ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Ανάλυση Και Προσομοίωση Μοντέλων Υπερπυκνωτών Και Σύνδεση Με Αντιστροφέα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΣΑΠΛΑΜΙΔΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ
&
ΣΠΕΤΣΙΩΤΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Ανάλυση Και Προσομοίωση Μοντέλων Υπερπυκνωτών Και Σύνδεση Με Αντιστροφέα

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΣΑΠΛΑΜΙΔΗ ΒΑΣΙΛΕΙΟΥ
&
ΣΠΕΤΣΙΩΤΗ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

Επιβλέπων : Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18η Οκτωβρίου 2010.

(Υπογραφή)	*(Υπογραφή)*	*(Υπογραφή)*
.....	.....	.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου	Παύλος Γεωργιλάκης	Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Λέκτορας	Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2010

(Υπογραφή)

.....

ΣΑΠΛΑΜΙΔΗΣ ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ

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

(Υπογραφή)

.....

ΣΠΕΤΣΙΩΤΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

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

Copyright © Σαπλαμίδης Βασίλης & Σπετσιώτης Κωνσταντίνος 2010

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος – All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τους συγγραφείς.

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

Περίληψη

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας αυτής είναι η μελέτη λειτουργίας των υπερπυκνωτών καθώς και η μοντελοποίηση τους σε περιβάλλον Simulink. Παρουσιάζονται διάφορα μαθηματικά μοντέλα που βρέθηκαν στην διεθνή βιβλιογραφία και προτείνονται τρόποι βελτίωσης ενός από αυτά.

Συγκεκριμένα στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας υπερπυκνωτών. Ακολουθεί απαρίθμηση των ειδών των υπερπυκνωτών καθώς και ιστορική αναδρομή από την εφεύρεση τους μέχρις τις τρέχουσες ερευνητικές εξελίξεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύονται οι κύριες εφαρμογές των υπερπυκνωτών τόσο στην βιομηχανία όσο και στην καθημερινή ζωή (ηλεκτρικά αυτοκίνητα, βελτίωση ποιότητας ισχύος).

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύονται αποτελέσματα πειραμάτων σε υπερπυκνωτές ώστε να γίνει σαφής η λειτουργία τους και η εξάρτηση των χαρακτηριστικών τους από τις πειραματικές παραμέτρους. Επίσης γίνεται μια σύντομη παρουσίαση του μαθηματικού πακέτου Simulink.

Στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή και ανάλυση κάθε μοντέλου ξεχωριστά. Αναλυτικότερα παρουσιάζεται το κυκλωματικό ισοδύναμο από το οποίο εξάγονται οι εξισώσεις που είναι απαραίτητες για την υλοποίηση του μοντέλου στο Simulink. Τέλος κάθε μοντέλο προσομοιώνεται και εξάγονται τα αντίστοιχα διαγράμματα.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζεται ένα απλό μοντέλο αντιστροφέα και γίνεται προσομοίωση σύνδεσης υπερπυκνωτή – αντιστροφεά – φορτίου.

Λέξεις-κλειδιά: «ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΗΣ, ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΚΥΚΛΩΜΑ, SIMULINK, ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ, ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ, ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑΣ»

Abstract

The purpose of this thesis is the study of the operation of Supercapacitors and their modeling in Simulink. Various mathematical are presented and several improvements are being investigated.

Specifically, in the first chapter the working principle of supercapacitors is being presented followed by a presentation of the different supercapacitor types and the history from their invention until current research developments.

The second chapter analyzes the main uses of the upercapacitors both in industrial applications and everyday life (electric cars, improved power quality).

In the third chapter we present experimental results on supercapacitors and the relations between their characteristics and various experimental parameters are being investigated. There is also a short presentation of the mathematical package Simulink.

In the fourth chapter we describe and analyze each model separately. Firstly, equivalent circuit is presented and then the equations needed to implement the model in Simulink are derived. Finally each model is simulated and diagrams are drawn.

The fifth chapter presents a simple model of an inverter and the connection between supercapacitor – inverter – electric load is simulated.

Keywords: «SUPERCAPACITOR, ULTRACAPACITOR, EDLC, DYNAMIC CIRCUIT, SIMULINK, MODELING, SIMULATION, INVERTER»

Ευχαριστίες

Ευχαριστούμε θερμά τον Καθηγητή κ. ΝΙΚΟΛΑΟ ΧΑΤΖΗΑΡΓΥΡΙΟΥ για την εμπιστοσύνη που μας έδειξε για την ανάθεση της διπλωματικής εργασίας καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή που είχαμε κατά την εκπόνηση της εργασίας αυτής.

Ειδικότερα θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε την υπ. Διδάκτορα Εριέττα Ζουντουρίδου της οποίας η συμβολή στην ολοκλήρωση της εργασίας ήταν καθοριστική.
Ευχαριστούμε επίσης θερμότατα τους Patrick Johansson και Bjorn Andersson απόφοιτους του CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY για την παραχώρηση πειραματικών δεδομένων που ήταν απαραίτητα για την πληρότητα της διπλωματικής εργασίας.
Τέλος οφείλουμε να ευχαριστήσουμε τις οικογένειες μας για την στήριξη που μας παρείχαν καθ’ όλη την διάρκεια των σπουδών μας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ **8**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ..... **10**

ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ **10**

1.1 Εισαγωγή 10
1.1.1 Περιγραφή Συμβατικού πυκνωτή *11*
1.1.2 Οι οπλισμοί *13*
1.1.3 Ο ηλεκτρολύτης *13*
1.2 Είδη υπερπυκνωτών – Αρχή λειτουργίας 14
1.2.1 Πυκνωτές διπλού στρώματος (Double layer Capacitors) *14*
1.2.2 Ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors) *18*
1.2.3 Υβριδικοί πυκνωτές *18*
1.3 Ιστορική αναδρομή 20
1.3.1 Παρελθόν *20*
1.3.2 Τρέχουσα εμπορική δραστηριότητα *22*
1.3.3 Έρευνα *24*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ..... **27**

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ **27**

2.1 Backup μνήμης 27
2.2 Ηλεκτρικά οχήματα 28
2.3 Ποιότητα ισχύος 32
2.4 Βελτίωση απόδοσης μπαταριών 33
2.5 Ηλεκτρομηχανικοί ενεργοποιητές 36
2.6 Οδήγηση ρυθμιζόμενης ταχύτητας (ASD) 36
2.7 Φορητά τροφοδοτικά 38
2.8 Αποθήκευση ενέργειας σε απομονωμένες εγκαταστάσεις (ΑΠΕ) 39

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ..... **40**

ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ **40**

3.1 Πειραματικές παρατηρήσεις 40
3.1.1 Εξάρτηση της αντίστασης σειράς από τη θερμοκρασία *40*
3.1.2 Εξάρτηση της χωρητικότητας από τη θερμοκρασία *41*
3.1.3 Εξάρτηση της χωρητικότητας από την τάση *42*
3.2 Παρουσίαση Simulink 43
3.2.1 Περιβάλλον διεπαφής χρήστη (User Interface) *44*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ..... **47**

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ **47**

4.1 Βασικό μοντέλο 47
4.1.1 Μοντέλο Simulink *49*
4.1.2 Υπολογισμός τιμών παραμέτρων *50*
4.1.2.1 Κύρια χωρητικότητα 50
4.1.2.2 'Lookup Table' για τη μη γραμμική χωρητικότητα 52
4.1.2.3 Χωρητικότητα C_P 53
4.1.2.4 Αντίσταση R1 53
4.1.2.5 Αντίσταση R2 54
4.1.2.6 Αντίσταση R3 55
4.1.2.7 Αντίσταση R_P 56
4.1.3 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών των παραμέτρων του βασικού μοντέλου *56*
4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης *56*
4.2 Μοντέλο δύο κλάδων (Two branches model) 61

4.2.1 Περιγραφή μοντέλου *61*
4.2.2 Μοντέλο Simulink *64*
4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης *65*
4.3 DTDSM 69
4.3.1 Περιγραφή Μοντέλου *69*
4.3.2 Μοντέλο Simulink – Ανάλυση *70*
4.3.2.1 Κύρια χωρητικότητα (C) και δυναμική συμπεριφορά 71
4.3.2.2 Αντίσταση σειράς (R_S) 73
4.3.2.3 Αντίσταση Balancing 75
4.3.3 Θερμική μοντελοποίηση *75*
4.3.3.1 Θερμικό μοντέλο πρώτης τάξης 77
4.3.3.2 Θερμικό μοντέλο δεύτερης τάξης 77
4.3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης *79*
4.3.4.1 Προσομοίωση μοντέλου με θερμοκρασιακή εξάρτηση $1^{ης}$ τάξης 79
4.3.4.2 Προσομοίωση μοντέλου με θερμοκρασιακή εξάρτηση $2^{ας}$ τάξης 85
4.4 ΒΕΛΤΊΩΣΗ ΜΟΝΤΈΛΟΥ ΔΎΟ ΚΛΆΔΩΝ 94
4.4.1 Περιγραφή μοντέλου *94*
4.4.2 Μοντέλο Simulink *97*
4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης *99*

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 106

ΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ 106

5.1 ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΈΑΣ (INVERTER) 106
5.1.1 Αρχή λειτουργίας *107*
5.1.2 Μοντέλο Simulink *111*
5.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης *113*
5.2 ΣΎΝΔΕΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΏΝ – ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΈΑ 117

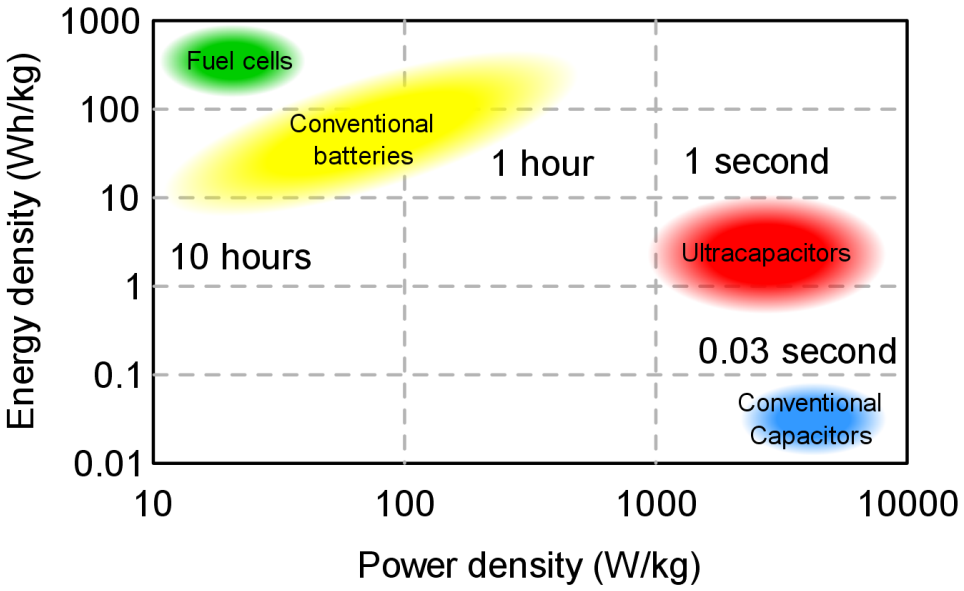
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 121

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 129

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1
ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή

Ο υπερπυκνωτής (supercapacitor ή ultracapacitor) είναι μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που μας ενδιαφέρει για πολλές εφαρμογές αφού έχει ένα μοναδικό χαρακτηριστικό: την πολύ μεγάλη (σε σύγκριση με συμβατικές αποθήκες ενέργειας) πυκνότητα ισχύος του. Μπορεί δηλαδή να παρέχει ενέργεια ακόμα και σε πολύ γρήγορες μεταβολές του φορτίου. Δύο είναι οι κύριες παράμετροι που εξετάζουμε στις συσκευές αποθήκευσης ενέργειας: η πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg) και ισχύος (W/Kg). Όπως φαίνεται και στο ακόλουθο διάγραμμα (σχήμα 1.1 – διάγραμμα Ragone), οι υπερπυκνωτές έχουν σήμερα [44] αρκετά χαμηλότερη πυκνότητα ενέργειας από τις συνήθεις μπαταρίες που λειτουργούν με χημικό τρόπο, αλλά αρκετά μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος.



Σχήμα 1.1

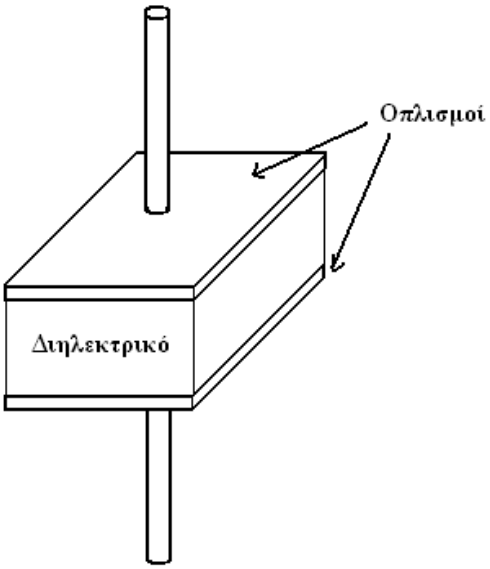
Στο διάγραμμα αυτό η περιοχή "Fuel cells" αντιπροσωπεύει τις κυψέλες υδρογόνου καθώς και τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου που χρησιμοποιούνται σήμερα. Η περιοχή "Conventional batteries" προκύπτει από την μέση απόδοση των πιο διαδεδομένων τύπων μπαταριών όπως ιόντων λιθίου (Li-Ion) και νικελίου - υδριδίου μετάλλου (NiMH). Η περιοχή Ultracapacitors δείχνει τις ικανότητες των σημερινών υπερπυκνωτών και τέλος ως Conventional capacitors εννοούνται οι συνήθεις πυκνωτές με τις μικρές χωρητικότητες που είναι χρήσιμοι κυρίως στην ηλεκτρονική και λιγότερο σε συστήματα ηλεκτρικής ισχύος.

Η κύρια διαφορά στην αρχή λειτουργίας υπερπυκνωτών και μπαταριών είναι ο τρόπος αποθήκευσης ενέργειας. Οι μπαταρίες είναι φτιαγμένες ώστε με διάφορες χημικές αντιδράσεις (εξαρτάται από τον τύπο της μπαταρίας) να αποθηκεύουν την ενέργεια που τους παρέχεται κατά τη φόρτιση. Όταν θέλουμε να πάρουμε την ενέργεια αυτή ως ηλεκτρικό ρεύμα, πάλι συγκεκριμένες αντιδράσεις στην κάθοδο και την άνοδο της μπαταρίας παράγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Η διαδικασία αυτή είναι που θέτει το όριο στην πυκνότητα ισχύος των μπαταριών. Ενώ δηλαδή μπορεί κανείς να έχει ουσιαστικά όση ενέργεια επιθυμεί (με περιορισμούς λόγω χώρου και κόστους) αποθηκευμένη σε μπαταρίες, δεν

μπορεί να την πάρει με οσοδήποτε μεγάλο ρυθμό. Οι υπερπυκνωτές αντίθετα αποθηκεύουν την ενέργεια μέσω διαχωρισμού φορτίων όπως περίπου και ένας απλός πυκνωτής παραλλήλων πλακών. Ένα άλλο πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών έναντι των συμβατικών μπαταριών είναι ότι δεν χρειάζονται χημικά προϊόντα για τη λειτουργία τους, πράγμα που τους δίνει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής (κύκλους φόρτισης – εκφόρτισης) και τους κάνει φιλικότερους προς το περιβάλλον. Στο σημείο αυτό μπορούμε να θυμηθούμε την αρχή λειτουργίας και τα κύρια χαρακτηριστικά ενός συμβατικού πυκνωτή.

1.1.1 Περιγραφή Συμβατικού πυκνωτή

Ο πυκνωτής είναι ένα παθητικό ηλεκτρονικό στοιχείο που γενικά αποτελείται από ένα ζεύγος αγώγιμων επιφανειών (οπλισμοί) χωρισμένες από διηλεκτρικό (μονωτή). Όταν εφαρμόζεται διαφορά δυναμικού μεταξύ των επιφανειών αυτών δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο μέσα στο διηλεκτρικό, ανάμεσα στους αγωγούς. Ακριβώς η ύπαρξη αυτού του πεδίου κάνει τον πυκνωτή χρήσιμο ως «αποθήκη» ηλεκτρικής ενέργειας. Στον ιδανικό πυκνωτή χρειαζόμαστε μόνο ένα μέγεθος για την περιγραφή του, την χωρητικότητα. Αυτή ορίζεται ως το πηλίκο του φορτίου (Q - Coulomb) που έχει συσσωρευτεί σε κάθε οπλισμό διά τη διαφορά δυναμικού (V - Volts) ανάμεσα στους οπλισμούς και μετριέται σε Farads.



Σχήμα 1.2

$$C = \varepsilon \frac{Q}{V}$$

Όπου με ε συμβολίζουμε την (απόλυτη) διηλεκτρική σταθερά του διηλεκτρικού υλικού. Υπάρχουν, όπως θα δούμε, υλικά που έχουν την ιδιότητα να αυξάνουν τη χωρητικότητα του πυκνωτή.

Στην ιδανική περίπτωση η χωρητικότητα είναι σταθερή και ανεξάρτητη του φορτίου και της τάσης (ο λόγος είναι πάντα σταθερός). Σε αυτήν την περίπτωση η ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στο πεδίο ανάμεσα στους οπλισμούς είναι:

$$W = \int_{q=0}^{Q} V dq = \int_{q=0}^{Q} \frac{q}{C} dq = \frac{1}{2}\frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}VQ$$

Αν υπάρχει μεταβαλλόμενο φορτίο στους οπλισμούς του πυκνωτή τότε θα υπάρχει ένα ρεύμα που θα ρέει από αυτόν και ορίζεται ως η χρονική παράγωγος του φορτίου.

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

Συνεπώς θα ισχύει η σχέση

$$I(t) = C\frac{dV(t)}{dt}$$

Οι πραγματικοί πυκνωτές έχουν χαρακτηριστικά που τους κάνουν μη ιδανικούς, με κυριότερα την τάση διάσπασης (breakdown voltage) και την αντίσταση σειράς (equivalent series resistance).

Όπως είναι γνωστό, κάθε μονωτικό υλικό που χρησιμοποιείται ως διηλεκτρικό μπορεί να γίνει αγωγός πάνω από κάποιες τιμές της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, προκαλώντας βραχυκύκλωμα ανάμεσα στους οπλισμούς του πυκνωτή και καταστρέφοντάς τον. Η τάση στην οποία συμβαίνει αυτό το φαινόμενο ονομάζεται τάση διάσπασης. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να αποθηκευθεί με ασφάλεια στον πυκνωτή περιορίζεται, λοιπόν, από το φαινόμενο αυτό, και στην πράξη η μέγιστη πυκνότητα ενέργειας (energy density) ενός πυκνωτή εξαρτάται απ' το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται. Όταν σαν διηλεκτρικό χρησιμοποιείται το κενό, η ένταση διάσπασης είναι της τάξης των 10^7 V/m. Τυπικοί πυκνωτές για ηλεκτρονική χρήση καταστρέφονται σε τάσεις από μερικές δεκάδες έως λίγες εκατοντάδες βολτ.

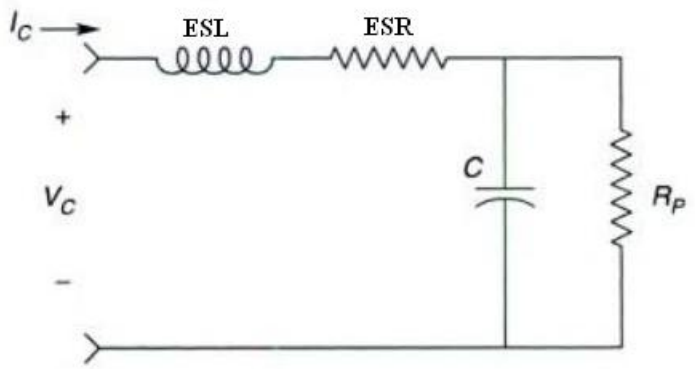
Οι μη ιδανικότητες του διηλεκτρικού εκδηλώνονται όμως και σε κανονική λειτουργία, σε τάση δηλαδή κάτω από την τάση διάσπασης. Γνωρίζουμε ότι στην πράξη δεν υπάρχουν τέλειοι μονωτές, και στην πραγματικότητα το διηλεκτρικό που χρησιμοποιείται για να διαχωρίζει ηλεκτρικά τους οπλισμούς του πυκνωτή, άγει το ρεύμα σε ένα μικρό ποσοστό. Έτσι ένας φορτισμένος πυκνωτής μπορεί ακόμα και με ανοικτοκυκλωμένα τα άκρα του να χάσει το φορτίο του με την πάροδο ικανού χρόνου, ο οποίος εξαρτάται από το είδος και την ποιότητα των υλικών και της κατασκευής του (αυτό-εκφόρτιση, self-discharge)

Το επόμενο σημαντικό σημείο μη ιδανικότητας ενός πυκνωτή είναι αυτό που λέμε ισοδύναμη αντίσταση σειράς (equivalent series resistance – ESR). Το ESR δεν είναι παρά ένα πραγματικό μέρος που εμφανίζεται "παρασιτικά" στην μιγαδική αντίσταση του πυκνωτή. Στην πράξη, με αυτόν τον τρόπο μοντελοποιούμε τις διάφορες μη ιδανικότητες στην κατασκευή και τα υλικά που αποτελούν τον πυκνωτή. Δηλαδή ο πραγματικός πυκνωτής δεν αποθηκεύει ενέργεια ώστε να τη δώσει ολόκληρη πίσω αλλά καταναλώνει ένα μέρος σε ωμικές απώλειες. Έχουμε λοιπόν για την μιγαδική αντίσταση ενός πυκνωτή:

$$R_C = \frac{1}{j\omega C} + R_{ESR}$$

Παρομοίως, οι ακροδέκτες σύνδεσης του πυκνωτή μπορούν (σε μεγάλες συχνότητες) να παρουσιάσουν επαγωγική συμπεριφορά που θα ακυρώσει εν τέλει τη χωρητικότητα του. Αυτό αναφέρεται ως ισοδύναμη επαγωγή σειράς (equivalent series inductance – ESL).

Τέλος, πρέπει να σημειώσουμε ότι ακόμα και η χωρητικότητα ενός πυκνωτή, που είναι άλλωστε και το κύριο μέγεθος που τον χαρακτηρίζει, δεν παραμένει πάντα αμετάβλητη με το χρόνο αλλά σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να φθίνει λόγω γήρανσης του διηλεκτρικού (πχ. στους κεραμικούς πυκνωτές) ή λόγω εξάτμισης (στους ηλεκτρολυτικούς). Στο φαινόμενο αυτό φαίνεται να συμβάλουν οι περιβαλλοντικές συνθήκες λειτουργίας (κυρίως η θερμοκρασία) και όχι τόσο η τάση λειτουργίας. Παρακάτω φαίνεται ένα βασικό μοντέλο για έναν πραγματικό πυκνωτή (σχήμα 1.3).



Σχήμα 1.3

Το εν σειρά πηνίο και αντίσταση αναπαριστούν τα ESL και ESR που αναφέραμε πιο πάνω και η παράλληλη αντίσταση R_P δείχνει το ρεύμα διαρροής που μπορεί να υπάρχει σε έναν πυκνωτή μέσω του διηλεκτρικού.

1.1.2 Οι οπλισμοί

Σε έναν συμβατικό πυκνωτή οι οπλισμοί του αποτελούνται από μία αγώγιμη επιφάνεια πάνω στην οποία συγκεντρώνονται τα φορτία και ανάμεσά τους έχουν το διηλεκτρικό. Οι οπλισμοί ενός υπερπυκνωτή, αντίθετα αποτελούνται από μία πορώδη μικροδομή συνήθως από άνθρακα, και ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται γύρω από αυτήν. Αυτή η δομή δίνει μία σημαντικά μεγαλύτερη επιφάνεια αποθήκευσης φορτίων σε σχέση με τους ηλεκτροστατικούς πυκνωτές. Μία λεπτή διαχωριστική μεμβράνη βρίσκεται ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο ώστε να μην επιτρέπει αγώγιμη επαφή μεταξύ των οπλισμών αφήνοντας παράλληλα τα ιόντα να περνούν ελεύθερα διαμέσου της.

1.1.3 Ο ηλεκτρολύτης

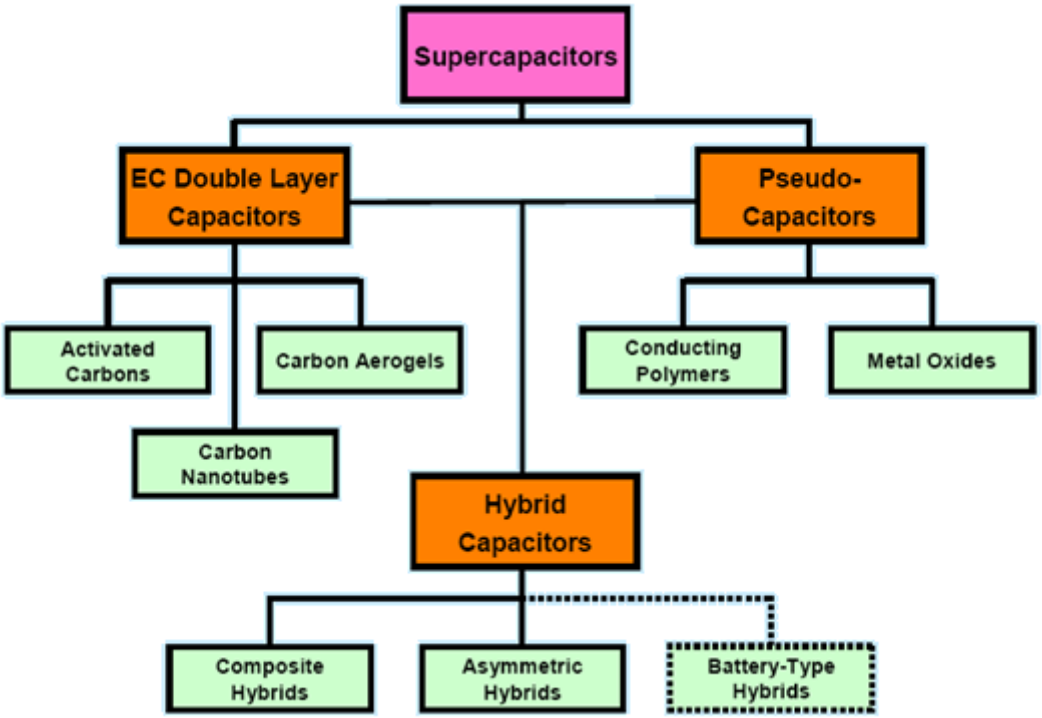
Η κύρια διαφορά μεταξύ των υπερπυκνωτών και των συμβατικών πυκνωτών είναι ότι ο ηλεκτρολύτης στους υπερπυκνωτές περιέχει ελεύθερα φορτία στη μορφή των ιόντων. Υπάρχουν δύο κύρια είδη ηλεκτρολυτών σήμερα στο εμπόριο, το ACN (Acetonitrile – CH_3CN) και το PC (Propylene Carbonate). [1] Οι ιδιότητες του ηλεκτρολύτη είναι που καθορίζουν την ονομαστική τάση του πυκνωτή που πρέπει πάντα να είναι μικρότερη από την τάση οξείδωσης του ηλεκτρολύτη. Σε περίπτωση που η τάση του πυκνωτή φτάσει την τάση οξείδωσης, εκκινεί μία χημική αντίδραση που παράγει αέρια προϊόντα, πράγμα επικίνδυνο που μπορεί να οδηγήσει σε έκρηξη και καταστροφή του πυκνωτή και ενδεχομένως άλλες υλικές ζημιές ή τραυματισμούς. Οι ηλεκτρολύτες που είναι διαθέσιμοι σήμερα έχουν ονομαστικές τάσεις μέχρι 2,8V.

Μία άλλη επιθυμητή ιδιότητα για τον ηλεκτρολύτη είναι να μπορεί να διαλύσει τα άλατα που παρέχουν τα ελεύθερα ιόντα στον πυκνωτή, και μάλιστα αυτά να εμφανίζουν τη μέγιστη δυνατή κινητικότητα μέσα στο διάλυμα αυτό. Η κινητικότητα των ελεύθερων ιόντων είναι σημαντική αφού στους υπερπυκνωτές είναι ο κύριος παράγοντας καθορισμού της αντίστασης σειράς, και άρα των ηλεκτρικών απωλειών και της θερμικής συμπεριφοράς τους. Μεγάλη κινητικότητα δίνει μικρή αντίσταση και αντίστροφα. Σε αυτό το σημείο θα έλεγε κανείς ότι η αντίσταση σειράς καθορίζεται κυρίως από παρασιτικές ωμικές αντιστάσεις λόγω κατασκευαστικών ατελειών στους οπλισμούς και στις αγώγιμες συνδέσεις των ηλεκτροδίων όπως αναφέραμε στην παράγραφο 1.1.1. Στους υπερπυκνωτές όμως η συμβολή του ηλεκτρολύτη είναι σημαντικότερη, και για να είμαστε ακόμα πιο ακριβείς πρέπει να ληφθεί υπόψη και η εξάρτηση της κινητικότητας των ιόντων στον ηλεκτρολύτη από την θερμοκρασία. Αυτή η εξάρτηση διαφέρει από ηλεκτρολύτη σε ηλεκτρολύτη αφού ο ACN δημιουργεί μία αντίσταση σειράς σχετικά πιο σταθερή παρά τις μεταβολές της θερμοκρασίας ενώ ο PC παρουσιάζει μεταβολές ειδικά σε χαμηλές θερμοκρασίες. Οι λόγοι που δεν χρησιμοποιείται αποκλειστικά ACN είναι κυρίως περιβαλλοντικοί αφού αν η τάση πυκνωτή με ACN υπερβεί την τάση οξείδωσης, παράγονται αέρια που περιέχουν την τοξική ένωση κυάνιο, και έτσι η χρήση του είναι παράνομη σε αρκετές χώρες [2].

Η συμπεριφορά του υπερπυκνωτή, την οποία σε αυτή την εργασία καλούμαστε μεταξύ άλλων να μοντελοποιήσουμε, καθορίζεται από δύο κυρίως φυσικούς μηχανισμούς. Την διάχυση και την ηλεκτροστατική δυναμική. Όταν ο πυκνωτής είναι πλήρως εκφορτισμένος (μηδενική τάση ανάμεσα στους οπλισμούς του), τα ιόντα μέσα στον ηλεκτρολύτη κατανέμονται ομοιόμορφα λόγω διάχυσης. Όταν ο πυκνωτής φορτιστεί, τα ιόντα υφίστανται δυνάμεις λόγω του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ των ηλεκτροδίων και διαχωρίζονται καθώς κινούνται προς τον οπλισμό που έλκει το κάθε ένα από αυτά. Η αυτο-εκφόρτιση ενός πυκνωτή οφείλεται κυρίως σε φαινόμενα διάχυσης [3].

1.2 Είδη υπερπυκνωτών – Αρχή λειτουργίας

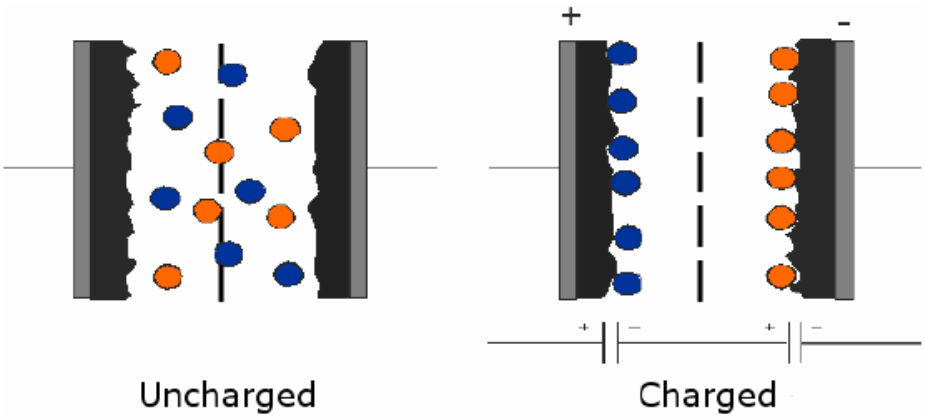
Οι υπερπυκνωτές μπορούν να χωριστούν σε διάφορα είδη ανάλογα με τον τρόπο όπου αποθηκεύουν την ενέργεια τους. Διακρίνουμε τρεις κατηγορίες, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα, οι πυκνωτές διπλού στρώματος (Double-layer capacitors), οι ψευδοπυκνωτές (pseudocapacitors) και τέλος ένας συνδυασμός των δύο παραπάνω, οι υβριδικοί.



Σχήμα 1.4

1.2.1 Πυκνωτές διπλού στρώματος (Double layer Capacitors)

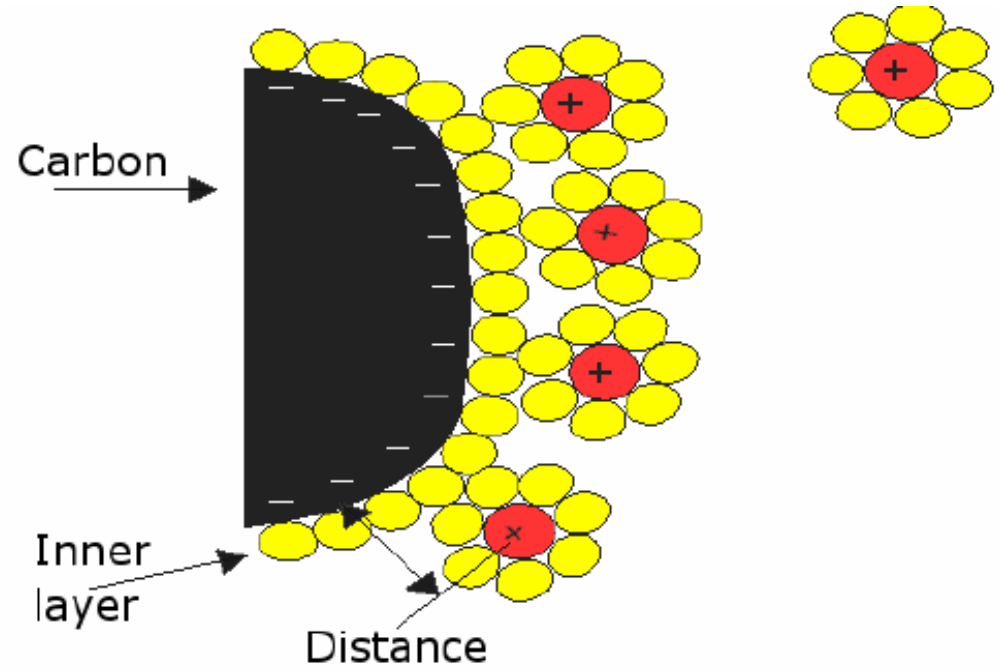
Όταν ο υπερπυκνωτής είναι φορτισμένος, τα ηλεκτρόνια στην κάθοδο έλκουν τα θετικά ιόντα και η απουσία ηλεκτρονίων στην άνοδο έλκει τα αρνητικά ιόντα ώστε να επιτευχθεί τοπική ισορροπία φορτίων. Κατ' αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μία χωρητικότητα μεταξύ των ιόντων και της επιφάνειας του οπλισμού. Η ονομασία "dual layer" δηλώνει τα δύο στρώματα ιόντων σε κάθε οπλισμό. Το πρώτο στρώμα που είναι κοντά στον οπλισμό δρα σαν διηλεκτρικό και το δεύτερο συγκρατεί τα φορτία. Αυτό συμβαίνει και στους δύο οπλισμούς του υπερπυκνωτή και η συνολική χωρητικότητα είναι και οι δύο χωρητικότητες που περιγράψαμε, συνδεδεμένες εν σειρά. Αυτό φαίνεται και στο σχήμα 1.5 που αναπαριστά την ιδανική περίπτωση όπου όλα τα ιόντα έχουν προσκολληθεί στους αντίστοιχους οπλισμούς.



Σχήμα 1.5

Στην πραγματικότητα, λόγω διάχυσης, τα ιόντα βρίσκονται σε διάφορες, τυχαίες αποστάσεις κοντά στους οπλισμούς. Επίσης, όπως είναι λογικό κάθε αύξηση της εφαρμοζόμενης διαφοράς δυναμικού αυξάνει την συγκέντρωση των ιόντων στους οπλισμούς και άρα την συνολικά εμφανιζόμενη χωρητικότητα.

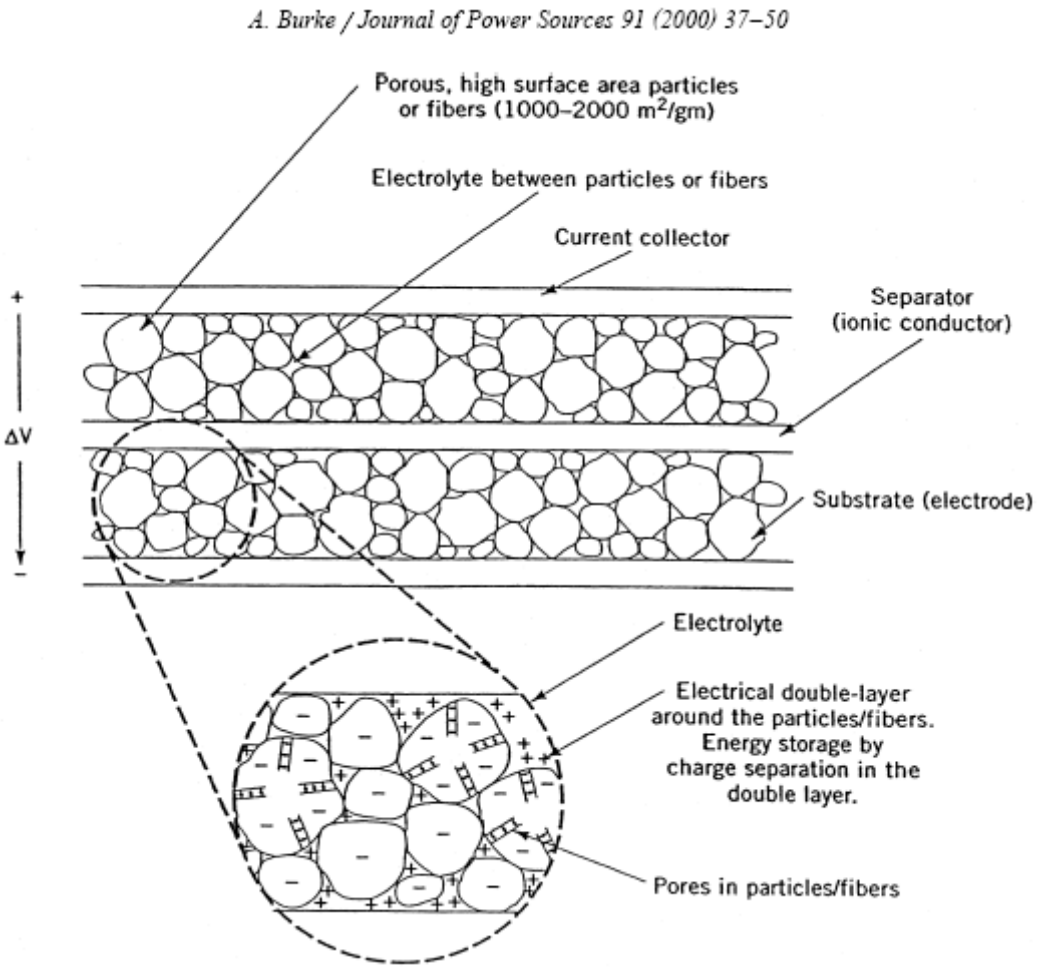
Οι επιφάνειες των οπλισμών δεν είναι λείες αλλά πορώδεις και συνήθως είναι από άνθρακα. Τα μόρια του ηλεκτρολύτη (μη αγώγιμο υλικό) είναι αυτά που δημιουργούν το πρώτο από τα δύο στρώματα πάνω στο υπόστρωμα από άνθρακα. Το δεύτερο στρώμα αποτελείται από ιόντα που περικυκλωμένα από μόρια ηλεκτρολύτη έλκονται προς τον οπλισμό όπως περιγράψαμε πιο πάνω. Η απόσταση μεταξύ των ιόντων και της επιφάνειας από άνθρακα είναι της τάξης της απόστασης των οπλισμών ενός συμβατικού πυκνωτή. Στο σχήμα 1.6 αναπαρίσταται το φαινόμενο αυτό σε μεγέθυνση πολύ κοντά στον έναν οπλισμό (στην κάθοδο). Στην άνοδο συμβαίνει το αντίστοιχο φαινόμενο με αρνητικά ιόντα.



Σχήμα 1.6

Η τεράστια (σε σχέση με συμβατικούς πυκνωτές) χωρητικότητα των υπερπυκνωτών, της τάξης των μερικών εκατοντάδων έως και χιλιάδων, σήμερα, Farads μπορεί τώρα να εξηγηθεί με βάση τα όσα είπαμε παραπάνω [2]. Εκμεταλλευόμενοι το φαινόμενο του διπλού αυτού στρώματος με τις πολύ μικρές, μοριακής τάξης μεγέθους, αποστάσεις καθώς και την τεράστια επιφάνεια που προκύπτει λόγω της πορώδους δομής των οπλισμών, είναι δυνατή η κατασκευή πυκνωτών μέχρι 5000 Farad.[4]

Ένα σχηματικό του υπερπυκνωτή φαίνεται στο σχήμα 1.7



Σχήμα 1.7 – Σχηματικό υπερπυκνωτή διπλού στρώματος

Τα εκτοπιζόμενα ιόντα, όπου σχηματίζουν τα δύο στρώματα μέσα στους πόρους, μεταφέρονται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια με διάχυση δια μέσου του ηλεκτρολύτη. Η ενέργεια και το φορτίο όπου αποθηκεύονται σε έναν ηλεκτροχημικό πυκνωτή είναι $1/2\ CV^2$ και CV, αντίστοιχα. Η χωρητικότητα εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υλικού του ηλεκτροδίου (εμβαδό επιφάνειας και κατανομή μεγέθους των πόρων). Η ειδική χωρητικότητα ενός υλικού του ηλεκτροδίου μπορεί να περιγραφεί από την σχέση $C/g = \left(F/cm^2\right)_{act} \cdot \left(cm^2/g\right)_{act}$, όπου εμβαδό επιφάνειας αναφερόμαστε στο ενεργό εμβαδό μέσα στους πόρους όπου σχηματίζονται τα δύο στρώματα. Με απλά λόγια, η χωρητικότητα ανά μονάδα ενεργού εμβαδού δίνεται από την σχέση $\left(F/cm^2\right)_{act} = \left(K/\text{πάχος των 2 στρωμάτων}\right)_{eff}$.

Ο υπολογισμός της ειδικής διηλεκτρικής σταθεράς K_{eff} του ηλεκτρολύτη και του πάχους των δύο στρωμάτων είναι πολύπλοκος και όχι πολύ κατανοητός. Το πάχος του διπλού στρώματος είναι πολύ μικρό (ένα κλάσμα του nm στον υγρό ηλεκτρολύτη) , κάτι το οποίο οδηγεί σε μία πολύ μεγάλη τιμή ειδικής χωρητικότητας της τάξης των 15-30 μF/cm^2. Για ένα εμβαδό επιφάνειας 1000m^2/g, έχουμε πιθανή χωρητικότητα 150-300 F ανά γραμμάριο υλικού του ηλεκτροδίου. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 1, οι μετρηθείσες ειδικές χωρητικότητες υλικών από άνθρακα που χρησιμοποιούνται στους υπερπυκνωτές, είναι στις περισσότερες περιπτώσεις μικρότερες από αυτές τις υψηλές τιμές. Κυμαίνονται σε ένα εύρος των 75-175F ανά γραμμάριο για υδατικούς ηλεκτρολύτες και 40-100 F ανά γραμμάριο για οργανικούς ηλεκτρολύτες. Αυτό συμβαίνει διότι στα περισσότερα υλικά από άνθρακα, ένα σχετικά μεγάλο μέρος του εμβαδού της επιφάνειας βρίσκεται στους πόρους όπου δεν μπορεί να υπάρξει πρόσβαση για τα ιόντα του ηλεκτρολύτη. Και είναι ακόμη πιο φανερό το πρόβλημα στους οργανικούς ηλεκτρολύτες επειδή το μέγεθος των ιόντων είναι μεγαλύτερο από ότι στους υδατικούς. Ο πορώδης άνθρακας για να χρησιμοποιηθεί στους υπερπυκνωτές, πρέπει να έχει μεγάλο μέρος του όγκου του σε πόρους, με διάμετρο 1-5nm. Υλικά με μικρούς πόρους (<1nm) εμφανίζουν μία μεγάλη πτώση σε χωρητικότητα για ρεύματα εκφόρτισης μεγαλύτερα από 100mA/cm^2 ειδικά όταν χρησιμοποιούνται οργανικοί ηλεκτρολύτες. Υλικά με μεγάλη διάμετρο πόρων, μπορούν να εκφορτιστούν με πυκνότητες ρευμάτων μεγαλύτερες από 500 mA/cm^2 με μικρή μείωση στην χωρητικότητα. [5]

Η τάση κάθε στοιχείου του υπερπυκνωτή εξαρτάται από τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Για υδατικούς ηλεκτρολύτες, η τάση του στοιχείου είναι περίπου 1 Volt και για οργανικούς ηλεκτρολύτες περίπου 3-3.5 Volt.

Material	Density (g/cm^3)	Electrolyte	F/g	F/cm^3
Carbon cloth	0.35	KOH	200	70
		organic	100	35
Carbon black	1.0	KOH	95	95
Aerogel carbon	0.6	KOH	140	84
Particulate from SiC	0.7	KOH	175	126
		organic	100	72
Particulate from TiC	0.5	KOH	220	110
		organic	120	60
Anhydrous RuO_2	2.7	H_2SO_4	150	405
Hydrous RuO_2	2.0	H_2SO_4	650	1300
Doped conducting polymers	0.7	organic	450	315

Πίνακας 1 – Ειδική χωρητικότητα διαφόρων υλικών ηλεκτροδίων

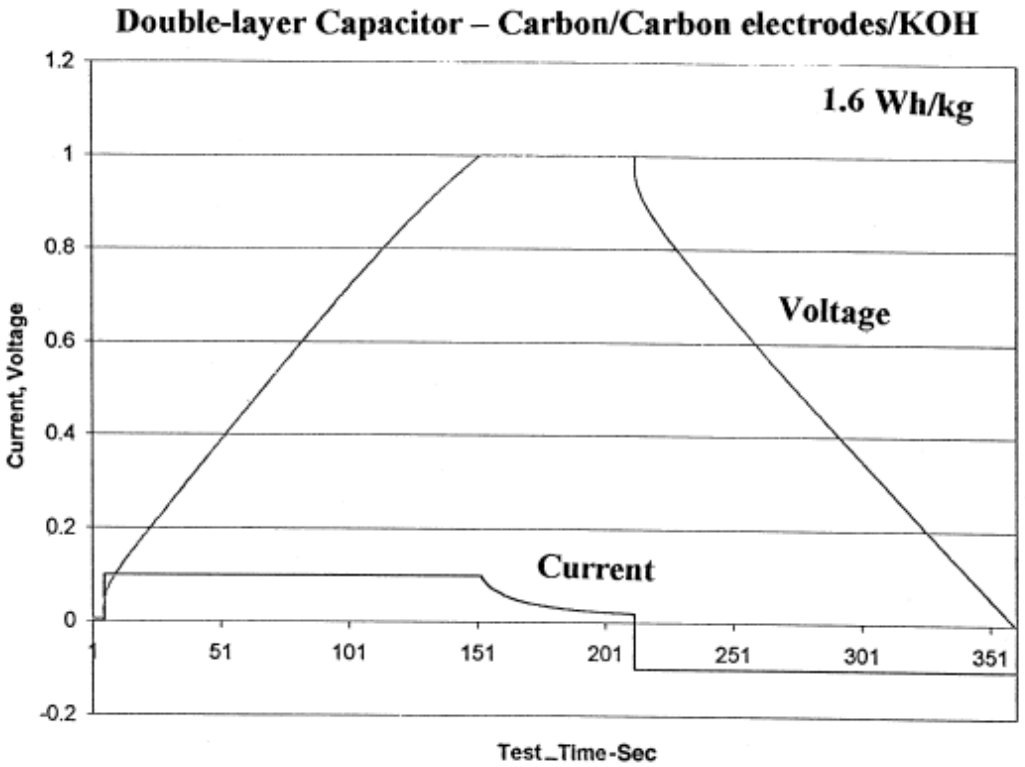
1.2.2 Ψευδοπυκνωτές (Pseudocapacitors)

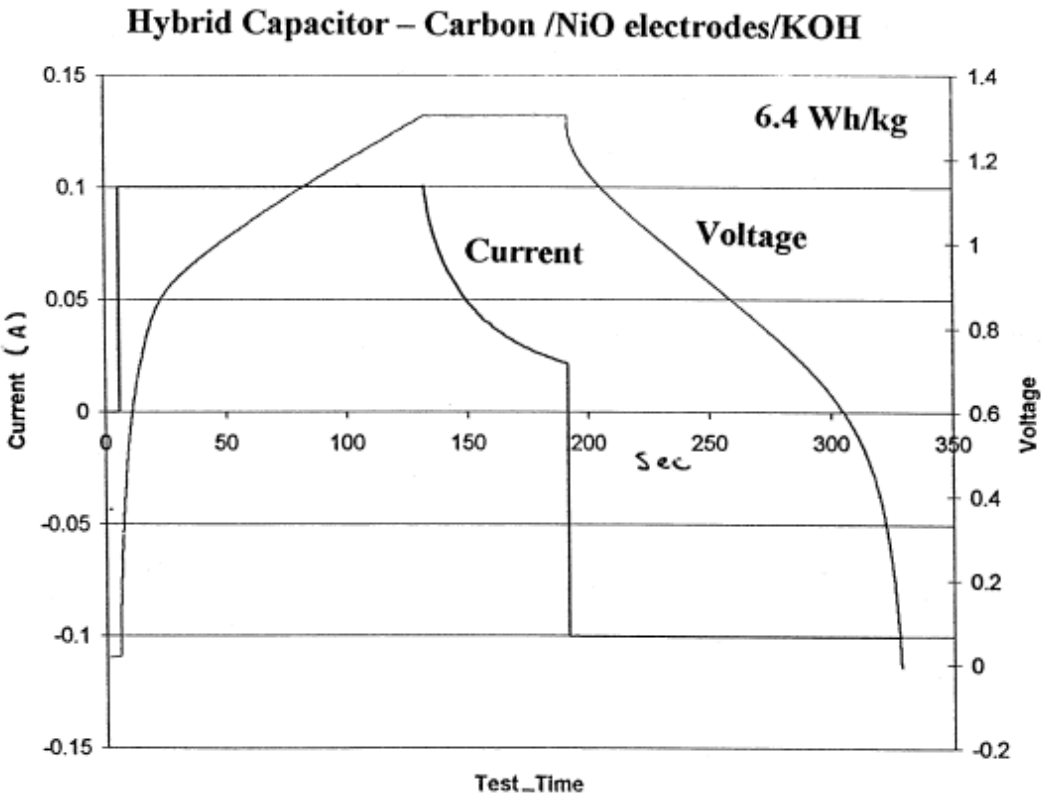
Για έναν ιδανικό πυκνωτή διπλού στρώματος, το φορτίο μεταφέρεται μέσα στο διπλό στρώμα και δεν υπάρχουν καθόλου φαρανταικές αντιδράσεις (αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου που συμβαίνουν στην επιφάνεια οπλισμών πυκνωτή) μεταξύ του στερεού υλικού και του ηλεκτρολύτη. Σε αυτήν την περίπτωση, η χωρητικότητα (dQ/dV) είναι μία σταθερά και ανεξάρτητη από την τάση. Για συσκευές όπου χρησιμοποιούν ψευδοχωρητικότητα , το περισσότερο φορτίο μεταφέρεται στην επιφάνεια ή στην περιοχή κοντά στην επιφάνεια του υλικού του στερεού ηλεκτροδίου. Άρα, σε αυτή την περίπτωση, η αλληλεπίδραση του στερεού υλικού και του ηλεκτρολύτη περιλαμβάνει φαρανταικές αντιδράσεις, οι οποίες πολλές φορές μπορούν να περιγραφούν σαν αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου. Το φορτίο που μεταφέρεται σε αυτές τις αντιδράσεις εξαρτάται από την τάση, πράγμα που σημαίνει ότι και η ψευδοχωρητικότητα (dQ/dV) εξαρτάται από την τάση. Τριών ειδών ηλεκτροχημικές διαδικασίες έχουν χρησιμοποιηθεί στην εξέλιξη των υπερπυκνωτών χρησιμοποιώντας την ψευδοχωρητικότητα. Αυτές είναι η επιφανειακή προσρόφηση ιόντων από τον ηλεκτρολύτη, οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις που περιλαμβάνουν ιόντα από τον ηλεκτρολύτη και η νόθευση ενεργών αγώγιμων πολυμερών υλικών στα ηλεκτρόδια. Οι πρώτες δύο διαδικασίες είναι κυρίως επιφανειακοί μηχανισμοί και άρα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το εμβαδό της επιφάνειας του υλικού του ηλεκτροδίου. Η τρίτη διαδικασία περιλαμβάνει το αγώγιμο πολυμερές υλικό και άρα γίνεται κυρίως στον όγκο του υλικού. Συνεπώς η ειδική χωρητικότητα εξαρτάται λιγότερο από το εμβαδό επιφάνειας, αν και γνωρίζουμε ότι σχετικά μεγάλο εμβαδό υλικού με μικροπόρους, απαιτείται για να κατανέμονται τα ιόντα από και προς τα ηλεκτρόδια σε ένα στοιχείο. Σε όλες τις περιπτώσεις, τα ηλεκτρόδια πρέπει να έχουν μεγάλη ηλεκτρική αγωγιμότητα για να κατανέμουν και να συλλέγουν το ηλεκτρικό ρεύμα. Η κατανόηση του μηχανισμού μεταφοράς φορτίου μπορεί να γίνει από την καμπύλη C(V) που συνήθως προσδιορίζεται χρησιμοποιώντας κυκλική βολταμετρία (cyclic voltametry).

Για την εκτίμηση των χαρακτηριστικών των συσκευών, είναι σκόπιμο να χρησιμοποιούμε την μέση χωρητικότητα (C_{av}) όπου υπολογίζεται $C_{av} = Q_{tot}/V_{tot}$, όπου Q_{tot} και V_{tot} είναι το ολικό φορτίο και η μεταβολή τάσης για την φόρτιση ή αποφόρτιση ενός ηλεκτροδίου αντίστοιχα. Αυτό επιτρέπει τον καθορισμό της ειδικής χωρητικότητας (C_{av}/g) του υλικού του ηλεκτρολύτη. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα 1, η ειδική χωρητικότητα των ψευδοχωρητικών υλικών είναι πολύ υψηλότερη από τα υλικά με άνθρακα. Όπως είναι αναμενόμενο, η ενεργειακή πυκνότητα των συσκευών που χρησιμοποιούν ψευδοχωρητικά υλικά, θα είναι μεγαλύτερη.

1.2.3 Υβριδικοί πυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές μπορούν να κατασκευαστούν με ένα ηλεκτρόδιο φτιαγμένο από double-layer (άνθρακα) υλικό και το άλλο ηλεκτρόδιο από ψευδοχωρητικό υλικό. Τέτοιες συσκευές λέγονται υβριδικοί πυκνωτές. Οι περισσότεροι υβριδικοί που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα, χρησιμοποιούν οξείδιο του νικελίου για ψευδοχωρητικό υλικό στο θετικό ηλεκτρόδιο. Η ενεργειακή πυκνότητα αυτών των συσκευών είναι κατά πολύ μεγαλύτερη από των double-layer πυκνωτών, αλλά όπως φαίνεται στο σχήμα 1.8, τα χαρακτηριστικά φόρτισης και αποφόρτισης τους απέχουν πολύ από τα ιδανικά (μη-γραμμικά). Οι υβριδικοί μπορούν επίσης να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας δύο ανόμοια αναμιγμένα μεταλλικά οξείδια ή νοθευμένα αγώγιμα πολυμερή υλικά.





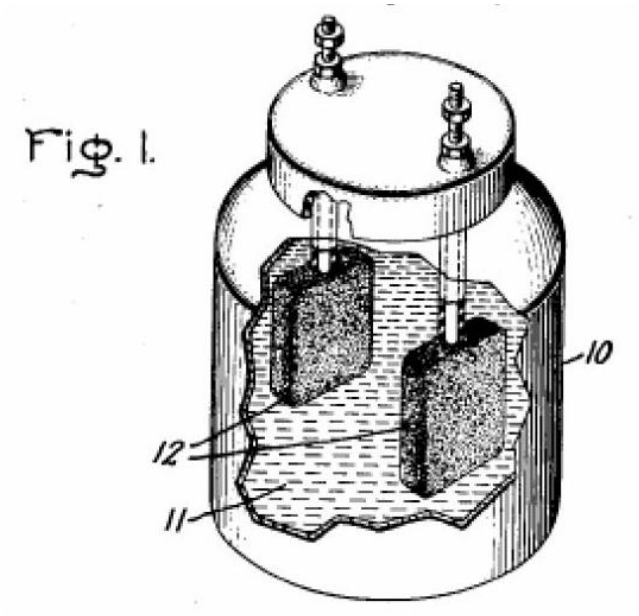
Σχήμα 1.8 – Χαρακτηριστικές φόρτισης αποφόρτισης EDLC και υβριδικών υπερπυκνωτών

1.3 Ιστορική αναδρομή

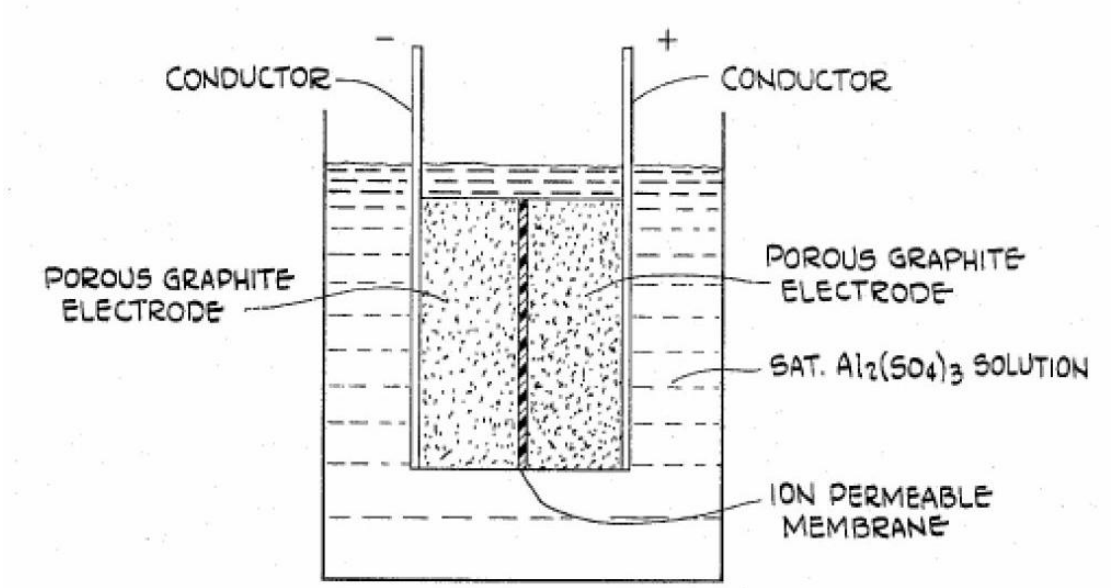
1.3.1 Παρελθόν

Η αποθήκευση ηλεκτρικού φορτίου μεταξύ μετάλλου και ηλεκτρολυτικού διαλύματος είχε μελετηθεί από χημικούς, ήδη από τον 19^{ο} αιώνα, αλλά η πρακτική χρήση των πυκνωτών διπλού στρώματος ξεκίνησε μόλις το 1957, όταν η General Electric κατοχύρωσε μία πατέντα για έναν ηλεκτρολυτικό πυκνωτή που χρησιμοποιούσε πορώδη ηλεκτρόδια από άνθρακα. (σχήμα 1.9)[6]. Αν και στο δίπλωμα ευρεσιτεχνίας αναφέρεται ότι "δεν είναι γνωστό τι ακριβώς γίνεται όταν οι συσκευές [...] χρησιμοποιούνται ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας", υπήρχε η πεποίθηση ότι η ενέργεια αυτή είναι αποθηκευμένη στους πόρους του άνθρακα, και ανέφερε ότι ο πυκνωτής παρουσίαζε «εξαιρετικά υψηλή χωρητικότητα". Αργότερα, το 1966, η Standard Oil Company, Κλίβελαντ, Οχάιο (SOHIO) πήρε δίπλωμα ευρεσιτεχνίας για μία συσκευή η οποία αποθήκευε ενέργεια στην διεπαφή διπλού στρώματος (Σχήμα 1.10) [7]. Η SOHIO αναγνώρισε ότι "η 'διπλού στρώματος' διεπαφή συμπεριφέρεται σαν πυκνωτής με σχετικά υψηλή ειδική χωρητικότητα". Η ίδια εταιρία συνέχισε πατεντάροντας έναν πυκνωτή σε σχήμα δίσκου το 1970 χρησιμοποιώντας μια πάστα άνθρακα εμποτισμένη σε ηλεκτρολύτη (Εικ. 1.11) [8]. Ωστόσο από το 1971, η έλλειψη πωλήσεων οδήγησε την SOHIO στο να εγκαταλείψει την περαιτέρω ανάπτυξη και έδωσε την άδεια για αυτήν την τεχνολογία στην NEC [9]. Η NEC παρήγαγε τον πρώτο εμπορικά επιτυχημένο πυκνωτή διπλού στρώματος με το όνομα "υπερπυκνωτής". Αυτές οι συσκευές χαμηλής τάσης είχαν υψηλή εσωτερική αντίσταση και, ως εκ τούτου σχεδιάστηκαν αρχικά για εφαρμογές backup μνήμης, και σταδιακά βρήκαν εφαρμογή σε ευρείας χρήσης καταναλωτικά προϊόντα [10].

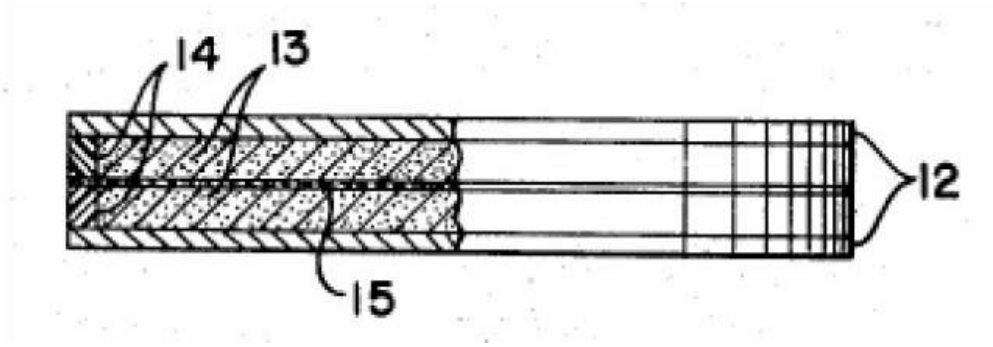
Από την δεκαετία του 1980 ένας μεγάλος αριθμός εταιριών παράγει ηλεκτροχημικούς πυκνωτές. Η Matsushita Electric Industrial Co., (γνωστή και ως Panasonic στον δυτικό κόσμο) είχε αναπτύξει τον "Χρυσό πυκνωτή" από το 1978. Οι συσκευές αυτές, όπως και οι αντίστοιχες της NEC, προορίζονταν για χρήση σε εφαρμογές backup μνήμης [11]. Από το 1987 η ELNA άρχισε την παραγωγή του δικού τους πυκνωτή διπλής στρώματος με την ονομασία "Dynacap" [12]. Ο πρώτος υψηλής ισχύος πυκνωτής διπλής στρώματος αναπτύχθηκε από την PRI. Η "PRI Ultracapacitor", που ιδρύθηκε το1982, ενσωμάτωσε ηλεκτρόδια από οξείδια μετάλλων τα οποία σχεδιάστηκαν για στρατιωτικές εφαρμογές, όπως όπλα λέιζερ και συστήματα καθοδήγησης πυραύλων [13]. Μια μελέτη από το αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας (DoE) στο πλαίσιο της έρευνας για τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, οδήγησε στην κατασκευή πολλών νέων τέτοιων συσκευών, και μέχρι το 1992 το Αναπτυξιακό Πρόγραμμα Υπερπυκνωτών του DoE ήταν σε εξέλιξη στα εργαστήρια της Maxwell [14].



Σχήμα 1.9 – Ο πυκνωτής που πατένταρε η General Electric



Σχήμα 1.10 – Ηλεκτρολυτική συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που πατένταρε η SOHIO



Σχήμα 1.11 – Πυκνωτής που πατένταρε η SOHIO

1.3.2 Τρέχουσα εμπορική δραστηριότητα

Μια σειρά από επιχειρήσεις σε όλο τον κόσμο κατασκευάζουν επί του παρόντος EDLCs (Electric Double Layer Capacitors) σε εμπορική κλίμακα. Η NEC και η Panasonic στην Ιαπωνία παράγουν EDLCs από το 1980. Στις Η.Π.Α., οι Epcos, ELNA, AVX, και Cooper παράγουν δομικά στοιχεία, ενώ οι Evans και Maxwell παράγουν ολοκληρωμένες μονάδες που περιλαμβάνουν κύκλωμα εξισορρόπησης τάσης. Η Kold Ban International διαθέτει στην αγορά μονάδες υπερπυκνωτών που έχουν σχεδιαστεί ειδικά για την εκκίνηση κινητήρων εσωτερικής καύσης σε συνθήκες χαμηλής θερμοκρασίας. Η Cap-XX στην Αυστραλία προσφέρει μια σειρά από δομικά στοιχεία υπερπυκνωτών , όπως κάνει και η Ness Capacitor Co στην Κορέα. Στον Καναδά, η Tavrima κατασκευάζει μια σειρά από μονάδες υπερπυκνωτών. Η Esma στη Ρωσία διαθέτει ένα ευρύ φάσμα EDLC's για εφαρμογές ως προς την ποιότητα ισχύος, τα ηλεκτρικά οχήματα, καθώς και για την έναρξη κινητήρων εσωτερικής καύσης.

Σχήμα 1.12 – Διάφοροι EDLC's που διατίθενται από την Ness Capacitor Co. στην Κορέα

Τα προϊόντα που είναι διαθέσιμα επί του παρόντος από τους κατασκευαστές, περιγράφονται στις ιστοσελίδες τους φαίνονται στον πίνακα 2.

