



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ Μ.Κ. & Α.Ε.  
Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου

Διπλωματική Εργασία

**Αναλυτική και Πειραματική Μελέτη Αποθήκευσης Ενέργειας  
σε Δοκό με Πιεζοηλεκτρικό Αισθητήρα**

Νικόλαος Μαργέλης

*Επιβλέπων Καθηγητής: Ε. Γ. Παπαδόπουλος*

ΑΘΗΝΑ 2017

## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται την αξιοποίηση ενέργειας από την ταλάντωση μιας δοκού με χρήση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος (piezoelectric patch) και πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module). Οι βασικοί άξονες της μελέτης που πραγματοποιήθηκε, είναι η αποθήκευση ενέργειας όταν, πρώτον, στη δοκό ασκείται ένα διαρκές ημιτονοειδές φορτίο και όταν, δεύτερον, σε αυτήν ασκείται ένα κρουστικό φορτίο.

Για την αντιμετώπιση του φυσικού προβλήματος, διαμορφώθηκε μία βασική μεθοδολογία η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία ενός μοντέλου στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και ενός μοντέλου στο πρόγραμμα επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων Pspice. Τα δύο αυτά μοντέλα γεφυρώνονται με τη χρήση μαθηματικών εξισώσεων που υπάρχουν στην διεθνή βιβλιογραφία.

Πρώτα, μελετάται η αποθήκευση ενέργειας για το ημιτονοειδές φορτίο και δημιουργούνται τα προαναφερθέντα μοντέλα. Στη συνέχεια, και αφού πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες παραδοχές, τα ίδια μοντέλα χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος και στην περίπτωση της κρούσης. Επιπλέον, το μοντέλο που δημιουργήθηκε στο Pspice, χρησιμοποιείται και για σχεδιαστικούς σκοπούς για την εκμετάλλευση ενέργειας από κρουστικό φορτίο.

Τα συμπεράσματα, που εξάγονται από τη συγκεκριμένη εργασία, αφορούν τόσο τη λειτουργία του συστήματος κατά την άσκηση ημιτονοειδούς φορτίου σε αυτό, όσο και τη λειτουργικότητά του υπό τις συνθήκες μιας κρούσης. Επιπλέον, παρατίθενται προτάσεις που αφορούν τους τρόπους με τους οποίους μπορεί να συνεχιστεί η μελέτη του εν λόγω αντικειμένου.

## **Abstract**

The current diploma thesis examines the exploitation of the energy stored in a beam while it vibrates with the use of a piezoelectric patch and a harvesting module. This study revolves around two main axes. The first axis is the energy harvesting that can be achieved from the application of a sinusoidal load on the beam. The second one involves the energy that can be stored with the same equipment while the beam faces an impact load.

The physics problem is dealt with a method that was shaped during this diploma thesis. This method consists of a computational model of the mechanical subsystem created on the commercial finite elements package Abaqus and a model of the electrical subsystem on the program Pspice. These two models are connected through mathematical equations found on the international bibliography.

Firstly, the models mentioned above, are created to predict the energy harvesting that results from sinusoidal loads. Then, the appropriate assumptions are made so that the same models can be used to predict the response of the energy harvesting system during an impact. Furthermore, the Pspice model also serves the purposes of redesigning the existing harvesting module so that it becomes functional under the conditions of an impact.

The conclusions derived from this diploma thesis, concern both the response of the energy harvesting system during the application of a sinusoidal load and the functionality of the same system during an impact. Moreover, suggestions for future work are discussed.

*Αφιερώνεται  
στην οικογένεια μου  
και τους φίλους μου*

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>12</b>
1.1	Σκοπός Εργασίας.....	12
1.2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	12
1.3	Δομή Εργασίας.....	14
<b>2</b>	<b>Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία.....</b>	<b>16</b>
2.1	Εισαγωγή.....	16
2.2	Στοιχεία θεωρίας ταλαντώσεων.....	16
2.2.1	Ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας.....	17
2.2.2	Ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας.....	21
2.3	Στοιχεία θεωρίας πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.....	24
2.3.1	Καταστατικές εξισώσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.....	25
2.3.2	Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε ηλεκτρικά κυκλώματα.....	28
<b>3</b>	<b>Μοντελοποίηση συστήματος για απόκριση σε ημιτονοειδές φορτίο.....</b>	<b>31</b>
3.1	Εισαγωγή.....	31
3.2	Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης.....	31
3.3	Μοντελοποίηση μηχανικού υποσυστήματος.....	32
3.3.1	Καθορισμός διαστάσεων του μοντέλου (Part).....	32
3.3.2	Προσδιορισμός των υλικών του μοντέλου (Property).....	33
3.3.3	Προσδιορισμός σχετικής θέσης των δύο σωμάτων (Assembly).....	35
3.3.4	Είδος προβλήματος και συνοριακές συνθήκες (Step).....	36
3.3.5	Αλληλεπίδραση μεταξύ των σωμάτων (Interaction).....	36
3.3.6	Φορτίο (Load).....	37
3.3.7	Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (Mesh).....	38
3.3.8	Αποτελέσματα (Job and Visualization).....	38
3.4	Μοντελοποίηση ηλεκτρικού υποσυστήματος.....	40
3.4.1	Πιεζοηλεκτρικό Επίθεμα.....	42
3.4.2	Ανόρθωση τάσης.....	43
3.4.3	Τελεστικός Ενισχυτής και transistor.....	43
3.4.4	Schmitt trigger και REF.....	44
3.4.5	Buck converter και voltage clipper.....	45
3.4.6	Ηλεκτρικό φορτίο.....	46
3.4.7	Προσδιορισμός παραμέτρων άγνωστων υποκυκλωμάτων.....	46
<b>4</b>	<b>Πειράματα παραγωγής ενέργειας με ημιτονοειδές φορτίο.....</b>	<b>54</b>
4.1	Εισαγωγή.....	54
4.2	Περιγραφή διάταξης.....	54
4.2.1	Δοκίμιο από σύνθετο υλικό.....	56
4.2.2	Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI.....	57
4.2.3	Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) E-821.00 της PI.....	58
4.2.4	LabVIEW και C-RIO από την NI.....	59

4.2.5	Ενισχυτής 2050E05 από τη The modal shop inc. ....	62
4.2.6	Δονητής (Shaker) MB Modal 110 από την MB Dynamics.....	63
4.2.7	Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03 και conditioner PCB 482A16.....	63
4.2.8	Παλμογράφος MS06014A από την Agilent Technologies.....	64
4.3	Περιγραφή Λειτουργίας Διάταξης.....	65
4.4	Περιγραφή πειραμάτων .....	65
4.4.1	Απόκριση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος χωρίς το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας.....	65
4.4.2	Απόκριση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας.....	70
<b>5</b>	<b>Παραγωγή ενέργειας από κρούση.....</b>	<b>72</b>
5.1	Εισαγωγή .....	72
5.2	Περιγραφή διάταξης πειράματος κρούσης.....	72
5.2.1	Δοκίμιο από σύνθετο υλικό.....	73
5.2.2	Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI .....	73
5.2.3	Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) E-821.00 της PI.....	73
5.2.4	Πλαίσιο .....	73
5.2.5	Βραχίονας.....	75
5.2.6	Αισθητήρας δύναμης και επικρουστήρας .....	75
5.2.7	LabVIEW VI και C-RIO .....	76
5.3	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	76
5.4	Πειραματικές μετρήσεις .....	77
5.5	Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας για τη μελέτη παραγωγής ενέργειας από κρούση.....	79
5.6	Χρήση μοντέλου στο Abaqus για την κρούση .....	79
5.7	Χρήση μοντέλου στο Pspice για την κρούση .....	80
5.7.1	Έλεγχος λειτουργικότητας πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας.....	81
5.7.2	Επανασχεδιασμός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας .....	82
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα.....</b>	<b>84</b>
6.1	Εισαγωγή .....	84
6.2	Αποτελέσματα μελέτης αποθήκευσης ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο... ..	84
6.2.1	Μοντέλο μηχανικού υποσυστήματος στο Abaqus.....	85
6.2.2	Προσδιορισμός ισοδύναμων ηλεκτρικών στοιχείων για την μοντελοποίηση της λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την αποθήκευση ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο .....	89
6.2.3	Πρόβλεψη απόκρισης συνολικού συστήματος με χρήση του μοντέλου στο Pspice.....	91
6.2.4	Εκτίμηση βαθμού απόδοσης του συστήματος .....	94
6.3	Αποτελέσματα μελέτης αποθήκευσης ενέργειας από κρουστικό φορτίο .....	96
6.3.1	Εύρεση ισοδύναμης στατικής δύναμης μέσω του μοντέλου στο Abaqus .....	96
6.3.2	Προσδιορισμός παραμέτρων του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την αποθήκευση ενέργειας από κρουστικό φορτίο.....	97

