώλειες αυξάνονται ή μειώνονται.

Στροφές ανά λεπτό	1800	6000
Μηχανικές απώλειες	2%	6%
Απώλειες διέγερσης (ρότορας)	7%	3%
Μαγνητικές απώλειες (στάτης)	21%	20%
Απώλειες χαλκού	49%	57%
Απώλειες ισχύος ανόρθωσης	21%	14%

Πίνακας 2 – Μείωση (πράσινο) και αύξηση (κόκκινο) των απωλειών του εναλλακτήρα

Από τον πίνακα συμπεραίνεται ότι η μεγαλύτερη απώλεια ισχύος προέρχεται από τις απώλειες χαλκού.

Παράδειγμα βαθμού απόδοσης γεννήτριας

Οι χαρακτηριστικές καμπύλες του εναλλακτήρα είναι συνάρτηση του ρεύματος εξόδου (I σε Α υπό σταθερή τάση) προς της στροφές του (σε Σ.Α.Λ.) και η ισχύς εισόδου προς τις στροφές εισόδου (του κινητήρα που παίρνει κίνηση). Το Διάγραμμα 4 απεικονίζει τις χαρακτηριστικές καμπύλες ενός τυπικού εναλλακτήρα υπό συγκεκριμένες συνθήκες όπως:

1. Σταθερή τάση εξόδου (ρυθμισμένη).
2. Σταθερή θερμοκρασία 300 K (25 °C).

Στο διάγραμμα 3 διακρίνονται :

1. Η ονομαστική ένταση ρεύματος.
2. Τα 2/3 της ονομαστικής έντασης.
3. Η μέγιστη ένταση.
4. Η ένταση ρεύματος στο ρελαντί.



Διάγραμμα 4 - Χαρακτηριστικές καμπύλες εναλλακτήρα ρεύματος και ισχύος εξόδου [19]

Τα διαγράμματα χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση ενός εναλλακτήρα για μια εφαρμογή και για τον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης του σε όλες της στροφές. Επειδή στα οχήματα οι γεννήτριες δεν περιστρέφονται με σταθερές στροφές, είναι επιθυμητό να έχουν έναν καλό βαθμό απόδοσης σε ολόκληρο το φάσμα στροφών (700 – 8000 Σ.Α.Λ. σε κοινά οχήματα). Η καμπύλη της ισχύος εισόδου βοηθά στο να γίνει επιλογή του μίαντα κίνησης που χρειάζεται για την μεταφορά ισχύος ή ροπής στην γεννήτρια (για την παραγωγή ρεύματος). Επίσης, η καμπύλη ισχύος σε συνδυασμό με την καμπύλη έντασης ρεύματος εξόδου, συμβάλλουν στον υπολογισμό του βαθμού απόδοσης της γεννήτριας. Ο βαθμός απόδοσης υπολογίζεται ως εξής :

$$\text{Βαθμός απόδοσης} = \frac{\text{Ισχύς εξόδου}}{\text{Ισχύς εισόδου}} * 100 \%$$

Στο Διάγραμμα 4, στις 8000 Σ.Α.Λ (ονομαστική τιμή έντασης ρεύματος εξόδου):

$$\rightarrow \text{Η ισχύς εξόδου είναι: } P_{out} = 14 \text{ V} * 70 \text{ A} = 980 \text{ W}$$

$$\rightarrow \text{Η ισχύς εισόδου είναι: } P_{in} = 2200 \text{ W}$$

Έτσι ο βαθμός απόδοσης είναι :

$$\text{Βαθμός απόδοσης} = \frac{980}{2200} * 100 \% = 0.445 \cong 0.45 \%$$

Δηλαδή, για την παραγωγή 980 W, η γεννήτρια “κλέβει” 2200 W (2.95 ίππους) από την Μ.Ε.Κ..

Στο ίδιο διάγραμμα, στα 2/3 της ονομαστικής έντασης είναι:

$$\rightarrow \text{Η ισχύς εξόδου είναι: } P_{out} = 14 \text{ V} * 45 \text{ A} = 630 \text{ W}$$

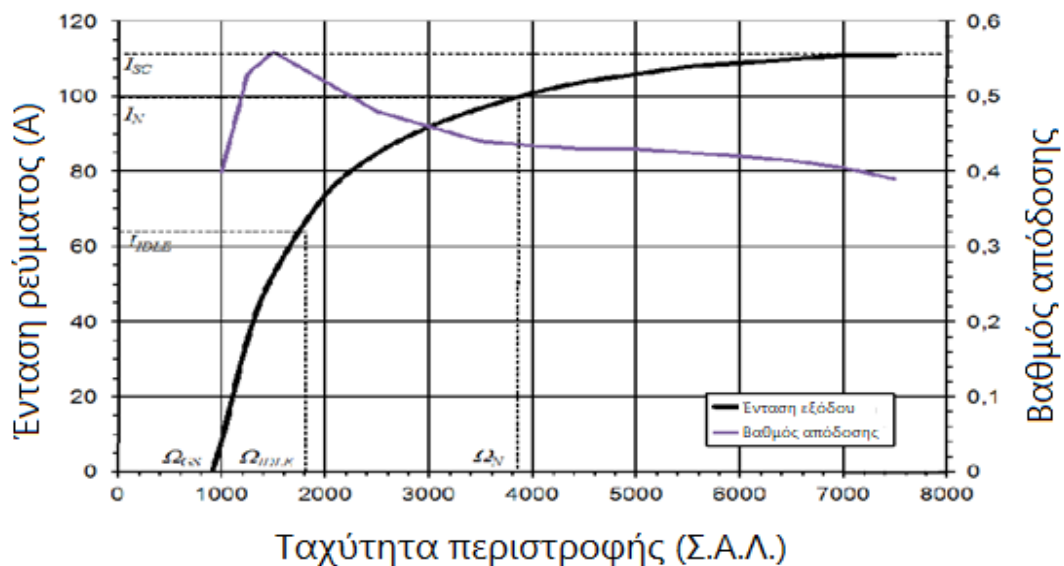
$$\rightarrow \text{Η ισχύς εισόδου είναι: } P_{in} = 1000 \text{ W}$$

Έτσι ο βαθμός απόδοσης είναι :

$$\text{Βαθμός απόδοσης} = \frac{630}{1000} * 100 \% = 0.63 \%$$

Δηλαδή, για την παραγωγή 630 W, η γεννήτρια “κλέβει” 1000 W (1.34 ίππους) από την Μ.Ε.Κ..

Γενικά οι γεννήτριες έχουν τον καλύτερο βαθμό απόδοσης σε χαμηλές στροφές και μειώνονται όσο πιο γρήγορα περιστρέφεται η γεννήτρια (Διάγραμμα 5).

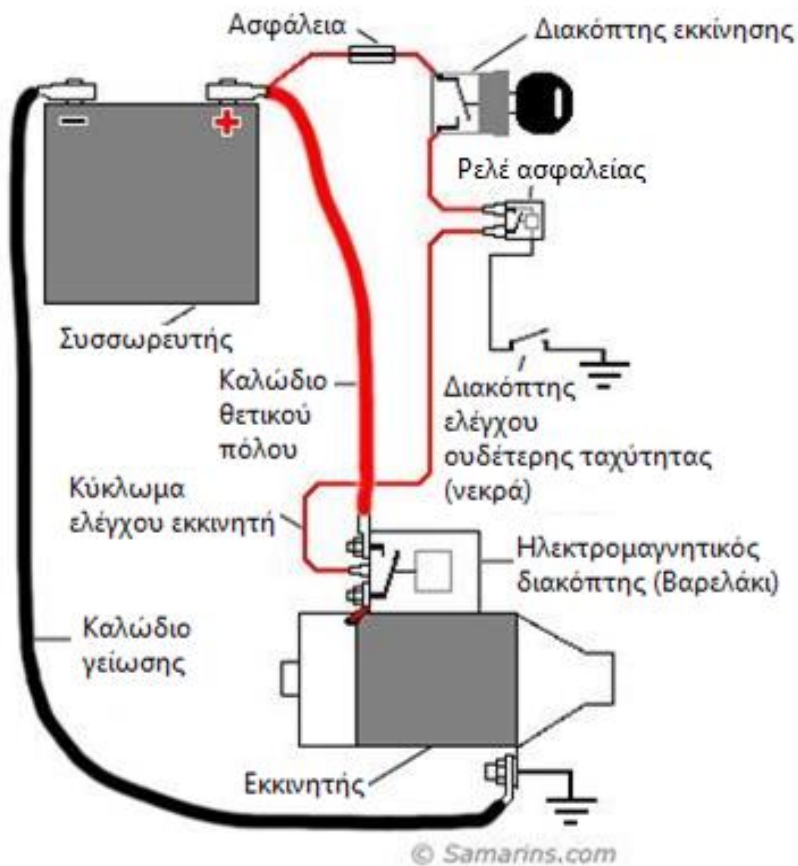


Διάγραμμα 5 - Χαρακτηριστικές καμπύλες έντασης ρεύματος και βαθμού απόδοσης [20]

Σύστημα εκκίνησης Μ.Ε.Κ. – Εκκινητής

Εισαγωγή

Η εκκίνηση μίας Μ.Ε.Κ. δεν είναι δυνατό να πραγματοποιηθεί μόνη της, διότι δεν μπορεί να έχει ροπή στις 0 Σ.Α.Λ.. Για την επίτευξη της εκκίνησης μιας Μ.Ε.Κ., πρέπει αρχικά να πραγματοποιηθεί περιστροφή του στροφαλοφόρου άξονα με την βοήθεια ενός εκκινητή έως ότου φτάσει τις ελάχιστες στροφές που είναι ικανή να παράγει την απαιτούμενη ισχύ ώστε να καλύψει τις στιγμιαίες απαιτήσεις για τη συμπίεση και τους κύκλους εναλλαγής αερίων. Τα βασικά εξαρτήματα του συστήματος εκκίνησης παρουσιάζονται στην Εικόνα 13.



Εικόνα 13 - Βασικό σχήμα συνδεσμολογίας συστήματος εκκίνησης [20]

Εκκινητής

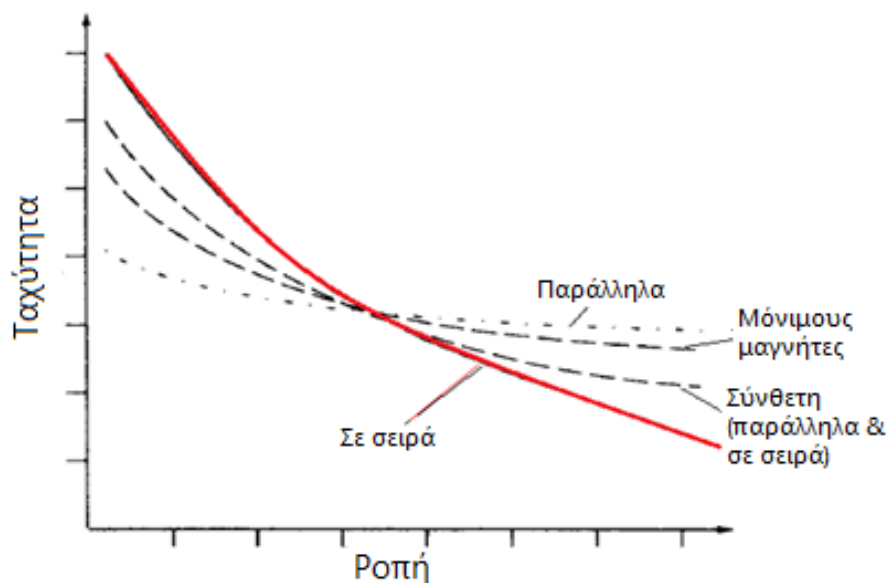
Το πιο σημαντικό εξάρτημα του συστήματος εκκίνησης είναι ο εκκινητής (ή μίζα) (Εικόνα 14). Ουσιαστικά, είναι ένας μικρός ηλεκτροκινητήρας συνεχούς ρεύματος με διέγερση



Εικόνα 14 – Εκκινητής αυτοκινήτου [21]

σειράς που φέρει έναν μηχανισμό σύμπλεξης, για την προσωρινή σύμπλεξη του ηλεκτροκινητήρα με την Μ.Ε.Κ..

Από κατασκευαστικής άποψης, ο εκκινητής είναι παρόμοιος με τις γεννήτριες συνεχούς ρεύματος, με την διαφορά ότι τα τυλίγματα τους κατασκευάζονται από αγωγούς μεγάλης διατομής (χάλκινες λάμες) ώστε να δέχονται τη μεγάλη ένταση ρεύματος για την εκκίνηση (που μπορεί να φτάσει τα 150 A για μικρούς εκκινητές και ξεπερνά πολλές φορές τα 500 A σε εκκινητές με μεγαλύτερη ισχύ). Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια με την αρχή λειτουργίας των ηλεκτροκινητήρων συνεχούς ρεύματος. Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 6) παρατηρείται η διαφορετική ροπή που έχουν διάφοροι τύποι εκκινητών ανάλογα με τα τυλίγματα διέγερσης. Η διέγερση σειράς προτιμάται γιατί παρέχει μεγάλη ροπή για την εκκίνηση της Μ.Ε.Κ..



Διάγραμμα 6 - Ποσοτικό διάγραμμα διέγερσης εκκινητών [22]

Ισχύς εκκινητή

Η ισχύς του εκκινητή εξαρτάται από το μέγεθος του κινητήρα (ή αλλιώς “κυβικά”), το είδος του κινητήρα (Otto ή Diesel), τον αριθμό των κυλίνδρων και των στροφών εκκίνησης της Μ.Ε.Κ.. Πιο αναλυτικά, οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται το μέγεθος και τα χαρακτηριστικά του εκκινητή είναι :

1. Η στατική ροπή εκκίνησης του κινητήρα (M_d). Είναι η ροπή στρέψης που απαιτείται για την περιστροφή της Μ.Ε.Κ. από στάση
2. Ροπή εκκίνησης του κινητήρα. Είναι η ροπή στρέψης που απαιτείται για την εξακολούθηση της περιστροφής της Μ.Ε.Κ..

Οπότε, ο εκκινητής πρέπει να είναι σε θέση να υπερνικήσει τη στατική ροπή της Μ.Ε.Κ. (Μ_d). Η ισχύς του καθορίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$P = \frac{M_d * n}{9740} [KW]$$

Όπου:

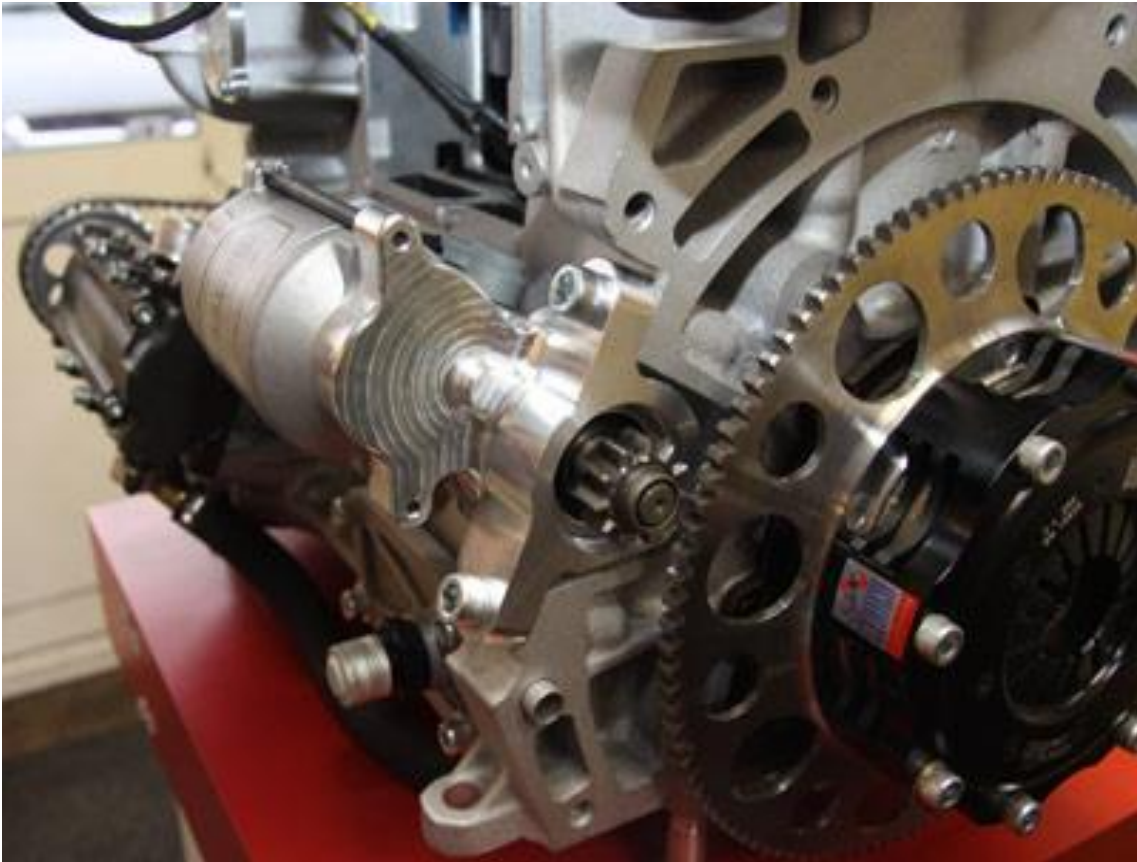
- Μ_d: στατική ροπή του κινητήρα σε Nm
- n: ο ελάχιστος αριθμός στροφών που απαιτείται την εκκίνηση του κινητήρα σε Σ.Α.Λ. (R.P.M.).

Συνήθως σε μικρούς κινητήρες η ισχύς των εκκινητών είναι της τάξης του 1 HP (0.7 KW), ενώ μπορεί να φτάσει και τους 5 HP σε μεγαλύτερους κινητήρες. Φυσικά όσο μεγαλύτερη η ισχύς τόσο μεγαλύτερος και ο όγκος του εκκινητή.

Σύμπλεξη

Η μετάδοση της κίνησης από τον εκκινητή στον κινητήρα πραγματοποιείται με ένα ζευγάρι οδοντωτών τροχών μέσω του μηχανισμού εκκίνησης. Το ένα, το πινιόν (ή γρανάζι εκκινητή) είναι τοποθετημένο στον άξονα του εκκινητή και εμπλέκεται με την οδοντωτή στεφάνη (103 – 144 για επιβατικά, 110 – 160 για επαγγελματικά οχήματα), που τοποθετείται στην περιφέρεια του σφονδύλου (βολάν), προκαλώντας έτσι την περιστροφή του κινητήρα (Εικόνα 15). Η σχέση μετάδοσης της κίνησης είναι 10:1 (για κάθε δέκα περιστροφές του πινιόν, εκτελείται μία περιστροφή του σφονδύλου). Αμέσως μόλις ο κινητήρας τεθεί σε λειτουργία, αποσυμπλέκεται το γρανάζι του εκκινητή γιατί διαφορετικά, ο εκκινητής θα παρασυρθεί σε κίνηση με δεκαπλάσιες στροφές από τις στροφές του κινητήρα, με αποτέλεσμα την

καταστροφή του δρομέα. Αυτό συμβαίνει, διότι η φυγόκεντρος δύναμη που αναπτύσσεται εκσφενδονίζει του αγωγούς του τυλίγματος από τα αυλάκια.



Εικόνα 15 - Σύμπλεξη πινιόν εκκινητή με σφόνδυλο Μ.Ε.Κ. [23]

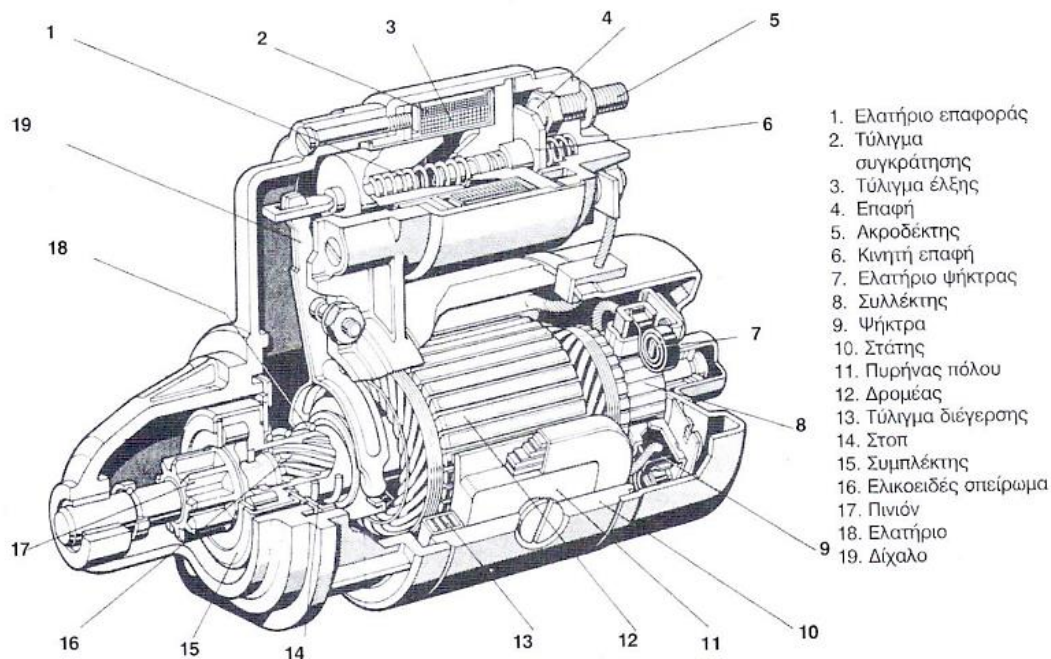
Κατάταξη

Ο τρόπος που συμπλέκεται/αποσυμπλέκεται το πινιόν με τον σφόνδυλο ονομάζεται μηχανισμός εμπλοκής και καθορίζει τον τύπο του εκκινητή. Τα βασικά είδη των εκκινητών, ανάλογα με τον μηχανισμό εμπλοκής είναι:

- Αδρανειακού τύπου (με πλωτό πινιόν).
 - Χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον σε επιβατικά οχήματα.
 - Ανάλογα με τον τρόπο κίνησης του πινιόν διακρίνονται οι εξής κατηγορίες.
 - Ελαφρού τύπου (το πινιόν κινείται σε ευθύ σφηνόδρομο).
 - Μέσου τύπου (το πινιόν κινείται σε ελικοειδή σφηνόδρομο με μεγάλο βήμα).
 - Συστήματα εμπλοκής Bendix (το πινιόν εδώ κινείται σε ελικοειδή σφηνόδρομο με πολύ μικρό βήμα).

→ Τύπου προ-εμπλοκής (με πλωτό δρομέα).

- Χρησιμοποιείται συνήθως σε βαρέα οχήματα.
- Η εμπλοκή εδώ γίνεται με τη κίνηση του δρομέα ο οποίος δεν περιστρέφεται μόνο αλλά έχει και τη δυνατότητα να κάνει αξονικές κινήσεις.



Εικόνα 16 - Δομή εκκινητή με πλωτό πινιόν, μέσου τύπου, με αυτόματη ηλεκτρομαγνητική σύμπλεξη [24]

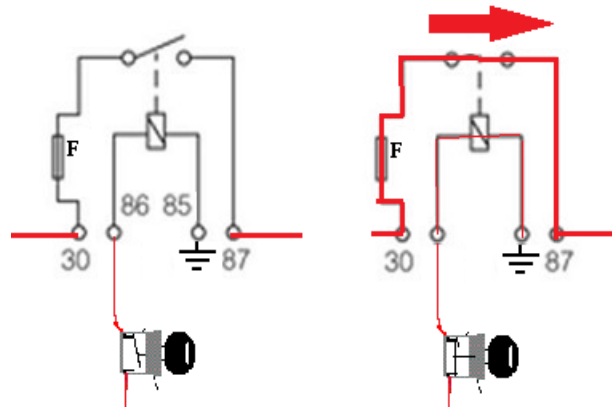
Τα περισσότερα εξαρτήματα είναι γνωστά από της μηχανές συνεχούς ρεύματος. Τα επιπλέον εξαρτήματα είναι για τον μηχανισμό σύμπλεξης του πινιόν.

Ηλεκτρομαγνήτης εκκινητή – ρελέ εκκίνησης

Για την λειτουργία του κυκλώματος του ηλεκτρικού κινητήρα εκκίνησης χρησιμοποιείται ένας διακόπτης εκκίνησης με ηλεκτρομαγνήτη (ή με την πιο συνηθισμένη ονομασία τους, ρελέ εκκίνησης). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο εκκινητής ενός οχήματος απορρόφα εκατοντάδες Ampere (A) κατά την εκκίνηση. Για να μην απαιτούνται καλώδια μεγάλης διαμέτρου και μεγάλοι διακόπτες εκκίνησης, χρησιμοποιούνται αυτοί οι διακόπτες. Έτσι ο διακόπτης εκκίνησης συνδέεται με τέτοιο τρόπο ώστε να ελέγχει το ρεύμα μικρής έντασης προς το πηνίο του ρελέ. Το κύκλωμα αυτό είναι γνωστό και ως κύκλωμα ελέγχου και συνδέεται με λεπτό καλώδιο.

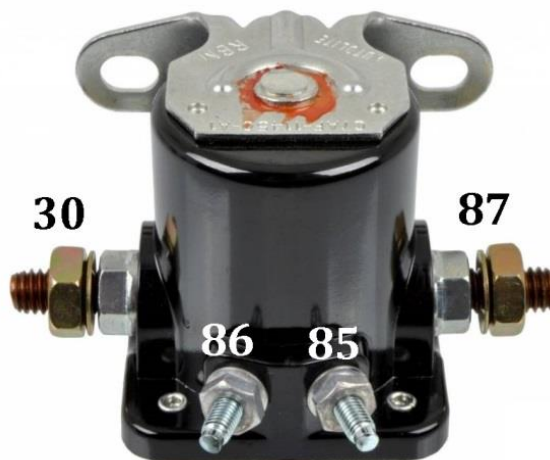
Συνδεσμολογία ρελέ εκκίνησης

Η συνδεσμολογία και η λειτουργία του ρελέ εκκίνησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17 – Συνδεσμολογία ρελέ και ροή ρευμάτων

Το ρεύμα μικρής έντασης (ελέγχου) διαρρέεται μέσω του διακόπτη εκκίνησης από τους ακροδέκτες 86 - 85. Μόλις “οπλίσει” το ρελέ, το ρεύμα μεγάλης έντασης ρέει από το 30 προς το 87. Η ασφάλεια F προστατεύει το κύκλωμα από τυχόν βραχυκυκλώματα. Στην Εικόνα 18

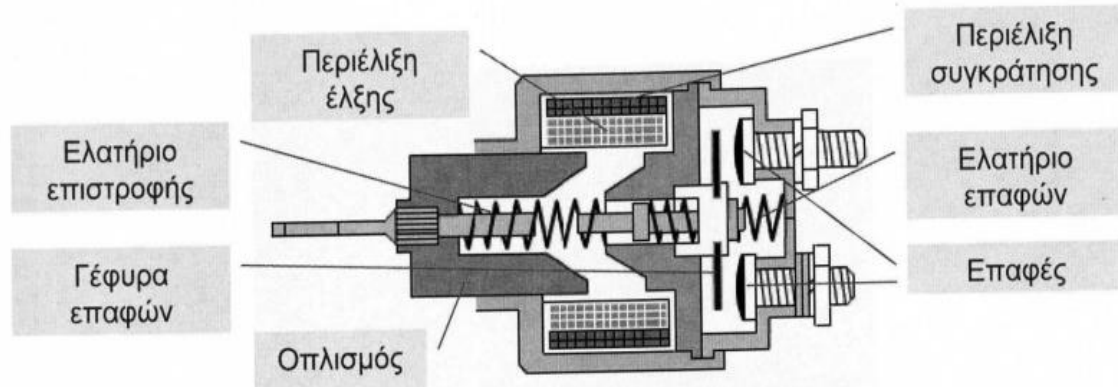


Εικόνα 18 - Ρελέ εκκίνησης [25]

παρουσιάζεται ένα ρελέ εκκίνησης. Αυτό το ρελέ διαρρέεται από ρεύμα μεγάλης έντασης (από 150 έως και 500+ A). Αυτά τα ρελέ χρησιμοποιούνται συνήθως σε εκκινητές με πλωτό δρομέα, που δεν έχουν μηχανισμό εμπλοκής με ηλεκτρομαγνήτη. Οι εκκινητές με πλωτό πινιόν έχουν έναν μηχανισμό που ωθεί το πινιόν και ονομάζεται ηλεκτρομαγνήτης εκκινητή - ρελέ εκκίνησης ή αλλιώς “βαρελάκι”. Τοποθετείται πάνω στον εκκινητή και αποτελείται από τα εξαρτήματα που παρουσιάζονται στην Εικόνα 19.

Ο ηλεκτρομαγνήτης έχει δύο σκοπούς:

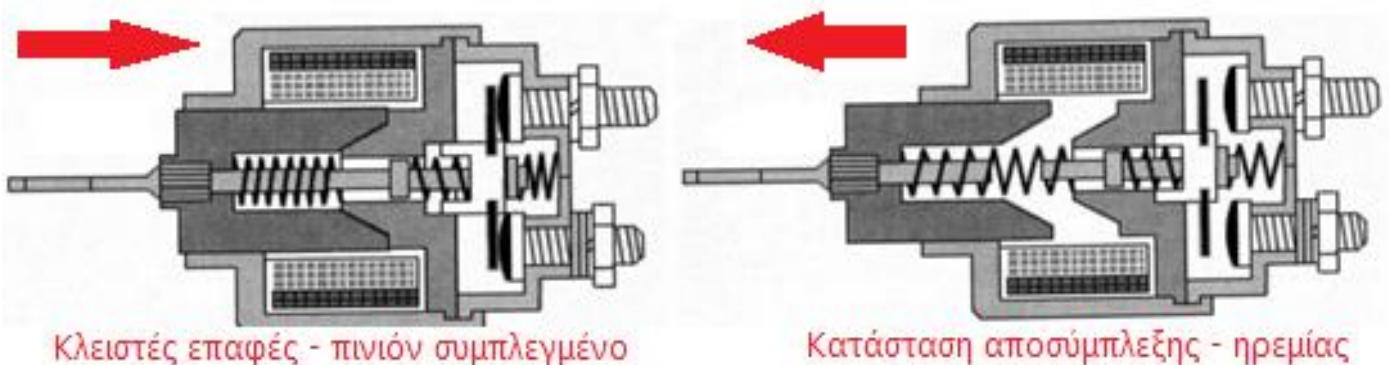
1. Τη σύμπλεξη του πινιόν του εκκινητή με τον σφόνδυλο.
2. Το κλείσιμο του κυρίως κυκλώματος για τη διαρροή ρεύματος προς τον εκκινητή.



Εικόνα 19 - Εξαρτήματα ηλεκτρομαγνήτη εκκινητή – ρελέ εκκίνησης [26]

Λειτουργία

Όταν το πηνίο έλξης διαρρέεται από ρεύμα, εκλύει τον οπλισμό υπερνικώντας τη δύναμη του ελατηρίου επιστροφής. Καθώς ο οπλισμός κατευθύνεται προς τα δεξιά σπρώχνει το ελατήριο επαφών και κλείνει τις επαφές. Κατά τον τερματισμό της διαδρομής του οπλισμού, συγκρατείται από το πηνίο συγκράτησης. Κλείνοντας της επαφές, ένα ρεύμα μεγάλης έντασης ρέει προς την μίζα και την ενεργοποιεί. Αφού έχει εκτελέσει την λειτουργία της η μίζα, το ρεύμα διακόπτεται και ο ηλεκτρομαγνήτης επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση (Εικόνα 20).



Εικόνα 20 - Θέσεις ηλεκτρομαγνήτη εκκινητή - ρελέ εκκίνησης

Το ρεύμα που διέρχεται από το “βαρελάκι” κατά την λειτουργία του είναι από 30 έως 60 Α. Για αυτό το λόγο μερικές φορές χρησιμοποιείται ένα ακόμα ρελέ για τον έλεγχο του ρελέ της μίζας (Εικόνα 21). Αυτό το ρελέ ονομάζεται και ρελέ ασφαλείας (ή fuse relay), δηλαδή ρελέ

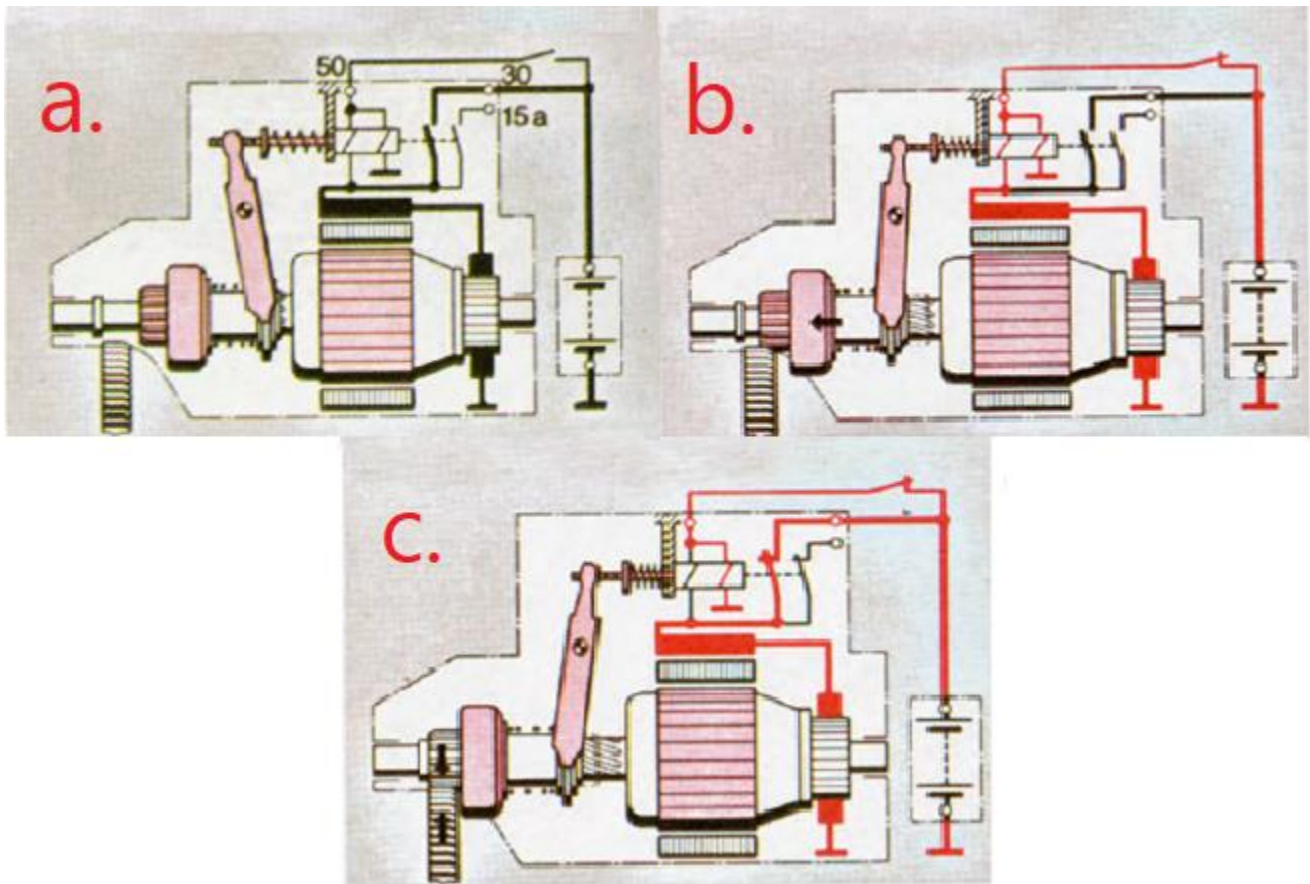
με τηκόμενη ασφάλεια. Τις περισσότερες φορές χρησιμοποιείται σε οχήματα με αυτόματα κιβώτια ταχυτήτων ώστε να επιτρέπει την εκκίνηση μόνο με την “νεκρά” (N) και “παρκινγκ” (P) ταχύτητα. Μόλις επιλέξει ο οδηγός την N ή P, άγει το ρελέ και επιτρέπει στον οδηγό να εκκινήσει το όχημα με τον διακόπτη έναυσης (κλειδί). Αξίζει να σημειωθεί ότι το ρελέ εκκίνησης και το ρελέ ασφαλείας επιτελούν διαφορετικούς σκοπούς, δηλαδή είναι διαφορετικά ρελέ.