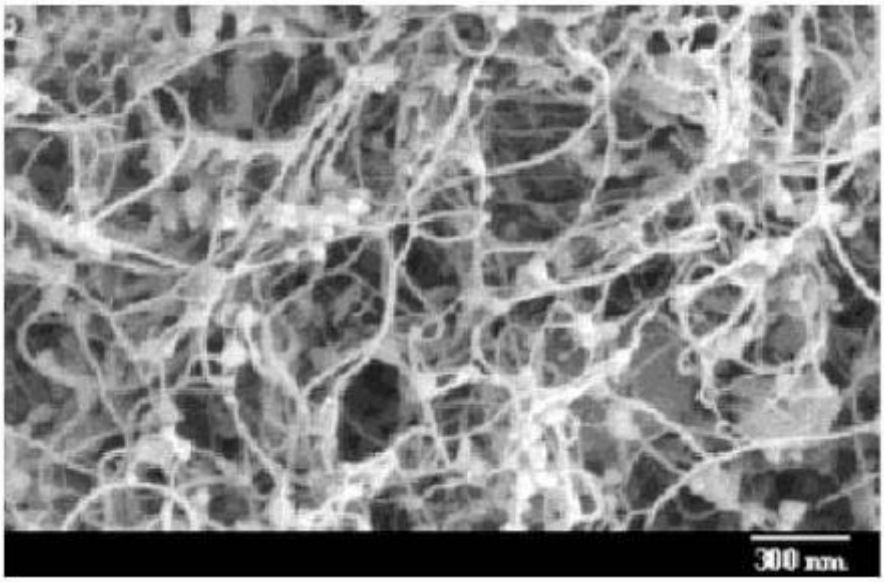
Company name	Country	Device name	Capacitance range (F)	Voltage range (V)	Web address
AVX	USA	Bestcap	0.022 - 0.56	3.5 - 12	http://www.avxcorp.com
Cap-XX	Australia	Supercapacitor	0.09 - 2.8	2.25 - 4.5	http://www.cap-xx.com
Cooper	USA	PowerStor	0.47 - 50	2.3 - 5	http://www.powerstor.com
ELNA	USA	Dynacap	0.033 - 100	2.5 - 6.3	http://www.elna-america.com/index.htm
ESMA	Russia	Capacitor modules	100 - 8000	12 - 52	http://www.esma-cap.com/?lang=English
Epcos	USA	Ultracapacitor	5 - 5000	2.3, 2.5	http://www.epcos.com
Evans	USA	Capattery	0.01 - 1.5	5.5, 11	http://www.evanscap.com
Kold Ban	USA	KAPower	1000	12	http://www.koldban.com
Maxwell	USA	Boostcap	1.8 - 2600	2.5	http://www.maxwell.com
NEC	Japan	Supercapacitor	0.01 - 6.5	3.5 - 12	http://www.nec-tokin.net
Ness	Korea	EDLC	10 - 3500	3	http://www.nesscap.com
Panasonic	Japan	Gold capacitor	0.1 - 2000	2.3 - 5.5	http://www.maco.panasonic.co.jp
Tavrima	Canada	Supercapacitor	0.13 - 160	14 - 300	http://www.tavrima.com

Πίνακας 2 – Κατασκευαστές EDLC's

1.3.3 Έρευνα

Πολλά ιδρύματα και πανεπιστήμια διεξάγουν έρευνα για να βελτιώσουν την πυκνότητα ενέργειας και ισχύος της τεχνολογίας των EDLC. Ο ενεργός άνθρακας είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο υλικό για την κατασκευή των ηλεκτροδίων των υπερπυκνωτών που κυκλοφορούν στην αγορά, και αποτελεί αντικείμενο έρευνας για τον προσδιορισμό των παραγόντων που συμβάλλουν στη ειδική χωρητικότητα και αντίσταση σειράς σε αυτά τα υλικά. Το πανεπιστήμιο Henri Poincaré-Nancy στη Γαλλία έχει πραγματοποιήσει έρευνα για τη σχέση μεταξύ της πορώδους δομής του ηλεκτροδίου και της αντίστασης σειράς [13]. Άλλες εργασίες που πραγματοποιούνται από το γαλλικό εργαστήριο του Conservatoire National de Arts et Métiers επιβεβαιώνουν το ρόλο που παίζει το μέγεθος των πόρων στην ειδική χωρητικότητα του υλικού [14].

Πρόσφατα άρχισε να ερευνάται η χρήση νανοσωλήνων άνθρακα, και διάφορα πανεπιστημιακά ιδρύματα όπως το Poznan University of Technology, στην Πολωνία και το Sungkyunkwan University της Κορέας κατάφεραν να κατασκευάσουν ηλεκτρόδια που επιτυγχάνουν μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα απ' ότι αυτά από ενεργό άνθρακα [15,16]. Μελέτες που έχουν γίνει από την Chinese Academy of Science έδειξαν ότι νανοσωλήνες από ενεργό άνθρακα επιδεικνύουν ακόμα μεγαλύτερη ειδική χωρητικότητα από τους νανοσωλήνες κανονικού άνθρακα [17]. Σημαντικό ενδιαφέρον έχει επιδειχθεί και στα αγώγιμα πολυμερή υλικά, όπου έρευνες δείχνουν ότι είναι δυνατόν να φτάσουν σε πολύ υψηλές τιμές ειδικής χωρητικότητας [18].



Σχήμα 1.13 – FE-SEM εικόνα από νανοσωλήνες άνθρακα

Τα οξείδια των μετάλλων ήταν πάντα ένα ελκυστικό υλικό για την κατασκευή ηλεκτροδίων λόγω της χαμηλής τους αντίστασης και της υψηλής ειδικής χωρητικότητας, αλλά το υπερβολικό κόστος τους τα καθιστά μία εμπορικά μη βιώσιμη εναλλακτική λύση. Παραδοσιακά για ηλεκτρόδια από οξείδια μετάλλων, χρησιμοποιούμε ως ηλεκτρολύτη ισχυρό θειικό οξύ, προκειμένου να αυξηθεί η κινητικότητα των ιόντων, και συνεπώς ο ρυθμός της φόρτισης και αποφόρτισης. Αυτό ωστόσο περιορίζει την επιλογή των υλικών ηλεκτροδίων, διότι τα περισσότερα γίνονται ασταθή και διαβρώνονται λόγω του έντονα όξινου ηλεκτρολύτη. Έρευνα που έγινε στο Πανεπιστήμιο του Τέξας, στις ΗΠΑ, επικεντρώθηκε στη δυνατότητα χρησιμοποίησης ενός ηπιότερου υδατικού ηλεκτρολύτη με χλωριούχο κάλιο (KCl) για χρήση με οξείδια μετάλλων. Το αποτέλεσμα της έρευνας έδειξε ότι η

αντικατάσταση είναι πράγματι δυνατή, και έτσι μπορεί να διευρυνθεί η διαθεσιμότητα των πιθανών υλικών ηλεκτροδίων. Το Imperial College του Λονδίνο, σε έρευνά του, επιβεβαίωσε ότι το οξείδιο του μαγνησίου είναι ένα πολύ καλό υλικό για ηλεκτρόδιο και μπορεί να αντικαταστήσει το πολύ ακριβότερο οξείδιο του ρουθηνίου [19].

Τα πιο ελπιδοφόρα αποτελέσματα προέρχονται από την χρήση υβριδικών συνθέσεων, τα οποία αποτελούνται από ενεργό άνθρακα και αγώγιμα πολυμερή ή μεταλλικά οξείδια. Μελέτες στο Πανεπιστήμιο της Μπολόνια, στην Ιταλία οδήγησαν σε κατασκευή υπερπυκνωτών με θετικό ηλεκτρόδιο από ενεργό άνθρακα και ένα αρνητικό πολυμερές ηλεκτρόδιο που πλεονεκτεί σε σχέση με συνθέσεις αποκλειστικά και μόνο από ενεργό άνθρακα [20]. Εργασίες στο National Cheng Kung University στην Ταϊβάν, έδειξαν ότι υψηλή ειδική χωρητικότητα μπορεί να επιτευχθεί με την εναπόθεση αγώγιμων πολυμερών επάνω σε ενεργό άνθρακα [21]. Οι Frackowiak et al. στο Poznan University of Technology συμπέραναν αύξηση της ειδικής χωρητικότητας των νανοσωλήνων άνθρακα όταν επικαλύπτονται από πολυμερές [22].

Υπάρχουν βέβαια κάποια μειονεκτήματα στη χρήση ενεργού άνθρακα για τέτοιες εφαρμογές. Πρώτον, η πορώδης δομή του περιορίζει την ικανότητά του για αγωγή μεγάλων ρευμάτων, και δεύτερον η διαδικασία παραγωγής του επιβάλει τη χρήση κάποιου συνδετικού υλικού ανάμεσα στον άνθρακα και το υπόστρωμα του ηλεκτροδίου από αλουμίνιο, πράγμα που οδηγεί σε αύξηση της αντίστασης σειράς. Μία ομάδα ερευνητών από το MIT των ΗΠΑ, ανέπτυξαν μία εργαστηριακή μέθοδο κατασκευής νανοσωλήνων άνθρακα πάνω σε αγώγιμο υλικό. Με τη χρήση νανοσωλήνων υπολογίζεται αύξηση της ενέργειας που μπορεί να αποθηκευτεί σε έναν υπερπυκνωτή μέχρι και 50% χωρίς παραχωρήσεις στην ισχύ αφού ορισμένα είδη νανοσωλήνων είναι άριστοι αγωγοί. Επίσης, η δομή τους, τους κάνει χημικά σταθερότερους σε σχέση με τον ενεργό άνθρακα, και άρα αντέχουν μεγαλύτερες τάσεις. Έχει ήδη κατασκευαστεί σε εργαστήριο, αντιδραστήρας χημικής εναπόθεσης ατμών υδρογονανθράκων σε αγώγιμες επιφάνειες, και τα πρώτα αποτελέσματα από τους υπερπυκνωτές που κατασκευάζονται, είναι ενθαρρυντικά. [24].

Επίσης, ενδιαφέρον παρουσιάζει η μελέτη των υπερπυκνωτών στερεάς κατάστασης που διεξάγεται στο Πανεπιστήμιο του Twente στην Ολλανδία, στην οποία αντί για υγρός ηλεκτρολύτης χρησιμοποιείται οξείδιο του ζιρκονίου (ZrO_2) που σταθεροποιείται στη χαρακτηριστική του δομή σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με πρόσθεση οξειδίου του υττρίου (Y_2O_3) [23].

Έρευνα που έγινε στο πανεπιστήμιο του Wisconsin κατέληξε στην δημιουργία ενός πρωτότυπου ηλεκτρολύτη. Πρόκειται για άλατα τεταρτοταγούς αμμωνίου που περιέχουν οργανοπυριτικές ομάδες. Σε αντίθεση με τους ηλεκτρολύτες που χρησιμοποιούνται σήμερα, αυτοί είναι σταθεροί σε υψηλές τάσεις και όχι ιδιαίτερα εύφλεκτοι ή τοξικοί. Μπορούν να αντικαταστήσουν γνωστούς υγρούς ηλεκτρολύτες σε συμβατικούς υπερπυκνωτές, και είναι κατάλληλοι για χρήση σε ηλεκτρικά και υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα.[42]

Μία ομάδα ερευνητών από τις ΗΠΑ και την Γαλλία σε συνεργασία με το πανεπιστήμιο του Drexel κατασκεύασε, βασιζόμενη στην τεχνολογία των υπερπυκνωτών, ένα νέο είδος πυκνωτών, τους οποίους ονόμασε μικρο-υπερπυκνωτές. Η ισχύς τους είναι συγκρίσιμη με των ηλεκτρολυτικών, η χωρητικότητα τους 4 ταξεις μεγαλύτερη και η ενέργεια τους έως και μία τάξη μεγαλύτερη. Επίσης η απόκρισή τους είναι τρεις τάξεις γρηγορότερη από ότι οι συμβατικοί υπερπυκνωτές. Οι νέες αυτές συσκευές ονομάστηκαν μικρο-υπερπυκνωτές διότι έχουν πάχος μερικά μικρόμετρα . Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να τροφοδοτήσουν ασύρματα δίκτυα αισθητήρων, βιοιατρικά εμφυτεύματα, ετικέτες ραδιοσυχνοτικής αναγνώρισης, ενσωματομένους μικροαισθητήρες και άλλες τέτοιες συσκευές.[43]

Μία ακόμη, πολλά υποσχόμενη νέα τεχνολογία είναι οι τυπωμένοι υπερπυκνωτές σε λεπτό φίλμ. Αυτοί, φτιάχνονται από δίκτυα νανοσωλήνων άνθρακα μονού τοιχώματος (Single-walled carbon nanotubes), που “ψεκάζονται” πάνω σε πλαστικό φιλμ. Χρησιμοποιείται υδατικός ηλεκτρολύτης σε

μορφή gel ή υγρός οργανικός ηλεκτρολύτης. Οι πυκνότητες ενέργειας και ισχύος που επιτυγχάνονται είναι αρκετά υψηλές, της τάξης των 6 Wh/kg και 23-70 kW/kg αντίστοιχα. [25]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ

Ένα πλεονέκτημα της χρήσης των υπερπυκνωτών είναι η μεγάλη διάρκεια ζωής τους (περίπου 1000000 κύκλοι φόρτισης) σε αντίθεση με τις μπαταρίες που μπορούν να κρατήσουν (ορισμένοι τύποι) έως περίπου 1000 κύκλους, αριθμός που ισχύει για μεταβολές του βαθμού φόρτισης (State of Charge) της τάξης του 80%. Για μεγαλύτερες μεταβολές η διάρκεια ζωής τους μειώνεται ακόμα περισσότερο. Η διάρκεια ζωής των υπερπυκνωτών, αντίθετα, δε φαίνεται να επηρεάζεται πολύ από το τις μεταβολές του βαθμού φόρτισης.

Στην πράξη οι διαφορές στην πυκνότητα ενέργειας και ισχύος ανάμεσα σε πυκνωτές και μπαταρίες μπορούν να γίνουν πλεονέκτημα με τον κατάλληλο συνδυασμό των δύο μεθόδων αποθήκευσης ώστε να λειτουργούν συμπληρωματικά. Ας πάρουμε για παράδειγμα τα ηλεκτρικά/υβριδικά αυτοκίνητα, όπου η αναγεννητική πέδηση δημιουργεί αρκετά μεγάλα ρεύματα για μικρά χρονικά διαστήματα. Οι απλές μπαταρίες δεν μπορούν να διαχειριστούν τέτοια ισχύ με τρόπο μη επιβαρυντικό για τη διάρκεια ζωής τους, ενώ οι υπερπυκνωτές δεν παρουσιάζουν τέτοιο πρόβλημα. Άλλο πεδίο χρήσης των υπερπυκνωτών είναι στην εκκίνηση ηλεκτρικών κινητήρων ή ακόμα και για χρήση σε παλμικά lasers. Μελετάται επίσης η χρήση τους σε συστήματα αδιάλειπτης παροχής ισχύος (UPS) για μικρά χρονικά διαστήματα.

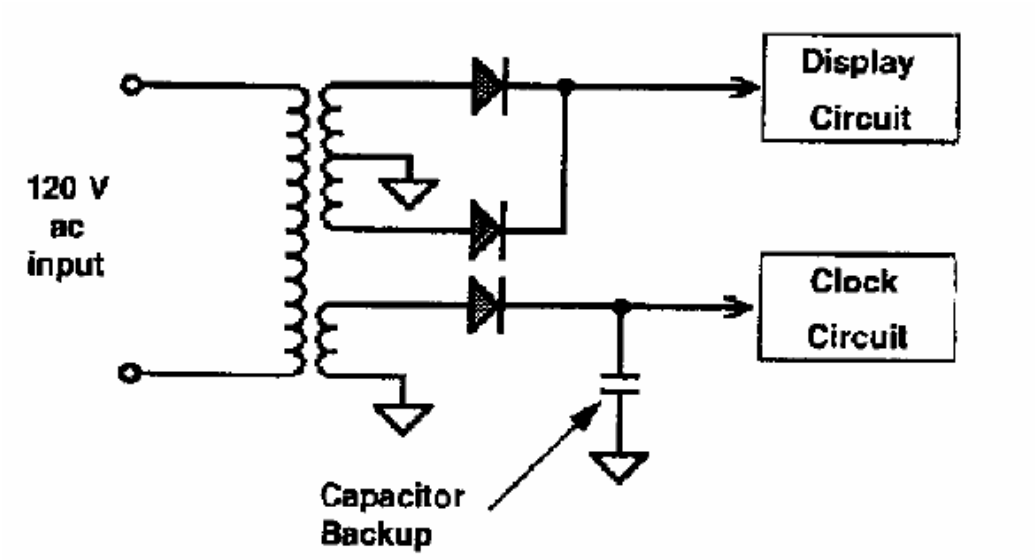
Το κύριο μειονέκτημα της τεχνολογίας των υπερπυκνωτών σήμερα είναι το κόστος τους ανά μονάδα ενέργειας καθώς είναι νέα, τεχνικά και εμπορικά, τεχνολογία και υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Για παράδειγμα, σύγχρονες επιστημονικές ανακαλύψεις θα οδηγήσουν σε υπερπυκνωτές με οπλισμούς από νανοσωλήνες άνθρακα [24] που σήμερα είναι ακόμα σε πειραματικό στάδιο. Σήμερα η πορώδης δομή των οπλισμών είναι τυχαία και έτσι η ενεργός περιοχή είναι σχετικά περιορισμένη. Με τους νανοσωλήνες που διατάσσονται σε ακριβείς, συμμετρικές δομές θα έχουμε σημαντική αύξηση της επιφάνειας επαφής διηλεκτρικού – ιόντων. Με αυτόν τον τρόπο θα έχουμε αύξηση της πυκνότητας ενέργειας που μπορεί να αποθηκευθεί σε έναν υπερπυκνωτή (αισιόδοξες εκτιμήσεις αναφέρουν ότι μπορεί να γίνει συγκρίσιμη με των μπαταριών).

Οι υπερπυκνωτές είναι σχετικά καινούριες συσκευές και δεν έχουν γνωρίσει ακόμη ευρεία χρήση. Αυτό συμβαίνει κυρίως λόγω των περιορισμένων δυνατοτήτων ενέργειας και ισχύος. Συχνά συναντώνται σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος και ενέργειας όπως για back-up μνήμη. Παράλληλα οι σημαντικές βελτιώσεις που γίνονται στην πυκνότητα ενέργειας και ισχύος τους , ανοίγουν τον δρόμο για νέες εφαρμογές. Στην συνέχεια παρουσιάζουμε πιθανές εφαρμογές των υπερπυκνωτών ως αποθηκευτικό στοιχείο.

2.1 Backup μνήμης

Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται ως μικρής διάρκειας εφεδρικά τροφοδοτικά σε καταναλωτικές συσκευές. Πολλές συσκευές ενσωματώνουν ψηφιακά στοιχεία με μνήμη, και ακόμη και μια μικρή διακοπή στην παροχή ρεύματος θα προκαλούσε απώλεια των αποθηκευμένων δεδομένων. Σε τέτοιες περιπτώσεις ένας υπερπυκνωτής συμπεριφέρεται σαν τροφοδοτικό για ένα μικρό χρονικό διάστημα, διατηρώντας τα αποθηκευμένα δεδομένα.

Η κοινή εναλλακτική λύση του υπερπυκνωτή σε αυτή την εφαρμογή είναι η μπαταρία. Ωστόσο οι μπαταρίες γενικά δεν έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και συνεπώς χρειάζονται τακτικά αλλαγή. Επίσης μια μπαταρία θα μπορούσε να κοστίζει έως και 20% της τιμής μιας κοινής και σχετικά φθηνής καταναλωτικής συσκευής. Συμπερασματικά, οι υπερπυκνωτές είναι μία καλή επιλογή ως εφεδρικά τροφοδοτικά λόγω της μεγάλης διάρκειας ζωής τους. [26]

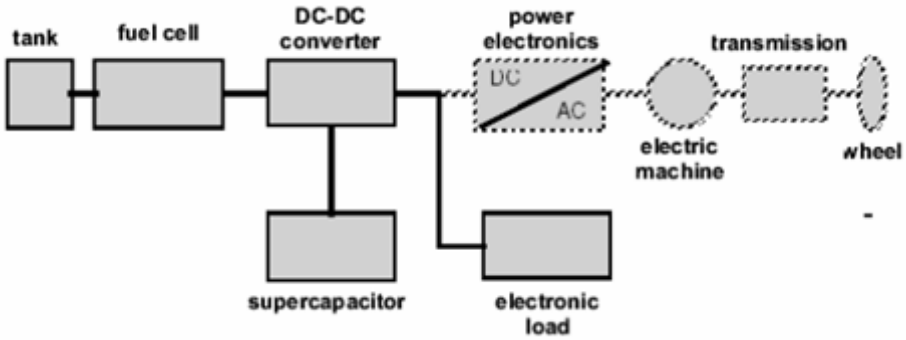


Σχήμα 2.1 – Backup μνήμης μέσω υπερπυκνωτή

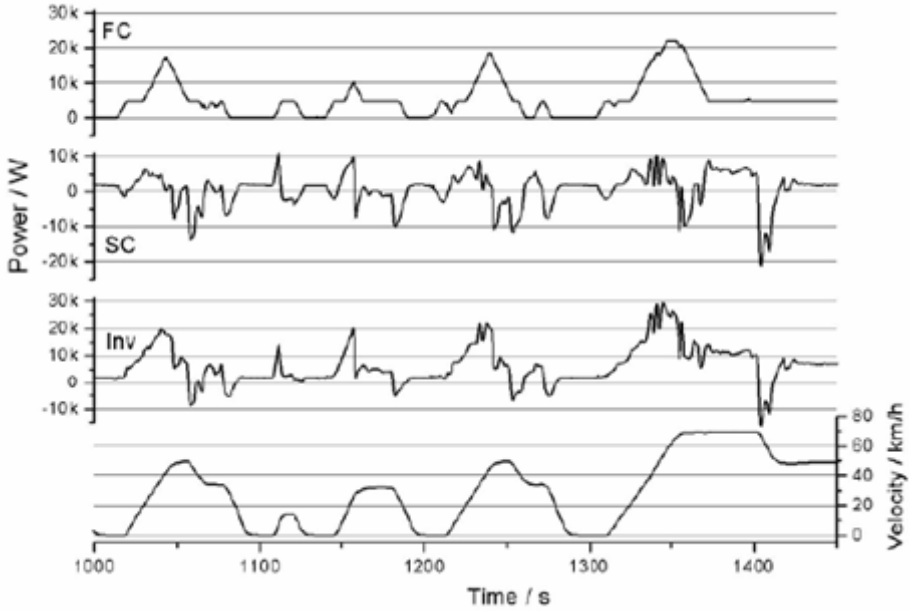
2.2 Ηλεκτρικά οχήματα

Η προοπτική της χρήσης των υπερπυκνωτών σε ηλεκτροκίνητα οχήματα, έχει τραβήξει την προσοχή των επιστημόνων και έχει γίνει αντικείμενο έρευνας, λόγω της ενεργειακής τους απόδοσης και της δυνατότητας που παρέχουν για ανάκτηση ενέργειας κατά τη διάρκεια της πέδησης. Πολλές από τις σημερινές πηγές ενέργειας που εξετάζονται για χρήση σε ηλεκτρικά οχήματα δεν πληρούν τις απαιτήσεις ισχύος για την επιτάχυνση του οχήματος. Οι κυψέλες καυσίμου είναι ελπιδοφόρες, λόγω της εξαιρετικά υψηλής ενεργειακής πυκνότητας τους, αλλά έχουν προσωρινά περιορισμένες δυνατότητες όσον αφορά στις προδιαγραφές ισχύος. Οι απαιτήσεις σε ισχύ και ενέργεια ενός ηλεκτρικού οχήματος μπορούν να ικανοποιηθούν με συνδυασμό των κυψελών καυσίμου και της τεχνολογίας των υπερπυκνωτών.

Μία συνδυασμένη πηγή ισχύος επιτρέπει στην συσκευή μεγάλης ενεργειακής πυκνότητας όπως είναι η κυψέλη καυσίμου να παρέχει το βασικά απαιτούμενο φορτίο. Οι μεγάλες και απότομες απαιτήσεις φορτίου, που είναι αποτέλεσμα επιτάχυνσης ή ανάβασης λόφων, παρέχονται από την συσκευή υψηλής ισχύος όπως είναι μία τράπεζα υπερπυκνωτών. Επίσης η χρησιμοποίηση των υπερπυκνωτών επιτρέπει την αναγεννητική πέδηση. Επειδή η τράπεζα των υπερπυκνωτών μπορεί να επαναφορτιστεί, είναι δυνατό να αποθηκευτεί μέρος της ενέργειας του κινούμενου οχήματος, και κατά συνέπεια να αυξηθεί η απόδοση καυσίμου του ηλεκτρικού οχήματος.

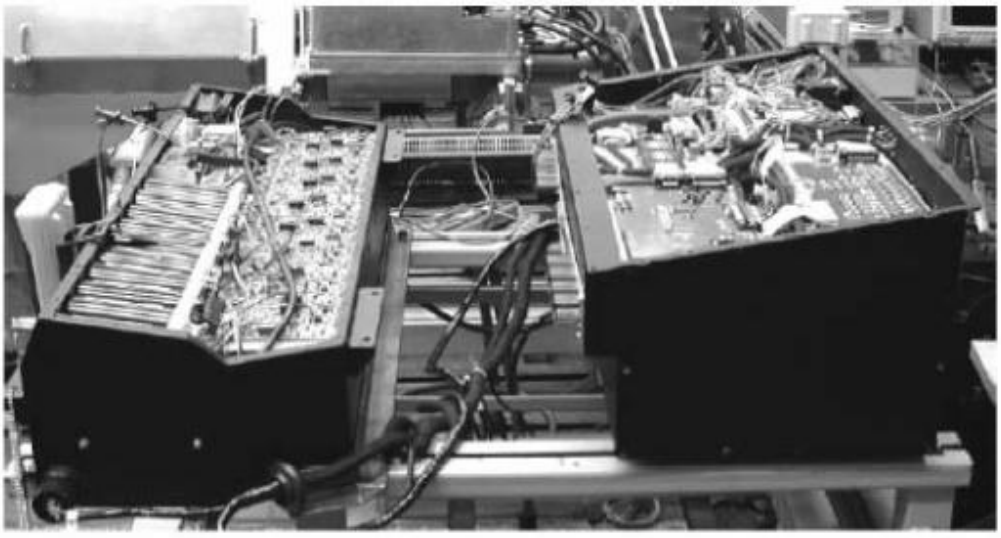


Σχήμα 2.2 – Ηλεκτρικό σύστημα κίνησης με χρήση κυψελών καυσίμου και υπερπυκνωτών



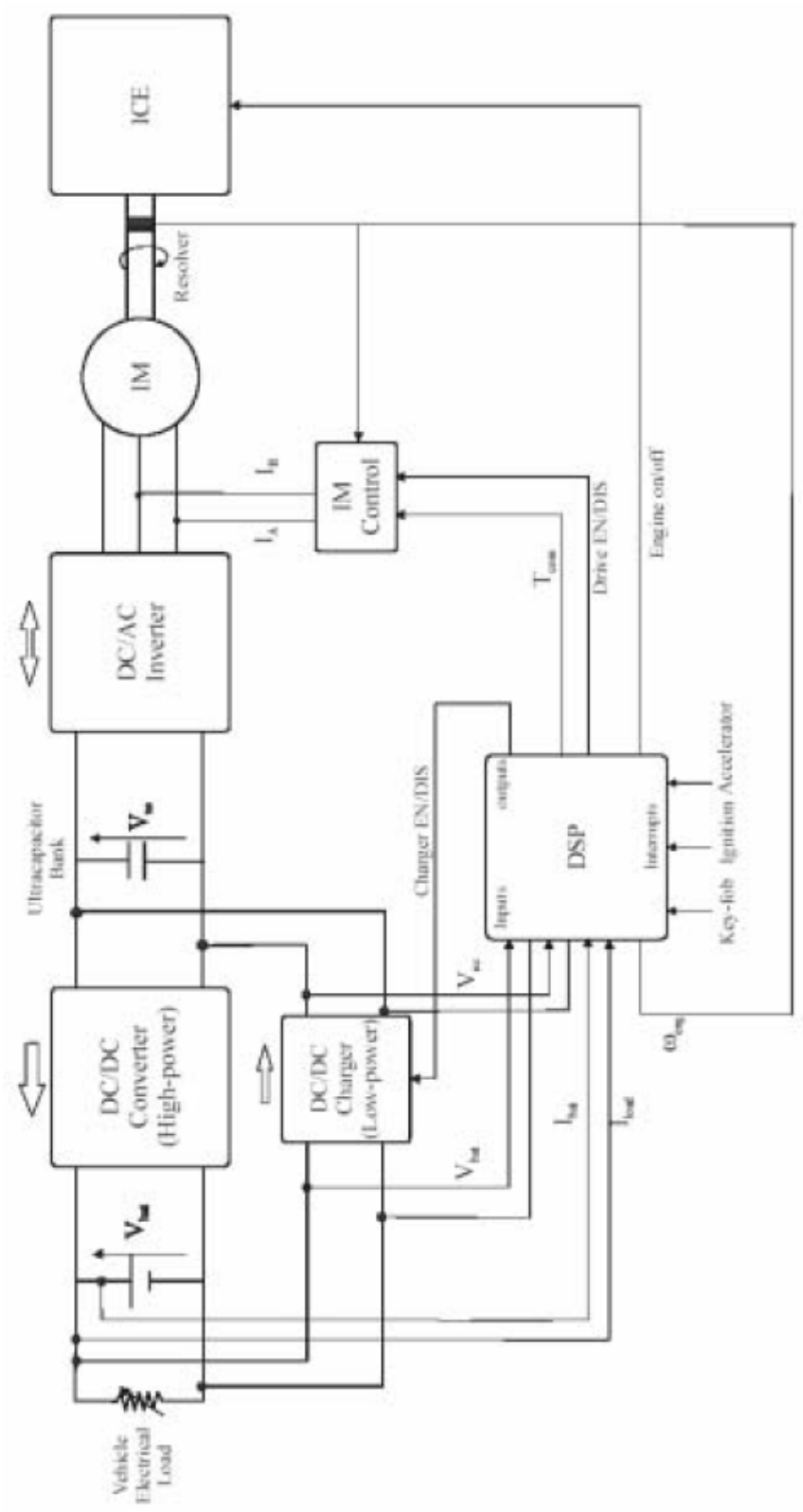
Σχήμα 2.3 – Ροή ισχύος σε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο από κυψέλες καυσίμου, υπερπυκνωτές και αντιστροφέα

Η ροή ισχύος κατά την διάρκεια ενός test drive ενός πειραματικού Volkswagen Bora κινούμενο από κυψέλη καυσίμου και μια τράπεζα υπερπυκνωτών φαίνεται στο παραπάνω διάγραμμα. Στο σχήμα 2.3, με FC αναπαρίσταται η ισχύς που παρέχεται από την κυψέλη καυσίμου και με SC η ισχύ της τράπεζας των υπερπυκνωτών. Η ροή ισχύος της κυψέλης καυσίμου είναι μία ομαλή συνάρτηση, με τις απαιτήσεις γρήγορων επιταχύνσεων να τροφοδοτούνται από τους υπερπυκνωτές. Η επαναφόρτιση των υπερπυκνωτών κατά την διάρκεια της πέδησης φαίνεται στο τρίτο γράφημα. Για να γίνει μια ποσοτική εκτίμηση της εξοικονόμησης καυσίμου από την αναγεννητική πέδηση, μετρήθηκε η κατανάλωση καυσίμου με και χωρίς την λειτουργία του συστήματος αυτού. Βρέθηκε ότι η κατανάλωση ήταν 6.1L/100km χωρίς την χρήση του συστήματος αναγεννητικής πέδησης και 5.3L/100km με το σύστημα σε λειτουργία, παρατηρώντας μία μείωση της τάξης του 15%.



Σχήμα 2.4 – Συστοιχίες υπερπυκνωτών σε ένα πρωτότυπο ηλεκτρικό αυτοκίνητο

Εκτός από τις εφαρμογές στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, οι υπερπυκνωτές μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να μεγιστοποιήσουν την απόδοση των κινητήρων εσωτερικής καύσης (ΚΕΚ) σε υβριδικά οχήματα (ΥΟ) (εικόνα 2.5). Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ισχύος σε πολυτελή αυτοκίνητα, και εναλλακτικών λύσεων σε συσκευές όπως ο εκκινητής του κινητήρα (μίζα), προτείνονται ηλεκτρικά συστήματα των 42 Volt. Σε ένα όχημα με 42 Volt, μία πιθανή επιλογή είναι ο ολοκληρωμένος εκκινητής-εναλλάκτης, μία ηλεκτρική μηχανή που μπορεί να αντικαταστήσει τον κινητήρα εκκίνησης και τον εναλλάκτη. Η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ικανότητα παραγωγής ενέργειας και επιτρέπει την start-stop λειτουργία του ΚΕΚ.
Ένα τέτοιο σύστημα μπορεί να εκκινήσει έναν ΚΕΚ εύκολα και γρήγορα, έτσι ώστε όταν το όχημα σταματά για μία εκτεταμένη περίοδο χρόνου ο ΚΕΚ να σβήνει και να μην καταναλώνει άσκοπα καύσιμα. Μια τράπεζα υπερπυκνωτών σε ένα τέτοιο σύστημα παρέχει την ισχύ για την εκκίνηση του κινητήρα, και διατηρείται φορτισμένη από μια μπαταρία. Η μπαταρία δεν είναι απαραίτητο να παρέχει την ισχύ για την εκκίνηση του ΚΕΚ παρά μόνο να φορτίζει τους υπερπυκνωτές. Με αυτό τον τρόπο η διάρκεια ζωής των μπαταριών επιμηκύνεται. [26]

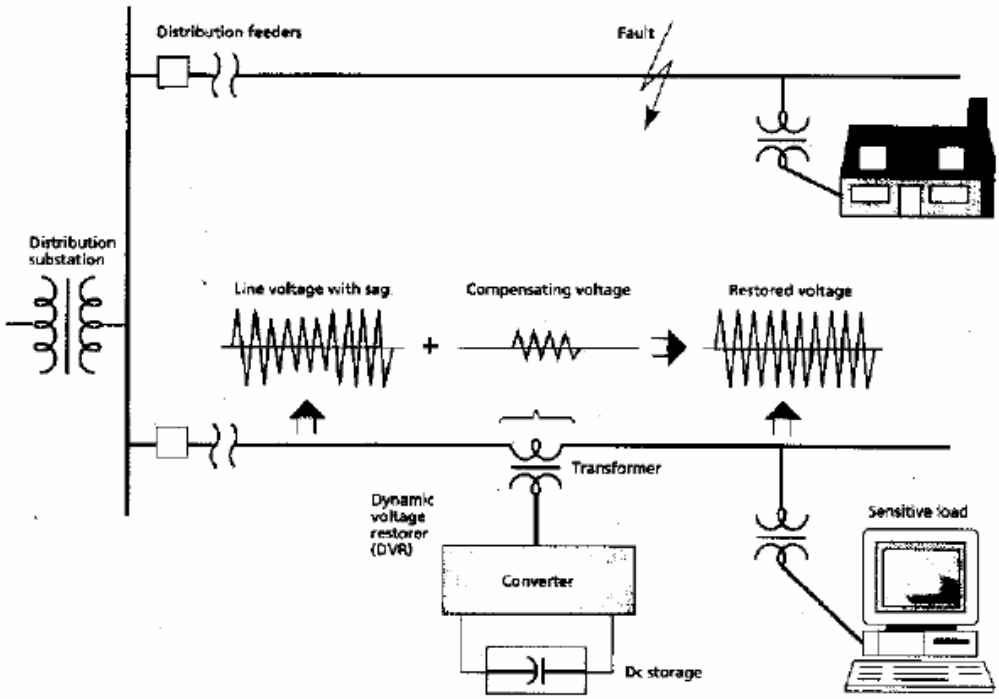


Σχήμα 2.5 – Μπλοκ διάγραμμα ενός υβριδικού ηλεκτρικού αυτοκινήτου με υπερπυκνωτές και κινητήρα επαγωγής

2.3 Ποιότητα ισχύος

Οι υπερπυκνωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συσκευές αποθήκευσης ενέργειας σε συστήματα που έχουν σχεδιαστεί για να βελτιώσουν την αξιοπιστία και την ποιότητα της διανομής ισχύος. Οι στατικοί συμπυκνωτές (STATCON) και οι συσκευές για δυναμική αποκατάσταση τάσης (DVRs) είναι συστήματα που σκοπό έχουν να εγχέουν ή να απορροφούν ισχύ σε μία γραμμή διανομής ώστε να αντισταθμίζουν τις διαταραχές της τάσης. Κατά συνέπεια, τέτοια συστήματα απαιτούν συσκευές αποθήκευσης ενέργειας συνεχούς τάσης ώστε η ενέργεια να μπορεί να αποδοθεί αλλά και να αποθηκευτεί.

Η διάρκεια της διαταραχής της τάσης που θα μπορέσει να αντισταθμιστεί αποτελεσματικά, εξαρτάται από την ενεργειακή πυκνότητα της DC αποθηκευτικής συσκευής. Η συντριπτική πλειοψηφία των διαταραχών της τάσης στο ζυγό διανομής είναι μικρής διάρκειας, καθώς οι περισσότερες από αυτές δεν διαρκούν για περισσότερους από δέκα κύκλους. Συνεπώς, η περιορισμένη ικανότητα αποθήκευσης των υπερπυκνωτών δεν αποτελεί πρόβλημα. Επίσης η συσκευή αποθήκευσης πρέπει να είναι σε θέση να ανταποκριθεί γρήγορα στις διαταραχές τάσης, πράγμα που αποτελεί πλεονέκτημα των υπερπυκνωτών εφόσον έχουν γρήγορο χρόνο αποφόρτισης. Αντίθετα οι μπαταρίες δεν είναι γενικά κατάλληλες για μικρής διάρκειας και γρήγορης απόκρισης εφαρμογές, όπως οι στατικοί συμπυκνωτές (STATCON) και οι συσκευές για δυναμική αποκατάσταση τάσης (DVRs). Επίσης αν η μπαταρία βρεθεί σε χαμηλά επίπεδα φόρτισης, όπως και μπορεί να συμβεί σε αυτή την περίπτωση, η διάρκεια ζωής της συσκευής θα μειωθεί σημαντικά.

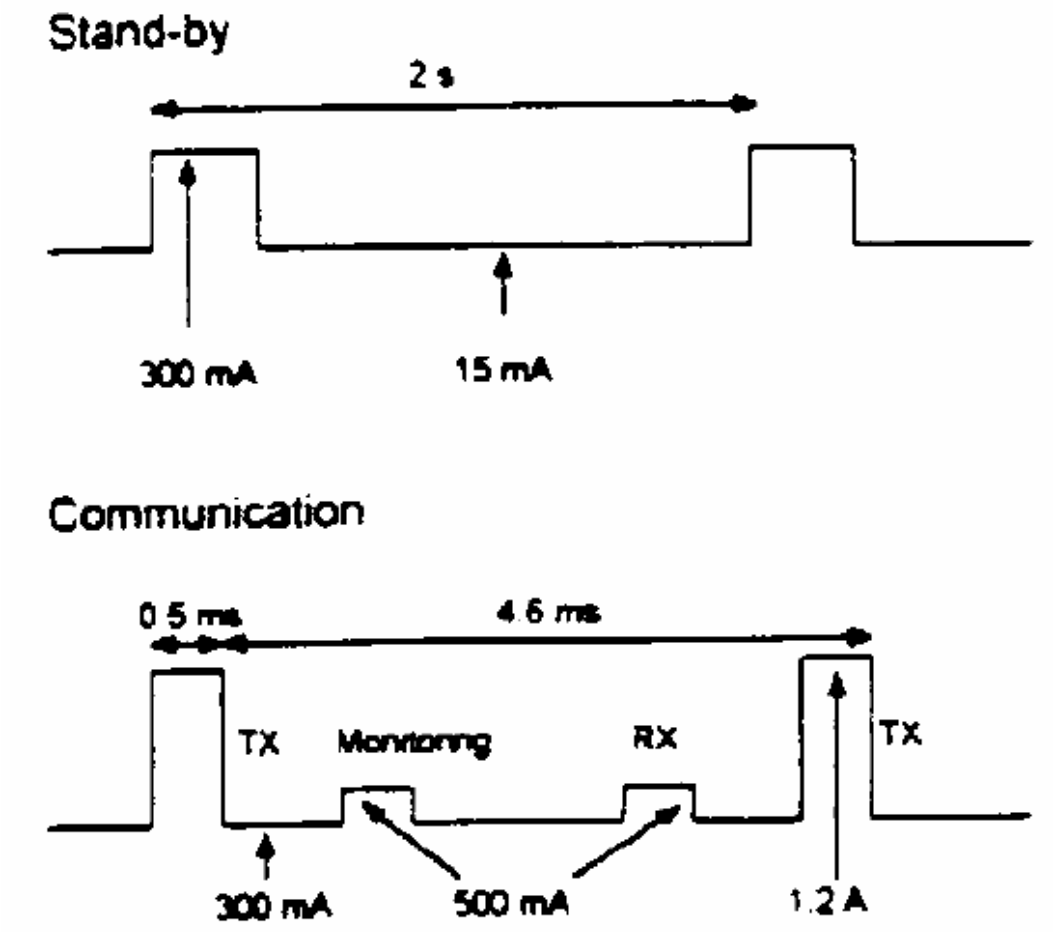


Σχήμα 2.6 – Βελτιωμένη ποιότητα ισχύος στη διανομή από DVR

Η άλλη μεγάλη τεχνολογία που εξετάζεται για εφαρμογές στην ποιότητα διανομής είναι η υπεραγώγιμη μαγνητική αποθήκη ενέργειας (SMES), η οποία επίσης έχει γρήγορη απόκριση και υψηλή απόδοση. Ωστόσο το σημαντικότερο μειονέκτημα της είναι το λειτουργικό κόστος για την διατήρηση κρυογονικών συνθηκών που είναι αναγκαία για την υπεραγωγιμότητα. [26]

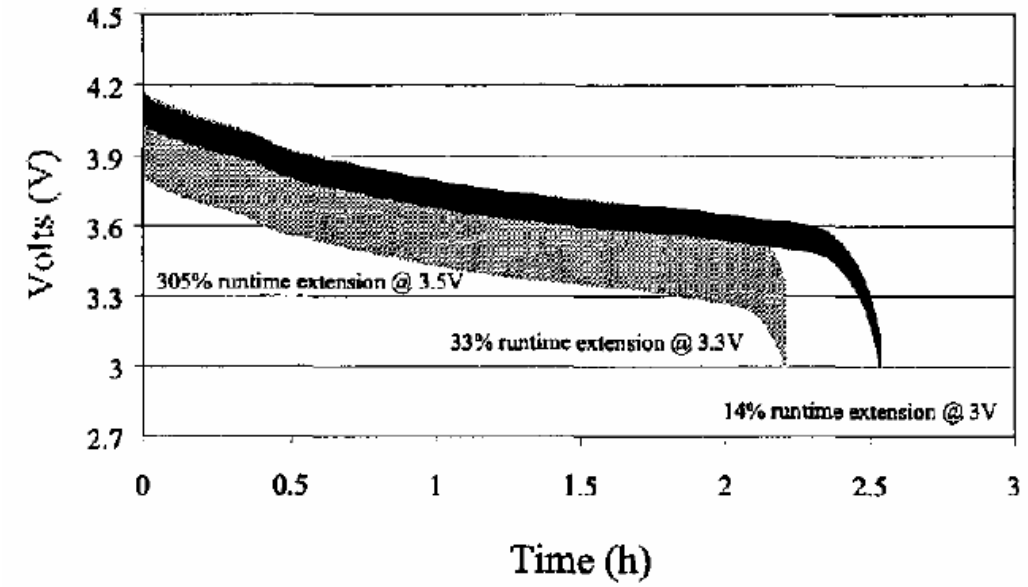
2.4 Βελτίωση απόδοσης μπαταριών

Όλο και περισσότερες φορητές ηλεκτρονικές συσκευές όπως οι φορητοί υπολογιστές και τα κινητά τηλέφωνα ενσωματώνουν μπαταρίες ως τροφοδοτικά. Πολλές τέτοιες συσκευές χρειάζονται υψηλής ισχύος, παλμικά ρεύματα (Εικ. 2.7) και γενικά προφίλ που αποτελούνται από σύντομες ριπές υψηλού ρεύματος που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσης της μπαταρίας. Η βέλτιστη λύση στον τομέα αυτό είναι η χρήση υπερπυκνωτών σε συνδυασμό με τις μπαταρίες.



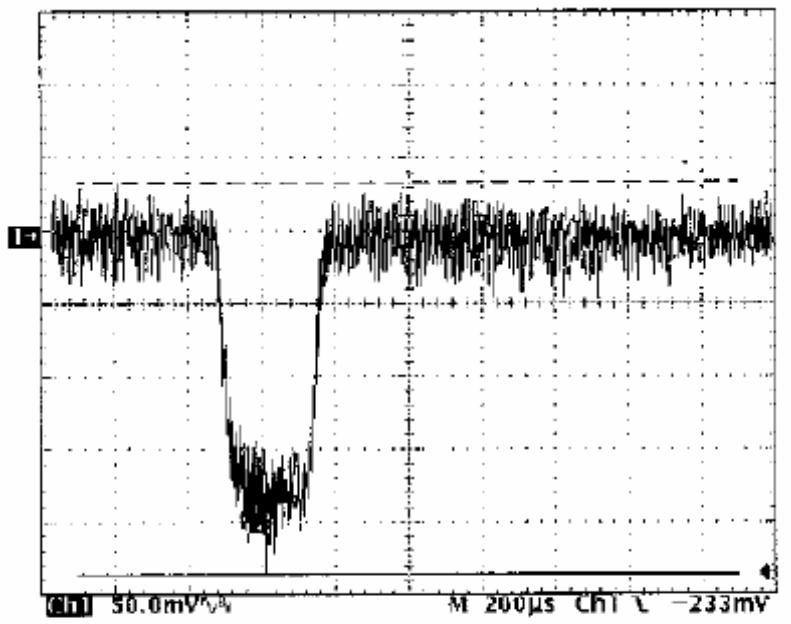
Σχήμα 2.7 – Ζήτηση παλμικού ρεύματος από ένα κινητό τηλέφωνο

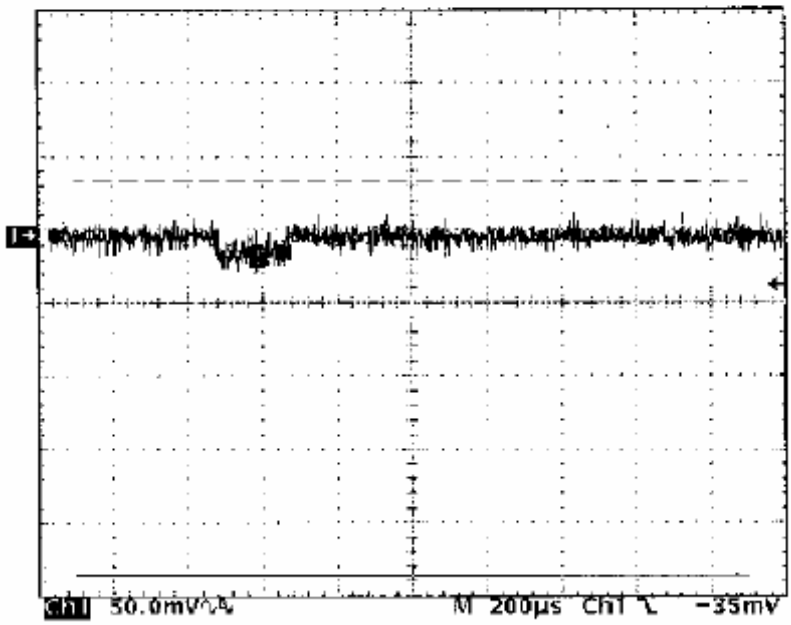
Ένας υπερπυκνωτής μπορεί να απαλλάξει την μπαταρία από τις απότομες ζήτησης φορτίου, επιτρέποντας στην μπαταρία να τροφοδοτεί το μέσο φορτίο. Η μείωση στη ζήτηση παλμικών ρευμάτων από την μπαταρία οδηγεί σε αύξηση την διάρκειας ζωής της.



Σχήμα 2.8 – Βελτίωση χρόνου αναμονής με χρήση EDLC και μπαταρίας

Επίσης πολλές ηλεκτρονικές συσκευές έχουν σύστημα πρόωρου ασφαλούς τερματισμού. Όταν ανιχνεύσουν ότι η τάση πέσει κάτω από κάποιο αποδεκτό όριο, απενεργοποιούνται, ώστε να αποφευχθεί η απώλεια δεδομένων. Ο θόρυβος που μπορεί να υπάρχει στην τάση τροφοδοσίας, είναι πιθανό να προκαλέσει σε αυτά τα κυκλώματα εσφαλμένο τερματισμό. Με την χρήση του υπερπυκνωτή όμως, μπορεί να προληφθεί η πρόωρη διακοπή της λειτουργίας, διότι μειώνει σημαντικά τα μεταβατικά φαινόμενα της τάσης (σχήμα 2.9) [45]. Το σχήμα 2.9 δείχνει την αποτελεσματικότητα ενός υπερπυκνωτή στη μείωση των μεταβατικών της τάσης. Το επάνω μέρος του διαγράμματος δείχνει μια μπαταρία ιόντων λιθίου 10,8 V που υποβάλλεται σε παλμούς ρεύματος 2 A, ενώ το κάτω μέρος του διαγράμματος δείχνει την ίδια μπαταρία σε συνδυασμό με υπερπυκνωτή 7 Farad, 5 mΩ στις ίδιες συνθήκες. [26]





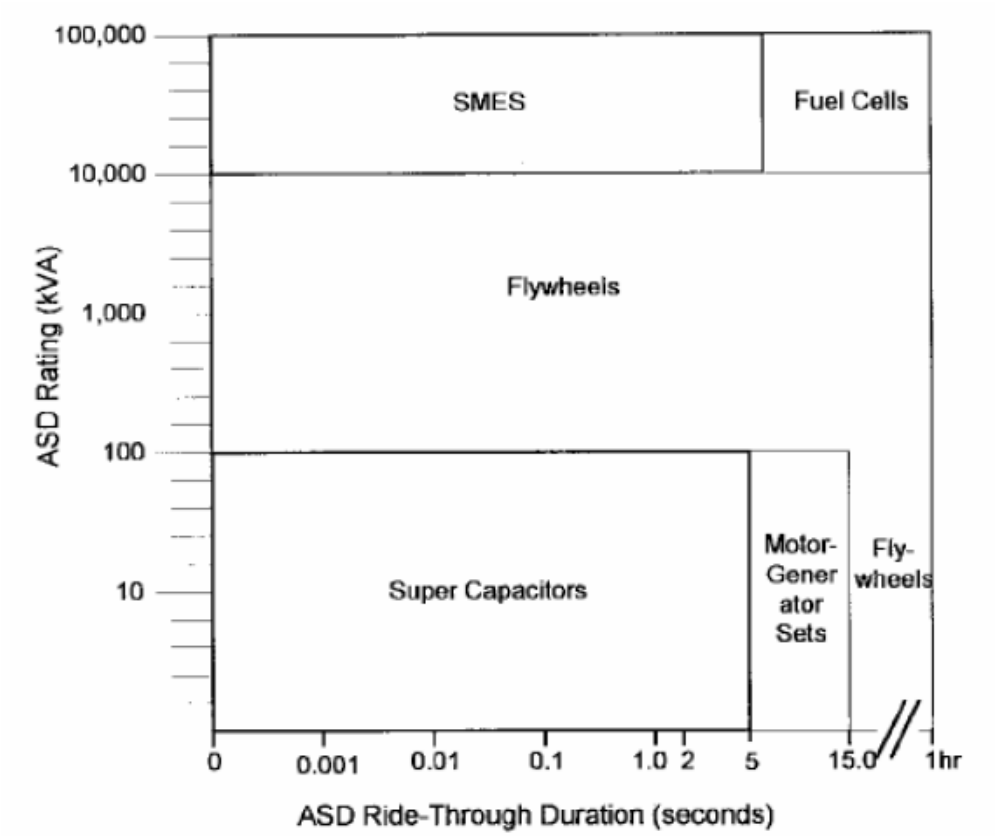
Σχήμα 2.9 – Τάση μπαταρίας που παρέχει παλμικό ρεύμα με (κάτω) και χωρίς (πάνω) υπερπυκνωτή

2.5 Ηλεκτρομηχανικοί ενεργοποιητές

Τα περισσότερα συστήματα ηλεκτρομηχανικών ενεργοποιητών (electromechanical actuators) απαιτούν παλμικά ρεύματα με μεγάλες απαιτήσεις ισχύος αιχμής (και όχι ιδιαίτερα υψηλή ισχύ κατά μέσο όρο). Μια τράπεζα υπερπυκνωτών είναι σχετικά απίθανο να καταφέρει να αποθηκεύσει αρκετή ενέργεια ώστε να ανταπεξέλθει στις παραπάνω συνθήκες. Από την άλλη μεριά, οι μπαταρίες για να μπορέσουν να καλύψουν την ισχύ αιχμής, θα έπρεπε να υπάρχει μια πολύ μεγάλη εγκατάσταση, το οποίο είναι ανεπιθύμητο για παράδειγμα, σε διαστημικές εφαρμογές όπου το βάρος πρέπει να διατηρηθεί σε χαμηλά όρια. Τα παραπάνω προβλήματα λύνονται με την χρήση υβριδικού συστήματος μπαταριών - τράπεζας υπερπυκνωτών, μειώνοντας έτσι το βάρος κατά 60% από ότι αν χρησιμοποιούνταν μόνο μπαταρίες [27]. Τέτοιοι ηλεκτρομηχανικοί ενεργοποιητές χρησιμοποιούνται σε διαστημικά οχήματα και υποβρύχια.

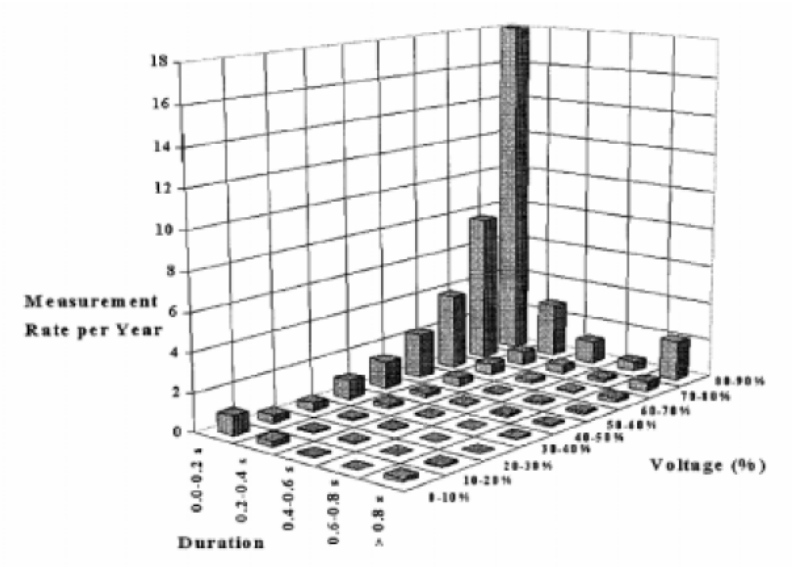
2.6 Οδήγηση ρυθμιζόμενης ταχύτητας (ASD)

Η οδήγηση ρυθμιζόμενης ταχύτητας (Adjustable Speed Drive) χρησιμοποιείται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές λόγω της αποτελεσματικότητάς της, αλλά είναι συχνά ευαίσθητη στις διακυμάνσεις ισχύος και στις διακοπές. Σε βιομηχανικές εγκαταστάσεις, τέτοιου είδους διαταραχές είναι ανεπιθύμητες, και η διακοπή μιας μηχανής που αποτελεί μέρος μιας αλυσίδας παραγωγής ισοδυναμεί με σημαντική οικονομική απώλεια. Συνεπώς, είναι σημαντική η ικανότητα σχεδιασμού οδηγών ρυθμιζόμενης ταχύτητας που μπορούν να ξεπεράσουν τις διαταραχές της παροχής του ηλεκτρικού ρεύματος. Προκειμένου ένας τέτοιος οδηγός να ξεπεράσει μια διαταραχή σε πλήρη ισχύ, μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας είναι απαραίτητη για να λειτουργήσει ως εφεδρική πηγή ενέργειας. Μια σειρά εναλλακτικών επιλογών είναι διαθέσιμες, με τις μπαταρίες και τα συστήματα σφονδύλων να είναι σε θέση να παρέχουν ενέργεια έως και μία ώρα. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των μπαταριών και των σφονδύλων είναι το μέγεθός τους και οι απαιτήσεις συντήρησης. Παρόλα αυτά οι μπαταρίες σήμερα είναι μια φθηνή επιλογή. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να αποθηκεύσουν μεγάλες ποσότητες ενέργειας, αλλά δεν μπορούν να ανταποκριθούν γρήγορα. Οι υπεραγώγιμες μαγνητικές αποθήκες ενέργειας (SMES) είναι αποτελεσματικές σε τέτοιες περιπτώσεις, αλλά χρειάζονται εξεζητημένα συστήματα ψύξης. Οι υπερπυκνωτές μπορούν να ανταποκριθούν πολύ γρήγορα σε διαταραχές τάσης, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, δεν χρειάζονται συντήρηση και μπορούν πολύ εύκολα να ελεγχθούν εφόσον το επίπεδο φόρτισής τους εξαρτάται από την τάση τους. Η επιλογή την αποθήκης ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις απαιτήσεις ισχύος και την επιθυμητή διάρκεια διαταραχής. Από το σχήμα 2.10 είναι φανερό ότι οι υπερπυκνωτές πλεονεκτούν για χρόνους έως 5 δευτερόλεπτα και ισχύς έως 100kVA. [26]



Σχήμα 2.10 – Τρόποι αποθήκευσης ενέργειας για συστήματα ASD με διάφορες ισχείς

Η διάρκεια των περισσότερων διαταραχών ισχύος είναι κάτω από 0.8 δευτερόλεπτα, οπότε οι υπερπυκνωτές παρέχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα στις περισσότερες εφαρμογές.



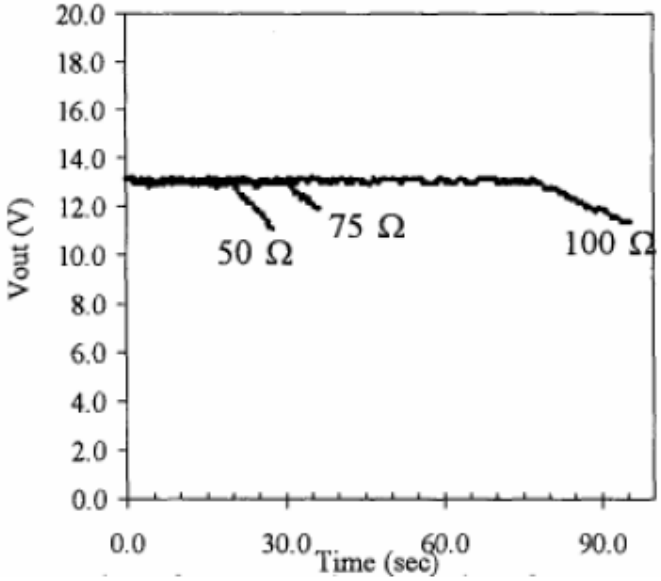
Σχήμα 2.11 – Κατανομή διαταραχών ισχύος κατά διάρκεια και μέγεθος

2.7 Φορητά τροφοδοτικά

Οι υπερπυκνωτές είναι κατάλληλοι για χρήση ως επαναφορτιζόμενες πηγές ενέργειας (αυτόνομες) για τις φορητές ηλεκτρονικές συσκευές με μέτριες ενεργειακές απαιτήσεις. Οι περισσότερες συσκευές χρησιμοποιούν μπαταρίες και έχουν μεγάλους χρόνους επαναφόρτισης. Αυτό έχει γίνει αποδεκτό ως περιορισμός της τωρινής τεχνολογίας. Οι υπερπυκνωτές προσφέρουν την δυνατότητα για δημιουργία συσκευών που μπορούν να επαναφορτίζονται γρήγορα, ίσως σε λίγα μόλις δευτερόλεπτα. Επαναλαμβανόμενη φόρτιση και αποφόρτιση μπορεί να πραγματοποιηθεί χωρίς σημαντικές απώλειες στην απόδοση. Με τη χρήση LED είναι δυνατόν να δημιουργηθεί ένας υψηλής απόδοσης και γρήγορα επαναφορτιζόμενος φακός. Η ανάγκη για συνεχή αντικατάσταση των μπαταριών στα τηλεχειριστήρια μπορεί να εξαλειφθεί.

Σχήμα 2.12 – Ολοκληρωμένος υπερπυκνωτής και DC converter

Στο σχήμα 2.12 φαίνεται ένα τροφοδοτικό που κατασκευάστηκε από το πανεπιστήμιο του Rio Grande [28], το οποίο περιλαμβάνει έναν DC-DC μετατροπέα με ένα υπερπυκνωτή 50 Farad, 2.5Volt . Το όλο μέγεθος του πακέτου είναι ίδιο με το μέγεθος με μια D-cell μπαταρία. Στο σχήμα 2.13 φαίνεται ότι κατάφερε να διατηρήσει σταθερή τάση για περισσότερο από 1 λεπτό με φορτίο 100Ω.



Σχήμα 2.13 – χαρακτηριστικές εκφόρτισης του ολοκληρωμένου dc converter για διάφορα φορτία

2.8 Αποθήκευση ενέργειας σε απομονωμένες εγκαταστάσεις (ΑΠΕ)

Απομακρυσμένες καταναλώσεις που παίρνουν την ενέργειά τους από διακοπτόμενες πηγές όπως είναι η αιολική ή ηλιακή ενέργεια, απαιτούν αποθήκη ενέργειας για να εξασφαλιστεί ότι η ενέργεια θα είναι διαθέσιμη οποιαδήποτε στιγμή. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι υπερπυκνωτές έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των κοινά επιλεγόμενων μπαταριών.

Οι εγκαταστάσεις που αντλούν ενέργεια από φωτοβολταϊκά φορτίζουν την ημέρα, και αντλούν ενέργεια από τις μπαταρίες την νύχτα. Αυτό το περιοδικό φαινόμενο έχει επιβλαβή επίδραση στις μπαταρίες, και κατά συνέπεια χρειάζονται αντικατάσταση κάθε 3-7 χρόνια [29]. Από την άλλη μεριά, οι υπερπυκνωτές είναι ικανοί να αντέξουν μεγάλο αριθμό φορτίσεων και αποφορτίσεων χωρίς αυτό να έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση τους. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται αντικατάσταση κάθε 20 χρόνια, όσο είναι δηλαδή και η διάρκεια ζωής των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Οι δαπάνες εγκατάστασης κατά συνέπεια εξισορροπούνται εφόσον δεν χρειάζονται τακτικές εργασίες συντήρησης.

Η ενεργειακή απόδοση είναι πάντα το κύριο μέλημα στην παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, και οι υπερπυκνωτές επιδεικνύουν μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα φόρτισης από ότι οι μπαταρίες. Μια μπαταρία μολύβδου-οξέος, για παράδειγμα, μπορεί να χάσει έως και το 30% της ενέργειας κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Οι υπερπυκνωτές από την άλλη πλευρά, χάνουν μόνο το 10% [29]. Η ικανότητα να λειτουργούν αποτελεσματικά σε ένα ευρύτερο φάσμα θερμοκρασιών είναι επίσης ένα πλεονέκτημά τους. Ορισμένοι απομακρυσμένοι σταθμοί μπορεί να βρίσκονται σε ψυχρά κλίματα και εφόσον χρησιμοποιούνται μπαταρίες για την αποθήκευση της ενέργειας, η θερμοκρασία θα πρέπει να διατηρηθεί κοντά στη θερμοκρασία δωματίου με βοηθητικά συστήματα θέρμανσης, πράγμα που σημαίνει συμπληρωματικό κόστος και επιπλέον κατανάλωση ενέργειας.

Το σημαντικότερο μειονέκτημα της τεχνολογίας των υπερπυκνωτών για εφαρμογή σε διακοπτόμενες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η περιορισμένη ενεργειακή πυκνότητα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το αρχικό κόστος, για να επιτευχθεί αποθήκευση ενέργειας ίση με αυτή των συσσωρευτών, να είναι υπερβολικό. Μια μελέτη από την Telstra Research Laboratories δίνει έμφαση στο μειωμένο κόστος κατά την διάρκεια ζωής ενός δικτύου με μονάδες που τροφοδοτούνται από Φ/Β πάνελ και υπερπυκνωτές, και καταλήγει στο συμπέρασμα ότι, ενώ με τις παρούσες τιμές αποκλείεται η χρήση τους, το κόστος του κεφαλαίου αναμένεται να μειωθεί σημαντικά τα επόμενα έτη [30].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΑΝΑΛΥΣΗ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗΣ

3.1 Πειραματικές παρατηρήσεις

Τα μοντέλα των υπερπυκνωτών, όπως και κάθε άλλης διάταξης, κατασκευάζονται για να μπορεί ο κάθε ερευνητής να προσομοιώσει δύσκολα και χρονοβόρα πειράματα στον υπολογιστή του, με μηδενικό κόστος και σε πολύ λίγο χρόνο. Για να φτιαχτεί ένα αξιόπιστο μοντέλο όμως, είναι αναγκαίο να εξαχθούν οι βασικές εξισώσεις που διέπουν το υπό μελέτη σύστημα καθώς και να αναλυθούν οι εξαρτήσεις μεταξύ των διαφόρων παραμέτρων. Από σειρές πειραμάτων και καμπύλες από μετρήσεις που βρήκαμε στη βιβλιογραφία [31], κάνουμε κάποιες παρατηρήσεις, παρακάτω, για την μεταβολή των διαφόρων χαρακτηριστικών του υπερπυκνωτή σε σχέση με αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους καθώς και για τα φυσικά αίτια που οδηγούν σε αυτή τη συμπεριφορά. Οι παράμετροι που φαίνονται στα παρακάτω διαγράμματα έχουν είτε μετρηθεί απευθείας είτε υπολογιστεί από μετρήσεις.