6.3.3 Έλεγχος λειτουργικότητας υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας σε συνθήκες κρούσης.....	98
6.3.4 Επανασχεδιασμός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας .....	100
<b>7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία.....</b>	<b>103</b>
7.1 Συμπεράσματα.....	103
7.2 Μελλοντική Εργασία.....	104
<b>8 Βιβλιογραφία.....</b>	<b>106</b>
<b>9 Παράρτημα Α.....</b>	<b>107</b>
9.1 LabVIEW.....	107
9.2 Ολοκληρωμένη πλατφόρμα εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (Compact RIO) .....	109
9.3 Εργασία (project) dma with encoder στο LabVIEW.....	109

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1.	Σύστημα μάζας-ελατηρίου σε κατακόρυφη ταλάντωση. ....	17
Σχήμα 2-2.	Σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα. ....	18
Σχήμα 2-3.	Επίδραση λόγου απόσβεσης ζ στην απόκριση του συστήματος. ....	19
Σχήμα 2-4.	Ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που τροφοδοτεί μία αντίσταση. ....	30
Σχήμα 3-1.	Διαστάσεις δοκιμίου στο Abaqus. ....	33
Σχήμα 3-2.	Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus. ....	33
Σχήμα 3-3.	Παράθυρο επιλογής υλικού. ....	35
Σχήμα 3-4.	Συναρμολογημένο μοντέλο (Assembly). ....	35
Σχήμα 3-5.	Εφαρμογή φορτίου στα reference points 2 και 3. ....	37
Σχήμα 3-6.	Πλέγμα μοντέλου μηχανικού υποσυστήματος. ....	38
Σχήμα 3-7.	Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο Abaqus. ....	39
Σχήμα 3-8.	Δομικό διάγραμμα κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 από την PI.41	
Σχήμα 3-9.	Μοντέλο επιθέματος-κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας στο Pspice της Orcad. ....	42
Σχήμα 3-10.	Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. ....	42
Σχήμα 3-11.	Ανορθωτής τάσης. ....	43
Σχήμα 3-12.	Transistor και τελεστικός ενισχυτής. ....	44
Σχήμα 3-13.	Schmitt trigger και REF. ....	45
Σχήμα 3-14.	Buck converter και Voltage Clipper. ....	46
Σχήμα 3-15.	Δομικό διάγραμμα Schmitt trigger για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. ....	48
Σχήμα 3-16.	Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. ....	48
Σχήμα 3-17.	Δομικό διάγραμμα Schmitt trigger για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων. ....	49
Σχήμα 3-18.	Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων. ....	49
Σχήμα 3-19.	Δομικό διάγραμμα buck converter και voltage clipper για πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. ....	51
Σχήμα 3-20.	Παλμός εξόδου για πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. ....	51
Σχήμα 3-21.	Δομικό διάγραμμα buck converter και voltage clipper για τελικό συνδυασμό παραμέτρων. ....	52
Σχήμα 3-22.	Παλμός εξόδου για τελικό συνδυασμό παραμέτρων. ....	52
Σχήμα 3-23.	Σύγκριση παλμών εξόδου για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων. ....	53
Σχήμα 4-1.	Διάταξη πειράματος με ημιτονοειδές φορτίο. ....	55
Σχήμα 4-2.	Διαστάσεις δοκιμίου από την PI. ....	56
Σχήμα 4-3.	Δομή πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. ....	57
Σχήμα 4-4.	Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πιεζοκεραμικού υλικού. ....	57
Σχήμα 4-5.	Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI. ....	58
Σχήμα 4-6.	Project Explorer του Sine Generator Project. ....	60
Σχήμα 4-7.	Front Panel του Sine Generator Host VI. ....	60
Σχήμα 4-8.	Block Diagram του Sine Generator Host VI. ....	61
Σχήμα 4-9.	Front Panel του Sine Generator FPGA VI. ....	61
Σχήμα 4-10.	Block Diagram του Sine Generator FPGA VI. ....	62
Σχήμα 4-11.	Ενισχυτής 2050E05 από τη The Modal Shop inc. ....	62



Σχήμα 4-12.	Shaker MB Modal 110. ....	63
Σχήμα 4-13.	Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03.....	63
Σχήμα 4-14.	Ενισχυτής (Conditioner) PCB 482A16. ....	64
Σχήμα 4-15.	Παλμογράφος MS06014A από την Agilent Technologies. ....	64
Σχήμα 4-16.	Μέτρηση δύναμης στον παλμογράφο σε V.....	66
Σχήμα 4-17.	Πραγματική μέτρηση αισθητήρα. ....	66
Σχήμα 4-18.	Μέτρηση δύναμης σε lb. ....	67
Σχήμα 4-19.	Μέτρηση δύναμης σε N (1 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	67
Σχήμα 4-20.	Μέτρηση δυναμικού (1 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	67
Σχήμα 4-21.	Μετρηση δύναμης σε N (2 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	68
Σχήμα 4-22.	Μέτρηση δυναμικού (2 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	68
Σχήμα 4-23.	Μετρηση δύναμης σε Newton (3 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	69
Σχήμα 4-24.	Μέτρηση δυναμικού (3 <sup>η</sup> επανάληψη). ....	69
Σχήμα 4-25.	Μετρηση δύναμης σε Newton (σύνδεση με πλακέτα). ....	70
Σχήμα 4-26.	Μέτρηση τάσης εισόδου (σύνδεση με πλακέτα). ....	71
Σχήμα 4-27.	Μέτρηση τάσης εξόδου (σύνδεση με πλακέτα). ....	71
Σχήμα 5-1.	Διάταξη για το πείραμα της κρούσης. ....	74
Σχήμα 5-2.	(α) Κοντινή άποψη της διάταξης, (β) Πάκτωση δοκού πάνω στο πλαίσιο. ....	74
Σχήμα 5-3.	Σύνδεση βραχίονα, αισθητήρα δύναμης και επικρουστήρα. ....	75
Σχήμα 5-4.	Μέτρηση δύναμης κατά τη διάρκεια της κρούσης. ....	77
Σχήμα 5-5.	Μέτρηση παραγόμενης τάσης στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. ....	77
Σχήμα 5-6.	Εστίαση στο σημείο εμφάνισης της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης. ....	78
Σχήμα 5-7.	Παράθυρο επιλογής Φορτίου στο Abaqus. ....	80
Σχήμα 5-8.	Μοντέλο πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με πηγή ρεύματος IPWL_FILE. ....	82
Σχήμα 5-9.	Επιλογές ρύθμισης του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. ....	83
Σχήμα 6-1.	Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 2.25N. ....	86
Σχήμα 6-2.	Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 2.25N. ....	86
Σχήμα 6-3.	Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 1.32N. ....	87
Σχήμα 6-4.	Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 1.32N. ....	87
Σχήμα 6-5.	Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 0.67N. ....	88
Σχήμα 6-6.	Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 0.67N. ....	88
Σχήμα 6-7.	Εκτίμηση τάσης εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N. ....	92
Σχήμα 6-8.	Μέτρηση τάσης εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N. ....	92
Σχήμα 6-9.	Εκτίμηση τάσης εξόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N. ....	93
Σχήμα 6-10.	Μέτρηση τάσης εξόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N. ....	93
Σχήμα 6-11.	Προσφερόμενη μηχανική ενέργεια ως συνάρτηση του χρόνου από μοντέλο στο Abaqus. ....	95