Εικόνα 21 - Ρελέ ασφαλείας [27]

Φάσεις λειτουργίας εκκινητή μέσου τύπου της Bosch

Η περιγραφή των φάσεων λειτουργίας του εκκινητή παρουσιάζεται στην Εικόνα 22. Ο εκκινητής αρχικά βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας (a). Κλείνοντας τον διακόπτη εκκίνησης διεγείρονται τα πηνία έλξης και συγκράτησης με αποτέλεσμα την κίνηση του οπλισμού προς τα δεξιά (b). Ταυτόχρονα κινείται προς τα αριστερά το δίχαλο και φέρνει, σπρώχνοντας το πινιόν, σε σύμπλεξη με το σφόνδυλο (βολάν). Όταν ο οπλισμός του ηλεκτρομαγνήτη μίζας φτάσει στο τέρμα (c) γεφυρώνεται η κύρια επαφή και το ρεύμα ρέει απευθείας από τον συσσωρευτή στον εκκινητή. Το πηνίο έλξης έχει βραχυκυκλωθεί στα άκρα του και δεν διαρρέεται πλέον από ρεύμα. Το πηνίο συγκράτησης κρατά τον οπλισμό στη θέση αυτή, μέχρι να ανοίξει ο διακόπτης εκκίνησης.

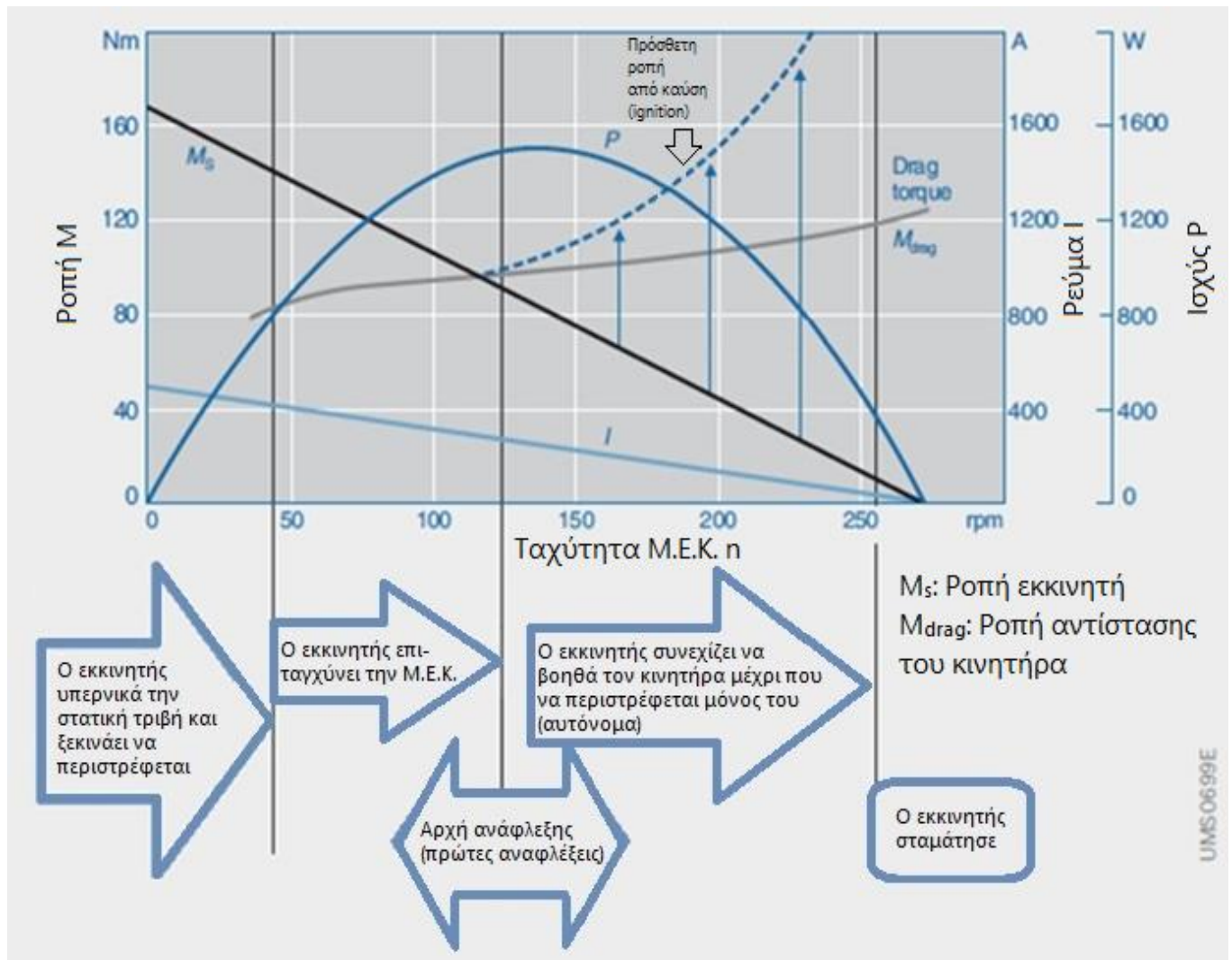


Εικόνα 22 – Λειτουργία εκκινητή μέσου τύπου Bosch με πλωτό πινιόν και ηλεκτρομαγνήτη μίζας – ρελέ εκκίνησης[28]

Εκκίνηση ΜΕΚ

Κατά την εκκίνηση μιας Μ.Ε.Κ., οι επιφάνειες των εδράνων (κύλισης και ολίσθησης) δεν έχουν επαρκή λίπανση, με αποτέλεσμα να αυξάνονται οι τριβές οι οποίες πρέπει να υπερνικηθούν για την περιστροφή της. Για την περιστροφή μιας Μ.Ε.Κ. από έναν εκκινητή, απαιτείται μια αξιόλογη ηλεκτρική ισχύς, ειδικότερα όταν ο κινητήρας είναι κρύος και το λιπαντικό είναι παχύρευστο (αυξημένες τριβές). Το ρεύμα για την λειτουργία του εκκινητή το παρέχει ο συσσωρευτής ενέργειας του αυτοκινήτου (μπαταρία). Τη στιγμή που το πινιόν συμπλέκεται στην οδοντωτή στεφάνη του βολάν, ο εκκινητής μεταφέρει ροπή στον στροφαλοφόρο άξονα του κινητήρα. Η ροπή του εκκινητή μεγιστοποιείται κατά την εκκίνηση του (από την κατάσταση ηρεμίας του) και μειώνεται σταδιακά καθώς οι στροφές αυξάνονται. Η στρεπτική ροπή που παρέχει ο εκκινητής κατά την εκκίνηση της Μ.Ε.Κ. (κατάσταση εκκίνησης) υπερνικά την στατική τριβή των εδράνων του κινητήρα (αυτό το φαινόμενο ονομάζεται Breakaway) και έπειτα επιταχύνει της κινούμενες μάζες (έμβολα, διωστήρες,

εκκεντροφόρο/-ους, αντλίες κ.λπ.) και τα παρελκόμενα βοηθητικά της Μ.Ε.Κ. (γεννήτρια, αντλία υδραυλικού τιμονιού, ανεμιστήρες κ.λπ.) μέχρι την επίτευξη της ταχύτητας εκκίνησης. Είναι εμφανές ότι σε υψηλές ταχύτητες περιστροφής, η ροπή του εκκινητή δεν είναι πλέον αρκετή ώστε να περιστρέψει τον κινητήρα. Έτσι η ταχύτητα περιστροφής του εκκινητή θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από τον ελάχιστο αριθμό στροφών που χρειάζεται για μία επιτυχημένη εκκίνηση της Μ.Ε.Κ.. Η μέγιστη ισχύς του εκκινητή βρίσκεται στις μεσαίες στροφές. Επίσης παρατηρείται μια αυξητική ροπή λόγω των πρώτων αναφλέξεων μίγματος.



Διάγραμμα 7 - Φάσεις της διαδικασίας εκκίνησης (M_{drag} : Στατική ροπή εκκίνησης του κινητήρα. Είναι η ροπή στρέψης που απαιτείται για να περιστραφεί η Μ.Ε.Κ. από στάση) [29]

Υπερπυκνωτές

Λίγα λόγια για τους πυκνωτές

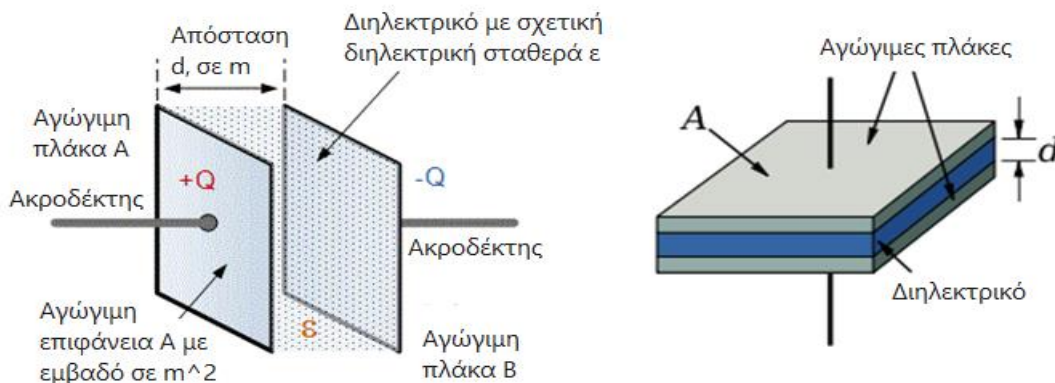
Τι είναι ο πυκνωτής

Πυκνωτής ονομάζεται το σύστημα δύο γειτονικών αγωγών όπου ανάμεσά τους παρεμβάλλεται μονωτικό υλικό. Τα βασικά εξαρτήματα από τα οποία αποτελείται ο πυκνωτής είναι:

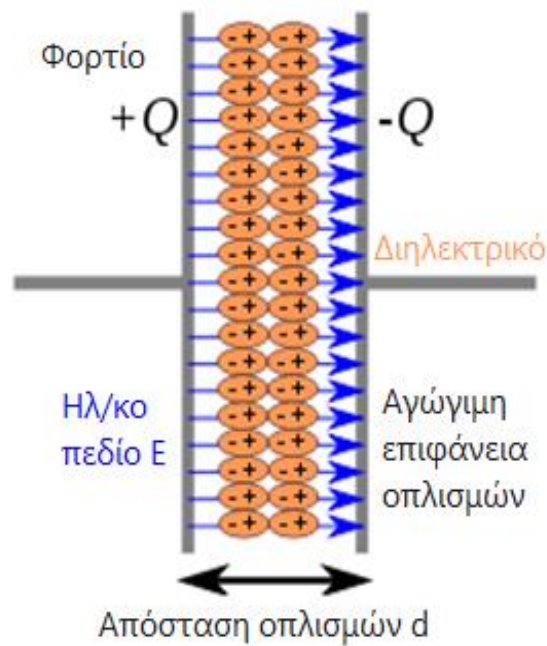
1. Οι οπλισμοί, όπου είναι κατασκευασμένοι από αγωγίμο υλικό.
2. Το παρεμβαλλόμενο υλικό το οποίο είναι κενό αέρος ή κάποιο μονωτικό υλικό (διηλεκτρικό).
3. Οι ακροδέκτες, που συνδέονται με τους οπλισμούς και καθορίζουν τους πόλους του πυκνωτή.

Αρχή λειτουργίας

Η βασική ιδιότητα ενός πυκνωτή είναι να αποθηκεύει ηλεκτρικό φορτίο και επομένως ηλεκτρική ενέργεια. Όταν δύο αγωγοί αντιμετωπίζουν μια διαφορά δυναμικού, για παράδειγμα



Εικόνα 23 - Βασική δομή πυκνωτή [30] [31]



Εικόνα 24 - Προσανατολισμός φορτίου στον πυκνωτή [32]

όταν ένας πυκνωτής είναι συνδεδεμένος με μια μπαταρία, αναπτύσσεται ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου του διηλεκτρικού, προκαλώντας ένα καθαρά θετικό φορτίο να συγκεντρωθεί σε μία πλάκα και ένα καθαρά αρνητικό φορτίο να συγκεντρωθεί στην άλλη πλάκα. Δεν υπάρχει διέλευση ρεύματος διαμέσου του διηλεκτρικού, αλλά υπάρχει μια ροή φορτίου μέσα από το κύκλωμα της πηγής.

Χαρακτηριστικά μεγέθη των πυκνωτών

Κάποια βασικά χαρακτηριστικά μεγέθη των πυκνωτών είναι τα εξής:

- Τάση πυκνωτή V_c : Είναι η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται μεταξύ των οπλισμών ενός φορτισμένου πυκνωτή.
- Φορτίο πυκνωτή Q_c : Είναι το φορτίο του θετικά φορτισμένου οπλισμού του.
- Ενέργεια φορτισμένου πυκνωτή: Είναι η ενέργεια που αποθηκεύει ο πυκνωτής κατά την φόρτισή του. Η ενέργεια είναι ανεξάρτητη από τον τρόπο φόρτισης του πυκνωτή και αποθηκεύεται με τη μορφή ενέργειας ηλεκτρικού πεδίου U_e . Η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται από τον εξής τύπο:

$$U_e = \frac{1}{2} * C * V_c^2 \text{ ή } U_e = \frac{1}{2} * \frac{Q_c^2}{C} \text{ ή } U_e = \frac{1}{2} * Q * V^2 [J]$$

, όπου:

- V_C : Τάση οπλισμών πυκνωτή σε Volt (V).
- Q_C : Φορτίο οπλισμών πυκνωτή σε Coulomb (C)

→ Χωρητικότητα πυκνωτή: Είναι μονόμετρο φυσικό μέγεθος που είναι ίσο με το πηλίκο του φορτίου Q_C προς την τάση V_C ενός πυκνωτή ($C = Q/V$). Η χωρητικότητα όμως ενός πυκνωτή δεν εξαρτάται ούτε από το φορτίο, ούτε από την τάση του, ούτε από το υλικό των οπλισμών του. Εξαρτάται όμως από:

- Σχήμα οπλισμών.
- Διαστάσεις οπλισμών.
- Απόσταση οπλισμών.
- Μονωτικό υλικό που παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών.

Π.χ., για έναν επίπεδο πυκνωτή, αποδεικνύεται ότι η χωρητικότητα του δίνεται από την εξής σχέση:

$$C = \epsilon * \epsilon_0 * \frac{A}{d} [F]$$

, όπου:

- ϵ : Η σχετική σταθερά του διηλεκτρικού. Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικές τιμές για της σχετική σταθερά του διηλεκτρικού.

Υλικό	Διηλεκτρική σταθερά
Κενό	1
Αέρας	1.0005
Νερό	80
Χαρτί	3.5
Μίκα	5.4
Κεχριμπάρι	2.7
Γυαλί	4.5
Πορσελάνη	6.5
Πολυαιθυλένιο	2.3

Πίνακας 3 - Ενδεικτικές τιμές σχετικής σταθεράς διηλεκτρικού

- ϵ_0 : Η απόλυτη διηλεκτρική σταθερά του κενού, που ισούται με: $\epsilon_0 = 8.85 * 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} * \text{m}^2$.
- A: Το εμβαδόν κάθε οπλισμού.
- d: Η απόσταση μεταξύ των οπλισμών.

Είδη πυκνωτών

Οι πυκνωτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- Διηλεκτρικοί
- Ηλεκτρολυτικοί

Η αρχή λειτουργίας είναι η ίδια και στις δύο κατηγορίες πυκνωτών, όμως διαφέρουν στην κατασκευή και στον τρόπο χρήσης τους.

Διηλεκτρικοί πυκνωτές

Οι διηλεκτρικοί πυκνωτές χωρίζονται σε 2 μεγάλες κατηγορίες, ανάλογα με την κατάσταση της χωρητικότητάς τους, δηλαδή σε:

→ Σταθερής. Οι πυκνωτές σταθερής χωρητικότητας χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους:

- Πυκνωτές χαρτιού. Οι πυκνωτές αυτοί ονομάζονται έτσι διότι έχουν σαν υλικό διηλεκτρικού το χαρτί.
- Πυκνωτές πλαστικής ταινίας. Οι πυκνωτές πλαστικής ταινίας κατασκευάζονται με το διηλεκτρικό τους να αποτελείται από διάφορα πλαστικά υλικά όπως ο πολυεστέρας, το πολυστυρένιο, το πολυπροπυλένιο και το τεφλόν. Συγκεκριμένα, τα είδη των πυκνωτών πλαστικής ταινίας είναι τα εξής:
 - Πυκνωτές πολυεστέρα (ΜΚΤ).
 - Πυκνωτές πολυπροπυλενίου (ΜΚΡ).
 - Πυκνωτές πολυστυρενίου.
 - Πολυανθρακικοί πυκνωτές.
 - Πυκνωτές τεφλόν.
- Πυκνωτές μίκας. Οι πυκνωτές μίκας διακρίνονται σε δύο τύπους:

- Φύλλων μίκας.
- Ταινίας μίκας.

Ο πρώτος τύπος χρησιμοποιεί σαν διηλεκτρικό φυσική μίκα μικρής επιφάνειας, ενώ ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιεί μίκα υπό μορφή ταινίας μετά από κατάλληλη επεξεργασία.

- Πυκνωτές γυαλιού. Οι πυκνωτές γυαλιού κατασκευάζονται από μικρά ελάσματα γυαλιού και φύλλων μετάλλου, με τεχνική παρόμοια με αυτή των πυκνωτών μίκας.
 - Κεραμικοί πυκνωτές. Στους κεραμικούς πυκνωτές το διηλεκτρικό είναι κεραμικό υλικό, όπως μίγματα πυριτιούχου μαγνησίου, αλουμινίου, οξειδίου του ζirkονίου, κτλ.
- Μεταβλητής. Οι πυκνωτές μεταβλητής χωρητικότητας είναι απαραίτητοι όπου χρειάζεται ακρίβεια της τιμής της χωρητικότητας ενός πυκνωτή σε ένα κύκλωμα και διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες:
- Μεταβλητοί πυκνωτές.
 - Ρυθμιζόμενοι πυκνωτές

Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές είναι σταθερής χωρητικότητας και η αρχή λειτουργίας τους στηρίζεται στην αρχή της ηλεκτρολύσεως. Στους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές το διηλεκτρικό είναι οξείδιο του μετάλλου της ανόδου. Για να σχηματιστεί ένα οξείδιο είναι απαραίτητη η παρουσία:

- Μετάλλου της ανόδου.
- Ένας ηλεκτρολύτης.
- Κάθοδος, όπου μπορεί να είναι το ίδιο ή διαφορετικό μέταλλο με την άνοδο.

Τα οξείδια που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι το αλουμίνιο και το ταντάλιο. Γι' αυτό διαχωρίζουμε τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές σε δύο είδη:

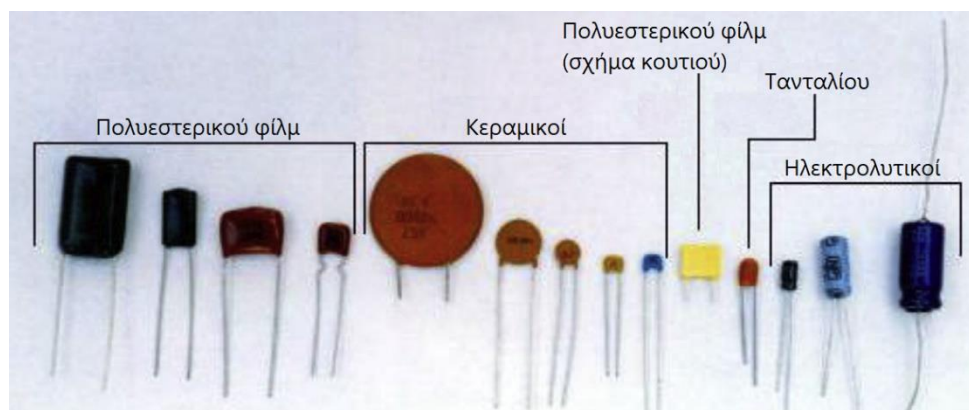
- Τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές αλουμινίου
- Τους ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές τανταλίου.

Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές διαχωρίζονται, επιπλέον, σε δύο είδη:

- Τους υγρούς ηλεκτρολυτικούς
- Τους ξηρούς ηλεκτρολυτικούς

Οι υγροί ηλεκτρολυτικοί περιέχουν υγρό στοιχείο για την διάλυση, ενώ στους ξηρούς ηλεκτρολυτικούς η διάλυση συγκρατείται από ένα φύλλο απορροφητικού χαρτιού ή γάζας, η οποία παρεμβάλλεται μεταξύ των οπλισμών. Είναι σημαντικό οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές να πολωθούν ορθά για να λειτουργήσουν σωστά, δηλαδή η άνοδος χρειάζεται θετικό δυναμικό ενώ η κάθοδος αρνητικό. Η ανάστροφη πόλωσή τους έχει σαν αποτέλεσμα την καταστροφή του ηλεκτρολυτικού πυκνωτή. Οι οπλισμοί μεταξύ τους βρίσκονται σε πολύ κοντινή απόσταση, γι' αυτό και παρουσιάζουν μεγάλη χωρητικότητα. Οι ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες, ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους:

- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές αλουμινίου.
- Ηλεκτρολυτικοί πυκνωτές τανταλίου.



Εικόνα 25 - Πυκνωτές διαφόρων ειδών [33]

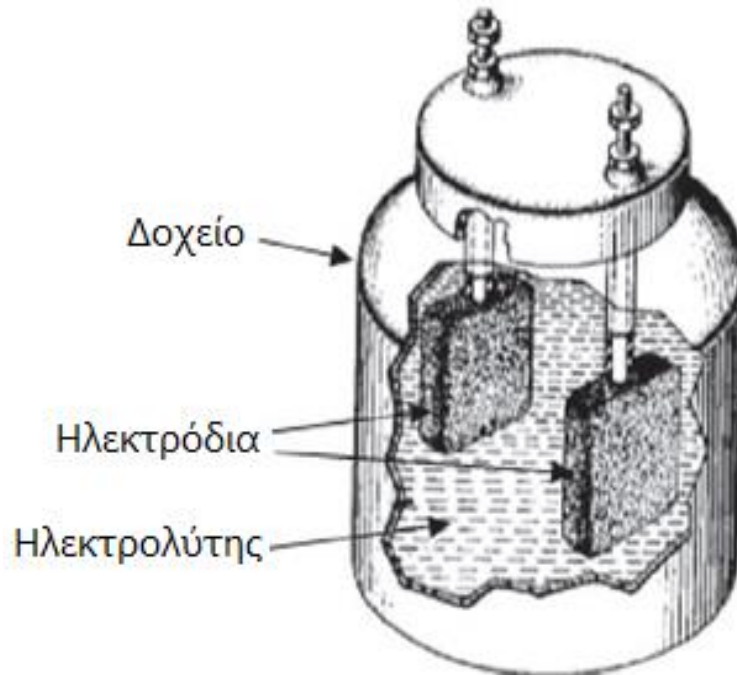
Υπερπυκνωτής

Τι είναι ο υπερπυκνωτής

Ο υπερπυκνωτής (στα αγγλικά supercapacitor ή ultracapacitor) ή πυκνωτής διπλού στρώματος (double layer capacitor) είναι ο πυκνωτής ο οποίος έχει πολύ μεγάλη χωρητικότητα. Για να γίνει αντιληπτή η τάξη μεγέθους της χωρητικότητας, οι τυπικοί πυκνωτές που αναφέρθηκαν παραπάνω έχουν χωρητικότητα της τάξεως των pF μέχρι των χαμηλών nF, ενώ οι υπερπυκνωτές έχουν χωρητικότητα της τάξεως των F.

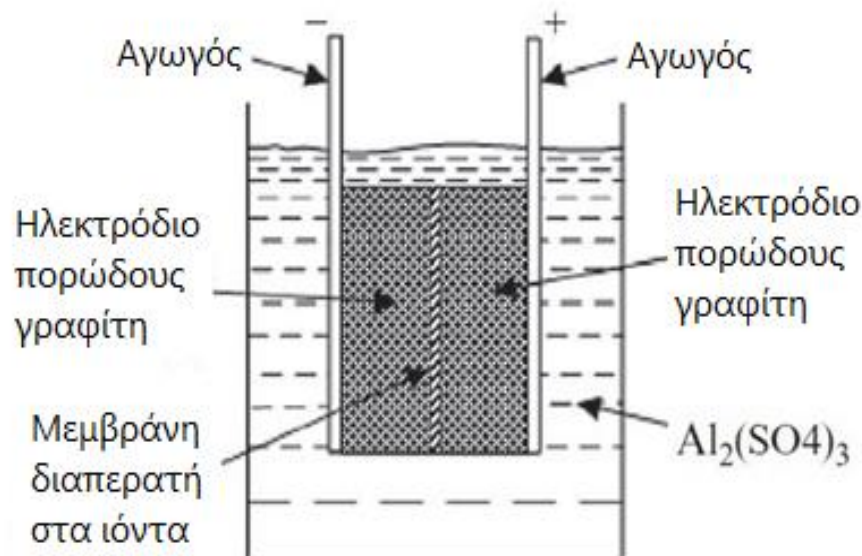
Λίγη ιστορία για τον υπερπυκνωτή

Το φαινόμενο της χωρητικότητας διπλού στρώματος ερευνήθηκε για πρώτη φορά από τον Γερμανό φυσικό Hermann von Helmholtz, φαινόμενο το οποίο αποτελεί τη βάση για την κατασκευή της πλειονότητας των υπερπυκνωτών. Ύστερα το 1957, μηχανολόγοι της General



Εικόνα 26 - Ηλεκτρολυτικός πυκνωτής της General Electric (1957) [34]

Electric, κατασκεύασαν μία πρώτη μορφή υπερπυκνωτή χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια πορώδους άνθρακα (Εικόνα 26). Τότε θεωρούταν ότι η ενέργεια αποθηκευόταν στο πορώδες του άνθρακα και γι' αυτό παρουσίασε εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα, μολονότι ο μηχανισμός αυτός ήταν άγνωστος τότε. Η πρώτη απόπειρα για την εμπορική κατασκευή, έγινε



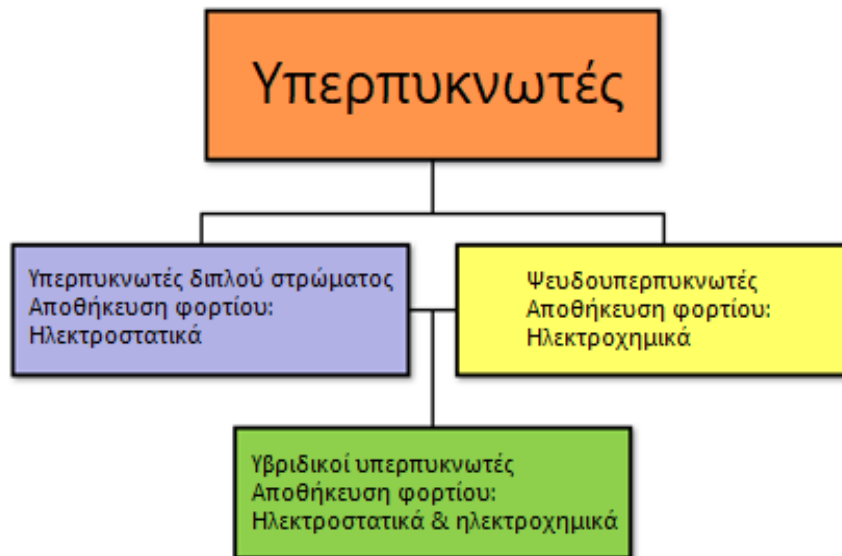
Εικόνα 27 - Υπερπυκνωτής της SOHIO (1966) [35]

από τη Standard Oil of Ohio (SOHIO), το 1961 και 1962 όπου έγινε ύστερα η καταχώρηση της πατέντας στο όνομα του Rightmire, με τίτλο “Συσκευή αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας” (“Electrical energy storage apparatus”). Η εξέλιξη του προϊόντος συνεχίστηκε και το πρώτο διαφημιστικό φυλλάδιο εκδόθηκε το 1969. Αντιλαμβανόμενη η SOHIO, ότι η κατασκευή διπλού στρώματος συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής υψηλής χωρητικότητας, πατένταρε έναν δισκοειδή πυκνωτή υψηλής χωρητικότητας, αξιοποιώντας πάστα άνθρακα εμβαπτισμένη σε ηλεκτρολύτη. Λόγω μικρών πωλήσεων, η SOHIO το 1971 διέκοψε την εξέλιξη των πυκνωτών και παρέδωσε τα δικαιώματα στην Nippon Electric Company (NEC). Η NEC εξέλιξε και εμπορευματοποίησε τους πυκνωτές διπλού στρώματος. Το 1978, παρουσίασε την τεχνολογία αυτή στην αγορά ως εφεδρική μνήμη ηλεκτρονικών υπολογιστών.

Κατηγορίες υπερπυκνωτών

Ανάλογα με το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων τους αλλά και τον τρόπο αποθήκευσης της ενέργειας, οι υπερπυκνωτές κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- Υπερπυκνωτές διπλού στρώματος, οι οποίοι χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια άνθρακα (ή παραπλήσιά τους). Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται ηλεκτροστατικά, με τον διαχωρισμό των φορτίων σε διπλό στρώμα Helmholtz, στη διεπιφάνεια μεταξύ της επιφάνειας του ηλεκτροδίου και του ηλεκτρολύτη.
- Ψευδουπερπυκνωτές, οι οποίοι χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια οξειδίων μετάλλων ή αγώγιμων πολυμερών. Η αποθήκευση ενέργειας γίνεται ηλεκτροχημικά, με οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις ηλεκτροδιάτρησης ή της παρένθεσης στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου ειδικών ιόντων που έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία αντιστρεφόμενων Φαραντεϊκών φορτίων στο ηλεκτρόδιο.
- Υβριδικοί υπερπυκνωτές, όπου χρησιμοποιούν ηλεκτρόδια με διαφορετικά χαρακτηριστικά: Το ένα ηλεκτρόδιο παρουσιάζει ηλεκτροστατική χωρητικότητα και το άλλο ηλεκτροχημική χωρητικότητα.



Εικόνα 28 - Κατηγορίες υπερπυκνωτών [36]

Φαινόμενο διπλού στρώματος

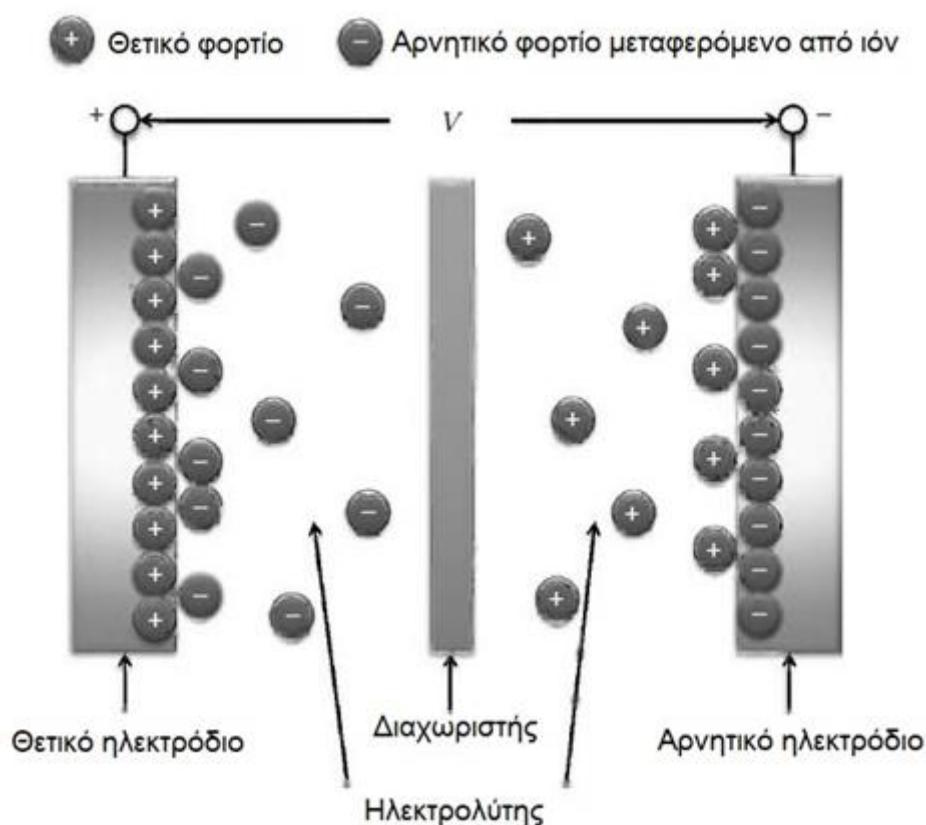
Αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο τρόπος λειτουργίας και κατασκευής των πυκνωτών. Δύο ηλεκτρόδια που χωρίζονται από διηλεκτρικό (διαφόρων μορφών), αποθηκεύουν φορτίο που συσσωρεύεται στο διηλεκτρικό. Στο συμβατικό πυκνωτή η αποθήκευση ενέργειας γίνεται με την αποκόλληση ηλεκτρονίων από την μια μεταλλική πλάκα και την εναπόθεσή τους στην άλλη. Αυτή η διαδικασία δημιουργεί διαφορά δυναμικού η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί από ένα εξωτερικό κύκλωμα. Η συνολική ενέργεια που αποθηκεύεται με αυτόν τον τρόπο εξαρτάται από τα παρακάτω:

- Τον αριθμό του φορτίου που αποθηκεύεται στις πλάκες. Αυτό εξαρτάται από το μέγεθος και τις ιδιότητες του υλικού των πλακών.
- Τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα από τις πλάκες. Αυτό εξαρτάται από το όριο τάσης για τη διάσπαση του διηλεκτρικού (dielectric breakdown), δηλαδή θα υπάρξει διέλευση ρεύματος διαμέσου του μονωτή, εάν η τάση ξεπεράσει ένα συγκεκριμένο όριο. Αυτό εξαρτάται από το υλικό του μονωτή.