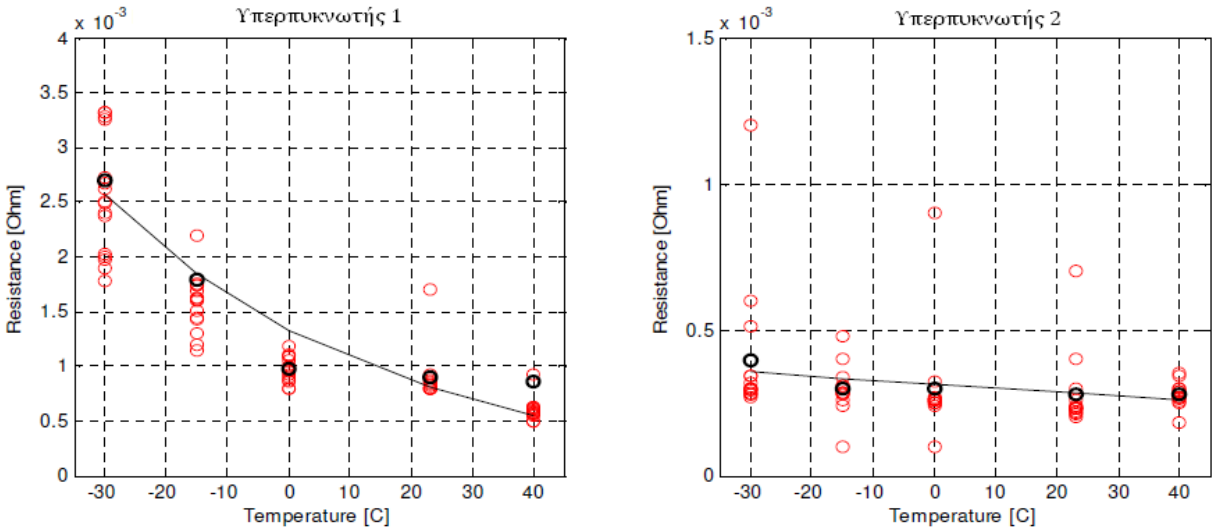
3.1.1 Εξάρτηση της αντίστασης σειράς από τη θερμοκρασία

Παρακάτω φαίνονται οι πειραματικές καμπύλες που βρήκαμε για 2 διαφορετικούς υπερπυκνωτές και αφορούν τη σχέση αντίστασης σειράς και θερμοκρασίας. Τα χαρακτηριστικά κάθε πυκνωτή είναι συγκεντρωμένα στον πίνακα 3.

	Ονομαστική Τάση [V]	**Ονομαστική Χωρητικότητα [F]**	**Κατασκευαστής**	**Είδος Ηλεκτρολύτη**	**Ονομαστικό Ρεύμα [A]**
Υπερπυκνωτής 1	2,3	2700	Nippon-ChemiCon	PC	500
Υπερπυκνωτής 2	2,7	5000	NessCap	CAN	1000

Πίνακας 3

Στα διαγράμματα που ακολουθούν βλέπουμε ότι γενικά η αντίσταση σειράς είναι αντιστρόφως ανάλογη της θερμοκρασίας. Αυτό κυρίως οφείλεται στην μειωμένη κινητικότητα που εμφανίζουν τα ιόντα μέσα στον ηλεκτρολύτη, σε χαμηλές θερμοκρασίες. Απ' ότι φαίνεται, όμως, δεν συμπεριφέρονται όλοι οι πυκνωτές με τον ίδιο τρόπο. Τα δύο διαγράμματα που φαίνονται στο σχήμα 3.1 δείχνουν ότι ο πρώτος υπερπυκνωτής εμφανίζει πολύ μεγαλύτερη διακύμανση στην αντίσταση σειράς του σε σχέση με τον δεύτερο. Αυτό εξηγείται αφού οι δύο πυκνωτές ουσιαστικά διαφέρουν στον τύπο του ηλεκτρολύτη (PC ή ACN, τους οποίους αναλύσαμε στο κεφάλαιο 1.1.2)

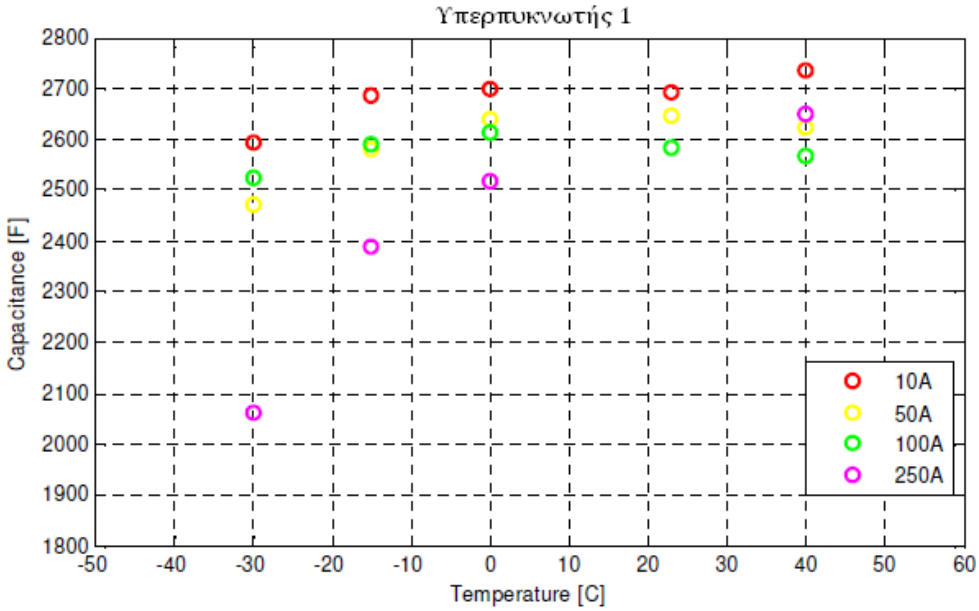


Σχήμα 3.1

Όπως παρατηρούμε ο υπερπυκνωτής 1 εμφανίζει περίπου 3,7 φορές μεγαλύτερη αντίσταση σειράς σε θερμοκρασία -30 ^{o}C απ' ότι στους 40 ^{o}C, ενώ ο υπερπυκνωτής δύο παρουσιάζει αύξηση στην αντίσταση σειράς του μόνο κατά 0,4 φορές, ανάμεσα στις ίδιες θερμοκρασίες. Η μεγάλη διασπορά στις μετρήσεις της αντίστασης ίσως οφείλονται στην υπερθέρμανση του υπερπυκνωτή λόγω των μεγάλων ρευμάτων και τις επαναλαμβανόμενες φορτίσεις.

3.1.2 Εξάρτηση της χωρητικότητας από τη θερμοκρασία

Ξέρουμε ότι η χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή εξαρτάται από παραμέτρους όπως η επιφάνεια των ηλεκτροδίων του και η συγκέντρωση των ιόντων στον ηλεκτρολύτη, που δεν έχουν κάποια προφανή θερμοκρασιακή εξάρτηση. Βρήκαμε παρ' όλα αυτά καμπύλες από μετρήσεις που δείχνουν ότι κάτι τέτοιο δεν είναι ακριβές. Οι καμπύλες αναφέρονται στον υπερπυκνωτή 1 του πίνακα 3.

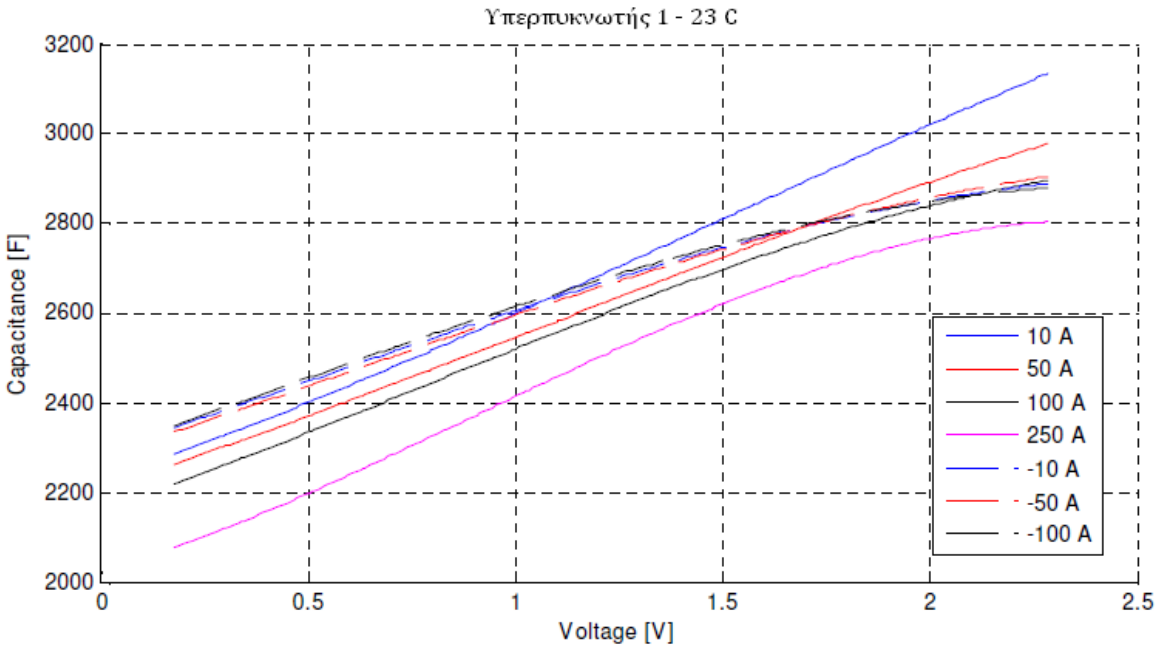


Σχήμα 3.2

Φαίνεται στο σχήμα 3.2 ότι για σχετικά μικρά ρεύματα (έως 100 A) υπάρχει κάποια μεταβολή στην χωρητικότητα που μπορεί να εκφραστεί με παρεμβολή κάποιας συνάρτησης. Για μεγαλύτερα ρεύματα, όμως υπάρχουν μεγάλες και απότομες μεταβολές που δεν είναι εύκολο να αναπαρασταθούν μαθηματικά. Αυτές οι μεταβολές ίσως είναι αποτέλεσμα της δυσκολίας που παρουσιάζεται για τα ιόντα να τακτοποιηθούν κοντά στην επιφάνεια του άνθρακα σε χαμηλές θερμοκρασίες

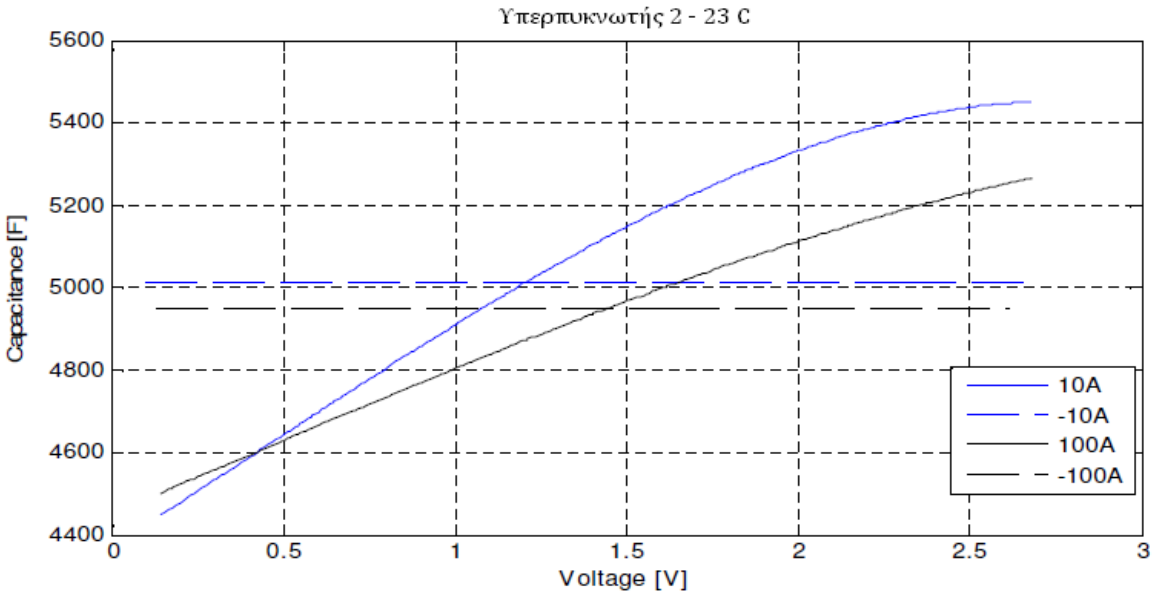
3.1.3 Εξάρτηση της χωρητικότητας από την τάση

Η σχέση της χωρητικότητας με την τάση είναι γνωστή και φαίνεται σε κάθε φόρτιση του υπερπυκνωτή με σταθερό ρεύμα. Είναι η κύρια μη γραμμική συμπεριφορά του πυκνωτή που μοντελοποιείται ακόμη και στο πρώτο βασικό μοντέλο που θα παρουσιάσουμε.
Γνωρίζουμε ότι η χωρητικότητα εξαρτάται από τη συγκέντρωση ιόντων κοντά στους οπλισμούς. Με την αύξηση της τάσης, το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται ισχυρότερο και έλκει όλο και περισσότερα ιόντα κοντά στους οπλισμούς, πράγμα που οδηγεί στην παρατηρούμενη αύξηση της χωρητικότητας.



Σχήμα 3.3

Στο διάγραμμα 3.3 βλέπουμε την μεταβολή της χωρητικότητας σε σχέση με την τάση για τον 1° υπερπυκνωτή. Μία σημαντική παρατήρηση είναι ότι υπάρχει διαφορετική συμπεριφορά του πυκνωτή ανάλογα με το αν πρόκειται για φόρτιση (θετικά ρεύματα) ή αποφόρτιση (αρνητικά ρεύματα). Κατά τις φορτίσεις φαίνεται ότι οι καμπύλες των διαφορετικών ρευμάτων είναι πιο απομακρυσμένες σε σχέση με αυτές κατά τις εκφορτίσεις. Στο διάγραμμα 3.4, για τον 2° υπερπυκνωτή είναι εμφανές πως κατά τις εκφορτίσεις δεν παρουσιάζεται σχεδόν καμία αλλαγή στη χωρητικότητα. Μία πιθανή εξήγηση για το φαινόμενο αυτό είναι ότι κατά τη φόρτιση οι ηλεκτρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται, αντιτίθενται στις δυνάμεις διάχυσης και εμφανίζεται αυτή η μη γραμμική συμπεριφορά. Κατά την εκφόρτιση, οι δύο δυνάμεις τείνουν να 'συνεργαστούν' απομακρύνοντας τα ιόντα από τους οπλισμούς.



Σχήμα 3.4

3.2 Παρουσίαση Simulink

Το SIMULINK είναι ένα λογισμικό πακέτο που επιτρέπει τη μοντελοποίηση, προσομοίωση και ανάλυση δυναμικών συστημάτων. Υποστηρίζει γραμμικά και μη γραμμικά συστήματα, μοντελοποιημένα σε συνεχή ή διακριτό χρόνο, ή ακόμη και υβριδικά συστήματα (εν μέρει μοντελοποιημένα σε συνεχή και εν μέρει σε διακριτό χρόνο). Υποστηρίζονται ακόμη συστήματα με τμηματικά διαφορετικούς χρόνους δειγματοληψίας.

Για τη μοντελοποίηση, το SIMULINK παρέχει ένα γραφικό περιβάλλον διεπαφής (GUI) που επιτρέπει την κατασκευή μοντέλων ως δομικών διαγραμμάτων, χρησιμοποιώντας λειτουργίες click-and-drag του ποντικιού. Το SIMULINK περιλαμβάνει ένα πλήθος βιβλιοθηκών δομικών στοιχείων (blocks), τα βασικότερα από τα οποία είναι οι πηγές (sources), τα στοιχεία «απορρόφησης» (sinks), τα συνεχή γραμμικά στοιχεία, τα μη γραμμικά στοιχεία και τα στοιχεία σημάτων και συστημάτων. Είναι επίσης δυνατή η τροποποίηση και η δημιουργία νέων δομικών στοιχείων από το χρήστη, καθώς και η εισαγωγή νέων toolboxes με εργαλεία για ειδικές εφαρμογές (ηλεκτρικές, μηχανικές, βιολογικές κτλ).

Τα μοντέλα SIMULINK είναι ιεραρχικά (ένα μοντέλο μπορεί να περιέχει μπλοκ τα οποία περιέχουν με τη σειρά τους άλλα μπλοκ), έτσι μπορούν να ιδωθούν σε διάφορα επίπεδα. Ένα σύστημα που έχει ιεραρχική δομή μπορεί να ιδωθεί αρχικά σε υψηλό επίπεδο ως ένα σύνολο διασυνδεμένων υποσυστημάτων, κάθε ένα από τα οποία μοντελοποιείται ως ένα μπλοκ. Στη συνέχεια, κάνοντας διπλό κλικ με το ποντίκι στα επί μέρους μπλοκ, ο χρήστης μπορεί να κατέβει σε χαμηλότερα επίπεδα ώστε να δει αυξανόμενους βαθμούς λεπτομέρειας.

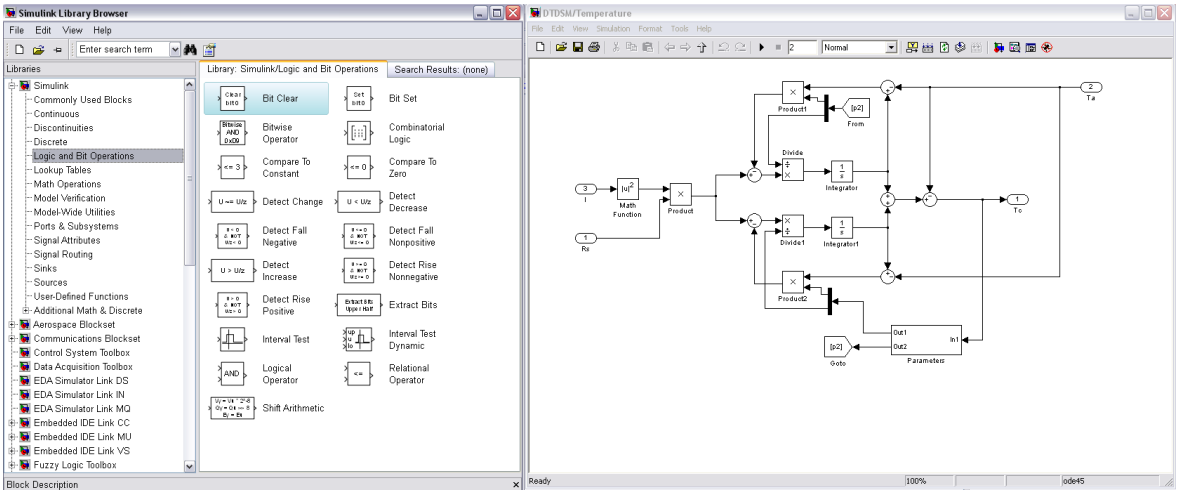
Μετά τη δημιουργία ενός μοντέλου, είναι δυνατή η προσομοίωση του, χρησιμοποιώντας μια από τις διάφορες μεθόδους ολοκλήρωσης που παρέχει το SIMULINK. Χρησιμοποιώντας παλμογράφους (scopes) και άλλα μπλοκ απεικόνισης, είναι δυνατή η παρακολούθηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης καθώς αυτή εξελίσσεται. Επιπλέον, είναι δυνατή η εξαγωγή αποτελεσμάτων της προσομοίωσης στο χώρο εργασίας της MATLAB για περαιτέρω επεξεργασία.

Ένα πλεονέκτημα του Simulink με τα διαγράμματα ροής σήματος που χρησιμοποιεί, είναι ότι μπορεί να μοντελοποιήσει συστήματα από διάφορα γνωστικά αντικείμενα, εφόσον οι εξισώσεις που διέπουν

τη συμπεριφορά του συστήματος είναι γνωστές και μπορούν να γραφούν ως εξισώσεις κατάστασης. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί ο χρήστης να είναι σίγουρος για τον τρόπο λειτουργίας κάθε επιμέρους κομματιού του συστήματος.
Από την άλλη, το γεγονός ότι όλα τα blocks που χρησιμοποιούνται στο Simulink είναι μαθηματικά, μπορεί να γίνει μειονέκτημα. Για παράδειγμα, όταν κατασκευάζουμε ένα ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει εξαρχής να αποφασίσουμε για το τι θα δίνουμε ως είσοδο και τι θέλουμε να βλέπουμε ως έξοδο του συστήματος (αιτιότητα – causality). Δεν μπορούμε σε ένα μοντέλο που έχει για είσοδο ρεύμα, να δώσουμε τάση στην είσοδο, εκτός και αν αλλάξουμε τις εξισώσεις του συστήματος για να λειτουργήσουν σωστά με τη νέα είσοδο. Δηλαδή πρέπει να δημιουργήσουμε δύο διαφορετικά μαθηματικά μοντέλα για να ελέγξουμε τη συμπεριφορά του μοντέλου με είσοδο ρεύμα ή τάση. Για μεγάλα συστήματα, με πολύπλοκες μαθηματικές σχέσεις, η διαδικασία αυτή είναι δύσκολη και χρονοβόρα. Γι αυτό το λόγο το Simulink χρησιμοποιείται εκεί που υπερτερεί των άλλων προγραμμάτων (μαθηματική μοντελοποίηση), ενώ συνήθως, για προσομοιώσεις πολύπλοκων ηλεκτρικών δικτύων χρησιμοποιούμε εναλλακτικά προγράμματα (ή κατάλληλα εργαλεία του Simulink όπως το SimPower Systems), που στοχεύουν αποκλειστικά σε μοντελοποίηση ηλεκτρικών/ηλεκτρονικών συστημάτων.

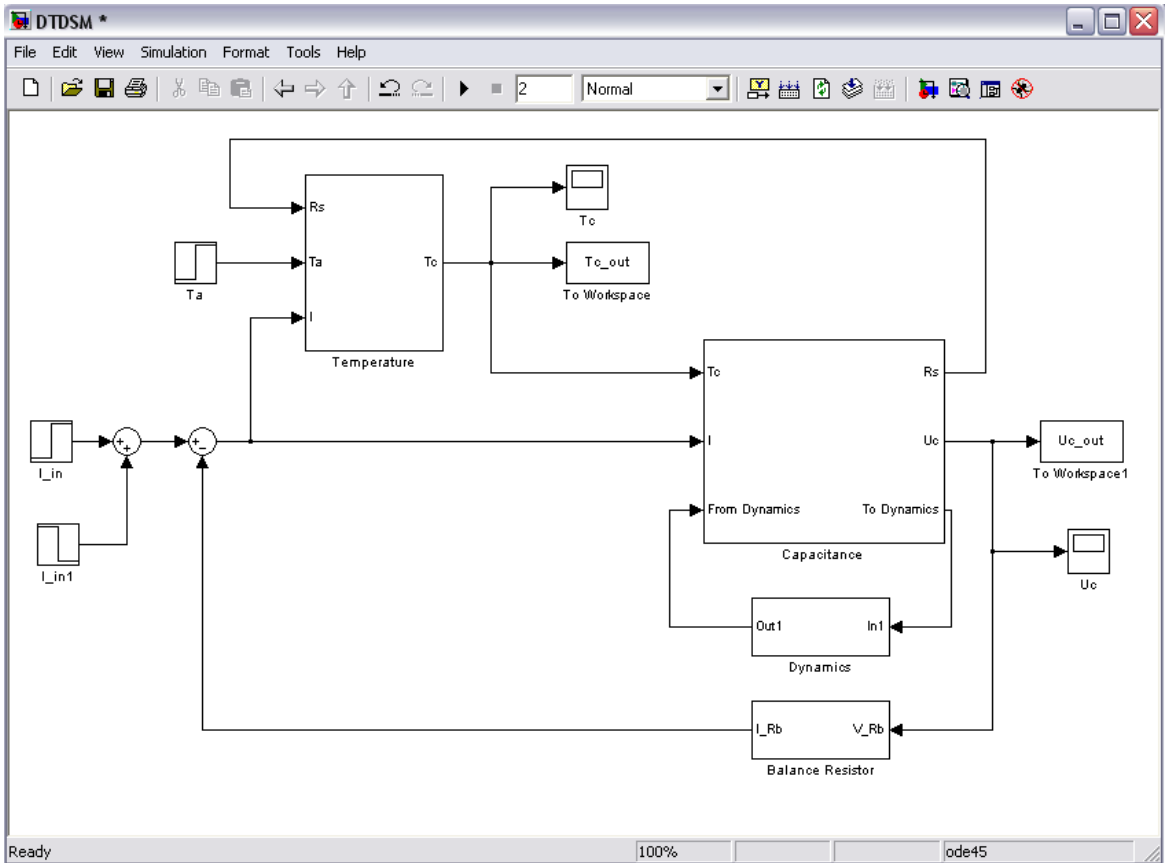
3.2.1 Περιβάλλον διεπαφής χρήστη (User Interface)

Όλα τα στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των μοντέλων στο Simulink είναι μαζεμένα σε μια βιβλιοθήκη, και οργανωμένα σε υποκατηγορίες ανάλογα με τη λειτουργία τους. Η εύρεση του κατάλληλου στοιχείου είναι εύκολη και ο χρήστης εξοικειώνεται γρήγορα μετά από μερικές αναζητήσεις. Έτσι ο χρόνος για την κατασκευή ακόμα και πολύπλοκων μοντέλων, είναι συνήθως σχετικά μικρός. Η γενική φιλοσοφία ενός μοντέλου στο Simulink είναι η χρήση κάποιων στοιχείων εισόδου (πηγές σημάτων) τα οποία συνδέονται με διάφορα μαθηματικά blocks που υλοποιούν τις εξισώσεις του μοντέλου μας. Οι έξοδοι των παραπάνω μπορούν να οδηγηθούν σε στοιχεία που μας επιτρέπουν να δούμε την χρονική εξέλιξη των διαφόρων μεταβλητών καθώς και να εξαχθούν στο περιβάλλον εργασίας του Matlab για περαιτέρω επεξεργασία. Αυτός ο τρόπος υλοποίησης ενός μοντέλου είναι πολύ γρήγορος ακόμη και για πολύπλοκα συστήματα και επιτρέπει ευκολότερη επισκόπηση και κατανόηση της δομής ενός μοντέλου, σε σύγκριση με μοντέλα που φτιάχνονται αποκλειστικά με κώδικα.
Ένα χρήσιμο εργαλείο του Simulink είναι η δυνατότητα ομαδοποίησης διαφόρων σημάτων σε μία γραμμή (με τη βοήθεια των blocks Mux, Demux). Μετά την ομαδοποίηση, τα σήματα μπορούν να διαχωριστούν όπου χρειαστεί. Με αυτόν τον τρόπο μπορούν διάφορα σήματα να δοθούν ως είσοδος σε ένα σύστημα και να παράγουν ξεχωριστές εξόδους για το κάθε ένα, χωρίς να χρειάζεται να φτιαχτούν διαφορετικά αντίγραφα του μοντέλου που θα επεξεργαστούν κάθε σήμα ξεχωριστά. Στο σχήμα 3.5 φαίνεται η επιφάνεια εργασίας του Simulink καθώς και το παράθυρο της βιβλιοθήκης των στοιχείων (Library Browser).



Σχήμα 3.5 – Επιφάνεια εργασίας Simulink

Άλλη πολύ χρήσιμη δυνατότητα που προσφέρει το πρόγραμμα αυτό είναι η δημιουργία υποσυστημάτων που αποτελούνται από διάφορα στοιχεία και υλοποιούν ένα συγκεκριμένο κομμάτι του μοντέλου μας. Με αυτόν τον τρόπο έχουμε μια κομψή εποπτική εικόνα για το μοντέλο μας όπου φαίνονται μόνο τα κύρια υποσυστήματα και οι διασυνδέσεις τους, και αν θέλουμε να δούμε πως λειτουργεί ένα συγκεκριμένο υποσύστημα αρκεί να ανοίξουμε το αντίστοιχο block με διπλό κλικ (σχήμα 3.6). Επίσης έτσι, αποφεύγονται και τυχόν κατά λάθος τροποποιήσεις του συστήματος. Το κάθε υποσύστημα μπορεί ακόμα να γίνει και κομμάτι της βιβλιοθήκης του Simulink για μελλοντική χρήση σε άλλα μοντέλα.



Σχήμα 3.6

Συνολικά μπορούμε να ομαδοποιήσουμε τα πλεονεκτήματα του περιβάλλοντος μοντελοποίησης του Simulink:

+ Μεγάλη κοινότητα χρηστών
+ Άμεση διασύνδεση με το περιβάλλον του Matlab
+ Εύχρηστη βοήθεια με χρήσιμες πληροφορίες
+ Εκτενής βιβλιοθήκη στοιχείων ελέγχου, επιτρέπει εύκολη υλοποίηση κάθε αλγόριθμου
+ Δυνατότητα εισαγωγής επιπλέον στοιχείων (φτιαγμένα από άλλους χρήστες κτλ)
+ Δυνατότητα χρήσης πεπλεγμένων σημάτων
+ Μπορεί να γίνει βελτιστοποίηση του μοντέλου με χρήση της δυνατότητας "parameter estimation" ώστε να προσαρμόσουμε το μοντέλο με μεγάλη ακρίβεια σε πειραματικά δεδομένα.

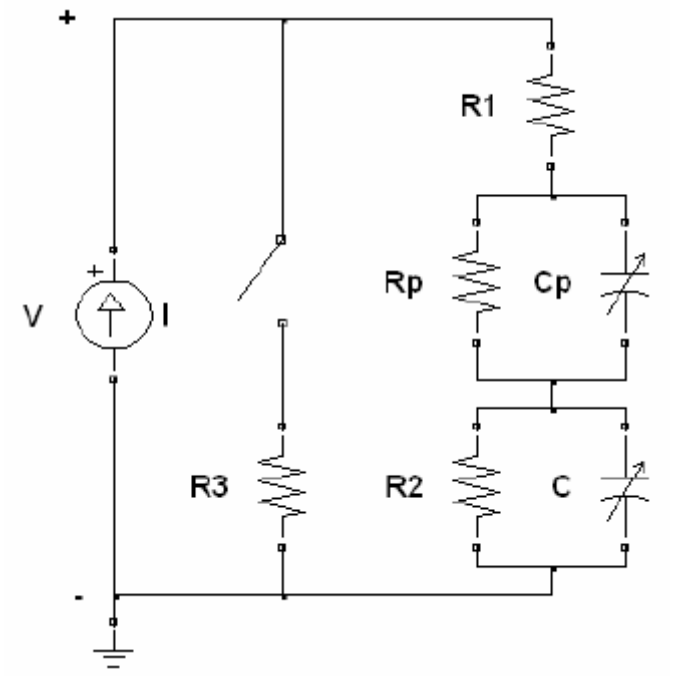
Ορισμένα μειονεκτήματα του προγράμματος αυτού είναι:

- Μειωμένες επιδόσεις προσομοίωσης σε σχέση με μοντέλα που χρησιμοποιούν μόνο κώδικα
- Μόνο μαθηματική μοντελοποίηση
- Προβλήματα σχετικά με την αιτιότητα (causality)
- Η εποπτική εικόνα του μοντέλου δεν είναι τόσο καλή όσο σε προγράμματα που επιτρέπουν μοντελοποίηση με ηλεκτρικά στοιχεία

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ

4.1 Βασικό μοντέλο

Το πρώτο βασικό μοντέλο για την περιγραφή ενός υπερπυκνωτή είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.1:



Σχήμα 4.1

Τα κυκλωματικά στοιχεία που φαίνονται στο σχήμα 4.1 χρησιμοποιούνται για να εκφράσουν τη συμπεριφορά και να μοντελοποιήσουν τη λειτουργία του πραγματικού πυκνωτή. Πιο συγκεκριμένα, η βασική χωρητική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή εκφράζεται μέσω της χωρητικότητας C η οποία παρατηρούμε ότι δεν είναι σταθερή αλλά μεταβλητή. Αυτό οφείλεται στην εξάρτηση που παρατηρείται ανάμεσα στην τάση και στην χωρητικότητα. Όπως εξηγήσαμε και στο κεφάλαιο 3.1.3, η αύξηση της διαφοράς δυναμικού που εφαρμόζεται σε έναν υπερπυκνωτή έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων κοντά στους οπλισμούς και λόγω των φαινόμενων στους πυκνωτές διπλού στρώματος οδηγεί σε αύξηση της χωρητικότητας. Η αντίσταση R2 παράλληλα με την κύρια χωρητικότητα μοντελοποιεί την αυτό-εκφόρτιση του πυκνωτή που συμβαίνει φυσιολογικά με το χρόνο λόγω διάχυσης φορτίων. Η αντίσταση R1 δεν είναι παρά η αντίσταση σειράς του υπερπυκνωτή που οδηγεί στις παρατηρούμενες απώλειες κατά την φόρτιση και την εκφόρτιση. Ξέρουμε ότι αυτό οφείλεται από τη μία στις μη ιδανικότητες των αγωγών που αποτελούν τους οπλισμούς και τις συνδέσεις μέσα στον υπερπυκνωτή, και από την άλλη στην ιδιαίτερη συμπεριφορά του διηλεκτρικού που αναφέραμε πιο πάνω. Η αντίσταση R3 (και ο διακόπτης που ελέγχει τη σύνδεση ή όχι του κλάδου αυτού στο κύκλωμα) αποτελούν μοντελοποίηση του κυκλώματος εξισορρόπησης (balancing) που προστατεύει από υπερτάσεις το κάθε στοιχείο (cell) του

υπερπυκνωτή. Είδαμε στο κεφάλαιο 1.1.2 ότι υπάρχει μία μέγιστη επιτρεπόμενη τάση που μπορεί να εφαρμοστεί με ασφάλεια σε έναν υπερπυκνωτή χωρίς να προκαλέσει προβλήματα.
Συνήθως δεν χρησιμοποιούμε τους υπερπυκνωτές μόνους τους αλλά σε συστοιχίες με σύνδεση αρκετών εν σειρά ώστε φτάσουμε επίπεδα τάσεων χρήσιμα για την υπόλοιπη εγκατάσταση. Αυτή η πρακτική ενέχει τον κίνδυνο, όμως, σε κάποιο από τα στοιχεία του υπερπυκνωτή με τυχόν μικρότερη χωρητικότητα από τα υπόλοιπα να δημιουργηθεί μεγαλύτερη τάση και να προκαλέσει έκρηξη και καταστροφή του εξοπλισμού. Γι αυτό το λόγο λοιπόν η αντίσταση R3, σε περίπτωση που ανιχνευθεί υπέρταση σε κάποιο στοιχείο, παραλληλίζεται με το στοιχείο αυτό μειώνοντας την συνολική φαινόμενη αντίσταση, άρα και την τάση στα άκρα του.
Τα στοιχεία R_P και C_P χρειάζονται για να μοντελοποιήσουν την δυναμική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή σε γρήγορες μεταβολές.

Μπορεί κανείς να δείξει ότι οι εξισώσεις που διέπουν το παραπάνω ισοδύναμο κύκλωμα είναι:

$$V_{OUT} = I^* \cdot \left[\frac{1}{sC_P + \frac{1}{R_P}} + R_1 + \frac{1}{sC_{Var} + \frac{1}{R_2}} \right]$$

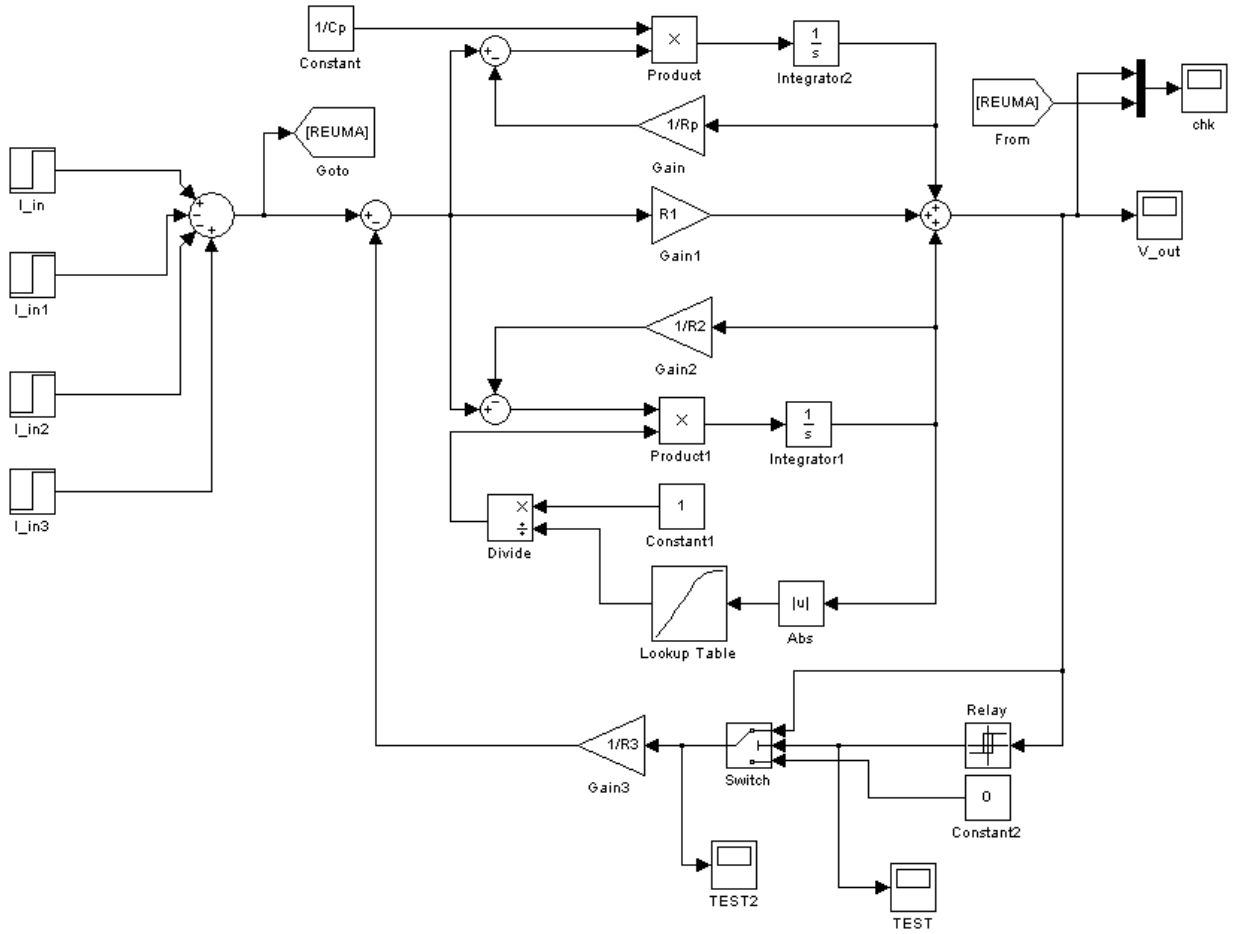
Όπου

$$I^* = \begin{cases} I_{IN} & \alpha\nu \ \mathrm{V}_{OUT} < 42{,}83 \ \mathrm{V} \\ I_{IN} - \dfrac{V_{OUT}}{R_3} & \alpha\nu \ \mathrm{V}_{OUT} > 42{,}84 \ \mathrm{V} \end{cases}$$

Στις καμπύλες τάσης που προέκυψαν από πειράματα που βρήκαμε στη βιβλιογραφία [31], παρατηρήθηκε μία σημαντική αλλαγή της πρώτης παραγώγου της καμπύλης μετά από ένα μέγιστο στα 42,83V. Αυτή η αλλαγή μπορεί να εξηγηθεί με την σύνδεση της αντίστασης R3 στο κύκλωμα που προκαλεί μείωση της συνολικής αντίστασης και αύξηση του ρεύματος με αποτέλεσμα η τάση να αυξάνεται με μικρότερο ρυθμό. Η τιμή αυτή των 42,84 V είναι αυτή στην οποία γίνεται σύνδεση της παράλληλης (balancing) αντίστασης R_3 στο κύκλωμα για να εμποδίσει τυχόν υπερβολική αύξηση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή. Η συγκεκριμένη τάση γενικά παρέχεται από τον κατασκευαστή, αλλά για μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί κανείς να την υπολογίσει από τη μορφή της καμπύλης φόρτισης του πυκνωτή.

4.1.1 Μοντέλο Simulink

Με βάση το παραπάνω κύκλωμα, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα πρώτο βασικό μοντέλο στο Simulink το οποίο φαίνεται στο σχήμα 4.2.



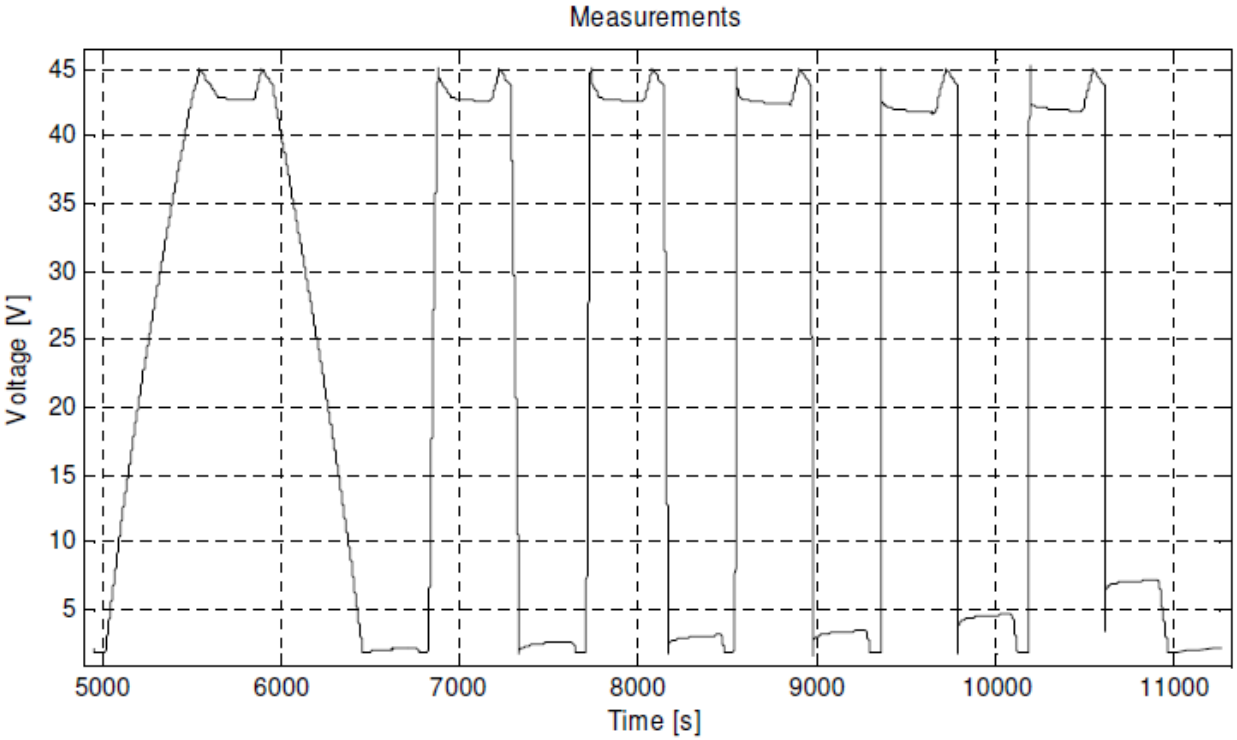
Σχήμα 4.2

Το στοιχείο 'Relay' που φαίνεται στο block διάγραμμα είναι ρυθμισμένο ώστε να δίνει έξοδο '1' όταν η τάση είναι μεγαλύτερη από 42,84V και '0' όταν αυτή είναι μικρότερη των 42,83V (αυτή η διαφορά οφείλεται στο ότι το 'Relay' στο Simulink ουσιαστικά υλοποίει ένα βρόχο υστέρησης και η τιμή που γυρίζει σε λογικό 1 πρέπει να είναι οριακά μεγαλύτερη από αυτή που γυρίζει σε λογικό 0).
Άλλο ένα πράγμα που μπορούμε να διακρίνουμε από την καμπύλη της μετρηθείσας τάσης, είναι ότι ξεκινά όχι από τα 0V, αλλά από τα 2,19V. Αυτό μπορεί να συμπεριληφθεί στο μοντέλο, θέτοντας αρχική τιμή σε έναν από τους ολοκληρωτές ίση με 2,19.
Το στοιχείο που βρίσκεται πριν τον 'lookup table' μας δίνει την απόλυτη τιμή της εξαγόμενης τάσης ώστε να εμποδίσει τυχόν αρνητικές τάσεις να εισέλθουν εκεί. Με αυτόν τον τρόπο, για κάθε αρνητική τάση, ο 'lookup table' θα παράγει την ίδια τιμή χωρητικότητας για μια τιμή τάσης, ανεξαρτήτως προσήμου. Σε αντίθετη περίπτωση οι πίνακες αυτοί κάνουν αυτόματα παρεμβολή και υπολογίζουν τιμές χωρητικότητας για τις αρνητικές τάσεις από μη υπάρχοντα τμήματα της καμπύλης πράγμα που οδηγεί σε λανθασμένα αποτελέσματα.

4.1.2 Υπολογισμός τιμών παραμέτρων

Οι τιμές για τα διάφορα στοιχεία του ισοδύναμου κυκλώματος που αποτελεί το βασικό μοντέλο μας υπολογίζονται με ανάλυση μετρήσεων του πυκνωτή που βρήκαμε στη βιβλιογραφία. Στο σημείο αυτό να αναφέρουμε ότι τα διαγράμματα και αριθμητικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του μοντέλου, προέρχονται από το datasheet [47] ενός υπερπυκνωτή 33F 42V της EPCOS και άλλες βιβλιογραφικές πηγές. [31]

Στο σχήμα 4.3, φαίνεται η μεταβολή της τάσης του υπερπυκνωτή κατά τη φόρτιση και την εκφόρτισή του με διάφορα επίπεδα ρεύματος.



Σχήμα 4.3

Αρχικά έχουμε πολύ μικρό ρεύμα και γι' αυτό παρατηρείται μεγάλος χρόνος φόρτισης/εκφόρτισης. Όσο το ρεύμα αυξάνεται, ο χρόνος μειώνεται αφού χοντρικά ισχύει: $I(t) = C\dfrac{dV(t)}{dt}$, έχουμε δηλαδή αύξηση της κλίσης της καμπύλης της τάσης. Η τελευταία εκφόρτιση που φαίνεται έγινε στα 400A και ο χρόνος που χρειάστηκε για την αποφόρτιση ήταν περίπου 3 δευτερόλεπτα.

4.1.2.1 Κύρια χωρητικότητα

Υπάρχουν δύο τρόποι υπολογισμού της κύριας χωρητικότητας του υπερπυκνωτή. Με τον όρο κύρια χωρητικότητα εννοούμε την ονομαστική τιμή του μεγέθους αυτού, αυτή που δίνει ο κατασκευαστής. Όπως είπαμε παραπάνω, η χωρητικότητα ενός υπερπυκνωτή δεν είναι σταθερή αλλά μεταβάλλεται με μη γραμμικό τρόπο ανάλογα με την τάση, τη θερμοκρασία, τη συχνότητα και άλλους παράγοντες. Όλα αυτά τα φαινόμενα θα ληφθούν υπόψη σε επόμενο κεφάλαιο όπου θα δείξουμε πώς μπορεί να μοντελοποιηθεί αυτή η μη γραμμικότητα.

Η πρώτη μέθοδος υπολογισμού βασίζεται σε ανάλυση της παραγώγου της καμπύλης της τάσης κατά τη φόρτιση του υπερπυκνωτή. Έχουμε ήδη πει πως σε έναν πυκνωτή ισχύει γενικά:

$$I(t) = C\frac{dV(t)}{dt}$$

Όπου C είναι η χωρητικότητα [32]. Με βάση αυτή τη σχέση, μπορεί να υπολογιστεί η χωρητικότητα για τα διάφορα τμήματα της καμπύλης της τάσης. Όταν χρησιμοποιούμε μεγάλα ρεύματα, η τάση επηρεάζεται έντονα και από άλλα φαινόμενα εκτός απ' την χωρητικότητα και έτσι η υπολογιζόμενη τιμή δεν θα είναι ακριβής

Επίσης είναι γνωστό ότι

$$Q = \int I(t)\,dt$$

Όπου Q είναι το φορτίο του πυκνωτή που μπορεί να υπολογιστεί ως το ολοκλήρωμα του ρεύματος σε ένα κύκλο φόρτισης. Συνεπώς η χωρητικότητα μπορεί να υπολογιστεί και ως:

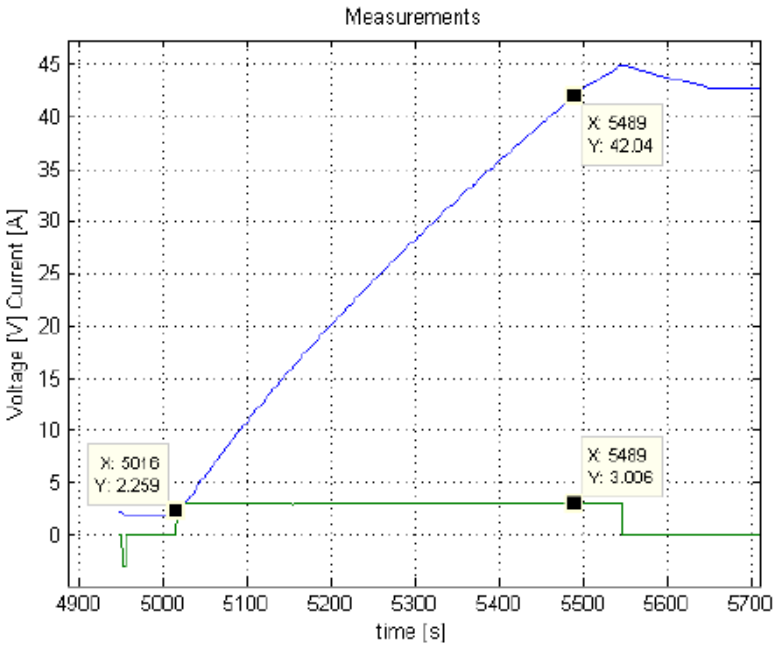
$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta V}$$

Όπου ΔQ και ΔV είναι οι διαφορές του φορτίου και της τάσης του πυκνωτή αντίστοιχα. Η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον πυκνωτή μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας μόνο ένα σημείο πάνω στην καμπύλη, έτσι δύο σημεία είναι αρκετά για να υπολογίσουμε την ικανότητα αποθήκευσης ενέργειας του πυκνωτή. Δηλαδή μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια που αποθηκεύεται στον υπερπυκνωτή χωρίς να μας επηρεάζουν τυχόν διακυμάνσεις της τάσης κατά την φόρτιση.

Η δεύτερη μέθοδος υπολογισμού είναι χρησιμοποιώντας την ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον πυκνωτή. Το κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν επηρεάζεται από τη μη γραμμική χωρητικότητα κατά τη διάρκεια της φόρτισης. Η σχέση που χρησιμοποιείται είναι:

$$W = \frac{1}{2}C\cdot(V_2 - V_1)^2$$

Κατά την πειραματική διαδικασία, ο πυκνωτής φορτίζεται από σχεδόν άδειος, μέχρι να αποκτήσει πλήρες φορτίο. Το τμήμα της καμπύλης αυτό φαίνεται στο σχήμα 4.4, όπου έχουν επισημανθεί και τα σημεία που θα χρησιμοποιήσουμε στους υπολογισμούς.



Σχήμα 4.4

Για να έχουμε καλύτερη εικόνα για την χωρητικότητα πήραμε στοιχεία όχι μόνο απ' το παραπάνω τμήμα της καμπύλης αλλά και από τις επόμενες δοκιμές όπως φαίνονται στο σχήμα 4.3.
Όπως βλέπουμε έχουμε σταθερό ρεύμα καθ' όλη τη διάρκεια της φόρτισης ενώ οι δύο τιμές που παίρνουμε για την τάση είναι στην αρχή κάθε καμπύλης και στο σημείο πριν αρχίσει η κάμψη λόγω της αντίστασης R3. Να τονίσουμε σε αυτό το σημείο, ότι εξετάζοντας διαφορές τάσης μπορούμε να αμελήσουμε την αντίσταση σειράς του πυκνωτή, αφού η τάση που 'καταναλώνεται' εκεί είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του φαινομένου. Οι μετρήσεις και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 4:

# δοκιμής	**I [A]**	**t0 [s]**	**t1 [s]**	**V0 [V]**	**V1 [V]**	**Δt [s]**	**ΔV [V[**	**Q [C]**	**C [F]**
1	3,0	5016	5489	2,259	42,04	473	39,781	1419	35,7
2	60	7708	7733	1,88	45,07	25	43,19	1500	34,7
3	200	9360	9367	1,9	45,16	7	43,26	1400	32,4

Πίνακας 4

4.1.2.2 'Lookup Table' για τη μη γραμμική χωρητικότητα

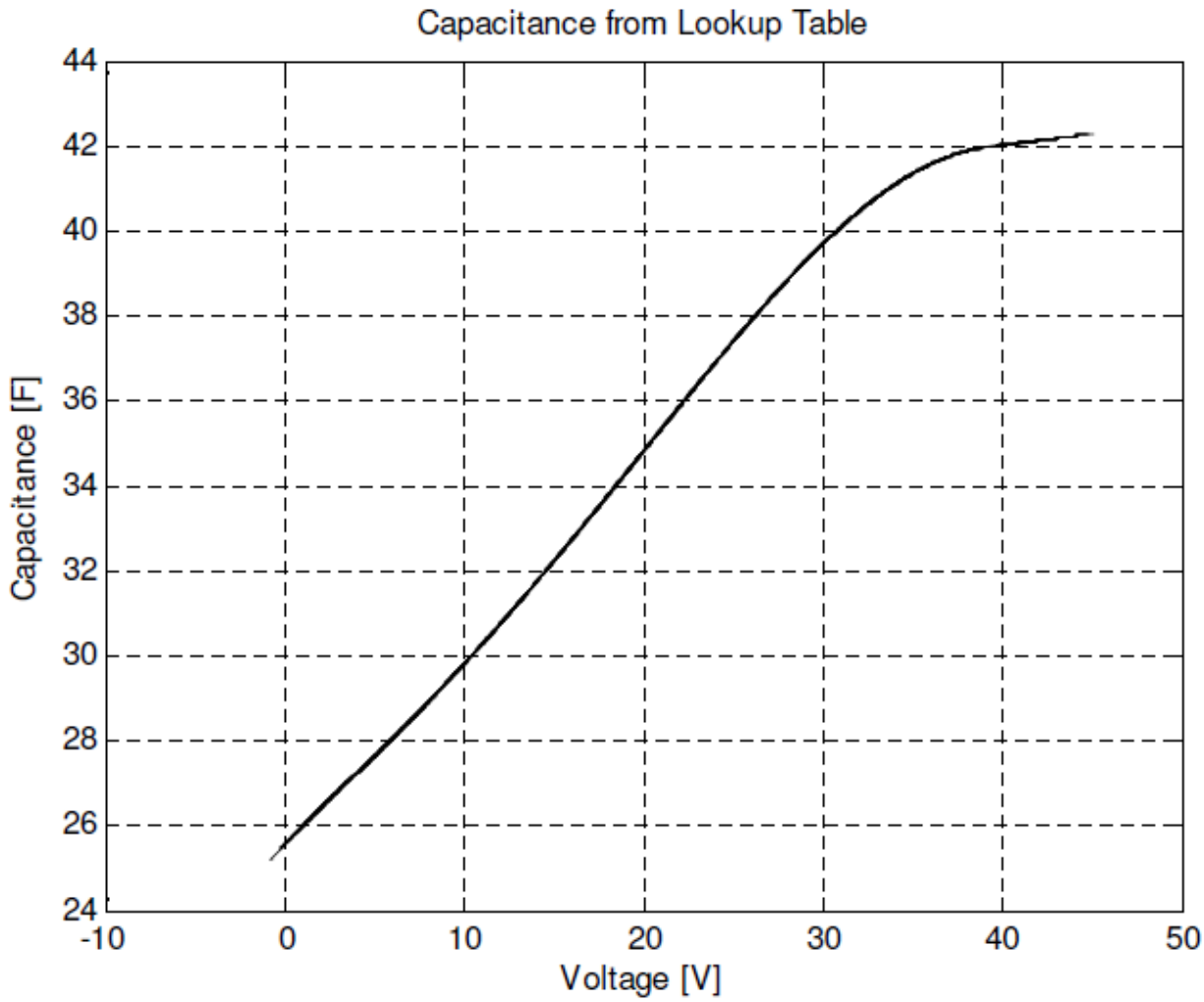
Όπως είπαμε παραπάνω, η χωρητικότητα, στην πράξη εξαρτάται από την τάση. Θα ήταν καλό να συμπεριλάβουμε την εξάρτηση αυτή στο μοντέλο μας και να μην αρκεστούμε σε μία σταθερή τιμή για το C. Το τμήμα της παραπάνω καμπύλης από τα 5018s ως τα 5449s μπορεί να εξαχθεί σε ένα νέο πίνακα στο Matlab για περαιτέρω ανάλυση. Με τα εργαλεία που μας παρέχει το πρόγραμμα αυτό μπορούμε να εξάγουμε την προσέγγιση του παραπάνω τμήματος της καμπύλης με χρήση ενός πολυώνυμου 3^{ου} βαθμού. Προκύπτει:

$$V(t) = 7{,}1138 \cdot 10^{-8} \cdot t^3 - 1{,}1657 \cdot 10^{-3} \cdot t^2 + 6{,}4391 \cdot t - 11945$$

Και με παραγώγιση του παραπάνω έχουμε:

$$\dot{V}(t) = 2{,}13414 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 2{,}3314 \cdot 10^{-3} \cdot t + 6{,}4391$$

Και σύμφωνα με τη διαδικασία που ακολουθήσαμε και πιο πάνω, το Matlab μπορεί να βρει τη χωρητικότητα για κάθε τιμή της τάσης V. Έτσι φτιάχνουμε την παρακάτω καμπύλη (σχήμα 4.5) που χρησιμοποιούμε και σαν 'Lookup Table' στο μοντέλο που φαίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.5

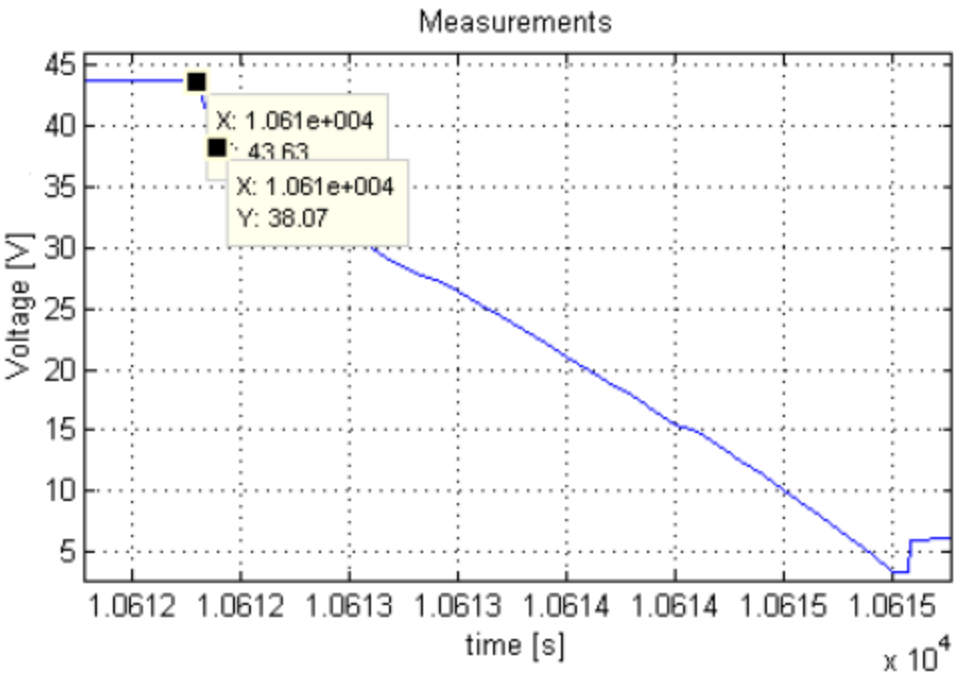
4.1.2.3 Χωρητικότητα C_P

Η τιμή της χωρητικότητας C_P επιλέγεται να είναι το 1/13 της C. Η τιμή αυτή επιλέγεται αφού το datasheet του πυκνωτή που εξετάζουμε [33] αναφέρει μια τέτοια σχέση. Σε κάθε περίπτωση, το στοιχείο C_P είναι μικρό και δεν επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του μοντέλου.

4.1.2.4 Αντίσταση R1

Η τιμή της R_1 (αντίσταση σειράς) μπορεί να βρεθεί παρατηρώντας μια απότομη μεταβολή του ρεύματος φόρτισης και μετρώντας την αρχική μεταβολή της τάσης. Η αρχική μεταβολή της τάσης φαίνεται πολύ πιο απότομη απ' ότι στη συνέχεια. Αυτό γιατί στην αρχή της εκφόρτισης όλη η πτώση τάσης που παρατηρείται οφείλεται στην αντίσταση σειράς R_1. Στο σχήμα 4.6 φαίνεται η μεγέθυνση της τελευταίας εκφόρτισης του σχήματος 4.3. Η κλίση της καμπύλης ανάμεσα στα σημεία που επισημαίνονται μας δίνει την R_1 κατά τη σχέση:

$$R_1 = \frac{\Delta V}{\Delta I}$$



Σχήμα 4.6

Ο ίδιος υπολογισμός γίνεται και για άλλες δύο εκφορτίσεις και τα αποτελέσματα φαίνονται στον πίνακα 5. Η επίδραση της αντίστασης R_2 μπορεί να αμεληθεί. Οι διαφορές που παρατηρούνται ανάμεσα στις δοκιμές ίσως είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας της αντίστασης R_3 που σε τέτοιες υψηλές τάσεις είναι συνδεδεμένη.

# δοκιμής	I [A]	t0 [s]	V0 [V]	V1 [V]	ΔV [V[	R_1 [mΩ]
1	-400	10610	43,63	38,07	5,56	13,9
2	-120	8968	43,71	41,76	1,95	16,2
3	-240	9788	43,71	40,41	3,3	13,7

Πίνακας 5

Η τιμή που δίνεται στο datasheet του υπερπυκνωτή είναι 24mΩ. Παρατηρείται απόκλιση των αποτελεσμάτων του πειράματος από την αναμενόμενη τιμή αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται σε εξάρτηση της αντίστασης αυτής από την τάση, σφάλματα μέτρησης, σφάλματα στην παραγωγή του παλμού ρεύματος που χρειάζεται, ο οποίος φυσικά δεν γίνεται να παρουσιάζει απόλυτα ακαριαίες μεταβολές. Επίσης πρέπει να λάβουμε υπόψη και την θέρμανση του όλου συστήματος λόγω των συνεχόμενων φορτίσεων/εκφορτίσεων με ρεύματα της τάξης των εκατοντάδων αμπέρ.

4.1.2.5 Αντίσταση R2

Η αντίσταση αυτή αναπαριστά την αυτό-εκφόρτιση του πυκνωτή λόγω μη ιδανικότητας των υλικών και της κατασκευής του. Όπως είναι λογικό, το ρεύμα αυτό-εκφόρτισης είναι πάρα πολύ μικρό και δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα. Γι' αυτό το λόγο, η τιμή της αντίστασης R_2 πρέπει να είναι αρκετά μεγάλη. Μετά από μικρή έρευνα στη βιβλιογραφία, προτείνουμε μία τιμή μεταξύ 18kΩ-20kΩ.

4.1.2.6 Αντίσταση R3

Πρόκειται για την αντίσταση που χρησιμοποιείται για το balancing που εξηγήσαμε πιο πάνω και συνδέεται στο κύκλωμα μόνο αν η τάση ξεπεράσει μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή της μπορεί να βρεθεί μετρώντας την πτώση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή, αφότου το ρεύμα φόρτισης μηδενιστεί. Ουσιαστικά έχουμε ένα κύκλωμα RC που εκφορτίζεται και άρα η τάση στα άκρα του πυκνωτή είναι:

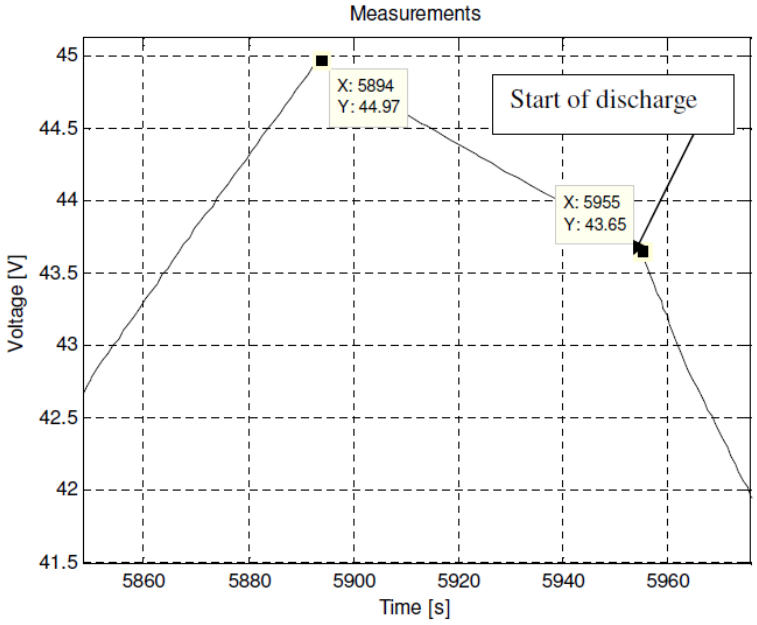
$$V_2 = V_1 \cdot e^{-\Delta t / R_3 C} \Leftrightarrow$$

$$\frac{V_2}{V_1} = e^{-\Delta t / R_3 C} \Leftrightarrow$$

$$\ln \frac{V_2}{V_1} = -\frac{\Delta t}{R_3 C} \Leftrightarrow$$

$$R_3 = -\frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) C}$$

Όπου τα V_1 και V_2 είναι η τάση στο τέλος της φόρτισης και στην αρχή της εκφόρτισης αντίστοιχα, και Δt, ο χρόνος που μεσολαβεί. Στο σχήμα 4.7 φαίνονται αυτά τα σημεία για μια από τις δοκιμές.



Σχήμα 4.7

Παίρνοντας στοιχεία από 4 δοκιμές φτιάχνουμε τον παρακάτω πίνακα:

# δοκιμής	t0 [s]	t1 [s]	V1 [V]	V2 [V]	V2/V1	Δt [s]	R3 (Ω)
1	5894	5955	44,97	43,65	0,971	61	59,75
2	7226	7286	44,96	43,71	0,972	60	62,10
3	8085	8143	44,91	43,71	0,973	58	62,50
4	8908	8968	44,97	43,71	0,972	60	61,61

Πίνακας 6

Η χωρητικότητα θεωρήθηκε στο πείραμα αυτό η ονομαστική του πυκνωτή που εξετάζουμε (33F) αφού η τιμή αυτή είναι κοντά και στις τιμές που υπολογίσαμε στην ενότητα 4.1.2.1.

4.1.2.7 Αντίσταση R_P

Η τιμή της αντίστασης αυτής δεν είναι δυνατόν να βρεθεί από τα διαγράμματα και τις μετρήσεις που διαθέτουμε, καθώς η αλλαγή που επιφέρει στο σχήμα της καμπύλης δεν είναι εμφανής. Η τιμή της βρέθηκε στη βιβλιογραφία [31]. Ο τρόπος που τελικά προσδιορίστηκε ήταν με δοκιμές, ώστε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να είναι όσο γίνεται πιο κοντά στα πραγματικά.