Σχήμα 6-12.	Προσέγγιση τάσης μετρήσεων με ισοδύναμη στατική δύναμη στο μοντέλο του Abaqus. ....	96
Σχήμα 6-13.	Πλήρες μοντέλο στο Pspice για τον έλεγχο της λειτουργικότητας του υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. ....	99
Σχήμα 6-14.	Τάση εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. ....	99
Σχήμα 6-15.	Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. ....	100
Σχήμα 6-16.	Τάση εξόδου από το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. ....	100
Σχήμα 6-17.	Αλλαγές στο υπάρχον κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας κατά την φάση του σχεδιασμού. ....	101
Σχήμα 6-18.	Τάση εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του. ....	101
Σχήμα 6-19.	Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του. ....	102
Σχήμα 6-20.	Τάση εξόδου από το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του. ....	102
Σχήμα 9-1.	Project explorer του dma with encoder project. ....	111
Σχήμα 9-2.	Πρόσοψη (front panel) του dma with encoder FPGA VI. ....	111
Σχήμα 9-3.	Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder FPGA VI. ....	112
Σχήμα 9-4.	Πρόσοψη (front panel) του dma with encoder Real Time VI. ....	112
Σχήμα 9-5.	Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder Real Time VI. ....	113
Σχήμα 9-6.	Παράθυρο προσδιορισμού χαρακτηριστικών FIFO. ....	115
Σχήμα 9-7.	Τεχνική παραγωγού-καταναλωτή (producer-consumer). ....	115

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2-1. Απόκριση συστήματος με απόσβεση ανάλογα με το λόγο απόσβεσης $\zeta$ . .....	19
Πίνακας 3-1. Μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες υλικών. ....	34
Πίνακας 4-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης. ....	55
Πίνακας 5-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης κρούσης.....	72

# 1 Εισαγωγή

Όταν ένα σώμα ταλαντώνεται, σε αυτό εμπεριέχεται μηχανική ενέργεια με τη μορφή παραμόρφωσης. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής μπορεί να ανακτηθεί με τη χρήση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων (energy harvesting). Τα πιεζοηλεκτρικά υλικά χαρακτηρίζονται από την ικανότητα τους να μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια παραμόρφωσης σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί, στη συνέχεια, να αποθηκευτεί σε κάποια διάταξη όπως π.χ. μία μπαταρία και έτσι, να είναι διαθέσιμη για εκμετάλλευση κάποια άλλη χρονική στιγμή.

Το σύστημα που εξετάστηκε στην παρούσα διπλωματική αποτελείται από μία πακτωμένη δοκό που έχει προσαρμοσμένο πάνω της ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (piezoelectric patch) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία συσσωρεύεται με τη χρήση μίας πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module). Η λειτουργία του συστήματος αυτού μελετήθηκε για δύο ειδών μηχανικά φορτία, τα οποία ήταν ένα ημιτονοειδές φορτίο και ένα κρουστικό.

## 1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός, λοιπόν, της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του παραπάνω συστήματος αποθήκευσης ενέργειας με χρήση πιεζοηλεκτρικών υλικών. Η μελέτη αυτή θα βοηθήσει στην εξακρίβωση των συνθηκών που κάνουν το εν λόγω σύστημα λειτουργικό. Επομένως, στόχος της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία ενός υπολογιστικού μοντέλου το οποίο θα έχει τη δυνατότητα να προβλέπει την απόκριση ενός τέτοιου συστήματος σε μία δεδομένη είσοδο. Ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να αξιοποιηθεί είτε ως κριτήριο για την επιλογή ή μη ενός τέτοιου συστήματος σε μια συγκεκριμένη μηχανολογική εφαρμογή, είτε ως ένα εργαλείο σχεδιασμού και ρυθμίσεως των κατάλληλων παραμέτρων, έτσι το σύστημα να είναι κατά το δυνατόν αποτελεσματικό κατά τη χρήση του.

Η σημασία μιας τέτοιας μελέτης εντείνεται λόγω του γεγονότος ότι στα περισσότερα μηχανολογικά συστήματα εμφανίζονται φαινόμενα ταλάντωσης, τα οποία μάλιστα είναι κατά κύριο λόγο ανεπιθύμητα. Ακόμα, συσκευές όπως είναι τα φορητά ηλεκτρονικά πολύ χαμηλής ισχύος (ultra-low power portable electronics) και οι ασύρματοι αισθητήρες (wireless sensors) χρειάζονται μια εναλλακτική μορφή ενέργειας αντί της συμβατικής μπαταρίας, καθώς η αλλαγή των μπαταριών τους ή η επαναφόρτισή τους πολλές φορές είναι αντιπαραγωγική ή και αδύνατη. Έτσι, τα συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε μια πληθώρα εφαρμογών.

## 1.2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στην παράγραφο αυτή, αναφέρεται συνοπτικά η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την περάτωση της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, παρατίθενται κάποιες εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων από αυτές που περιγράφονται στην ανασκόπηση των Heung Soo Kim, Joo Hyong Kim και Jaehwan Kim [5]. Οι πηγές που αναφέρονται στη συνέχεια,

επιστρατεύτηκαν με σκοπό κυρίως τη θεμελίωση της θεωρητικής βάσης πάνω στην οποία στηρίχθηκε η εργασία. Αυτό συνέβη καθώς το μεγαλύτερο τμήμα της εργασίας σχετίζεται με τη διενέργεια πειραμάτων αλλά και τη δημιουργία υπολογιστικών μοντέλων σε εμπορικό κώδικα για την προσέγγιση αυτών. Τα δύο αυτά στοιχεία της εργασίας δεν απαιτούν τη χρήση κάποιας βιβλιογραφικής πηγής.

Διάφοροι λόγοι έχουν προκαλέσει το ενδιαφέρον πολλών ερευνητικών ομάδων, οι οποίες αναζητούν τρόπους εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων που προσφέρουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία αλλά και ανάπτυξης της υπάρχουσας τεχνολογίας. Οι Matheu και Moll ανέλυσαν διάφορες κατασκευές με δοκούς που υφίσταντο κάμψη, χρησιμοποιώντας πιεζοηλεκτρικές ταινίες, οι οποίες είναι κατάλληλες για τοποθέτηση εντός υποδημάτων, ώστε να διεγείρονται μέσω περπατήματος. Στη συνέχεια, εξέφρασαν την παραμόρφωση λόγω κάμψης των δοκών ως συνάρτηση των γεωμετρικών παραμέτρων και των ιδιοτήτων των υλικών. Συγκρίνοντας την ενέργεια που αποθηκεύεται κάθε φορά, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί η βέλτιστη διαμόρφωση της διάταξης. Η διάταξη περιλαμβάνει συνήθως, εκτός από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο και έναν πυκνωτή στον οποίο αποθηκεύεται προσωρινά η ενέργεια. Έπειτα, με βάση τη δουλειά τους αυτή, ανέπτυξαν πιεζοηλεκτρικές ταινίες που εισήχθησαν μέσα σε υποδήματα και μελετήθηκε η επίδραση διαφόρων παραγόντων όπως το είδος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, το μέγεθος της διέγερσης αλλά και το μέγεθος του πυκνωτή, για να προσδιοριστεί ο κατάλληλος πυκνωτής και τα διαστήματα φόρτισης αυτού για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

Ακόμα, ο Shah και οι συνεργάτες του συνέκριναν την παραγωγή ενέργειας σε σύνθετα υλικά με πιεζοηλεκτρικές ίνες (PFC's) και σε πιεζοηλεκτρικές ταινίες με βάση πολυμερή υλικά (PVDF). Τα υλικά αυτά υποβάλλονταν σε διέγερση από διάφορες ταχύτητες ανέμου και σταγόνες νερού με σκοπό τη διερεύνηση της πιθανότητας παραγωγής ενέργειας από αυτές της ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Απέδειξαν ότι τα πολυμερή υλικά μπορούν να παράγουν μεγαλύτερα ποσά ισχύος από τα κεραμικά και ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ενέργειας από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως οι σταγόνες της βροχής και ο άνεμος.

Ο Sohn και οι συνεργάτες του χρησιμοποίησαν μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων για να εκτιμήσουν τη δυνατότητα παραγωγής ισχύος με χρήση πιεζοηλεκτρικών ταινιών, όταν αυτές υποβάλλονταν σε πίεση αίματος. Η ανάλυση τους περιελάμβανε κυκλικούς και τετράγωνους σχηματισμούς.

Ο Liu παρουσίασε μια ενεργητική προσέγγιση στην αποθήκευση ενέργειας χρησιμοποιώντας ηλεκτρονικά ισχύος για να ελέγξει την τάση σε μία πιεζοηλεκτρική συσκευή σε σχέση με την αντίστοιχη μηχανική είσοδο με σκοπό το βέλτιστο τρόπο μετατροπής ενέργειας. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων του έδειξαν ότι η προσέγγισή του αύξησε την παραγωγή ενέργειας κατά πέντε φορές σε σχέση με ένα βελτιστοποιημένο κύκλωμα ανόρθωσης με διόδους για την ίδια μηχανική μετατόπιση.