Ένας υπερπυκνωτής διπλού στρώματος έχει την εξής μορφή. Αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια από ενεργό άνθρακα, που είναι το πιο συνηθισμένο υλικό για την κατασκευή τέτοιων ηλεκτροδίων. Ο ενεργός άνθρακας είναι πολύ αγωγίμο υλικό και πολύ πορώδες υλικό (αύξηση επιφάνειας οπλισμού), που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της χωρητικότητας και της απόδοσης του υπερπυκνωτή. Η τυπική διαδικασία παραγωγής των ηλεκτροδίων

συμπεριλαμβάνει την ανάμειξη σκόνης άνθρακα, αγωγίμα σωματίδια, ενός πολυμερούς που περιέχει φθόριο (όπως το PTFE) και συνδετικού μέσου με διαλύτη ώστε να επιτευχθεί η δημιουργία πάστας η πηχτού υγρού. Ύστερα η πάστα (ή το πηχτό υγρό), απλώνεται, θερμαίνεται και στεγνώνει για τη δημιουργία ηλεκτροδίου σε μορφή φιλμ. Πάνω στα ηλεκτρόδια βρίσκεται ο συλλέκτης, όπου είναι φύλλα αλουμινίου ή χαλκού ή νικελίου, πάχους 20-80 μm . Εκτός από την κόλληση των φιλμ ενεργού άνθρακα επάνω στα ηλεκτρόδια, μπορεί είτε να γίνει εναπόθεση υλικού επάνω στα ηλεκτρόδια ή να ψεκαστεί επάνω σε αυτά. Εάν η κόλληση του άνθρακα επάνω στο ηλεκτρόδιο δεν είναι σωστή, θα αυξηθεί η εσωτερική αντίσταση. Ανάμεσα στα ηλεκτρόδια με τον άνθρακα βρίσκεται ένας ηλεκτρολύτης. Ο ηλεκτρολύτης συναντάται στις εξής δύο μορφές:

- Στερεός. Ο στερεός ηλεκτρολύτης έχει δύο σκοπούς, να άγει ιόντα και να διαχωρίζει το θετικό από το αρνητικό ηλεκτρόδιο.
- Υγρός. Οι κατασκευαστές υπερπυκνωτών χρησιμοποιούν δύο ειδών υγρών ηλεκτρολυτών:
 - Υδατοδιαλυτούς (π.χ. H_2SO_4 , KOH , NaClO_4 , LiClO_4). Οι υδατοδιαλυτοί ηλεκτρολύτες χρησιμοποιούνται σε υπερπυκνωτές με χαμηλή ειδική ενέργεια και υψηλή ειδική ισχύ.
 - Μη υδατοδιαλυτούς (Οργανικοί) (π.χ. CH_3CN , $\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2\text{CO}$, $(\text{CH}_2)_4\text{O}$). Οι μη υδατοδιαλυτοί ηλεκτρολύτες έχουν το πλεονέκτημα ότι έχουν αντοχή σε υψηλότερες τάσεις σε σχέση με τους υδατοδιαλυτούς, παρουσιάζοντας έτσι μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα.



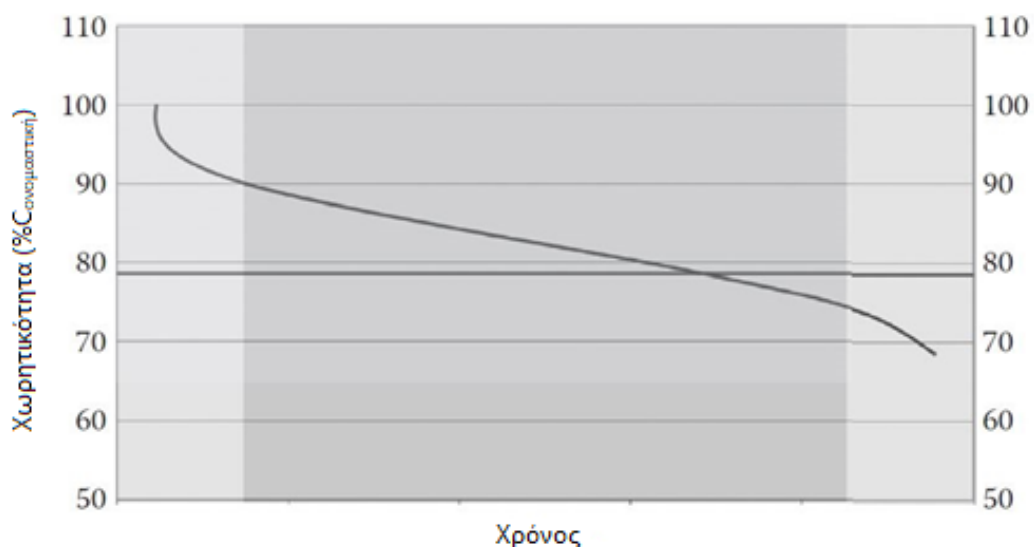
Εικόνα 29- Βασική δομή υπερπυκνωτή διπλού στρώματος [37]

Οι ηλεκτρολύτες είναι υλικά που λειτουργούν σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών, δεν είναι εύφλεκτα, είναι ελάχιστα τοξικά και δεν είναι διαβρωτικά προς τα υλικά του υπερπυκνωτή. Είναι επίσης σημαντικό να χρησιμοποιείται μαζί με τους υγρούς ηλεκτρολύτες ένα αδρανές, λεπτό (0.3 – 0.8 nm) και πορώδες φύλλο, ή αλλιώς διαχωριστής, ώστε να επιτρέπει τη διέλευση ιόντων, για τη δημιουργία ρευμάτων, άλλα να αποτρέπει τη φυσική επαφή μεταξύ των ηλεκτροδίων. Οι διαχωριστές από είναι υλικά (π.χ. $(C_3H_3N)_n$) τα οποία έχουν πολύ μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό, έχουν πολύ μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα ώστε να επιτρέπουν τη διέλευση ιόντων και δεν αλλοιώνονται εύκολα. Οι πυκνωτές διπλού στρώματος δεν έχουν διηλεκτρικό. Σε αυτούς τους πυκνωτές το “διηλεκτρικό” είναι υπερβολικά λεπτό, και λόγω του πορώδους του ενεργού άνθρακα των ηλεκτροδίων, η επιφάνεια του είναι πολύ μεγάλη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη χωρητικότητα των πυκνωτών αυτών. Το μειονέκτημα (περισσότερα για αυτά θα αναλυθούν σε παρακάτω κεφάλαιο) με αυτή την κατασκευή είναι ότι αυτοί οι πυκνωτές μπορούν να αντέξουν μικρές τάσεις, σε περιοχή της τάξεως των 2.7 V.

Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα υπερπυκνωτών συγκριτικά με μπαταρίες

Πλεονεκτήματα

→ Διάρκεια ζωής. Θεωρητικά, η διάρκεια ζωής ενός υπερπυκνωτή είναι απεριόριστη, διότι δεν υπάρχει ένα τελικό γεγονός για να δείξει ότι δεν λειτουργεί. Ακόμα, μπορούν (θεωρητικά) να φορτιστούν άπειρες φορές, σε αντίθεση με τις ηλεκτροχημικές μπαταρίες (π.χ. Pb, Li-on), όπου έχουν έναν ορισμένο και σχετικά μικρό κύκλο ζωής. Σε βάθος χρόνου οι πυκνωτές επιπλέον φθείρονται λιγότερο σε σχέση με τις μπαταρίες. Η συνεχόμενη φόρτιση και εκφόρτιση ενός υπερπυκνωτή με σταθερή ένταση ρεύματος, μπορεί να οδηγήσει σε εκθετική μείωση της χωρητικότητας του. Ως “τέλος” του κύκλου ζωής ενός υπερπυκνωτή θεωρείται η μέγιστη αποδεκτή πτώση της σχετικής χωρητικότητάς του. Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 8) παρουσιάζεται η πτώση της χωρητικότητας

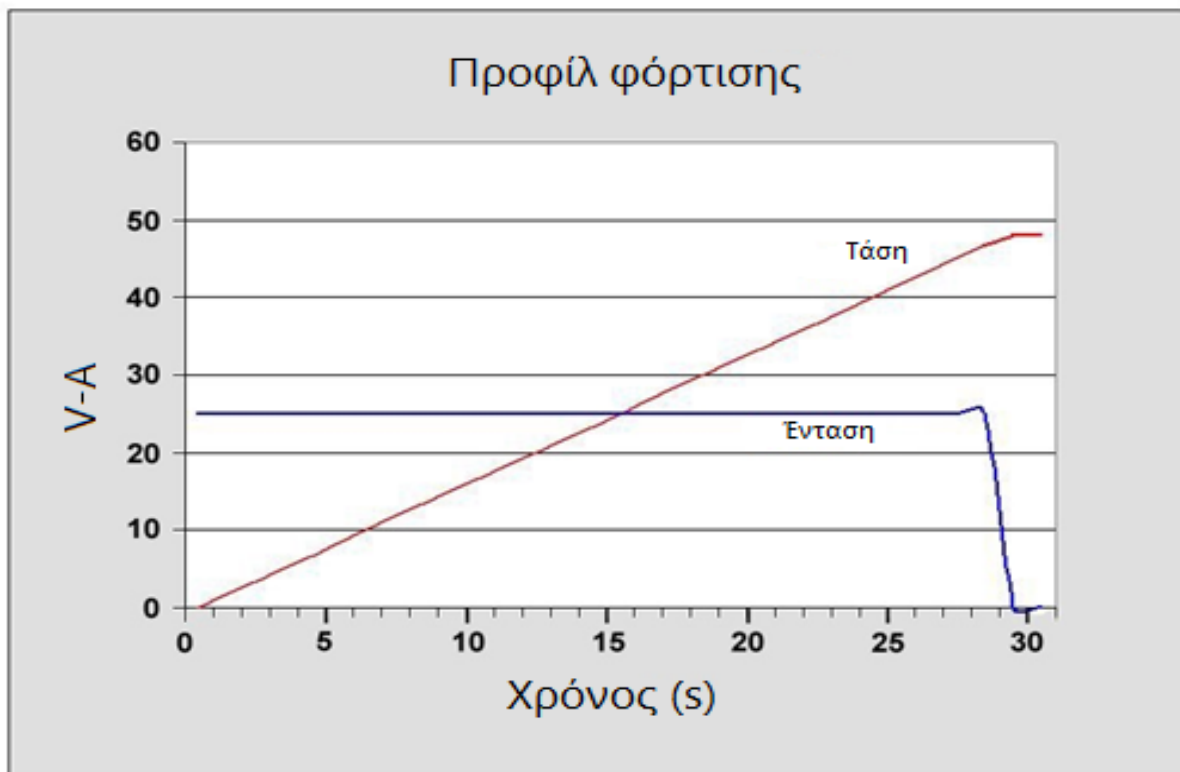


Διάγραμμα 8 - Χωρητικότητα πυκνωτή σε βάθος χρόνου [38]

(συγκεκριμένα δείχνει το επί τοις εκατό της ονομαστικής) κατά την πάροδο του χρόνου. Η οριζόντια γραμμή είναι η αποδεκτή πτώση της σχετικής χωρητικότητάς τους. Ένας πυκνωτής χάνει περίπου 20% της χωρητικότητάς του σε 10 χρόνια.

→ Βάρος. Λόγω των υλικών κατασκευής των υπερπυκνωτών, είναι πολύ ελαφρύτεροι από τα περισσότερα είδη μπαταριών που πωλούνται στο εμπόριο. Στην συγκεκριμένη εργασία, οι υπερπυκνωτές που χρησιμοποιούνται είναι πολύ ελαφρύτεροι από τη συμβατική μπαταρία εκκίνησης του οχήματος, που είναι μολύβδου - οξέος.

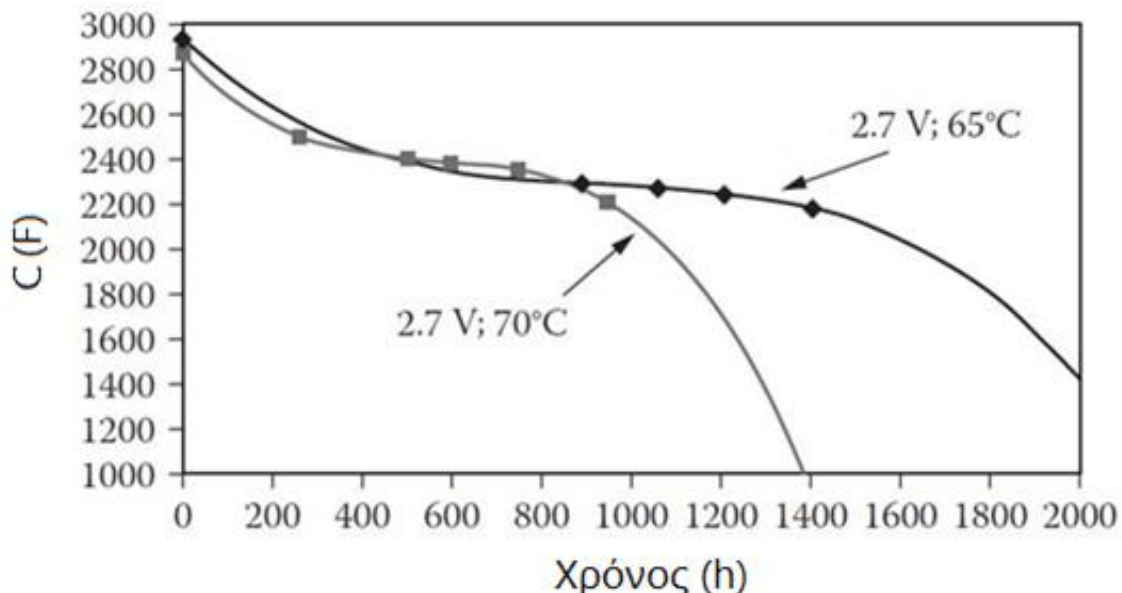
- Μικρή εσωτερική αντίσταση και μεγάλη ειδική ισχύς. Η ειδική ισχύς είναι η ισχύς ανά μονάδα βάρους (W/kg). Οι υπερπυκνωτές λόγω μικρού βάρους έχουν μεγάλη ειδική ισχύ. Επιπλέον, λόγω της μικρότερης εσωτερικής αντίστασης, συγκριτικά με τις συμβατικές μπαταρίες, οι πυκνωτές μπορούν να δώσουν ρεύμα μεγάλου φορτίου πιο εύκολα, πάντα σε σχέση με τις μπαταρίες.
- Ταχεία και απλή φόρτιση. Οι υπερπυκνωτές φορτίζουν πολύ πιο γρήγορα σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες. Αυτό είναι πολύ χρήσιμο για εφαρμογές που πρέπει να φορτίσουν άμεσα οι πυκνωτές και να δώσουν αυτό το φορτίο εξίσου (και πιο) γρήγορα. Περισσότερα για τις εφαρμογές θα αναφερθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Επιπλέον οι πυκνωτές δεν είναι επιρρεπείς σε υπερφορτίσεις, διότι σταματάει η ροή του ρεύματος μόλις φορτίσει ο πυκνωτής, χωρίς τη χρήση κυκλώματος ανίχνευσης πλήρους φόρτισης, όπως για παράδειγμα οι μπαταρίες ιόντων - λιθίου (Li-Ion).



Διάγραμμα 9 - Προφίλ φόρτισης υπερπυκνωτή με σταθερή ένταση [39]

- Ασφάλεια, φιλικότητα στο περιβάλλον, αξιοπιστία. Οι υπερπυκνωτές είναι πολύ ασφαλείς στη λειτουργία τους λόγω:
 - Της αυξημένης τους αντοχής σε επαναλαμβανόμενους κύκλους φόρτισης και εκφόρτισης.
 - Της διακοπής της κυκλοφορίας του ρεύματος στο τέλος της φόρτισής τους.

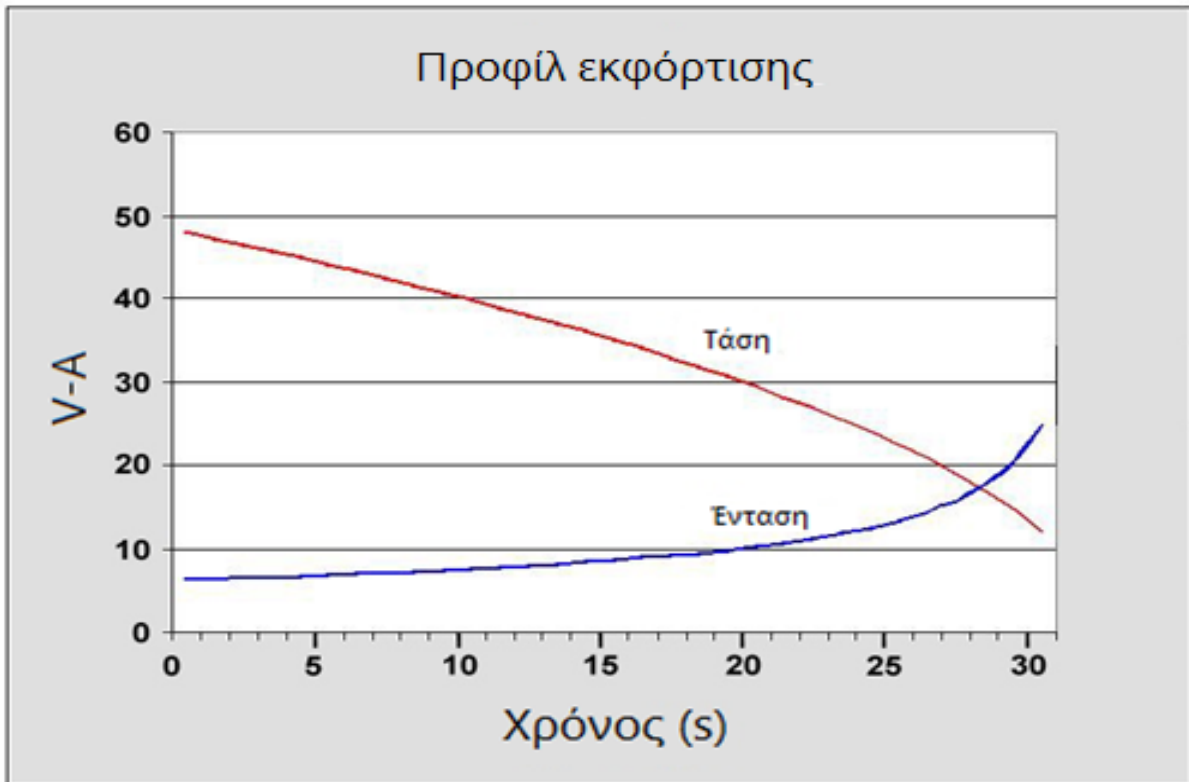
- Της χρήσης περιβαλλοντικά φιλικών υλικών για την κατασκευή τους, σε αντίθεση με κάποιες μπαταρίες του εμπορίου, όπως η μολύβδου-οξέος.
- Λειτουργία σε μεγάλο εύρος θερμοκρασιών περιβάλλοντος. Ένα ακόμα στοιχείο που κάνει τους πυκνωτές ανώτερους από τις συμβατικές μπαταρίες είναι ότι λειτουργούν σωστά σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (από $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ μέχρι $65\text{ }^{\circ}\text{C}$), χωρίς να εξασθενούν προσωρινά οι ιδιότητές τους, όπως των μπαταριών. Οι χαμηλές θερμοκρασίες ευνοούν τους μη υδατοδιαλυτούς ηλεκτρολύτες, λόγω του σημείου πήξης του νερού. Όμως η θερμοκρασία στην οποία λειτουργεί ο πυκνωτής, παίζει μεγάλο ρόλο στην εξασθένηση της χωρητικότητας στη διάρκεια ζωής του. Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 10) παρουσιάζεται πως εξασθενεί η χωρητικότητα του πυκνωτή κατά τη διάρκεια ζωής του, με σταθερή τάση σε διαφορετικές θερμοκρασίες.



Διάγραμμα 10 - Χωρητικότητα πυκνωτή στη διάρκεια του χρόνου σε διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος [40]

Μειονεκτήματα

- Χαμηλή ειδική ενέργεια. Οι πυκνωτές έχουν μικρή ειδική ενέργεια, διότι δεν αποθηκεύουν μεγάλο ποσό ενέργειας. Εδώ υπερτερούν οι μπαταρίες, λόγω της αποθήκευσης μεγαλύτερου φορτίου. Για την κατανόηση της υπεροχής των μπαταριών σε αυτόν τον τομέα, η ειδική ενέργεια που αποθηκεύουν οι υπερπυκνωτές κυμαίνεται από 1 έως 30 Wh/Kg, όπου είναι 10 έως 50 φορές μικρότερη από των μπαταριών ιόντων λιθίου (Li-Ion).
- Γραμμική πτώση τάσης. Ένα ακόμα μειονέκτημα των υπερπυκνωτών είναι η γραμμική πτώση τάσης κατά την εκφόρτιση, σε αντίθεση με τις μπαταρίες οι οποίες διατηρούν



Διάγραμμα 11 - Εκφόρτιση υπερπυκνωτή σε μήκος χρόνου [41]

σχετικά σταθερή την τάση τους στο χρήσιμο εύρος ισχύος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μείωση του χρήσιμου εύρους ισχύος. Παρατηρείται στο Διάγραμμα 11, ότι η τάση μειώνεται σχεδόν γραμμικά κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή. Η ένταση του ρεύματος αυξάνεται κατά την εκφόρτιση του πυκνωτή, διότι χρησιμοποιείται μετατροπέας DC-DC για τη διατήρηση σταθερής ισχύος του υπερπυκνωτή.

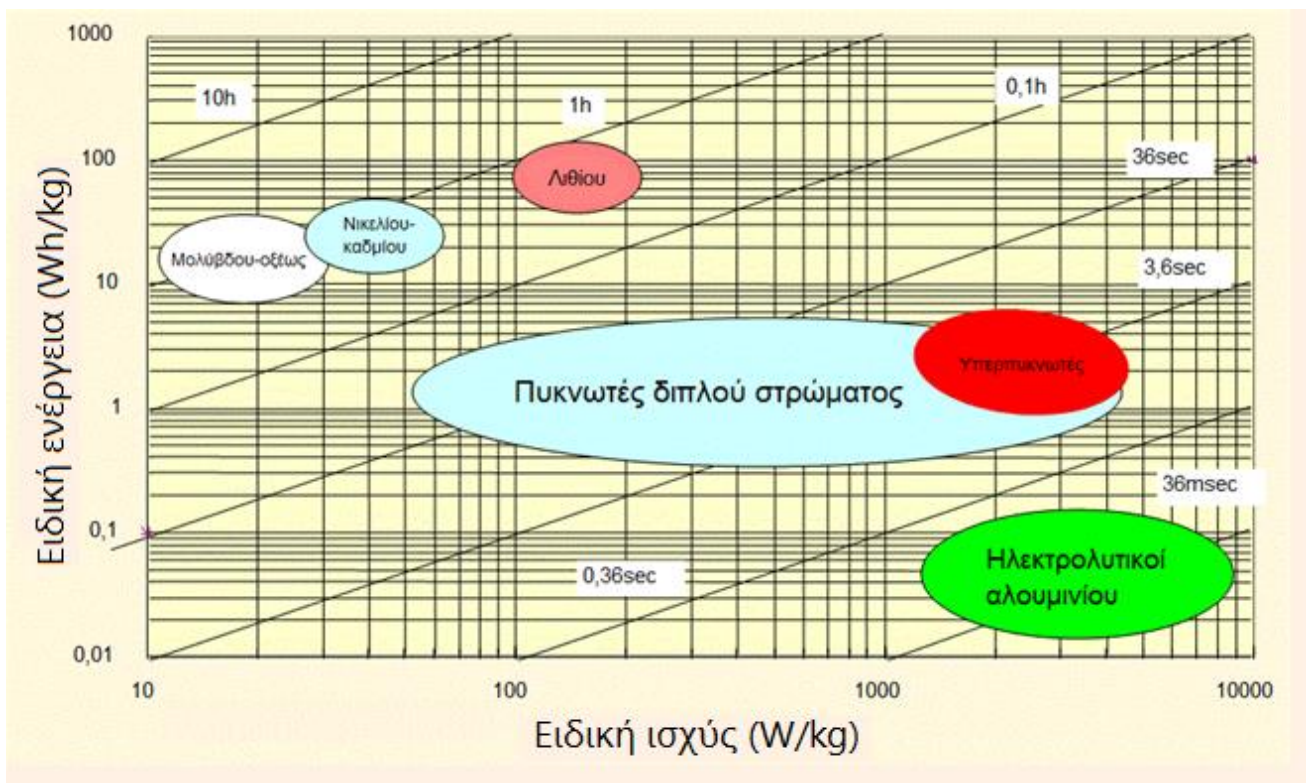
- Υψηλή αυτοεκφόρτιση. Σημαντικό μειονέκτημα των υπερπυκνωτών είναι η υψηλή αυτοεκφόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι ο υπερπυκνωτής όταν βρίσκεται σε κατάσταση αποσύνδεσης, εκφορτίζεται μόνος του. Η εκφόρτιση αυτή είναι πιο γρήγορη από αυτή των μπαταριών. Εκεί όπου οι υπερπυκνωτές μπορεί να εκφορτιστούν από 50 έως 100% σε 30 με 40 μέρες, οι μπαταρίες μολύβδου και λιθίου εκφορτίζονται περίπου 5% ανά μήνα.
- Χαμηλή τάση κελιών. Όλοι οι πυκνωτές έχουν ανοχή σε μεγάλη τάση, εκτός από τους υπερπυκνωτές. Η τάση τους περιορίζεται από 2.5 έως 2.7 V ανά κελί και εξαρτάται από τον τύπο του ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Φυσικά υπάρχουν υπερπυκνωτές που η τάση τους φτάνει μέχρι και τα 3 V, αλλά τιμές από 2.8 V και άνω δεν συνιστανται, λόγω της μικρότερης διάρκειας ζωής τους. Για την επίτευξη υψηλότερων τάσεων είναι απαραίτητη η σύνδεση πυκνωτών σε σειρά. Εδώ όμως έγκειται και ένα νέο πρόβλημα: μειώνεται η χωρητικότητα και αυξάνεται η εσωτερική αντίσταση. Επιπλέον, για τη σύνδεση τριών

πυκνωτών και άνω σε σειρά, απαιτείται η εξισορρόπηση των τάσεων των κελιών, για την αποφυγή δημιουργίας υπέρτασης στα κελία.

→ Υψηλό κόστος ανά Watt. Η τεχνολογία των υπερπυκνωτών, μπορεί να εφευρέθηκε στα μέσα του 20^{ου} αιώνα, όμως είναι ένα φαινόμενο το οποίο βρίσκει ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Αυτό σημαίνει ότι ο τρόπος παραγωγής τους, από την εύρεση και κατασκευή των υλικών τους μέχρι και την παραγωγική τους διαδικασία, δεν είναι αντίστοιχα εξελιγμένος με αυτών των τυπικών μπαταριών. Αυτό συνεπάγεται υψηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με το κόστος παραγωγής των τυπικών μπαταριών.

Σύγκριση υπερπυκνωτών και μπαταριών

Έγινε αντιληπτό από τα παραπάνω κεφάλαια ότι οι υπερπυκνωτές είναι ένα είδος πυκνωτών, με εξαιρετικά μεγάλη χωρητικότητα, όπου η αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην φόρτιση και εκφόρτιση στη διεπαφή ηλεκτροδίου-ηλεκτρολύτη. Οι υπερπυκνωτές υπακούν στις βασικές αρχές των συμβατικών πυκνωτών, της ταχείας φόρτισης και απελευθέρωσης ενέργειας. Η κύρια διαφορά είναι στη μεγαλύτερη αποτελεσματική επιφάνεια και στο πολύ λεπτό “διηλεκτρικό” (δεν υπάρχει πραγματικό διηλεκτρικό, όμως το “διηλεκτρικό” που δημιουργείται καθορίζεται από το πάχος του διπλού στρώματος). Όπως και οι συμβατικοί



Διάγραμμα 12 - Διάγραμμα Ragone για συσκευές αποθήκευσης ενέργειας [42]

πυκνωτές, έτσι και οι υπερπυκνωτές έχουν χαμηλή εσωτερική αντίσταση, υψηλή ειδική ισχύ και χαμηλή ειδική ενέργεια. Στο Διάγραμμα 12, γίνεται σύγκριση των υπερπυκνωτών με διάφορες συσκευές αποθήκευσης ενέργειας.

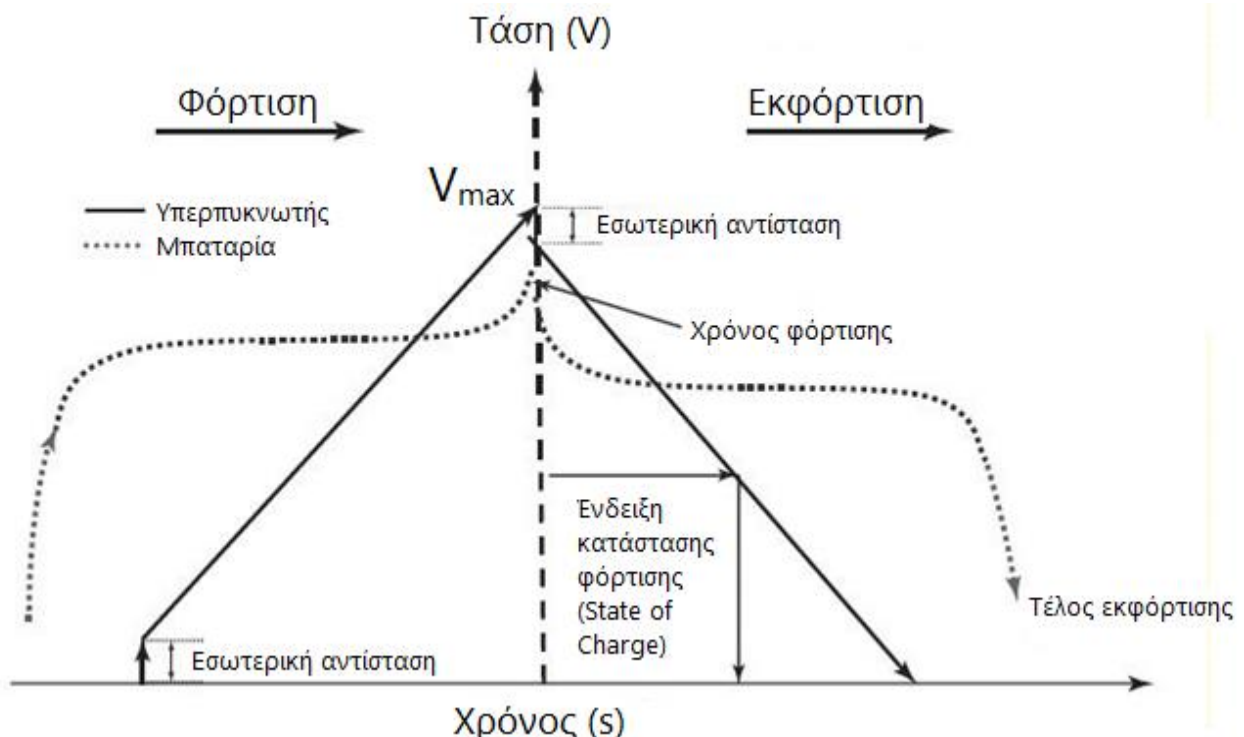
Επομένως, οι υπερπυκνωτές μπορούν να θεωρηθούν ως επαναφορτιζόμενες μπαταρίες λόγω αποθήκευσης και παράδοσης ηλεκτρικού φορτίου. Ο μηχανισμός με τον οποίο αποθηκεύουν φορτίο είναι εντελώς διαφορετικός από τις συμβατικές μπαταρίες. Για αυτόν τον λόγο, οι υπερπυκνωτές δεν πρέπει να θεωρηθούν αντικαταστάτες των μπαταριών, αλλά συμπληρωματικές συσκευές αποθήκευσης ενέργειας. Αυτή η θεώρηση, τοποθετεί τους υπερπυκνωτές σε εξειδικευμένη κατηγορία χρήσης λόγω διάφορων παραγόντων, όπως παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4).