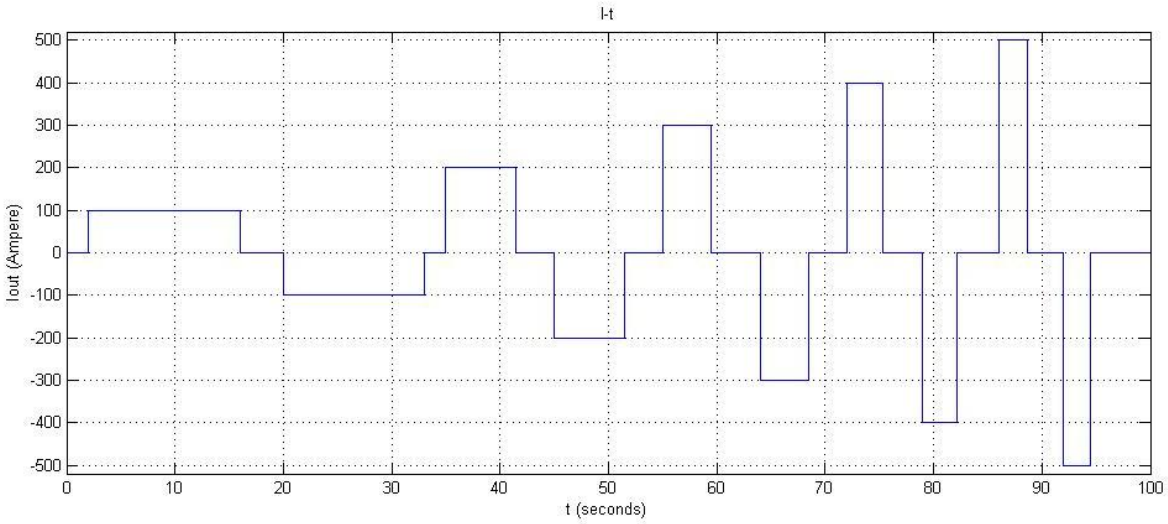
4.1.3 Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών των παραμέτρων του βασικού μοντέλου

Στοιχείο	R1 [mΩ]	R2 [kΩ]	R3 [Ω]	Rp [mΩ]	C [F]	Cp [F]
Τιμή	15	18	61	3	34	C/13

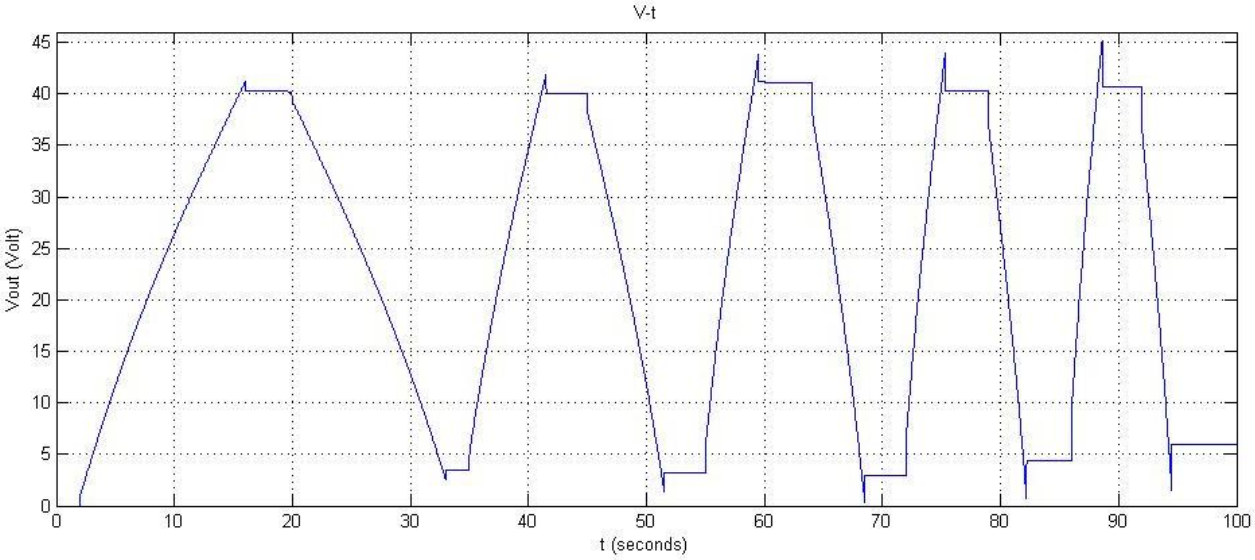
Πίνακας 7

4.1.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

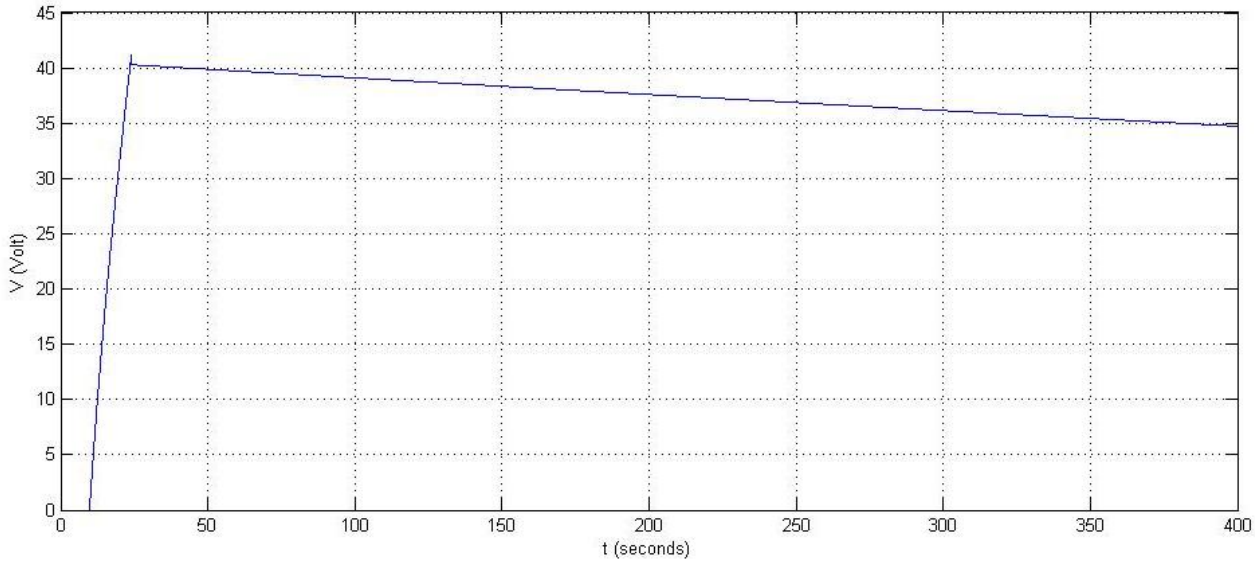
Δίνουμε για είσοδο στο μοντέλο μας ρεύμα της παρακάτω μορφής, και παρατηρούμε την απόκριση του μοντέλου μας για τις διάφορες μεταβλητές



Το πρώτο σημαντικό διάγραμμα είναι αυτό της τάσης στα άκρα του πυκνωτή

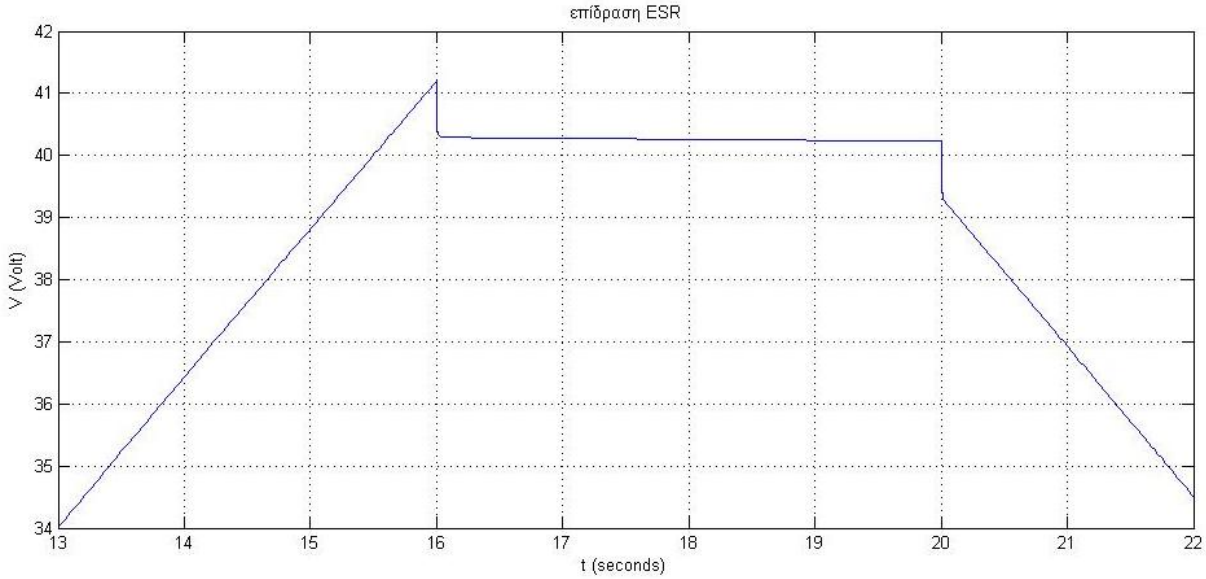


Παρατηρούμε ότι σε κάθε φόρτιση (θετικό ρεύμα – εισροή ρεύματος προς τον πυκνωτή), η τάση αυξάνεται ενώ κατά τις εκφορτίσεις η τάση μειώνεται. Η κλίση της καμπύλης της τάσης φαίνεται ότι εξαρτάται απ' το ύψος του ρεύματος, πράγμα λογικό αφού τα δύο μεγέθη έχουν στους πυκνωτές αυτή την εξάρτηση παραγώγου. Όταν το ρεύμα είναι μηδενικό (ανάμεσα στις φόρτο-εκφορτίσεις) η τάση του υπερπυκνωτή παραμένει σχεδόν σταθερή και όποια μικρή μείωση οφείλεται στην επίδραση της αντίστασης R2 (EPR – Equivalent Parallel Resistor), δηλαδή στις απώλειες διαμέσου του ηλεκτρολύτη του πυκνωτή. Αν φορτίσουμε τον πυκνωτή και τον αφήσουμε ανοικτοκυκλωμένο (μηδενικό ρεύμα) η επίδραση της R2 είναι πιο εμφανής, αφού μετά από ικανό χρονικό διάστημα ρίχνει εμφανώς την τάση, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

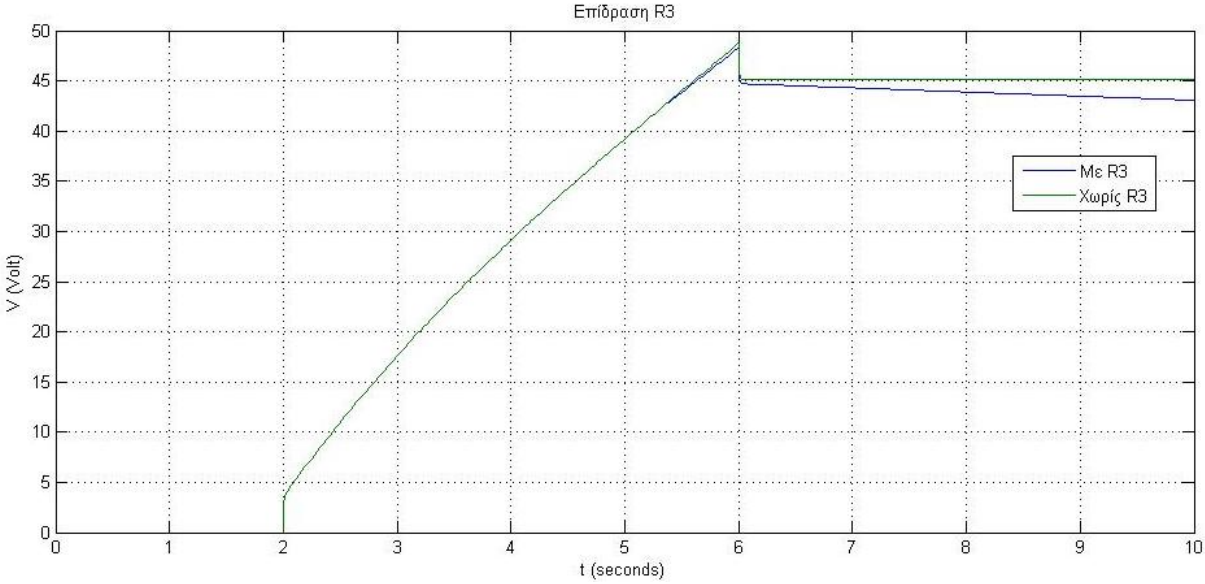


Στο διάγραμμα V-t φαίνεται και ένα άλλο σημαντικό φαινόμενο, αυτό της επίδρασης της ESR (Equivalent Series Resistance) που στο μοντέλο μας παριστάνεται από την R1. Η ύπαρξη της αντίστασης αυτής με πολύ μικρή τιμή, σε σειρά με την κύρια χωρητικότητα, οδηγεί σε σχεδόν ακαριαίες μικρές μεταβολές της τάσης κατά τις βηματικές αλλαγές του ρεύματος πριν αρχίσει το κύριο φαινόμενο φόρτισης/αποφόρτισης από την κύρια χωρητικότητα.

Στο παρακάτω διάγραμμα, έχουμε μεγεθύνει ένα τμήμα του διαγράμματος V-t ώστε να γίνει εμφανές το φαινόμενο αυτό.

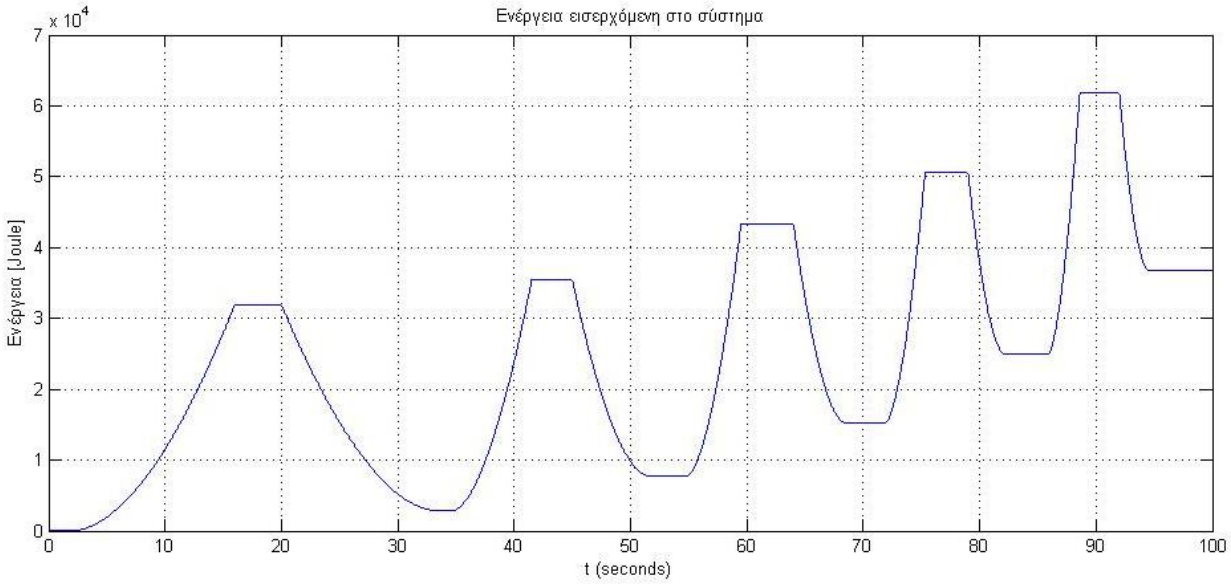


Ένα τελευταίο σημείο που αξίζει προσοχής είναι η επίδραση της αντίστασης R3 (Balancing Resistor) στην τάση του υπερπυκνωτή. Υπενθυμίζουμε ότι η αντίσταση αυτή συνδέεται παράλληλα στο κύκλωμα του υπερπυκνωτή μόνο αν η τάση ξεπεράσει ένα κατώφλι ώστε να την χαμηλώσει και να αποφευχθεί καταστροφή του στοιχείου. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η διαφορά στη μορφή της τάσης του υπερπυκνωτή αν γίνει ή όχι χρήση της αντίστασης αυτής. Οι δύο καμπύλες αρχίζουν να διαφέρουν με το που η τάση περνάει την οριακή τιμή των 42,83V που ορίσαμε στο ρελέ.

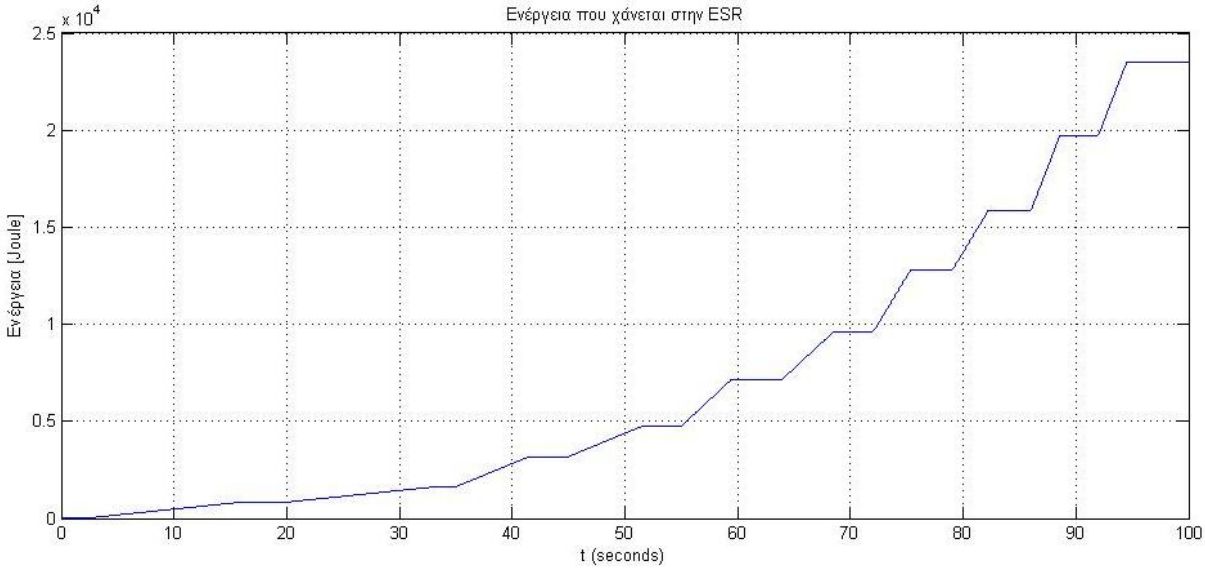


Στα επόμενα διαγράμματα δείχνουμε τις καμπύλες ενέργειας που εισέρχονται στο σύστημα του υπερπυκνωτή καθώς και το ποσό της ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμο κάθε στιγμή. Η διαφορά των δύο έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά κύριο λόγο πάνω στην αντίσταση σειράς (ESR).

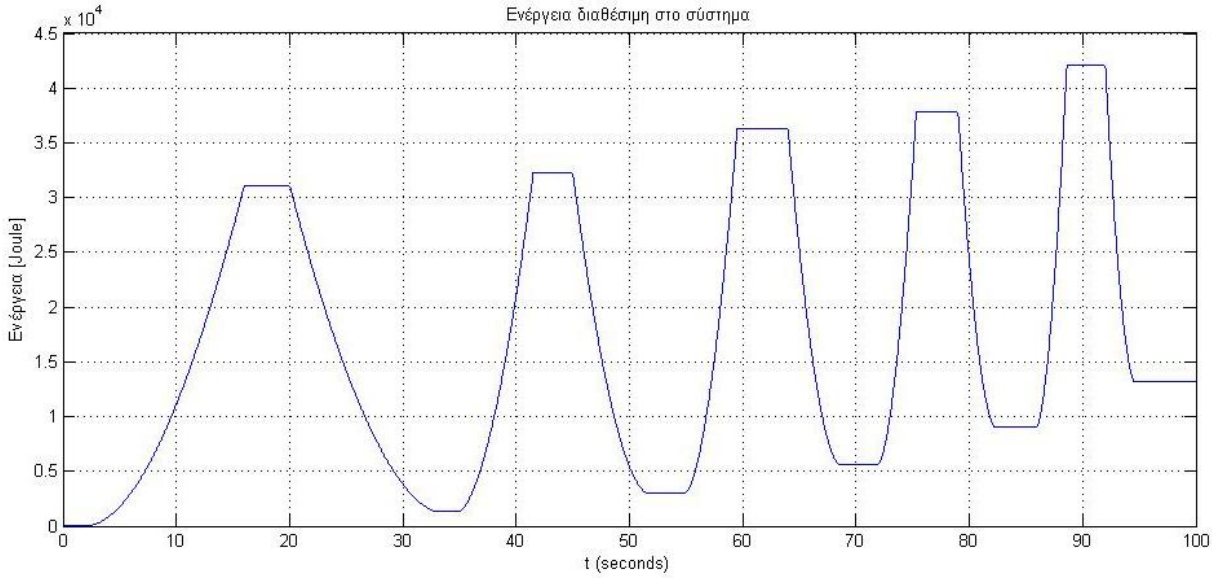
Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα με τη μορφή του ρεύματος φόρτισης που παρουσιάσαμε στο πρώτο διάγραμμα.



Η ενέργεια που έχει χαθεί κάθε στιγμή (και έχει μετατραπεί σε θερμότητα) πάνω στην αντίσταση σειράς είναι:



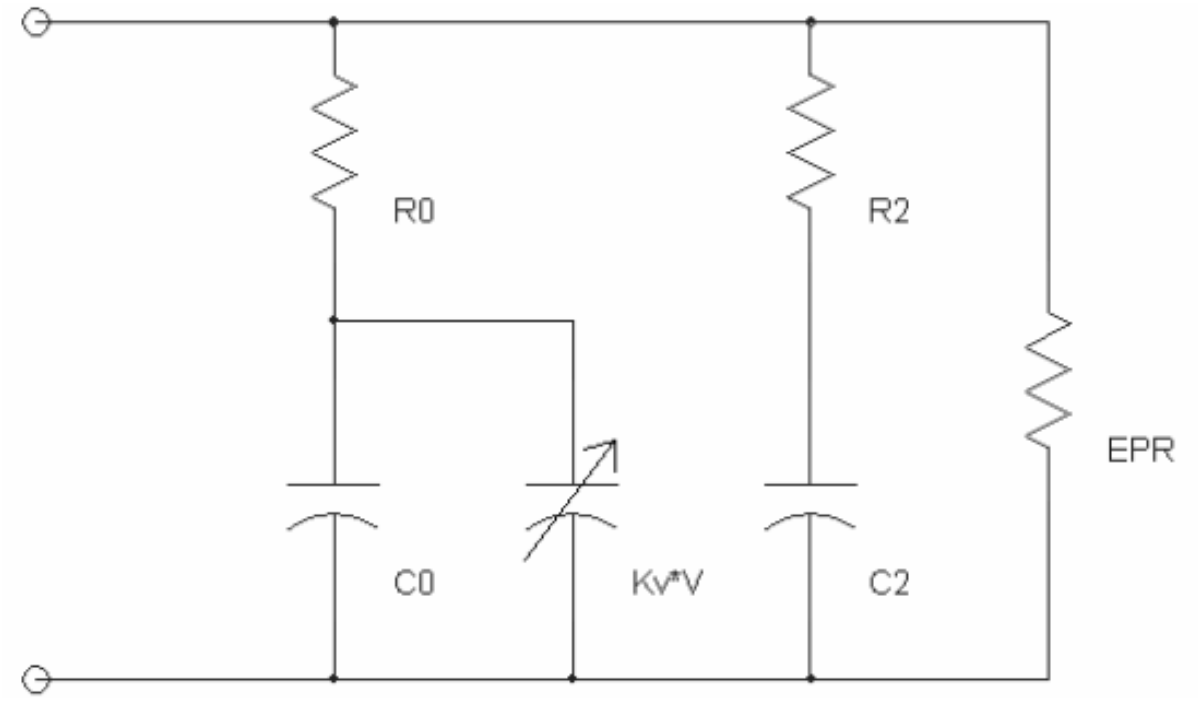
Και τελικά, η διαφορά των δύο είναι η διαθέσιμη (αποθηκευμένη) κάθε στιγμή ενέργεια στον υπερπυκνωτή.



4.2 Μοντέλο δύο κλάδων (Two branches model)

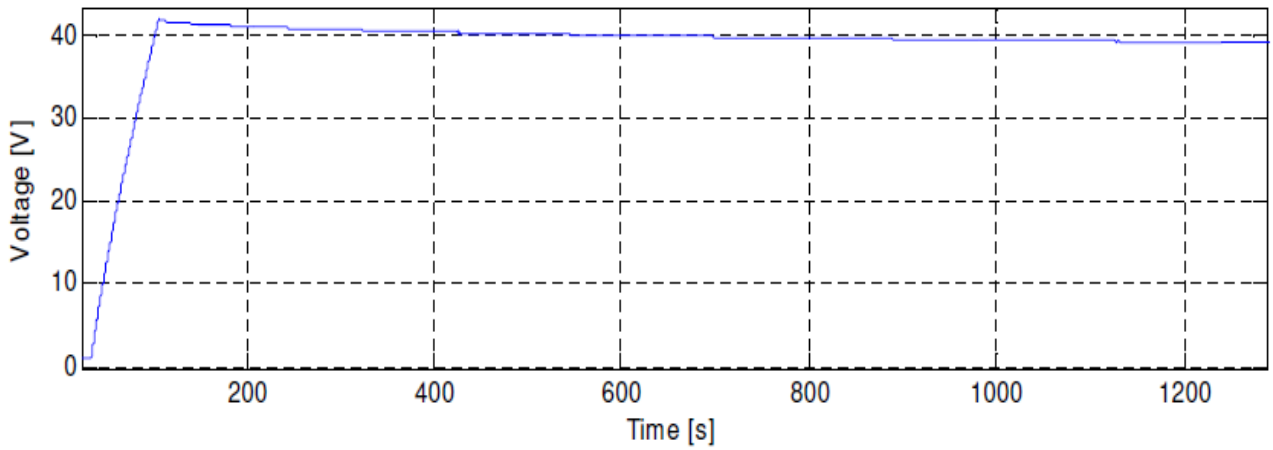
4.2.1 Περιγραφή μοντέλου

Το απλό μοντέλο του υπερπυκνωτή που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4.1 έχει κάποιες σημαντικές ατέλειες. Για παράδειγμα, δεν λαμβάνει υπόψη την εξάρτηση των διαφόρων παραμέτρων από τη θερμοκρασία. Επίσης ο τρόπος που μοντελοποιείται η δυναμική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή χρειάζεται βελτίωση, καθώς τα αποτελέσματα δεν ταιριάζουν με τα πειραματικά δεδομένα.
Το κυκλωματικό ισοδύναμο του υπερπυκνωτή, με βάση το μοντέλο των δύο κλάδων είναι αυτό που φαίνεται στο σχήμα 4.8.



Σχήμα 4.8

Το μοντέλο αυτό έχει προταθεί από τους R. Faranda, M. Gallina και D.T. Son σε σχετική εργασία τους [34]. Αναφέρεται ότι είναι ευκολότερο στη χρήση από άλλα πιο περίπλοκα μοντέλα, και ενώ είναι απλό στην υλοποίηση παρέχει ικανοποιητική ακρίβεια στα αποτελέσματά του. Ένα άλλο πλεονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ότι υπάρχει συγκεκριμένος τρόπος υπολογισμού των τιμών των παραμέτρων του. Στη βιβλιογραφία αναφέρεται ότι όλες οι τιμές των στοιχείων του σχήματος 4.8 μπορούν να προσδιοριστούν με μόνο ένα πείραμα και μάλιστα παίρνοντας μόνο 4 σημεία πάνω στην μετρούμενη καμπύλη της τάσης. Ο υπερπυκνωτής πρέπει να φορτιστεί πλήρως (από εντελώς εκφορτισμένος) με σταθερό ρεύμα. Όταν επιτευχθεί πλήρες φορτίο, το ρεύμα φόρτισης μηδενίζεται και παίρνουμε μετρήσεις της τάσης για 20 λεπτά. Τελικά προκύπτει η καμπύλη του σχήματος 4.9.



Σχήμα 4.9

Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων του πειράματος αυτού ακολουθείται η εξής διαδικασία.

Η αντίσταση σειράς (R0) προσδιορίζεται κοιτώντας το πρώτο τμήμα της καμπύλης κατά την άνοδο της τάσης. Κατά το χρονικό διάστημα αυτό, η χωρητικότητα θεωρείται πλήρως εκφορτισμένη (βραχυκύκλωμα), άρα όλη η τάση εφαρμόζεται στην αντίσταση R0. Χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$R0 = \frac{\Delta V}{I}$$

βρίσκουμε την ζητούμενη τιμή.

Χρησιμοποιώντας εξισώσεις που περιγράφουν την μεταβλητή χωρητικότητα, συσχετίζοντας το ρεύμα με την τάση του υπερπυκνωτή, βρίσκουμε δύο σχέσεις με τις οποίες υπολογίζονται οι παράμετροι:

$$C0 = \left[\frac{t_1}{V_1} - \frac{V_1 t_2 - V_2 t_1}{V_2^2 - V_1 V_2} \right] I$$

και

$$Kv = 2\left[\frac{V_1 t_2 - V_2 t_1}{V_1 V_2^2 - V_1^2 V_2} \right] I$$

Όπου τα V_1, V_2, t_1, t_2 αναφέρονται σε σημεία της καμπύλης του σχήματος 4.9 κατά την άνοδο της τάσης. Τα σημεία αυτά πρέπει να καλύπτουν αρκετά μεγάλο κομμάτι της ανόδου, χωρίς όμως να βρίσκονται στο ακραίο αρχικό τμήμα ή στο τελευταίο τμήμα της ανόδου, κοντά στην αρχή της περιοχής πτώσης της τάσης.

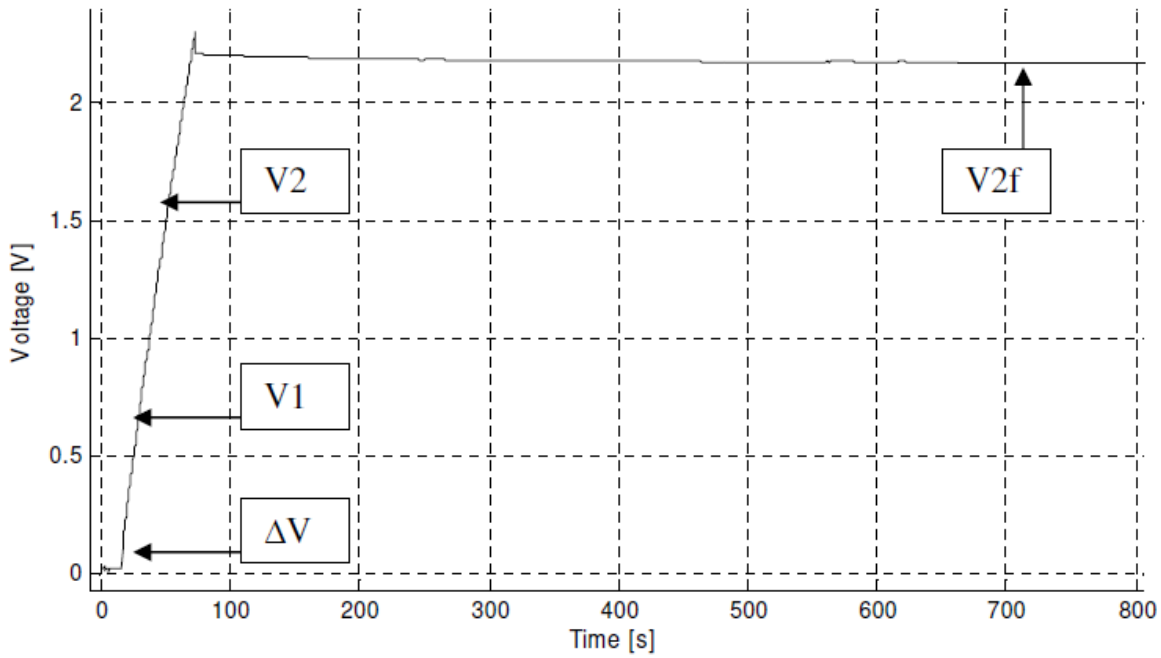
Τα στοιχεία R2 και C2 μοντελοποιούν τη δυναμική συμπεριφορά του πυκνωτή. Χρειάζεται να επιλεγεί μία σταθερά χρόνου που περιγράφει την συμπεριφορά αυτή. Στην εργασία που εισάγει το μοντέλο αυτό, έχει επιλεγεί μία σταθερά 250sec μετά από πειράματα με διάφορες σταθερές. Επειδή δεν είχαμε τη δυνατότητα εκτέλεσης παραπάνω πειραμάτων θα κρατήσουμε την τιμή αυτή. Η χρονική σταθερά αυτή, χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του μοντέλου μας κατά την αργή εκφόρτιση του πυκνωτή μετά την αρχική φόρτιση. Για την εύρεση του C2 χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση, όπου είναι όλα γνωστά εκτός απ' το ζητούμενο.

$$Q_{total} = I_C T_C = C2 \cdot V_{2f} + \left(C0 + \frac{Kv}{2} V_{2f} \right) V_{2f}$$

όπου V_{2f} είναι η τάση τη χρονική στιγμή που είναι 3 φορές η χρονική σταθερά που επιλέχθηκε (750sec).

Η χρονική σταθερά, όμως, δεν είναι τίποτε άλλο από το γινόμενο R2·C2, και συνεπώς ξέροντας το C2 υπολογίζουμε το R2 και πλέον όλες οι παράμετροι του μοντέλου των δύο κλάδων είναι γνωστές.
Η αντίσταση που φαίνεται ως EPR (Equivalent Parallel Resistor) μοντελοποιεί τις απώλειες διαμέσου του πυκνωτή που οφείλονται σε ατέλειες των υλικών και της κατασκευής του. Μπορεί να υπολογιστεί μετρώντας την κλίση της καμπύλης τάσης του πυκνωτή αρκετό χρόνο μετά τη φόρτιση αλλά με τάση που δεν ξεπερνά την κρίσιμη τάση σύνδεσης της αντίστασης εξισορρόπησης (δεν φαίνεται στο σχήμα 4.8).

Στο σχήμα 4.10 φαίνονται οι θέσεις όλων των παραπάνω σημείων πάνω στην καμπύλη των μετρήσεων για έναν υπερπυκνωτή 2700F 2,3V από την Nippon Chemi-Con [46]. Το ρεύμα φόρτισης ήταν 100A.



Σχήμα 4.10

Σε αυτό το σημείο να αναφέρουμε κάποιες λεπτομέρειες για τη σωστή εκτέλεση του πειράματος όσον αφορά τη λήψη των μετρήσεων. Τα σημεία V1 και V2 εμπεριέχουν την πτώση τάση πάνω στην αντίσταση σειράς και εφόσον χρησιμοποιούνται αυτούσια στους υπολογισμούς και όχι η διαφορά τους, πρέπει η τάση αυτή να αφαιρεθεί. Επίσης, για να έχουμε σωστά χρονικά αποτελέσματα ο χρόνος πρέπει να ξεκινάει μετά την αρχική άνοδο της τάσης λόγω της αντίστασης σειράς, με την έναρξη της φόρτισης του υπερπυκνωτή.
Στον πίνακα 8 φαίνονται οι τιμές που εξήχθησαν για όλα τα παραπάνω μεγέθη από την καμπύλη τάσης καθώς και οι υπολογισμοί των παραμέτρων σύμφωνα με όσα αναφέραμε πιο πάνω.

ΔV [V]	I [A]	V1 [V]	t1 [s]	V2 [V]	t2 [s]	V2f [V]	Tc [s]	χρονική σταθερά [s]
0,14993	100	0,6786	15	1,6786	38,33	2,1714	57,33	250

Πίνακας 8

Και προκύπτουν:

R0 [Ω]	C0 [F]	Kv [F/V]	C2 [F]	R2 [Ω]
0,001499	2161	146,0	321,0	0,7793

Πίνακας 9

4.2.2 Μοντέλο Simulink

Με ανάλυση του κυκλωματικού μοντέλου που φαίνεται στο σχήμα 4.8 προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$V = I \cdot Z_{o\lambda}$$

όπου

$$Z_{o\lambda} = \left(R_0 + \frac{1}{sC_0} // \frac{1}{sC'} \right) // \left(R_2 + \frac{1}{sC_2} \right) // R_{EPR} \Leftrightarrow$$

$$Z_{o\lambda} = \frac{\left(R_0 + \frac{1}{s(C_0 + C')} \right) \cdot \left(R_2 + \frac{1}{sC_2} \right)}{R_0 + \frac{1}{s(C_0 + C')} + R_2 + \frac{1}{sC_2}} // R_{EPR}$$

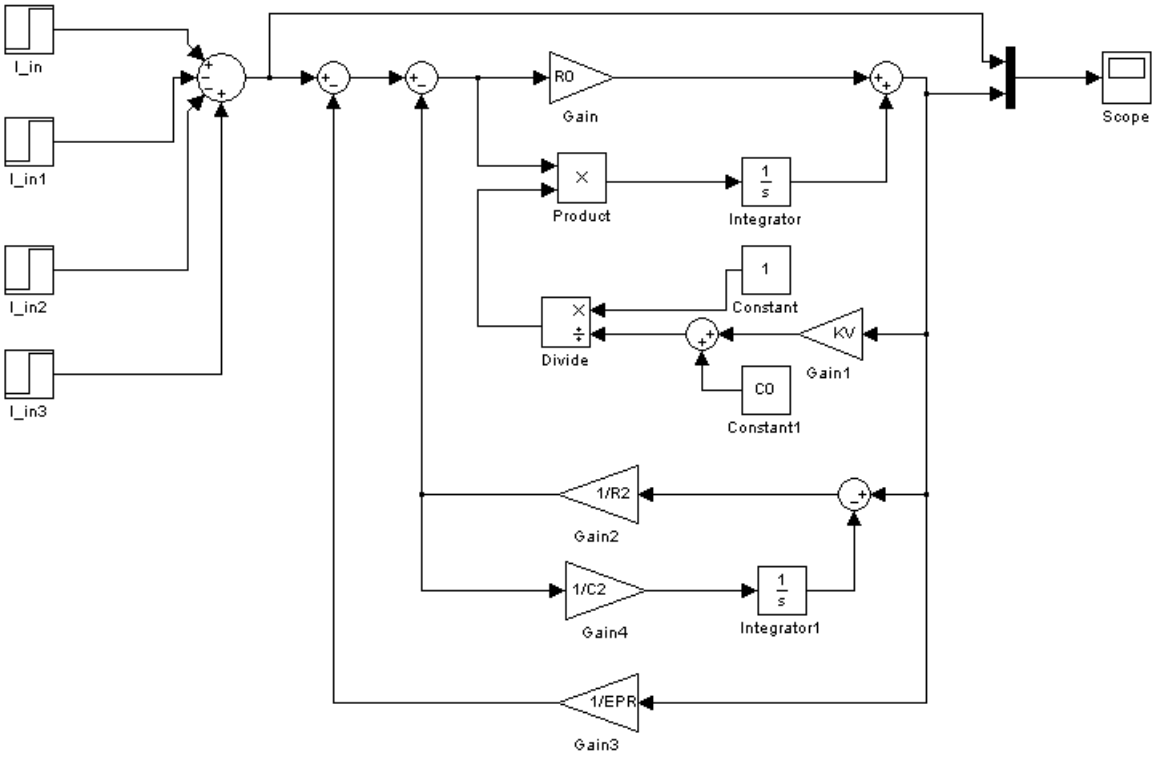
με

$$C' = \mathrm{K}_V \cdot V$$

Μετά από πράξεις καταλήγουμε στην πιο εύχρηστη, για τη μοντελοποίηση, έκφραση:

$$V = I \cdot \frac{\left(R_0 + \frac{1}{s\left(C_0 + C'\right)} \right) \left(R_2 + \frac{1}{sC_2} \right) R_{EPR}}{R_2 R_{EPR} + \frac{R_{EPR}}{sC_2} + R_0 R_{EPR} + \frac{R_{EPR}}{s\left(C_0 + C'\right)} + R_0 R_2 + \frac{R_0}{sC_2} + \frac{R_2}{s\left(C_0 + C'\right)} + \frac{1}{s^2 C_2 \left(C_0 + C'\right)}}$$

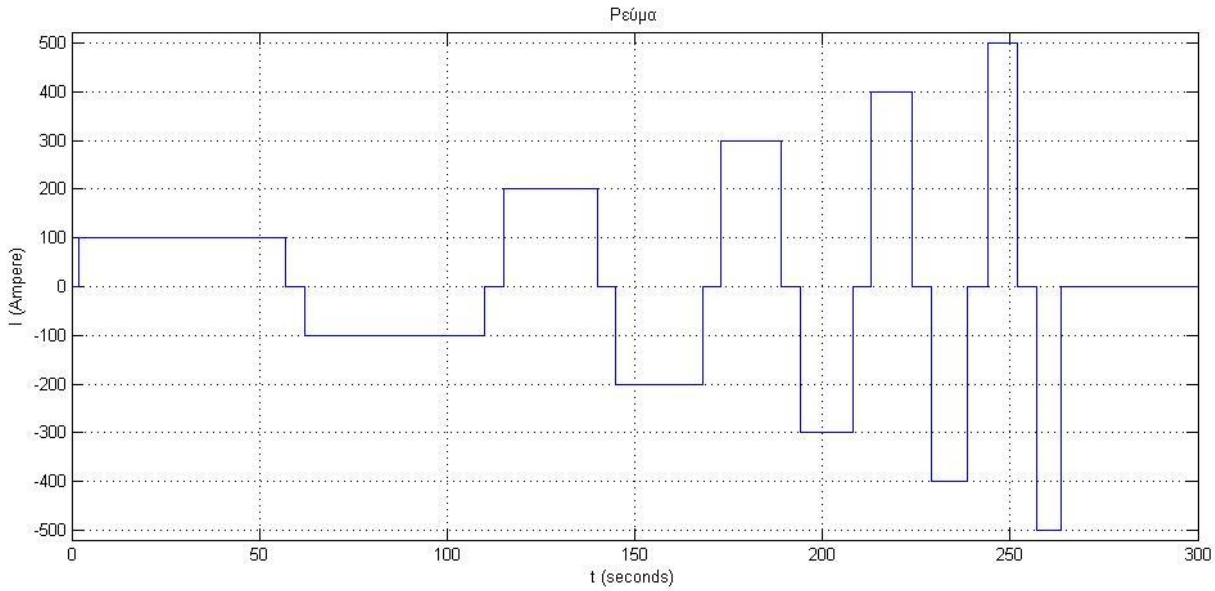
Το αντίστοιχο μοντέλο στο Simulink μπορεί να υλοποιηθεί ως εξής:



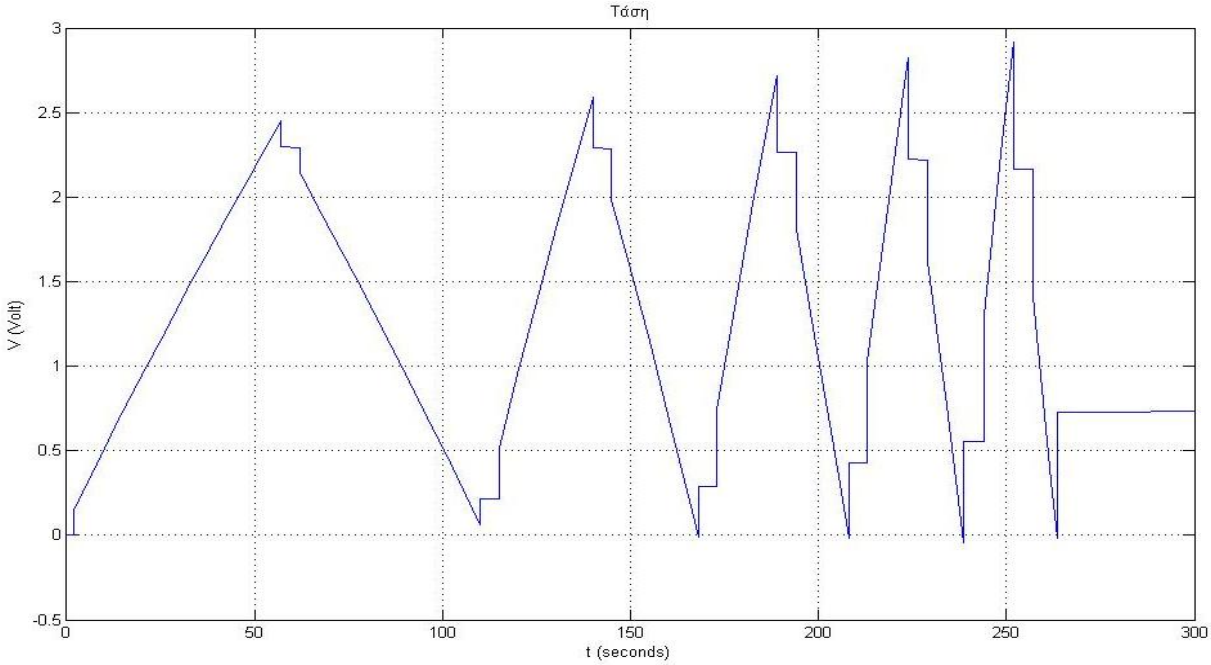
Σχήμα 4.11

4.2.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Ακολουθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του παραπάνω μοντέλου στο Simulink.
Το ρεύμα στην είσοδο του μοντέλου είχε την εξής μορφή:

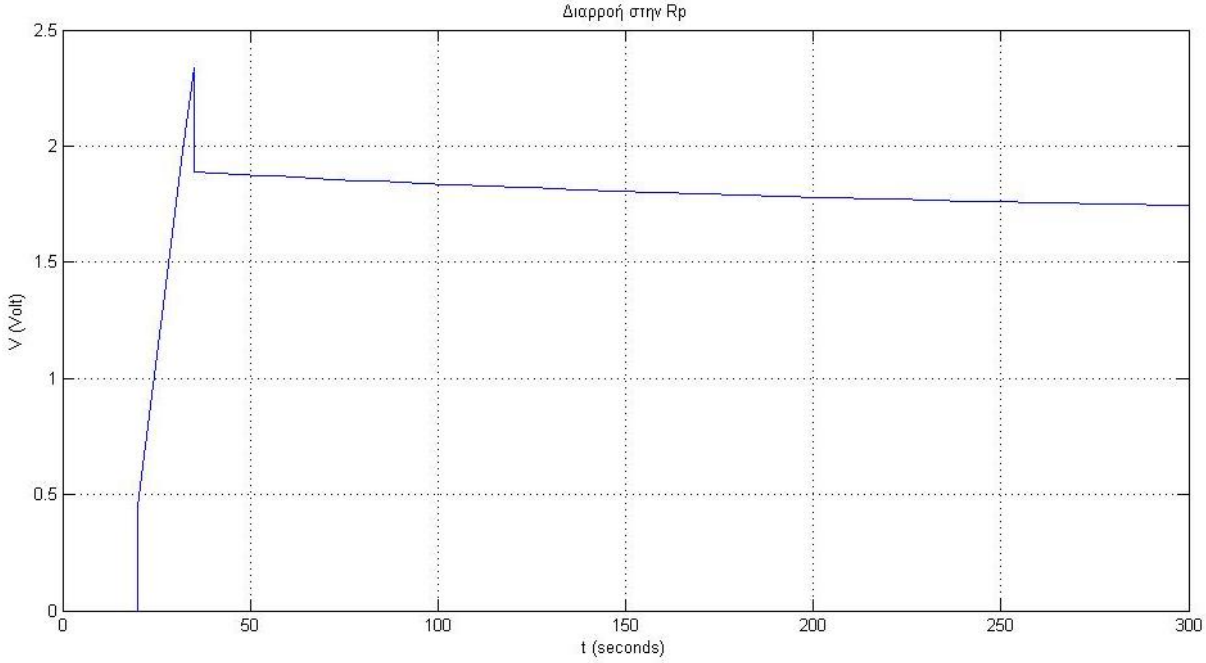


Και η τάση του υπερπυκνωτή όπως προκύπτει από το μοντέλο είναι:



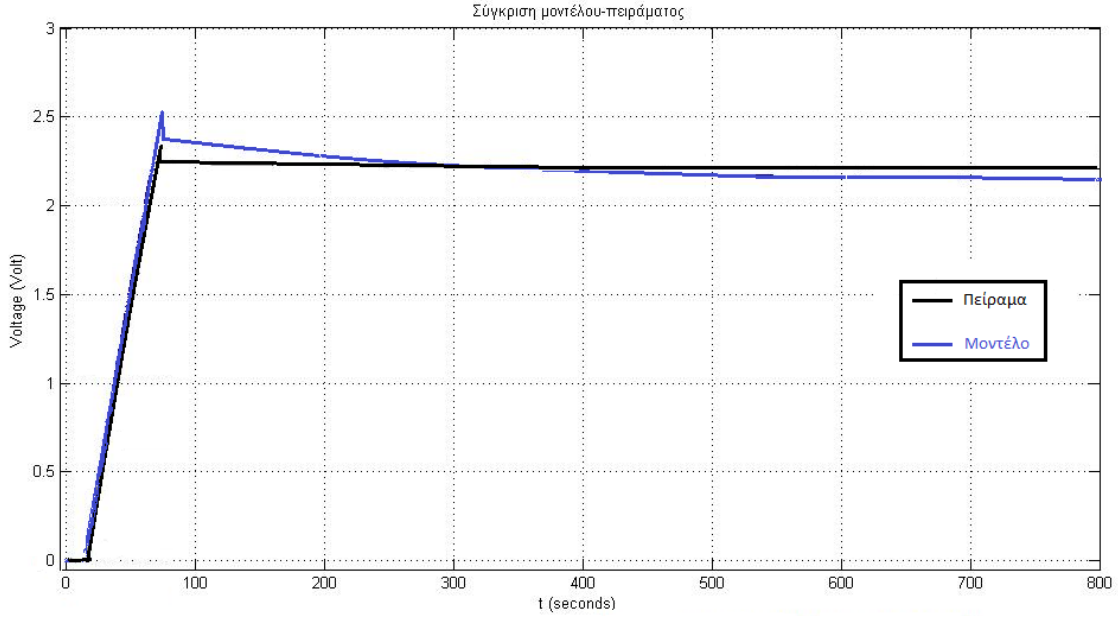
Η μορφή της καμπύλης είναι παρόμοια με αυτή του βασικού μοντέλου αλλά δυστυχώς δεν είναι συγκρίσιμες αφού αφορούν διαφορετικούς πυκνωτές επειδή δεν ήταν δυνατόν να βρούμε τα στοιχεία που θέλαμε και για τις δύο μοντελοποιήσεις σε διαγράμματα μετρήσεων για τον ίδιο πυκνωτή. Ένα αξιοσημείωτο φαινόμενο είναι ότι τώρα οι επιδράσεις της ESR ως ακαριαίες αλλαγές της τάσης είναι πολύ πιο εμφανείς και οδηγούν σε μεγαλύτερες διακυμάνσεις που πολλές φορές υπερβαίνουν την ονομαστική τάση του στοιχείου.

Και πάλι μπορούμε να δούμε την επίδραση της παράλληλης αντίστασης R_P που διαπιστώνεται ως μία αργή μείωση στην τάση όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



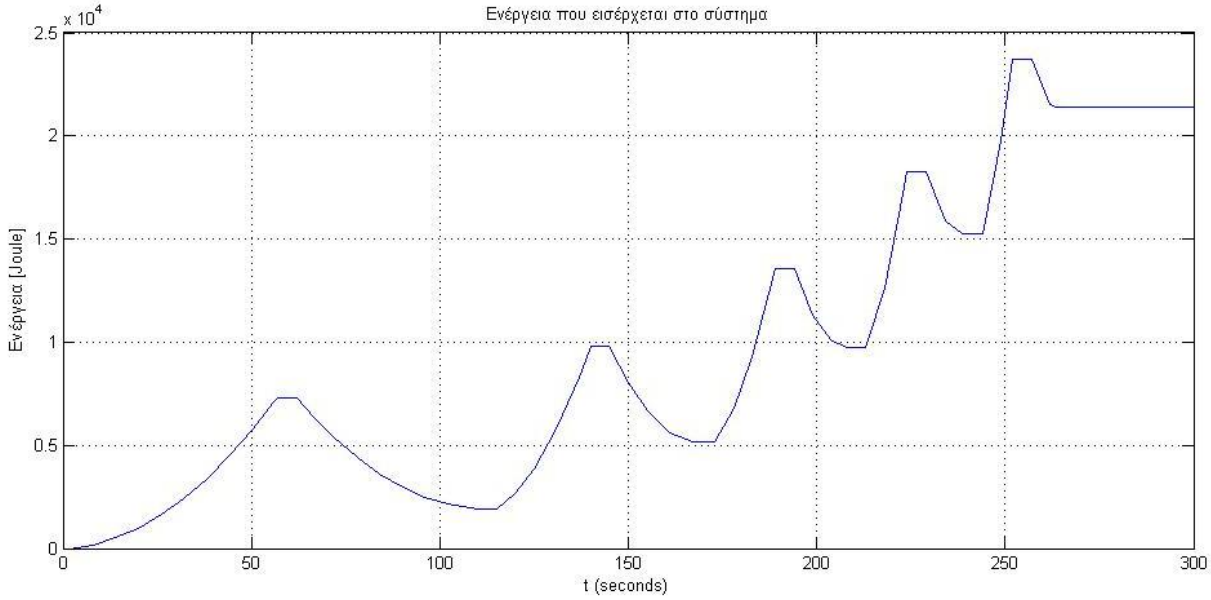
Έχοντας βρει τις πειραματικές καμπύλες για τον πυκνωτή αυτόν στη βιβλιογραφία [31] μπορούμε να διαπιστώσουμε κατά πόσο συμφωνεί το μοντέλο με τις παρατηρήσεις, βάζοντας στο ίδιο διάγραμμα

την πειραματική καμπύλη που προέκυψε από μέτρηση της τάσης του πυκνωτή κατά τη φόρτισή του και το αποτέλεσμα της προσομοίωσης έχουμε:

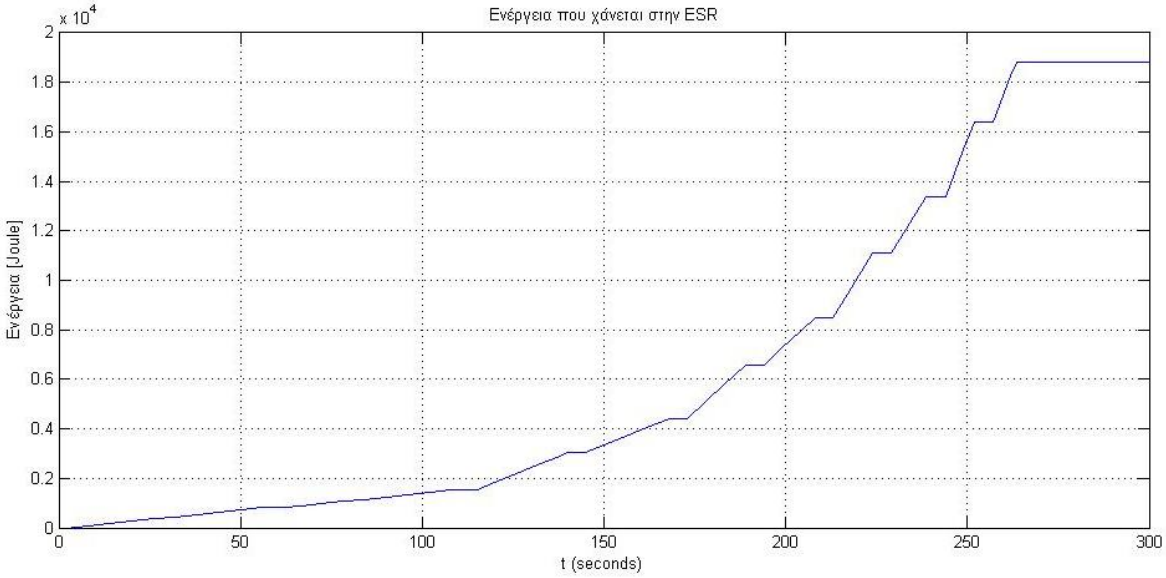


Το μοντέλο είναι σχετικά ακριβές αλλά ειδικά στο πρώτο κομμάτι της καμπύλης εμφανίζει αρκετά μεγάλη απόκλιση που πιθανότατα οφείλεται στην έλλειψη θερμικής μοντελοποίησης από το μοντέλο δύο κλάδων. Το πρόβλημα λύνεται με την εισαγωγή της μοντελοποίησης της θερμοκρασιακής εξάρτησης διαφόρων μεγεθών όπως η αντίσταση σειράς και η χωρητικότητα, στο βελτιωμένο μοντέλο δύο κλάδων που αναπτύξαμε.

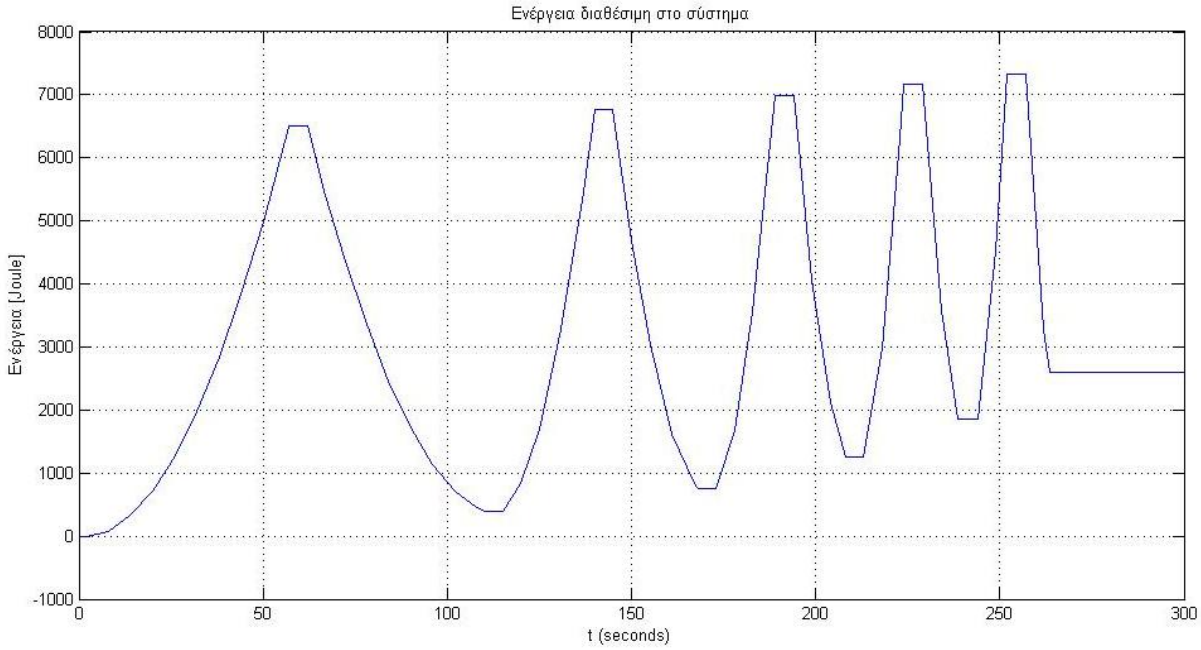
Στα επόμενα διαγράμματα δείχνουμε τις καμπύλες ενέργειας που εισέρχονται στο σύστημα του υπερπυκνωτή καθώς και το ποσό της ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμο κάθε στιγμή. Η διαφορά των δύο έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά κύριο λόγο πάνω στην αντίσταση σειράς (ESR). Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα με τη μορφή του ρεύματος φόρτισης που παρουσιάσαμε στο πρώτο διάγραμμα.



Η ενέργεια που έχει χαθεί κάθε στιγμή (και έχει μετατραπεί σε θερμότητα) πάνω στην αντίσταση σειράς είναι:



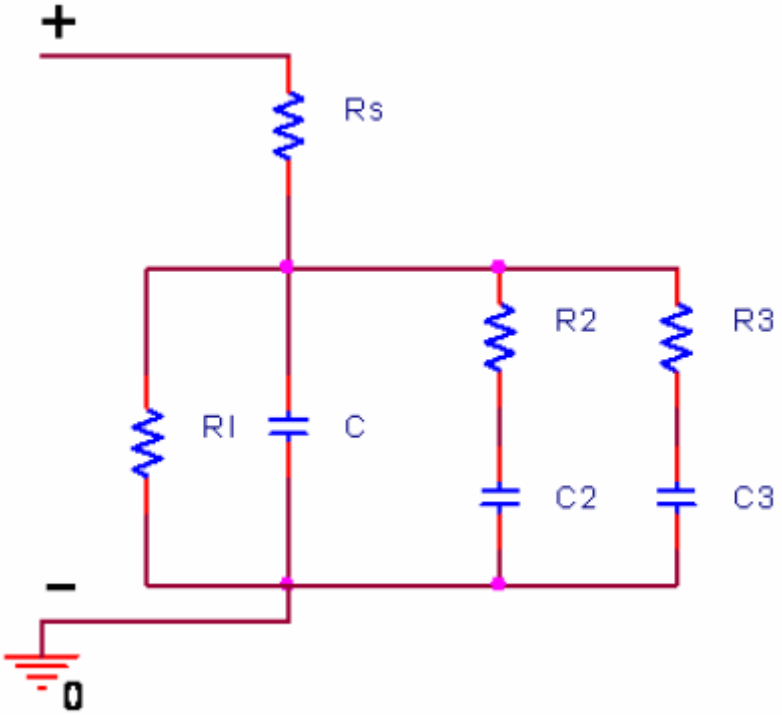
Και τελικά, η διαφορά των δύο είναι η διαθέσιμη (αποθηκευμένη) κάθε στιγμή ενέργεια στον υπερπυκνωτή.



4.3 DTDSM

4.3.1 Περιγραφή Μοντέλου

Το μοντέλο με το οποίο θα ασχοληθούμε εκτενέστερα παρακάτω είναι το DTDSM (Dynamic Temperature Dependent Supercapacitor Model). Το μοντέλο προτάθηκε από τους P. Johansson και B. Andersson στην εργασία τους "Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modeling", και το κυκλωματικό του ισοδύναμο φαίνεται στο σχήμα 4.12.[31]



Σχήμα 4.12

Η αποθηκευτική ικανότητα ενέργειας του υπερπυκνωτή συμβολίζεται με την κύρια χωρητικότητα C. Οι δύο παράλληλοι κλάδοι με τις χωρητικότητες C2 και C3 μοντελοποιούν τη δυναμική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή. Η αντίσταση σειράς συμβολίζεται με την Rs και οι απώλειες φορτίου λόγω ατελειών στην κατασκευή και τα υλικά αναπαρίστανται με την παράλληλη αντίσταση μεγάλης τιμής R1. Οι ηλεκτρικές εξισώσεις του ισοδυνάμου κυκλώματος είναι:

$$V_c = V_{esr} + V_s \Rightarrow V_c = I \cdot R_s + \left(I - I_2 - I_3\right) \cdot \left(R_1 // \frac{1}{sC}\right)$$

όπου I_2 I_3 τα ρεύματα που διαρρέουν τους κλάδους R_2C_2 και R_3C_3 αντίστοιχα και V_s η τάση στα άκρα του πυκνωτή απο το κυκλωματικό ισοδύναμο.

Και για το ρεύμα:

$$I_{dynamics} = I_2 + I_3 \Rightarrow I_{dynamics} = \frac{V_s}{R_2 + \frac{1}{sC_2}} + \frac{V_s}{R_3 + \frac{1}{sC_3}}$$

Ένα μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι η αδυναμία μοντελοποίησης των δυναμικών μεταβολών με πολύ μεγάλες χρονικές σταθερές. Θα μπορούσε βέβαια να προστεθεί ένας ακόμη παράλληλος κλάδος αλλά αυτό θα αύξανε την περιπλοκότητα του μοντέλου και συνεπώς το χρόνο που χρειάζεται για το 'τρέξιμό' του στο Simulink. Μια εναλλακτική λύση θα ήταν η χρήση του κλάδου των R3, C3 για τις αργές μεταβολές (με κατάλληλη προς τα πάνω αναπροσαρμογή των τιμών των στοιχείων αυτών), αλλά και πάλι θα ενδέχεται να παρουσιαστούν προβλήματα στην μοντελοποίηση των γρήγορων μεταβολών. Η διαπίστωση αυτή ισχύει για τα περισσότερα μοντέλα αυτού του τύπου με κλάδους, όπου χρειάζεται να επιλέξουμε ποια χαρακτηριστικά του πραγματικού συστήματος μας ενδιαφέρουν πιο πολύ να μοντελοποιηθούν, ώστε να έρθουμε σε έναν συμβιβασμό ανάμεσα στην ακρίβεια και την πολυπλοκότητα του ισοδύναμου κυκλώματος.
Η καινοτομία αυτού του μοντέλου σε σχέση με τα προηγούμενα είναι ότι εισάγει την μοντελοποίηση της εξάρτησης των παραμέτρων από τη θερμοκρασία. Όχι μόνο λαμβάνοντας υπόψη τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος αλλά αναπαριστώντας και πώς τα διάφορα στοιχεία του κυκλώματος αλλάζουν τη θερμοκρασία του πυκνωτή κατά τη λειτουργία τους. Λόγω της αρκετά μεγάλης πολυπλοκότητας του κυκλώματος, τα διάφορα κομμάτια του μοντελοποιήθηκαν σε διαφορετικά sub-blocks του Simulink και ενώθηκαν εξωτερικά ώστε να παρουσιάζουν καλή εποπτική εικόνα.
Τα στοιχεία του μοντέλου που έχουν σταθερές τιμές φαίνονται στον πίνακα 10 και αναφέρονται σε συγκεκριμένο μοντέλο υπερπυκνωτή (2,3V, 2300F της Nippon Chemicon). Και έχουν προκύψει μετά από έρευνα σε σχετική βιβλιογραφία [46] ώστε να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα για τον πυκνωτή αυτόν.