Ο Chang μοντελοποίησε και ανέλυσε τη λειτουργία μιας πιεζοελαστικής συσκευής αποθήκευσης ενέργειας μέσα σε έναν σκληρό δίσκο υπολογιστή. Μέθοδοι πεπερασμένων στοιχείων και πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι το 25% της ενέργειας που

καταναλώνει ο κινητήρας του πηνίου φωνής του σκληρού δίσκου μπορεί να ανακτηθεί με την προτεινόμενη συσκευή.

Όλα τα παραπάνω αποτελούν μόνο κάποια από τα πολλά παραδείγματα εφαρμογών των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων που έχουν ερευνηθεί και αποδεικνύουν ότι τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία είναι ένα πολλά υποσχόμενο πεδίο έρευνας. Αυτός, άλλωστε, είναι και ένας ακόμη λόγος που η συγκεκριμένη διπλωματική εστιάστηκε γύρω από το αντικείμενο της παραγωγής ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων.

Όσον αφορά τη βιβλιογραφία που χρησιμοποιείται στα επόμενα κεφάλαια, στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται η παράθεση των βασικών θεωρητικών στοιχείων πάνω στα οποία στηρίζεται η εργασία. Το πρώτο μέρος του κεφαλαίου αυτού πραγματεύεται τη φυσική που διέπει τις ταλαντώσεις. Στη Παράγραφο 2.2.1, περιγράφονται οι βασικές αρχές της ταλάντωσης με και χωρίς απόσβεση. Το τμήμα αυτό στηρίχθηκε στην πηγή [10]. Στην Παράγραφο 2.2.2, γίνεται μία ανασκόπηση της ελεύθερης και της εξαναγκασμένης ταλάντωσης συστημάτων διανεμημένης μάζας, με βάση τη βιβλιογραφική πηγή [6].

Το δεύτερο μέρος του ίδιου κεφαλαίου αναφέρεται στη λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου ως μετασχηματιστής μηχανικής σε ηλεκτρική ισχύ, αλλά και τη μοντελοποίηση αυτού, ώστε να μελετηθεί στα πλαίσια ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η θεωρία που χρησιμοποιείται στο τμήμα αυτό της διπλωματικής εργασίας, αντλήθηκε από την πηγή [3].

Εν κατακλείδι, αξίζει να αναφερθούν οι πηγές [1] και [4] γιατί αυτές συνέβαλαν με τη σειρά τους στη μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου και οδήγησαν στη συγκεκριμένη μέθοδο επίλυσης του προβλήματος που αντιμετωπίστηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ακόμα, σημαντικές πληροφορίες σχετικές με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας μπορούν να αντληθούν από την πηγή [2].

### **1.3 Δομή Εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Τα κεφάλαια αυτά θα παρουσιαστούν συνοπτικά σε αυτήν την παράγραφο για την καλύτερη εποπτεία του αναγνώστη.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται μια εισαγωγή στις θεωρητικές έννοιες που είναι απαραίτητες για την κατανόηση των φυσικών φαινομένων που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του πειράματος αποθήκευσης ενέργειας. Αρχικά, παρουσιάζονται κάποια στοιχεία θεωρίας που αφορούν τις ταλαντώσεις τόσο των συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας όσο και των συστημάτων διανεμημένης μάζας. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η αρχή λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων μέσα από την καταστατική τους εξίσωση και υποδεικνύεται ο τρόπος με τον οποίο ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μοντελοποιείται όταν αυτό είναι μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται αναλυτική περιγραφή του τρόπου με τον οποίο δημιουργήθηκαν τα υπολογιστικά μοντέλα με τα οποία προσεγγίστηκε η διαδικασία του πειράματος. Τα μοντέλα είναι δύο και αντιστοιχούν στο μηχανικό και το ηλεκτρικό υποσύστημα της διάταξης. Το μηχανικό υποσύστημα μοντελοποιείται με τη βοήθεια του

πακέτου πεπερασμένων στοιχείων Abaqus, ενώ το ηλεκτρικό αποδίδεται και επιλύεται με τη βοήθεια του προγράμματος Pspice. Τα παραπάνω μοντέλα δημιουργήθηκαν με σκοπό την πρόβλεψη της λειτουργίας του συστήματος σε ημιτονοειδή φορτία. Στη συνέχεια ελέγχεται η ακρίβειά τους για ημι-στατικά κρουστικά φορτία. Τέλος, το μοντέλο στο Pspice χρησιμοποιείται και για σκοπούς σχεδιασμού του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας στην περίπτωση της κρούσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο εστιάζει στην πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε όταν στο σύστημα ασκήθηκε συνεχόμενο ημιτονοειδές φορτίο (εξαναγκασμένη ταλάντωση). Στα πλαίσια της ενότητας αυτής, πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πειράματα τα οποία και παρουσιάζονται. Επίσης, γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και παρατίθενται οι μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Το πέμπτο κεφάλαιο αφορά στην εφαρμογή των υπολογιστικών εργαλείων που αναπτύχθηκαν στο τρίτο κεφάλαιο στο πείραμα της κρούσης. Αρχικά, περιγράφεται η νέα διάταξη που χρησιμοποιείται για αυτό το πείραμα. Στη συνέχεια, εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται τα προαναφερθέντα εργαλεία για την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος. Επιπλέον, θα γίνει προσπάθεια σχεδιασμού ενός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο θα είναι λειτουργικό υπό τις συνθήκες της κρούσης.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται τα αριθμητικά αποτελέσματα και συγκρίνονται με τις πειραματικές μετρήσεις που προέκυψαν κατά την διάρκεια της εν λόγω διπλωματικής.

## 2 Πιεζοηλεκτρικά Στοιχεία

### 2.1 Εισαγωγή

Το σύστημα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική εργασία περιλαμβάνει μία δοκό και ένα πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (piezoelectric patch). Ο στόχος του συστήματος αυτού είναι η εκμετάλλευση μέρους της μηχανικής ενέργειας που εμπεριέχεται στη δοκό λόγω της ταλάντωσης που υφίσταται και η μετατροπή της σε ηλεκτρική ενέργεια. Για το λόγο αυτό, είναι απαραίτητη η κατανόηση του φαινομένου της ταλάντωσης αλλά και του μηχανισμού μέσω του οποίου το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο μετατρέπει την παραμόρφωσή του σε ηλεκτρικό δυναμικό.

### 2.2 Στοιχεία θεωρίας ταλαντώσεων

Όλα τα σώματα που διαθέτουν μάζα και ελαστικότητα υπόκεινται σε ταλαντώσεις. Εξαιτίας εξωτερικών διεγέρσεων, στις περισσότερες μηχανολογικές κατασκευές συναντάται ταλαντωτική συμπεριφορά, η οποία είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό τους.

Οι ταλαντώσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες με βάση την ύπαρξη εξωτερικής διέγερσης ή μη. Οι ταλαντώσεις που οφείλονται μόνο σε εσωτερικές δυνάμεις του συστήματος και όχι σε εξωτερικές ονομάζονται ελεύθερες ταλαντώσεις. Τα συστήματα που υφίστανται ελεύθερη ταλάντωση, ταλαντώνονται σε μία ή περισσότερες από τις φυσικές τους συχνότητες, οι οποίες είναι χαρακτηριστικές ιδιότητες του δυναμικού συστήματος και καθορίζονται από τη μάζα και την ελαστικότητά του.

Οι ταλαντώσεις που οφείλονται σε εξωτερικές διεγείρουσες δυνάμεις χαρακτηρίζονται ως εξαναγκασμένες. Αν η διεγείρουσα δύναμη είναι αρμονικής φύσεως και το σύστημα γραμμικό τότε η συχνότητα με την οποία ταλαντώνεται το σύστημα συμπίπτει με αυτή της διέγερσης. Ακόμα, όταν η συχνότητα της εξωτερικής διέγερσης ταυτίζεται με κάποια φυσική συχνότητα του συστήματος, τότε εμφανίζεται το φαινόμενο του συντονισμού, κατά το οποίο το σύστημα ταλαντώνεται με ιδιαίτερα έντονο τρόπο.

Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό των συστημάτων που ταλαντώνονται είναι και η απόσβεσή τους. Η απόσβεση μιας ταλάντωσης συνήθως προκύπτει ως αποτέλεσμα τριβών ή άλλων αντιστάσεων (π.χ. αεροδυναμική αντίσταση). Αν η απόσβεση ενός συστήματος είναι σχετικά μικρή τότε οι φυσικές συχνότητες του δεν επηρεάζονται σημαντικά από αυτή και για αυτό υπολογίζονται με την υπόθεση μη ύπαρξης της απόσβεσης.

Ο αριθμός των ανεξάρτητων μεταβλητών που χρειάζονται για την περιγραφή της κίνησης ενός σώματος ονομάζεται βαθμός ελευθερίας του συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, ένα απόλυτα στερεό σώμα διαθέτει έξι βαθμούς ελευθερίας, τρεις για τη θέση του και τρεις για τον προσανατολισμό του. Το ίδιο ισχύει και για ένα σώμα το οποίο μοντελοποιείται με την υπόθεση της συγκεντρωμένης μάζας. Τα συνεχή ελαστικά σώματα θεωρητικά διαθέτουν άπειρους βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, συχνά γίνεται η υπόθεση πως αυτά αποτελούνται από ένα πεπερασμένο αριθμό στερεών σωματιδίων και επομένως



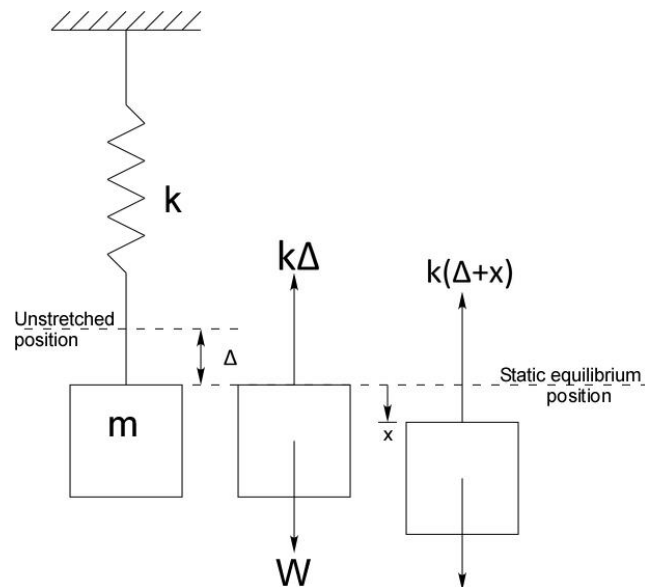
οι βαθμοί ελευθερίας τους είναι και αυτοί πλέον πεπερασμένοι. Η υπόθεση αυτή επιτρέπει την ύπαρξη υπολογιστικών προσεγγίσεων, οι οποίες συχνά έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

### 2.2.1 Ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Το βασικό μοντέλο, που περιγράφει τέτοια συστήματα, αποτελείται από μία μάζα, ένα ελατήριο και έναν αποσβεστήρα. Η μάζα θεωρείται συγκεντρωμένη ενώ το ελατήριο και ο αποσβεστήρας δεν διαθέτουν δική τους μάζα. Παρακάτω, θα γίνει η περιγραφή της ταλάντωσης τέτοιων συστημάτων όταν αυτή είναι ελεύθερη ή εξαναγκασμένη.

#### Ελεύθερη ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Στην παράγραφο αυτή, εξετάζεται το πλέον απλό σύστημα μιας μάζας που ταλαντώνεται ελεύθερα στον κατακόρυφο άξονα με τη βοήθεια ενός ελατηρίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-1.



Σχήμα 2-1. Σύστημα μάζας-ελατηρίου σε κατακόρυφη ταλάντωση.

Για το σύστημα αυτό ισχύει ότι στο σημείο ισορροπίας, η μάζα  $m$  ισορροπεί υπό την επίδραση του βάρους της και της δύναμης που ασκεί το ελατήριο με ελαστική σταθερά  $k$ . Δηλαδή:

$$F_{\text{ελατ.}} = k\Delta = w = mg \quad (2-1)$$

όπου,  $\Delta$  η απόσταση του σημείου ισορροπίας από το ελεύθερο μήκος του ελατηρίου και  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Απομακρύνοντας το σώμα από το σημείο ισορροπίας κατά μήκος  $x$  η δύναμη του ελατηρίου γίνεται:

$$F_{\text{ελατ.}} = k(\Delta + x) \quad (2-2)$$

Εφαρμόζοντας το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα προκύπτει:

$$\Sigma F = m\ddot{x} \Leftrightarrow w - k(\Delta + x) = m\ddot{x} \quad (2-3)$$

Και επειδή  $k\Delta = mg$ :

$$m\ddot{x} = -kx \quad (2-4)$$

Η εξίσωση αυτή είναι διαφορική δεύτερης τάξης και μπορεί να γραφτεί με τη μορφή:

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = 0 \quad (2-5)$$

όπου,  $\omega_n$  η φυσική κυκλική συχνότητα του συστήματος η οποία ορίστηκε ίση με:

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (2-6)$$

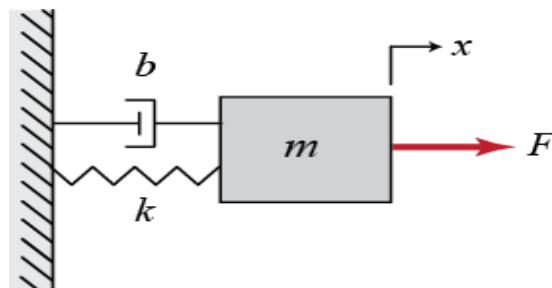
Τέλος, η λύση της διαφορικής εξίσωσης είναι της μορφής:

$$x = A \sin(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t) \quad (2-7)$$

όπου, οι σταθερές A και B προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος.

Ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζονται συστήματα συγκεντρωμένης μάζας με απόσβεση, όπως αυτό που απεικονίζεται στο Σχήμα 2-2, είναι παρόμοιος. Αξίζει να αναφερθεί ότι η διαφορική που διέπει αυτό το πρόβλημα, όταν η απόσβεση μπορεί να αποδωθεί ως μία δύναμη που είναι ανάλογη με την ταχύτητα του συστήματος, είναι:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-8)$$



**Σχήμα 2-2. Σύστημα μάζας-ελατηρίου-αποσβεστήρα.**

Και η απόκριση του συστήματος εξαρτάται από το λόγο απόσβεσης  $\zeta$  που ορίζεται ως:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (2-9)$$

όπου,  $c_c$  ο συντελεστής κρίσιμης απόσβεσης. Για αυτόν ισχύει:

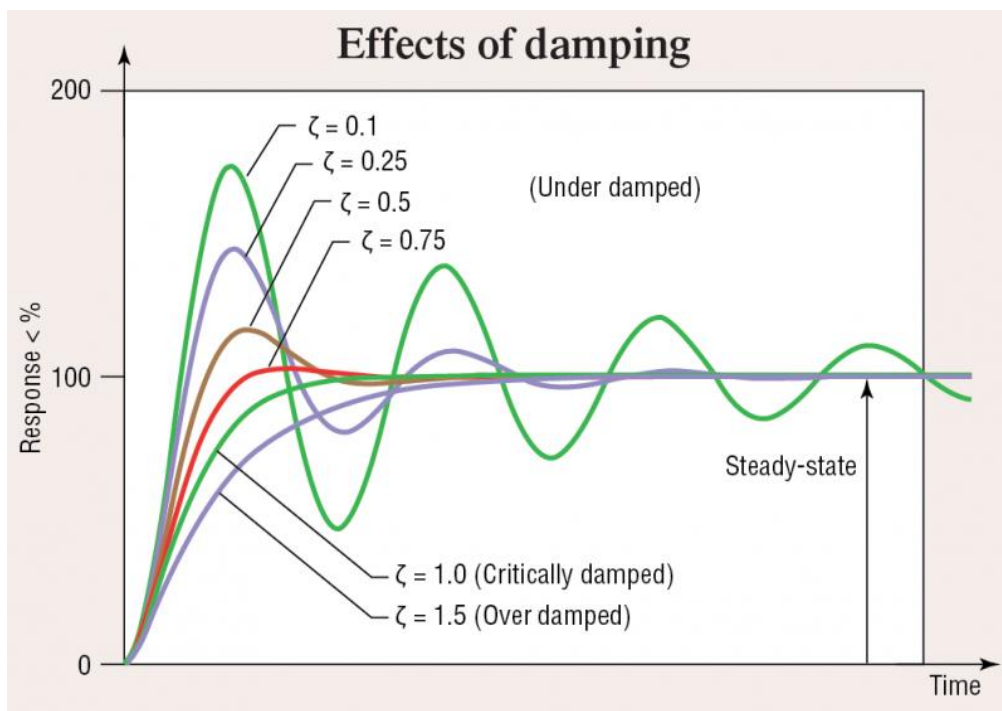
$$c_c = 2m \sqrt{\frac{k}{m}} = 2m\omega_n \quad (2-10)$$

Ο τρόπος με τον οποίο επηρεάζεται η απόκριση του συστήματος από το λόγο απόσβεσης φαίνεται στον Πίνακα 2-1 και το Σχήμα 2-3.