Χαρακτηριστικά	Πυκνωτής	Υπερπυκνωτής διπλού στρώματος	Μπαταρία
Παραδείγματα	Al, οξείδιο Ta	Ενεργός άνθρακας σε NaClO ₄ ή LiClO ₄	Pb-H ₂ SO ₄ , Ni-Cd, Ni-MH
Μηχανισμός αποθήκευσης ενέργειας	Ηλεκτροστατικός	Ηλεκτροστατικός	Χημικός
Ειδική ενέργεια (Wh/kg)	< 0.1	1 - 10	≈ 20 - 150
Ειδική ισχύς (W/kg)	>> 10000	500 - 10000	< 1000
Χρόνος εκφόρτισης (t _a)	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³ δευτερόλεπτα	Δευτερόλεπτα έως λεπτά	0.3 - 3 ώρες
Χρόνος φόρτισης (t _c)	10 ⁻⁶ - 10 ⁻³ δευτερόλεπτα	Δευτερόλεπτα έως λεπτά	1.5 - 5 ώρες
Αποδοτικότητα (t _a /t _c)	≈ 1	0.85 - 0.99	0.7 - 0.85
Κύκλοι λειτουργίας (χρόνος ζωής)	>> 10 ⁶ (>> 10 χρόνια)	> 10 ⁶ (> 10 χρόνια)	≈ 1500 (≈ 3 χρόνια, λιγότερο για εφαρμογές εκφόρτισης υψηλής έντασης ρεύματος)
Περιορισμοί χρόνου ζωής	Σχεδιασμός, υλικά κατασκευής	Ακαθαρσίες, παρεμφερής αντιδράσεις	Χημική αντιστρεψιμότητα, μηχανική σταθερότητα
Μέγιστη τάση κελιού	Υψηλή	< 3 V	≈ 2.1 V

Καθορισμός μέγιστης τάσης	Πάχος διηλεκτρικού,	Σταθερότητα ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων	Θερμοδυναμική των αντιδράσεων φάσης
Τοποθεσία αποθήκευσης φορτίου	Μεταξύ φορτισμένων πλακών	Διεπαφή μεταξύ ηλεκτρολύτη και ηλεκτροδίων	Σε ολόκληρο το ηλεκτρόδιο
Καθορισμός ποσότητας φορτίου προς αποθήκευση	Γεωμετρία ηλεκτροδίων, διηλεκτρικό	Μικροδομή ηλεκτροδίων, ενεργή επιφάνεια ηλεκτρολύτη	Ενεργή μάζα
Τρόπος εκφόρτισης	V/t: Γραμμικά	V/t: Γραμμικά	Μη γραμμικά
Αυτοεκφόρτιση	Χαμηλή	Μέτρια (από μA έως mA)	Χαμηλή

Πίνακας 4 - Σύγκριση πυκνωτών, υπερπυκνωτών διπλού στρώματος και μπαταριών

Με πιο σωστή σχεδίαση των υπερπυκνωτών, αυτοί καθίστανται ικανοί να καλύψουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών, όπως επίσης και να χρησιμοποιηθούν μόνοι τους σε ορισμένες εφαρμογές (και όχι σαν συμπληρωματική μονάδα αποθήκευσης φορτίου). Γι' αυτό τοποθετούνται στον παραπάνω πίνακα ανάμεσα στους πυκνωτές και στις συμβατικές μπαταρίες. Συγκριτικά με τις μπαταρίες παρατίθεται το παρακάτω διάγραμμα, δείχνοντας την τάση ενός ιδανικού υπερπυκνωτή και μίας ιδανικής μπαταρίας.



Διάγραμμα 13 - Προφίλ φόρτισης και εκφόρτισης ιδανικού υπερπυκνωτή και ιδανικής μπαταρίας [43]

Είδη υπερπυκνωτών εμπορίου

Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται σε πλειάδα εφαρμογών (οι εφαρμογές αυτές θα αναφερθούν στο παρακάτω κεφάλαιο). Γι' αυτόν τον λόγο, υπάρχουν διαφορετικά είδη υπερπυκνωτών, ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Οι δύο μεγάλες κατηγορίες στις οποίες χωρίζονται οι υπερπυκνωτές, ανάλογα με το φυσικό μέγεθος των κελιών, είναι:

- Κελιά μικρού μεγέθους.
- Κελιά μεγάλου μεγέθους.
- Κελιά τύπου “πουγκί” (pouch).

Κελιά μικρού μεγέθους

Τα κελιά μικρού μεγέθους χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές, που κυμαίνονται στην περιοχή των ηλεκτρονικών εφαρμογών (όχι ηλεκτρολογικών), όπου απαιτούνται λίγα Farad (1-15 F). Εφαρμογές όπως:

- Εξαρτήματα σε ηλεκτρονικές κάρτες.
- Μονάδες αποθήκευσης ενέργειας για ενεργοποιητές.
- Βοηθητική παροχή ενέργειας σε μνήμες.
- Συστήματα ήχου.
- Μονάδες διαχείρισης ενέργειας φορητών υπολογιστών.
- LED φλας κινητών τηλεφώνων.

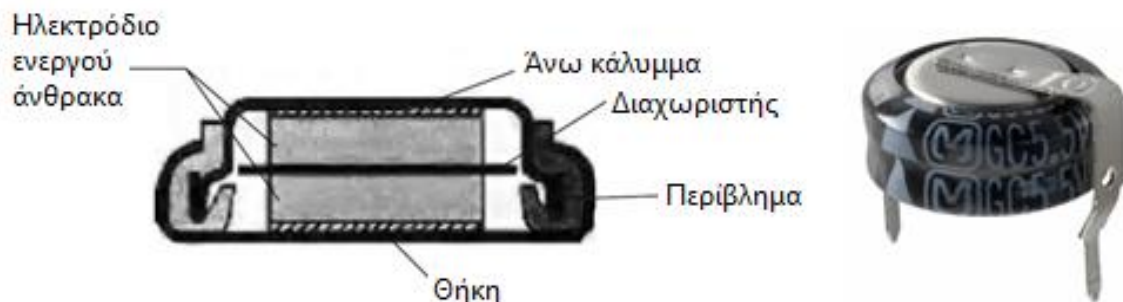
Μερικές εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιους υπερπυκνωτές είναι οι παρακάτω:

- Panasonic
- NEC-Tokin
- Elna
- Seiko
- Korship
- Cooper Bussmann
- Alumapro
- CapXX
- Shoei Electronics
- Smart Thinker

- Nichicon
- Nippon Chemicon
- Vina
- Vishay
- Rubycon

Οι υπερπυκνωτές τέτοιων εφαρμογών παρουσιάζονται σε δύο βασικές μορφές κελιών:

→ Μορφή κέρματος (Coin cell), όπου η φυσική μορφή του μοιάζει με κέρμα.



Εικόνα 30 - Υπερπυκνωτής μορφής κέρματος [44] [45]

→ Τυλιχτή μορφή (Wound cell), όπου τα εσωτερικά στοιχεία του πυκνωτή είναι τυλιγμένα στο εσωτερικό του. Η χωρητικότητα αυτών είναι μεγαλύτερη από την χωρητικότητα των υπερπυκνωτών της μορφής κέρματος.



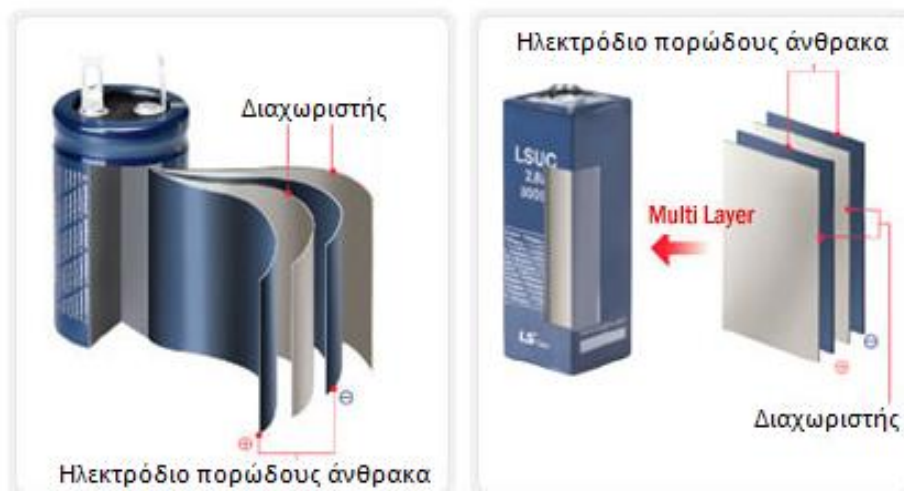
Εικόνα 31- Υπερπυκνωτής τυλιχτής μορφής [46]

Κελιά μεγάλου μεγέθους

Η κατασκευή τέτοιων κελιών δεν είναι τυποποιημένη. Κάθε εταιρία σχεδιάζει τα κελιά της σύμφωνα με την ανάπτυξη των εσωτερικών εξαρτημάτων και την βελτιστοποίηση της απόδοσης του πυκνωτή. Οι υπερπυκνωτές αυτοί διακρίνονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

→ Κελιά υψηλής ισχύος, που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές που απαιτείται υψηλή ισχύς, όπως υβριδοποίηση οχημάτων. Λόγω του πεδίου εφαρμογών των υπερπυκνωτών αυτών, ο σχεδιασμός των κελιών είναι απλός, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται πολύ μικρή εσωτερική αντίσταση (ESR). Μερικές από τις εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιους υπερπυκνωτές είναι οι εξής:

- Batscap
- Maxwell Technologies
- Nesscap
- LS Mtron
- Eaton



Εικόνα 32 – Διατομή υπερπυκνωτή κυλινδρικής και ορθογωνικής γεωμετρίας κελιού μεγάλου μεγέθους [47]

Οι υπερπυκνωτές αυτοί έχουν μορφή όμοια με αυτή των υπερπυκνωτών τυλιχτής μορφής κελιών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Ένα πλεονέκτημα αυτής της μορφής υπερπυκνωτών είναι ότι, τυλίγοντας τα ηλεκτρόδια, μπορούν να αποθηκευτούν σε μικρή συσκευασία. Τα μεγάλα και λεπτά (>100 nm) ηλεκτρόδια μειώνουν πολύ την εσωτερική αντίσταση των υπερπυκνωτών και απλοποιούν τη στεγανοποίησή τους. Λόγω του πεδίου χρήσεως των πυκνωτών αυτών (υβριδοποίηση οχημάτων), οι υπερπυκνωτές αυτοί πρέπει να είναι αεροστεγείς, υδατοστεγείς, να μην επιτρέπεται η διαρροή ηλεκτρολύτη και να αντέχει υψηλές πιέσεις (περίπου 5 bar). Οι υπερπυκνωτές

αυτοί συναντώνται με γεωμετρία κυλίνδρου (κυλινδρικοί) ή ορθογωνική γεωμετρία (πρισματικοί).



Εικόνα 33 – Διάφορα είδη υπερπυκνωτών κελιών υψηλής ισχύος [48] [49] [50]

→ Κελιά αποθήκευσης ενέργειας για εφαρμογές όπως UPS (Uninterrupted Power Supply).

Η κατασκευή των κελιών αυτών θυμίζει τους συμβατικούς ηλεκτρολυτικούς πυκνωτές.

Η εσωτερική αντίσταση είναι υψηλότερη σε αυτούς τους υπερπυκνωτές, για τρεις λόγους:

- Οι ηλεκτρολύτες τους έχουν ως βάση το ανθρακικό πολυπροπυλένιο.
- Ο τρόπος που έχει σχεδιαστεί δεν είναι βελτιστοποιημένος για απόδοση ισχύος.
- Τα ηλεκτρόδια είναι παχύτερα από τους παραπάνω υπερπυκνωτές, για να αυξηθεί ο συντελεστής πυκνότητας ενέργειας (ειδική ενέργεια).

Μερικοί από τους κύριους κατασκευαστές τέτοιων υπερπυκνωτών είναι οι εξής:

- Nippon Chemicon
- Panasonic
- Nichicon
- Asahi Glass
- Meidensha

Οι υπερπυκνωτές αυτοί συναντώνται με γεωμετρία κυλίνδρου (κυλινδρικοί) ή ορθογωνική γεωμετρία(πρισματικοί).



Εικόνα 34 – Υπερπυκνωτές κελιών αποθήκευσης ενέργειας κυλινδρικής γεωμετρίας [51]

Κελία τύπου πουγκί

Αυτοί οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται για μικρομεσαίες εφαρμογές (μέχρι 2400 mF). Ο σχεδιασμός και η γεωμετρία τους παραπέμπει στις μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε κινητά τηλέφωνα. Έτσι μεγιστοποιείται (ως προς το βάρος και τον όγκο) η ενεργειακή πυκνότητα, καθιστώντας τους κατάλληλους για την χρήση σε ηλεκτρονικές συσκευές χειρός και εφαρμογές ηλεκτρονικής. Λόγω της ελαφριάς συσκευασίας τους αυτοί οι υπερπυκνωτές έχουν μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος και ενέργειας. Όμως παρουσιάζουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως:

- Δεν αντέχουν μηχανικές δονήσεις
- Η αποδοτικότητα της θερμικής διαχείρισης είναι μικρότερη σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες.
- Αύξηση όγκου με τη δημιουργία αερίων λόγω αύξησης της θερμοκρασίας.
- Τυλίγματα του πυκνωτή που έχουν ως βάση πολυμερή, δεν είναι υδατοστεγή και αεροστεγή για μεγάλο χρονικό διάστημα.

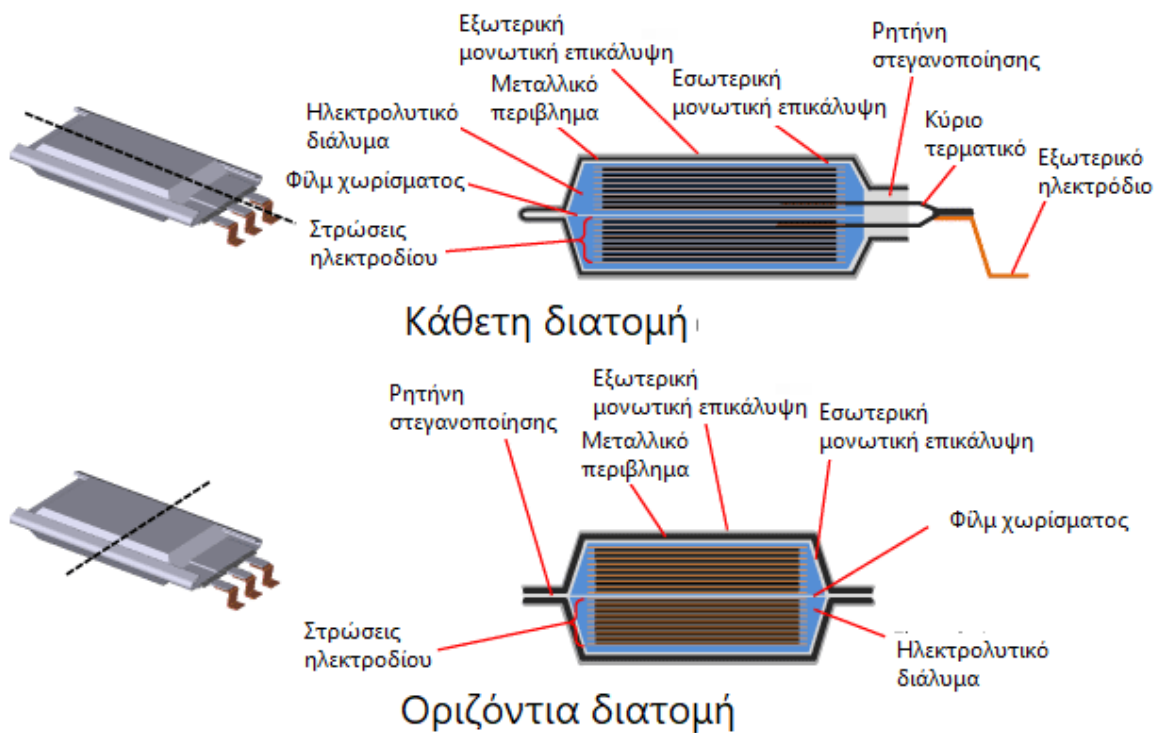
Μερικές από τις εταιρίες που κατασκευάζουν τέτοιους πυκνωτές είναι οι εξής:

- CapXX
- Murata
- APowerCap

- Nisshinbo
- Yunasko



Εικόνα 35 – Υπερπυκνωτής τύπου πουγκί [52]



Εικόνα 36 – Διατομή υπερπυκνωτή τύπου πουγκί [53]

Συστοιχία κελιών

Λόγω της χαμηλής τάσης των υπερπυκνωτών (2.5 – 3.0 V), απαιτείται η χρήση πολλαπλών πυκνωτών σε εφαρμογές όπου χρειάζεται υψηλή τάση και αποδοτικότητα ισχύος, συνδεδεμένους με τέτοιο τρόπο, ώστε να καλύπτει τις απαιτήσεις. Οι πυκνωτές μπορούν να συνδεθούν είτε σε σειρά, είτε παράλληλα, είτε με συνδυασμό των δύο προηγούμενων τρόπων.

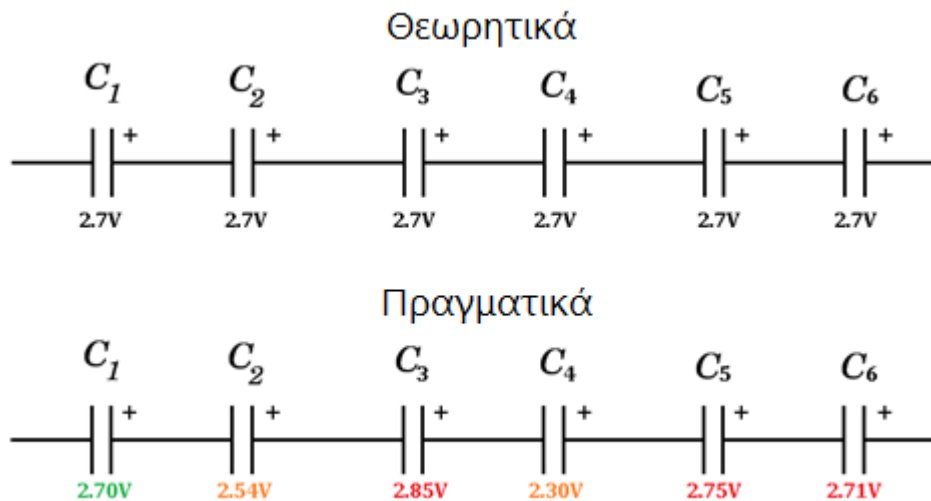
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος σύνδεσης είναι σε σειρά, διότι αυξάνεται η τάση και η ενέργεια της συστοιχίας των πυκνωτών. Όμως κατά τη σύνδεσή τους σε σειρά, εμφανίζουν άνισες κατανομές τάσης, διότι οι υπερπυκνωτές δεν είναι ίδιοι μεταξύ τους, λόγω κατασκευαστικών ανοχών. Εδώ προκύπτει η ανάγκη εξισορρόπησης της τάσης των πυκνωτών για την προστασία τους από την καταστροφή, καθώς και για την εξασφάλιση της σωστής λειτουργίας τους. Αυτό



Εικόνα 37 – Συστοιχίες υπερπυκνωτών (σύνδεση σε σειρά) [54] [55]
ονομάζεται εξισορρόπηση τάσης (balancing).

Εξισορρόπηση τάσης

Θεωρητικά, σε μία διάταξη υπερπυκνωτών που είναι συνδεδεμένη είτε σε σειρά είτε παράλληλα, όλοι οι πυκνωτές έχουν την ίδια τάση. Στην πράξη όμως συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο (Εικόνα 38). Ένας τρόπος για να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο είναι φορτίζοντας κάθε πυκνωτή ξεχωριστά και έπειτα να γίνεται η σύνδεση μεταξύ τους, κάτι το οποίο είναι πολύ χρονοβόρο και καθόλου πρακτικό. Επιπλέον, είναι σημαντικό να εξασφαλιστεί, ότι κάθε



Εικόνα 38– Θεωρητική και πραγματική κατανομή τάσης μεταξύ των πυκνωτών (σύνδεση σε σειρά)

πυκνωτής ξεχωριστά δεν θα πρέπει να ξεπερνάει την ονομαστική τάση λειτουργίας του, καθώς αυτό μπορεί να προκαλέσει

- Αποσύνθεση του ηλεκτρολύτη.
- Παραγωγή επικίνδυνων αερίων.
- Αύξηση της ESR (Εσωτερική αντίσταση)
- Μείωση της διάρκειας ζωής του πυκνωτή

Η ανομοιομορφία των πυκνωτών οφείλεται στην μαζική τους παραγωγή και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ανομοιομορφία στην χωρητικότητα των πυκνωτών. Η κατανομή της τάσης στους υπερπυκνωτές σε σειρά, εξαρτάται αρχικά από τη χωρητικότητα. Εάν το επίπεδο τάσης παραμείνει σταθερό για ένα χρονικό διάστημα, η κατανομή της τάσης (η τάση των πυκνωτών), εξαρτάται πιά από την εσωτερική αντίσταση (ρεύμα διαρροής). Σε ιδανική περίπτωση όπου οι υπερπυκνωτές στη συστοιχία είχαν την ίδια χωρητικότητα, γίνεται ισοκατανομή της τάσης μεταξύ των πυκνωτών. Λόγω της διαφοράς των χωρητικοτήτων μεταξύ τους, οι πυκνωτές με την μεγαλύτερη χωρητικότητα φορτίζουν σε χαμηλότερες τάσεις, ενώ αυτοί με μικρότερη χωρητικότητα φορτίζουν σε υψηλότερες τάσεις και σε λιγότερο χρόνο από τους προηγούμενους. Επιπλέον, ο πυκνωτής με το μεγαλύτερο ρεύμα διαρροής στη συστοιχία, θα εκφορτιστεί σε μία χαμηλότερη τάση μοιράζοντας την στους άλλους πυκνωτές που είναι συνδεδεμένοι με αυτόν, με αποτέλεσμα την υπερφόρτιση τους. Για παράδειγμα, αν δύο πυκνωτές με ονομαστική τάση 2.7 V, 10 F ο καθένας, συνδεθούν σε σειρά με τον έναν πυκνωτή να έχει +20% της ονομαστικής του χωρητικότητας ($10\text{ F} + 20\% \cdot (10\text{ F}) = 12\text{ F}$) και τον άλλον να έχει -10% (9F). Τότε η τάση, στη χειρότερη περίπτωση, στα άκρα των πυκνωτών θα είναι:

$$V_{cap1} = V_{supply} * \left(\frac{C_{cap1}}{C_{cap1} + C_{cap2}} \right)$$

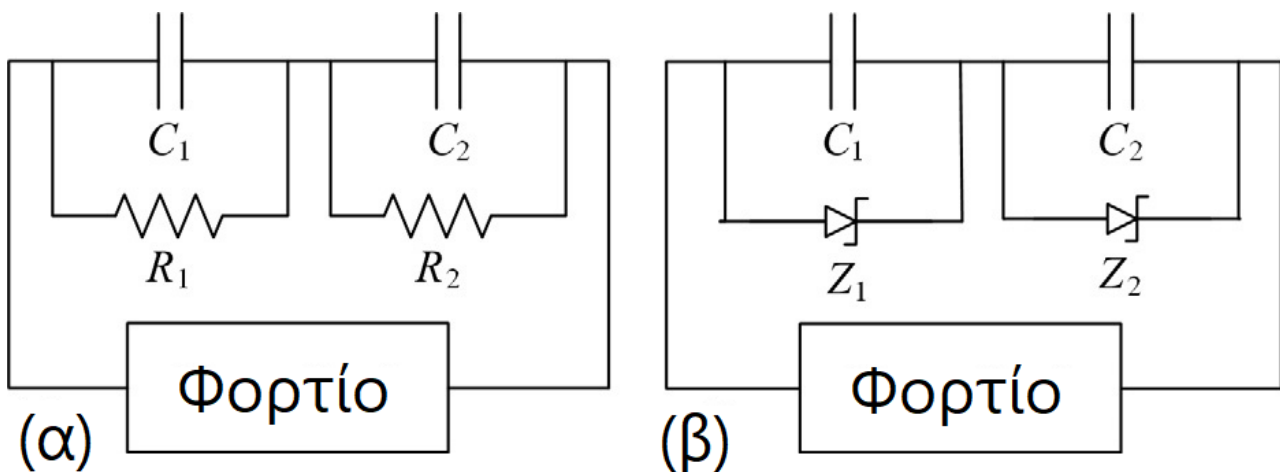
$$V_{supply} = 5.4 \text{ V}$$

$$V_{cap1} = 5.4 * \left(\frac{12}{12 + 9} \right) = 3.08 \text{ V}$$

Άρα, η τάση του πυκνωτή με την μικρότερη χωρητικότητα φτάνει στα 3.08 V > 2.7 V. Υπάρχουν δύο τρόποι για την εξισορρόπηση της τάσης των κελιών της συστοιχίας των υπερπυκνωτών:

→ Παθητική εξισορρόπηση (passive balancing). Η παθητική εξισορρόπηση χρησιμοποιεί κυρίως είτε αντιστάσεις, είτε διόδους Zener.

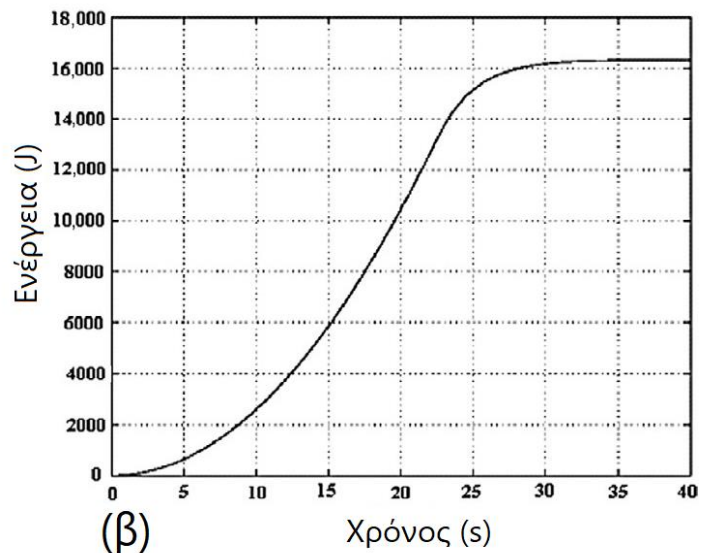
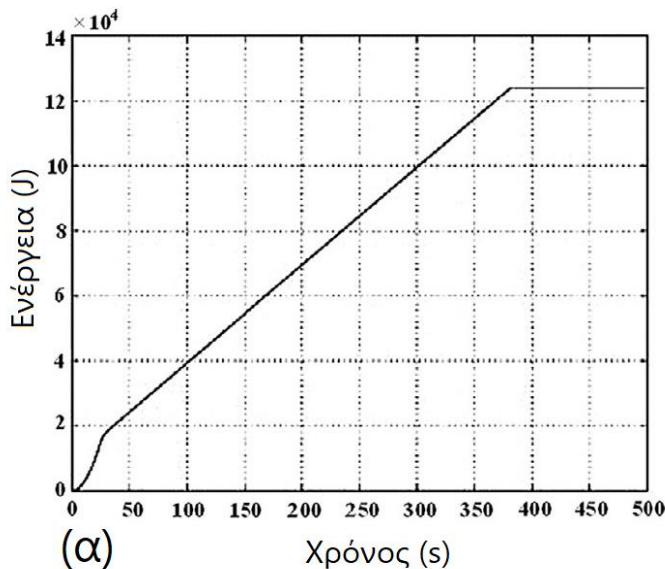
- Εξισορρόπηση με αντιστάσεις (resistance balancing) (Εικόνα 39.α). Η εξισορρόπηση εδώ επιτυγχάνεται με τη σύνδεση μίας αντίστασης παράλληλα με τον κάθε πυκνωτή όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.α. Το ποσό του ρεύματος που ρέει από τις αντιστάσεις είναι ανάλογο της τάσης των κελιών, δηλαδή εκτρέπεται περισσότερο ρεύμα στις αντιστάσεις καθώς η τάση των κελιών αυξάνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς της τάσης μεταξύ των κελιών, με τους υπερπυκνωτές με τη μεγαλύτερη τάση να εκφορτίζονται περισσότερο. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου είναι η ευκολία στην κατασκευή και το μικρό κόστος. Τα μειονεκτήματα από την άλλη είναι ότι η ανακτώμενη ενέργεια μετατρέπεται σε επιπλέον απώλειες στις αντιστάσεις και το ρεύμα που αντλείται από τις αντιστάσεις δεν μπορεί να ελεγχθεί, με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ελεγχθεί πλήρως η τάση των κελιών και οι πυκνωτές να εκφορτίζονται συνεχώς. Η παθητική εξισορρόπηση



Εικόνα 39 - Τρόποι εξισορρόπησης τάσης, (α) με αντιστάσεις, (β) με διόδους Zener [56]

χρησιμοποιείται σε εφαρμογές που δεν φορτίζονται/εκφορτίζονται συχνά οι υπερπυκνωτές και η πηγή φόρτισης είναι σταθερή.

- Εξισορρόπηση με διόδους Zener (Zener diode balancing) (Εικόνα 39.β). Για καλύτερο έλεγχο του ρεύματος που αντλείται από τους υπερπυκνωτές, χρησιμοποιούνται διόδοι Zener για τον καλύτερο έλεγχο αυτών. Λόγω της λειτουργίας της διόδου στην περιοχή κατάρρευσης, χρησιμοποιείται η τάση

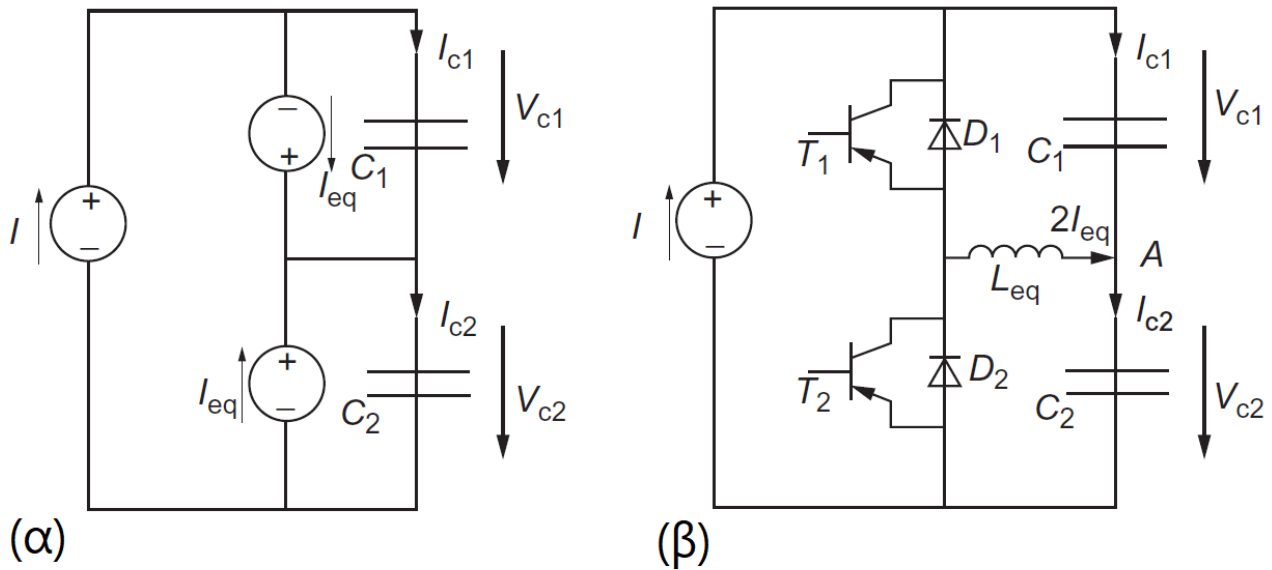


Διάγραμμα 14 – Σύγκριση απωλειών ενέργειας με εξισορρόπηση αντιστάσεων (α) και με εξισορρόπηση διόδων Zener (β) [57]

κατάρρευσης (breakdown voltage) για την ρύθμιση της τάσης. Η συνδεσμολογία παρουσιάζεται στην Εικόνα 39.β, όπου όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει πολύ κοντά στην τάση κατάρρευσης, τότε γίνεται εκτροπή ρεύματος προς τη δίοδο. Το πλεονέκτημα αυτού του τρόπου είναι, ότι περιορίζεται το ποσό της χαμένης ενέργειας (Διάγραμμα 14), διότι ο κλάδος αυτός “ενεργοποιείται” μόνο όταν η τάση του πυκνωτή ξεπεράσει την τάση κατάρρευσης. Όμως, το μειονέκτημα αυτού του τρόπου εξισορρόπησης τάσης είναι ότι υπάρχουν αυξημένες απώλειες όταν ενεργοποιείται το κύκλωμα, όπως επίσης ότι εξαρτάται από τον συντελεστή θερμοκρασίας των διόδων.

- Ενεργή εξισορρόπηση (active balancing). Στην ενεργή εξισορρόπηση, η ανακτώμενη ενέργεια διαχέεται σε διακλάδωση χαμηλής αντίστασης η οποία την αποβάλλει στο περιβάλλον. Λόγω του τρόπου λειτουργίας της, η ενεργή εξισορρόπηση καθίσταται κατάλληλη για εφαρμογές χαμηλής ισχύος (ή περιορισμένη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας) ή για συνεχή φόρτιση/εκφόρτιση των πυκνωτών. Η μέθοδος αυτή καταναλώνει λιγότερο ρεύμα σε σχέση με την παθητική εξισορρόπηση σε κατάσταση ηρεμίας και εκφορτίζει τον πυκνωτή με ρεύμα μεγάλης έντασης, μόνο όταν αυτός έχει μεγαλύτερη

τάση από την ονομαστική. Το ενεργό κύκλωμα αναγκάζει την τάση του κάθε πυκνωτή να παραμένει στην ονομαστική τάση. Η γενική φιλοσοφία της ενεργής εξισορρόπησης



Εικόνα 40 – Ενεργή εξισορρόπηση. (α) Γενική ιδέα, (β) Τοπολογία buck-boost [58]

παρουσιάζεται στην Εικόνα 40.α. Το ρεύμα φόρτισης I επαυξάνεται από τα ισοδύναμα ρεύματα I_{eq} . Το μέγεθος και η κατεύθυνση των ισοδύναμων ρευμάτων ελέγχεται σύμφωνα με τις τοπικές τάσεις που παρουσιάζονται στις αντίστοιχες συσκευές. Τα ισοδύναμα κυκλώματα παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στην Εικόνα 40.β, όπου βασίζονται στην τοπολογία buck-boost. Εάν η τάση V_{c1} ανιχνευθεί αρκετά μεγαλύτερη από τη V_{c2} , το τρανζίστορ T_1 θα ενεργοποιηθεί σε μία συγκεκριμένη συχνότητα έτσι ώστε να παράγει ένα θετικό ρεύμα εξισορρόπησης $2I_{eq}$. Εάν $V_{c2} > V_{c1}$, τότε το τρανζίστορ T_2 θα ενεργοποιηθεί έτσι ώστε να παράγει ένα αρνητικό ρεύμα εξισορρόπησης. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι οι τάσεις να εξισωθούν.