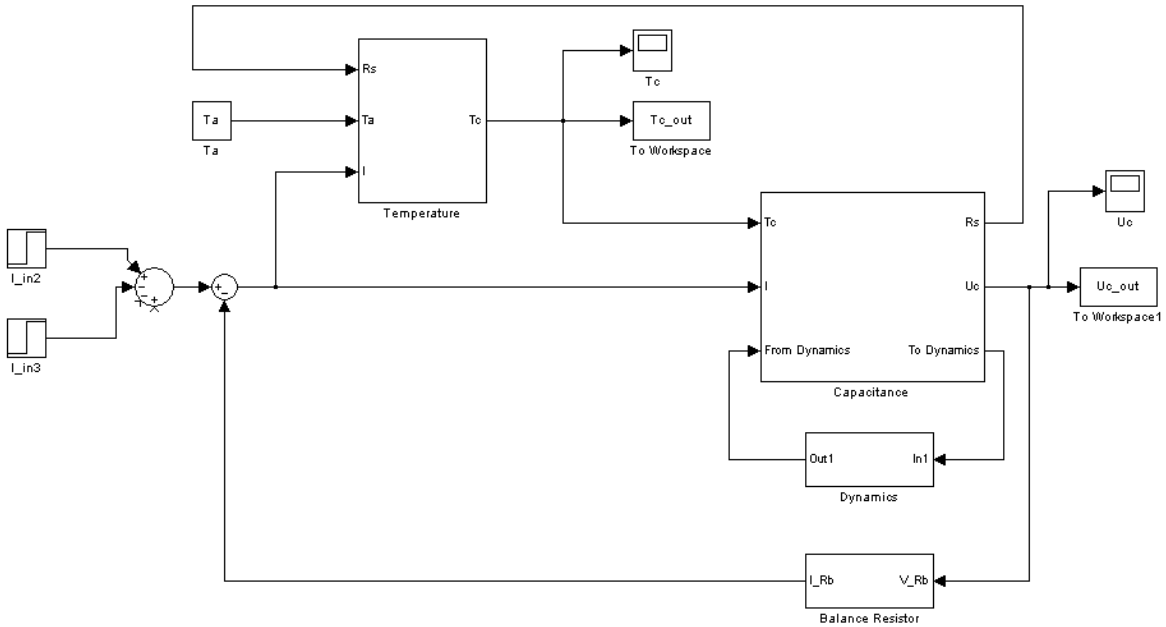
Παράμετρος	**R1 [kΩ]**	**C2 [F]**	**C3 [F]**	**R2 [Ω]**	**R3 [Ω]**
Τιμή	15	80	145	0,5	10

Πίνακας 10

Τα υπόλοιπα στοιχεία (C και Rs) είναι μη γραμμικά και άρα δεν έχουν απλές αριθμητικές τιμές.

4.3.2 Μοντέλο Simulink – Ανάλυση

Το μοντέλο Simulink έχει τη μορφή του σχήματος:



Σχήμα 4.13

4.3.2.1 Κύρια χωρητικότητα (C) και δυναμική συμπεριφορά

Η κύρια χωρητικότητα περιγράφεται από το στοιχείο C και μοντελοποιείται με τρόπο παρόμοιο με αυτόν του βασικού μοντέλου. Δηλαδή, γίνεται χρήση ενός Lookup Table που περιγράφει την εξάρτηση της χωρητικότητας από την τάση. Ο πίνακας αυτός κατασκευάζεται από τις καμπύλες των μετρήσεων που έχουμε για κάθε πυκνωτή σε θερμοκρασία δωματίου (23 ^{o}C). Προφανώς, κάθε υπερπυκνωτής έχει διαφορετικό Lookup Table.
Η χωρητικότητα εξαρτάται επίσης και από τη θερμοκρασία (κεφάλαιο 3.1.2). Αυτό μπορεί να εισαχθεί στο μοντέλο αυτό με τη χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή (corr) ο οποίος θα εξαρτάται απ' τη θερμοκρασία και θα πολλαπλασιάζεται με την χωρητικότητα που προκύπτει απ' τον Lookup Table. Έτσι θα έχουμε ουσιαστικά μία αναπροσαρμοζόμενη καμπύλη χωρητικότητας-τάσης, ανάλογα με τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται με κατάλληλη συνάρτηση στο Matlab όπου λαμβάνουμε το λόγο της χωρητικότητας στην ζητούμενη θερμοκρασία προς την ονομαστική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή, Δηλαδή:

$$corr = \frac{p1 \cdot T_C^3 + p2 \cdot T_C^2 + p3 \cdot T_C + p4}{C_{nom}}$$

Ο αριθμητής του κλάσματος περιέχει την πολυωνυμική προσέγγιση της καμπύλης που περιγράφει την μεταβολή της χωρητικότητας λόγω της θερμοκρασίας. Η καμπύλη προκύπτει από τις μετρήσεις που έγιναν για τη δημιουργία των καμπυλών του σχήματος 3.2. Για τον πυκνωτή που μελετούμε οι συντελεστές αυτοί είναι:

$$p1 = 0,002161$$
$$p2 = -0,06140$$
$$p3 = -0,18243$$
$$p4 = 2701,990$$
$$\kappa\alpha\iota$$
$$C_{NOM} = 2700\ F$$

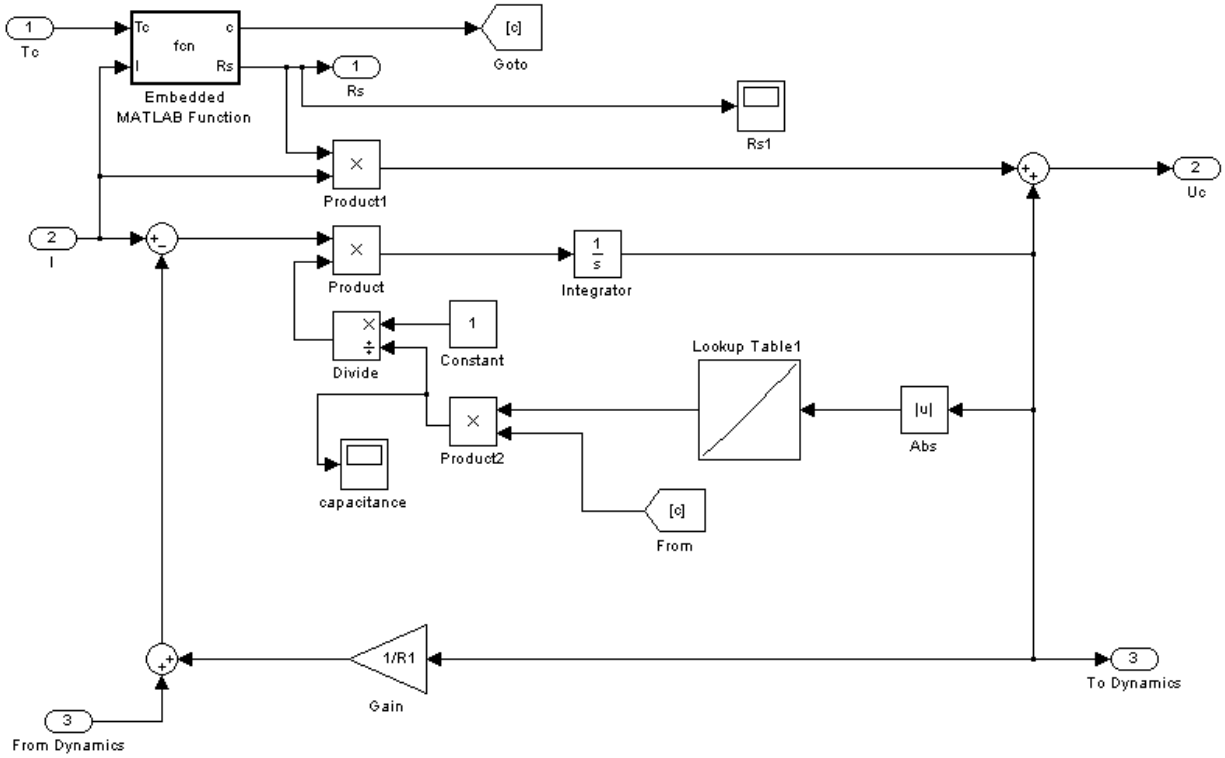
Οι εξισώσεις που δίνουν την τάση του υπερπυκνωτή προκύπτουν από το κυκλωματικό μοντέλο ως:

$$Uc = I \cdot R_S + \frac{I}{s \cdot c \cdot C\left(U_c\right) + A + \frac{1}{R_1}}$$

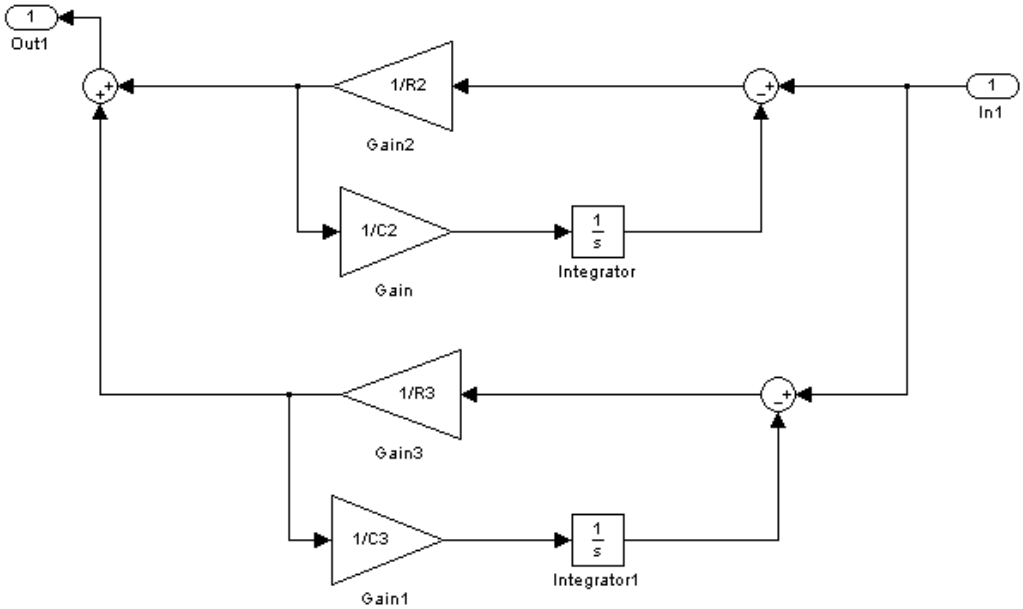
όπου

$$\mathrm{A} = \frac{1}{R_2\left(1 + \frac{1}{sC_2R_2}\right)} + \frac{1}{R_3\left(1 + \frac{1}{sC_3R_3}\right)}$$

Τα παραπάνω μοντελοποιούνται μέσω των sub-blocks 'Capacitance' και 'Temperature' τα οποία φαίνονται εσωτερικά στα σχήματα 4.14 και 4.15.

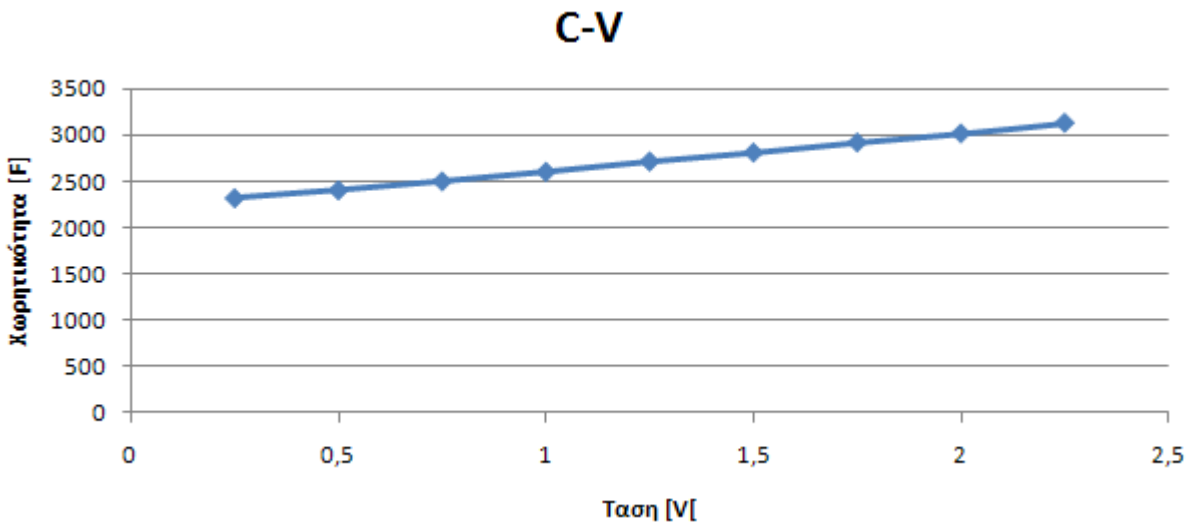


Σχήμα 4.14 – 'Capacitance' Block



Σχήμα 4.15 – 'Dynamics' Block

Το lookup table που εκφράζει την εξάρτηση της χωρητικότητας από την τάση είναι η καμπύλη που βρήκαμε για τον συγκεκριμένο υπερπυκνωτή, στη βιβλιογραφία [31].



Σχήμα 4.16

4.3.2.2 Αντίσταση σειράς (R_S)

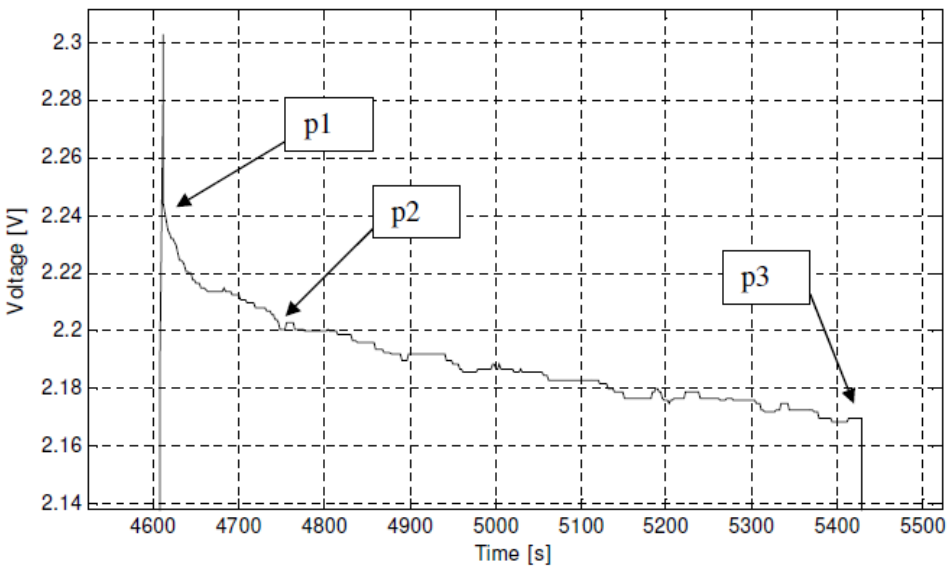
Η τιμή της αντίστασης σειράς, και αυτή εξαρτάται από τη θερμοκρασία (κεφάλαιο 3.1.1). Στην πράξη, είναι το στοιχείο που παράγει τις περισσότερες απώλειες κατά τις φορτίσεις και εκφορτίσεις του υπερπυκνωτή. Παράγει θερμότητα και τελικά αυξάνει τη θερμοκρασία του υπερπυκνωτή, με τρόπο που φυσικά εξαρτάται και από τη θερμική συμπεριφορά των υλικών του, της συσκευασίας του κτλ. Για τη μοντελοποίηση της εξάρτησης αυτής χρησιμοποιείται μία εκθετική συνάρτηση, κατάλληλη ώστε να προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα. Η συνάρτηση αυτή, επίσης υπολογίζεται από το Matlab μαζί με το συντελεστή corr της χωρητικότητας στο ίδιο αρχείο κώδικα, για κάθε κύκλο της προσομοίωσης. Η μορφή της συνάρτησης είναι:

$$Rs = Ae^{-\lambda T}$$

όπου A η αρχική τιμή της, T η θερμοκρασία και λ ο συντελεστής που περιγράφει τη μορφή της εκθετικής. Για τον υπό εξέταση πυκνωτή, οι συντελεστές αυτοί είναι:

$$A = 0,0013 \quad \kappa\alpha\iota \quad \lambda = 0,0219$$

Οι δύο κλάδοι που συνδέονται παράλληλα στην κύρια χωρητικότητα, που αποτελούνται από τα στοιχεία R2, C2, R3, C3 μοντελοποιούν την δυναμική συμπεριφορά του υπερπυκνωτή σε αργές μεταβολές, δηλαδή, μετά την φόρτιση ή την εκφόρτιση. Στο σχήμα 4.17 φαίνεται η εκθετική μορφή της καμπύλης εκφόρτισης ενός υπερπυκνωτή, μετά την αρχική σχεδόν ακαριαία πτώση τάσης που οφείλεται στην αντίσταση σειράς.



Σχήμα 4.17

Τα τρία σημεία p1, p2 και p3 που έχουν χαραχθεί στο διάγραμμα χρησιμοποιούνται για να προσδιορισθεί η εκθετική αυτή συμπεριφορά.

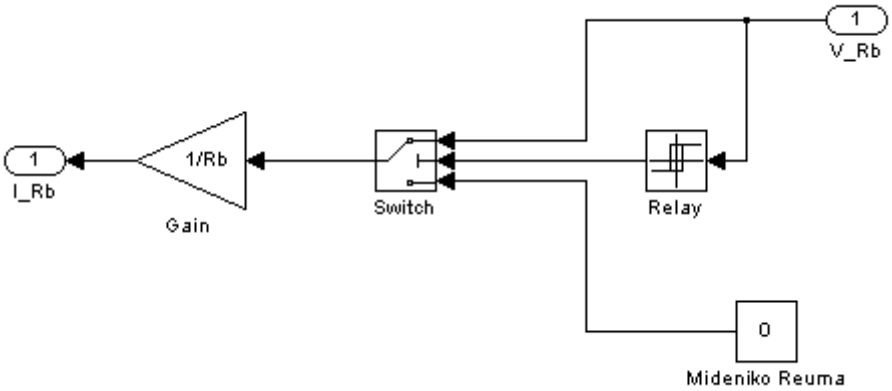
Η δυναμική συμπεριφορά ενός υπερπυκνωτή, στην πραγματικότητα, προσπαθεί να προσομοιώσει την άνιση κατανομή των φορτίων πάνω στο στρώμα άνθρακα [35]. Θα μπορούσαμε να εισάγουμε επιπλέον παράλληλους κλάδους, ώστε να συμπεριλάβουμε και άλλα δυναμικά φαινόμενα. Όμως η πολυπλοκότητα του μοντέλου γίνεται πολύ μεγαλύτερη χωρίς να υπάρξει ανάλογη βελτίωση στην ακρίβεια του.

Η συνάρτηση (Embedded MATLAB function) που φαίνεται στο υποσύστημα 'Capacitance' υλοποιεί την εξάρτηση της χωρητικότητας και της αντίστασης σειράς από τη θερμοκρασία όπως περιγράψαμε. Ο κώδικας MATLAB είναι ο εξής:

```
function [c, Rs] = fcn(Tc,I)
% Ypologismos tis antistasis seiras tou yperpyknwti
% ws synartisis tis thermokrasias
% O syntelestis c xrisimopoihtai gia diorthwsi tis xwritikotitas
% kata tis allages tis thermokrasias
% Eisodoi: Tc = thermokrasia
%          I = reyma eisodou
% Eksodoi: c = syntelestis diorthwsis
%          Rs = antistasi seiras

%Rs
A = 0.0013;
lamda = 0.0219;
Rs = A*exp(-lamda*Tc);
%Capacitance
p1 = 0.002161;
p2 = -0.06140;
p3 = -0.18243;
p4 = 2701.990;

cor = p1*Tc^3+p2*Tc^2+p3*Tc+p4;
c = cor/2700;

end
```

4.3.2.3 Αντίσταση Balancing

Το υποσύστημα αυτό είναι παρόμοιο με το αντίστοιχο κομμάτι των προηγούμενων μοντέλων, και αποτελείται ουσιαστικά από ένα ρελέ που παραλληλίζει την αντίσταση εξισορρόπησης (R_b) με το κελί του υπερπυκνωτή σε περίπτωση που η τάση υπερβεί μία ανώτατη τιμή.



Σχήμα 4.18

Η ανώτατη τιμή τάσης λαμβάνεται από το datasheet του κατασκευαστή για τον συγκεκριμένο υπερπυκνωτή και είναι 2.6V. Η αντίσταση R_b ελήφθη ίση με 61Ω όπως και στα προηγούμενα μοντέλα αφού ο τρόπος μοντελοποίησης αυτού του κομματιού του κυκλώματος δεν έχει ουσιαστικά αλλάξει.

Έτσι λοιπόν είναι προφανές ότι όπου λέμε παραπάνω για ρεύμα εννοούμε:

$$I = I_{in} - I_{Rb}$$

όπου

$$I_{Rb} = \frac{V_{Rb}}{R_b} \quad an\ U_c > 2{,}6\text{V, αλλιώς } I_{Rb} = 0$$

4.3.3 Θερμική μοντελοποίηση

Για τη θερμική μοντελοποίηση, γίνονται κάποιες παραδοχές για λόγους απλούστευσης. Καταρχάς, αμελείται η θερμική αντίσταση του υλικού του υπερπυκνωτή. Έτσι θεωρούμε ότι όποια θερμότητα παράγεται λόγω απωλειών πάνω στην αντίσταση σειράς, ανεβάζει ομοιόμορφα τη θερμοκρασία ολόκληρου του υπερπυκνωτή ως συστήματος. Δεύτερον, θεωρείται ότι η θερμότητα που εκλύει ο υπερπυκνωτής στο περιβάλλον, δεν αλλάζει την εξωτερική θερμοκρασία, πράγμα λογικό αν θεωρήσουμε έναν αρκετά μεγάλο και αεριζόμενο χώρο εγκατάστασης του συστήματος.
Κατά τη φόρτιση με μικρά ρεύματα, οι επιπτώσεις στη θερμοκρασία είναι μικρές, αλλά με μεγαλύτερα, τα θερμικά δυναμικά φαινόμενα μπορούν να φανούν πιο έντονα. Η θερμοκρασία μετράται στα ηλεκτρόδια του πυκνωτή ώστε να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή θερμική επαφή με το εσωτερικό του. Βέβαια, αυτό μπορεί να οδηγήσει και σε λανθασμένες εκτιμήσεις καθώς μπορεί να μετρηθεί θερμότητα που παράγεται στην επαφή αυτή και όχι στο εσωτερικό. Αυτή η λεπτομέρεια δεν ελήφθη υπόψη στην κατασκευή του μοντέλου. Μία πρώτη προσέγγιση στη πρόβλημα είναι το

γραμμικό μοντέλο που περιγράφει τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας με τον απλούστερο δυνατό τρόπο. Η εξίσωση που το περιγράφει είναι:

$$c\frac{\partial T}{\partial t} = P - k\left(T - T_a\right)$$

c είναι η θερμοχωρητικότητα του υλικού του υπερπυκνωτή, k η θερμική αγωγιμότητα ανάμεσα στον υπερπυκνωτή και το περιβάλλον και P η θερμότητα που παράγεται στην αντίσταση σειράς. Η παραπάνω εξίσωση μας λέει απλά, ότι η αύξηση της θερμοκρασίας, εξαρτάται από την θερμότητα που παράγεται μέσα στον πυκνωτή (P) μειωμένη κατά την θερμότητα την οποία εκπέμπει στον περιβάλλοντα χώρο $k\left(T - T_a\right)$. T_α είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

Η παραπάνω εξίσωση (θερμικό μοντέλο πρώτης τάξης) μπορεί να γραφεί ως:

$$c \cdot sT = I^2 R_s - k\left(T - T_a\right) \Leftrightarrow$$

$$T = \frac{I^2 R_s}{sc + k} + \frac{k}{sc + k} T_a$$

Το αποτέλεσμα είναι ένα μοντέλο που ακολουθεί περιοδικά την καμπύλη θερμοκρασίας αλλά χάνει τις κορυφές, ή ένα που ακολουθεί τα μέγιστα θερμοκρασίας αλλά εμφανίζει πολύ γρήγορες μειώσεις ειδικά όταν η διαφορά θερμοκρασίας με το περιβάλλον είναι μικρή. Έτσι οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι χρειάζεται ένα μοντέλο με δύο χρονικές σταθερές ώστε να καλύπτει τα αργά και τα γρήγορα φαινόμενα. Αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό δύο μοντέλων πρώτης τάξης, ώστε να φτιαχτεί ένα μοντέλο δευτέρας τάξης. Οι εξισώσεις κατάστασης είναι:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{k_1}{c_1} & 0 \\ 0 & -\frac{k_2}{c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} & \frac{k_1}{c_1} \\ \frac{1}{c_2} & \frac{k_2}{c_2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ T_a \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} - T_a$$

Τα αποτελέσματα είναι καλύτερα με το μοντέλο αυτό όπως βλέπουμε στη βιβλιογραφία [31]. Για την ακριβή προσαρμογή βέβαια του μοντέλου αυτού σε έναν πραγματικό πυκνωτή χρειάζονται σειρές μετρήσεων και πειραμάτων που δεν είχαμε τη δυνατότητα να πραγματοποιήσουμε στο ΕΜΠ. Μάλιστα, φαίνεται ότι επιτυγχάνεται ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια αν οι σταθερές k1, k2, c1, c2 είναι εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία. Στο Simulink αυτό είναι απλό να γίνει με χρήση Lookup Tables εφόσον βρούμε πειραματικά το συσχετισμό αυτό.

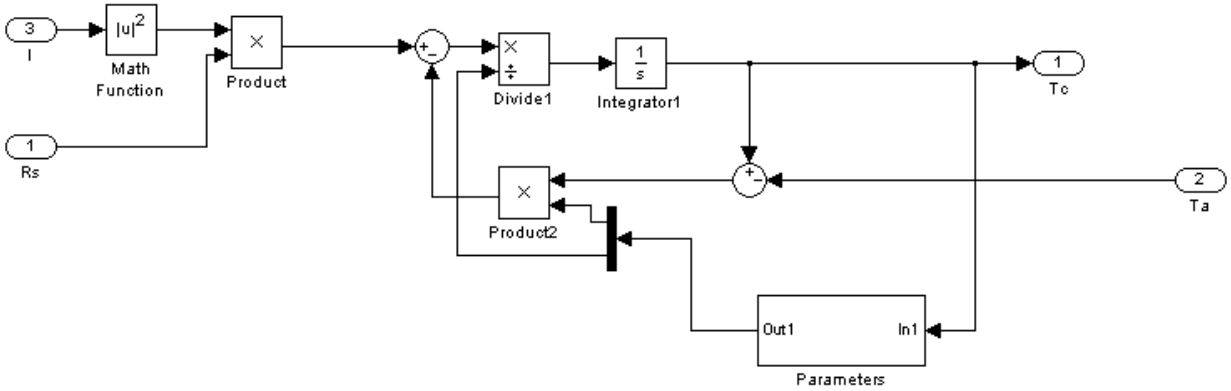
Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, έγιναν προσομοιώσεις και του μοντέλου DTDSM και για τις δύο περιπτώσεις θερμικής μοντελοποίησης ώστε να φανούν οι διαφορές μεταξύ τους. Ακολουθεί περιγραφή της δομής και λειτουργίας του υποσυστήματος ‘Temperature’ που υλοποιεί τις παραπάνω σχέσεις σε κάθε περίπτωση.

4.3.3.1 Θερμικό μοντέλο πρώτης τάξης

Υλοποιείται η σχέση που είδαμε πιο πάνω

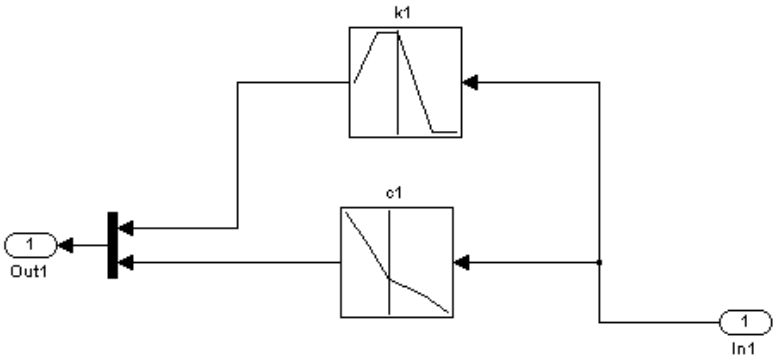
$$c \cdot sT = I^2 R_s - k\left(T - T_a\right) \Leftrightarrow$$

$$T = \frac{I^2 R_s}{sc + k} + \frac{k}{sc + k} T_a$$



Σχήμα 4.19

Όπου στο υποσύστημα 'Parameters' υπάρχει η συσχέτιση θερμικής αγωγιμότητας και θερμοχωρητικότητας από τη θερμοκρασία όπως βρέθηκε στη βιβλιογραφία [31,36,37,38].



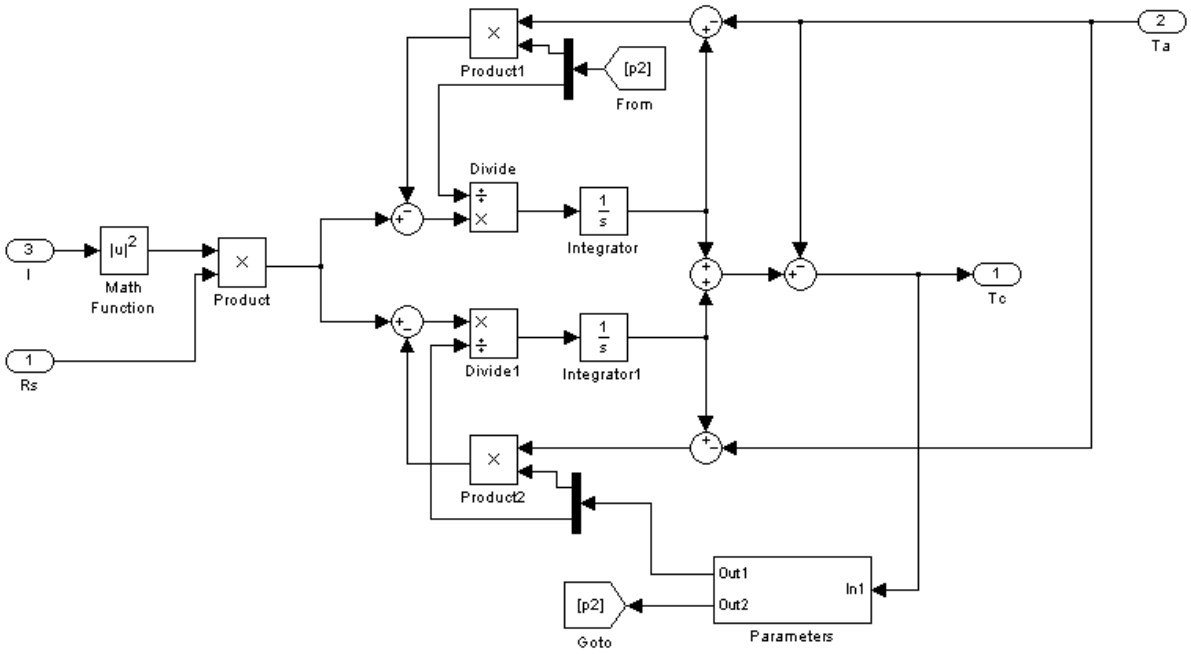
Σχήμα 4.20

4.3.3.2 Θερμικό μοντέλο δεύτερης τάξης

Από την εξίσωση κατάστασης του θερμικού μοντέλου 2^{ης} τάξης προκύπτει η σχέση:

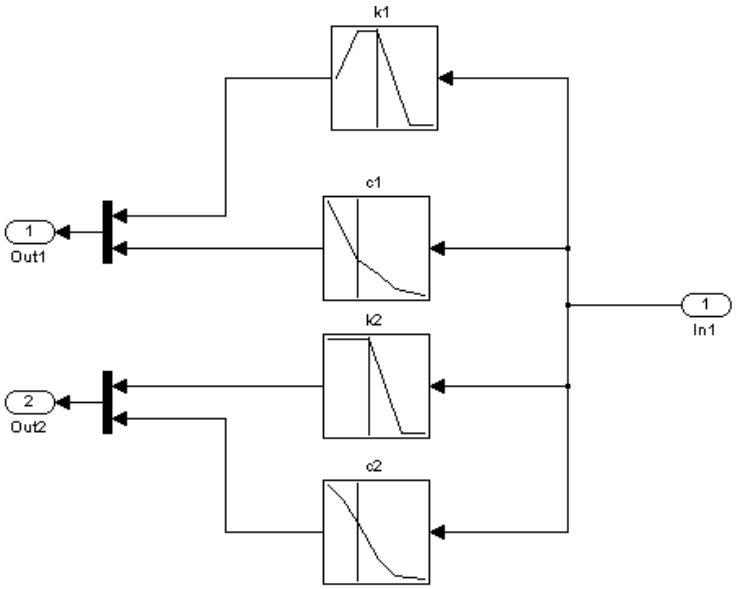
$$T_c = I^2 R_s \left(\frac{1}{c1 \cdot s + k1} + \frac{1}{c2 \cdot s + k2} \right) + T_a \left(\frac{k1}{c1 \cdot s + k1} + \frac{k2}{c2 \cdot s + k2} - 1 \right)$$

Που υλοποιείται στο Simulink ως εξής:



Σχήμα 4.21

Με τις εξαρτημένες από τη θερμοκρασία, παραμέτρους c1, k1, c2, k2 να προκύπτουν από κατάλληλα lookup tables:



Σχήμα 4.21

Όπως είπαμε και παραπάνω, οι lookup tables αυτοί προκύπτουν από πειραματικά δεδομένα και βρέθηκαν στη βιβλιογραφία ως εξής:

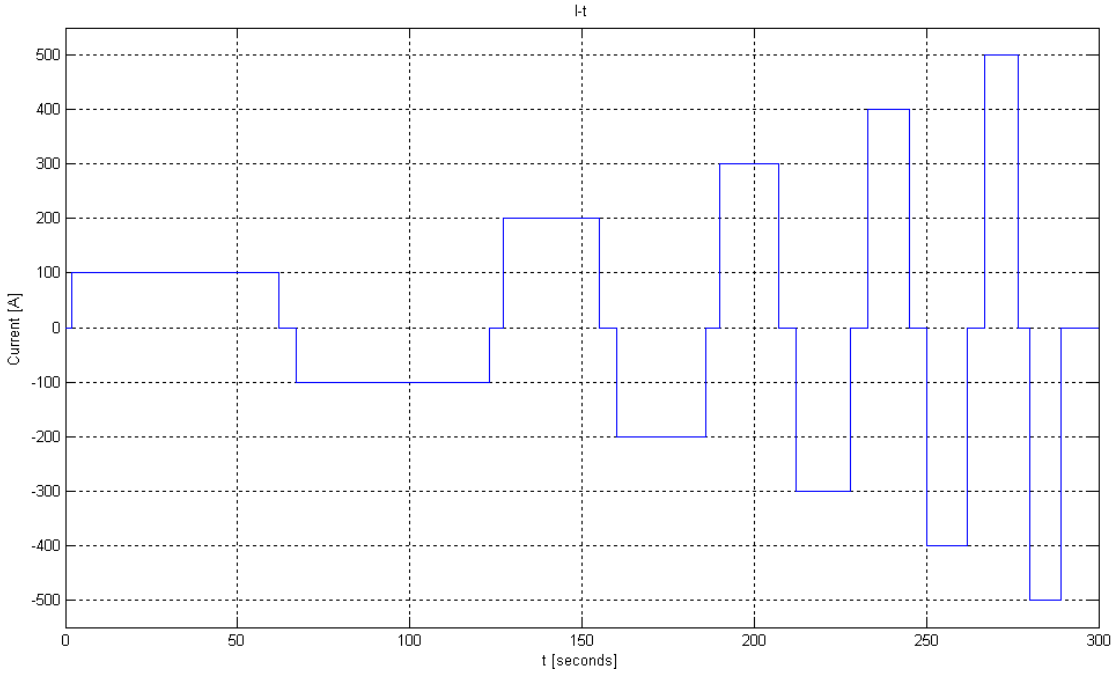
Tc [^{o}C]	c1 [J/^{o}C]	k1 [W/^{o}C]	c2 [J/^{o}C]	k2 [W/^{o}C]
-30	800	0,4	1400	10
-15	600	0,5	1200	10
0	400	0,5	900	10
23	300	0,3	400	5
40	200	0,3	200	5

Πίνακας 11

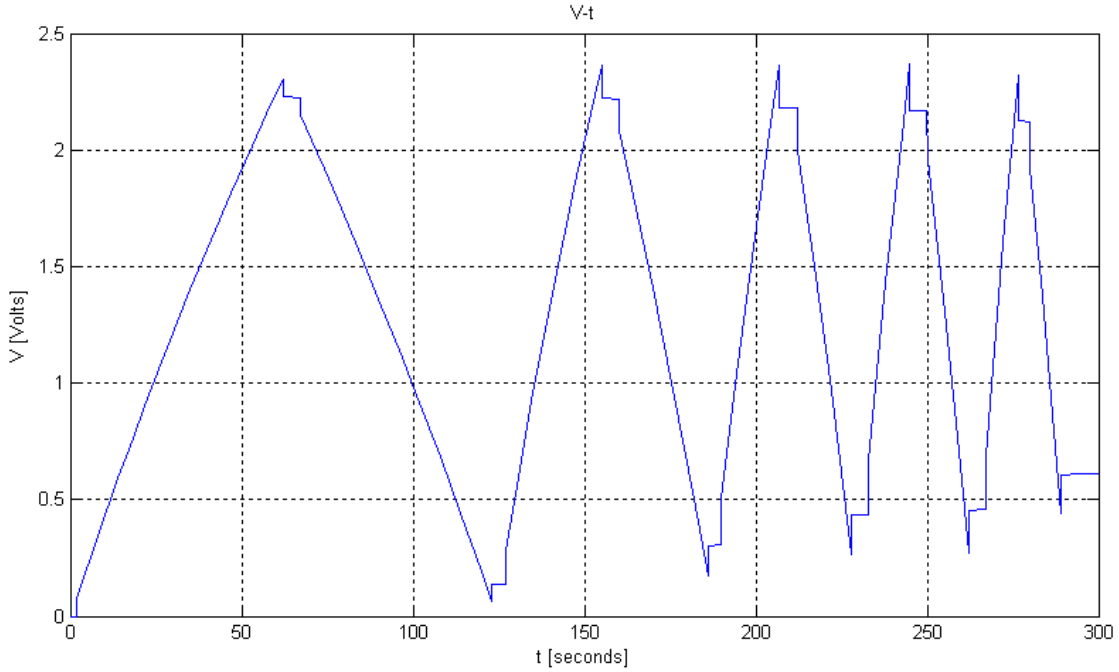
4.3.4 Αποτελέσματα προσομοίωσης

4.3.4.1 Προσομοίωση μοντέλου με θερμοκρασιακή εξάρτηση 1^{ης} τάξης

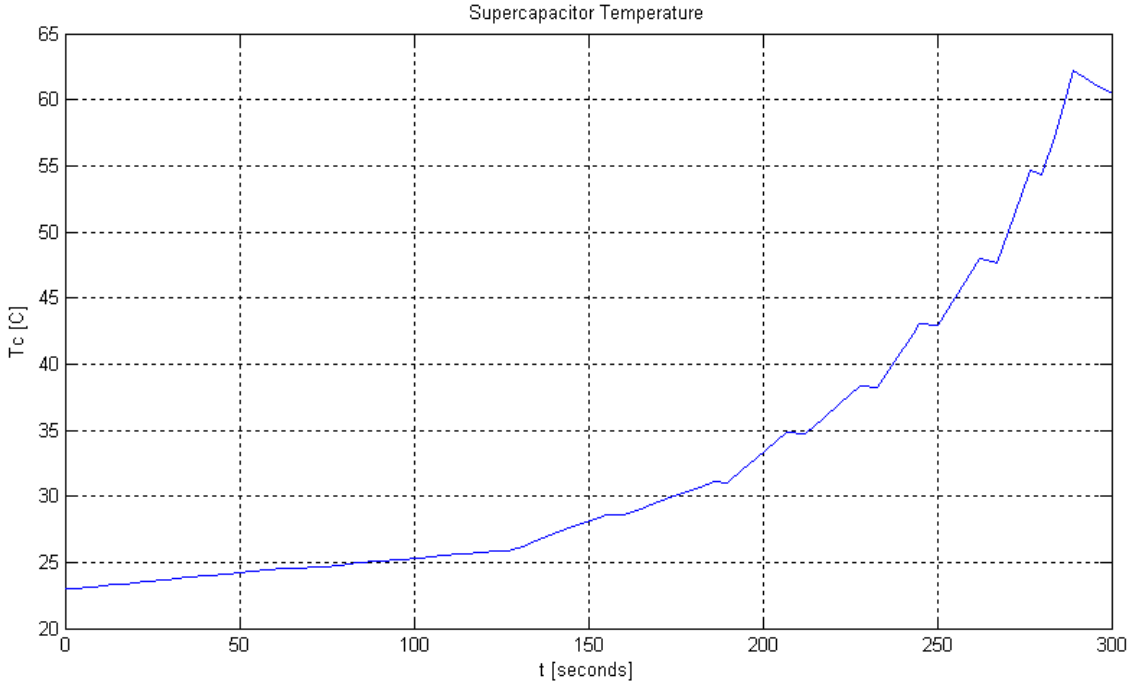
Όπως και στις προηγούμενες προσομοιώσεις, δώσαμε για είσοδο το ρεύμα που φαίνεται παρακάτω:



Και προέκυψε η τάση που φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:

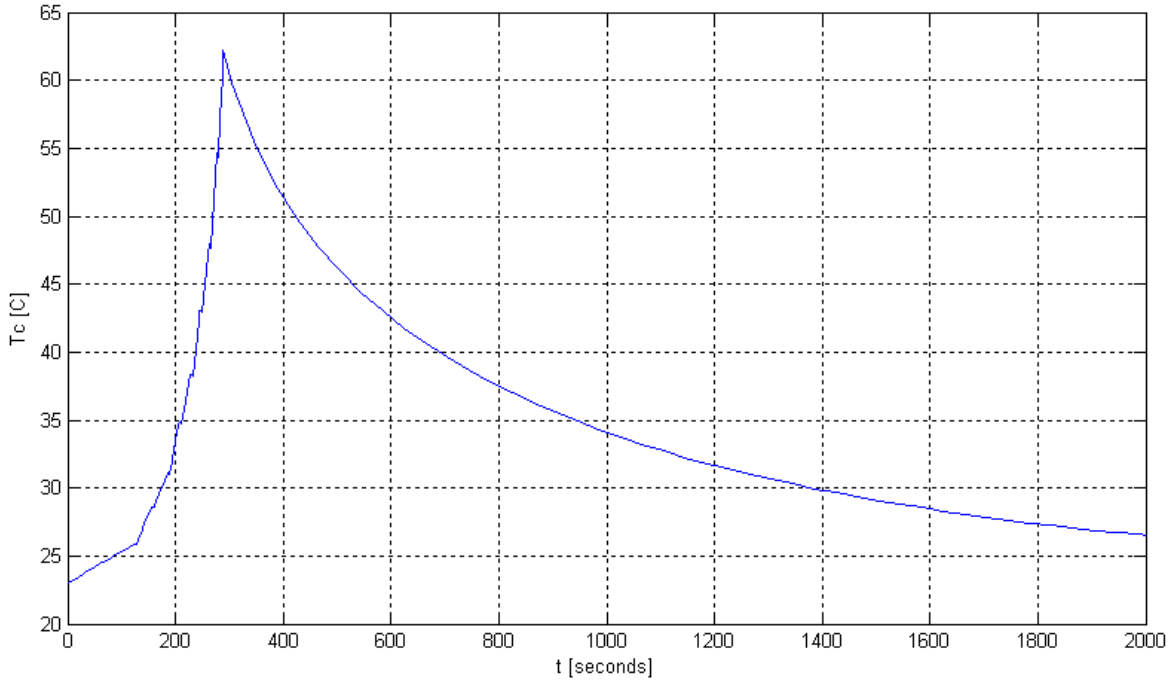


Φαίνονται όλα τα κλασσικά χαρακτηριστικά της τάσης του υπερπυκνωτή που αναλύσαμε και στα προηγούμενα μοντέλα όπως η επίδραση της αντίστασης σειράς και η μορφή της καμπύλης που εξαρτάται απ' το ολοκλήρωμα του ρεύματος φόρτισης. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται όπως στο ακόλουθο διάγραμμα

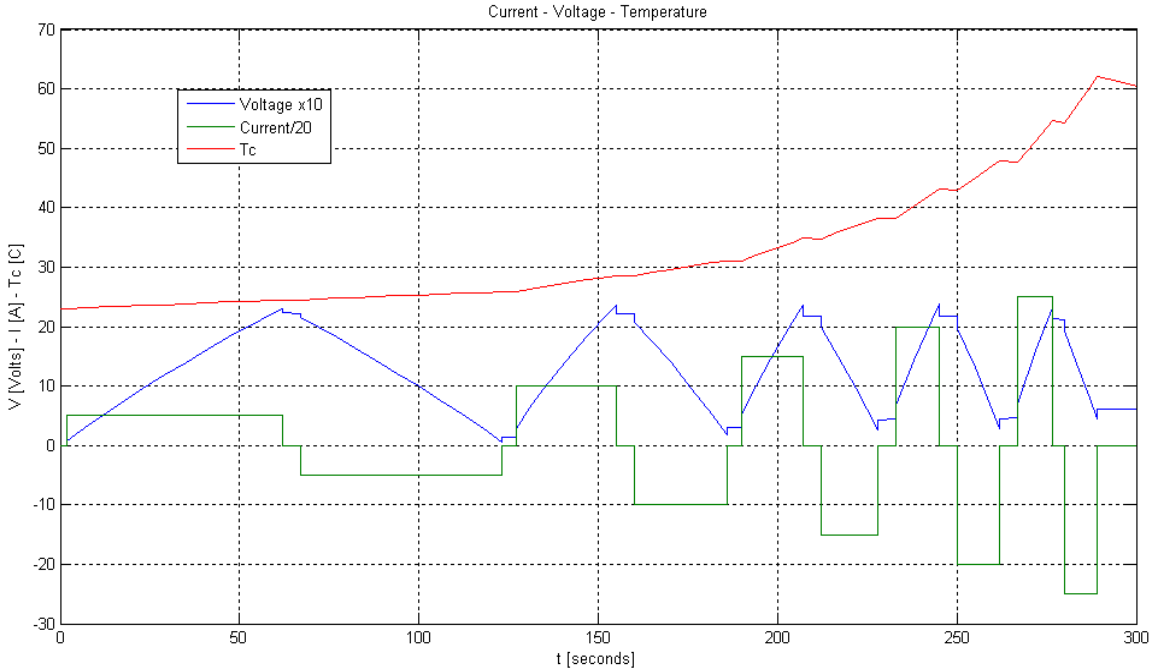


Όπως φαίνεται, η θερμοκρασία αυξάνεται κάθε στιγμή που έχουμε μη μηδενικό ρεύμα, αφού ισχύς καταναλίσκεται πάνω στην αντίσταση σειράς ανεξάρτητα αν το ρεύμα εξέρχεται από ή εισέρχεται στον πυκνωτή. Κατά τις χρονικές περιόδους ανάμεσα στις φόρτο-εκφορτίσεις η θερμοκρασία τείνει να μειωθεί με τρόπο που καθορίζεται από τις παραμέτρους k και c.

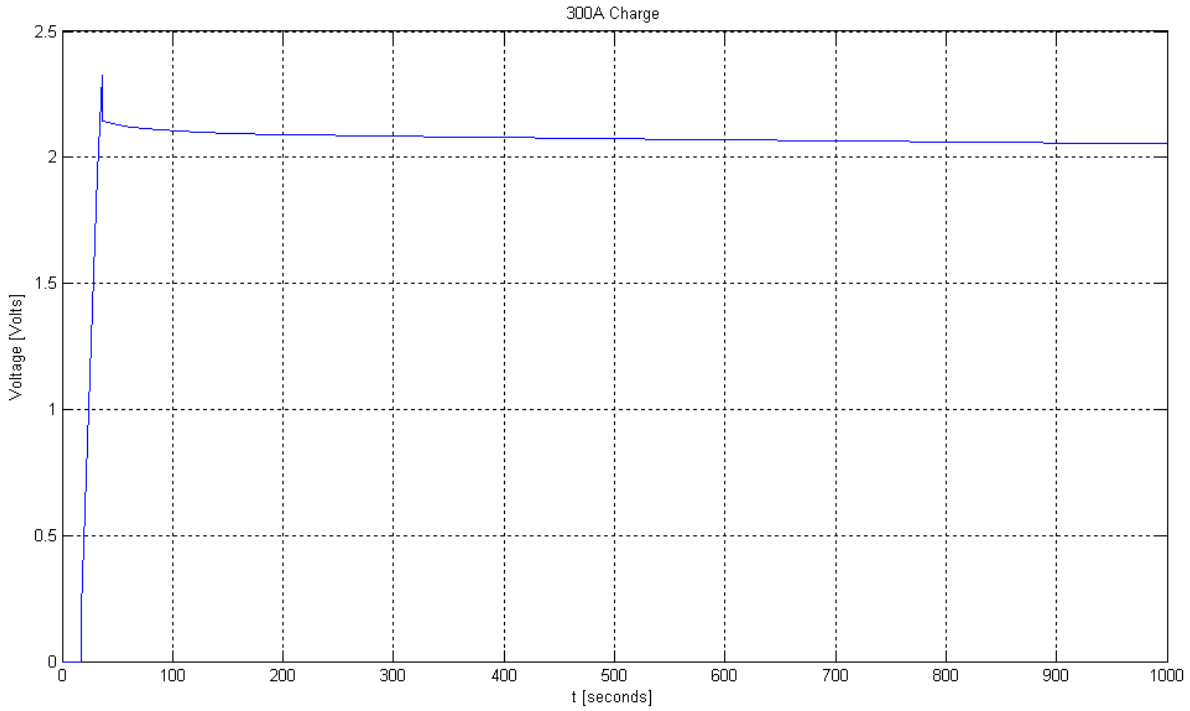
Στο επόμενο διάγραμμα έχουμε τρέξει το μοντέλο μας για χρόνο 2000sec ώστε να φανεί ότι χωρίς ρεύμα η θερμοκρασία τελικά θα επανέλθει στην θερμοκρασία περιβάλλοντος (23°C).



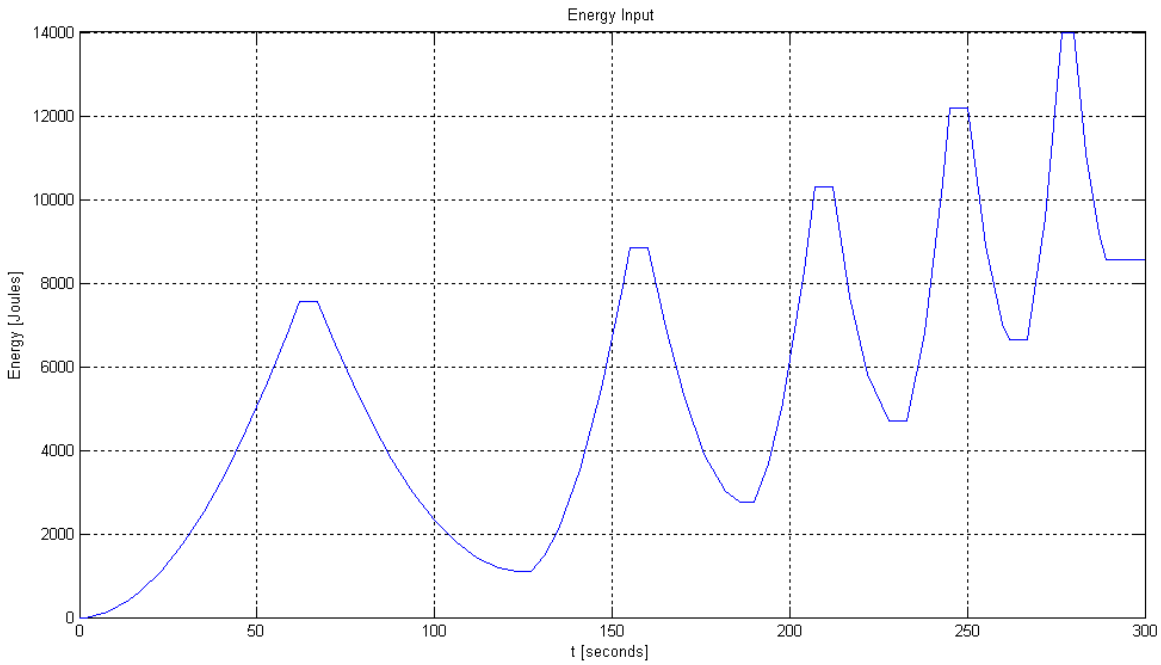
Τα τρία πρώτα διαγράμματα σε κοινούς άξονες, μας δίνουν μια πολύ καλή εποπτική εικόνα του φαινομένου.



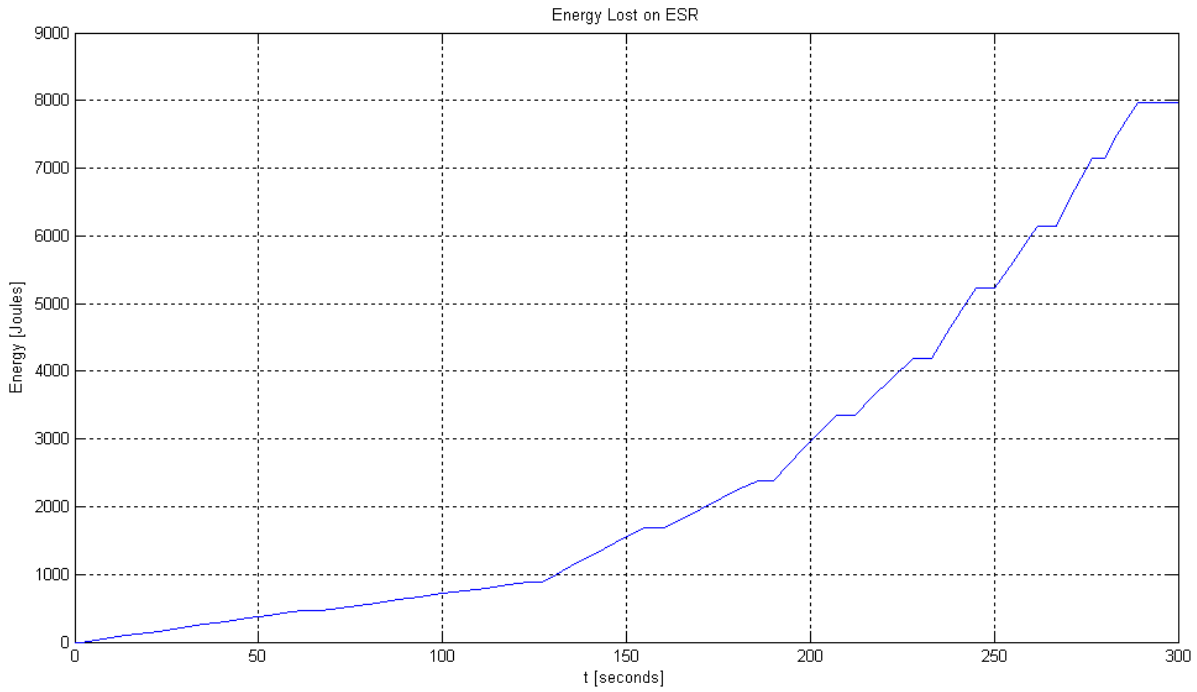
Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, η επίδραση της EPR (Equivalent Parallel Resistor) φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα όπου μετά τη φόρτιση, ο πυκνωτής αφήνεται ανοικτοκυκλωμένος.



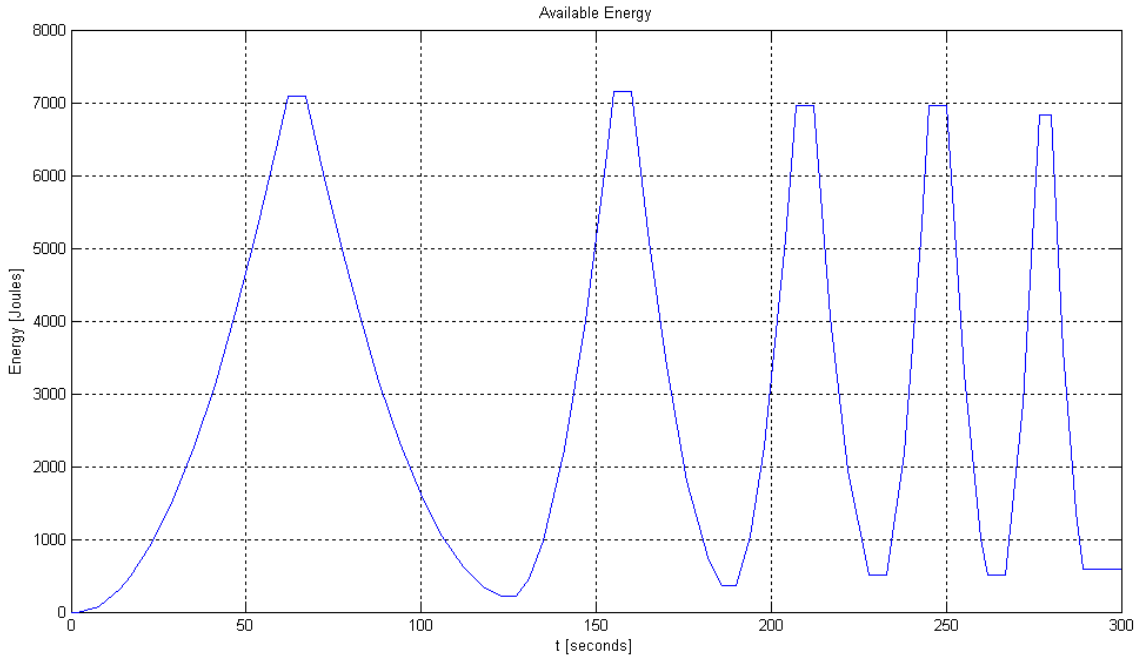
Στα επόμενα διαγράμματα δείχνουμε τις καμπύλες ενέργειας που εισέρχονται στο σύστημα του υπερπυκνωτή καθώς και το ποσό της ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμο κάθε στιγμή. Η διαφορά των δύο έγκειται στο γεγονός ότι υπάρχουν απώλειες ενέργειας κατά κύριο λόγο πάνω στην αντίσταση σειράς (ESR). Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα με τη μορφή του ρεύματος φόρτισης που παρουσιάσαμε στο πρώτο διάγραμμα.



Η ενέργεια που έχει χαθεί κάθε στιγμή (και έχει μετατραπεί σε θερμότητα) πάνω στην αντίσταση σειράς είναι:

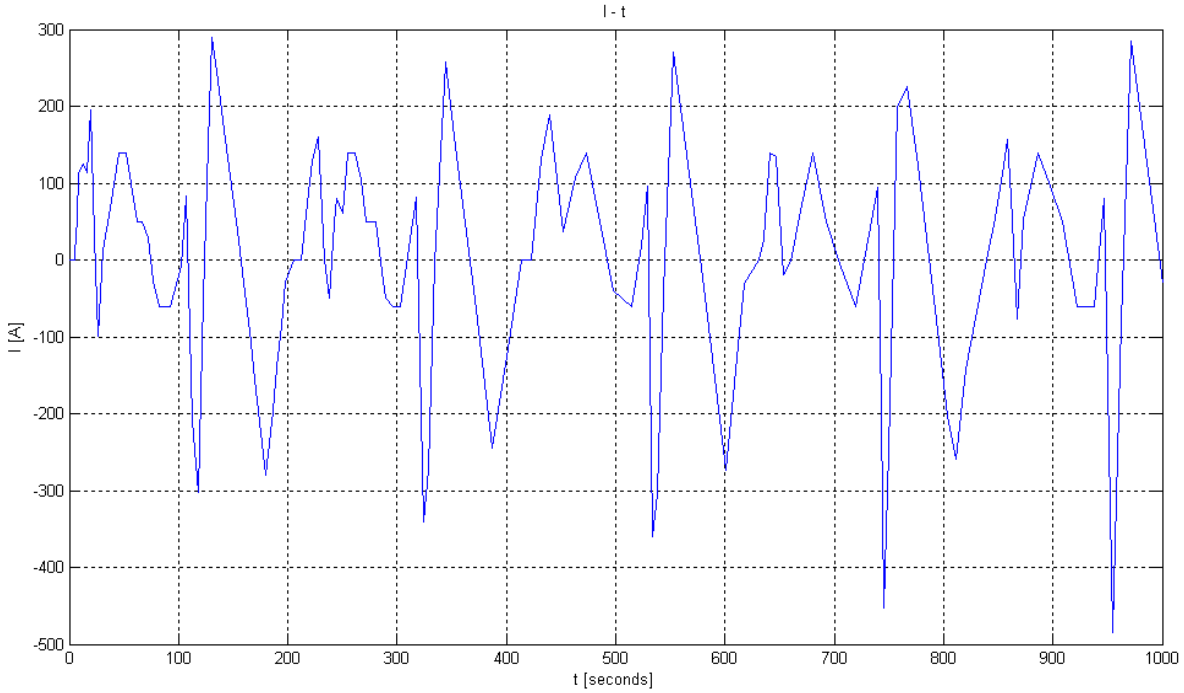


Και τελικά, η διαφορά των δύο είναι η διαθέσιμη (αποθηκευμένη) κάθε στιγμή ενέργεια στον υπερπυκνωτή.