**Πίνακας 2-1. Απόκριση συστήματος με απόσβεση ανάλογα με το λόγο απόσβεσης  $\zeta$ .**

Λόγος απόσβεσης	Είδος ταλάντωσης	Εξίσωση απόκρισης
$\zeta = 0$	Αρμονική ταλάντωση	$x = A \sin(\omega_n t) + B \cos(\omega_n t)$
$\zeta < 1$	Υποαπόσβεση	$x = e^{-\zeta\omega_n t} \left( C_1 \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \cdot \omega_n t) + C_2 \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \cdot \omega_n t) \right)$
$\zeta = 1$	Κρίσιμη απόσβεση	$x = (A + Bt)e^{-\zeta\omega_n t}$
$\zeta > 1$	Υπεραπόσβεση	$x = Ae^{(-\zeta + \sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t} + Be^{(-\zeta - \sqrt{1-\zeta^2})\omega_n t}$

όπου τα  $A, B, C_1, C_2$  είναι σταθερές που προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος.



**Σχήμα 2-3. Επίδραση λόγου απόσβεσης  $\zeta$  στην απόκριση του συστήματος.**

## Εξαναγκασμένη αρμονική ταλάντωση συστημάτων συγκεντρωμένης μάζας

Η εξαναγκασμένη αρμονική ταλάντωση οφείλεται σε μια εξωτερική αρμονική διέγερση. Τέτοιου είδους διεγέρσεις απαντώνται συχνά σε μηχανολογικά συστήματα (π.χ. ανεμοπίεση, λειτουργία κινητήρα κ.λ.π). Όταν ένα σύστημα υποβάλλεται σε μια αρμονική διέγερση τότε αυτό ταλαντώνεται με τη συχνότητα που επιβάλλει η διέγερση. Γενικά, η διέγερση μπορεί να είναι είτε μία δύναμη που ακείται στο σύστημα είτε μια μετατόπιση.

Για τους σκοπούς της παρούσας διπλωματικής, θα παρατεθούν κάποια βασικά στοιχεία που αφορούν την εξαναγκασμένη ταλάντωση ενός βαθμού ελευθερίας. Στο πρόβλημα που θα εξεταστεί η διέγερση είναι μια δύναμη ημιτονοειδούς μορφής και οι αποσβέσεις μοντελοποιούνται ως ανάλογες της ταχύτητας του συστήματος. Η διαφορική που περιγράφει την κίνηση ενός τέτοιου συστήματος είναι:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega t) \quad (2-11)$$

Η λύση της παραπάνω διαφορικής εξίσωσης αποτελείται από δύο τμήματα, την ομογενή λύση και τη μερική λύση. Η ομογενής λύση αντιστοιχεί στην εξίσωση:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (2-12)$$

Ενώ η μερική λύση της μπορεί να υποθεθεί ότι είναι της μορφής:

$$x_{\mu\epsilon\rho.} = X \sin(\omega t - \varphi) \quad (2-13)$$

όπου το  $X$  είναι σταθερά που εκφράζει το πλάτος της ταλάντωσης του συστήματος και το  $\varphi$  είναι σταθερά που εκφράζει τη διαφορά φάσης μεταξύ της μετατόπισης και της διεγείρουσας δύναμης. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η συχνότητα της μετατόπισης είναι ίδια με αυτήν της εξωτερικής δύναμης, όπως ήταν αναμενόμενο με βάση αυτά που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

Η διαφορική του συστήματος μπορεί εναλλακτικά να γραφτεί στη μορφή:

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2 x = \frac{F_0}{m} \sin(\omega t) \quad (2-14)$$

όπου,  $\zeta$  είναι ο λόγος απόσβεσης του συστήματος και  $\omega_n$  είναι η φυσική του συχνότητα. Με βάση τη σχετική μαθηματική ανάλυση, η λύση του συστήματος είναι:

$$x(t) = x_{\mu\epsilon\rho.} + x_{ομογ.} = \frac{F_0}{k} \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} + X_1 e^{-\zeta\omega_n t} \sin\left(\sqrt{1 - \zeta^2} \cdot \omega_n t + \varphi_1\right) \quad (2-15)$$

όπου, τα  $X_1$  και  $\varphi_1$  είναι σταθερές που αφορούν το πλάτος και τη φάση της ομογενούς λύσης αντίστοιχα και υπολογίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Είναι

σημαντικό να σημειωθεί στο σημείο αυτό ότι η ομογενής λύση, που εξαρτάται από τη μάζα, την ελαστικότητα και την απόσβεση του συστήματος, λόγω του όρου  $e^{-\zeta\omega_n t}$  τείνει να μηδενισθεί για χρόνο μεγαλύτερο του  $t=4/\zeta\omega_n$ . Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τη μερική λύση, η οποία εμφανίζεται εξ αιτίας της διεγείρουσας δύναμης, και η οποία παραμένει αμείωτη. Το γεγονός αυτό οδηγεί στο χαρακτηρισμό της απόκρισης που αντιστοιχεί στην ομογενή λύση του συστήματος ως μεταβατικής απόκρισης ενώ η απόκριση που οφείλεται στη μερική λύση ονομάζεται απόκριση μόνιμης κατάστασης.

Επειδή η μεταβατική απόκριση της εξαναγκασμένης ταλάντωσης ενός συστήματος, επηρεάζει για περιορισμένο χρονικό διάστημα τη συνολική απόκριση του συστήματος, είναι συχνά επωφελές να παραλείπεται σε μελέτες που αφορούν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Ωστόσο, είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της σε εφαρμογές όπου υπάρχει κίνδυνος συντονισμού.

### 2.2.2 Ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Τα συστήματα που θα εξεταστούν σε αυτήν την παράγραφο χαρακτηρίζονται από το γεγονός ότι η μάζα τους αλλά και η ελαστικότητα τους είναι συνεχώς διανεμημένες. Στην παρούσα εργασία, γίνεται η υπόθεση ότι αυτά τα σώματα ταλαντώνονται εντός της ελαστικής περιοχής και άρα ότι υπακούουν στο νόμο του Hooke. Για τον προσδιορισμό της θέσης ενός σημείου σε ένα παραμορφωμένο ελαστικό σώμα, είναι θεωρητικά αναγκαία η ύπαρξη ενός άπειρου αριθμού μεταβλητών και επομένως το σώμα διαθέτει άπειρους βαθμούς ελευθερίας. Ωστόσο, στην πράξη, τα συστήματα διανεμημένης μάζας μοντελοποιούνται ως ένα σύνολο σωματιδίων συγκεντρωμένης μάζας και με αυτόν τον τρόπο, οι βαθμοί ελευθερίας τους είναι πεπερασμένοι. Μία από τις μεθόδους που προσεγγίζει με αυτό τον τρόπο το σύστημα διανεμημένης μάζας (συνεχές μέσο) είναι η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων. Αποδεικνύεται ότι για μεγάλο αριθμό στοιχείων τα αποτελέσματα που παρέχει είναι ικανοποιητικά.