Σύγκριση πυκνωτών βάση γεωμετρίας

Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5) συγκρίνονται οι πυκνωτές ανάλογα της γεωμετρίας τους (κυλινδρικής, πρισματικής, πουγκιού):

Παράμετρος	Πρισματικός	Κυλινδρικός	Πουγκί
Μέχρι και 100F	<ul style="list-style-type: none"> → Ελάχιστες κατασκευές με μεταλλικό περίβλημα (επίπεδα κελιά). → Μερικοί κατασκευαστές: NEC/Tokin, Cellergy, Maxwell Tech., OptiXtal, Kyocera-AVX, Tecate 	<ul style="list-style-type: none"> → Πιο αποδεκτές κατασκευές. → Μερικοί κατασκευαστές: Panasonic, Nippon Chemicon, NEC, Korchip, Maxwell Tech., Nichicon, Elna 	<ul style="list-style-type: none"> → Ελάχιστες κατασκευές. → Πολύ επίπεδα κελιά. → Μερικοί κατασκευαστές: CapXX, Murata
Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> → Πολύ καλή στεγανότητα. → Βολικό για τοποθέτηση σε στριμωγμένα μέρη. → Υψηλή πυκνότητα ενέργειας από ογκομετρική άποψη. 	<ul style="list-style-type: none"> → Καλή στεγανότητα. → Χαμηλό κόστος κατασκευής. 	<ul style="list-style-type: none"> → Πολύ ελαφρύς → Φθηνός. → Πολύ υψηλή πυκνότητα ενέργειας.
Δυσκολίες	<ul style="list-style-type: none"> → Υψηλό κόστος κατασκευής. 	<ul style="list-style-type: none"> → Δεν συστήνεται για επίπεδες συσκευές. 	<ul style="list-style-type: none"> → Μικρή διάρκεια ζωής σε δυσμενή περιβάλλοντα (π.χ. υψηλή θερμοκρασία ή/και υψηλή υγρασία)
Πάνω από 100F	<ul style="list-style-type: none"> → Μερικοί κατασκευαστές: Nesscap, LS Cable, Nippon Chemicon, Meidensha, Ioxus 	<ul style="list-style-type: none"> → Μερικοί κατασκευαστές: Batscap, Maxwell, Nesscap, Nippon Chemicon, Panasonic, Elna. 	<ul style="list-style-type: none"> → Μερικοί κατασκευαστές: APowerCap, Nisshinbo PowerSystem, Yunasko

Πλεονεκτήματα	<ul style="list-style-type: none"> → Υψηλότερη πυκνότητα ενέργειας. → Πολύ καλή στεγανότητα. 	<ul style="list-style-type: none"> → Φθηνοί στην κατασκευή. → Μεγαλύτερη διάρκεια ζωής. → Μικρός αριθμός εξαρτημάτων. → Υψηλή αποδοτικότητα θερμικής διαχείρισης. 	<ul style="list-style-type: none"> → Υψηλή πυκνότητα ενέργειας. → Φθηνοί στην κατασκευή. → Περιορισμένος αριθμός εξαρτημάτων.
Δυσκολίες	<ul style="list-style-type: none"> → Υψηλή εσωτερική αντίσταση. → Υψηλό κόστος σχεδιασμού (λόγω μεγάλο αριθμό εξαρτημάτων/κελιών). → Υψηλό κόστος κατασκευής. → Χαμηλή αποδοτικότητα θερμικής διαχείρισης. 	<ul style="list-style-type: none"> → Τη χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας. 	<ul style="list-style-type: none"> → Μικρή διάρκεια ζωής σε δυσμενή περιβάλλοντα (π.χ. υψηλή θερμοκρασία ή/και υψηλή υγρασία). → Καταστροφή σε περίπτωση διαρροής ηλεκτρολύτη. → Πολύ χαμηλή αποδοτικότητα θερμικής διαχείρισης.

Πίνακας 5 - Σύγκριση υπερπυκνωτών με βάση της γεωμετρίας τους

Πεδίο εφαρμογών

Οι υπερπυκνωτές, αν και σχετικά καινούρια τεχνολογία, χρησιμοποιείται σε διάφορες εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας και σταθεροποίησης τάσης σε διάφορους τομείς, οι οποίοι αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο “Είδη υπερπυκνωτών εμπορίου”. Συγκεκριμένα, στον χώρο του οχήματος χρησιμοποιείται στους παρακάτω τομείς:

Μέσα Μαζικής Μεταφοράς

Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται στα παρακάτω μέσα:

→ Τρένα. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ως συμπλήρωμα των μπαταριών σε συστήματα εκκίνησης ντιζελαμαξών με ηλεκτρική μετάδοση. Επιπλέον

χρησιμοποιούνται στην αναγεννητική πέδηση, ανακτώντας την παραγόμενη ενέργεια κατά το φρενάρισμα.

- Ελαφριά τρένα και τραμ. Εδώ χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση ενέργειας, έτσι ώστε να μειωθεί η χρήση των εναέριων καλωδίων σε περιοχές όπου είναι δύσκολη η τοποθέτησή τους, αλλά και σε περιοχές ιστορικής σημασίας.
- Λεωφορεία. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται σε υβριδικά και ηλεκτρικά λεωφορεία. Το πρώτο υβριδικό λεωφορείο που χρησιμοποιούσε υπερπυκνωτές κατασκευάστηκε από τη MAN, το λεγόμενο “Ultracapbus”. Το λεωφορείο λειτούργησε σε κανονικές συνθήκες το 2001/2002. Το λεωφορείο εφοδιαζόταν με 8 μονάδες κελιών υπερπυκνωτών (που η κάθε μία περιλάμβανε 36 εξαρτήματα), στα 80 V το καθένα, λειτουργώντας στα 640 V και φόρτιζε/εκφόρτιζε στα 400 A.



Εικόνα 41 – MAN Ultracapbus [59]

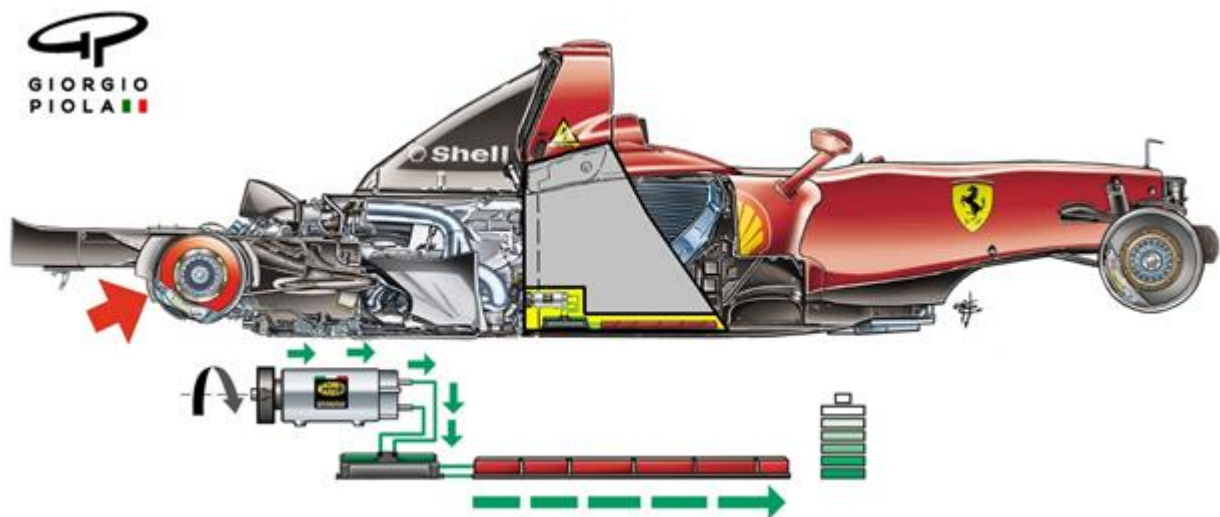


Εικόνα 42- Capbus [60]

Στις αρχές του 2005 στην Σαγκάη, έγινε η δοκιμή ενός λεωφορείου που ονομάζεται Carbus. Το λεωφορείο αυτό κινείται χωρίς καλώδια και εφοδιάζεται με υπερπυκνωτές που φόρτιζαν μερικώς σε ειδικές περιοχές κατά το δρομολόγιο του και ολικώς στους τερματικούς. Εκτιμάται ότι οι υπερπυκνωτές ήταν πιο φθηνοί από τις μπαταρίες ιόντων-λιθίου, και το κάθε λεωφορείο έκανε οικονομία 200.000\$ τον χρόνο σε καύσιμα.

Αγωνιστικά οχήματα

Από τις 23 Μαΐου 2007, η FIA επέβαλε τη χρήση υβριδικών συστημάτων παραγωγής ενέργειας, με την χρήση μηχανής εσωτερικής καύσης και “υπερμπαταριών” που αποτελούνταν από μπαταρίες και υπερπυκνωτές συνδεδεμένα παράλληλα (Kinetic Energy Recovery System – K.E.R.S.). Το σύστημα έχει αναπτυχθεί πολύ τα τελευταία χρόνια, με την αύξηση της ισχύος



Εικόνα 43 - Σύστημα K.E.R.S. [61]

από 60 kW στα 120 kW, από το 2014. Οι υπερπυκνωτές επίσης χρησιμοποιούνται σε αγωνιστικά οχήματα αγώνων αντοχής (Endurance Racing). Συγκεκριμένα, το Toyota TS030 είναι ένα υβριδικό όχημα κατηγορίας LMP1, το οποίο χρησιμοποιεί υβριδικό σύστημα κίνησης με υπερπυκνωτές. Το παραπάνω όχημα κέρδισε τρεις από τους οκτώ αγώνες τη σεζόν 2012 του FIA World Endurance Championship (WEC).

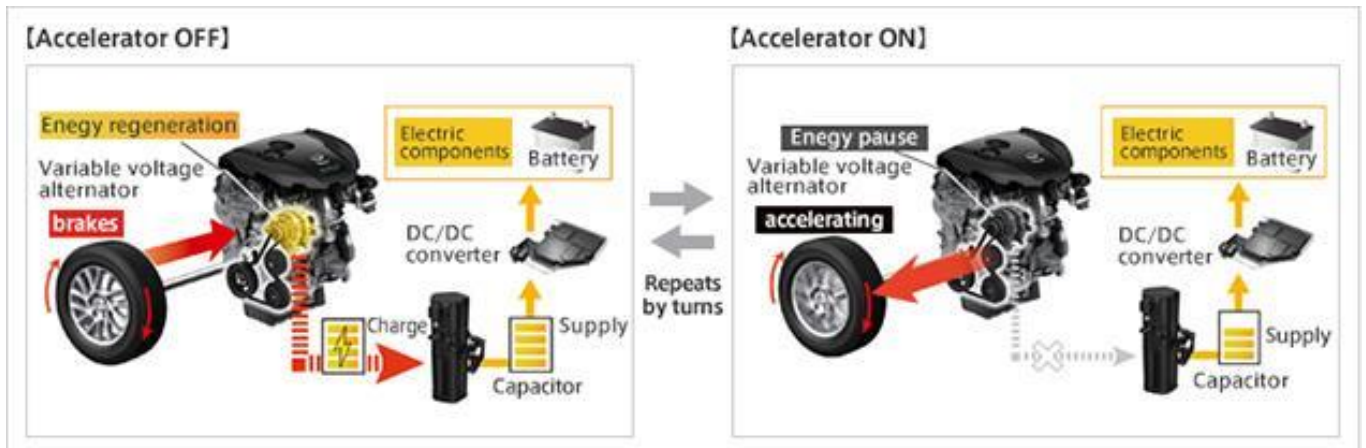


Εικόνα 44 - Toyota TS030 [62]

Συμβατικά και εμπορικά οχήματα

Η χρήση υπερπυκνωτών σε υβριδικά και ηλεκτρικά οχήματα βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη, κυρίως για την αναγεννητική πέδηση. Έρευνες δείχνουν μείωση της κατανάλωσης καύσιμου με την χρήση αναγεννητικής πέδησης σε υβριδικά οχήματα από 20 έως 60%. Η ικανότητα των υπερπυκνωτών να φορτίζουν γρηγορότερα από τις μπαταρίες, η σταθερότητα των ηλεκτρικών ιδιοτήτων τους, το μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασιών χρήσης τους καθώς και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους, τους καθιστούν κατάλληλους για χρήση στα συμβατικά οχήματα. Όμως το βάρος, ο όγκος και κυριότερα το κόστος (σε σχέση με τις μεγάλες μπαταρίες λιθίου που χρησιμοποιούνται σε συμβατικά οχήματα) μπορεί να ανατρέψουν αυτά τα πλεονεκτήματα. Για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιούνται παράλληλα με τις μπαταρίες, για την ταχεία απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται σε οχήματα με κινητήρες εσωτερικής καύσης, για την αναγεννητική πέδηση και για το σύστημα Start/Stop. Για παράδειγμα το Mazda 6, χρησιμοποιεί υπερπυκνωτές για την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας από τον εναλλακτήρα μέσω αναγεννητικής πέδησης κατά την

επιβράδυνση του οχήματος, σε ένα σύστημα της που ονομάζεται i-Eloop και είναι εφοδιασμένο με υπερπυκνωτές της Nippon Chemi-Con Corp..



Εικόνα 45- Σύστημα i-Eloop [63]



Εικόνα 46 - Mazda 6 [64]

Οι όμιλοι PSA Peugeot – Citroën και General Motors θα τοποθετήσουν υπερπυκνωτές, σε οχήματα που εφοδιάζονται με σύστημα Start/Stop, λόγω της ταχείας φόρτισής τους. Δύο μοντέλα της General Motors, η Cadillac ATS και CTS, εφοδιάζονται ήδη με υπερπυκνωτές της Maxwell στο Start/Stop σύστημά τους.



Εικόνα 47 - Cadillac ATS (αριστερά) & Cadillac CTS (δεξιά) [65] [66]

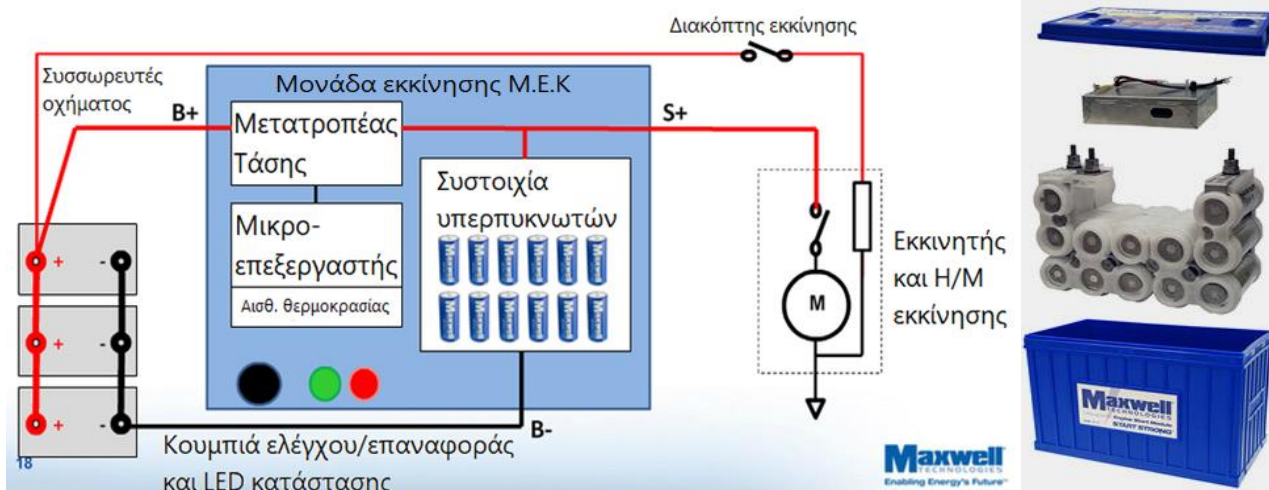
Οι υπερπυκνωτές επιπλέον, λόγω της φύσης τους, χρησιμοποιούνται σε βοηθητικά συστήματα που απαιτούν βραχυπρόθεσμη απόδοση μεγάλου ποσού ενέργειας, μεγάλη διάρκεια ζωής της ηλεκτρικής πηγής και φυσικά μικρό μέγεθος και βάρος της κατασκευής. Συγκεκριμένα, οι βοηθητικές εφαρμογές που βρίσκει στα οχήματα, είναι οι εξής:

- Σε συστήματα ασφαλείας, ως δευτερεύουσα πηγή ενέργειας σε περίπτωση αστοχίας της μπαταρίας του οχήματος. Τέτοια συστήματα είναι συνήθως:
 - Δευτερεύοντα συστήματα αυτόματου κιβωτίου ταχυτήτων.
 - Συστήματα αυτόματου ελέγχου σύγκρουσης.
 - Ελεγκτές του συστήματος Ride-By-Wire.
- Σε εφαρμογές υψηλής ισχύος. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται επιπλέον σε εφαρμογές που χρειάζεται μία αξιόπιστη πηγή ενέργειας με μεγάλη διάρκεια ζωής. Μερικές από αυτές τις εφαρμογές είναι οι παρακάτω:
 - Ηλεκτρική υποβοήθηση τιμονιού (Electric Power Steering – EPS).
 - Ηλεκτρικά υποβοηθούμενοι υπερπληρωτές.
 - Συστήματα ενεργής ανάρτησης.



Εικόνα 48 – Υπερπυκνωτές και συστοιχίες υπερπυκνωτών που διατίθενται στο εμπόριο [67]

Επιπλέον, υπάρχουν στο εμπόριο συστοιχίες υπερπυκνωτών, όπου συνδέονται στην μπαταρία του οχήματος για την εκκίνηση του σε δυσμενείς συνθήκες (χαμηλές θερμοκρασίες) και όταν η μπαταρία έχει εκφορτιστεί πλήρως από επαναλαμβανόμενες εκκινήσεις ή από ηλεκτρικά φορτία του οχήματος. Το κύριο πεδίο χρήσης των μονάδων αυτών είναι σε εμπορικά οχήματα βαρέως τύπου. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 49) παρουσιάζεται η δομή και η συνδεσμολογία τέτοιας συστοιχίας, για την εκκίνηση του οχήματος.



Εικόνα 49 – Συνδεσμολογία και δομή μονάδας εκκίνησης οχήματος [68] [69]

Ανυψωτικά μηχανήματα και γερανοί

Οι υπερπυκνωτές έχουν βρει μικρή εφαρμογή στον χώρο των οχημάτων τεχνικών έργων. Συγκεκριμένα, σε υβριδικούς γερανούς (ντίζελ/ηλεκτρικοί) χρησιμοποιούνται για την απόδοση ρεύματος μεγάλης έντασης κατά την ταχεία ανύψωση φορτίων και την ανύψωση φορτίου μεγάλου βάρους. Επιπλέον, έγινε εφαρμογή σε περνοφόρο ανυψωτικό υβριδικό όχημα, όπου οι συσσωρευτές χρησιμοποιούνται για την απορρόφηση κορυφώσεων της έντασης του ρεύματος, την αποθήκευση ενέργειας κατά την ανάκτηση από την πέδηση και την άμεση απόδοσή της κατά την επιτάχυνση και την ανύψωση φορτίων. Τα αποτελέσματα είναι η εξοικονόμηση ενέργειας κατά 50%, καθώς και ο περιορισμός της αλλαγής των μπαταριών εν ώρα εργασίας λόγω πλήρης εκφόρτισης (Battery swap mid shift).



Εικόνα 50 - Υβριδικό περνοφόρο ανυψωτικό όχημα [70]

Πειραματική διάταξη

Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι η κατασκευή μίας συστοιχίας υπερπυκνωτών, η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την εκκίνηση της Μ.Ε.Κ., αντικαθιστώντας πλήρως τη μπαταρία μολύβδου – οξέος. Στις περισσότερες εφαρμογές, οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται συνδυαστικά με τις μπαταρίες. Αυτός ο συνδυασμός υλοποιείται, λόγω της ταχείας απόδοσης ενέργειας αλλά και της μικρής χωρητικότητας των πυκνωτών. Έτσι αλληλοσυμπληρώνονται η μπαταρία και οι πυκνωτές, αναιρώντας το ένα τα μειονεκτήματα του άλλου και αντιστρόφως. Η αντικατάσταση αυτή θα έχει τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες.** Λόγω της φύσης των υπερπυκνωτών, η κατασκευή θα λειτουργεί σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, σε αντίθεση με τις μπαταρίες που υπολειτουργούν στις χαμηλές θερμοκρασίες. Πρακτικά, η σειρά των υπερπυκνωτών που θα χρησιμοποιηθούν για αυτή την εφαρμογή λειτουργούν αξιόπιστα μέχρι και τους $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, χωρίς να επηρεάζει τα χαρακτηριστικά τους, σε αντίθεση με τις μπαταρίες που το αξιόπιστο όριο θερμοκρασίας για τις περισσότερες μπαταρίες είναι στους $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Υψηλό ρεύμα εκκίνησης.** Οι υπερπυκνωτές είναι σε θέση να παρέχουν ρεύμα υψηλής έντασης (από 680 μέχρι 1500 A).
- **Ταχεία φόρτιση.** Ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών, είναι ότι μπορούν να φορτιστούν με ρεύμα μεγάλης έντασης, χωρίς να διατρέχουν τον κίνδυνο της υπερθέρμανσης και της δημιουργίας ατμού, εφόσον δεν περιέχει διάλυμα θειικού οξέος – νερού.
- **Μικρό βάρος.** Οι μπαταρίες μολύβδου – οξέος χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους μόλυβδο, ο οποίος είναι βαρύ μέταλλο, καθώς και μεγάλο όγκο ηλεκτρολυτικού υγρού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το βάρος μιας συμβατικού μεγέθους μπαταρίας να ξεκινάει από τα 15 χιλιόγραμμα και να φτάνει τα 30 (!). Αντίθετα οι υπερπυκνωτές, χρησιμοποιούν ελαφριά υλικά για την κατασκευή τους (π.χ. αλουμίνιο, άνθρακα), καθιστώντας τους ιδανικούς για την συνολική ιδέα της μείωσης βάρους των οχημάτων. Συγκεκριμένα, το βάρος των πυκνωτών που θα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή ανέρχεται στα 0.5 χιλιόγραμμα ανά τεμάχιο.

- **Χωροδιάταξη.** Λόγω του σχήματος των υπερπυκνωτών, μπορούν να τοποθετηθούν με οποιοδήποτε τρόπο και σε οποιοδήποτε σημείο του οχήματος. Σε αντίθεση με τις μπαταρίες που δεν είναι τόσο ευέλικτες, διότι το σχήμα τους είναι συγκεκριμένο.
- **Διάρκεια ζωής.** Ένα πολύ μεγάλο πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών είναι η διάρκεια ζωής τους (μέχρι ένα εκατομμύριο κύκλους εργασίας, που ανέρχεται περίπου στα 10 χρόνια). Οι μπαταρίες από την άλλη έχουν διάρκεια ζωής περίπου 3 χρόνια. Όμως, καθώς αυξάνεται η διάρκεια ζωής της μπαταρίας, αυξάνεται και το κόστος.
- **Καθολική χρήση.** Επειδή οι υπερπυκνωτές δίνουν ρεύμα πολύ υψηλής έντασης, δεν κατατάσσονται ανάλογα με τα CCA, όπως οι μπαταρίες. Αυτό τους καθιστά πολύ ευέλικτους, διότι μπορούν να καλύψουν μεγαλύτερο εύρος χρήσης στα οχήματα, ανεξάρτητα από το ρεύμα εκκίνησης που απαιτεί κάθε Μ.Ε.Κ.
- **Φιλικό προς το περιβάλλον και στον άνθρωπο.** Οι υπερπυκνωτές έχουν πιστοποίηση RoHS, επειδή τα υλικά τους είναι φιλικά προς το περιβάλλον. Άρα επιβαρύνουν στο ελάχιστο το περιβάλλον σε σχέση με τις συμβατικές μπαταρίες των οχημάτων. Εκτός από το περιβάλλον, οι υπερπυκνωτές είναι πολύ φιλικό προς τον άνθρωπο, λόγω της απουσίας του μόλυβδου και του θεικού οξέος, περιορίζοντας σε πολύ μεγάλο βαθμό τα ατυχήματα που μπορεί να προκληθούν (π.χ. δηλητηρίαση από μόλυβδο, σοβαρές δερματολογικές, οφθαλμικές και αναπνευστικές βλάβες).

Τα μειονεκτήματα είναι τα εξής:

- **Μικρή ειδική ενέργεια.** Η ειδική ενέργεια μίας συμβατικής μπαταρίας κυμαίνεται από 20 έως 150 Wh/kg, ενώ οι υπερπυκνωτές από 1 έως 10 Wh/kg. Αυτό περιορίζει πολύ τους πυκνωτές, αποκλειστικά και μόνο για την εκκίνηση του οχήματος για περιορισμένες προσπάθειες. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι ο περιορισμός των ηλεκτρικών φορτίων του οχήματος στα απολύτως απαραίτητα, πριν την εκκίνηση του οχήματος. Αυτό το μειονέκτημα διορθώνεται με τον συνδυασμό μίας αρκετά μικρότερης μπαταρίας, με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει όλα τα πλεονεκτήματα της παραπάνω διάταξης.
- **Κόστος.** Η τεχνολογία των υπερπυκνωτών είναι μια σχετικά καινούρια τεχνολογία, με περιορισμένες ακόμα εφαρμογές, καθιστώντας το κόστος τους υψηλό.

Υλικά/εξαρτήματα

Τα εξαρτήματα που θα χρησιμοποιηθούν για την πειραματική διάταξη της πτυχιακής εργασίας είναι 5 υπερπυκνωτές της εταιρίας Maxwell. Οι πυκνωτές έχουν τα εξής χαρακτηριστικά:

- Όνομα: Maxwell BCAP3000 P270
- Ονομαστική τάση: 2.7 V
- Ονομαστική χωρητικότητα: 3000 F
- Ονομαστική εσωτερική αντίσταση: 0.29 mΩ
- Ονομαστική τιμή ενέργειας πυκνωτή: 3.04 Wh



Εικόνα 51 - Maxwell BCAP3000 P270 [71]

Οι πυκνωτές αυτοί θα συνδεθούν σε σειρά, για να δώσουν την κατάλληλη τάση για χρήση της συστοιχίας πυκνωτών σε εφαρμογές για το όχημα. Για να υπάρξει μία ομοιότητα με τους συμβατικούς συσσωρευτές του οχήματος, έγινε κατασκευή των πόλων ενός συμβατικού συσσωρευτή. Λόγω των μικρών διαφορών των διαστάσεων των πόλων μεταξύ των κατασκευαστών, το σχέδιο των πόλων βασίστηκε στην τυποποίηση DIN για τους πόλους του συσσωρευτή, με μικρές τροποποιήσεις στα αρχικά σχέδια. Επιπλέον, κατασκευάστηκε σπείρωμα, ώστε να βιδώνει στους ακροδέκτες των πυκνωτών. Οι κατεργασίες για την κατασκευή των πόλων εκτελέστηκαν στο Μηχανολογικό Εργαστήριο του τμήματος



Εικόνα 52 - Σχέδια πólων συσσωρευτή και αποτελέσματος κατεργασιών [72]

Η τελική συστοιχία των υπερπυκνωτών, φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 53 - Συστοιχία υπερπυκνωτών

Υπολογισμοί

Θεωρητικοί υπολογισμοί

Θα γίνει ένας θεωρητικός υπολογισμός με τη μορφή άσκησης για να γίνουν κατανοητή η τάξη των μεγεθών του υπερπυκνωτή. Πρόκειται να συνδεθούν 5 πυκνωτές των 2.7 V χωρητικότητας 3000 F ο καθένας, όπως αυτοί που επιλέχθηκαν για την χρήση στα πειράματα της εργασίας.. Να βρεθούν:

- A. Η συνολική τάση της συστοιχίας
- B. Η συνολική χωρητικότητα σε F, σε Ah & Wh και την συνολική ενέργεια σε KJ.
- C. Ο χρόνος που χρειάζεται να φορτίσει το συγκρότημα πυκνωτών.
- D. Την ενέργεια που έχει περισσέψει εάν εκφορτιστούν οι πυκνωτές με 500 A για 5 δευτερόλεπτα σε Wh με σταθερή τάση.
- E. Την ολική εσωτερική αντίσταση ESR
- F. Την πτώση τάσης και την αντίστοιχη κατανάλωση σε W λόγω της ESR για έναν πυκνωτή.

Δεδομένα:

- $N = 5$
- $C = 3000 \text{ F}$
- $V = 2.7 \text{ V}$
- $\text{ESR} = 0.29 \text{ m}\Omega$

A. Για πυκνωτές συνδεδεμένους σε σειρά ισχύει ο τύπος:

$$V_{\text{ολικό}} = V_1 + V_2 + V_n$$

Άρα η τάση για 5 πυκνωτές προκύπτει:

$$V_{\text{ολικό}} = 2.7 + 2.7 + 2.7 \dots = 13.5 \text{ V}$$

B. Η χωρητικότητα κάθε πυκνωτή είναι 3000 F. Όταν συνδέονται πυκνωτές με την ίδια χωρητικότητα σε σειρά τότε η συνολική χωρητικότητα μειώνεται ανάλογα με τον αριθμό των πυκνωτών. Η ολική χωρητικότητα σε F είναι:

$$C_{ολικό} = \frac{C_{πυκνωτή}}{N} = \frac{3000}{5} = 600 \text{ F}$$

Σε περίπτωση που συνδεθούν πυκνωτές με διαφορετική χωρητικότητα (δεν συνιστάται) τότε υπολογίζεται ως εξής:

$$C_{ολικό} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_n}}$$

Η συνολική ενέργεια σε KJ υπολογίζεται ως εξής:

$$U = \frac{1}{2} * C_{ολικό} * V^2 = 0.5 * 600 * 13.5^2 = 54675 \text{ J} = 54.675 \text{ KJ}$$

Η χωρητικότητα σε Wh είναι (1 Wh = 3.6 KJ):

$$Wh = \frac{54.675}{3.6} = 15.1875 \text{ Wh}$$

Η χωρητικότητα σε Ah είναι:

$$Ah = \frac{Wh}{V} = \frac{15.1875}{13.5} = 1.125 \text{ Ah}$$

C. Ο χρόνος φόρτισης εξαρτάται από το ρεύμα φόρτισης I την χωρητικότητα C και την τάση που πρέπει να επιτευχθεί.

Ο τύπος για την φόρτιση ενός πυκνωτή είναι:

$$I = C * \frac{dV}{dt}$$

,όπου:

- I σε A
- C σε F
- dv/dt σε V/s

Αλλάζοντας τον τύπο σε:

$$\frac{I}{C} = \frac{dv}{dt}$$

και με ρεύμα φόρτισης 15 A:

$$\frac{15A}{600F} = 0.025 \text{ V/s}$$

και αφού το συγκρότημα πυκνωτών πρέπει να φορτιστεί στα 13.5 V θα χρειαστούν:

$$t = \frac{13.5}{0.025} = 540 \text{ s} = 9 \text{ min}$$

D. Οι πυκνωτές έχουν χωρητικότητα 15.1875 Wh στα 13.5 V. Η αποφόρτιση με 500 A για 5 sec απαιτεί ισχύ:

$$P = I * V = 500 * 13.5 = 6750 \text{ W}$$

για 5 sec, άρα:

$$Q = 6750 * \frac{5}{3600} = 9.375 \text{ Wh}$$

Η χωρητικότητα που έμεινε είναι $15.1875 - 9.375 = 5.8125 \text{ Wh}$

E. Η ESR είναι η εσωτερική αντίσταση του πυκνωτή. Σε σειρά η αντίσταση αυτή αυξάνεται βάσει:

$$ESR_{ολική} = ESR_{πυκνωτή} * n$$

,σε περίπτωση που έχουν διαφορετική ESR τότε είναι :

$$ESR_{ολική} = ESR_1 + ESR_2 + ESR_3 + ESR_n$$

Άρα η ESR είναι :

$$ESR_{ολική} = 0.29 \text{ m}\Omega * 5 = 1.45 \text{ m}\Omega$$

F. Η εσωτερική αντίσταση είναι υπεύθυνη για την μέγιστη τιμή του ρεύματος αποφόρτισης του πυκνωτή. Η ESR μιας μπαταρίας AAA είναι 120mΩ ενώ στους υπερπυκνωτές είναι συνήθως 0.6-0.8 mΩ δηλαδή αυτή του πυκνωτή είναι 170 φορές μικρότερη. Τι σημαίνει πρακτικά αυτό; Π.χ. έστω μια μπαταρία AAA (1.5V) με μια ESR = 120 mΩ και της ασκείται ένα φορτίο 100 mA. Η πτώση τάσης θα είναι:

$$V_{drop} = I * R = 0.1 * 0.12 = 0.012 \text{ V}$$

Άρα η τάση υπό φορτίο θα είναι:

$$V_{load} = 1.5 - 0.012 = 1.488 \text{ V}$$

(αποδεκτό).

Η κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$P = I^2 * R = 0.12 * 0.12 = 0.0012 \text{ W} = 1.2 \text{ mW}$$

Άρα θα παράγει 1.2 mW θερμότητα, η οποία δεν είναι ανησυχητική.

Αν τώρα ασκηθεί ένα φορτίο των 10 A η κατάσταση θα είναι πολύ διαφορετική (!).

Η πτώση τάσης θα είναι:

$$V_{drop} = I * R = 10 * 0.12 = 1.2 V$$

Άρα η τάση υπό φορτίο θα είναι:

$$V_{load} = 1.5 - 1.2 = 0.3 V$$

(μη λειτουργικό).