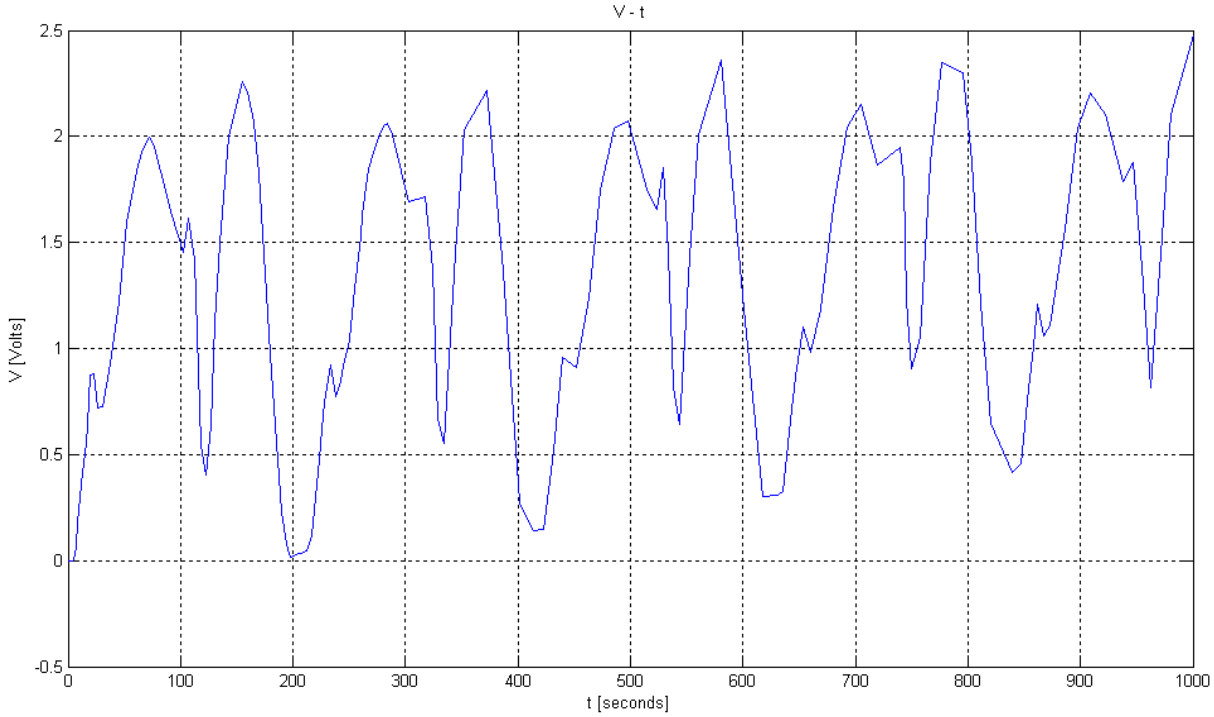


Λόγω της αρκετά καλής ακρίβειας του μοντέλου αυτού και επειδή μοντελοποιείται και η θερμοκρασιακή εξάρτηση των διαφόρων παραμέτρων αποφασίσαμε να παρουσιάσουμε και μία σειρά διαγραμμάτων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα τυχαίας μορφής ρεύμα εξόδου που θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι πραγματική είσοδος ενός υπερπυκνωτή σε ένα σύστημα ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

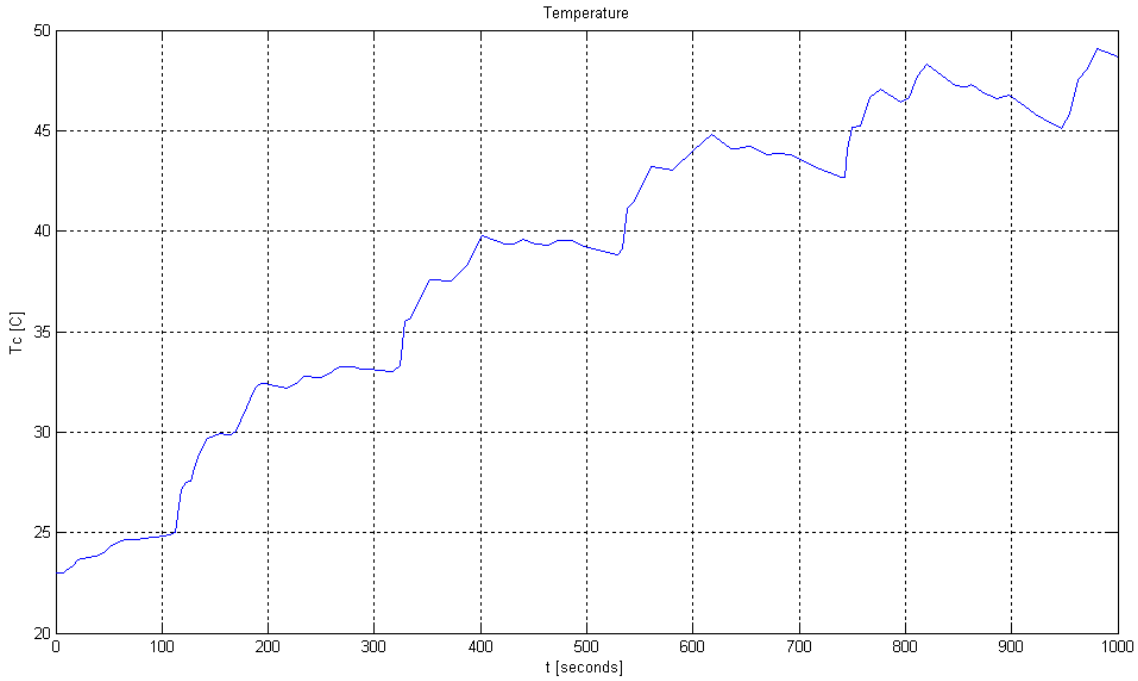
Η μορφή της καμπύλης του ρεύματος είναι:



Η τάση προκύπτει από το μοντέλο:

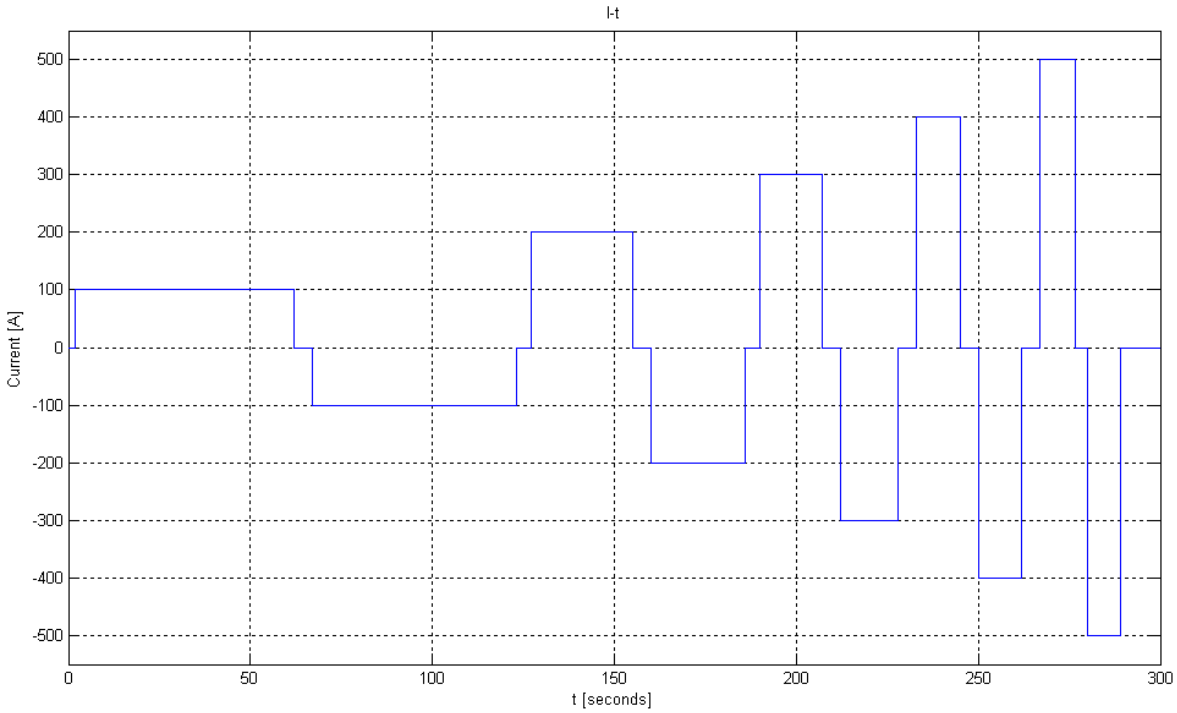


Και η θερμοκρασία:

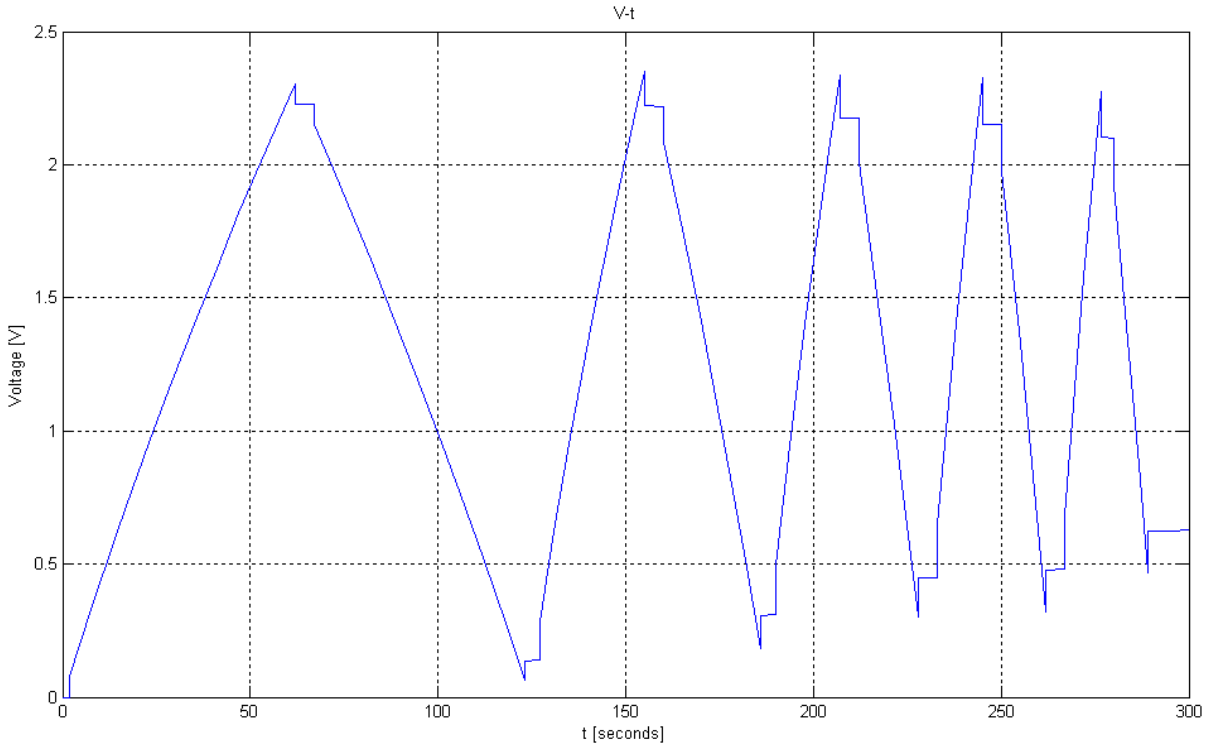


4.3.4.2 Προσομοίωση μοντέλου με θερμοκρασιακή εξάρτηση 2^{ας} τάξης

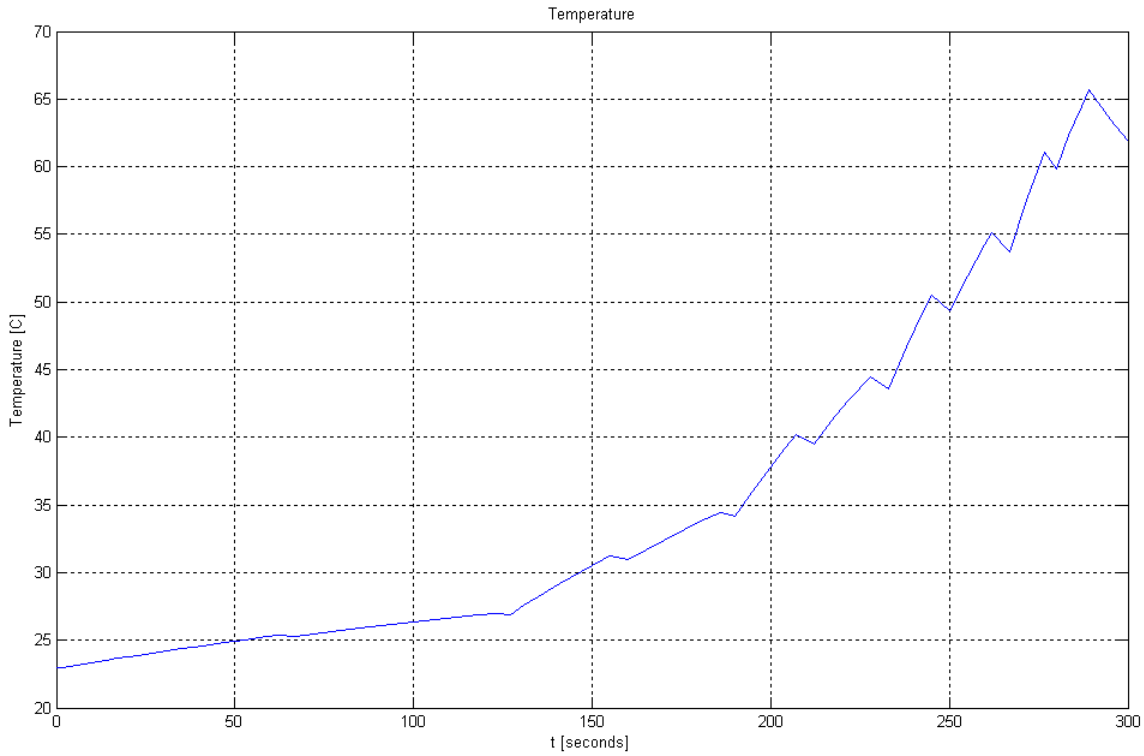
Το ρεύμα που δώσαμε ως είσοδο φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα:



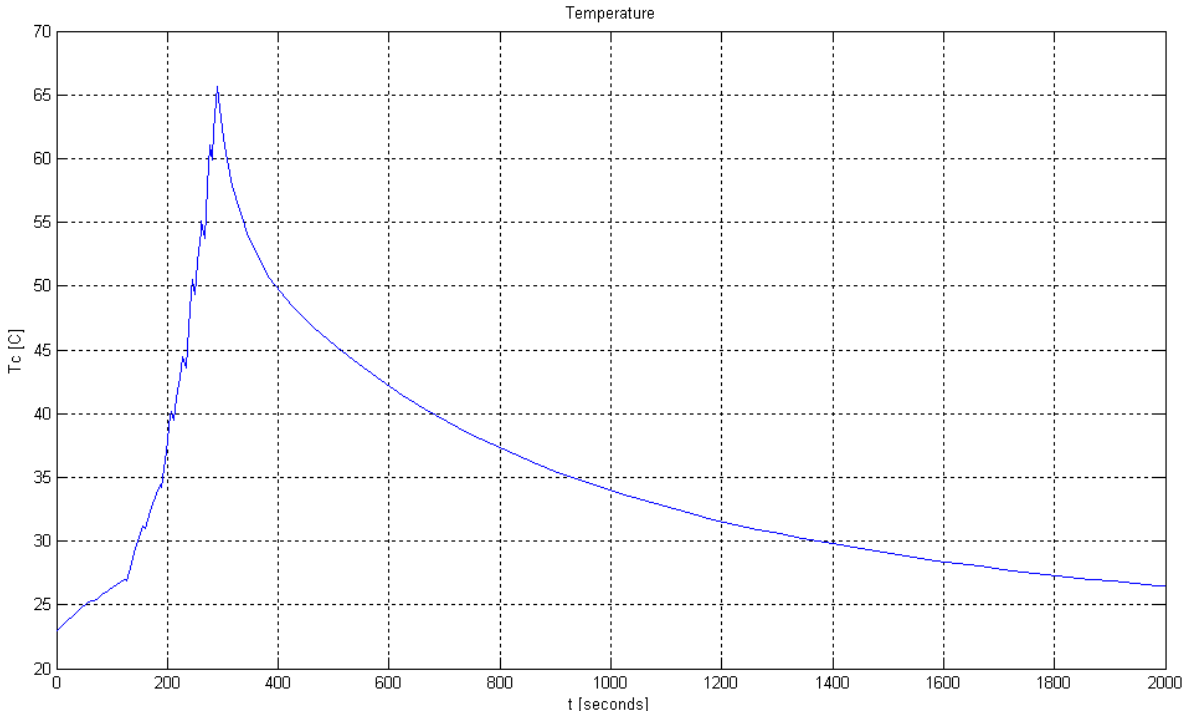
Η τάση που έδωσε το μοντέλο ήταν:



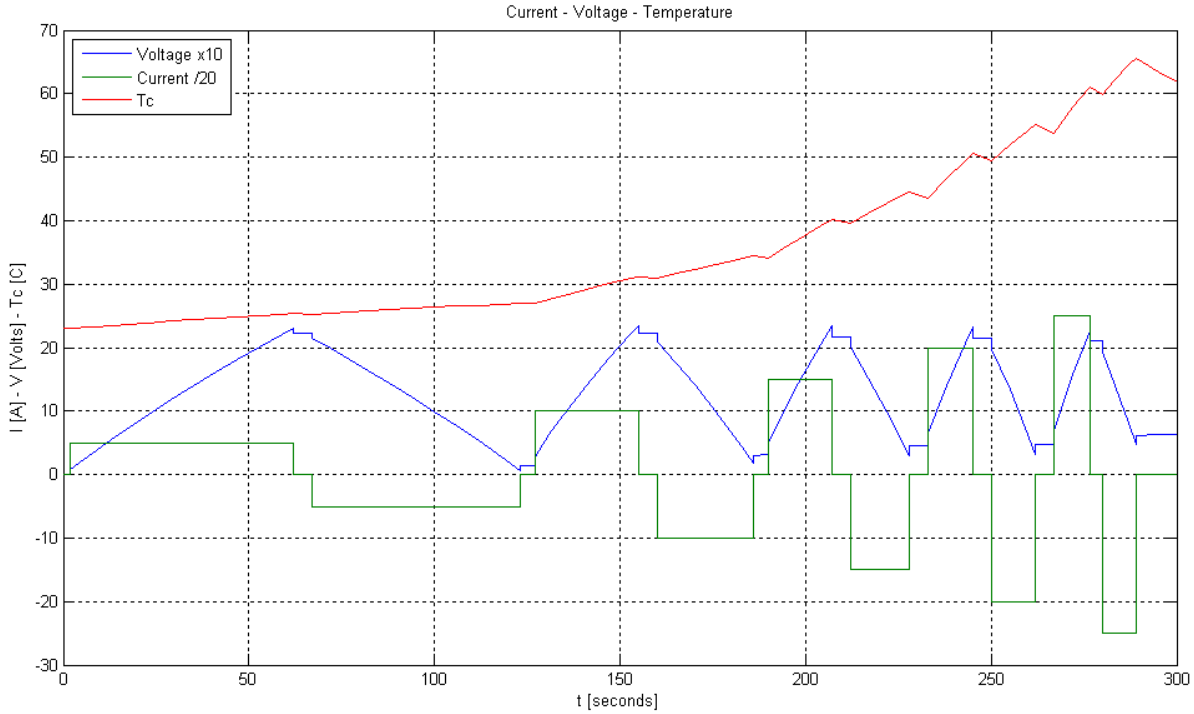
Η θερμοκρασία μεταβλήθηκε όπως φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



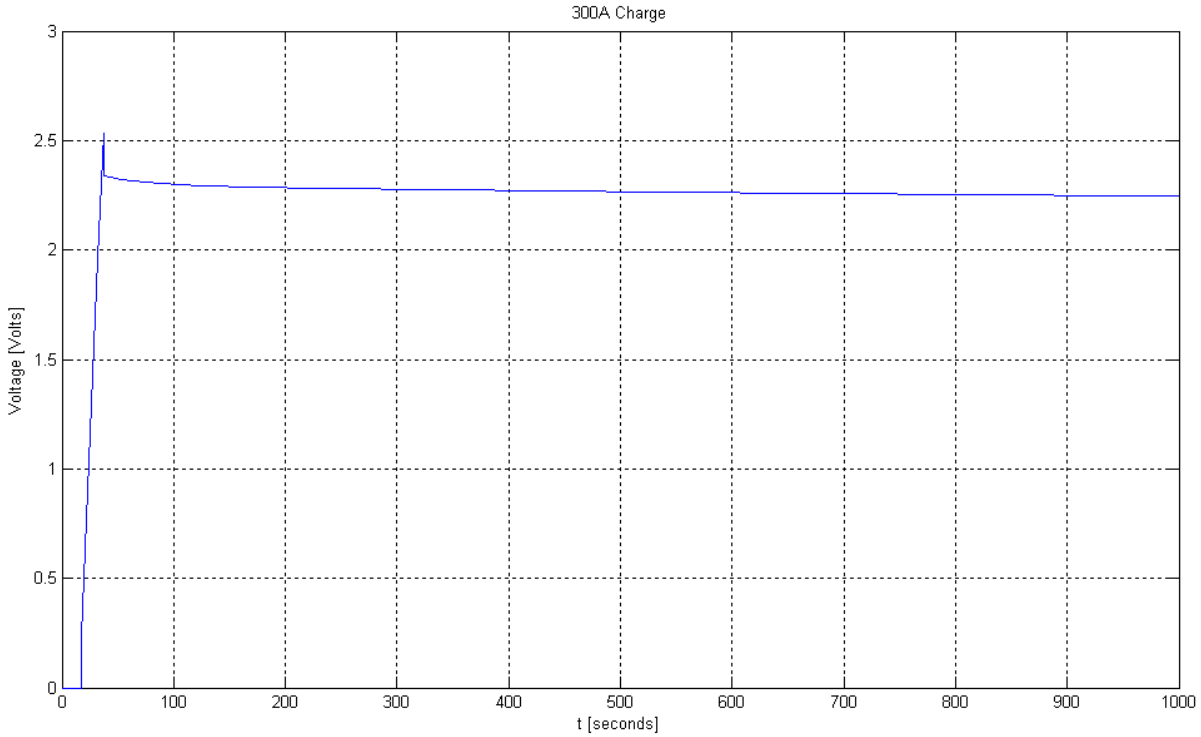
Και σε αρκετό χρονικό διάστημα μετά το μηδενισμό του ρεύματος η θερμοκρασία επανέρχεται στην θερμοκρασία περιβάλλοντος.



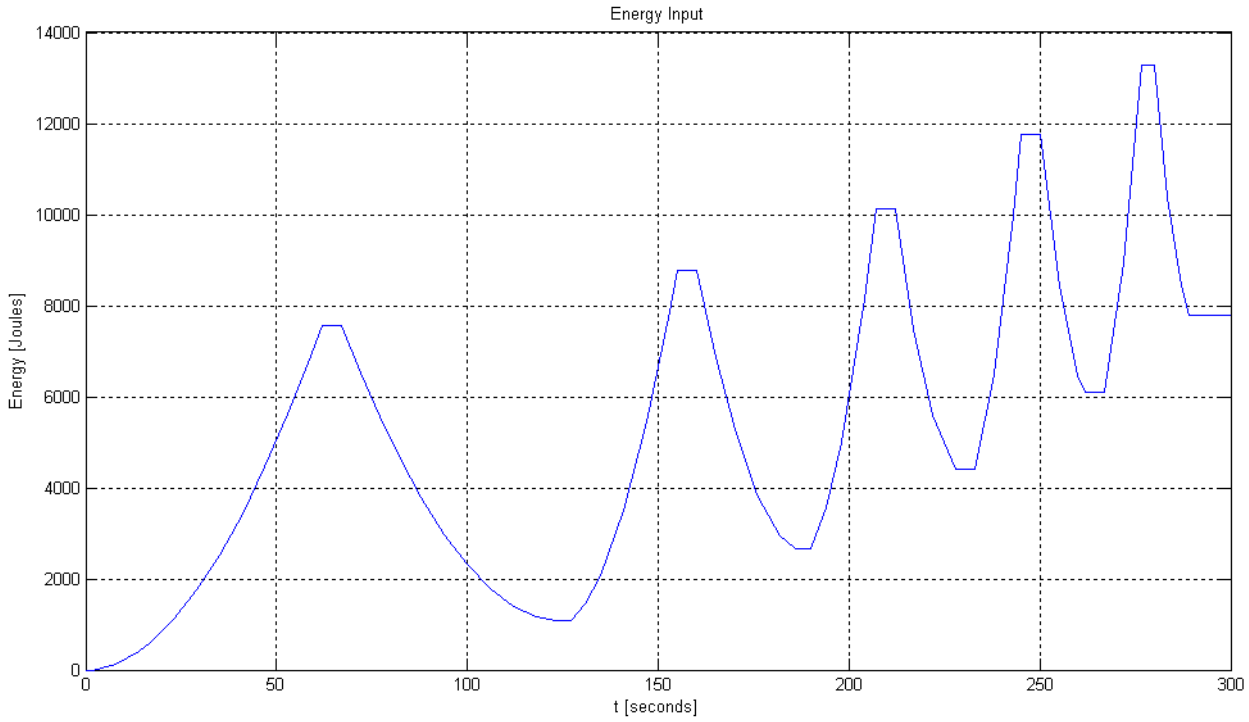
Τα τρία πρώτα διαγράμματα σε κοινούς άξονες για εύκολη σύγκριση



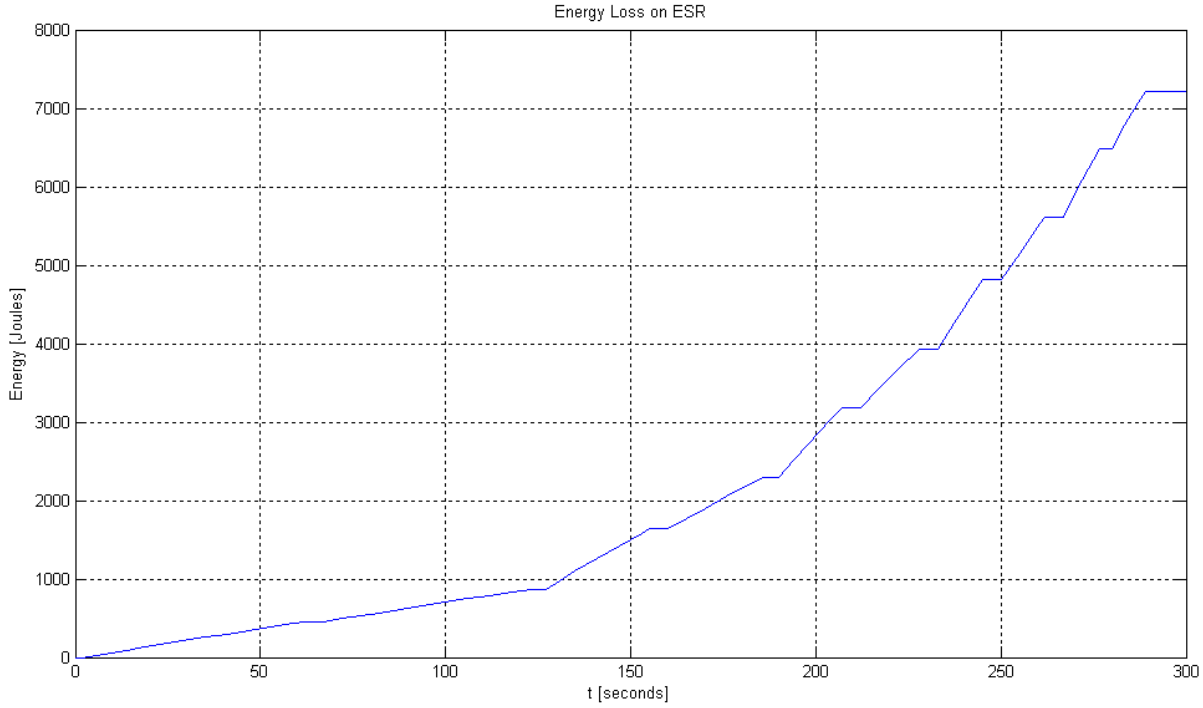
Όπως και στα προηγούμενα μοντέλα, η επίδραση της EPR (Equivalent Parallel Resistor) φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα όπου μετά τη φόρτιση, ο πυκνωτής αφήνεται ανοικτοκυκλωμένος.



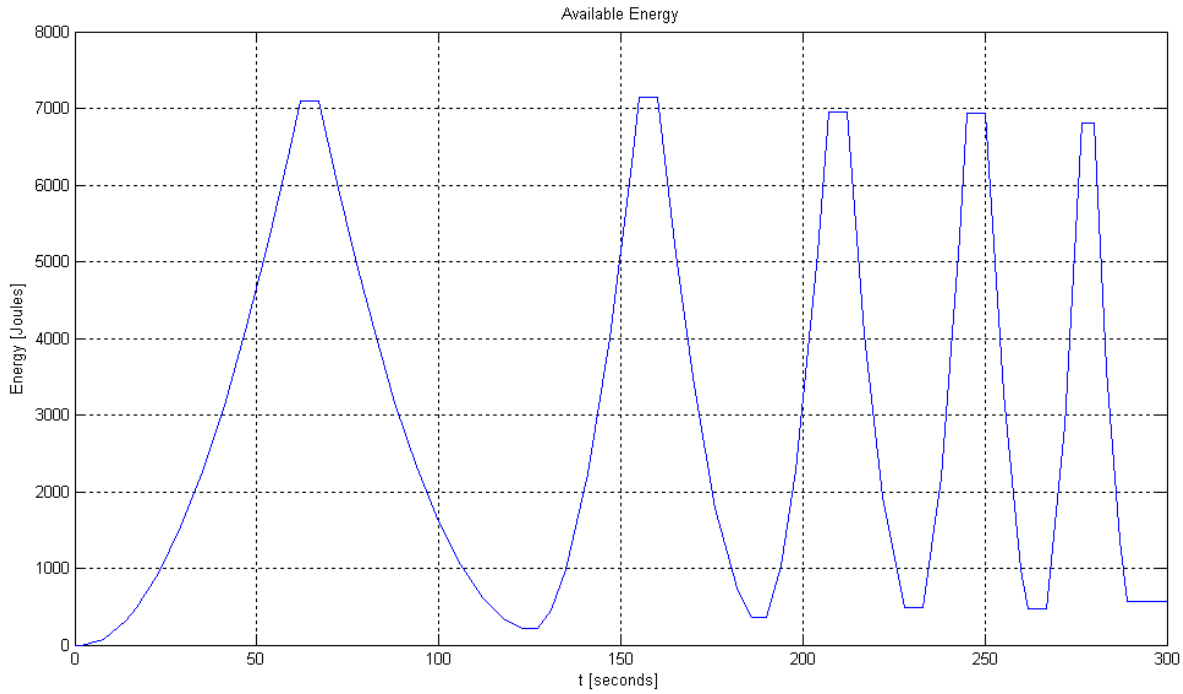
Η ενέργεια που εισέρχεται στον υπερπυκνωτή είναι:



Η ενέργεια που χάνεται πάνω στην αντίσταση σειράς (ESR)

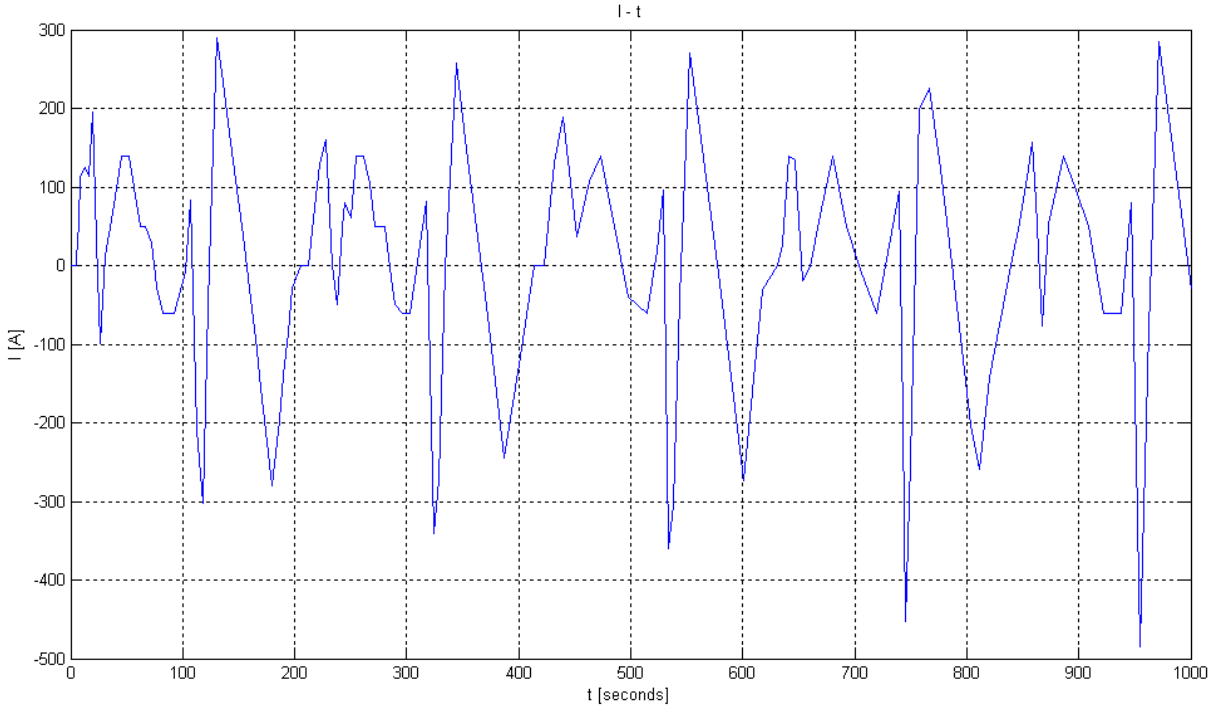


Και η διαθέσιμη κάθε στιγμή ενέργεια στον υπερπυκνωτή:

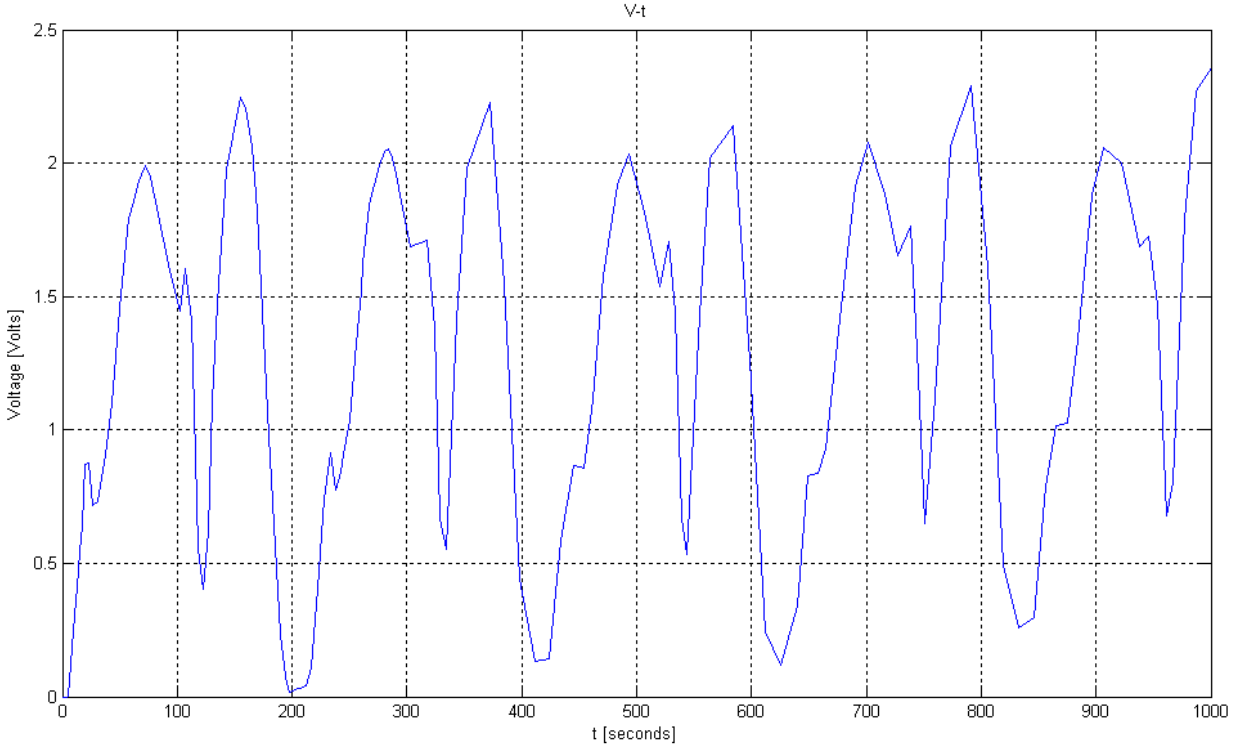


Λόγω της αρκετά καλής ακρίβειας του μοντέλου αυτού και επειδή μοντελοποιείται και η θερμοκρασιακή εξάρτηση των διαφόρων παραμέτρων αποφασίσαμε να παρουσιάσουμε και μία σειρά διαγραμμάτων από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για ένα τυχαίας μορφής ρεύμα εξόδου που

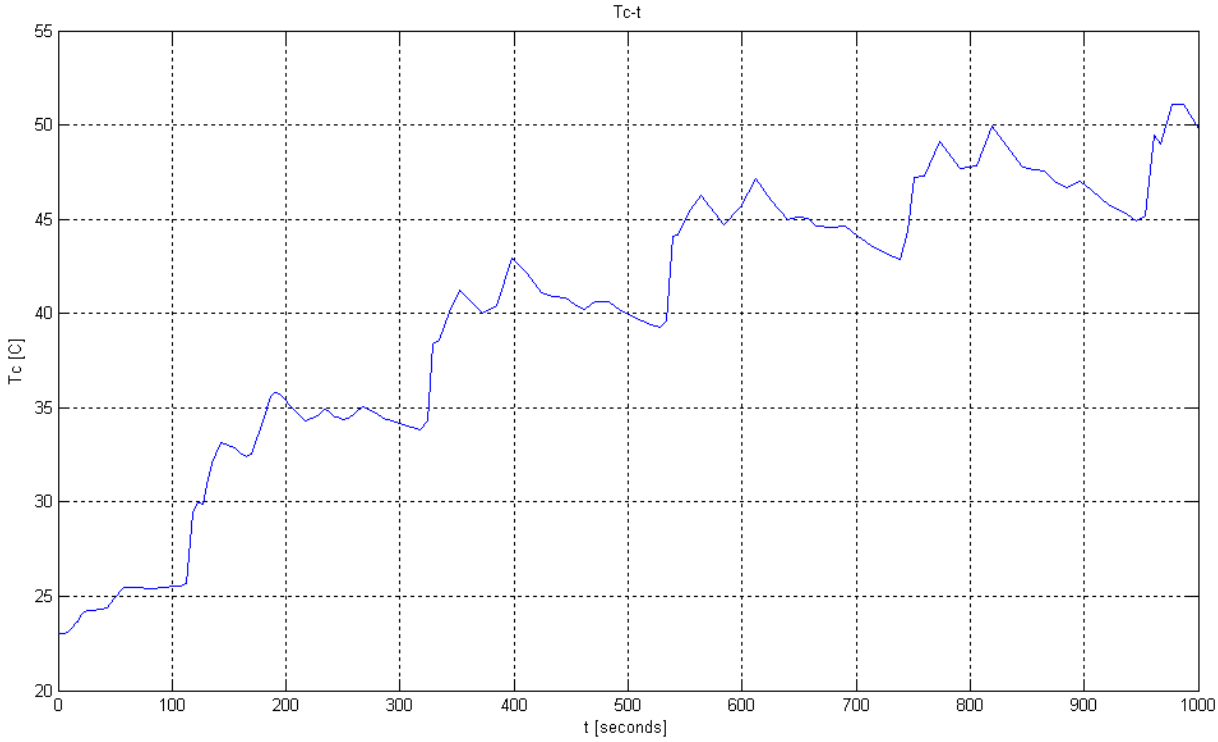
θα μπορούσε για παράδειγμα να είναι πραγματική είσοδος ενός υπερπυκνωτή σε ένα σύστημα ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η μορφή της καμπύλης του ρεύματος είναι:



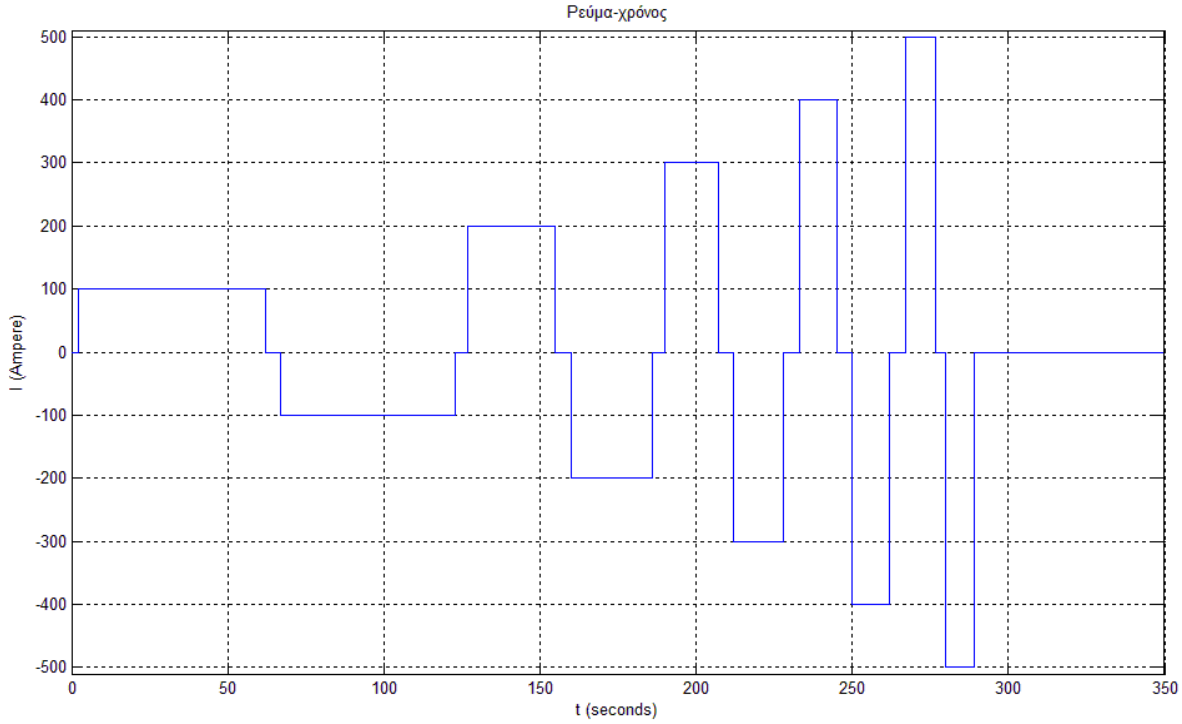
Η τάση προκύπτει:



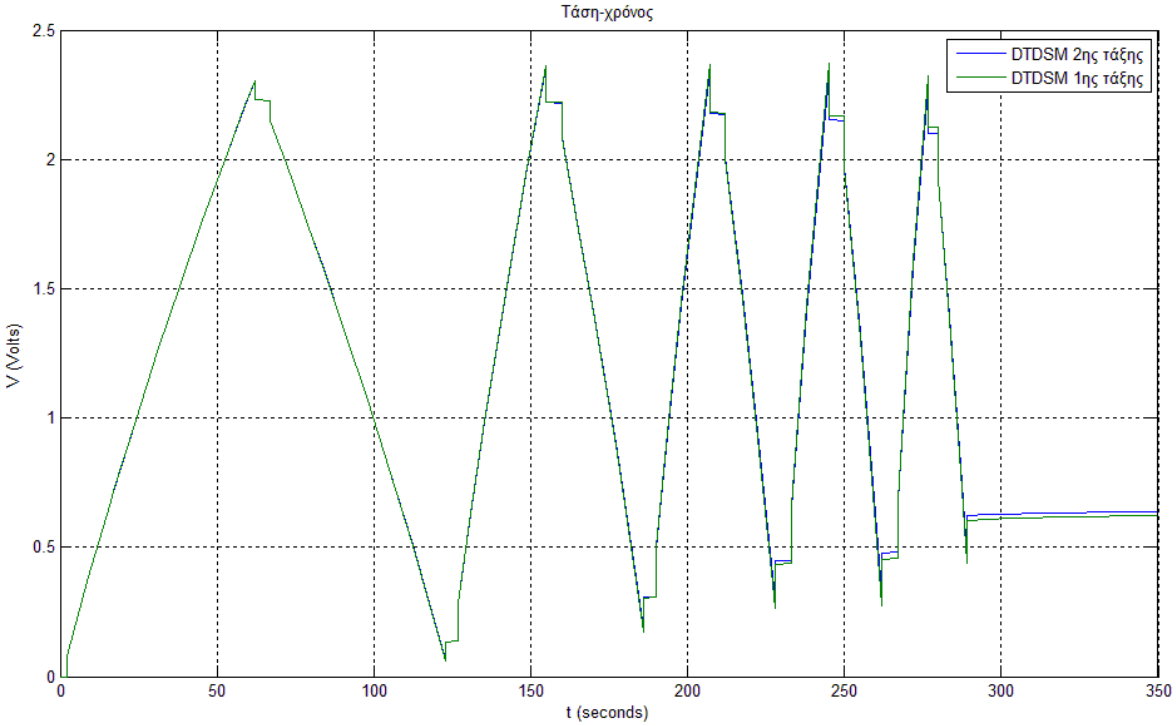
Και η θερμοκρασία:

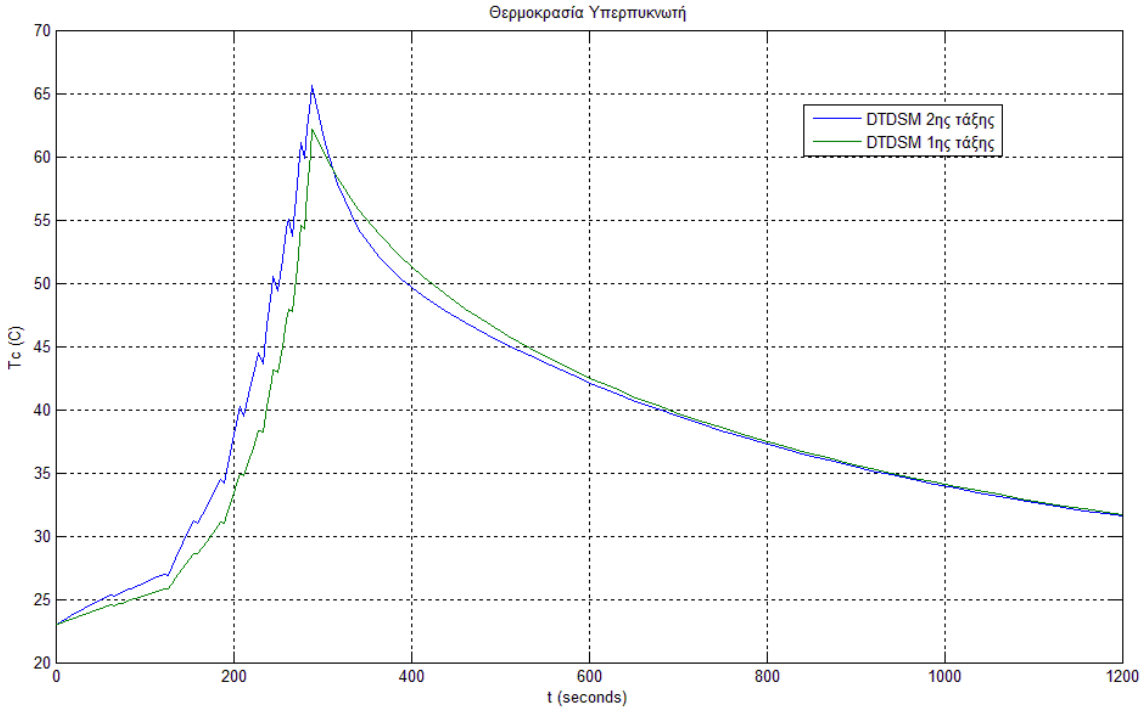


Έχει ενδιαφέρον να δούμε τη διαφορά των δύο τεχνικών θερμικής μοντελοποίησης όσον αφορά την υπολογιζόμενη τάση και θερμοκρασία. Έχουμε κάνει σε κοινούς άξονες τα διαγράμματα της τάσης και της θερμοκρασίας για τις δύο περιπτώσεις λοιπόν. Το ρεύμα που δώσαμε ως είσοδο ήταν:



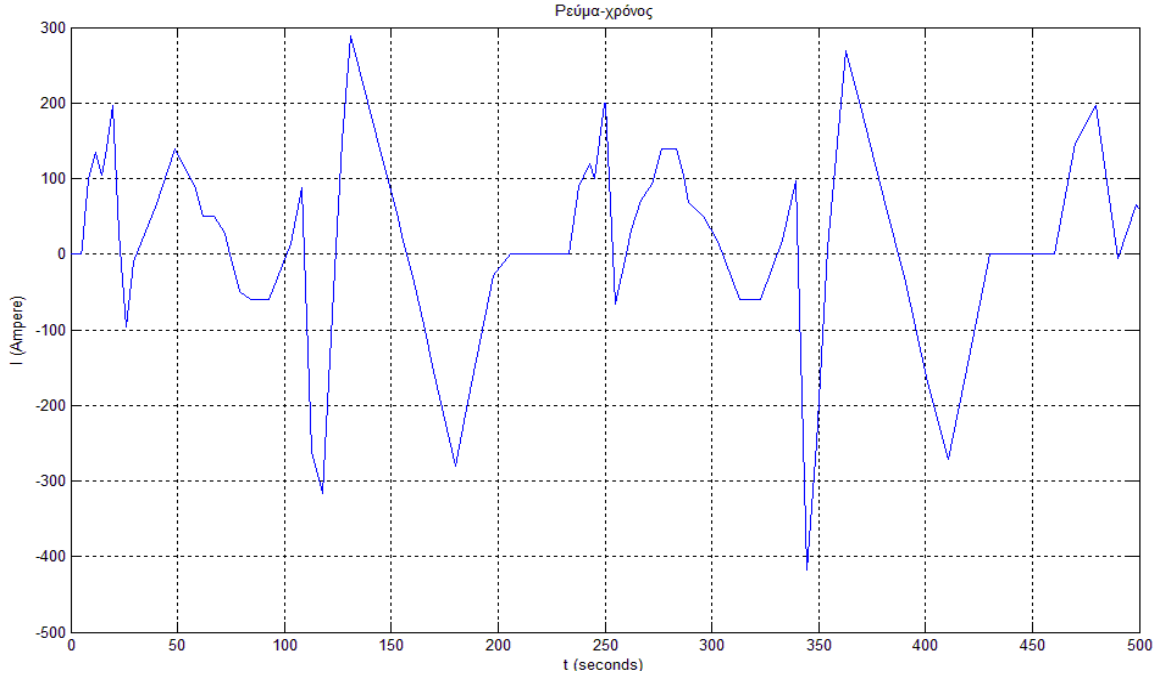
Και προέκυψαν:



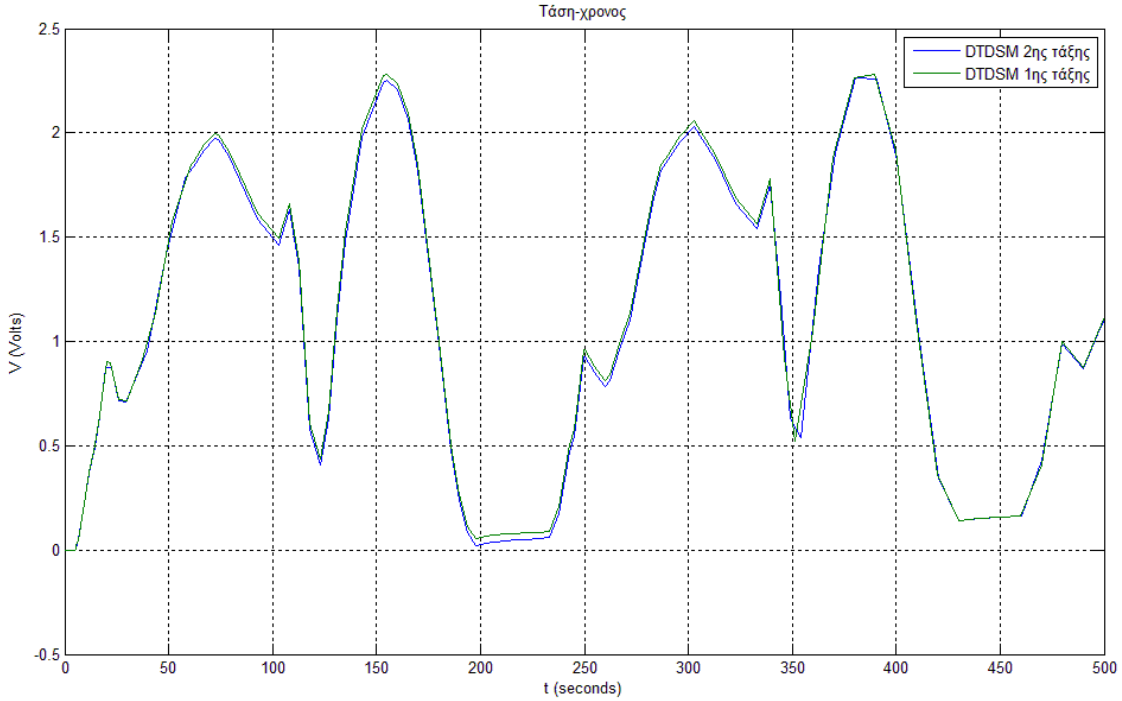


Βλέπουμε ότι το 2^{ης} τάξης μοντέλο μπορεί να αναπαραστήσεις πιο γρήγορες θερμοκρασιακές μεταβολές, χωρίς να χαλάει τη γενική περιγραφή του μοντέλου 1^{ης} τάξης για αργές μεταβολές όπως φαίνεται μετά τα 600s στο διάγραμμα της θερμοκρασίας. Η τάση που υπολογίζεται απ' τα δύο μοντέλα είναι όμοια, και διαφορές αρχίζουν να διαφαίνονται όταν οι θερμοκρασία που συσσωρεύεται στο σύστημα από τις συνεχείς φόρτο/εκφορτίσεις αρχίζει να έχει διαφορετική τιμή σε κάθε μοντέλο και να προκαλεί διαφορά στις παραμέτρους (R_S και corr).

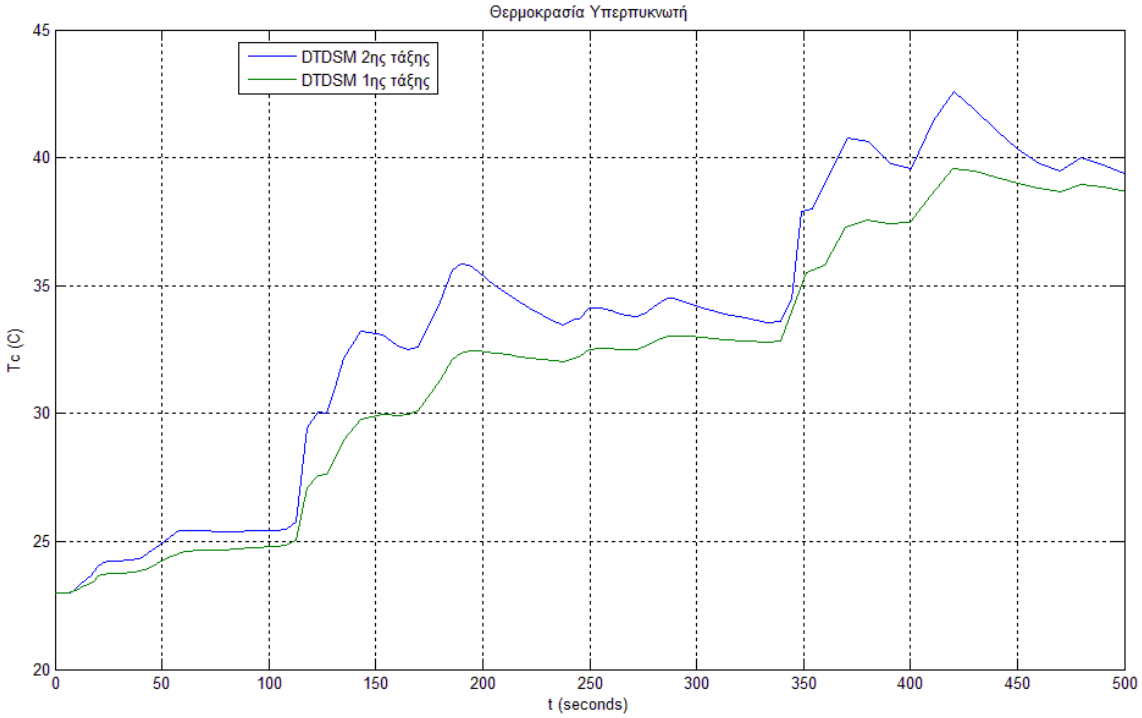
Ομοίως με ένα τυχαίο ρεύμα εισόδου:



Προκύπτουν:



Και η θερμοκρασία:

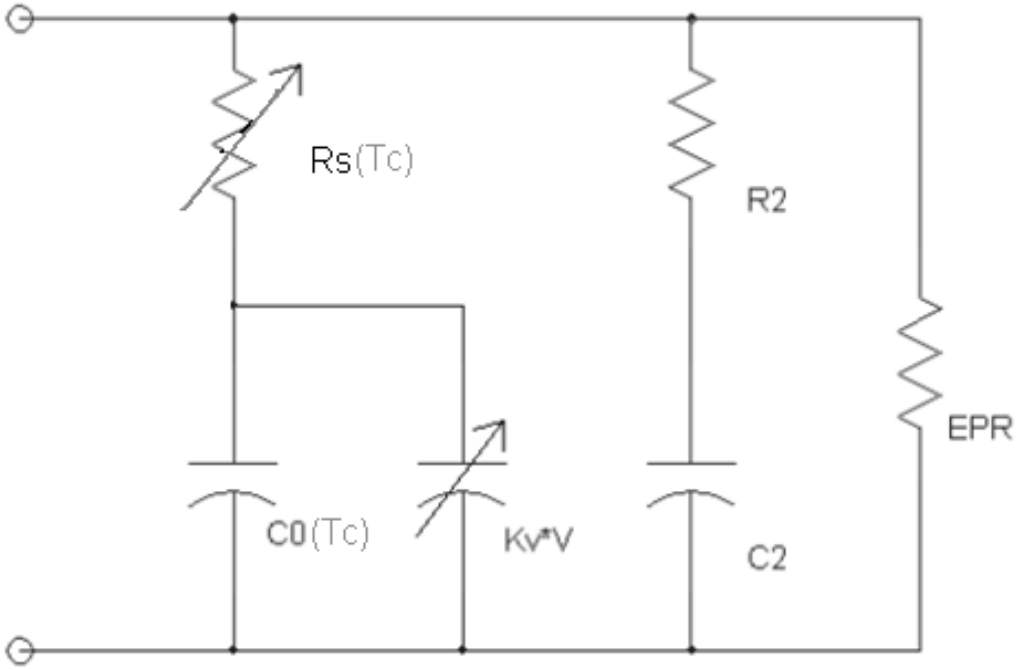


4.4 Βελτίωση μοντέλου δύο κλάδων

4.4.1 Περιγραφή μοντέλου

Η ευκολία υπολογισμού των παραμέτρων του μοντέλου δύο κλάδων από μία μόνο πειραματική καμπύλη, αποτελεί σαφές πλεονέκτημα αφού το κάνει άμεσα χρήσιμο σε κάθε προσπάθεια μοντελοποίησης εργαστηριακών διατάξεων. Το μειονέκτημα του μοντέλου αυτού είναι ουσιαστικά η έλλειψη μοντελοποίησης της θερμικής συμπεριφοράς των διαφόρων στοιχείων και κυρίως της αντίστασης σειράς και της χωρητικότητας. Η διακύμανση των τιμών των στοιχείων αυτών σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι αρκετά μεγάλη και δεν μπορεί να αγνοηθεί αν θέλουμε να πετύχουμε μια καλή ακρίβεια. Αντίθετα το μοντέλο DTDSM παρέχει ικανοποιητική θερμική μοντελοποίηση αλλά ο ακριβής υπολογισμός των παραμέτρων του βασίζεται σε δοκιμές και χρονοβόρες σειρές πειραμάτων που απαιτούν ενδεχομένως εξειδικευμένο εξοπλισμό.
Η σκέψη μας ήταν η δημιουργία ενός νέου μοντέλου που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο παραπάνω. Το κυκλωματικό ισοδύναμο δεν διαφέρει πολύ από αυτό του μοντέλου δύο κλάδων, και η ουσιαστική διαφορά είναι η αλλαγή των στοιχείων της αντίστασης σειράς και της χωρητικότητας με άλλα μη γραμμικά εξαρτημένα απ' τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία του υπερπυκνωτή δεν λαμβάνεται σταθερή αλλά επηρεάζεται από τη θέρμανση της αντίστασης σειράς (R_S) λόγω του ρεύματος που τον διαρρέει. Για τη θερμική μοντελοποίηση ακολουθεί το απλό μοντέλο δεύτερης τάξης που αναφέραμε στο κεφάλαιο 4.3.3.2. Σε μελλοντικές εργασίες που θα εκπονηθούν για τους συγκεκριμένους υπερπυκνωτές που θα αγοραστούν από το ΕΜΠ, πρέπει να γίνουν σειρές πειραμάτων για να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι συντελεστές c1, k1, c2, k2. Οι υπόλοιπες παράμετροι το μοντέλου προκύπτουν από μία μόνο μέτρηση όπως στο μοντέλο δύο κλάδων στο κεφάλαιο 4.2.1.

Έχουμε λοιπόν το κυκλωματικό ισοδύναμο:



Σχήμα 4.22

Η εξάρτηση της αντίστασης σειράς από τη θερμοκρασία ακολουθεί το μοντέλο DTDSM και όπως περιγράψαμε αναλυτικά στο κεφάλαιο 4.3.2.2, για τη μοντελοποίηση της εξάρτησης αυτής χρησιμοποιείται μία εκθετική συνάρτηση, κατάλληλη ώστε να προσεγγίζει τα πειραματικά δεδομένα. Η συνάρτηση αυτή, επίσης υπολογίζεται από το Matlab, για κάθε κύκλο της προσομοίωσης. Η μορφή της συνάρτησης είναι: $Rs = Ae^{-\lambda T}$
όπου Α η αρχική τιμή της, Τ η θερμοκρασία και λ ο συντελεστής που περιγράφει τη μορφή της εκθετικής. Στην περίπτωση του πυκνωτή 2700F – 2,3V της Nippon-Chemicon είναι:

$$A = 0,0015 \quad \kappa\alpha\iota \quad \lambda = 0,0219$$

Η εξάρτηση της χωρητικότητας του πυκνωτή από τη θερμοκρασία μοντελοποιείται με χρήση ενός διορθωτικού συντελεστή. Έτσι θα έχουμε, όπως στο DTDSM, μία αναπροσαρμοζόμενη καμπύλη χωρητικότητας-τάσης, ανάλογα με τη θερμοκρασία. Ο συντελεστής αυτός υπολογίζεται με κατάλληλη συνάρτηση στο Matlab όπου λαμβάνουμε το λόγο της χωρητικότητας στην ζητούμενη θερμοκρασία προς την ονομαστική χωρητικότητα του υπερπυκνωτή, Δηλαδή:

$$corr = \frac{p1 \cdot T_C^3 + p2 \cdot T_C^2 + p3 \cdot T_C + p4}{C_{nom}}$$

Ο αριθμητής του κλάσματος περιέχει την πολυωνυμική προσέγγιση της καμπύλης που περιγράφει την μεταβολή της χωρητικότητας λόγω της θερμοκρασίας. Η καμπύλη προκύπτει από τις μετρήσεις που έγιναν για τη δημιουργία των καμπυλών του σχήματος 3.2. Για τον πυκνωτή που μελετάμε οι συντελεστές αυτοί είναι:

$$p1 = 0,002161$$
$$p2 = -0,06140$$
$$p3 = -0,18243$$
$$p4 = 2701,990$$

Και η ονομαστική τιμή της χωρητικότητας λαμβάνεται ίση με το άθροισμα $C0 + Kv \cdot V$ για τάση V κοντά στην ονομαστική του που αναγράφεται στα στοιχεία του πυκνωτή.

Όλα τα κυκλωματικά στοιχεία (εκτός προφανώς από την R0) λαμβάνονται με όμοιο τρόπο όπως στο μοντέλο δύο κλάδων και συνεπώς είναι:

C0 [F]	Kv [F/V]	C2 [F]	R2 [Ω]
2161	146,0	321,0	0,7793

Πίνακας 12

Οι μαθηματικές σχέσεις που μοντελοποιούμε στο Simulink είναι:

$$V = I \cdot \frac{\left(R_S\left(T_c\right) + \frac{1}{s \cdot corr\left(C_0 + C'\right)}\right)\left(R_2 + \frac{1}{sC_2}\right)R_{EPR}}{R_2 R_{EPR} + \frac{R_{EPR}}{sC_2} + R_S\left(T_c\right)R_{EPR} + \frac{R_{EPR}}{s \cdot corr\left(C_0 + C'\right)} + R_S\left(T_c\right)R_2 + \frac{R_S\left(T_c\right)}{sC_2} + \frac{R_2}{s \cdot corr\left(C_0 + C'\right)} + \frac{1}{s^2 C_2 \cdot corr\left(C_0 + C'\right)}}$$

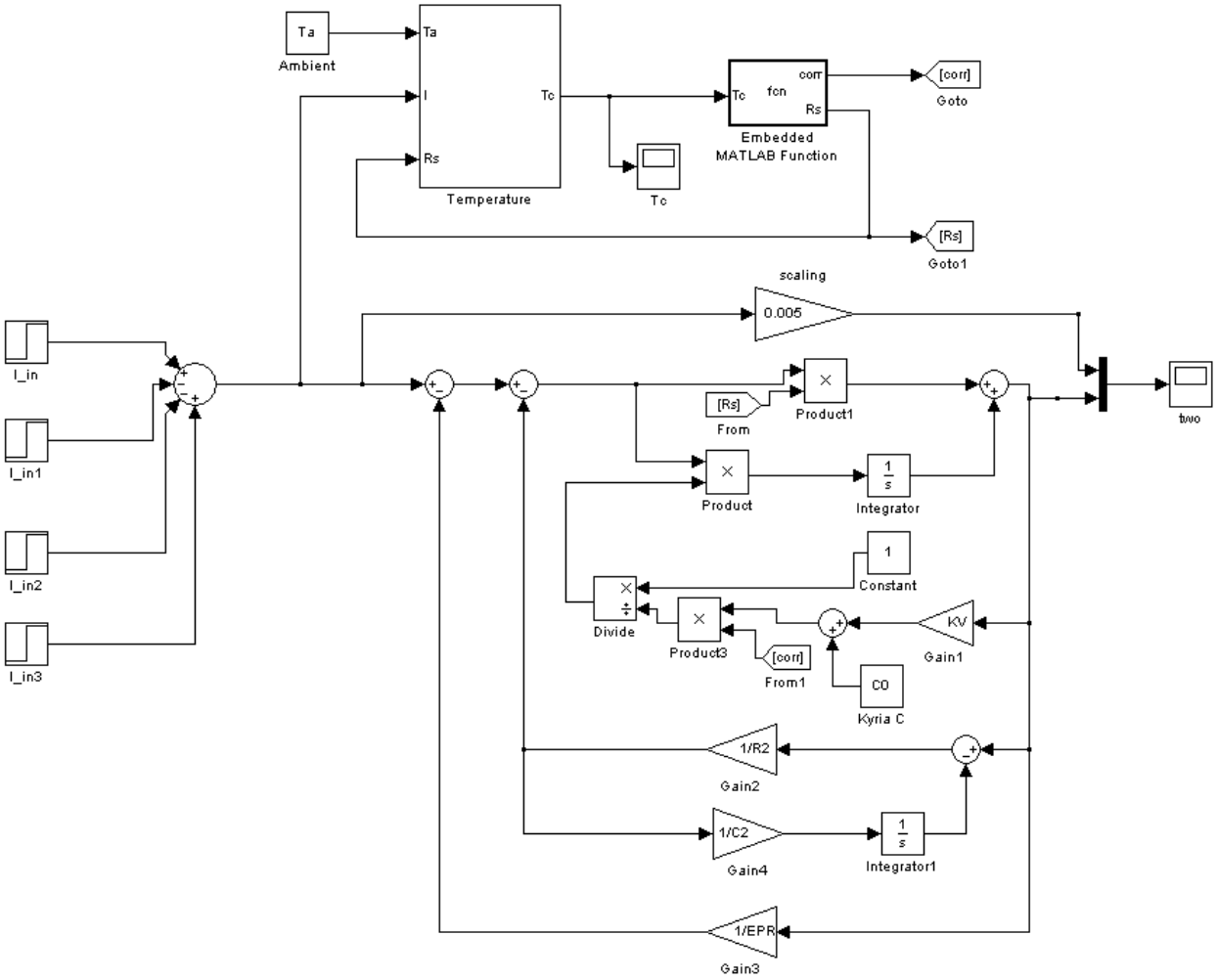
Ενώ για τη θερμοκρασιακή εξάρτηση το μοντέλο δεύτερης τάξης είναι όπως στο DTDSM

$$T_c = I^2 R_s\left(\frac{1}{c1 \cdot s + k1} + \frac{1}{c2 \cdot s + k2}\right) + T_a\left(\frac{k1}{c1 \cdot s + k1} + \frac{k2}{c2 \cdot s + k2} - 1\right)$$

Με συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας k, και θερμοχωρητικότητα c όπως και στο DTDSM, εξαρτώμενα από την θερμοκρασία μέσω πειραματικά προσδιοριστέων σχέσεων που καταγράφονται σε lookup tables.