Η ελεύθερη ταλάντωση των σωμάτων διανεμημένης μάζας είναι το αποτέλεσμα του αθροίσματος της συνεισφοράς όλων των ιδιομορφών τους. Κάθε ιδιομορφή ενός σώματος, οδηγεί τα σωματίδια του σε αρμονική ταλάντωση στη συχνότητα που της αντιστοιχεί. Αν η καμπύλη του παραμορφωμένου σχήματος του σώματος στην εκκίνηση της κίνησης του, ταυτίζεται με την καμπύλη μιας ιδιομορφής, τότε η ταλάντωση του σώματος οφείλεται αποκλειστικά σε αυτήν την ιδιομορφή. Παρόλα αυτά, συνήθως οι ταλαντώσεις που οφείλονται σε κρούσεις, δεν υπάγονται στην παραπάνω περίπτωση. Αντιθέτως, οι δυνάμεις, που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, διεγείρουν όλες τις ιδιομορφές του σώματος.

Για τις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις, αξίζει να αναφερθεί ότι η συχνότητα τους οφείλεται κατά κύριο λόγο στη συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης. Ακόμα, ο τρόπος στήριξης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας επηρεάζει τις ιδιομορφές που αυτό παρουσιάζει.

Για την περιγραφή της ταλάντωσης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας υπάρχουν αναλυτικές εξισώσεις (π.χ εξισώσεις δοκού Euler, δοκός Timoshenko), ωστόσο στην

παρούσα διπλωματική εργασία η προσέγγιση που ακολουθείται είναι υπολογιστική. Αυτό σημαίνει ότι θα χρησιμοποιηθεί η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων για τον υπολογισμό των μητρώων δυσκαμψίας και αδράνειας της κατασκευής, που υπεισέρχονται στην εξίσωση κίνησης του συστήματος, η οποία θα περιγραφεί στις επόμενες παραγράφους.

### Ελεύθερη ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Η μελέτη της ελεύθερης ταλάντωσης ενός συστήματος διανεμημένης μάζας είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οδηγεί στον προσδιορισμό των ιδιομορφών του συστήματος. Η διαφορική εξίσωση που διέπει την ταλάντωση ενός τέτοιου συστήματος γράφεται ως εξής:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [C] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0 \quad (2-16)$$

όπου,  $\{q\}$  είναι το διάνυσμα που περιλαμβάνει τους βαθμούς ελευθερίας του συστήματος. Τα μητρώα  $[M]$ ,  $[K]$  και  $[C]$  αντιστοιχούν στη μάζα, την ελαστικότητα και την απόσβεση του συστήματος. Για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, η απόσβεση θεωρείται αμελητέα και δεν λαμβάνεται υπόψη. Με βάση τα παραπάνω η εξίσωση που εξετάζεται είναι η ακόλουθη.

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = 0 \quad (2-17)$$

Η λύση της εξίσωσης αυτής είναι της μορφής [6] :

$$\{q(t)\} = \{\varphi\} \cdot e^{i\omega t} \quad (2-18)$$

όπου,  $\varphi$  είναι το ιδιοδιάνυσμα του συστήματος και  $\omega$  η αντίστοιχη ιδιοσυχνότητα. Η μορφή αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη μιας αρμονικής αμείωτης ταλάντωσης αφού έχει γίνει η υπόθεση ότι οι αποσβέσεις είναι αμελητέες. Τελικά, η γενική λύση είναι της μορφής:

$$\{q(t)\} = c_1\{\varphi_1\} \cdot e^{i\omega_1 t} + c_2\{\varphi_2\} \cdot e^{i\omega_2 t} + \dots + c_n\{\varphi_n\} \cdot e^{i\omega_n t} \quad (2-19)$$

όπου, οι σταθερές  $c_i$  προσδιορίζονται με βάση τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος. Με βάση της μορφής της λύσης που υποτέθηκε, η διαφορική εξίσωση μπορεί πλέον να γραφτεί με τον εξής τρόπο:

$$(-\omega^2 \cdot [M] + [K]) \cdot \{\varphi\} \cdot e^{i\omega t} = 0 \quad (2-20)$$

Και για να έχει λύση το σύστημα θα πρέπει:

$$|-\omega^2 \cdot [M] + [K]| = 0 \quad (2-21)$$

Η εξίσωση (2-21) οδηγεί στην εύρεση η διαφορετικών ιδιοσυχνοτήτων  $\omega_n$ . Οι ιδιοσυχνότητες αυτές αποδεικνύεται ότι είναι όλες θετικές αφού τα μητρώα της μάζας και της ελαστικότητας

είναι θετικά ημιορισμένα. Τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος προκύπτουν με βάση τη σχέση που ακολουθεί:

$$\omega_i^2 \cdot [M] \cdot \{\varphi_i\} = [K] \cdot \{\varphi_i\} \quad (2-22)$$

Σημειώνεται στο σημείο αυτό, ότι τα ιδιοδιανύσματα του συστήματος είναι ορθογώνια μεταξύ τους και αυτή τους η ιδιότητα χρησιμοποιείται για να πραγματοποιηθεί η κανονικοποίησή τους. Η κανονικοποίηση, τελικά, υλοποιείται όπως φαίνεται παρακάτω.

$$\{\varphi_i\}^T [M] \cdot \{\varphi_i\} = 1 \quad \{\varphi_i\}^T [K] \cdot \{\varphi_i\} = \omega_i^2 \quad (2-23)$$

### Εξαναγκασμένη ταλάντωση συστημάτων διανεμημένης μάζας

Έχοντας ολοκληρώσει τη μελέτη της ελεύθερης ταλάντωσης των συστημάτων διανεμημένης μάζας, είναι πλέον δυνατή η ανάλυση της περίπτωσης όπου η ταλάντωση ενός τέτοιου συστήματος διεγείρεται από μία εξωτερική δύναμη. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορική εξίσωση που περιγράφει, εν γένει, τη φυσική του συστήματος, έχει τη μορφή που ακολουθεί.

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [C] \cdot \{\dot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{F\} \cdot u \quad (2-24)$$

Ωστόσο, όπως και προηγουμένως οι αποσβέσεις αμελούνται και επομένως η διαφορική που θα χρησιμοποιηθεί είναι:

$$[M] \cdot \{\ddot{q}\} + [K] \cdot \{q\} = \{F\} \cdot u \quad (2-25)$$

Στις δύο προαναφερθείσες εξισώσεις, εμφανίζεται ο όρος  $\{F\} \cdot u$ . Στον όρο αυτό, με  $\{F\}$  συμβολίζεται το διάνυσμα προσαρμογής της μοναδιαίας εισόδου στη διάσταση του συστήματος και με  $u$  η είσοδος, η οποία είναι η διεγείρουσα δύναμη του συστήματος.

Η λύση της διαφορικής αυτήν τη φορά έχει τη μορφή:

$$\{q(t)\} = [\Phi] \cdot \{\eta(t)\} \quad (2-26)$$

όπου,  $[\Phi]$  είναι το μητρώο που περιλαμβάνει τα ιδιοδιανύσματα  $\varphi_i$  και  $\{\eta(t)\}$  είναι το διάνυσμα των συντεταγμένων στο χώρο των ιδιομορφών. Αντικαθιστώντας την παραπάνω έκφραση στη διαφορική του συστήματος, προκύπτει η εξίσωση:

$$[M][\Phi] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [K][\Phi] \cdot \{\eta\} = \{F\} \cdot u \quad (2-27)$$

Και πολλαπλασιάζοντας και τα δύο μέλη της εξίσωσης με το μητρώο  $[\Phi]^T$ , η εξίσωση μετατρέπεται στην ακόλουθη μορφή:

$$[\Phi]^T [M] [\Phi] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] \cdot \{\eta\} = [\Phi]^T \{F\} \cdot u \quad (2-28)$$

Ή αλλιώς:

$$[M_{ffmod}] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [K_{ffmod}] \cdot \{\eta\} = \{F_{sfmod}\} \cdot u \quad (2-29)$$

Για την εξίσωση (2-29), αξίζει να αναφερθεί ότι στα πλαίσια της εργασίας αυτής, τα μητρώα  $[M_{ffmod}]$ ,  $[K_{ffmod}]$  και  $\{F_{sfmod}\}$  εκφυλλίζονται σε αριθμούς, αφού για την ανάλυση που υλοποιήθηκε, έγινε η υπόθεση ότι είναι απαραίτητη μόνο η πρώτη ιδιομορφή του συστήματος. Επιπροσθέτως, η λύση της διαφορικής αυτής εξίσωσης αποτελείται από δυο επιμέρους τμήματα, την ομογενή και τη μερική λύση. Στη διάρκεια της μελέτης που θα ακολουθήσει, η ομογενής λύση δεν θα ληφθεί υπόψη. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πράξη η απόκριση στη μόνιμη κατάσταση, εξαρτάται κυρίως από τη διεγείρουσα δύναμη και άρα από τη μερική λύση. Επισημαίνεται, στο σημείο αυτό, ότι η αντιστοιχία μεταξύ ομογενούς λύσης και μεταβατικής κατάστασης αλλά και μερικής λύσης και μόνιμης κατάστασης, που εντοπίστηκε στα συστήματα συγκεντρωμένης μάζας, συνεχίζει να ισχύει και στα συστήματα διανεμημένης μάζας.