Η κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$P = I^2 * R = 10^2 * 0.12 = 12 W$$

δηλαδή θα παράγει 12W θερμότητα, η οποία είναι ανησυχητική. Το ίδιο παράδειγμα θα εκτελεστεί με έναν υπερπυκνωτή της άσκησης (2.7 V), μόνο που θα χρησιμοποιηθεί ένα φορτίο αρκετά μεγαλύτερο, της τάξης των 100 A.

Η πτώση τάσης θα είναι:

$$V_{drop} = I * R = 100 * 0.00029 = 0.029 V$$

Άρα η τάση υπό φορτίο θα είναι:

$$V_{load} = 2.7 - 0.029 = 2.671 V$$

(σχεδόν ανύπαρκτη διαφορά).

Η κατανάλωση ενέργειας είναι:

$$P = I^2 * R = 100^2 * 0.00029 = 2.9 W$$

Άρα θα παράγει 2.9 W, θερμότητα η οποία δεν είναι ανησυχητική, διότι ο όγκος του συγκεκριμένου πυκνωτή είναι μεγαλύτερος σε σχέση με την AAA μπαταρία και μπορεί να την αποβάλλει.

Είδη πειραμάτων

Για την κατάλληλη σύγκριση της συστοιχίας υπερπυκνωτών με έναν συμβατικό συσσωρευτή οχήματος, το πειραματικό μέρος της εργασίας περιλαμβάνει μία σειρά πειραμάτων, ώστε να γίνει λεπτομερής η σύγκριση μεταξύ των δύο πηγών ενέργειας. Τα πειράματα που θα εκτελεστούν είναι τα εξής:

1. Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία λαμπτήρων.
2. Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία εκκινητή με μεταβαλλόμενη αντίσταση

Για την καταγραφή των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το διαγνωστικό μηχάνημα FSA 720/740/750 της Bosch GmbH.

Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία λαμπτήρων

Στο πρώτο πείραμα θα χρησιμοποιηθούν λαμπτήρες οχήματος για την καταγραφή της συμπεριφοράς της συστοιχίας των υπερπυκνωτών. Αρχικά θα γίνει σύνδεση με έναν λαμπτήρα και ανά ορισμένα χρονικά διαστήματα θα γίνεται τριών ακόμα λαμπτήρων για τα πρώτα 8 λεπτά. Ύστερα θα γίνει εκφόρτιση της συστοιχίας μέχρι το χρονικό όριο των 10 λεπτών του πειράματος. Επιπλέον, θα γίνει καταγραφή της συμπεριφοράς της συστοιχίας κατά την εκφόρτιση της για 10 λεπτά. Κατά τη διάρκεια του πειράματος θα γίνει καταγραφή της τάσης και της έντασης του ρεύματος και υπολογισμός της κατάστασης φόρτισης. Το παραπάνω πείραμα θα πραγματοποιηθεί επίσης με έναν συμβατικό συσσωρευτή οχήματος, για σύγκριση των δύο πηγών ενέργειας. Οι λαμπτήρες που θα συνδεθούν είναι δύο ειδών

→ Εμπρόσθιοι λαμπτήρες. Οι λαμπτήρες αυτοί περιλαμβάνουν και τις τρεις σκάλες φωτισμού, όπως σε ένα συμβατικό όχημα, δηλαδή φώτα θέσης, διασταυρώσεως και πορείας. Αυτές θα συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους, για την λειτουργία τους ως ένας καταναλωτής, αλλά και για να την κατανάλωση της μέγιστης ενέργειας. Ύστερα από μέτρηση, οι λαμπτήρες, στα 12 V καταναλώνουν 113.8 W με ρεύμα έντασης 9.45 A.



Εικόνα 54 – Εμπρόσθια φώτα

→ Οπίσθιοι λαμπτήρες. Οι λαμπτήρες αυτοί περιλαμβάνουν και τα τρία είδη φωτών, όπως σε ένα συμβατικό όχημα, δηλαδή δείκτες αλλαγής κατεύθυνσης, φώτα τροχοπέδησης και φώτα θέσεως. Αυτές θα συνδεθούν παράλληλα μεταξύ τους, όπως και οι παραπάνω λαμπτήρες. Ύστερα από μέτρηση, οι λαμπτήρες, στα 12 V καταναλώνουν 46.8 W, με ρεύμα έντασης 3.9 A.



Εικόνα 55 - Οπίσθιοι λαμπτήρες

Θα συνδεθούν μεταξύ τους 2 λαμπτήρες από κάθε είδος, δηλαδή δύο εμπρόσθιοι και δύο οπίσθιοι. Θεωρητικά, το σύστημα στα 12 V, θα διαρρέεται από ρεύμα έντασης:

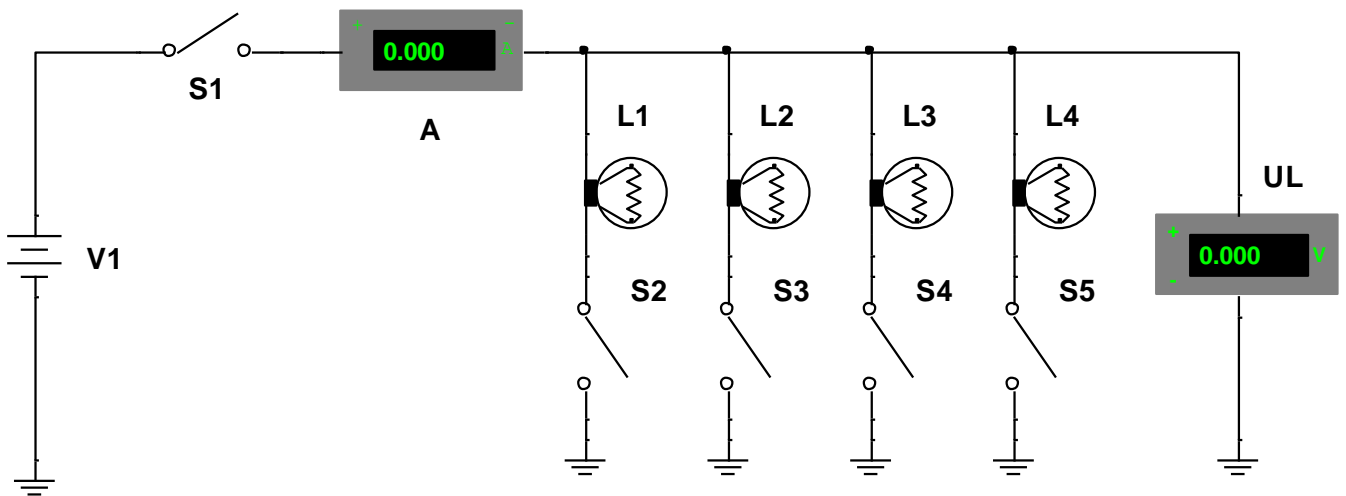
$$I_{ολικό} = I_{εμπρόσθιων} + I_{οπίσθιων} = 2 * I_{εμπρόσθιου} + 2 * I_{οπίσθιου} = 2 * 9.45 + 2 * 3.9$$

$$= 26.7 A$$

Και θα καταναλώνει:

$$P_{ολικό} = V * I_{ολικό} = 12 * 26.7 = 320.4 W$$

Οι συνδέσεις των λαμπτήρων και των μετρητικών οργάνων της πειραματικής διάταξης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχέδιο:



Εικόνα 56 - Ηλεκτρικό σχέδιο πειραματικής διάταξης λαμπτήρων

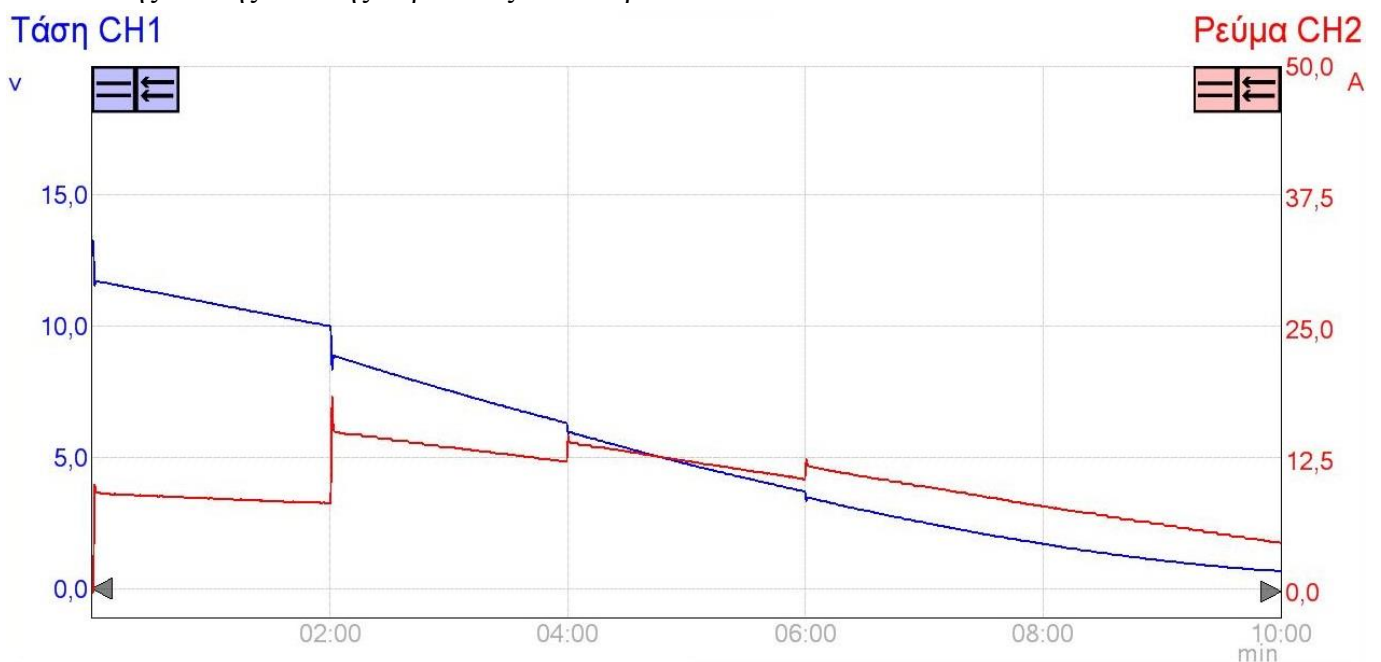
Πείραμα με συστοιχία υπερπυκνωτών

Η εκτέλεση του πειράματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

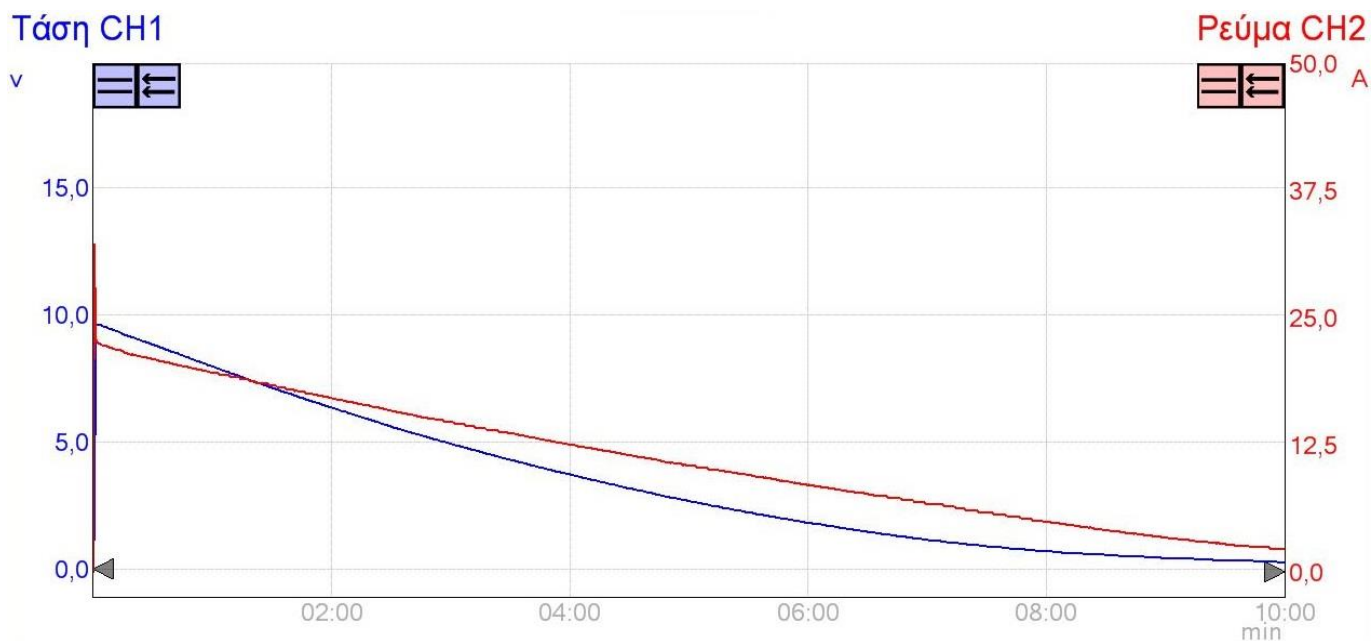


Εικόνα 57- Σύνδεση συστοιχίας υπερπυκνωτών με λαμπήρες

Κατά την εκτέλεση του πειράματος έγινε η καταγραφή της τάσης και της έντασης της συστοιχίας κατά της εκφόρτιση της με αυξανόμενο και με πλήρες φορτίο. Οι καμπύλες της τάσης και της έντασης παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 15 - Καμπύλες τάσης (μπλε) και έντασης (κόκκινο) της συστοιχίας κατά την εκφόρτιση σε αυξανόμενο φορτίο



Διάγραμμα 16 - Καμπύλες τάσης (μπλε) και έντασης (κόκκινο) της συστοιχίας κατά την εκφόρτιση σε πλήρες φορτίο

Από τα διαγράμματα, έγινε καταγραφή της τάσης και της έντασης ανά 30 δευτερόλεπτα, καθώς επίσης και καταγραφή της τάσης πριν και μετά το πείραμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Χρόνος (s)	Πυκνωτές αυξανόμενο φορτίο		Πυκνωτές πλήρες φορτίο	
	Current (A)	Voltage (V)	Current (A)	Voltage (V)
0	0	13.2	0	13.2
30	9.1	11.3	20.9	8.9
60	8.9	10.9	19.6	8.6
90	8.6	10.4	18.4	7.1
120	15.4	8.9	17.1	6.4
150	14.5	8.2	15.9	5.6
180	13.7	7.5	14.7	4.9
210	13	6.9	13.6	4.3
240	14.2	6	12.5	3.7
270	13.3	5.4	11.5	3.2
300	12.4	4.8	10.5	2.7
330	11.5	4.2	9.5	2.2
360	11.9	3.5	8.6	1.8
390	11	3	7.7	1.5
420	10	2.5	6.7	1.2

450	9	2.1	5.8	0.9
480	8.1	1.7	4.9	0.7
510	7.2	1.4	4.1	0.6
540	6.4	1.1	3.4	0.4
570	5.5	0.8	2.7	0.4
600	4.6	0.7	2.3	0.3

Πίνακας 6 - Πίνακας καταγεγραμμένων τιμών έντασης ρεύματος (κόκκινο) και τάσης (μπλε) συστοιχίας υπερπυκνωτών

Από τις τιμές, γίνεται ο υπολογισμός της κατάστασης φόρτισης (State of Charge – SoC), της συστοιχίας. Η κατάσταση φόρτισης, μέχρι την χρονική στιγμή t_x , ορίζεται ως εξής:

$$SoC = Q - SoD = Q - \int_0^{t_x} i(t) dt \cong \sum_{k=1}^{N-1} \frac{I_k + I_{k+1}}{2} * \frac{t_{k+1} - t_k}{3600} [Ah]$$

,όπου:

→ N: ο αριθμός των δειγμάτων που λήφθηκαν.

Η μεταβολή της σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα:

Χρόνος (s)	SoC συστοιχίας (αυξ. Φορτίο) (Ah)	SoC συστοιχίας (πλ. Φορτίο) (Ah)
0	1.125	1.125
30	1.02292	1.03292
60	0.93042	0.96
90	0.84167	0.89458
120	0.76125	0.83833
150	0.69	0.78833
180	0.62458	0.74458
210	0.56458	0.70625
240	0.51083	0.67292
270	0.46333	0.64417
300	0.42083	0.61958
330	0.38333	0.59917
360	0.35125	0.5825
390	0.32417	0.56875

420	0.30125	0.5575
450	0.28208	0.54875
480	0.26625	0.54208
510	0.25333	0.53667
540	0.24292	0.5325
570	0.235	0.52917
600	0.22875	0.52625

Πίνακας 7 - Τιμές κατάστασης φόρτισης συστοιχίας κατά την εκφόρτιση της με αυξανόμενο και πλήρες φορτίο

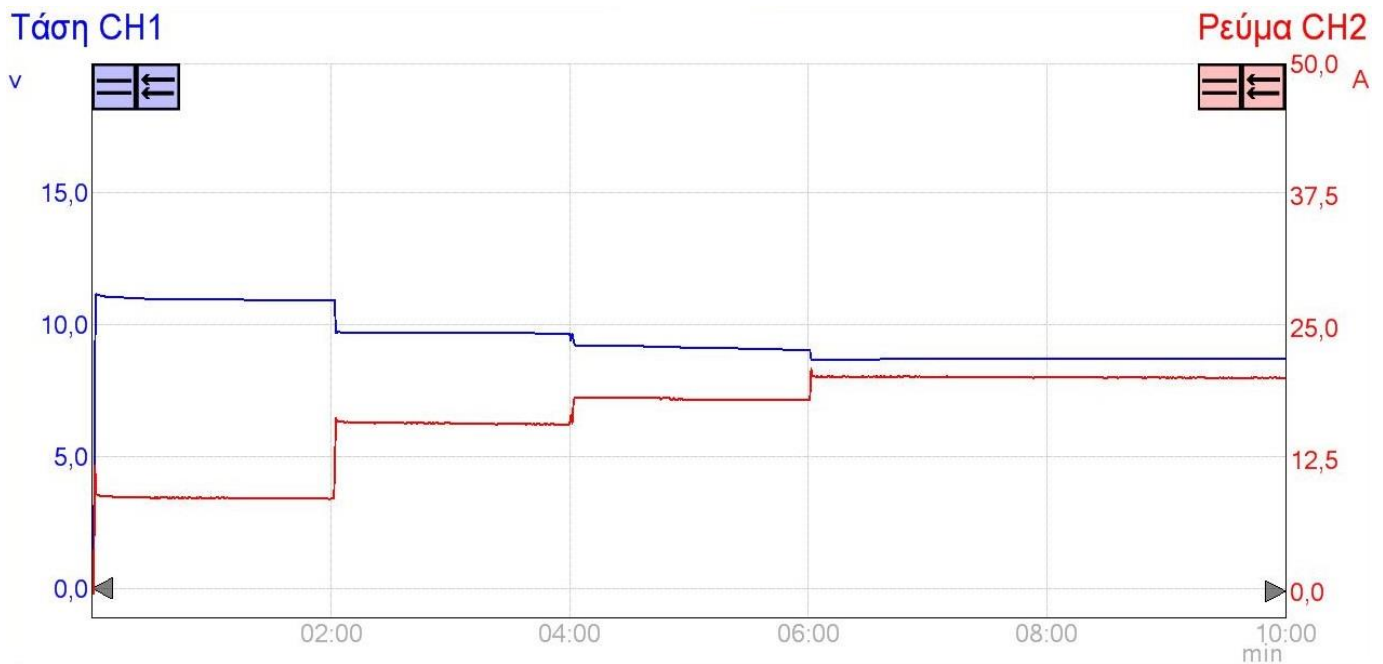
Πείραμα με συσσωρευτή

Η εκτέλεση του πειράματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

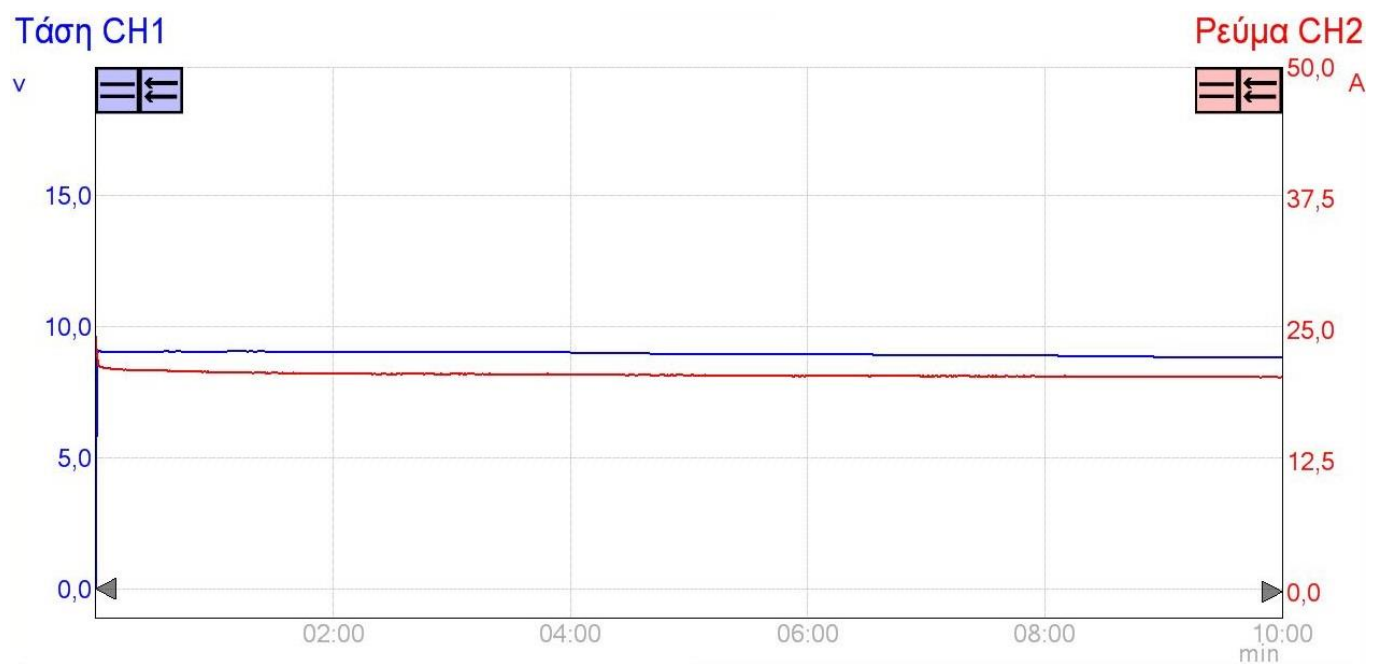


Εικόνα 58 - Σύνδεση συσσωρευτή με λαμπτήρες

Κατά την εκτέλεση του πειράματος έγινε η καταγραφή της τάσης και της έντασης του συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση του με αυξανόμενο και με πλήρες φορτίο. Οι καμπύλες της τάσης και της έντασης παρουσιάζονται παρακάτω:



Διάγραμμα 17 - Καμπύλες τάσης (μπλε) και έντασης (κόκκινο) του συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση σε αυξανόμενο φορτίο



Διάγραμμα 18 - Καμπύλες τάσης (μπλε) και έντασης (κόκκινο) του συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση σε πλήρες φορτίο

Από τα διαγράμματα, έγινε καταγραφή της τάσης και της έντασης ανά 30 δευτερόλεπτα, καθώς επίσης και καταγραφή της τάσης πριν και μετά το πείραμα. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα και διάγραμμα :

Χρόνος (s)	Συσσωρευτής αυξανόμενο φορτίο		Συσσωρευτής πλήρες φορτίο	
0	0	12.8	0	12.8
30	11	8.8	21.1	9.1
60	11	8.8	20.9	9.1
90	10.9	8.8	20.9	9.1
120	16.1	9.7	20.8	9.1
150	16	9.7	20.7	9.1
180	16	9.7	20.8	9
210	15.9	9.7	20.7	9
240	18.4	9.2	20.7	9
270	18.3	9.2	20.7	9
300	18.2	9.1	20.6	9
330	18.1	9.1	20.6	9
360	20.3	8.7	20.6	9
390	20.3	8.7	20.6	8.9
420	20.3	8.7	20.5	8.9
450	20.3	8.7	20.5	8.9
480	20.3	8.7	20.5	8.9
510	20.2	8.7	20.5	8.9
540	20.2	8.7	20.5	8.8
570	20.2	8.7	20.5	8.8
600	20.2	8.7	20.5	8.8

Πίνακας 8 -Πίνακας καταγεγραμμένων τιμών έντασης ρεύματος (κόκκινο) και τάσης (μπλε) συσσωρευτή

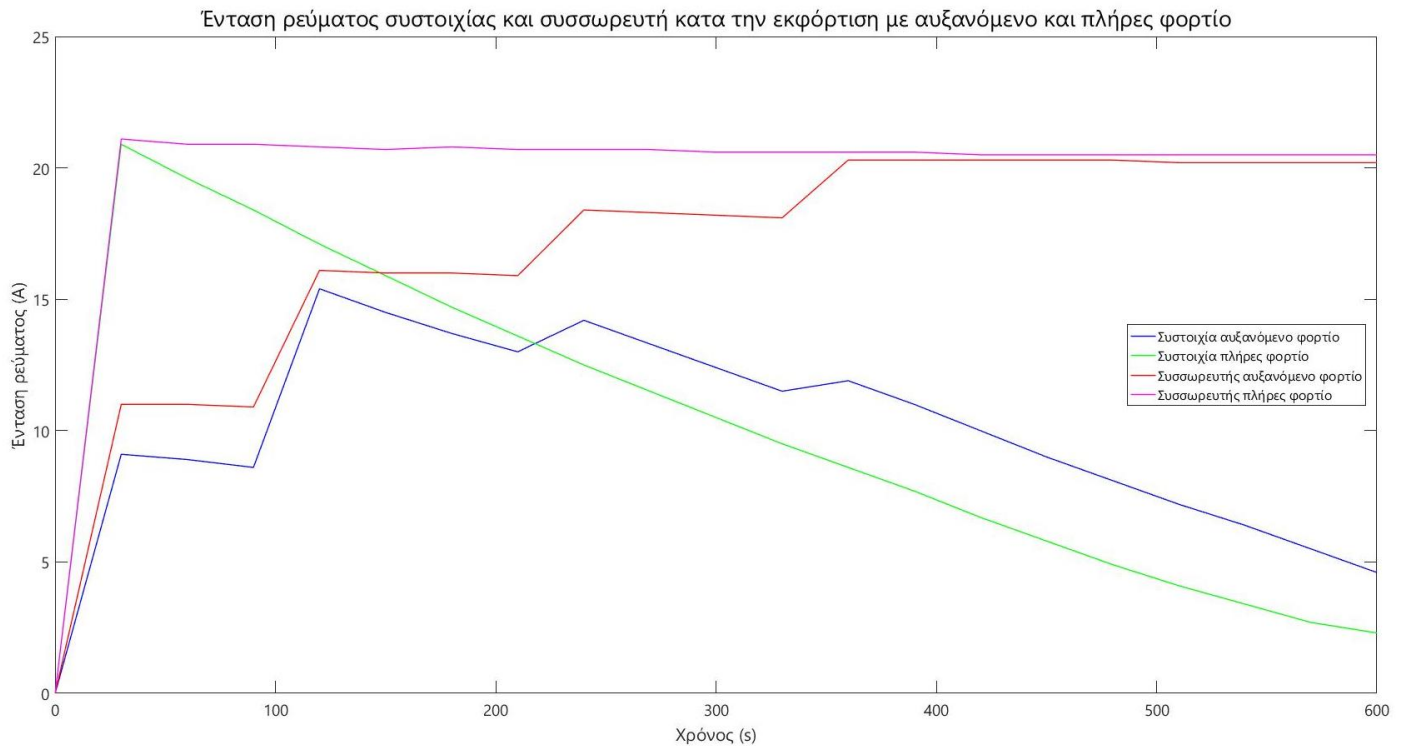
Από τις τιμές, γίνεται ο υπολογισμός της κατάστασης φόρτισης (State of Charge – SoC), όπως και στο προηγούμενο πείραμα της συστοιχίας. Η μεταβολή της σε συνάρτηση με τον χρόνο παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα και στα διαγράμματα:

Χρόνος (s)	SoC συσσωρευτή (αυξ. Φορτίο) (Ah)	SoC συσσωρευτή (πλ. Φορτίο) (Ah)
0	62	62
30	61.91	61.9088
60	61.8367	61.8329
90	61.7633	61.7571
120	61.6863	61.6813
150	61.6054	61.6054
180	61.5246	61.53
210	61.4438	61.455
240	61.365	61.38
270	61.2883	61.305
300	61.2121	61.23
330	61.1363	61.155
360	61.0621	61.08
390	60.9896	61.0054
420	60.9171	60.9313
450	60.8446	60.8571
480	60.7721	60.7829
510	60.6996	60.7088
540	60.6271	60.635
570	60.5546	60.5617
600	60.4821	60.4883

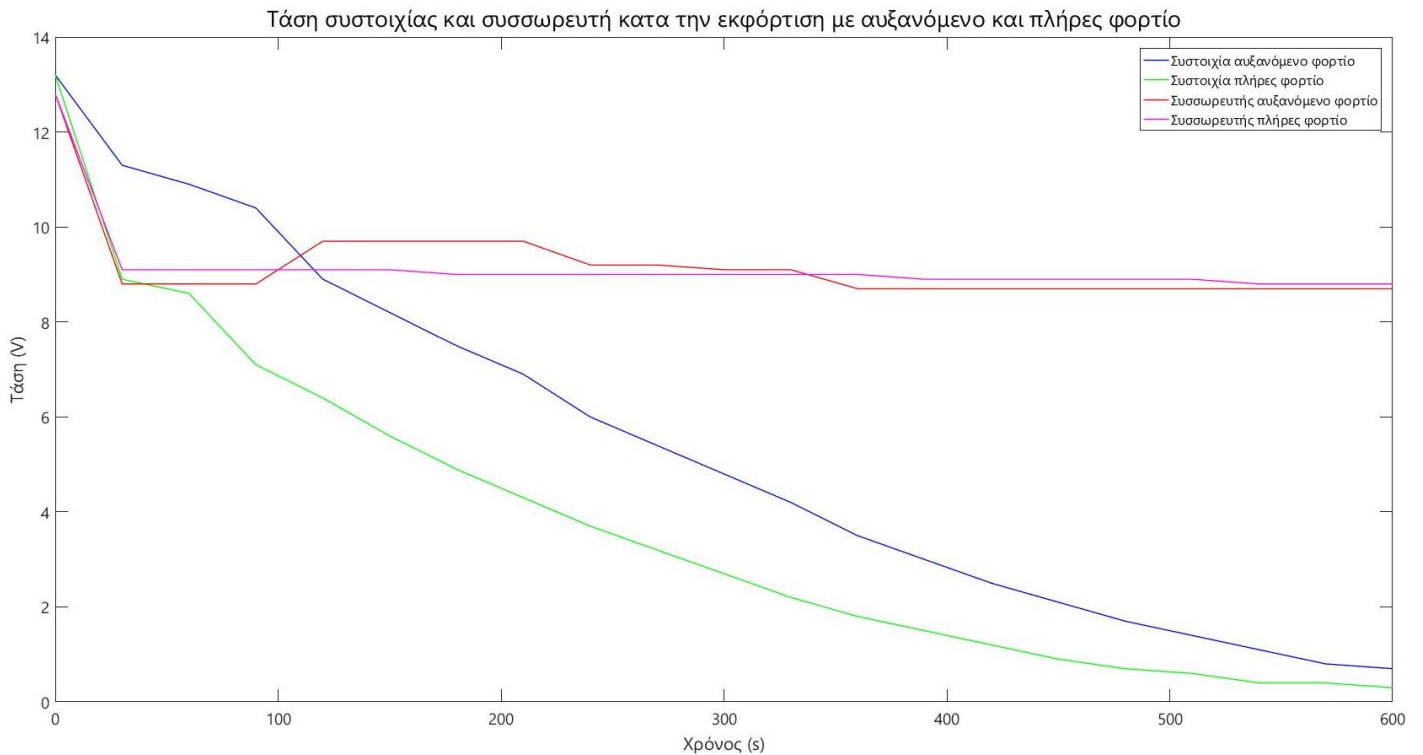
Πίνακας 9 - Τιμές κατάστασης φόρτισης συσσωρευτή κατά την εκφόρτιση του με αυξανόμενο και πλήρες φορτίο

Αποτελέσματα μετρήσεων

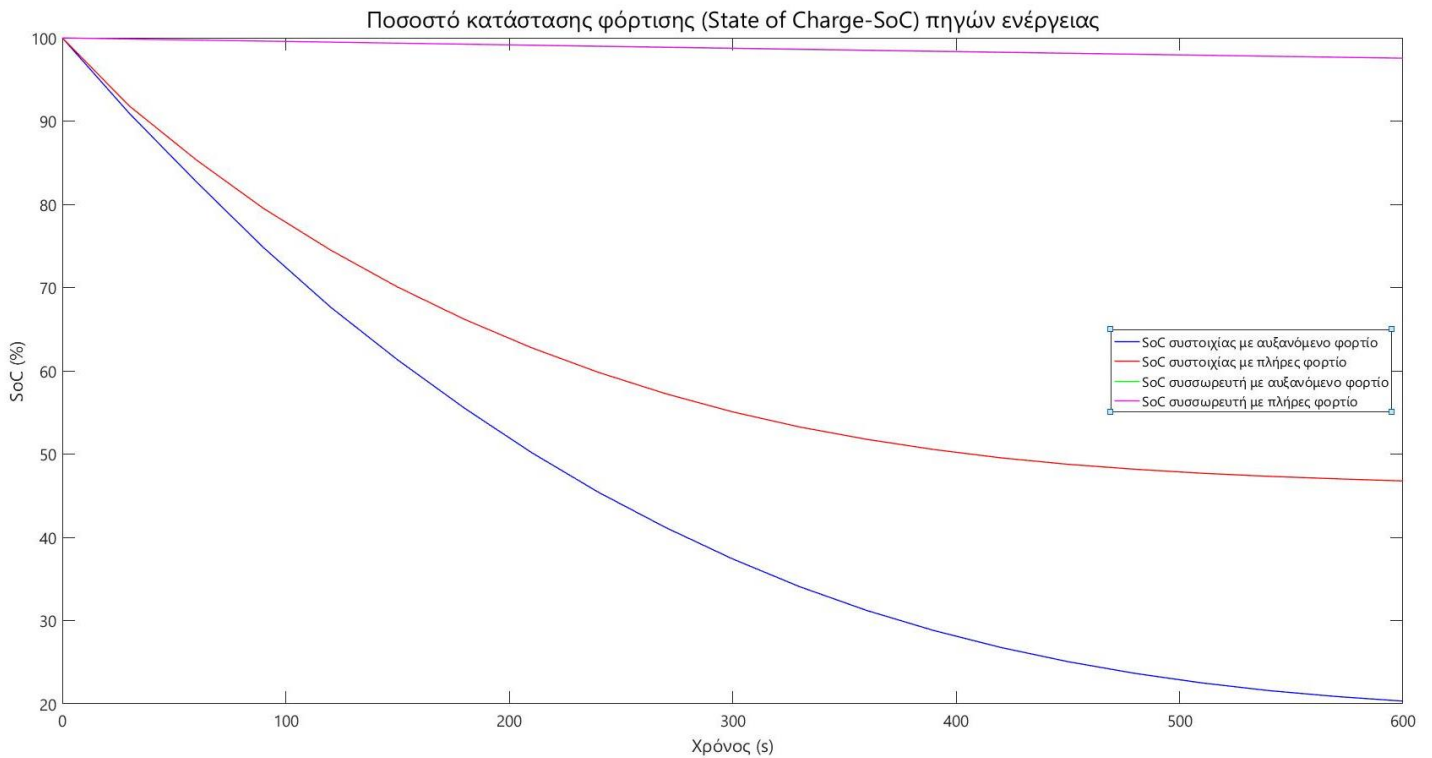
Από τις τιμές των παραπάνω πινάκων προκύπτουν τα εξής συγκριτικά διαγράμματα:



Διάγραμμα 19 - Σύγκριση έντασης ρεύματος συστοιχίας και συσσωρευτή κατά την εκφόρτισή τους



Διάγραμμα 20 - Σύγκριση τάσης ρεύματος συστοιχίας και συσσωρευτή κατά την εκφόρτισή τους

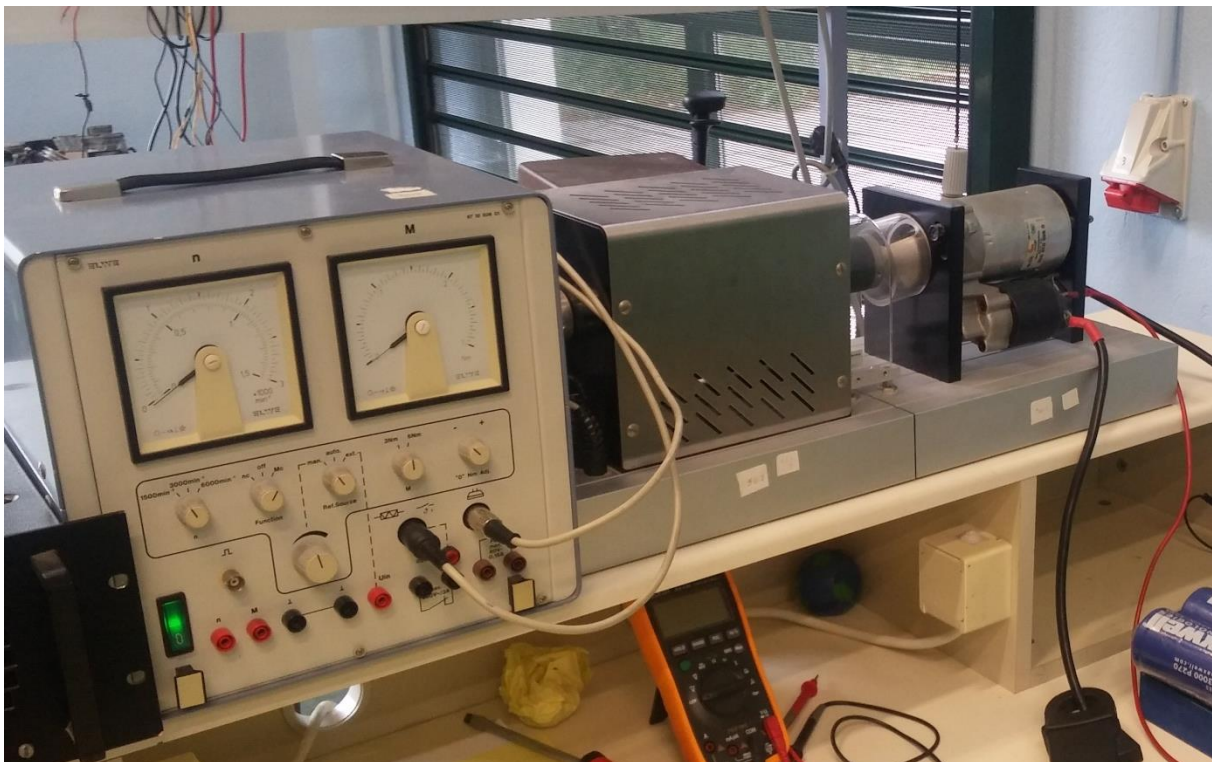


Διάγραμμα 21 - Σύγκριση ποσοστού κατάστασης φόρτισης συστοιχίας και συσσωρευτή

Από τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από το πείραμα, παρατηρείται ότι οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται ταχύτερα, σε αυξανόμενο και μέγιστο φορτίο, από ότι ο συμβατικός συσσωρευτής. Το φορτίο των λαμπτήρων μπορεί να θεωρηθεί κατά έναν βαθμό σταθερό, διότι είτε μεταβάλλεται με αργό ρυθμό (αύξηση ανά 2 λεπτά) είτε δεν μεταβάλλεται καθόλου (μέγιστο από την αρχή της καταγραφής). Αυτό συμπεραίνεται από την πτώση της τάσης πριν και μετά τη λειτουργία του εκκινητή, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό λόγω της διαφοράς της χωρητικότητας μεταξύ των δύο πηγών ενέργειας (1.125 Ah η συστοιχία και 62 Ah ο συσσωρευτής).

Χρήση πηγών ενέργειας για την τροφοδοσία εκκινητή με μεταβαλλόμενη αντίσταση

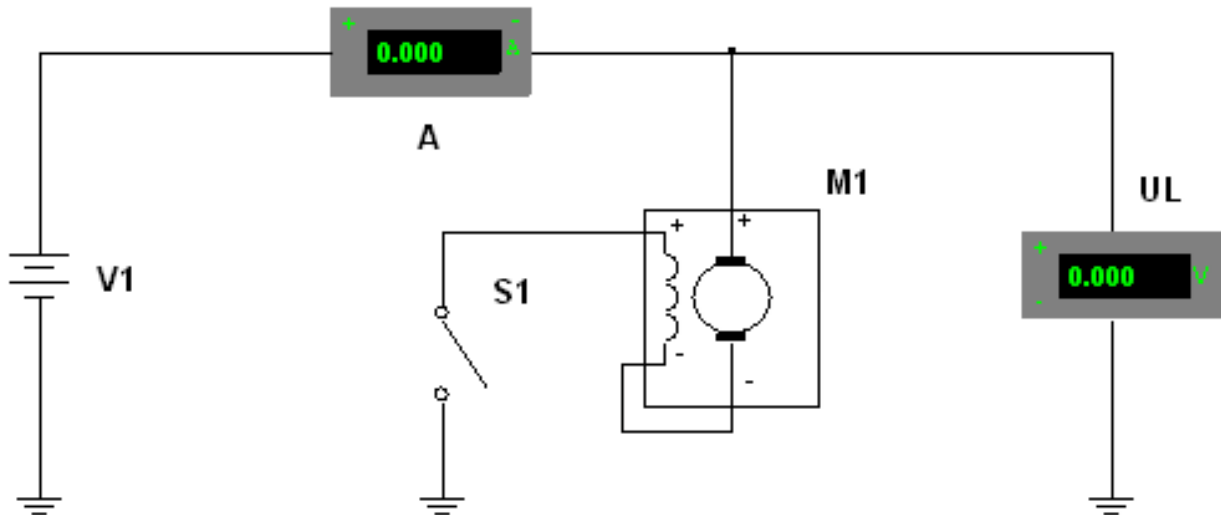
Στο δεύτερο πείραμα θα γίνει καταγραφή της συμπεριφοράς της συστοιχίας υπερπυκνωτών κατά την τροφοδοσία εκκινητή οχήματος στον οποίο ασκείται ροπή αντίσταση από ηλεκτροκινητήρα. Η αντίσταση αυτή θα μεταβάλλεται για την προσομοίωση διαφορετικών μεγεθών της μηχανής εσωτερικής καύσης. Όσο μεγαλύτερη η ροπή αντίστασης, τόσο μεγαλύτερο και το μέγεθος της μηχανής εσωτερικής καύσης που προσομοιώνεται.



Εικόνα 59 - Πειραματική διάταξη εκκινητή

Θα γίνει η καταγραφή της τάσης και της έντασης του ρεύματος καθώς και οι καμπύλες των μεγεθών κατά τη λειτουργία του συσσωρευτή, με τη βοήθεια του διαγνωστικού μηχανήματος, για “μίζαρισμα” 5 δευτερολέπτων. Επιλέχθηκε αυτό το χρονικό διάστημα, για να γίνει μία επαρκής καταγραφή των τιμών της τάσης και της έντασης σε μία κατάσταση που διαρκεί παραπάνω από ένα φυσιολογικό “μίζαρισμα” καθώς και για να γίνουν φανερές οι ανοχές της συστοιχίας. Η καταγραφή της έντασης του ρεύματος που χρειάζεται ο εκκινητής θα γίνει από τη στιγμή της κορύφωσης της έντασης (peak) και για κάθε δευτερόλεπτο, μέχρι το τέλος του “μίζαρίσματος”, δηλαδή τα 5 δευτερόλεπτα. Επιπλέον θα γίνει καταγραφή καθώς και της τάσης της πηγής πριν και μετά την προσομοίωση. Στο τέλος κάθε προσομοίωσης θα ρυθμίζεται η ροπή που θα ασκείται από τον ηλεκτροκινητήρα. Θα γίνει προσομοίωση λειτουργίας του

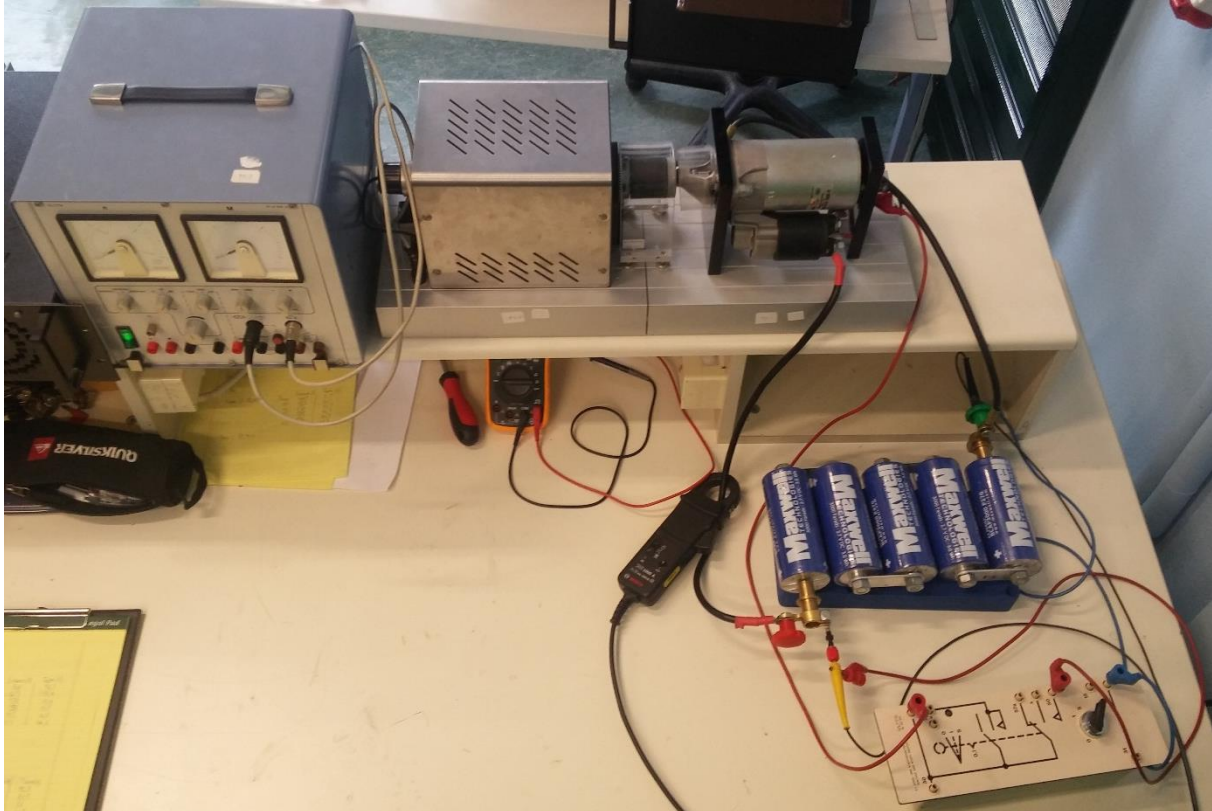
εκκινητή για τέσσερις τιμές ροπής, τα 0.5, 1, 1.5 και 2 Nm. Ύστερα από κάθε προσομοίωση, θα φορτίζεται ξανά η συστοιχία στην τάση λειτουργίας της, για την λήψη ομοιόμορφων αποτελεσμάτων. Ο εκκινητής που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο 0 986 010 030 της Bosch, με χαρακτηριστικά 12 V, 0.7 KW. Το παραπάνω πείραμα θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση συσσωρευτή, για την σύγκριση των δύο πηγών ενέργειας. Οι συνδέσεις του εκκινητή και των μετρητικών οργάνων της πειραματικής διάταξης παρουσιάζονται στο παρακάτω σχέδιο



Εικόνα 60 - Ηλεκτρικό σχέδιο πειραματικής διάταξης εκκινητή

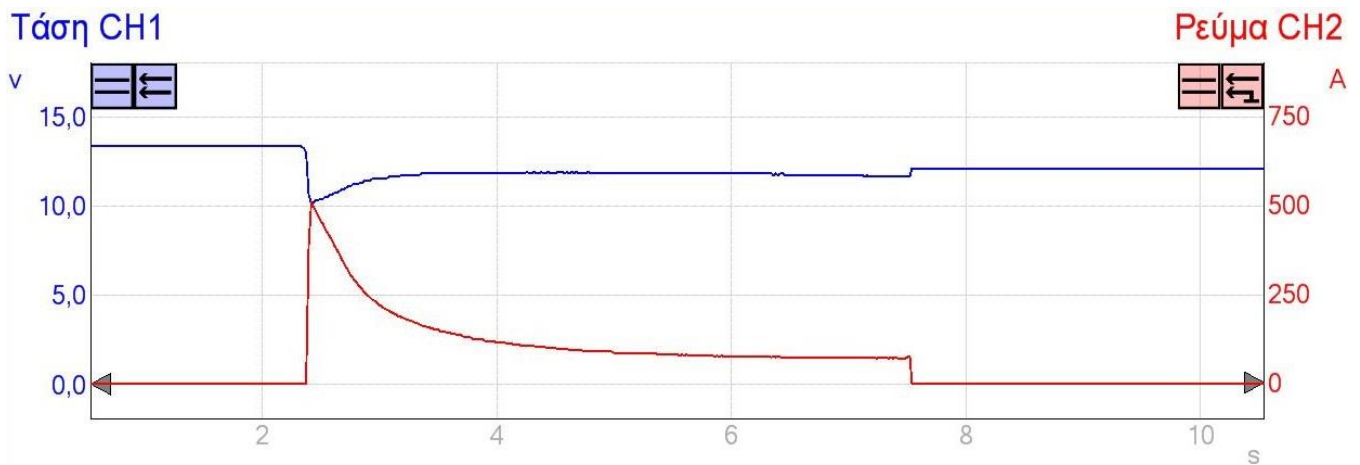
Πείραμα με συστοιχία υπερπυκνωτών

Η εκτέλεση του πειράματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

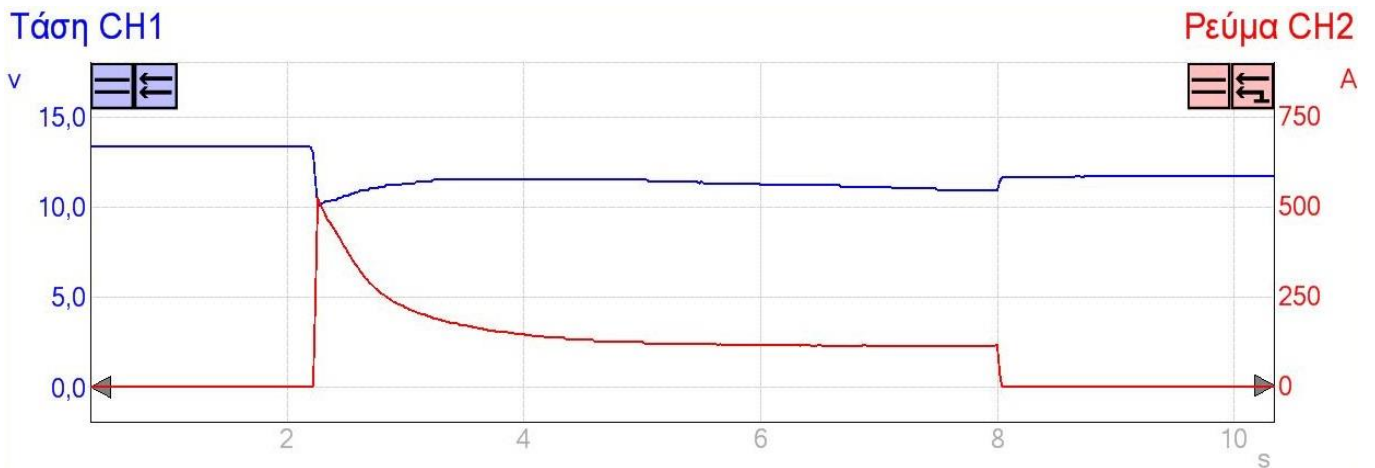


Εικόνα 61 – Σύνδεση συστοιχίας υπερπυκνωτών με εκκινητή

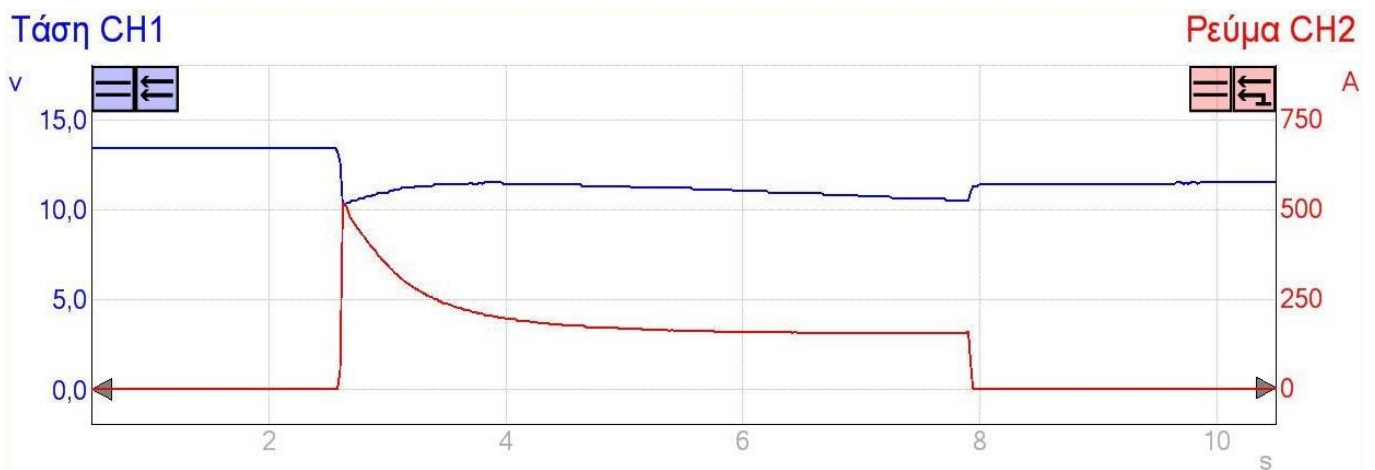
Κατά την εκτέλεση του πειράματος έγινε η καταγραφή της τάσης και της έντασης της συστοιχίας κατά το “μίζαρισμα”, σε τέσσερις διαφορετικές τιμές ροπής αντίστασης. Οι καμπύλες της τάσης και της έντασης παρουσιάζονται παρακάτω:



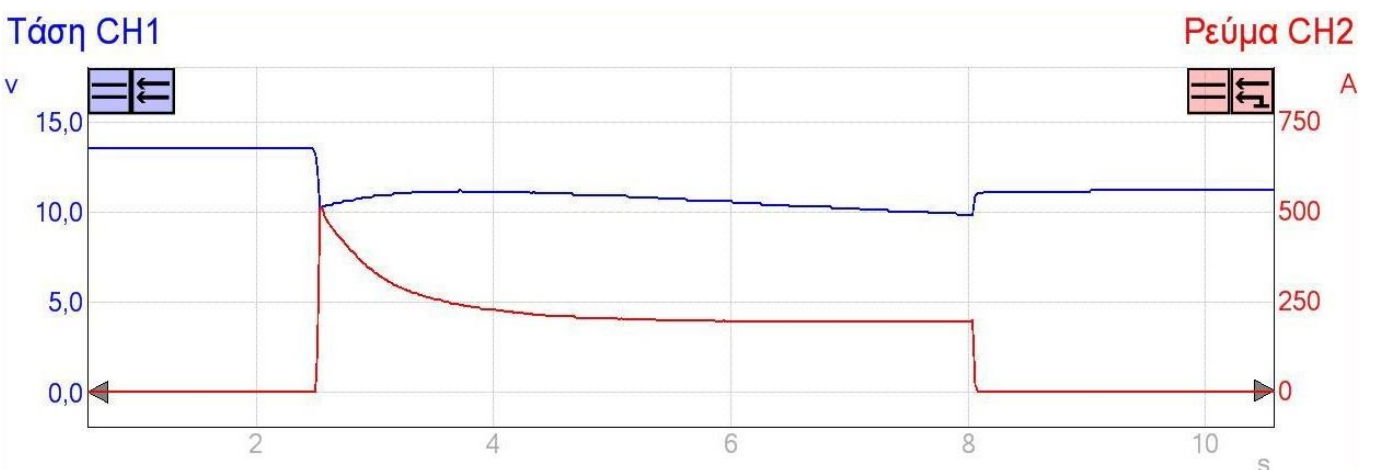
Διάγραμμα 22 - Λειτουργία εκκινητή κατά την τροφοδοσία από την συστοιχία υπερπυκνωτών, με ροπή αντίστασης 0.5 Nm



Διάγραμμα 23 - Λειτουργία εκκινήτη κατά την τροφοδοσία από την συστοιχία υπερπυκνωτών, με ροπή αντίστασης 1 Nm



Διάγραμμα 24 - Λειτουργία εκκινήτη κατά την τροφοδοσία από την συστοιχία υπερπυκνωτών, με ροπή αντίστασης 1.5 Nm



Διάγραμμα 25 - Λειτουργία εκκινήτη κατά την τροφοδοσία από την συστοιχία υπερπυκνωτών, με ροπή αντίστασης 2 Nm

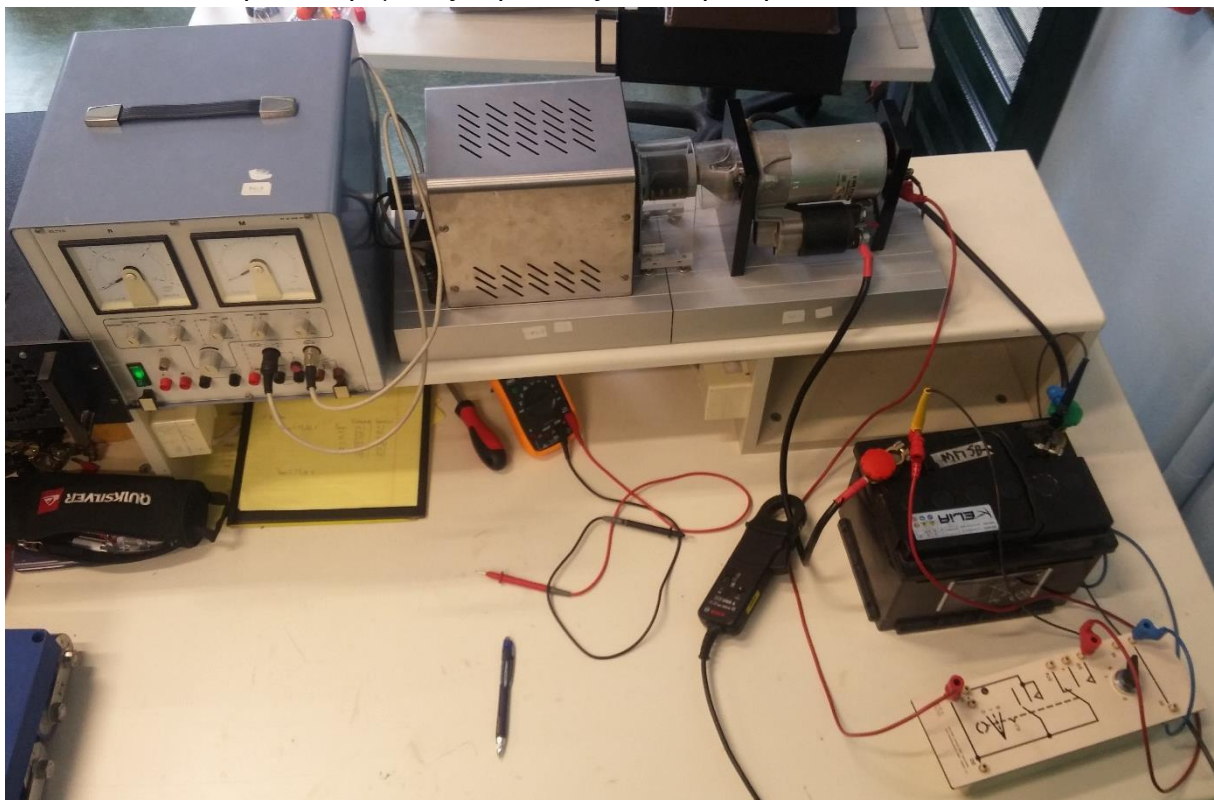
Από τα διαγράμματα, έγινε καταγραφή της τάσης πριν το “μιζάρισμα”, μετά το “μιζάρισμα” και την ελάχιστη, όπως επίσης και της έντασης του ρεύματος κατά την κορύφωση (peak) Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ροπή (Nm)	0.5		1		1.5		2	
Αρχική τάση (V)	13.27		13.27		13.3		13.4	
Peak (0 sec)	508	10.2	522	10	511	10.3	508	10.2
+ 1 sec	153	11.8	198	11.4	255	11.4	254	11.1
+ 2 sec	100	11.8	134	11.5	172	11.4	209	11
+ 3 sec	79	11.8	118	11.4	158	11.1	195	10.7
+ 4 sec	73	11.7	113	11.2	153	10.9	193	10.3
+ 5 sec	71	11.6	111	11	153	10.6	193	10
Ελάχιστη τάση (V)	10.1		10		10.2		9.8	
Τελική τάση (V)	12.1		11.7		11.5		11.2	

Πίνακας 10 - Τιμές έντασης ρεύματος (κόκκινο) και τάσης (μπλε) πειράματος εκκινή με συστοιχία υπερπυκνωτών

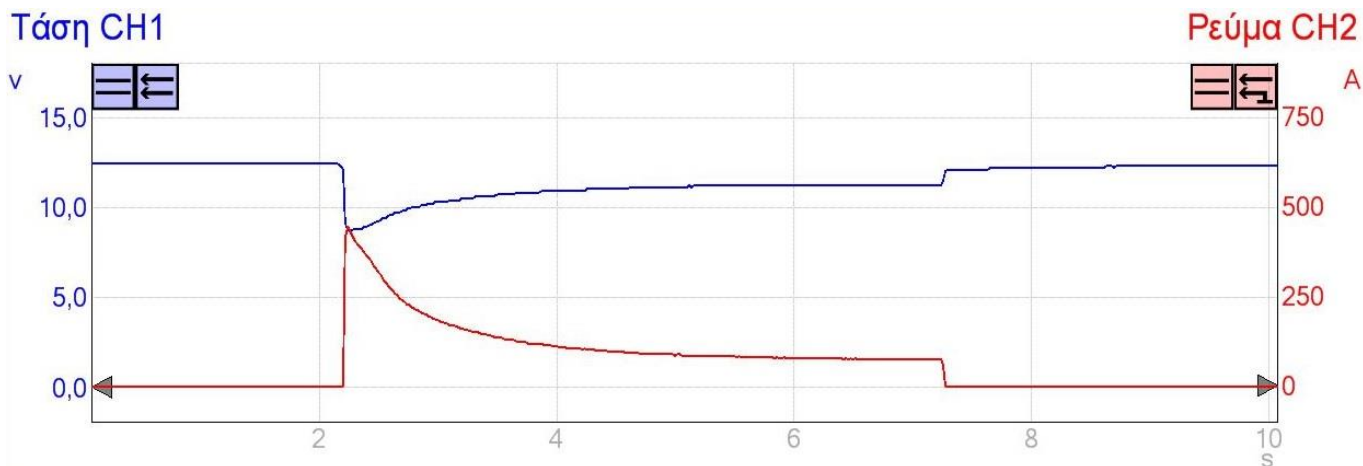
Πείραμα με συσσωρευτή

Η εκτέλεση του πειράματος παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα:

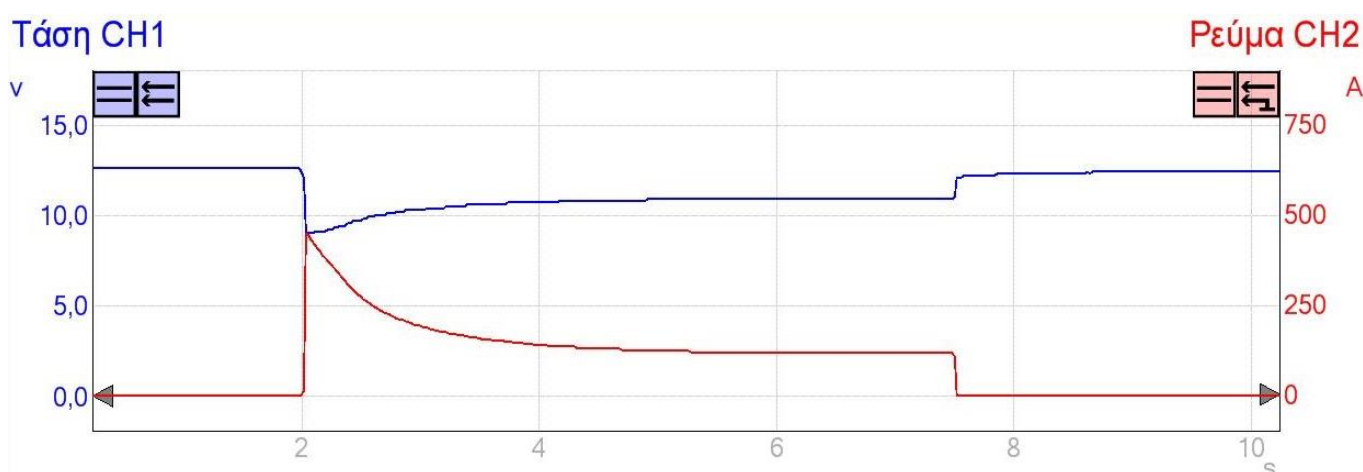


Εικόνα 62 - Σύνδεση συσσωρευτή με εκκινή

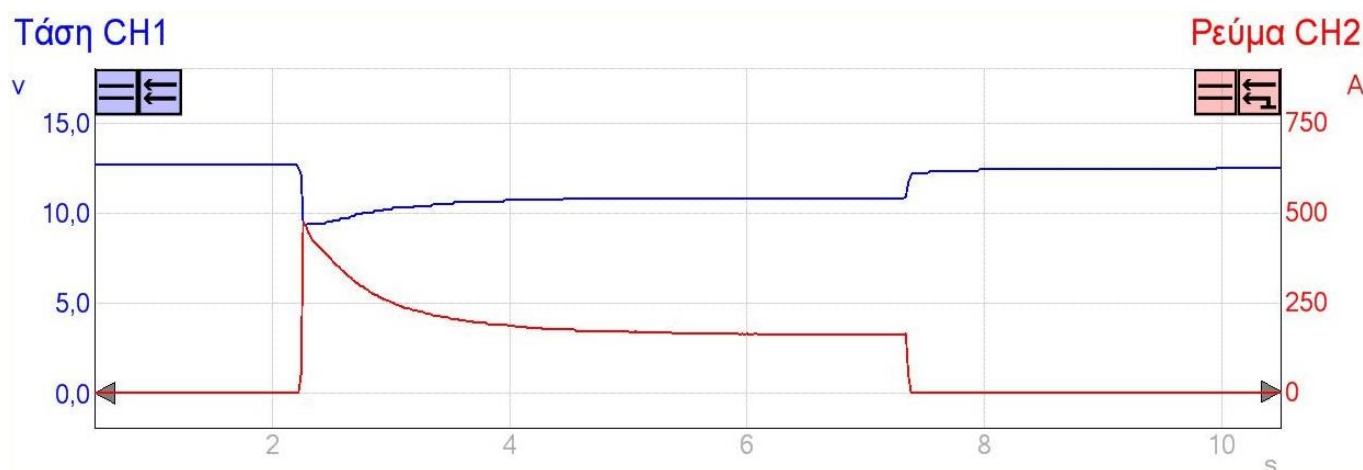
Κατά την εκτέλεση του πειράματος έγινε η καταγραφή της τάσης και της έντασης του συσσωρευτή κατά το “μιζάρισμα”, σε τέσσερις διαφορετικές τιμές ροπής αντίστασης. Οι καμπύλες της τάσης και της έντασης παρουσιάζονται παρακάτω:



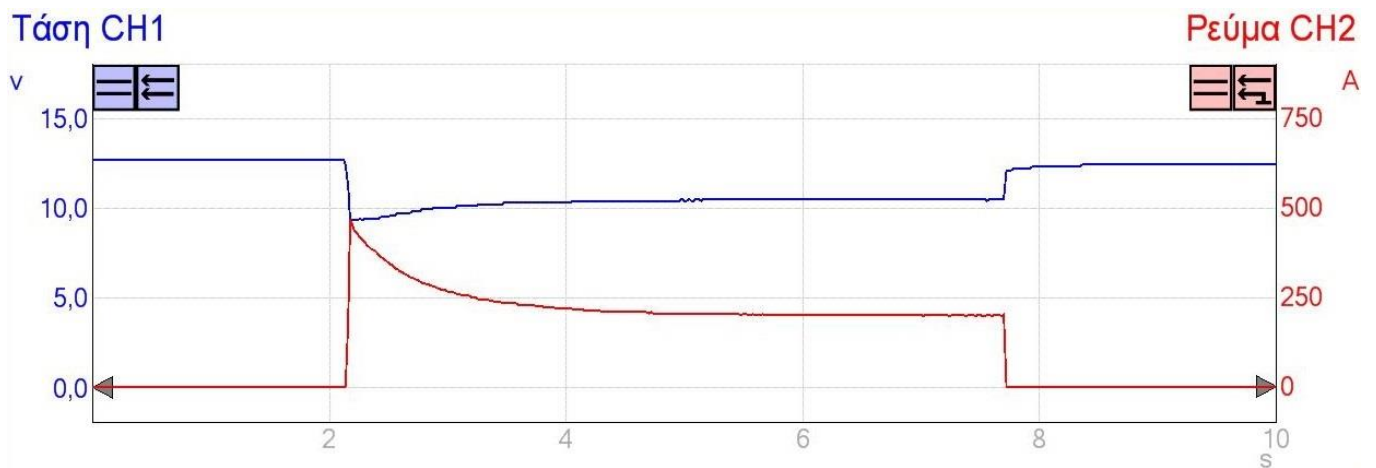
Διάγραμμα 26 - Λειτουργία εκκινητή κατά την τροφοδοσία από τον συσσωρευτή, με ροπή αντίστασης 0.5 Nm



Διάγραμμα 27 - Λειτουργία εκκινητή κατά την τροφοδοσία από τον συσσωρευτή, με ροπή αντίστασης 1 Nm



Διάγραμμα 28 - Λειτουργία εκκινητή κατά την τροφοδοσία από τον συσσωρευτή, με ροπή αντίστασης 1.5 Nm



Διάγραμμα 29 - Λειτουργία εκκινητή κατά την τροφοδοσία από τον συσσωρευτή, με ροπή αντίστασης 2 Nm

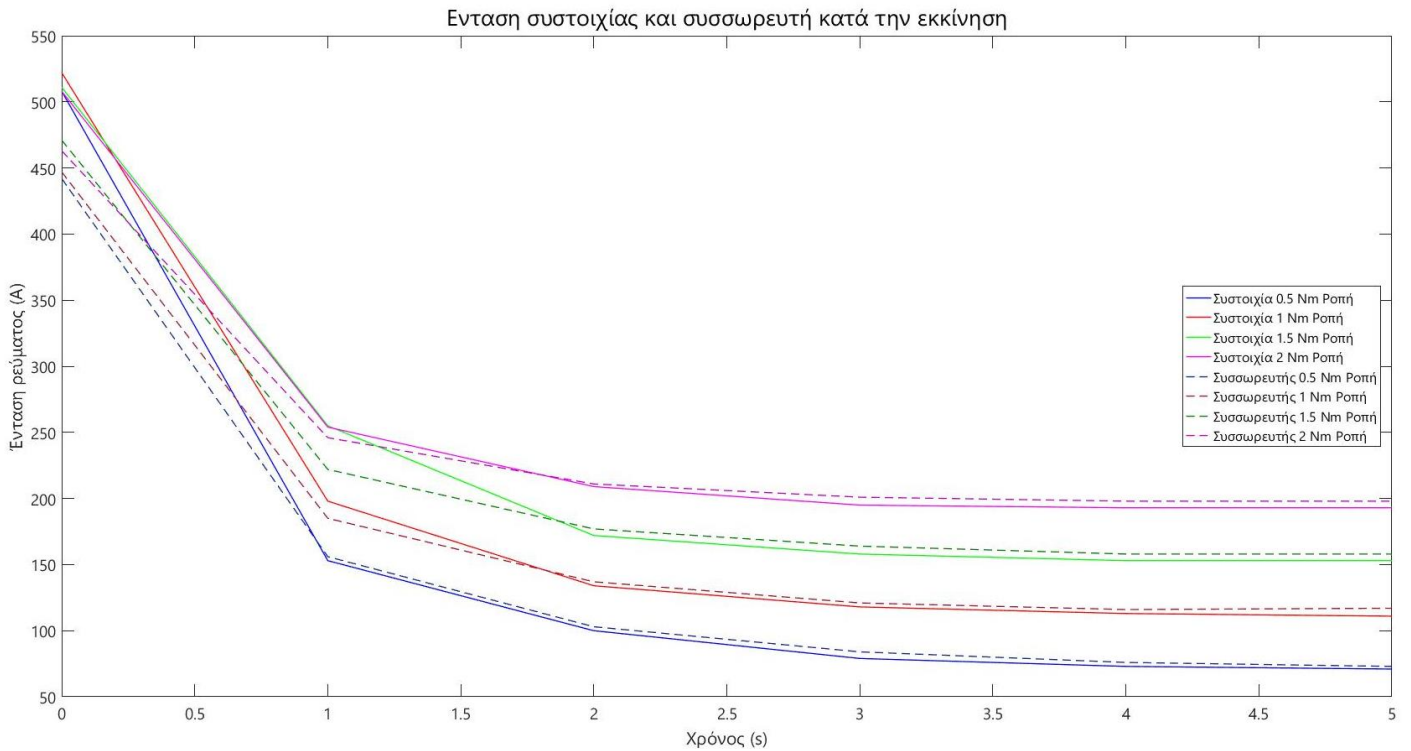
Από τα διαγράμματα, έγινε καταγραφή της τάσης πριν το “μιζάρισμα”, μετά το “μιζάρισμα” και της ελάχιστης τάσης, όπως επίσης και της έντασης του ρεύματος κατά την κορύφωση (peak). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Ροπή (Nm)	0.5		1		1.5		2	
Αρχική τάση (V)	12.34		12.52		12.66		12.66	
Peak (0 sec)	442	8.7	447	9.1	471	9.4	463	9.3
+ 1 sec	156	10.5	185	10.3	222	10.4	246	10.1
+ 2 sec	103	10.9	137	10.7	177	10.7	211	10.4
+ 3 sec	84	11.2	121	10.9	164	10.8	201	10.5
+ 4 sec	76	11.2	116	10.9	158	10.8	198	10.5
+ 5 sec	73	11.2	117	10.9	158	10.8	198	10.5
Ελάχιστη τάση (V)	8.7		9		9.3		9.3	
Τελική τάση (V)	12.3		12.4		12.5		12.4	

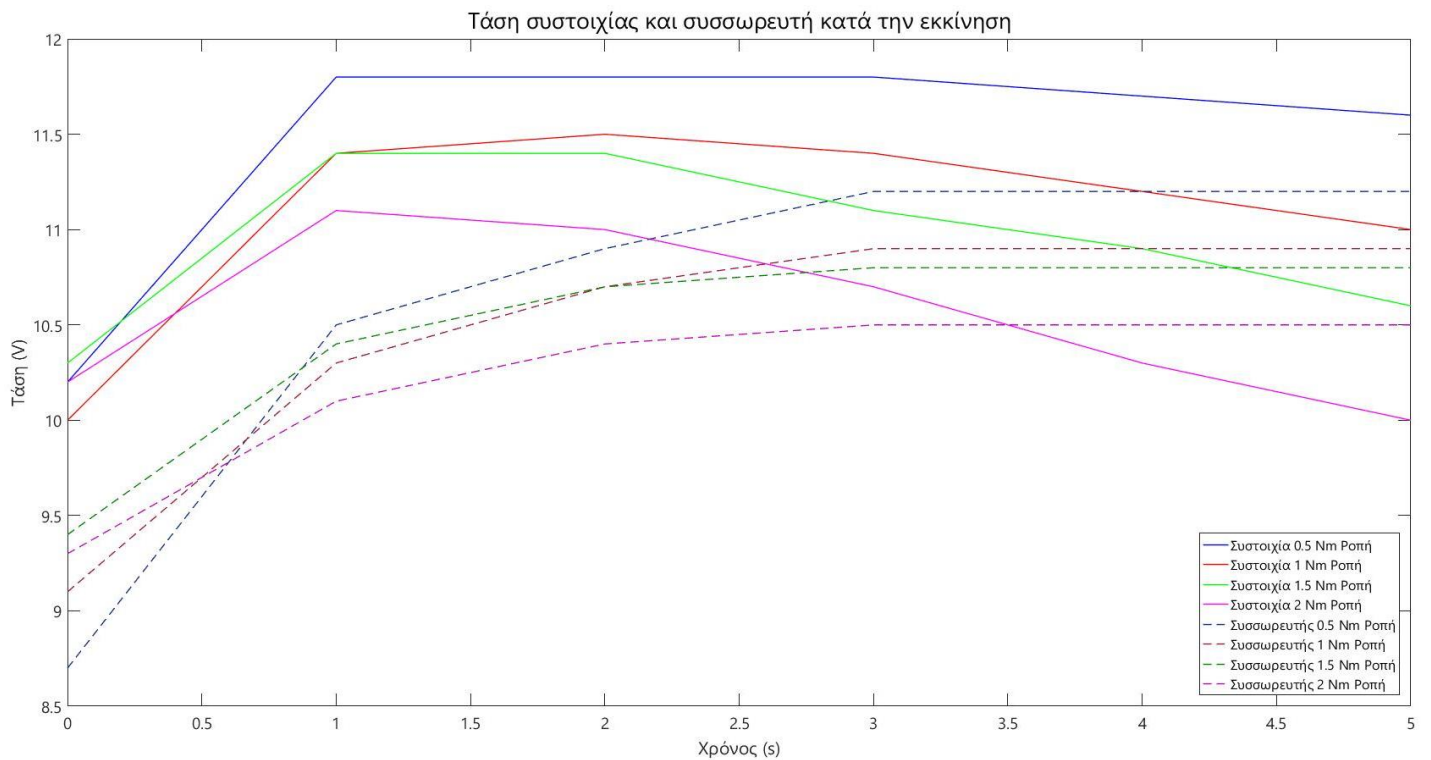
Πίνακας 11 - Τιμές έντασης ρεύματος (κόκκινο) και τάσης (μπλε) πειράματος εκκινητή με συσσωρευτή

Αποτελέσματα μετρήσεων

Από τις τιμές των παραπάνω πινάκων προκύπτουν τα εξής συγκριτικά διαγράμματα:



Διάγραμμα 30 - Σύγκριση έντασης ρεύματος κατά τη λειτουργία του εκκινητή σε μεταβαλλόμενη ροπή αντίστασης



Διάγραμμα 31 - Σύγκριση τάσης κατά τη λειτουργία του εκκινητή σε μεταβαλλόμενη ροπή αντίστασης

Από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, παρατηρείται ότι η συστοιχία αναπτύσσει ρεύμα μεγαλύτερης έντασης στην κορύφωσή της, δηλαδή κατά την έναρξη της λειτουργίας του εκκινητή, από ότι ο συσσωρευτής. Αυτό οφείλεται στην μεγαλύτερη τάση λειτουργίας της συστοιχίας, καθώς και στις φυσικές ιδιότητες του υπερπυκνωτή, δηλαδή την απόδοση ρεύματος μεγάλης έντασης. Καθώς αυξάνεται η ροπή αντίστασης που ασκείται στον εκκινητή, η ένταση του ρεύματος τείνει να σταθεροποιηθεί σε όλο και μεγαλύτερη τιμή. Σε αυτόν τον τομέα και οι δύο πηγές ενέργειας είναι ικανές να αποδώσουν αυτό το ποσό ενέργειας στον εκκινητή, με τη διαφορά ότι η συστοιχία υπερπυκνωτών έχει εκφορτιστεί περισσότερο από τον συσσωρευτή. Αυτό συμπεραίνεται από την πτώση της τάσης πριν και μετά τη λειτουργία του εκκινητή, κάτι το οποίο είναι απολύτως λογικό λόγω της χωρητικότητας μεταξύ των δύο πηγών ενέργειας (1.125 Ah η συστοιχία και 62 Ah ο συσσωρευτής).

Συμπεράσματα/Αποτελέσματα πειραμάτων

Με τα αποτελέσματα που λήφθηκαν από τα πειράματα σύγκρισης των δύο πηγών ενέργειας, έγινε φανερό ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν κατά έναν βαθμό να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς συσσωρευτές των οχημάτων. Η απόδοσή τους είναι παρόμοια κατά την τροφοδοσία του εκκινητή, όμως σε πιο σταθερά φορτία οι υπερπυκνωτές εκφορτίζονται με αισθητά γρηγορότερο ρυθμό από ότι ο συσσωρευτής. Αυτό συμβαίνει λόγω της φύσης των υπερπυκνωτών, που έχουν μικρότερη ειδική ενέργεια, αλλά μεγαλύτερη ειδική ισχύ από τους συσσωρευτές. Γι' αυτό τον λόγο έχουν ίδια απόδοση με τους συσσωρευτές, αλλά με μικρότερο βάρος και όγκο. Η εκτέλεση των πειραμάτων επιβεβαίωσαν τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των υπερπυκνωτών, που αναφέρονται παραπάνω. Όμως υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης για την κατανόηση της συμπεριφοράς των υπερπυκνωτών. Με τη χρήση πέντε υπερπυκνωτών έγινε η βασική κατανόηση της συμπεριφοράς τους. Με τη χρήση έξι υπερπυκνωτών, θα αυξανόταν η συνολική τάση της συστοιχίας ($2.7 \cdot 6 = 16.2 \text{ V}$), οπότε θα μπορούσε να συνδεθεί με το σύστημα φόρτισης ενός συμβατικού οχήματος (14.5 V) και να μελετηθεί η συμπεριφορά της συστοιχίας κατά τη φόρτιση όπως επίσης και συνολικά στη λειτουργία ενός οχήματος. Επιπλέον, λόγω της χρήσης πολλαπλών υπερπυκνωτών σε σειρά, κρίνεται απαραίτητη η χρήση κυκλώματος εξισορρόπησης της τάσης (balancing), λόγω διαφορών της τάσης μεταξύ των κελιών της συστοιχίας. Η τεχνολογία των υπερπυκνωτών είναι σε πρώιμα στάδια. Με την πάροδο του χρόνου και την εξέλιξη νέων υλικών και της

παραγωγικής διαδικασίας, οι υπερπυκνωτές θα γίνουν αποδοτικότεροι και οικονομικότεροι, με αποτέλεσμα να γίνει ευρύτερη η χρήση τους στο πεδίο της αυτοκίνησης.

Βιβλιογραφία

Σύνδεσμοι

1. Guerra M. (2016, Αύγουστος), Can Supercapacitors Surpass Batteries for Energy Storage?
URL: http://www.electronicdesign.com/power/can-supercapacitors-surpass-batteries-energy-storage?utm_test=redirect&utm_referrer=https%3A%2F%2Fwww.google.gr%2F
2. Woodford C. (2018, Φεβρουάριος), Supercapacitors.
URL: <http://www.explainthatstuff.com/how-supercapacitors-work.html>
3. Duder Z. (2017, Αύγουστος), Using supercapacitors to enhance the performance and increase the longevity of a lead acid battery bank in an off-grid power system.
URL: <https://easylivingoffgrid.wordpress.com/2014/08/27/using-supercapacitors-to-enhance-the-performance-and-increase-the-longevity-of-a-lead-acid-battery-bank-in-an-off-grid-power-system/>
4. Beecham M. (2013, Απρίλιος), Q&A with CAP-XX: Supercapacitors for stop-start applications.
URL: https://www.just-auto.com/interview/supercapacitors-for-stop-start-applications_id134803.aspx
5. Sedgwick D. (2015, Οκτώβριος), New energy for stop-start tech.
URL: <http://www.autonews.com/article/20151019/OEM10/310199977/new-energy-for-stop-start-tech>
6. Kurzweil Accelerating Intelligence (Αύγουστος 2014), “Could hemp nanosheets topple graphene for better supercapacitor electrodes?”.
URL: <http://www.kurzweilai.net/could-hemp-nanosheets-topple-graphene-for-better-supercapacitor-electrodes>
7. Hamilton T. (Οκτώβριος 2009), “Next Stop: Ultracapacitor Buses”.
URL: <https://www.technologyreview.com/s/415773/next-stop-ultracapacitor-buses/>

8. Schindall J.G. (Νοέμβριος 2007), The Charge of the Ultra-Capacitors.
URL: <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/the-charge-of-the-ultra-capacitors>
9. Battery University (2017, Απρίλιος), BU-209: How does a Supercapacitor Work?
URL: http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
10. Techate Group, Ultracapacitor & Supercapacitor Frequently Asked Questions
URL: <https://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracapacitor-FAQ.php>
11. Murata Group, (2015, Ιούνιος), Supercapacitor (EDLC) Basics (Part 1): What Is a Supercapacitor (EDLC)?
URL: <http://www.murata.com/products/emiconfun/capacitor/2015/03/24/20150324-p1>
12. University of South Wales (2008, Μάιος), Launch of Europe's First Tribid Green Minibus.
URL: <http://news.glam.ac.uk/news/en/2008/may/30/launch-europes-first-tribid-green-minibus/>
13. Nimmervoll C., (2009, Μάρτιος), Die große Analyse: KERS für Dummys.
URL: <https://www.motorsport-total.com/formel-1/news/die-grosse-analyse-kers-fuer-dummys-09032524>
14. Collins S., (2012, Ιανουάριος), Toyota TS030 LMP1 hybrid revealed.
URL: <http://www.racecar-engineering.com/news/toyota-ts030-lmp1-hybrid-revealed/>
15. Schurig M., (2012, Απρίλιος), DIE HYBRIDTECHNIK IM TOYOTA TS030: Mit Superkondensatoren zum LeMans-Erfolg.
URL: <https://www.auto-motor-und-sport.de/motorsport/die-hybridtechnik-im-toyota-ts030-mit-superkondensatoren-zum-lemans-erfolg/>
16. Jaillet F., (2015, Ιούνιος), “Post TOYOTA Racing Impresses In Le Mans Qualifying • TOYOTA Racing - FIA World Endurance Championship Team”
URL: <https://www.racingbytmg.com/toyota-racing-impresses-in-le-mans-qualifying/?myvar=News>
17. Cap-XX, (2012, Μάρτιος), Supercapacitors for Automotive & Other Vehicle Applications.
URL: <https://www.cap-xx.com/wp-content/uploads/2015/04/CAP-XX-Supercapacitors-for-Automotive-Applications-website.pdf>

18. AFS Trinity Power Corporation, (2008, Ιανουάριος), AFS TRINITY UNVEILS 150 MPG EXTREME HYBRID (XH™) SUV
URL: <http://www.thebreakingnews.com/files/articles/afstrinity-xh150-pressrelease.pdf>
19. Ross J. N., (2013, Ιούνιος), Ross, Jeffrey N. “2014 Mazda6 i-Eloop to net 40 mpg hwy, 28 mpg city.
URL: <https://www.autoblog.com/2013/07/05/2014-mazda6-i-eloop-to-net-40-mpg-hwy-28-mpg-city/?guccounter=1>
20. Woodford C. (2018, Μάρτιος), Capacitors.
URL: <http://www.explainthatstuff.com/capacitors.html>
21. Electronic Circuits, Πυκνωτές.
URL: <http://www.electroniccircuits.gr/pyknwtes.html>
22. Crankshaft Publishing, Principle of Operation (Automobile).
URL: <http://what-when-how.com/automobile/principle-of-operation-automobile/>
23. Hamilton M, DELCO REMY models 10SI & 12SI alternators.
URL: <http://www.madelectrical.com/electricaltech/delcoremy.shtml>
24. Maxwell Technologies, Forklifts & Cranes.
URL: <http://www.maxwell.com/solutions/transportation/forklifts-cranes>
25. Forklift Action (2007, Οκτώβριος), TRIPLE-HYBRID FORKLIFT UNVEILED IN GERMANY.
URL: <https://www.forkliftaction.com/news/newsdisplay.aspx?nwid=4812>
26. Maxwell Technologies, Maxwell's Ultracapacitor-Based Engine Start Module.
URL: <http://www.maxwell.com/esm/>
27. Green Car Congress (2014, Μάρτιος), Maxwell Technologies introduces ultracapacitor-based engine start module for medium-duty diesel trucks.
URL: <http://www.greencarcongress.com/2014/03/20140305-maxwell.html>
28. Hrishikesh D. (2015, Ιανουάριος), Supercapacitors.
URL: <https://www.slideshare.net/dixithrishikesh26/supercapacitors-ppt-hhd>

Περιοδικά, Papers, Εκθέσεις, Συνέδρια

1. Ho J. & Jow R. & Boggs S., “Historical Introduction to Capacitor Technology”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 26, (Ιανουάριος 2010).
2. Namisnyk A.M., “A survey of electrochemical supercapacitor technology”, Technical report, University of Technology, Sydney. (Ιούνιος 2003).

3. Ellenbogen J.C., Halper M.S., “Supercapacitors: A Brief Overview”, MITRE Nanosystems Group. (Μάρτιος 2006).
4. Yu L.; Chen G. Z., “Redox electrode materials for supercapatteries”, *J. Power Sources*. (Σεπτέμβριος 2016).
5. Kinoshita K., “Electrochemical Oxygen Technology”, Wiley. (Ιούνιος 1992)
6. Dr. Kersch S.; Hipp E., Lexe G., “Efficient Hybrid Drive System with Ultracaps for City Buses”, paper presented at Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2005, 5-6 Οκτώβρη.
7. Härrä V.; Eigen S.; Zemp B.; Carriero D., “Kleinbus “TOHYCO-Rider” mit SAM Superkapazitätenspeicher”, Πρόγραμμα “Verkehr & Akkumulatoren”, University of Applied Sciences Central Switzerland, Lucerne, Jahresbericht 2003.
8. Burke A.F., “Batteries and Ultracapacitors for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles”, *Proceedings of the IEEE*, Vol: 95, Issue: 4. (Απρίλιος 2007).
9. Burke A.F.; Simon P., “Nanostructured Carbons: Double-Layer Capacitance and More”, *Electrochemical Society*. (Μάρτιος 2008).
10. Bradfield M., “Improving Alternator Efficiency Measurably Reduces Fuel Costs”, Delco Remy. (2008).

Πατέντες

1. Becker H.I., “Low voltage electrolytic capacitor”, US Patent: 280061.
2. Rightmire, Robert A., “Electrical energy storage apparatus”, US Patent: 3288641.

Βιβλία

1. Frackowiaka E.; François B., *Carbon*, Pergamon, 39 (6): 937–950 (2001).
2. Willmer D. A., *A Text-Book of Physics*, 4th ed, P. Blakiston's Son & Co., p. 361 (1919).
3. Ulaby F.T., *Fundamentals of Applied Electromagnetics*, Prentice Hall, p. 69,168 (1999).
4. Purcell E., *Electricity and Magnetism*, 2nd ed., Cambridge University Press, p. 110–111 (2011).
5. Serway R.A.; Vuille C., *College Physics*, 10th ed., Cengage Learning. p. 582 (2014).

6. Hammond P., *Electromagnetism for Engineers: An Introductory Course*, Elsevier Science, p. 44–45.
7. Dorf R.C.; Svoboda J.A., *Introduction to Electric Circuits*, 5th ed., Wiley, p.263.
8. Δημόπουλος Ι.Φ., *Ηλεκτρικό Σύστημα Αυτοκινήτου*.
9. Petruzella F.D., *Ηλεκτρικό Ηλεκτρονικό Σύστημα Αυτοκινήτου*, Εκδόσεις Τζιόλα (2013).
10. Bohner M., *Τεχνολογία Αυτοκινήτου 4: Ηλεκτρικά και Ηλεκτρονικά Συστήματα Αυτοκινήτου*, Ευρωπαϊκές Τεχνολογικές Εκδόσεις (ETE) (2006).
11. Bagotsky V.S.; Skundin A.M.; Volkovich Y.M., *Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors*, Wiley (2015).
12. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015).
13. Chabot V.; Yu A.; Zhang J., *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications*, CRC Press (2013).
14. Beguin F.; Frackowiaka E., *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*, Wiley (2013).
15. Bosch R., *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics*, 5th ed., Springer (2007).
16. Αλεξάκης Ν.; Αμπατζής Σ.; Γκουκούσης Γ.; Κουντούρης Β.; Μοσχοβίτης Ν.; Οβαδίας Σ.; Πετρόχειλος Κ.; Σαμπράκος Μ.; Ψαλίδας Α., *Φυσική Β' Λυκείου (Γενικής Παιδείας)*, ΟΕΔΒ.
17. Δημόπουλος Φ.; Παπαδόπουλος Ν.; Τοπάλογλου Γ., *Ηλεκτρικό Σύστημα Αυτοκινήτου και Σχέδιο Ηλεκτρικού Συστήματος Αυτοκινήτου (Τ.Ε.Ε. Β' Τάξη 1^ο κύκλου)*, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ “ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ” (2013).

Κανονισμοί

1. Federation Internationale de l'Automobile (FIA) (Μάιος, 2007), Formula One 2011: Power-Train Regulation Framework.

Εικόνες

- [1]. https://classicalfa.com/product_images/o/el049d_45762_zoom.jpg
- [2]. <https://waps.co/upload/cs144-alternator-wiring-diagram/cs144-alternator-wiring-delco-remy-cs-diagram.jpg>
- [3]. http://br.bosch-automotive.com/media/parts/engine_systems_auto_parts/starters_alternators_engine_systems/spare_parts_for_alternators_starters_alternators/pictures_spare_parts_for_alternators/et_generator_714x600.jpg?width=800&height=422
- [4]. <http://www.kava-auto.com/imglibs/images/e81b7e9f-29b6-40ed-9037-4ac89a2b5408-big.jpg>
- [5]. <http://autosystempro.com/wp-content/uploads/2013/06/The-north-and-south-poles-of-a-rotors-field-alternate.jpg>
- [6]. http://www.tempel.com/images/uploads/general_images/winding.png
- [7]. <http://www.laserlaminations.com/images/products/stator-core-1.jpg>
- [8]. <http://store.alternatorparts.com/images/products/display/04422.jpg>
- [9]. <http://www.industrial-electronics.com/images/elec3-11-1.jpg>
- [10]. http://oi1251.photobucket.com/albums/hh555/ufopolitics/genera6_zps16806633.jpg
- [11]. Petruzella F.D., Ηλεκτρικό Ηλεκτρονικό Σύστημα Αυτοκινήτου, Εκδόσεις Τζιόλα (2013)
- [12]. <http://www.240turbo.com/IB354-28mm-1.png>
- [13]. <https://contentinfo.autozone.com/znetcs/product-info/en/US/w12/VR773/image/2/>
- [14]. <http://www.forwardlook.net/forums/forums/get-attachment.asp?action=view&attachmentid=143441>
- [15]. <http://autosystempro.com/wp-content/uploads/2013/06/The-cooling-fan-draws-air-in-from-the-rear-of-the-AC-generator-to-keep-the-diodes-cool.jpg>
- [16]. <https://idtxs3.imgix.net/si/00/07/71.jpg?w=800>
- [17]. https://www.dmb.uk.com/uploads/prod_img/2_1342_s.jpg
- [18]. http://www.pirate4x4.com/tech/billavista/Wiring/Part2/images/10si%20perf%20curves_400.jpg
- [19]. https://lh6.ggpht.com/_Ii1ukGkfijY/Sqn0xRSLGpI/AAAAAAAAACrQ/skxgVyMZpag/s1600-h/clip_image002222.jpg
- [20]. https://www.samarins.com/glossary/img/starting_system.gif

- [21]. <http://osloautos.com/wp-content/uploads/2017/04/STARTER-1.png>
- [22]. http://lh4.ggpht.com/Ii1ukGkfijY/SqnxVtzsmKI/AAAAAAAAACm4/1p4uvT_nVdU/s1600-h/clip_image002102.jpg
- [23]. [http://www.sbdev.co.uk/Duratec/Duratec%20Pics/Starter%20Motor/STR-DURA-2-0-2-3L-02A-\(3\).jpg](http://www.sbdev.co.uk/Duratec/Duratec%20Pics/Starter%20Motor/STR-DURA-2-0-2-3L-02A-(3).jpg)
- [24]. <http://totalotomotif.com/wp-content/uploads/2017/01/Gambar-potongan-pre-engaged-starter.jpg>
- [25]. https://storeimages-westcoastclassic.netdna-ssl.com/dc/2000321/1369767554_h.jpg
- [26]. Bosch R., *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics*, 5th ed., Springer (2007)
- [27]. [http://cdn1.stylincdn.com/is/image/Autos/siry115_1?\\$STT_Main\\$](http://cdn1.stylincdn.com/is/image/Autos/siry115_1?STT_Main)
- [28]. Δημόπουλος Φ.; Παπαδόπουλος Ν.; Τοπάλογλου Γ., *Ηλεκτρικό Σύστημα Αυτοκινήτου και Σχέδιο Ηλεκτρικού Συστήματος Αυτοκινήτου (Τ.Ε.Ε. Β' Τάξη 1^ο κύκλου)*, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ “ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ” (2013)
- [29]. Bosch R., *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics*, 5th ed., Springer (2007)
- [30]. <https://www.electronics-tutorials.ws/capacitor/cap1a.gif>
- [31]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/3/35/Parallel_plate_capacitor.svg/250px-Parallel_plate_capacitor.svg.png
- [32]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/cd/Capacitor_schematic_with_dielectric.svg/430px-Capacitor_schematic_with_dielectric.svg.png
- [33]. <http://ghz.elec.uow.edu.au/electronicslab/TopicThree/images/capacitors.jpg>
- [34]. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015)
- [35]. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015)
- [36]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/19/Supercapacitor_types_overview.svg/800px-Supercapacitor_types_overview.svg.png
- [37]. Chabot V.; Yu A.; Zhang J., *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications*, CRC Press (2013)
- [38]. Chabot V.; Yu A.; Zhang J., *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications*, CRC Press (2013)
- [39]. http://batteryuniversity.com/_img/content/charge22.jpg

- [40]. Chabot V.; Yu A.; Zhang J., *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery: Fundamentals and Applications*, CRC Press (2013)
- [41]. http://batteryuniversity.com/_img/content/discharge.jpg
- [42]. https://www.tecategroup.com/ultracapacitors-supercapacitors/ultracapacitor-FAQ_files/image010.gif
- [43]. Beguin F.; Frackowiaka E., *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*, Wiley (2013)
- [44]. Beguin F.; Frackowiaka E., *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*, Wiley (2013)
- [45]. <https://i.stack.imgur.com/tMdfu.jpg>
- [46]. Beguin F.; Frackowiaka E., *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*, Wiley (2013)
- [47]. https://www.ultracapacitor.co.kr:8001/images/sub/sub3_1_img02.jpg
- [48]. <http://www.wedigtheearth.com/wp-content/uploads/2013/07/Supercapacitors-150x150.jpg>
- [49]. https://cantecsystems.com/images/stories/virtuemart/product/cantec_ls_mtron_cell_lsu_c_002r8p_3000f_ea_img14.jpg
- [50]. <https://media.digikey.com/photos/Eaton%20Busmann/XL60-2R7308T-R.JPG>
- [51]. <https://www.mouser.com/images/microsites/JL.JPG>
- [52]. https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/capacitor/edlc/edlc_img0001.ashx?h=182&la=en-US&mw=320&w=288
- [53]. https://www.murata.com/~media/webrenewal/products/capacitor/edlc/advantage/advantage_img0006.ashx?la=en
- [54]. <https://i.ebayimg.com/images/g/~R8AAOSwc2FZ7wFg/s-11600.jpg>
- [55]. <https://news.nationalgeographic.com/content/dam/news/photos/000/705/70565.adapt.590.1.jpg>
- [56]. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015)
- [57]. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015)
- [58]. Kularatna N., *Energy Storage Devices for Electronic Systems: Rechargeable Batteries and Supercapacitors*, Elsevier (2015)
- [59]. https://kids.kiddle.co/images/thumb/b/bb/Stadtbuss_N%C3%BCrberg_Bus_713_Btf._Schweinau.jpg/777px-Stadtbuss_N%C3%BCrberg_Bus_713_Btf._Schweinau.jpg

- [60]. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Expo_2010_Electric_Bus.jpg
- [61]. https://www.formula1.com/content/fom-website/en/latest/technical/2017/2/re-writing-the-f1-rulebook---part-4--cleaner-cars--kers-and-the-_jcr_content/featureContent/image_6.img.jpg/1486635411904.jpg
- [62]. <http://www.autoguide.com/blog/wp-content/uploads/2012/10/toyota-ts030-hybrid.jpg>
- [63]. http://com.mazdacdn.com/common/en/assets/innovation/technology/img/env_technology/brake-energy-regeneration-system/technology_env_i-e-loop_en_2nd-row_img2.ts.1602150248478430.jpg?quality=75
- [64]. <https://www.mazda.ie/Canvas/all-new-showroom/mazda6-IPM-saloon/110n/master/Gallery/images/RHD/desktop/highlights/01.jpg>
- [65]. https://static.cargurus.com/images/site/2014/03/12/17/36/2015_cadillac_ats_coupe-pic-4240283642749834925-640x480.jpeg
- [66]. http://media.cadillac.com/content/media/ca/en/cadillac/vehicles/CTS_Sedan/2016/_jcr_content/mediaVehiclePar/image.img.jpg/1440435209495.jpg
- [67]. http://www.maxwell.com/images/products/Maxwell_Portfolio_Shot_new_June_2015.png
- [68]. <http://bioage.typepad.com/.a/6a00d8341c4fbe53ef01a5117c8905970c-popup>
- [69]. http://www.maxwell.com/images/products/esm_small_view_expanded_new.png
- [70]. <https://www.forkliftaction.com/upload/gallery/5358.jpg>
- [71]. http://cdn2.bigcommerce.com/server1600/9baf2/products/443/images/1268/BCAP3000_P270_K04_33685.1382915962.1280.1280.JPG?c=2
- [72]. <https://fcache1.pakwheels.com/original/4X/8/3/1/831481823f58f20c3c8f2d6299d4d2271f43d1cb.jpg>