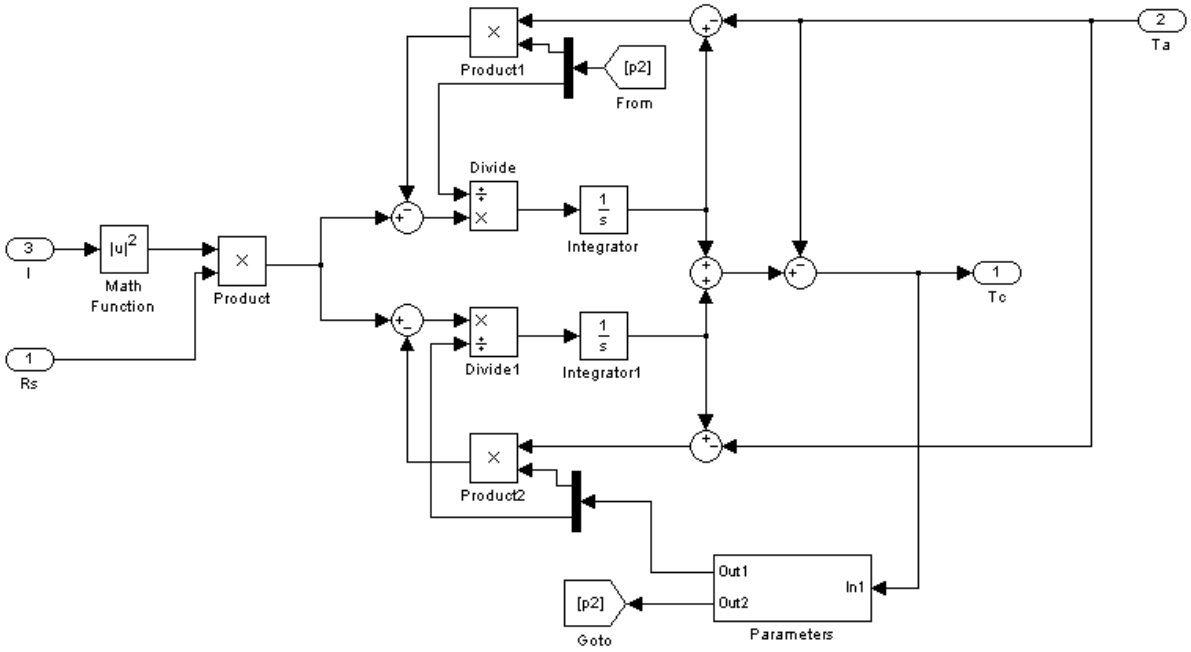
4.4.2 Μοντέλο Simulink

Το μοντέλο στο Simulink θα είναι:



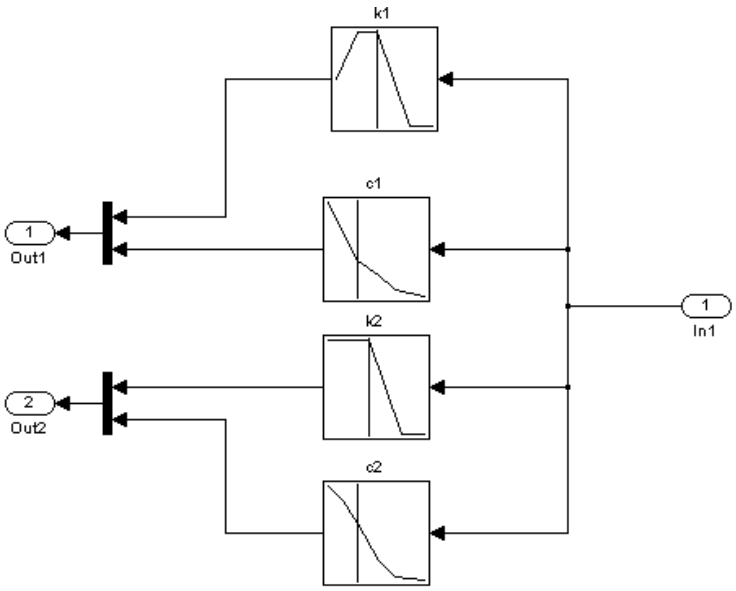
Σχήμα 4.23

Με το υποσύστημα για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας:



Σχήμα 4.24

Με τις εξαρτημένες από τη θερμοκρασία, παραμέτρους c1, k1, c2, k2 να προκύπτουν από κατάλληλα lookup tables:



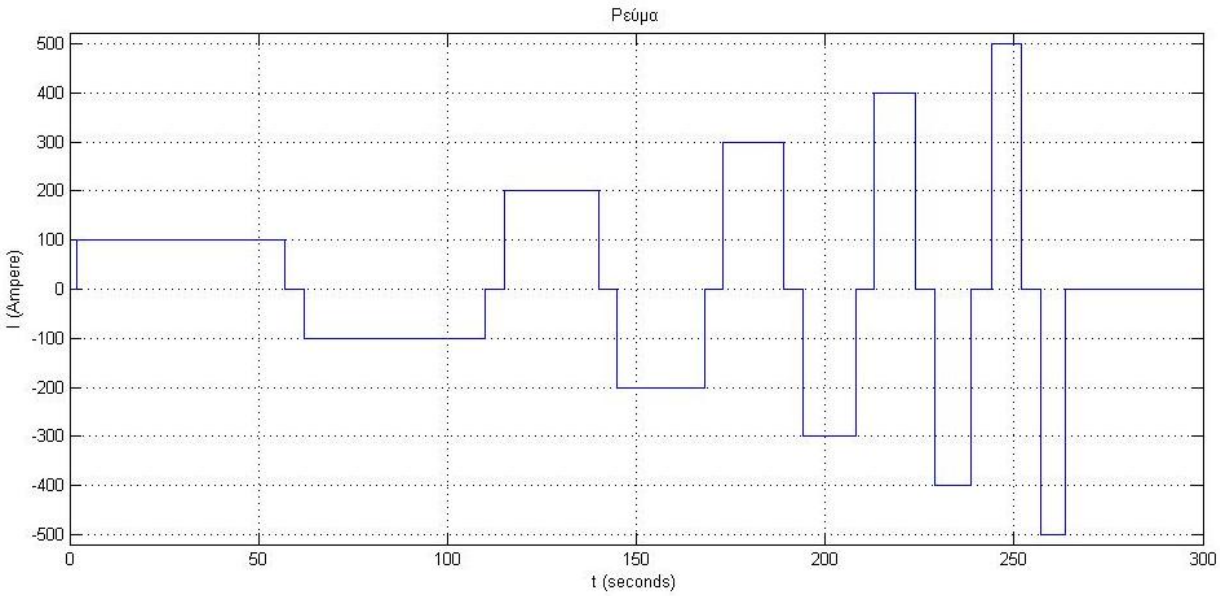
Σχήμα 4.25

Ενώ η συνάρτηση υπολογισμού της αντίστασης σειράς και του συντελεστή διόρθωσης της χωρητικότητας είναι:

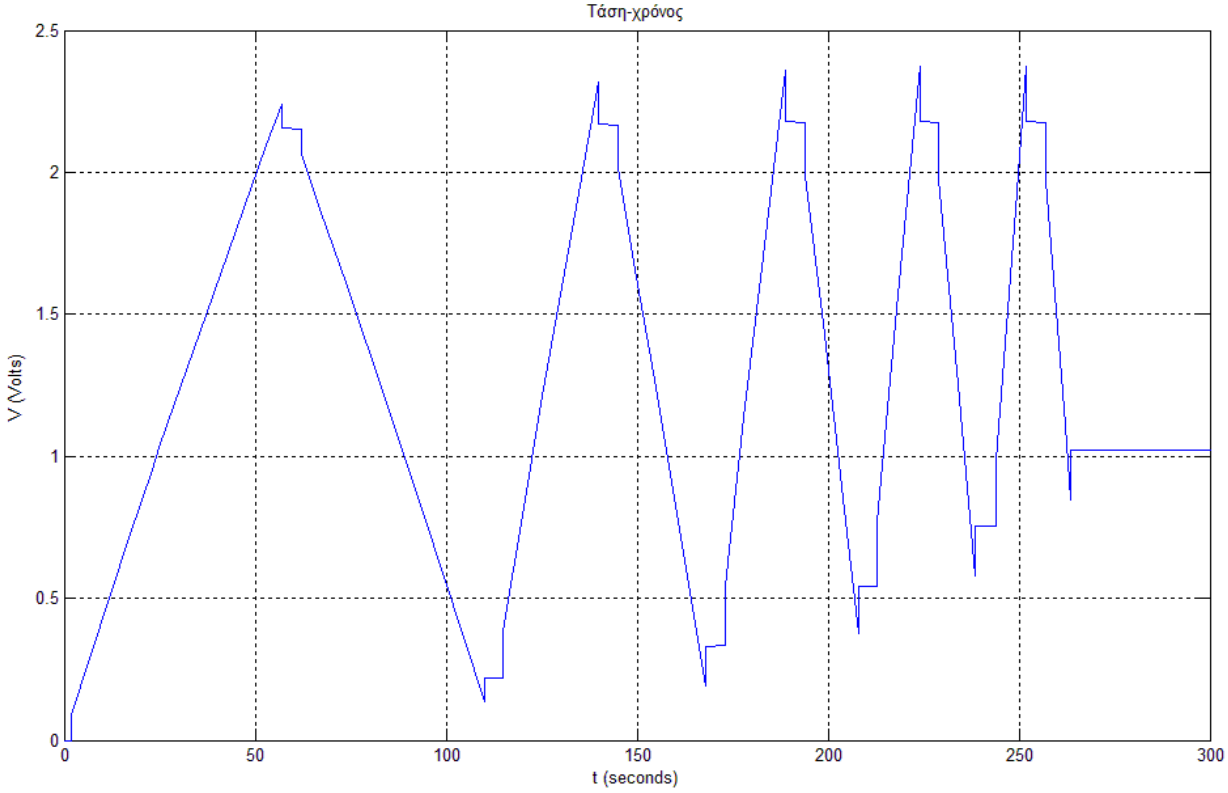
```
function [corr, Rs] = fcn(Tc)
% Ypologismos tis antistasis seiras tou yperpyknwti
% ws synartisis tis thermokrasias
% O syntelestis c xrisimopoihtai gia diorthwsi tis xwritikotitas
% kata tis allages tis thermokrasias

% Eisodoi: Tc = thermokrasia
%          I = reyma eisodou
% Eksodoi: c = syntelestis diorthwsis
%          Rs = antistasi seiras

%Rs
A = 0.0015;
lamda = 0.0219;
Rs = A*exp(-lamda*Tc);

%Capacitance
p1 = 0.002161;
p2 = -0.06140;
p3 = -0.18243;
p4 = 2701.990;

cor = p1*Tc^3+p2*Tc^2+p3*Tc+p4;
corr = cor/2497;

end
```

4.4.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

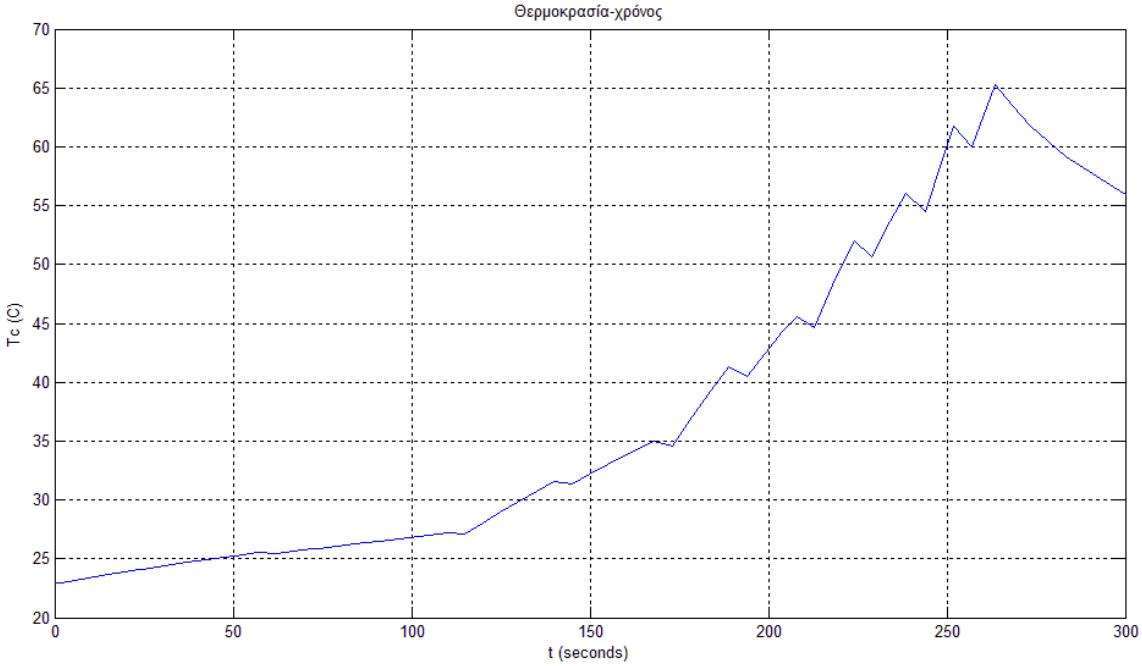
Το ρεύμα που δώσαμε ως είσοδο ήταν:



Και προέκυψε τάση στον υπερπυκνωτή όπως στο ακόλουθο διάγραμμα

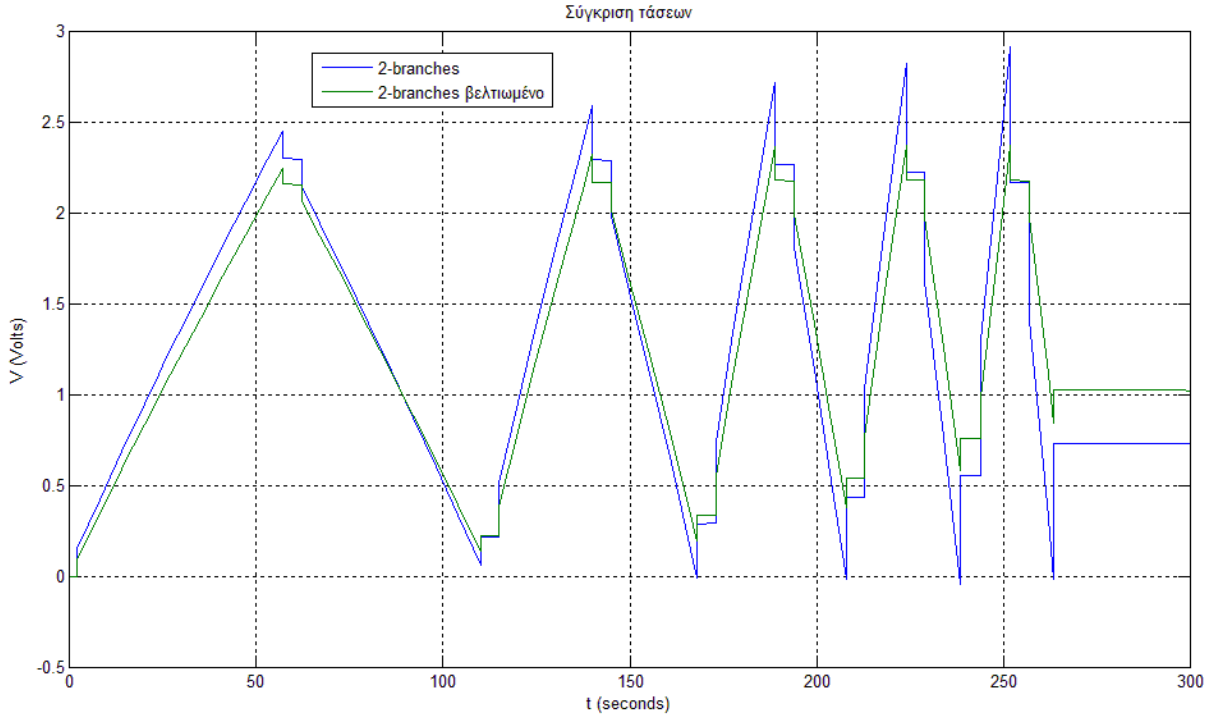


Η θερμοκρασία, σύμφωνα με το μοντέλο μας, διακυμάνθηκε ως εξής:

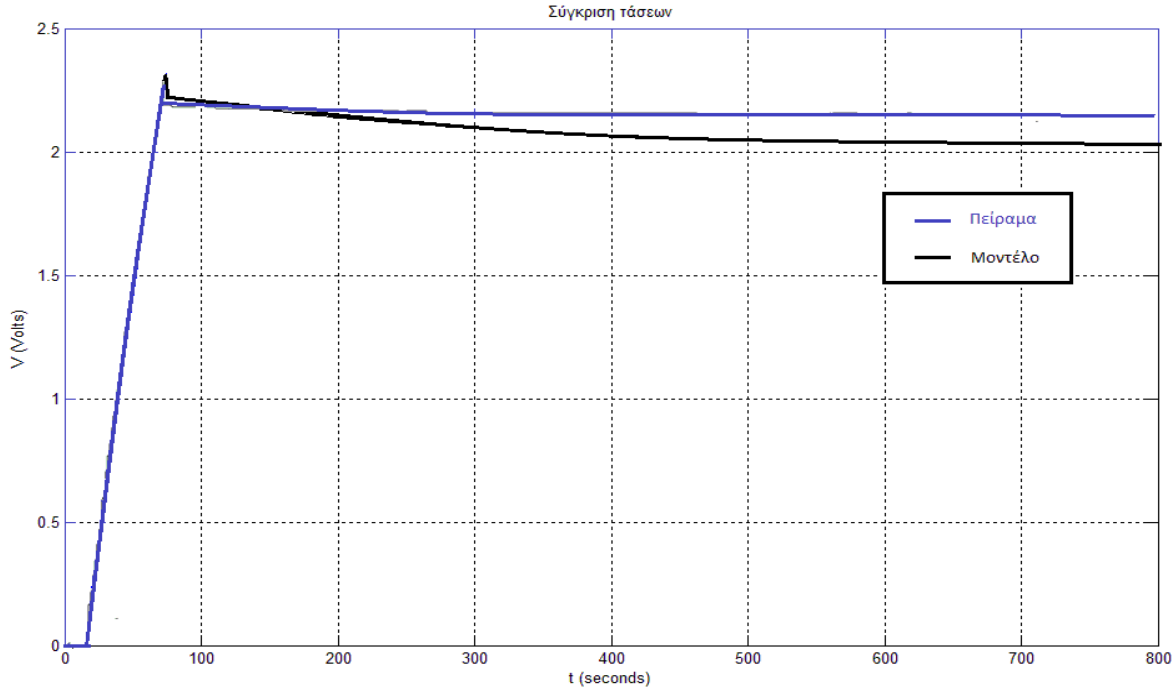


Τα αποτελέσματα προσομοιάζουν με αυτά του απλού μοντέλου δύο κλάδων, αλλά έχει ενδιαφέρον η σύγκριση μεταξύ τους ώστε να δούμε αν τελικά η εισαγωγή της εξάρτησης των παραμέτρων από τη

θερμοκρασία βελτίωσε το μοντέλο. Η τάση πάνω στον υπερπυκνωτή φαίνεται παρακάτω για κάθε μοντέλο σε κοινούς άξονες.

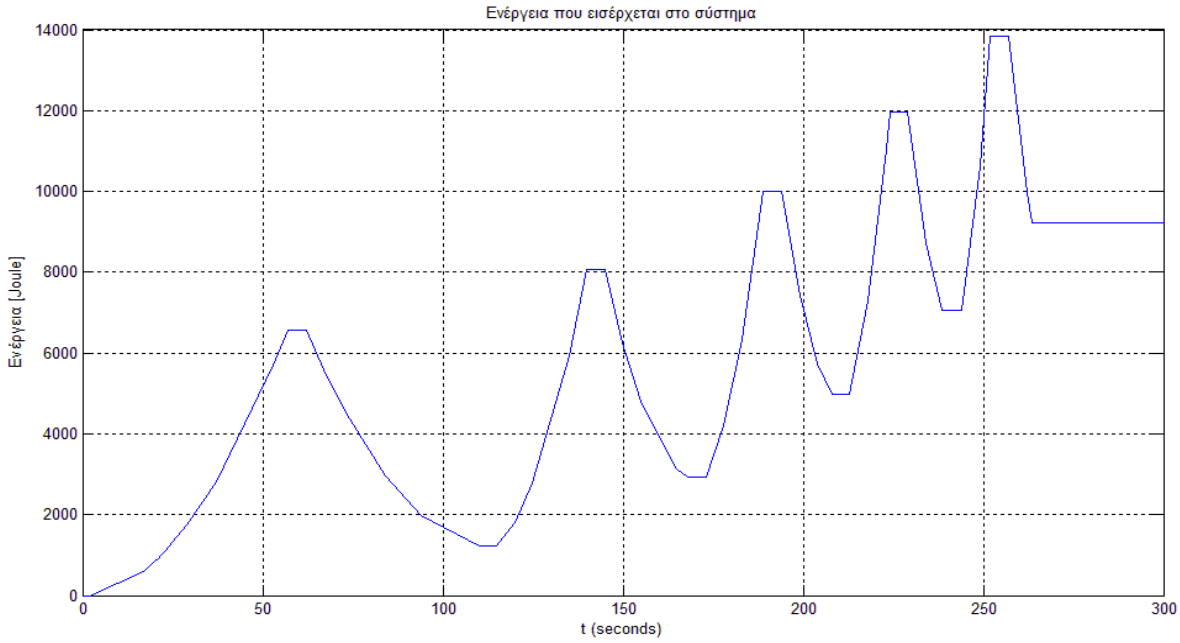


Το πιο σημαντικό αποτέλεσμα φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα, όπου βλέπουμε την τάση του υπερπυκνωτή όπως προκύπτει από το μοντέλο μας σε σχέση με τα πειραματικά δεδομένα που είχαμε στη διάθεσή μας. Απ' ότι βλέπουμε η ταύτιση, ειδικά στην αρχή της καμπύλης είναι σχεδόν τέλεια. Όσο περνάει ο χρόνος φαίνεται ότι οι δύο καμπύλες αποκλίνουν. Αυτό ίσως διορθώνεται με μία πιο καλή εκτίμηση των θερμοκρασιακών παραμέτρων k και c, μέσα από πειράματα για τον συγκεκριμένο υπερπυκνωτή.

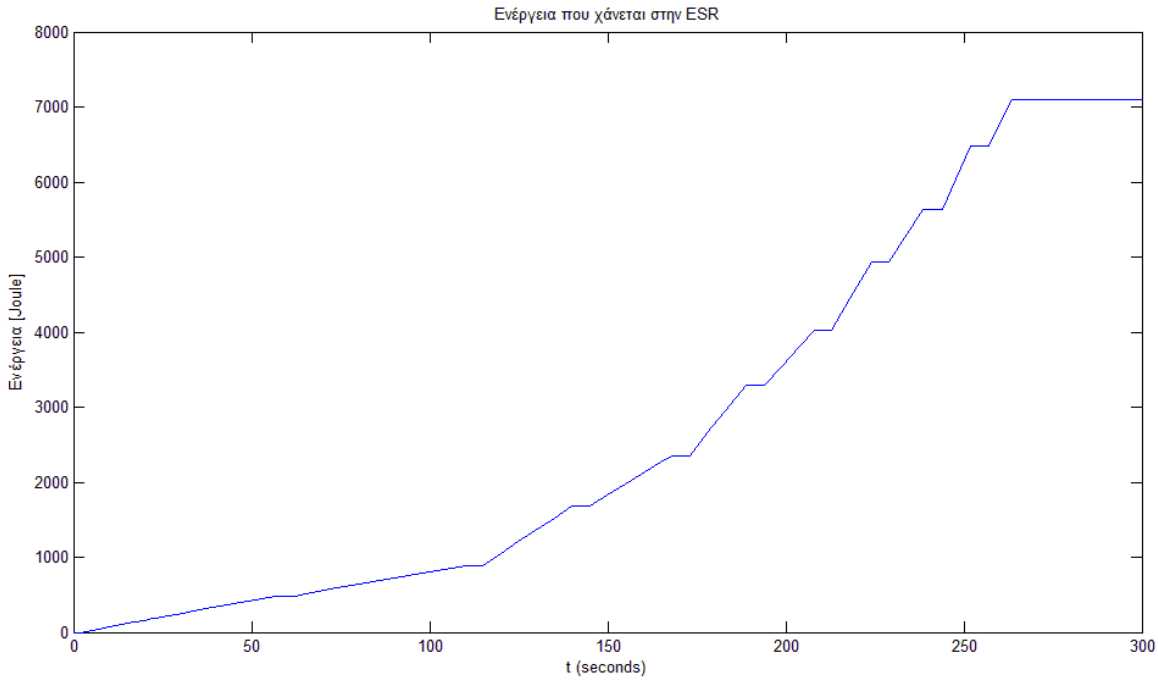


Ακολουθούν τα διαγράμματα με τις καμπύλες ενέργειας που εισέρχονται στο σύστημα του υπερπυκνωτή, τις ενεργειακές απώλειες πάνω στην αντίσταση σειράς, καθώς και το ποσό της

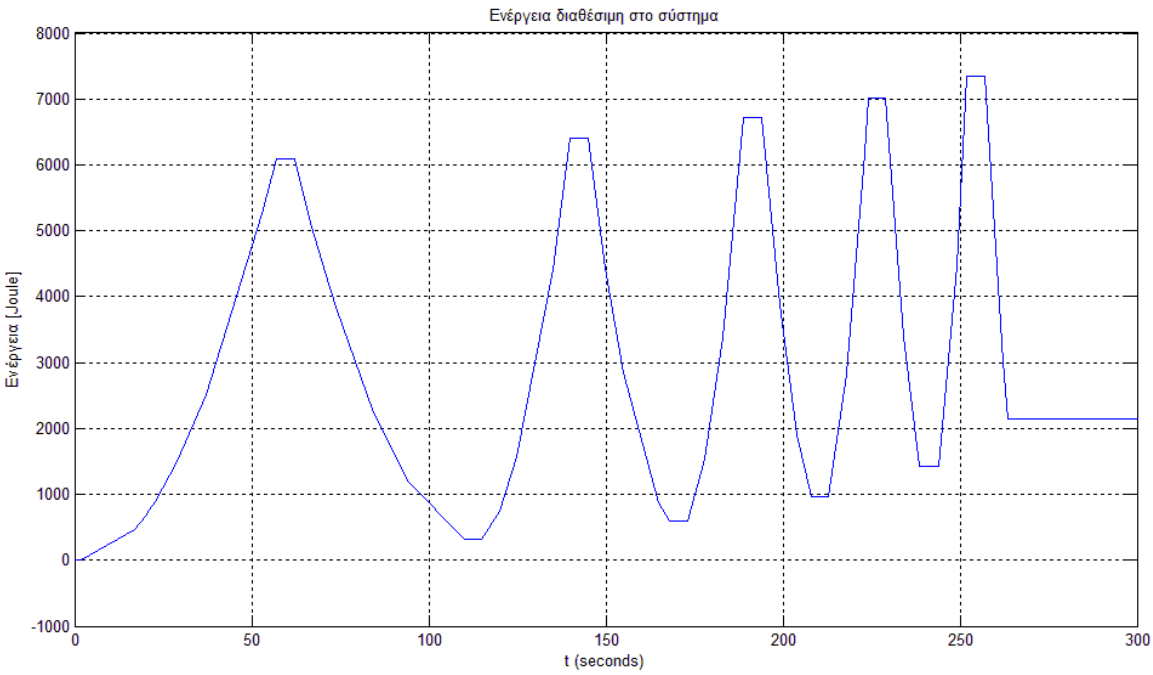
ενέργειας που είναι πραγματικά διαθέσιμο κάθε στιγμή. Στο ακόλουθο διάγραμμα παρουσιάζεται η ενέργεια που εισέρχεται στο κύκλωμα με τη μορφή του ρεύματος φόρτισης που παρουσιάσαμε στο πρώτο διάγραμμα.



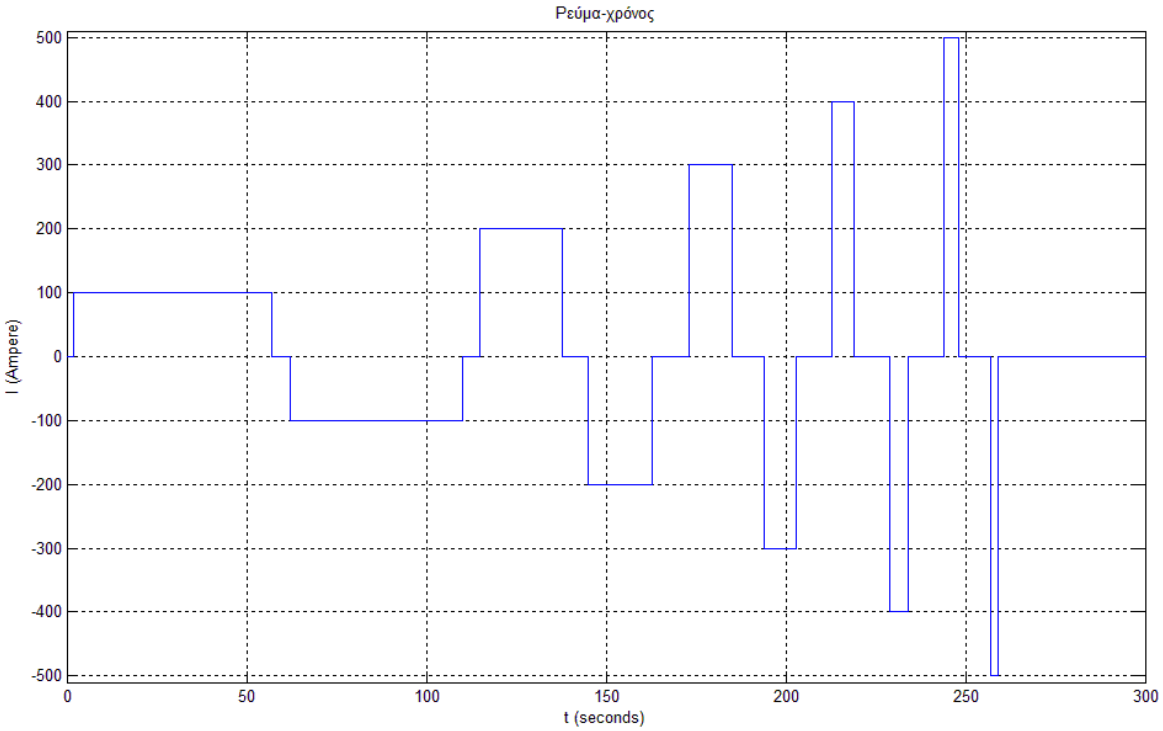
Η ενέργεια που έχει χαθεί κάθε στιγμή (και έχει μετατραπεί σε θερμότητα) πάνω στην αντίσταση σειράς είναι:



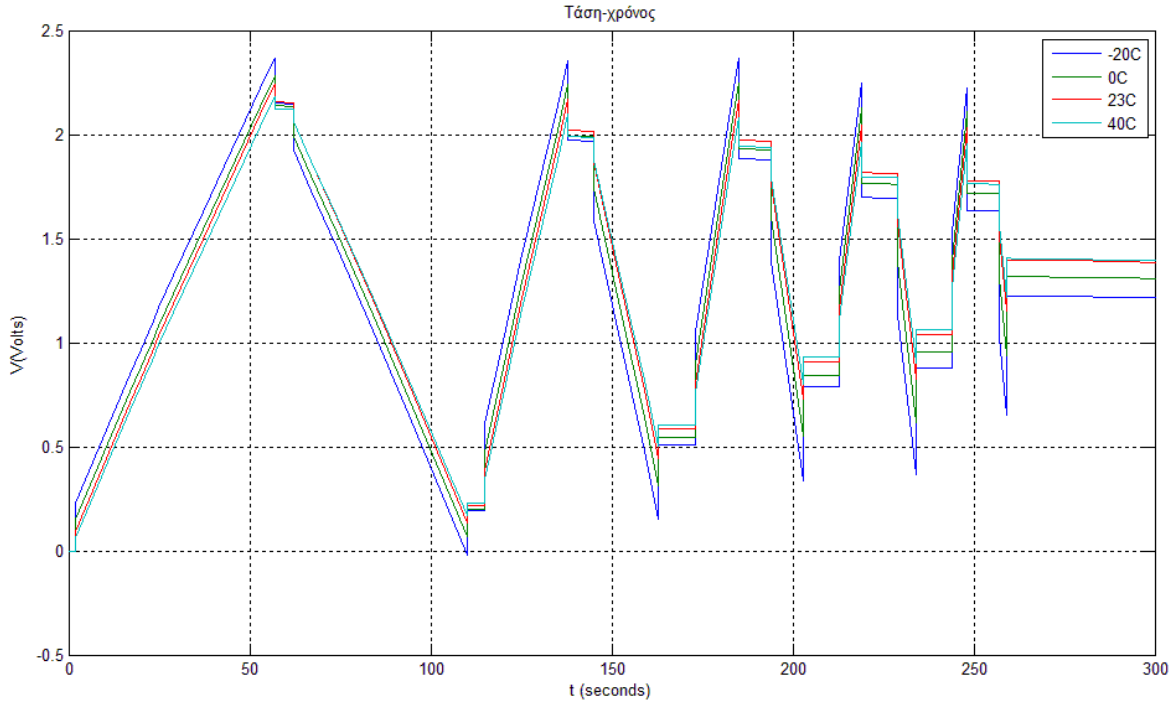
Και τελικά, η διαφορά των δύο είναι η διαθέσιμη (αποθηκευμένη) κάθε στιγμή ενέργεια στον υπερπυκνωτή.



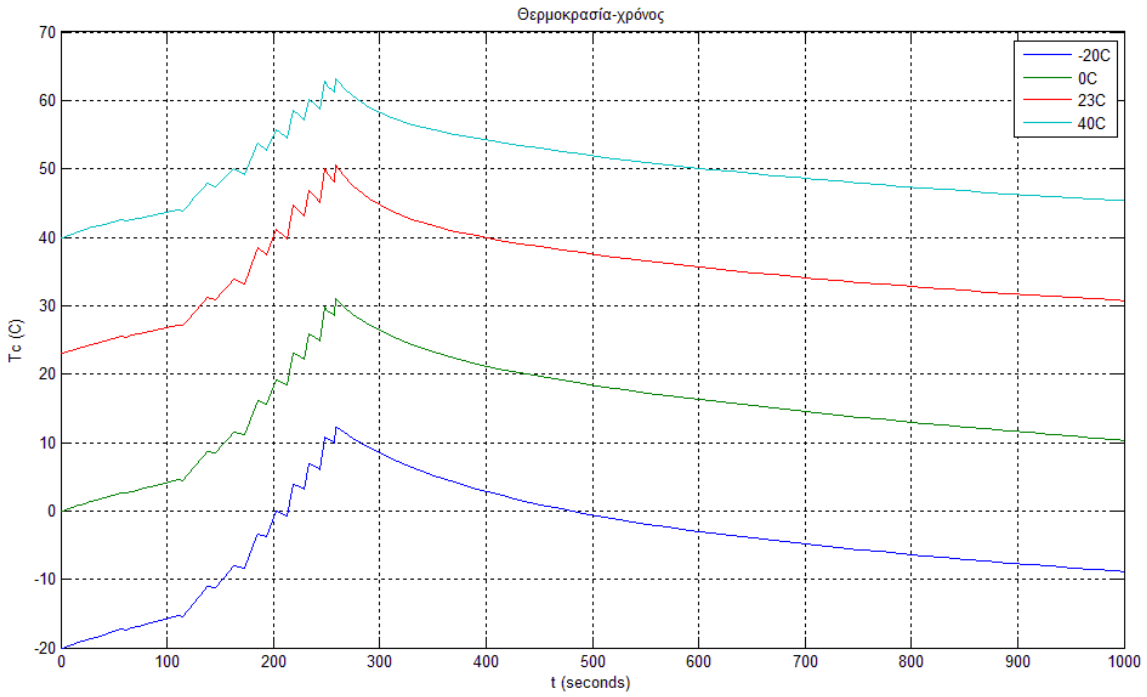
Το μοντέλο μας, λαμβάνει επίσης υπόψη την θερμοκρασία περιβάλλοντος. Στα επόμενα διαγράμματα φαίνονται οι διάφορες καμπύλες τάσης, θερμοκρασίας κτλ για διάφορες θερμοκρασίες περιβάλλοντος.
Το ρεύμα που χρησιμοποιήθηκε γι αυτές τις προσομοιώσεις ήταν:



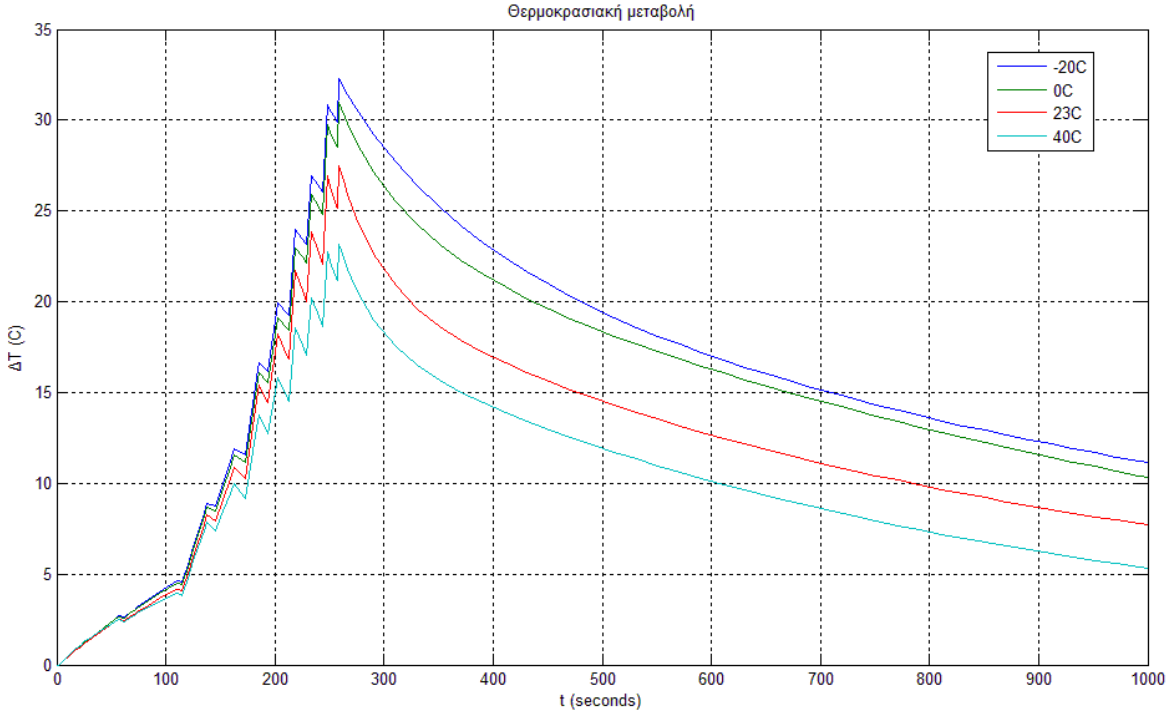
Για διαφορετικές θερμοκρασίες, η τάση του υπερπυκνωτή είναι:



Η θερμοκρασία του υπερπυκνωτή σε κάθε προσομοίωση κυμάνθηκε όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα



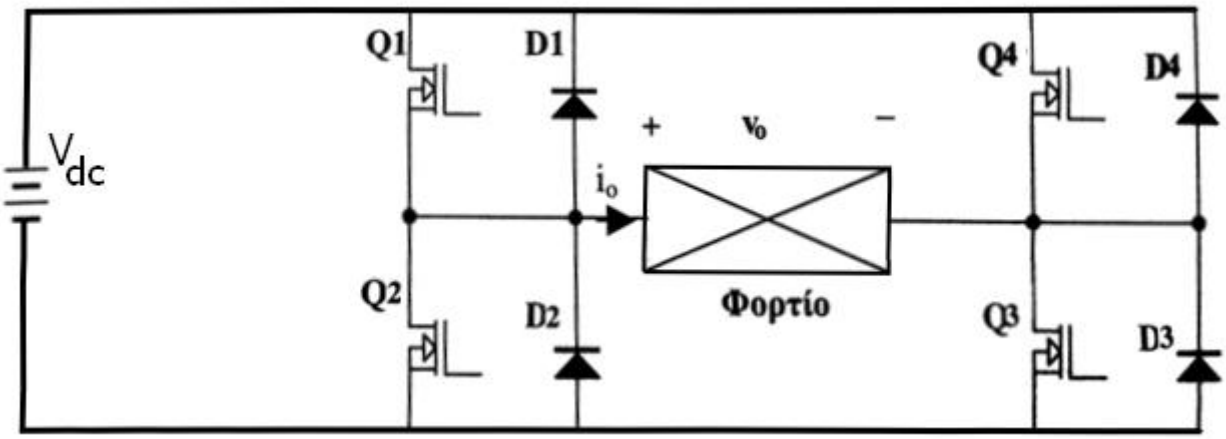
Πιο ενδιαφέρον είναι το ακόλουθο διάγραμμα που μας δείχνει την μεταβολή στη θερμοκρασία του πυκνωτή σε σχέση με τη θερμοκρασία περιβάλλοντος σε κάθε περίπτωση.


Θερμοκρασιακή μεταβολή
ΔT (C)
t (seconds)
-20C
0C
23C
40C
0
5
10
15
20
25
30
35
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΣΥΝΔΕΣΗ ΥΠΕΡΠΥΚΝΩΤΩΝ ΜΕ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΕΑ

Ένας σκοπός της εργασίας αυτής είναι η προσομοίωση λειτουργίας ενός υπερπυκνωτή ως πηγή ισχύος σε ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Για τη σύνδεση του υπερπυκνωτή όμως, στο δίκτυο ή απλά και σε απομονωμένο φορτίο χρειάζεται ένας αντιστροφέας. Η συσκευή αυτή μετατρέπει την συνεχή τάση στα άκρα του πυκνωτή σε εναλλασσόμενη κατάλληλης συχνότητας και πλάτους ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί από το δίκτυο. Με άλλα λόγια, η συσκευή που παρέχει ενεργό και άεργο ισχύ στο δίκτυο και εν γένει στο φορτίο μας είναι ο αντιστροφέας. Ο υπερπυκνωτής και οι άλλες dc πηγές (πχ μπαταρίες) παρέχουν την ενεργό ισχύ στην είσοδο του αντιστροφέα.

5.1 Αντιστροφέας (Inverter)

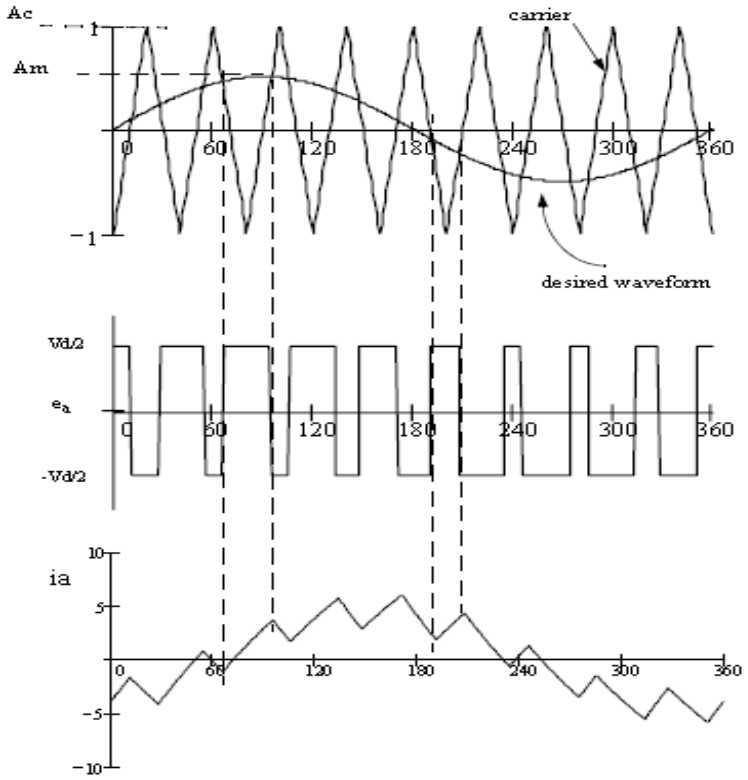


Σχήμα 5.1

Η μοντελοποίηση μας αφορά έναν μονοφασικό αντιστροφέα με ημιτονοειδή διαμόρφωση εύρους παλμών (SPWM). Η τεχνική ελέγχου SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation - Ημιτονοειδής Διαμόρφωση Εύρους Παλμών) αναπτύχθηκε πρωτίστως για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα που δημιουργούσε η διαμόρφωση τετραγωνικής μορφής εναλλασσόμενης τάσης εξόδου από τον αντιστροφέα. Αυτό συνίσταται κυρίως στις πολλές ανεπιθύμητες παρασιτικές αρμονικές που αυτή περιέχει σε χαμηλές συχνότητες, οι οποίες μπορούν να δημιουργούν επιπρόσθετες ροπές στο φορτίο μας και να το καταπονούν μηχανικά, παρεμποδίζοντας τη σωστή του κίνηση, αλλά πιο σημαντικά, προκαλούν μεγαλύτερα ρεύματα απωλειών με συνέπεια τη μικρή απόδοση των διατάξεών μας. Η προσπάθεια εξάλειψης ή μείωσης αυτών των αρμονικών μέσω φίλτρων LC είναι αρκετά δαπανηρή σε κόστος, βάρος και όγκο. Η διαμόρφωση SPWM ξεπερνά αυτές τις δυσκολίες χάρη στην ειδικής μορφής τάση που παράγει στην έξοδο του Inverter (αντιστροφέα). [39,40]

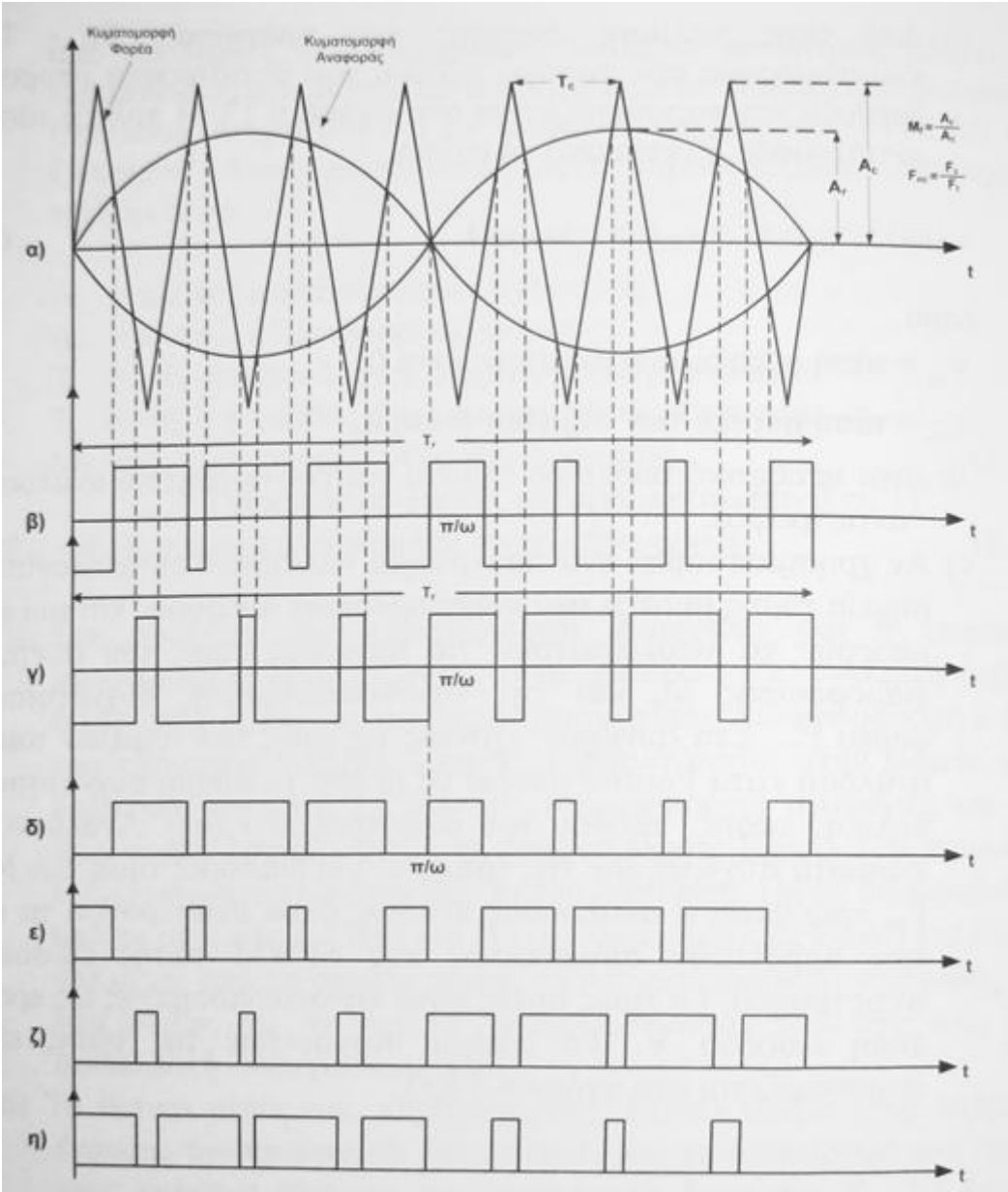
5.1.1 Αρχή λειτουργίας

Η βασική αρχή της τεχνικής SPWM παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2 που δείχνει πως με την σύγκριση δύο κυματομορφών, ενός ημιτόνου και ενός τριγωνικού παλμού, η τάση που παράγεται στην έξοδο του αντιστροφέα είναι άθροισμα πολλαπλών παλμών, που αρχίζει με παλμούς μικρού εύρους, το οποίο αυξάνεται και γίνεται μέγιστο όταν φτάσουμε στο μισό της ημιπεριόδου, έπειτα μειώνεται μέχρι το τέλος της ημιπεριόδου και στη συνέχεια επαναλαμβάνει την ίδια εικόνα για την δεύτερη ημιπερίοδο.



Σχήμα 5.2

Πιο αναλυτικά, από παλμογεννήτριες που υπάρχουν στο κύκλωμα ελέγχου του αντιστροφέα, δημιουργούνται δύο ημιτονικές κυματομορφές αναφοράς, μια για την πρώτη ημιπερίοδο για τους παλμούς έναυσης των Q1 και Q3 της γέφυρας ανόρθωσης που χρησιμοποιούμε και μία που διαφέρει από την πρώτη κατά φάση 180° για τους παλμούς έναυσης των Q2 και Q4 για την δεύτερη ημιπερίοδο, και μία τριγωνική παλμοσειρά φορέα. Στη συνέχεια, δύο τελεστικοί ενισχυτές-συγκριτές που αναλαμβάνουν τη σύγκριση των θετικών ημιπεριοδών των ημιτόνων με την τριγωνική παλμοσειρά, παράγουν στην έξοδό τους παλμούς οδήγησης των Q1,Q3 και Q2,Q4 αντίστοιχα, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τα MOSFET ή όποιες άλλες ημιαγώγιμες διακοπτικές διατάξεις χρησιμοποιούμε.



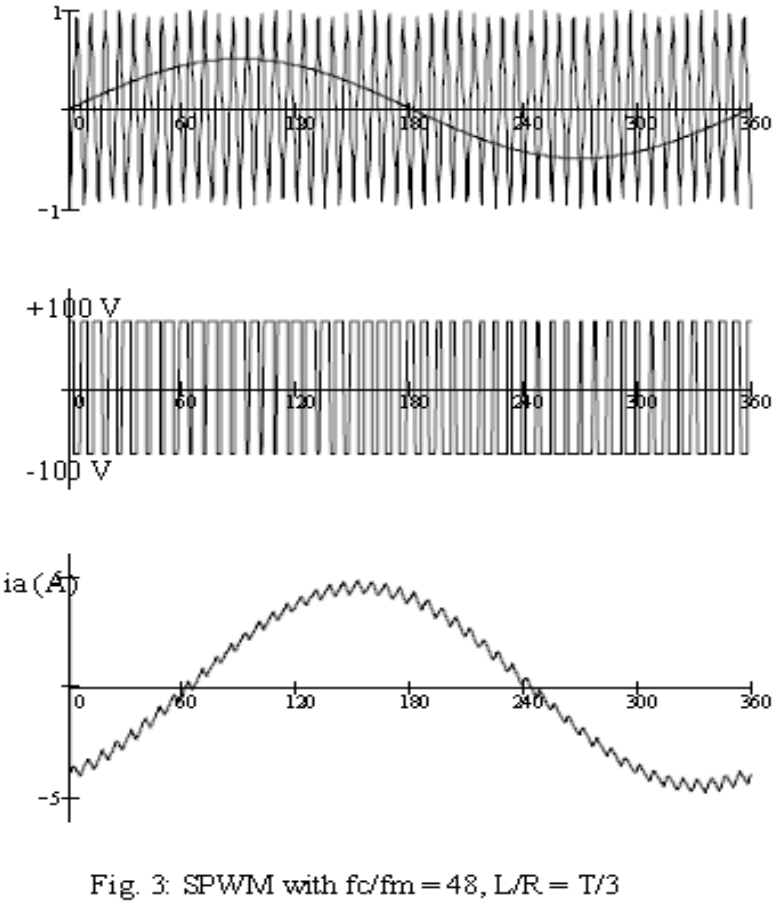
Σχήμα 5.3

Όπως φαίνεται και στο σχήμα 5.3, για την σύγκριση των δύο σε κάθε περίπτωση κυματομορφών υπάρχουν ορισμένοι παράμετροι τους, με τον έλεγχο των οποίων καταφέρνουμε να ελέγξουμε τις ιδιότητες της τάσης εξόδου:

Με τη μεταβολή των F_c, συχνότητα του τριγωνικού φορέα (F_{trig}), και F_r, συχνότητα της ημιτονοειδούς κυματομορφής (F_{sin}), μπορούμε να ελέγξουμε τη συχνότητα των παλμών σε μία περίοδο και κατά συνέπεια, τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Πιο συγκεκριμένα, μέσω του λόγου $F_{nc} = \frac{f_c}{f_{\sin}}$ μπορούμε να ρυθμίσουμε τη συχνότητα της v_{out} , αλλά όπως έχει αποδειχθεί για την SPWM αυτός ο λόγος καθορίζει και τη θέση των ανώτερων παρασιτικών αρμονικών του σήματος εξόδου. Μάλιστα, είναι αποδεδειγμένο πως αυτές οι αρμονικές εμφανίζονται συμμετρικά γύρω από τα πολλαπλάσια της συχνότητας F_{nc} ,δηλαδή γύρω από την $2F_{nc}$, $3F_{nc}$ κλπ.

Έτσι, η $1^{η}$ ανώτερη αρμονική της v_{out} γίνεται η αρμονική στη συχνότητα $2F_{nc}$-1, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα (η αρμονική στη συχνότητα $2F_{nc}$-3 είναι υπαρκτή και αυτή, αλλά λόγω του μικρού της πλάτους - περίπου 3% της κύριας αρμονικής - την αγνοούμε):

Σχήμα 5.4

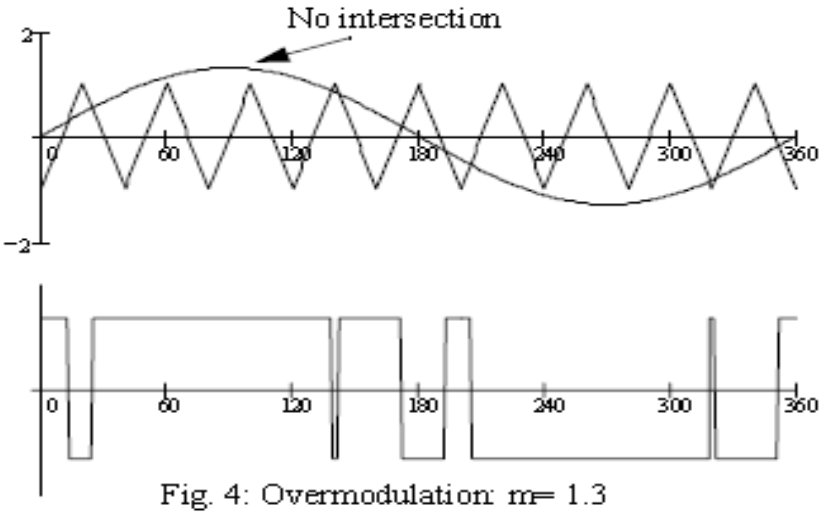


Σχήμα 5.5

Έτσι, για σχετικά μεγάλο F_{nc} (πολλοί τριγωνικοί παλμοί μέσα σε μία περίοδο του ημιτόνου), η πρώτη ανώτερη παρασιτική αρμονική 'φεύγει' πολύ μακριά από την κύρια αρμονική με αποτέλεσμα να μην επηρεάζει τόσο πολύ την v_{out} και να μην ενισχύει το ρεύμα απωλειών αφού μέσω της σχέσης i=v/Lω το ρεύμα που θα προκαλεί θα είναι μικρό ακόμα και αν έχουμε σχετικά μεγάλο πλάτος v. Έτσι, οι παρασιτικές αυτές αρμονικές μπορούν να απαλειφθούν εύκολα με μικρότερο (σε L,C) και λιγότερο δαπανηρό φίλτρο εξόδου. Κατά συνέπεια, με την SPWM η κυματομορφή του εξερχόμενου ρεύματος είναι ομαλότερη όπως φαίνεται και στο σχήμα.

Έπειτα, με τη ρύθμιση των A_r, πλάτος του ημιτόνου, και A_c, πλάτος της τριγωνικής παλμοσειράς, μπορούμε να προσαρμόσουμε την τάση εξόδου από πλευράς RMS τιμής. Συγκεκριμένα, μέσω του ελέγχου του λόγου $m = \frac{A_r}{A_c}$, μπορούμε να αυξομειώνουμε το πλάτος της κύριας αρμονικής της v_{out}. Μάλιστα, το πλάτος αυτό έχει υπολογιστεί ως $V \cdot m$, όπου V η τάση εισόδου του αντιστροφέα.

Στις περισσότερες των περιπτώσεων που εφαρμόζεται η τεχνική SPWM, η τιμή του m (συντελεστής διαμόρφωσης εύρους παλμών) κυμαίνεται από 0 έως 1.Για την σημαντική βελτίωση των παρασιτικών αρμονικών της τάσης εξόδου που μας παρέχει η τεχνική αυτή, μειώνεται η απόδοση σε πλάτος τάσης καθώς σύμφωνα με την παραπάνω σχέση, σε γενική περίπτωση, το πλάτος της κύριας αρμονικής εξόδου είναι περίπου 61% της τάσης DC εισόδου του inverter, ενώ με την τετραγωνική μορφή έχουμε περίπου 78%. Σε ορισμένες περιπτώσεις λοιπόν (όταν δεν μας ενοχλεί η ύπαρξη χαμηλόσυχνων παρασιτικών αρμονικών) μπορούμε να προσαρμόσουμε την τάση A_r να είναι μεγαλύτερη από την A_c, δηλαδή $M_f>1$, ώστε να αυξηθεί η RMS τιμή της v_{out} και να πλησιάζει την απόδοση της τετραγωνικής μορφής. Τότε λέμε πως έχουμε υπερδιαμόρφωση (overmodulation) όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



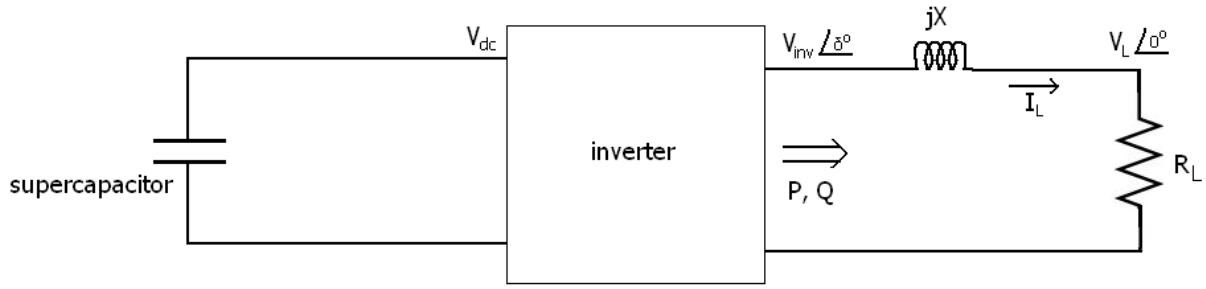
Σχήμα 5.6

Ανακεφαλαιώνοντας έχουμε ότι αν η τάση στην dc πλευρά είναι V_{dc}, τότε η RMS τιμή της κύριας αρμονικής της τάσης εξόδου του αντιστροφέα θα είναι:

$$\tilde{V} = \frac{m \cdot V_{dc}}{\sqrt{2}} \quad \text{για } 0 \le m \le 1$$

5.1.2 Μοντέλο Simulink

Το μοντέλο που θα κατασκευάσουμε δεν αναπαριστά την λειτουργία ενός αντιστροφέα, αλλά μόνο τα σημεία που μας ενδιαφέρουν (τάση εξόδου, ισχύς κλπ). Ένα ολοκληρωμένο μοντέλο αντιστροφέα με ακριβή μοντελοποίηση των ηλεκτρονικών ισχύος που τον αποτελούν δεν συμπεριλαμβάνεται στους στόχους της εργασίας αυτής και γι' αυτό στα αποτελέσματά μας φαίνονται μόνο στοιχειώδεις λειτουργίες της συσκευής.
Το μοντέλο που υλοποιήσαμε έχει ως βάση το παρακάτω κυκλωματικό ισοδύναμο:



Σχήμα 5.7

Η επαγωγή jX συμβολίζει μία γραμμή μεταφοράς μέχρι την ωμική κατανάλωση που συμβολίζεται με R_L. Θεωρούμε μηδενική γωνία της τάσης στο φορτίο και γωνία δ στην έξοδο του inverter.

Από θεωρία έχουμε [41]:

$$P = \frac{V_{inv} \cdot V_L \cdot \sin\delta}{\mathrm{X}}$$

$$Q = \frac{V_{inv}^2 - V_{inv} \cdot V_L \cdot \cos\delta}{X}$$

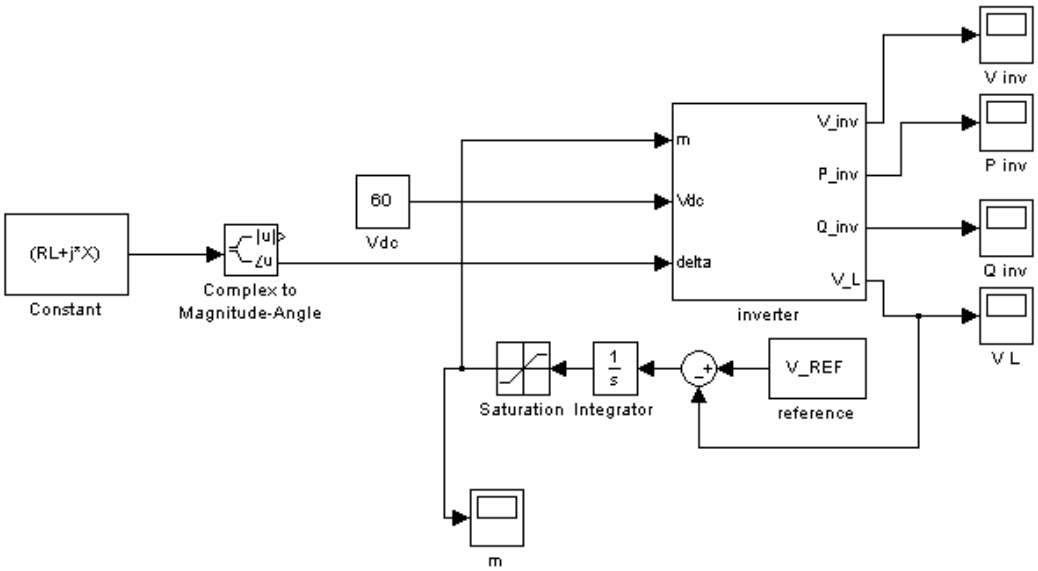
$$V_L \underline{|0^o} = \tilde{V}_{inv} \frac{R_L}{R_L + jX}$$

$$\tilde{V}_{inv} = mV_{dc} \underline{|\delta^o}$$

Η γωνία δ μπορεί να υπολογιστεί ως η γωνία του φορτίου (επαγωγής και αντίστασης)

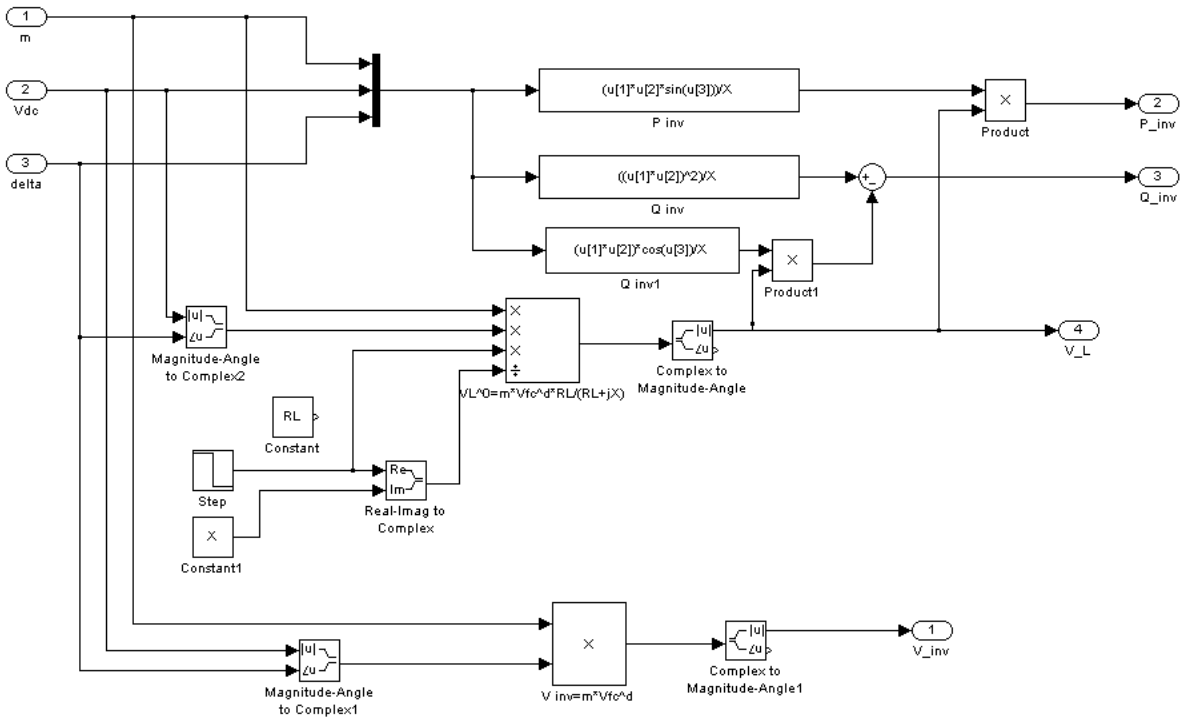
$$\delta = Arg\left\{R_L + jX\right\}$$

Και σύμφωνα με όλα τα παραπάνω έχουμε το ακόλουθο μοντέλο στο Simulink



Σχήμα 5.8

Το τμήμα του μοντέλου που αποτελείται από τον ολοκληρωτή, την τάση αναφοράς και τον περιοριστή, υλοποιεί το σύστημα ελέγχου του αντιστροφέα που αλλάζει τον συντελεστή διαμόρφωσης εύρους παλμών (m) ώστε να κρατηθεί η τάση στο επίπεδο της τάσης αναφοράς σε τυχόν αλλαγή του φορτίου ή της dc τάσης εισόδου. Ουσιαστικά πρόκειται για έναν I- ελεγκτή που τείνει να μηδενίσει τη διαφορά $V_{Lref} - V_L$. Ο περιοριστής κρατάει την τιμή του m ανάμεσα σε 0 και 1, αφού δεν θέλουμε να φτάσουμε σε υπερδιαμόρφωση. Το υποσύστημα του υπερπυκνωτή υλοποιεί απλά τις μαθηματικές εξισώσεις που αναφέραμε πιο πάνω.

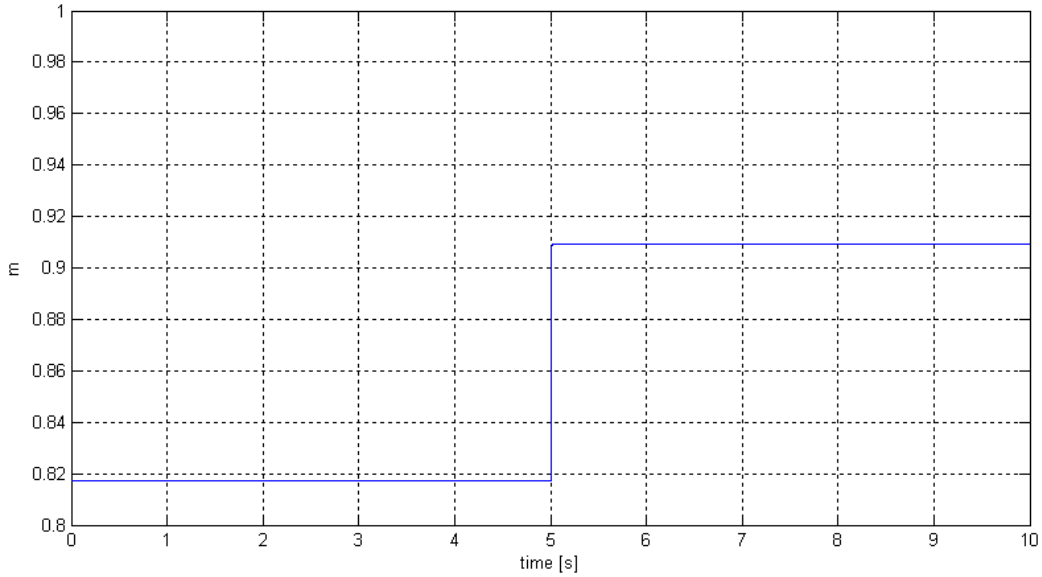


Σχήμα 5.9

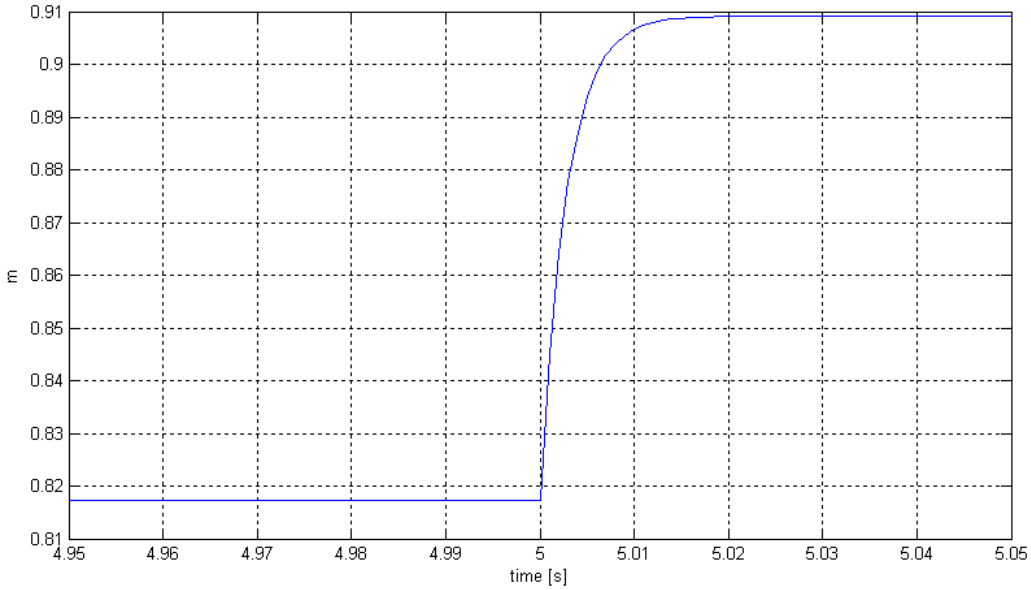
Θέτοντας σταθερή είσοδο 400V στην dc πλευρά ζητούμε μέσω του V_REF πλάτος τάσης εξόδου $230 \cdot \sqrt{2}$ V. Η ισχύς της εξόδου καθορίζεται από το μέγεθος της αντίστασης RL. Στην προσομοίωση που ακολουθεί, έχουμε κάνει τις εξής παραδοχές, X = 10Ω και RL = 100Ω. Η προσομοίωση τρέχει αρχικά με αυτές τις συνθήκες (και τις κατάλληλες αρχικοποιήσεις) και σε χρόνο 5sec πραγματοποιούμε μία βηματική πτώση της RL στα 20Ω, ώστε να δούμε αν ο έλεγχος του μοντέλου μας ανταποκρίνεται στις αλλαγές ισχύος που ζητάει το φορτίο, διατηρώντας την τάση V_L σταθερή χωρίς μεγάλη διακύμανση για πολύ χρόνο.

5.1.3 Αποτελέσματα προσομοίωσης

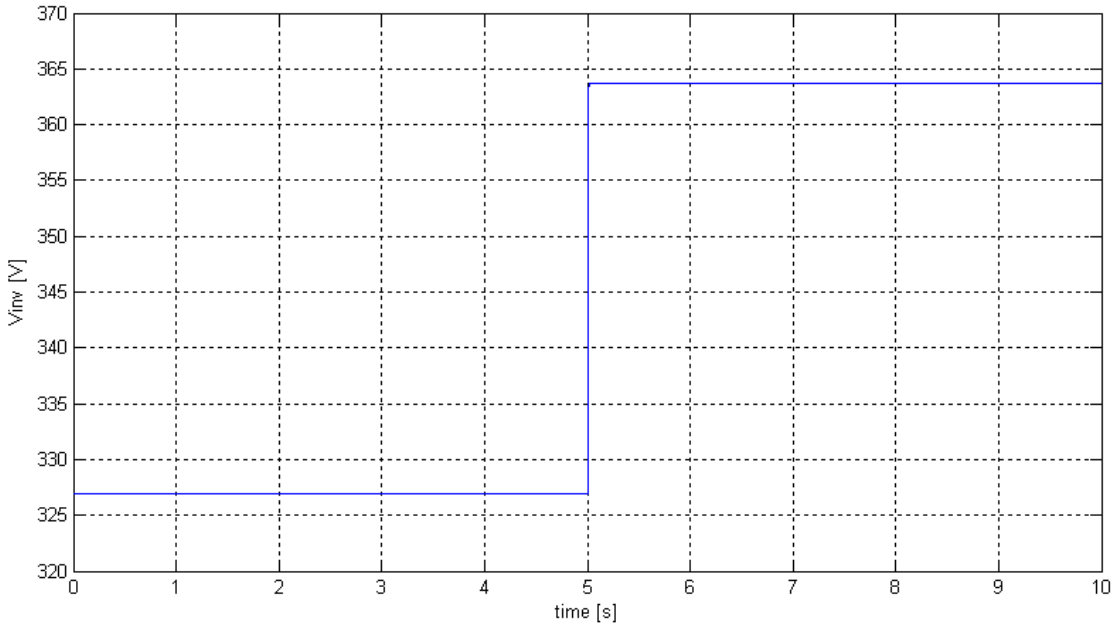
Συντελεστής διαμόρφωσης εύρους παλμών (m)



Η αλλαγή της αντίστασης φορτίου στα 5sec τείνει να μειώσει την τάση στο φορτίο. Μόλις ανιχνευθεί μεταβολή στην τάση φορτίου (VL) ο έλεγχος αλλάζει τον συντελεστή m ώστε να την κρατήσει σταθερή. Γι' αυτό βλέπουμε και την πολύ γρήγορη αύξηση του m σε αυτό το διάγραμμα. Η αλλαγή δεν είναι βηματική όπως φαίνεται στην ακόλουθη μεγέθυνση αφού ο ολοκληρωτής έχει ένα συγκεκριμένο χρόνο απόκρισης

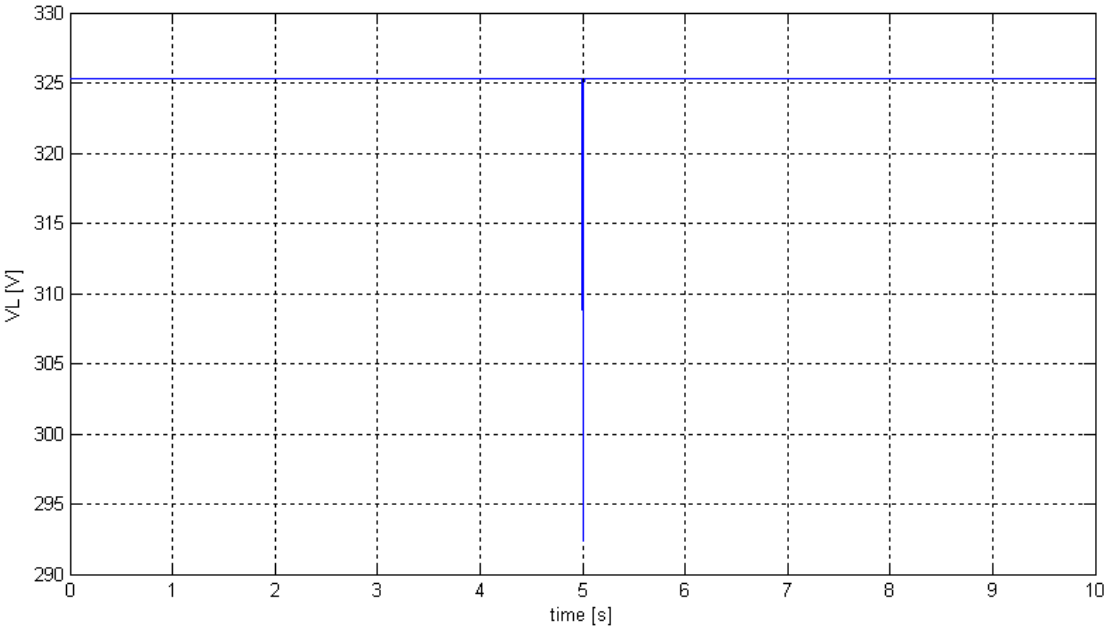


Τάση αντιστροφέα (V_inv)

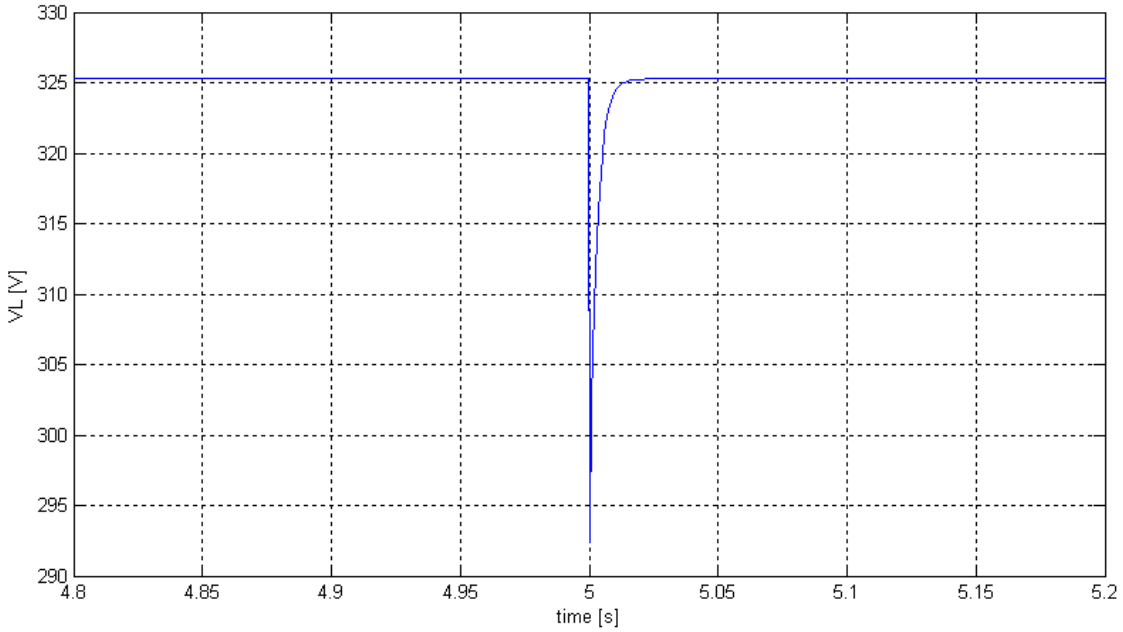


Η τάση αυτή εξαρτάται καθαρά από τον συντελεστή m οπότε η μεταβολή της έχει την ίδια μορφή με την αλλαγή του συντελεστή αυτού.

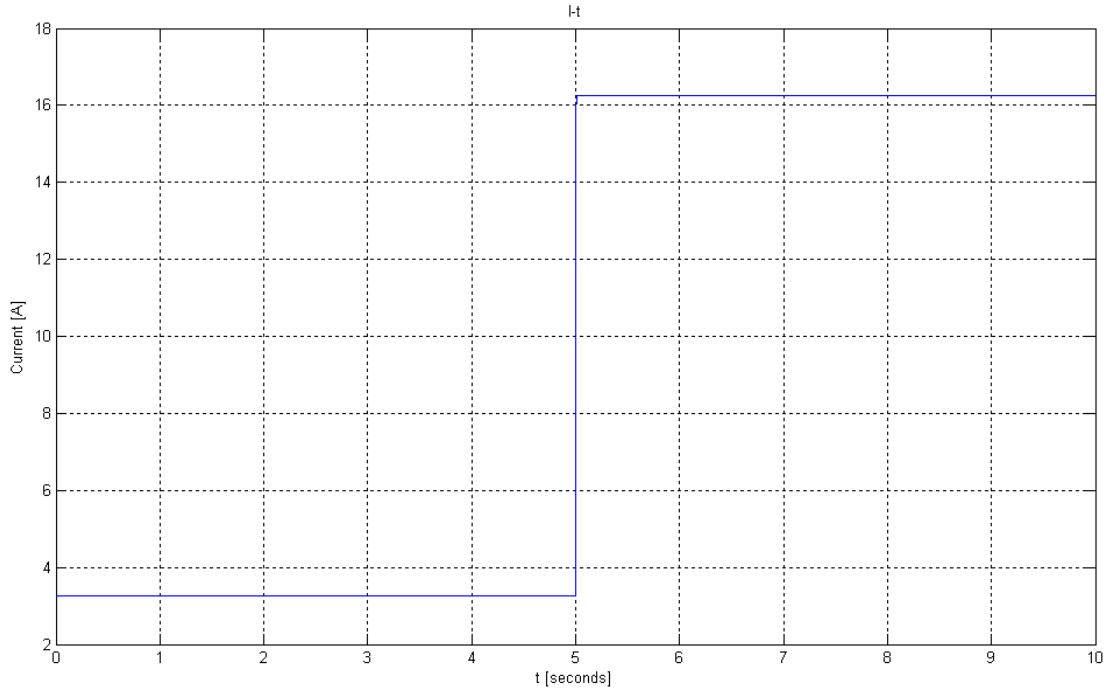
Τάση φορτίου (V_L)



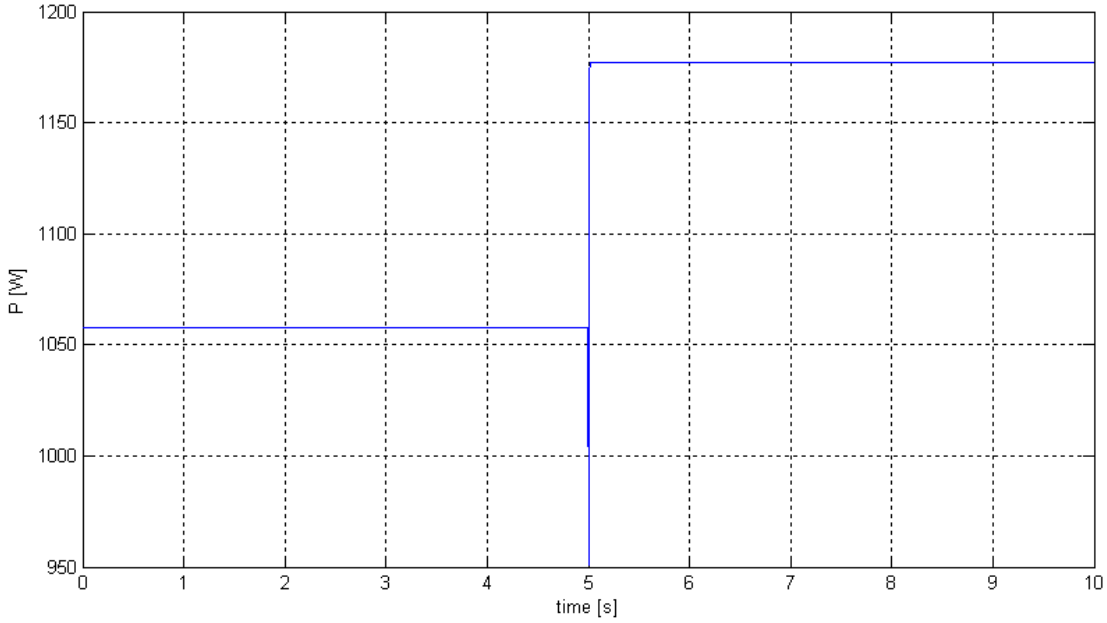
Η τάση του φορτίου παραμένει ουσιαστικά σταθερή εκτός από ένα μικρό χρονικό διάστημα (εκατοστό του δευτερολέπτου) που υπάρχει μία πτώση περίπου 32V όπως φαίνεται και στην ακόλουθη μεγέθυνση, μέχρι να δράσει ο έλεγχος που όπως είδαμε δεν είναι ακαριαίος.



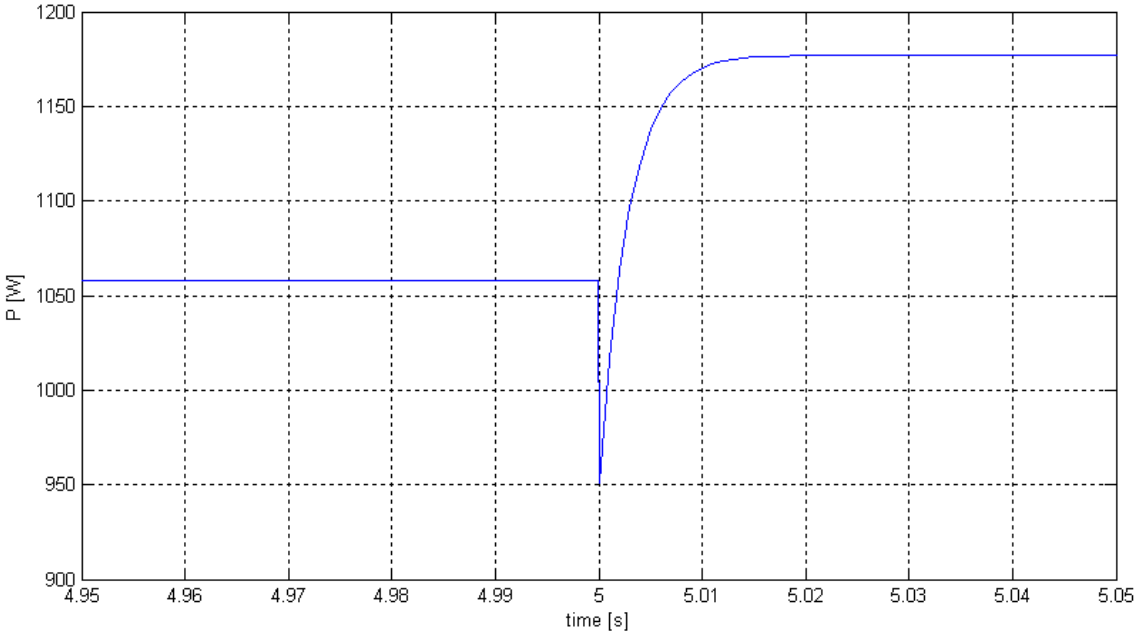
Το ρεύμα που παρέχεται στο φορτίο φαίνεται στο ακόλουθο διάγραμμα:



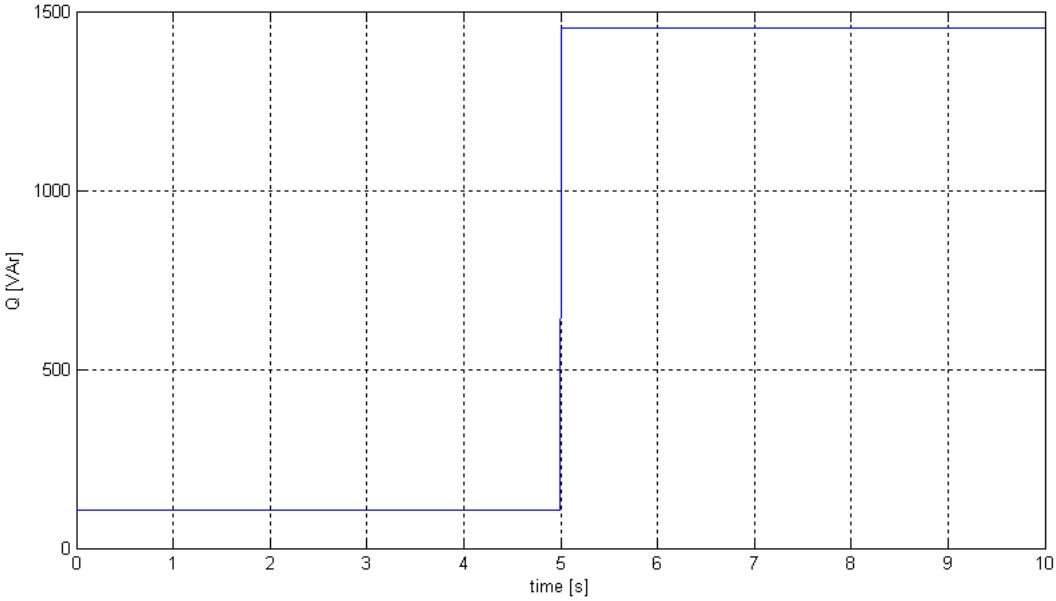
Ενεργός ισχύς



Τελικά η ενεργός ισχύς αυξάνεται, πράγμα που είναι αναμενόμενο αφού έχουμε μικρότερη αντίσταση φορτίου με την ίδια τάση. Η μικρή πτώση ενεργού ισχύος κατά τη μεταβολή είναι αποτέλεσμα του ελέγχου που οδηγεί, όπως είδαμε, σε στιγμιαία πτώση της τάσης. Ακολουθεί μεγέθυνση του σημείου αυτού.



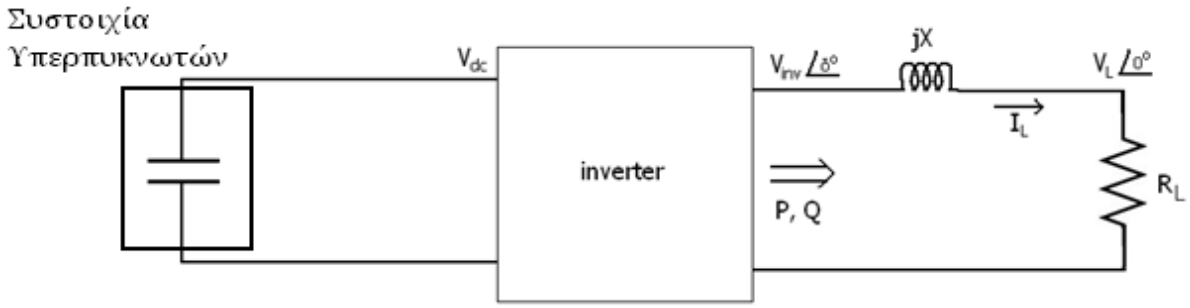
Άεργος ισχύς



Η άεργος ισχύς αυξήθηκε λόγω της αύξησης του ρεύματος προς το φορτίο. Και συνεπώς της επίπτωσης της επαγωγής της γραμμής στην κατανάλωση φαινομένου ισχύος.

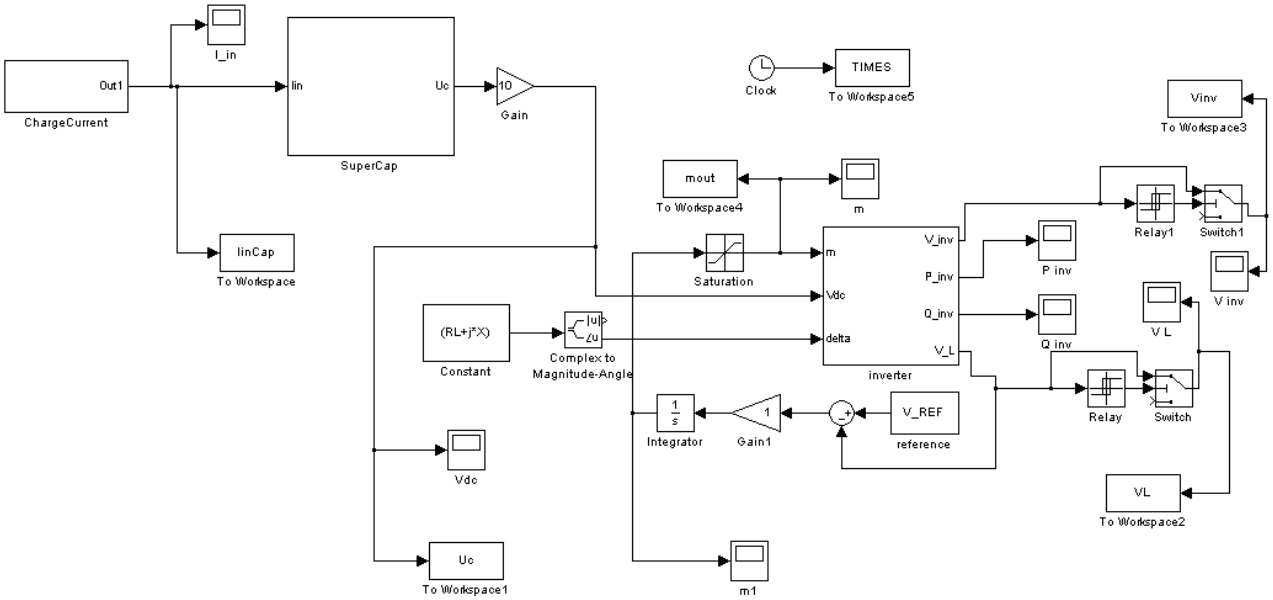
5.2 Σύνδεση υπερπυκνωτών – αντιστροφέα

Η σύνδεση των υπερπυκνωτών στο φορτίο γίνεται μέσω του αντιστροφέα που περιγράψαμε πιο πάνω. Στην είσοδο του αντιστροφέα θέτουμε την τάση από την έξοδο του μοντέλου του υπερπυκνωτή που περιγράφεται στην παράγραφο 4.4 (βελτιωμένο μοντέλο δύο κλάδων). Οι μεταβολές στο φορτίο προσομοιώνονται με αντίστοιχες αλλαγές στο ρεύμα φόρτισης του υπερπυκνωτή (αρνητικό ρεύμα φόρτισης ισοδυναμεί με εκφόρτιση, μείωση τάσης κλπ). Το κυκλωματικό ισοδύναμο που θεωρήσαμε ήταν αυτό του σχήματος 5.10



Σχήμα 5.10

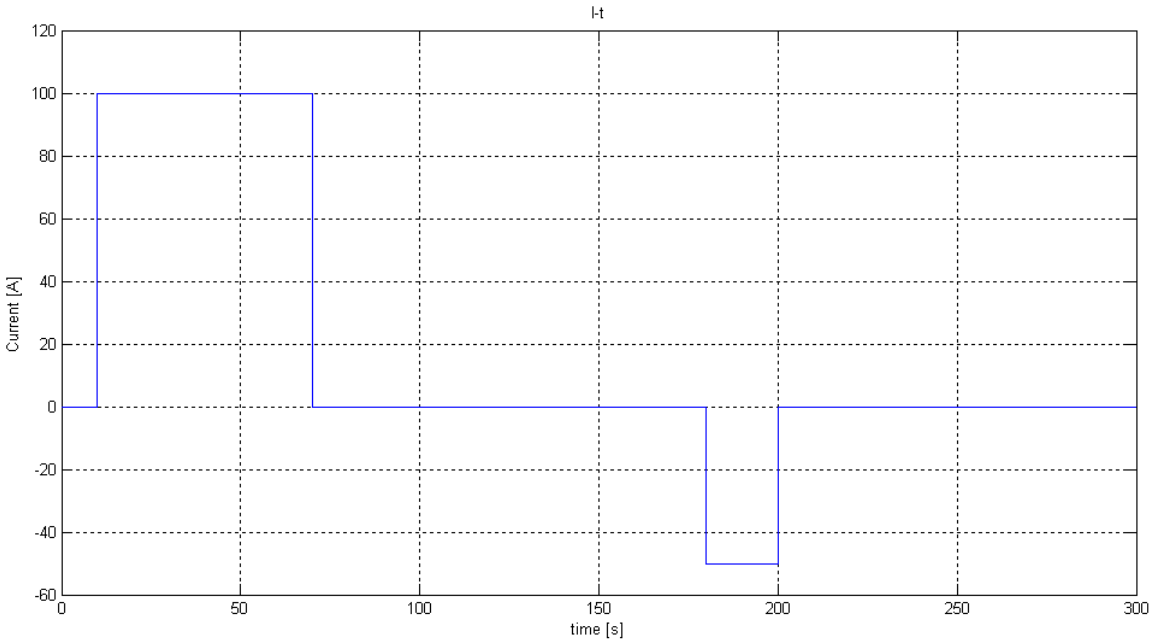
Στο σχήμα 5.11 φαίνεται το μοντέλο Simulink που προέκυψε.



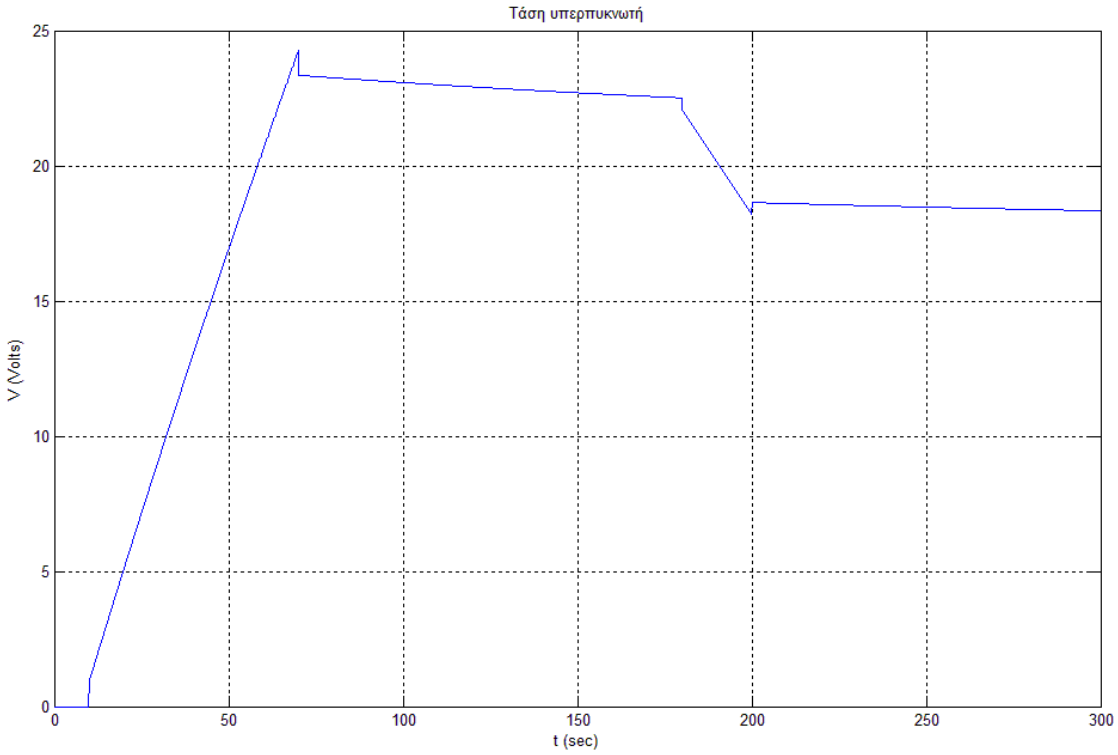
Σχήμα 5.11

Το κέρδος x10 στην τάση του υπερπυκνωτή συμβολίζει τη σύνδεση 100 υπερπυκνωτών ανα 10 παράλληλα και 10 δεκάδες στη σειρά. Με αυτή τη συδεσμολογία πετυχαίνουμε τάση 10 φορες μεγαλύτερη από αυτή του ενός πυκνωτή χωρίς αλλαγή της συνολικής χωρητικότητας.

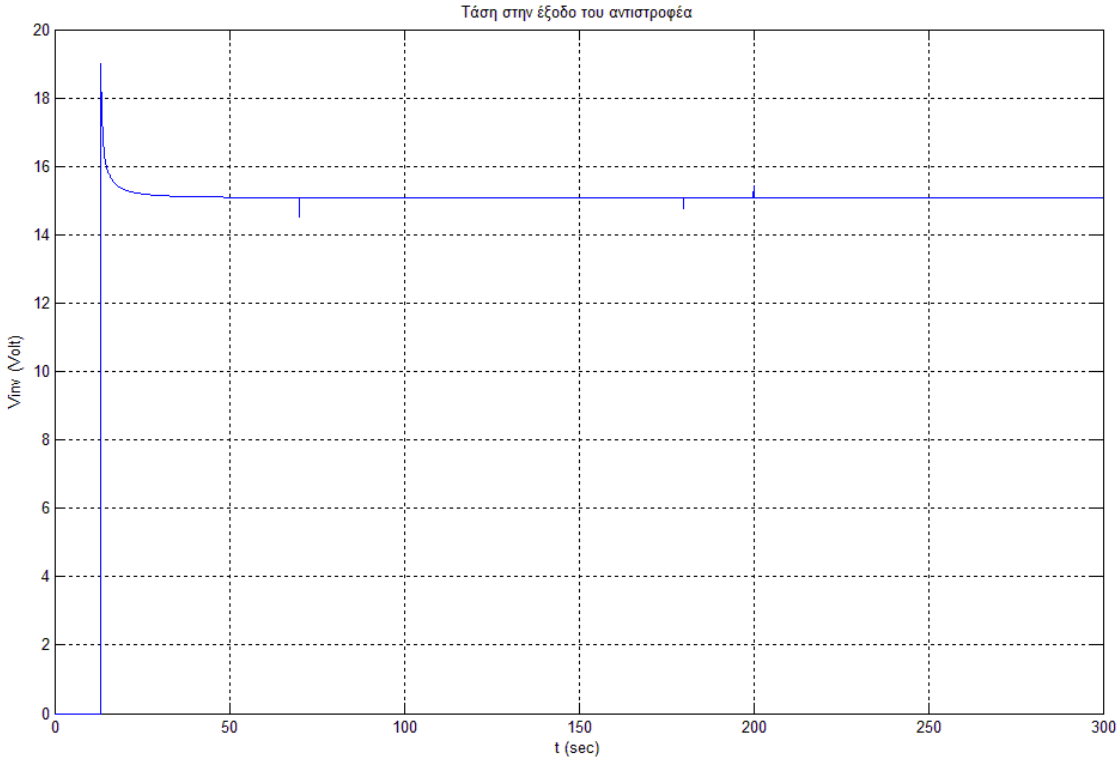
Μέσα στο sub-block ‘SuperCap’ βρίσκεται το μοντέλο της παραγράφου 4.4 με είσοδο το ρεύμα και έξοδο την τάση. Στο sub-block ‘ChargeCurrent’ βρίσκεται η διάταξη παραγωγής ρεύματος της μορφής που φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



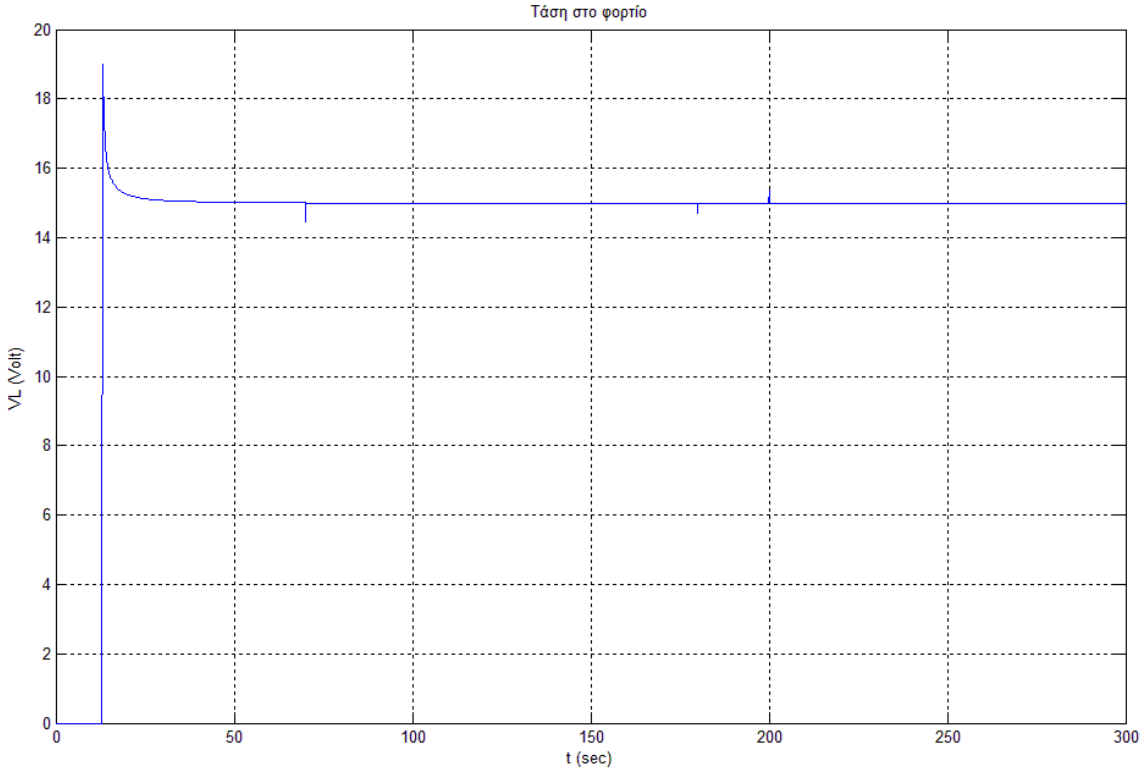
Η τάση της συστοιχίας των υπερπυκνωτών προκύπτει:



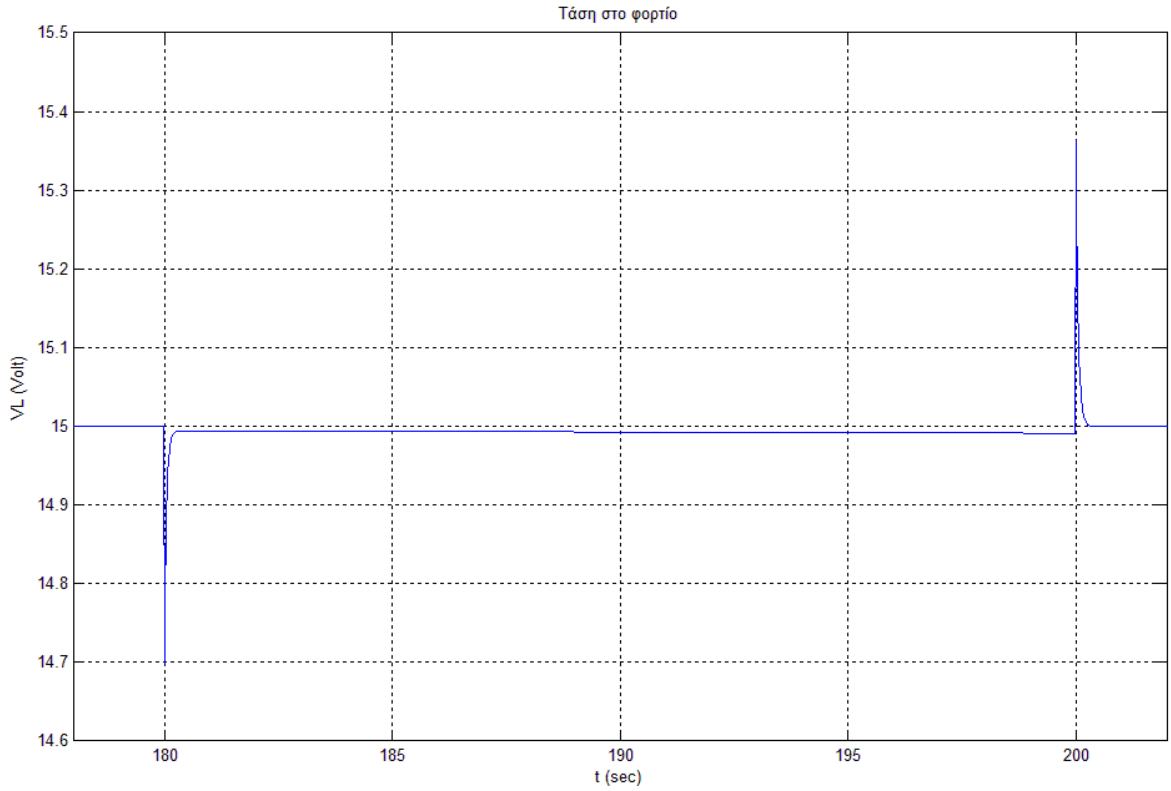
Στο φορτίο χρειαζόμαστε τάση σταθερού πλάτους 15V, όπως έχουμε δηλώσει στο V_REF. Σε περίπτωση που η τάση των υπερπυκνωτών είναι πολύ μικρή, με ένα ρελέ κόβουμε την τροφοδότηση του φορτίου μας μέχρι να εχουμε dc τάση ικανής τιμής για την παραγωγή ac τάσης 15V. Η λειτουργεία του μοντέλου του inverter παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 5.1. Το πλάτος της ac τάσης στα άκρα του αντιστροφέα προέκυψε:



Και η τάση στο φορτίο:



Κατά τις αλλαγές της dc τάσης εισόδου στον αντιστροφέα, είχαμε στιγμιαίες μεταβολές της τάσης εξόδου όπως φαίνεται παρακάτω. Αυτό το φαινόμενο παρατηρήθηκε και στην λειτουργία του αντιστροφέα με σταθερή dc είσοδο (κεφάλαιο 5.1) και έχει να κάνει με την καθυστέρηση λόγω του ελέγχου του συντελεστή διαμόρφωσης με τον ολοκληρωτή.



World-wide research and development activities on ultracapacitors

Country	Company or lab	Funding	Description of the technology	Device characteristics	Energy density (W h/kg)	Power density (W/kg)	Status/availability
Carbon particulate composites							
Japan	Panasonic	Private	Spiral wound, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 800–2000 F	3–4	200–400	Commercial
France/US	Saft/Alcatel	US DOE/private	Spiral wound, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 130 F	3	500	Packaged prototypes
Australia	Cap xx	Private	Spiral wound and monoblock, particulate with binder, organic electrolyte	3 V, 120 F	6	300	Packaged prototypes
Japan	NEC	Private	Monoblock, multi-cell, particulate with binder, aqueous electrolyte	5–11 V, 1–2 F	0.5	5–10	Commercial
Russia (Moscow)	ELIT	Russian Government/private	Bipolar, multi-cell, carbon with sulfuric acid	450 V, 0.5 F	1.0	900–1000 > 100,000 cycles	Commercial
Carbon fiber composites							
United States	Maxwell	US DOE/private	Monoblock, carbon cloth on aluminium foil, organic electrolyte	3 V, 1000–2700 F	3–5	400–600	Commercial
Sweden/Ukraine	Superfarad	Private	Monoblock, multi-cell, carbon cloth on aluminum foil, organic electrolyte	40 V, 250 F	5	200–300	Packaged prototypes
Aerogel carbons							
United States	PowerStor	US DOE/private	Spiral wound, aerogel carbon with binder, organic electrolyte	3 V, 7.5 F	0.4	250	Commercial
Conducting polymer films							
United States	Los Alamos National Lab	US DOE	Single-cell, conducting polymer (PFPT) on carbon paper, organic electrolyte	2.8 V, 0.8 F	1.2	2000	Laboratory prototype
Mixed metal oxides							
United States	Pinnacle Research Institute	US DOE/private	Bipolar, multi-cell, ruthenium oxide, on titanium foil, sulfuric acid	15 V, 125 F 100 V, 1 F	0.5–0.6	200	Packaged prototypes
United States	US Army, Fort Monmouth	US DOD	Hydrous ruthenium oxide, bipolar, multi-cell, sulfuric acid	5 V, 1F	1.5	4000	Unpacked lab prototype
Hybrid							
United States	Evans	Private	Double-layer/electrolytic, single cell, monoblock, ruthenium oxide/ tantalum powder dielectric, sulfuric acid	28 V, 0.02 F	0.1	30,000	Packaged prototype
Russia (Moscow)	ESMA	Russian Government/private	Double-layer/Faradaic, monoblock, multi-cell modules, carbon/nickel oxide/KOH	1.7 V cells/17 V modules/20 A h (50,000 F)	8–10	80–100 (95% discharge effic.) cycle life 10–20 K cycles	Commercial

DATASHEET
48 V MODULES

BMOD0083 P048
BMOD0110 P048
BMOD0165 P048

FEATURES AND BENEFITS

- Compact, rugged, fully enclosed splash-proof design
- Highest power performance available
- Individually balanced cells
- Lowest time constant
- Over 1,000,000 duty cycles
- Ultra-low internal resistance
- Voltage and temperature sensor output included

TYPICAL APPLICATIONS

- Automotive
- Industrial
- Telecommunications
- Bus, Train
- UPS

PRODUCT SPECIFICATIONS

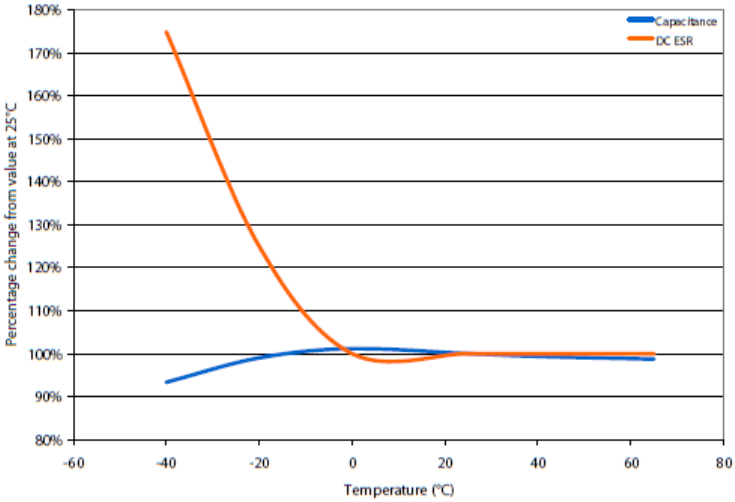
	BMOD0083	BMOD0110	BMOD0165
ELECTRICAL			
Capacitance			
Nominal capacitance	83 F	110 F	165 F
Tolerance capacitance	-5 % / +20%	-5 % / +20%	-5 % / +20%
Voltage			
Rated voltage	48.6 V DC	48.6 V DC	48.6 V DC
Resistance			
ESR, DC (max., room temperature)	10.3 mΩ	8.1 mΩ	6.3 mΩ
ESR, AC (max., room temperature, 1 kHz)	9.8 mΩ	5.6 mΩ	5.2 mΩ
Current			
Maximum continuous current	61 A	79 A	98 A
Maximum peak current, 1 sec.	1,090 A	1,410 A	1,970 A
Leakage current (After 72 hours at 25°C. Initial leakage current can be higher.)	3 mA	4.2 mA	5.2 mA
TEMPERATURE			
Operating temperature range (Cell case temperature)	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C	-40°C to +65°C
Storage temperature range (Stored uncharged)	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C	-40°C to +70°C
POWER AND ENERGY			
Usable power density, Pd	2,700 W/kg	3,100 W/kg	3,300 W/kg
Usable power	27,500 W	35,000 W	45,000 W
Impedance match power density, Pmax	5,570 W/kg	6,450 W/kg	6,940 W/kg
Gravimetric energy density, Emax	2.65 Wh/kg	3.19 Wh/kg	4.01 Wh/kg
Energy available	27 Wh	36 Wh	54 Wh

PRODUCT SPECIFICATIONS (cont.)

	BMOD0083	BMOD0110	BMOD0165
DC LIFESPAN			
Endurance (at rated voltage and temperature)	2,000 hours	2,000 hours	2,000 hours
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤60%	≤60%	≤60%
Life Test (at rated voltage and 20°C)	10 years	10 years	10 years
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤100%	≤100%	≤100%
Cycle Test (Number of cycles)	1 million	1 million	1 million
Capacitance change (% decrease from rated value)	≤20%	≤20%	≤20%
ESR change (% increase from rated value)	≤100%	≤100%	≤100%
Shelf Life (Storage uncharged up to maximum storage temperature)	2 years	2 years	2 years
Capacitance change (% decrease from rated value)	10%	10%	10%
ESR change (% increase from rated value)	50%	50%	50%
CONNECTION			
Power output terminals	M8, M10 Screw	M8, M10 Screw	M8, M10 Screw
Monitoring and control	NTC	NTC	NTC
Cell management	VMS 2.0	VMS 2.0	VMS 2.0
Maximum series voltage	750 V DC	750 V DC	750 V DC
PHYSICAL			
Dimensions	See drawing	See drawing	See drawing
Weight	10.3 kg	11.3 kg	13.5 kg
SAFETY			
Short circuit current (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	4,700 A	6,000 A	7,700 A
Certifications	RoHS	RoHS	UL810a, RoHS
Surge voltage (Voltage above this level can cause catastrophic failure.)	50.4 V DC	50.4 V DC	50.4 V DC
Isolation voltage	2,500 V DC	2,500 V DC	2,500 V DC
ENVIRONMENTAL RATINGS			
Degrees of protection	IP65	IP65	IP65
Vibration resistance	SAE J2380	SAE J2380	SAE J2380
Shock resistance	SAE J2464	SAE J2464	SAE J2464

TYPICAL CHARACTERISTICS

	BMOD0083	BMOD0110	BMOD0165
THERMAL CHARACTERISTICS			
Thermal resistance (Rth, case to ambient)	0.39°C/W	0.30°C/W	0.25°C/W



ADDITIONAL TECHNICAL INFORMATION

Capacitance and ESR, DC measured per document no. 1007239 available at www.maxwell.com.
Unless specified, all specifications are at 25°C.

Short circuit current (Isc) $= \frac{V_{RATED}}{ESR(DC)}$

Emax $= \frac{\frac{1}{2} CV^2}{3{,}600 \times mass}$

Pmax $= \frac{V^2}{4 \times ESR(DC) \times mass}$

Pd $= \frac{0.12V^2}{ESR(DC) \times mass}$

Maximum peak current (1 sec) $= \frac{\frac{1}{2} CV}{C \times ESR(DC) + 1}$

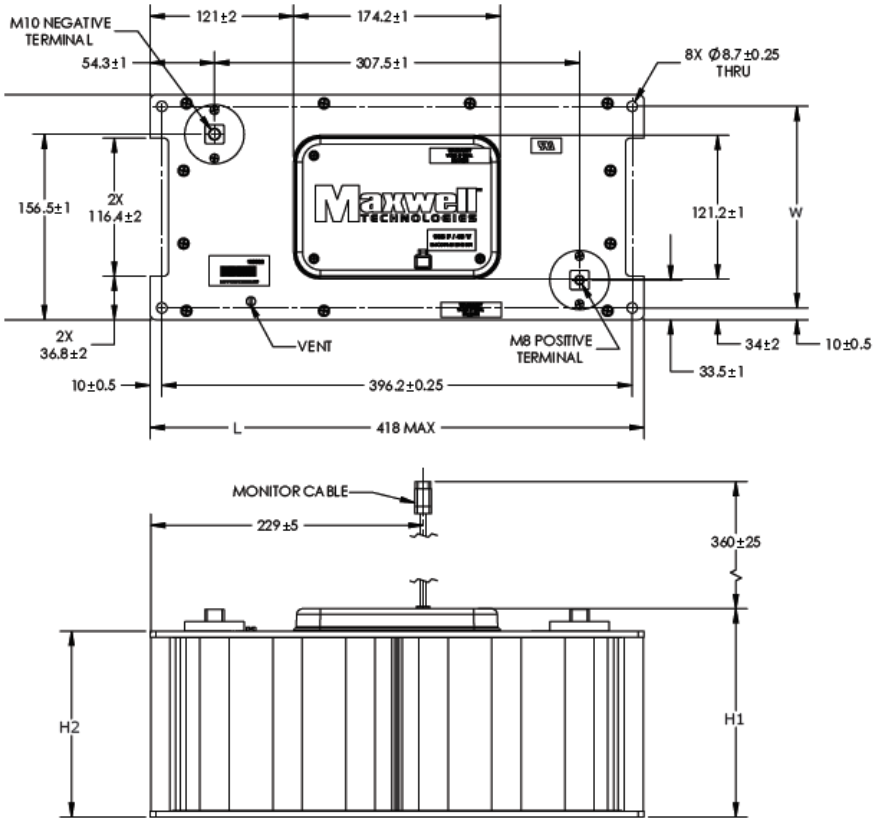
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Do not reverse polarity. Modules are designed to be connected into series or parallel strings. Clean terminals before mounting.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

DIMENSIONS



Part Description	Dimensions (mm)				Package Quantity
	L (max)	W (max)	H1 (max)	H2 (max)	
BMOD0083 P048	418	191	126	104	1
BMOD0110 P048	418	191	143	121	1
BMOD0165 P048	418	191	179	157	1

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice.
Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

Maxwell Technologies, Inc.
Global Headquarters
5271 Viewridge Court, Suite 100
San Diego, CA 92123
USA
Tel: +1 858 503 3300
Fax: +1 858 503 3301

Maxwell Technologies SA
CH-1728 Rossens
Switzerland
Tel: +41 (0)26 411 85 00
Fax: +41 (0)26 411 85 05

Maxwell Technologies, GmbH
Brucker Strasse 21
D-82205 Gilching
Germany
Tel: +49 (0)8105 24 16 10
Fax: +49 (0)8105 24 16 19

Maxwell Technologies, Inc.
Shanghai Representative Office
13E, CR Times Square
500 Zhangyang Road, Pudong
Shanghai 200122, P.R. China
Tel: +86 21 5836 8780
Fax: +86 21 5836 8790

Online: www.maxwell.com • Email: info@maxwell.com

Table 1: Summary of the Characteristics of Commercially Available Carbon/Carbon Ultracapacitors

Device	V rated	C (F)	R (mOhm)	RC (sec)	Wh/kg (1)	W/kg (95%) (2)	W/kg Match. Imped.	Wgt. (kg)	Vol. lit.
Maxwell**	2.5	2700	.32	.86	2.55	784	6975	.70	.62
Ness	2.7	10	25.0	.25	2.5	3040	27000	.0025	.0015
Ness (3)	2.3	120	21.0	2.5	3.8	282	3700	.017	.010
Ness	2.7	1800	.55	1.00	3.6	975	8674	.38	.277
Ness	2.7	3640	.30	1.10	4.2	928	8010	.65	.514
Ness	2.7	5085	.24	1.22	4.3	958	8532	.89	.712
Asahi Glass (propylene carbonate)	2.7	1375	2.5	3.4	4.9	390	3471	.210 (estimated)	.151
Panasonic (propylene carbonate)	2.5	1200	1.0	1.2	2.3	514	4596	.34	.245
Panasonic	2.5	1791	.30	.54	3.44	1890	16800	.310	.245
Panasonic	2.5	2500	.43	1.1	3.70	1035	9200	.395	.328
EPCOS	2.5	220	3.0	.66	2.76	1126	10000	.052	.042
EPCOS	2.5	2790	.15	.42	3.46	2055	18275	.57	.377
Montena	2.5	1800	.50	.90	2.49	879	7812	.40	.30
Montena	2.5	2800	.39	1.1	3.33	858	7632	.525	.393
Okamura Power Sys.	2.7	1350	1.5	2.0	4.9	650	5785	.21	.151
ESMA	1.3	10000	.275	2.75	1.1	156	1400	1.1	.547

(1) Energy density at 400 W/kg constant power, Vrated - 1/2 Vrated
(2) Power based on P=9/16*(1-EF)*V2/R, EF=efficiency of discharge
** Except where noted, all the devices use acetonitrile as the electrolyte
(3) Psuedo-caps from Ness using carbon/metal oxide electrodes

Table 2: Characteristics of various Psuedo-capacitor technologies

Device	Electrode Materials	Electrolyte	Voltage	Wh/kg/ Wh/L	(W/kg) 90%	Status
Ness Pseudo-cap	Carbon/ metal oxide	Organic	1.0-2.3	10/13	1000	Commercial
Okamura	Intercalation into graphite	Organic	0-3.8	25/32	1200	Lab proto-types
Ashasi Glass	Intercalation into a mix of activated carbon and graphite	Organic	0-3.0	12/15	1200	Lab proto-types
Telcordia	LiTi/carbon	Organic	1.0-2.8	14/24	1500	Lab proto-Types
Atlantic University, Russians	Carbon/ NiOOH	Aqueous, KOH		15/30	2000	Commercial and small lab devices
UC Davis, Russians	Carbon/PbO2	Aqueous, Sulfuric Acid	1.0-2.1	15/40	3500	Small lab cells

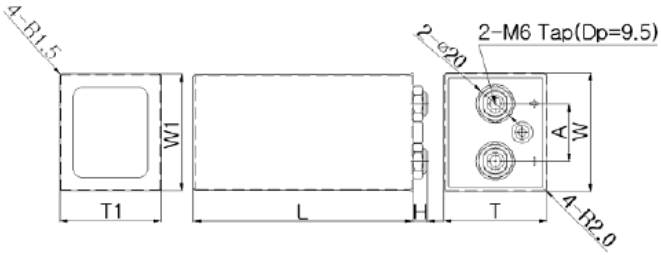
NESSCAP® Ultracapacitor Products

Features

EDLC(Electric Double Layer Capacitor)
Two screw terminals and prismatic design
Compliant with RoHS requirement (Ex : Cd, Pb)

Dimension

Dimension in mm (not to scale)



Capacitance	Dimension (mm)						
	L (±2.0)	W (±2.0)	W1 (±1.0)	T (±2.0)	T1 (±1.0)	H (±0.5)	A (±0.1)
600F	90	60	60	28	28	8	30
1700F	165	60	60	28	28	8	30
3500F	165	60	60	52	52	8	30
5000F	165	60	60	72	72	8	30

Product & Spec.

Rated Capacitance	Internal Resistance (mΩ)		Max. Current (A)	Leakage Current (mA)	Stored Energy (Wh)	Specific Energy (Wh/kg)	Weight (g)	Part Number
Discharge with constant current at 25℃	AC(100㎐)	DC	1 sec discharge rate to 1/2V_R	72hours, 25℃	at V_R	Gravimetric		
600F	< 0.64	< 0.83	541	1.7	0.608	2.90	210	ESHSP-0600C0-002R7
1700F	< 0.50	< 0.65	1,090	2.4	1.721	4.47	385	ESHSP-1700C0-002R7
3500F	< 0.28	< 0.36	2,091	5.5	3.544	5.17	685	ESHSP-3500C0-002R7
5000F	< 0.25	< 0.33	2,547	8.1	5.063	5.44	930	ESHSP-5000C0-002R7

Rated Voltage,V_R	2.7 V	
Surge Voltage	2.85 V	
Capacitance Tolerance	0% / +20%	
Operating Temperature Range	-40 ~ 65 ℃	| ΔC | <5% and ΔESR < 0.5 times of initially measured value at 25°C, respectively
Storage Temperature Range	-40 ~ 70 ℃	
Life Time at RT(1)	10 years	(1) | ΔC | < 30% and ΔESR < 1 times of initially specified value , respectively and LC < specified value (2) Cycle : between rated voltage and half rated voltage under constant current at 25°C
Cycle Life (25°C)(1)(2)	500,000 cycles	

※ Life time is provisional value

© NESSCAP 2008. All Rights reserved. Design, Specifications are subjected to change without notice.

Nesscap Co., Ltd.
(446-901) 750-8, Gomae-dong, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, Korea
Tel: +82-31-289-0721 Fax: +82-31-286-6767 e-mail: marketing@nesscap.com
www.nesscap.com

ISO 9001, ISO 14001, TS 16949

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Acetonitrile, 2009-09-26

[2] Stanley Atcitty, 2006, Electrochemical Capacitor Characterization for Electric Utility

Applications, 2008-01-07, http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-11162006-151143/unrestricted/AtcittyDissertation_11-29.pdfAtcittyDissertation_11-29.pdf

[3] David A. New, John G. Kassakian, Joel E. Shinddall, Doubel Layer Capacitors: Automotive Applications and Modelling, 2008-01-08, http://lees.mit.edu/lees/posters/double_layer_capacitors_poster.ppt

[4] http://www.nesscap.com/products_lineup.htm

[5] Burke, Andrew 'Ultracapacitors: Why, How, and Where is the Technology', University of California, 11-01-2000

[6] Becker, H.I., “Low voltage electrolytic capacitor”, U.S. Patent 2800616, 23 July 1957.

[7] Rightmire, R.A., “Electrical energy storage apparatus”, U.S. Patent 3288641, 29 Nov 1966.

[8] Boos, D.L., “Electrolytic capacitor having carbon paste electrodes”, U.S. Patent 3536963, 27 Oct 1970.

[9] Endo, M., Takeda, T., Kim, Y.J., Koshiba, K. & Ishii, K., "High power electric double layer capacitor (EDLC's); from operating principle to pore size control in advanced activated carbons," Carbon science, vol. 1, pp. 117-128, 2001.

[10] NEC, 2003, NEC-Tokin web site [Online], Available: http://www.nectokin.net/now/english/product/hypercapacitor/outline02.html [Accessed 7 May 2003].

[11] Yoshida, A., Imoto, K., Nishino, A. & Yoneda, H., "An electric doublelayer capacitor with high capacitance and low resistance," 41st Electronic Components and Technology Conference, Atlanta, GA, USA, 1991.

[12] Ness Capacitor Co., Ltd., 2000, NessCap product line as of year 2002, [Online], Available: http://www.nesscap.com/prod/ba3.htm [Accessed 3 May 2003].

[13] Celzard, A., Collas, F., Mareche, J.F., Furdin, G., & Rey, I., "Porous electrodes-based double-layer supercapacitors: pore structure versus series resistance," Journal of power sources, vol. 108, pp. 153-162, 2002.

[14] Gamby, J., Taberna, P.L., Simon, P., Fauvarque, J.F., & Chesneau, M.,"Studies and characterisations of various activated carbons used for carbon/carbon supercapacitors," Journal of power sources, vol. 101, pp. 109-116, 2001.

[15] An, K.H., Kim, W.S., Park, Y.S., et al., “Electrochemical properties of high-power supercapacitors using single-walled carbon nanotube electrodes”, Advanced functional materials, vol. 11, no. 5, pp. 387-392, 2001.

[16] Frackowiak, E., Metenier, K., Bertagna, V., & Beguin, F., "Supercapacitor electrodes from multiwalled carbon nanotubes," Applied Physics Letters, vol. 77, pp. 2421-2423, 2000.

[17] Jiang, Q., Qu, M.Z., Zhou, G.M., Zhang, B.L., & Yu, Z.L., "A study of activated carbon nanotubes as electrochemical super capacitors electrode materials," Materials Letters, vol. 57, pp. 988-991, 2002.

[18] Laforgue, A., Simon, P., Sarrazin, C., & Fauvarque, J., "Polythiophenebased supercapacitors," Journal of power sources, vol. 80, pp. 142-148, 1999.

[19] Jiang, J., & Kucernak, A., "Electrochemical supercapacitor material based on manganese oxide: preparation and characterization," Electrochimica Acta, vol. 47, pp. 2381-2386, 2002.

[20] Arbizzani, C., Mastragostino, M., & Soavi, F., "New trends in electrochemical supercapacitors," Journal of power sources, vol. 100, pp. 164-170, 2001.

[21] Chen, W., Wen, T., & Teng, H., "Polyaniline-deposited porous carbon electrode for supercapacitor," Electrochimica Acta, vol. 48, pp. 641-649, 2003.

[22] Frackowiak, E., Jurewicz, K., Szostak, K., Delpeux, S., & Beguin, F., "Nanotubular materials as electrodes for supercapacitors," Fuel processing technology, vol. 77-78, pp. 213-219, 2002.

[23] Hendriks, M.G.H.M., Heijman, M.J.G.W., Van Zyl, W.E., Ten Elshof, J.E., & Verweij, H., "Solid state supercapacitor materials: Layered structures of yttria-stabilized zirconia sandwiched between platinum/
yttria-stabilized zirconia composites," Journal of Applied Physics, vol. 90, pp. 5305-5307, 2001.

[24] Joel Schindall, 'The Charge of the Ultracapacitors', IEEE Spectrum Nov.2007,p.42

[25] Martti Kaempgen, Candace K. Chan, J. Ma, Yi Cui and George Gruner "Printable Thin Film Supercapacitors Using Single-Walled Carbon Nanotubes"NANO LETTERS 2009 Vol. 9, No. 5 (p.1872-1876)

[26] Adam Marcus Namisnyk, "A SURVEY OF ELECTROCHEMICAL SUPERCAPACITOR TECHNOLOGY", University of Technology, Sydney, 23 June 2003

[27] Merryman, S.A., & Hall, D.K., "Characterization of CDL capacitor power sources for electrical actuation applications," 32nd Intersociety Energy Conversion Conference, IECEC-97., 1997.

[28] Jordan, B.A., & Spyker, R.L., "Integrated capacitor and converter package," 15th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition APEC 2000, New Orleans, LA, USA, 2000.

[29] Barker, P.P, "Ultracapacitors for use in power quality and distributed resource applications," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 2002, Knoxville, TN, USA, 2002.

[30] Robbins, T., & Hawkins, J.M., "Powering telecommunications network interfaces using photovoltaic cells and supercapacitors," Telecommunications Energy Conference 1997, Melbourne, Vic, Australia, 1997.

[31] Patrik Johansson, Bjorn Andersson "Comparison of Simulation Programs for Supercapacitor Modelling" CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg, Sweden, 2008

[32] Dorf Richard C, Svoboda James A, 2004, Introduction to electric circuits, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-44795-1, page 242

[33] Data sheet for supercapacitor from EPCOS with Part No.: B48621-S0203-Q288

[34] Faranda, R.; Gallina, M.; Son, D.T.; A new simplified model of Double-Layer Capacitors 2007; ICCEP'07. International Conference on Clean Electrical Power 21-23 May 2007 Page(s):706 – 710; ISBN: 1-4244-0632-3

[35] F.BELHACHEM, S.RAL, B.DAVAT, 2000, A physical based model of power electric double-layer supercapacitors.pdf,2008-10-09, http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?tp=&arnumber=882604&isnumber=19086

[36] Monzer Al Sakka, Hamid Gualous, Joeri Van Mierlo, Hasan Culcu "Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications", Journal of Power Sources 194 (2009) 581–587

[37] F. Rafika, H. Gualous, R. Gallay c, A. Crausaz, A. Berthon "Frequency, thermal and voltage supercapacitor characterization and modeling" Journal of Power Sources 165 (2007) 928–934

[38] H. Gualous, H. Louahlia-Gualous, R. Gallay, A Miraoui "Supercapacitor thermal characterization in transient state"

[39] Στέφανος Ν. Μανιάς, Αθανάσιος Καλετσάνος "ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ" Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ 2003, ISBN 960-7888-37-5

[40] Στέφανος Ν. Μανιάς "ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΑ ΙΣΧΥΟΣ", Εκδόσεις ΣΥΜΕΩΝ 2007, ISBN 978 960-7888-74-7

[41] Β. Κ. Παπαδιάς "Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμος 1", Εκδόσεις ΕΜΠ 1985

[42] http://www.ibridgenetwork.org/warf/improved-electrolytes-for-supercapacitors

[43] http://www.drexel.edu/news/headlines/international-research-team-develops-ultrahigh-power-energy-storage-devices.aspx

[44] http://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitors 2009-9-28

[45] Smith, T.A., Mars, J.P., & Turner, G.A., "Using supercapacitors to improve battery performance," presented at Power Electronics Specialists Conference, 2002, 2002

[46] Datasheet υπερπυκνωτή 2,3V - 2700F από τη Nippon-Chemicon

[47] Datasheet υπερπυκνωτή 42V – 33F της EPCOS