Ολοκληρώνοντας την ανασκόπηση των θεωρητικών στοιχείων που αφορούν τις ταλαντώσεις, αναφέρεται ότι και για τις εξαναγκασμένες ταλαντώσεις συστημάτων διανεμημένης μάζας, ισχύει ότι:

$$q_i(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_{i,j}(x) \cdot \eta_{i,j}(t) \quad (2-30)$$

όπου, το  $j$  αντιστοιχεί στην  $j$ -ιστή ιδιομορφή του συστήματος. Ωστόσο, για τις ανάγκες της εργασίας αυτής, ο μόνος βαθμός ελευθερίας που θα εξεταστεί είναι η βύθιση του δοκιμίου και θα χρησιμοποιηθεί μόνο η πρώτη ιδιοσυχνότητα του συστήματος, οπότε, τελικά, η (ρεφερενς) γράφεται ως εξής:

$$w_{rel}(x, t) = \varphi_1(x) \cdot \eta_1(t) \quad (2-31)$$

### 2.3 Στοιχεία θεωρίας πιεζοηλεκτρικών στοιχείων

Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί με τους οποίους γίνεται η μετατροπή της ενέργειας που περιέχεται σε μία ταλάντωση σε ηλεκτρική, σε εφαρμογές χαμηλής ισχύος, είναι οι ηλεκτρομαγνητικοί, οι ηλεκτροστατικοί και οι πιεζοηλεκτρικοί μετασχηματιστές. Από τις τρεις παραπάνω εναλλακτικές, μετά από ενδελεχή επιστημονική έρευνα, έχει προκύψει ότι τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία υπερτερούν έναντι των υπολοίπων σε εφαρμογές ταλαντώσεων [3]. Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν είναι η μεγάλη ενεργειακή τους πυκνότητα και η ευκολία στη χρήση τους. Η ηλεκτρομαγνητική εναλλακτική στην αποθήκευση ενέργειας σε εφαρμογές ταλαντώσεων, παρουσιάζει, γενικά, μικρότερες τιμές παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού σε σχέση με τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία και συχνά απαιτείται η χρήση μετεπεξεργασίας της εξόδου τους σε πολλά επίπεδα για την επίτευξη



τιμών δυναμικού που επιτρέπουν την αποθήκευση της ενέργειας. Αυτό στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία δεν είναι αναγκαίο καθώς το δυναμικό που παράγουν είναι άμεσα αξιοποιήσιμο. Επιπλέον, στην ηλεκτροστατική μετατροπή ενέργειας, χρειάζεται η εφαρμογή ενός σήματος εισόδου με τη μορφή δυναμικού ή ρεύματος, έτσι ώστε η σχετική κίνηση της ταλάντωσης των στοιχείων συσσώρευσης να παράξει μία εναλλασσόμενη έξοδο. Αντιθέτως, στα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία το δυναμικό που προύπτει στην έξοδο τους είναι αποτέλεσμα της ίδιας της καταστατικής τους εξίσωσης και άρα δεν υπάρχει ανάγκη για εξωτερική παρέμβαση. Τέλος, ένα επιπλέον πλεονέκτημα που παρουσιάζουν τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία έναντι των υπολοίπων εναλλακτικών είναι και το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να προσαρμοστούν τόσο σε εφαρμογές μεγάλης όσο και μικρής κλίμακας.

Τα πιεζοηλεκτρικά στοιχεία, συνήθως, τοποθετούνται σε πακτωμένες δοκούς αλλά μπορούν να βρουν εφαρμογή και σε άλλες κατασκευές όπως είναι οι επίπεδες πλάκες. Τα πιεζοηλεκτρικά εκμεταλλεύονται τη δυναμική παραμόρφωση των δοκών και τη μετατρέπουν σε ηλεκτρικό δυναμικό στα ηλεκτρόδιά τους, το οποίο είναι εναλλασσόμενης φύσεως. Το δυναμικό αυτό, θα πρέπει στη συνέχεια να ανορθωθεί και να εξομαλυνθεί με τη χρήση ειδικού κυκλώματος, το οποίο περιλαμβάνει γέφυρα ανόρθωσης και πυκνωτή (AC-DC converter), προκειμένου να αποθηκευθεί σε κάποια μπαταρία. Συχνά χρησιμοποιείται και ένα δεύτερο υποκύκλωμα το οποίο ρυθμίζει το δυναμικό της εξόδου ως προς το πλάτος για μέγιστη μεταφορά ισχύος προς τη συσκευή συσσώρευσης της ενέργειας.

Οι παραπάνω πληροφορίες δικαιολογούν το ενδιαφέρον που οδηγεί στη μελέτη της αποθήκευσης ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικών στοιχείων. Ωστόσο, για την καλύτερη κατανόηση των διατάξεων αυτών, είναι απαραίτητη η περιγραφή της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων τόσο όταν αυτά βρίσκονται συνδεδεμένα σε κάποιο κύκλωμα όσο και όταν αυτό δεν συμβαίνει. Για το λόγο αυτό στις παραγράφους που ακολουθούν, παρατίθενται η καταστατική εξίσωση των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων, αλλά και ο τρόπος με τον οποίο αυτά μοντελοποιούνται όταν αποδίδουν την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν σε κάποιο κύκλωμα αποθήκευσης.

### **2.3.1 Καταστατικές εξισώσεις πιεζοηλεκτρικών στοιχείων**

Γενικά, τα πιεζοηλεκτρικά υλικά είναι εγκαρσίως ισότροπα υλικά. Στις εξισώσεις που θα παρατεθούν στη συνέχεια, το επίπεδο ως προς το οποίο εμφανίζεται η ισοτροπία είναι το επίπεδο-xy (ή αλλιώς επίπεδο-12). Επομένως, το πιεζοηλεκτρικό υλικό εμφανίζει συμμετρία ως προς τον άξονα-z (ή αλλιώς άξονα-3), ο οποίος είναι και ο άξονας πόλωσης του υλικού. Ο τρόπος με τον οποίο ορίζονται οι άξονες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου φαίνονται στο κεφάλαιο 3 όπου και παρουσιάζεται το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος.

Οι καταστατικές εξισώσεις, που διέπουν τη λειτουργία ενός πιεζοηλεκτρικού στοιχείου, μπορούν να εκφραστούν ως προς οποιοδήποτε ζεύγος μεταβλητών από τις τέσσερις που αναφέρθηκαν παραπάνω. Για το λόγο αυτό, υπάρχουν τέσσερις διαφορετικοί τρόποι να

γραφτούν. Στη συνέχεια, παρατείνονται οι διαφορετικές εκφράσεις των καταστατικών εξισώσεων του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^E \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \\ D_i &= d_{ikl} \cdot T_{kl} + \varepsilon_{ik}^T \cdot E_k \end{aligned} \quad (2-32)$$

Οι μεταβλητές που συνδέονται μέσω της καταστατικής εξίσωσης του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου είναι οι τάσεις  $T_{ij}$ , οι παραμορφώσεις  $S_{ij}$ , το ηλεκτρικό πεδίο  $E_k$  και η ηλεκτρική μετατόπιση (φορτίο ανα μονάδα επιφάνειας)  $D_k$ . Αυτή είναι η πιο συνηθισμένη μορφή που λαμβάνουν οι καταστατικές εξισώσεις του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Σε μητρική μορφή αποδίδονται ως εξής:

$$\begin{bmatrix} S \\ D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s^E & d^t \\ d & \varepsilon^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ E \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

Οι εκθέτες  $E$  και  $S$  υποδηλώνουν ότι οι σταθερές που τους φέρουν έχουν εκτιμηθεί σε σταθερό ηλεκτρικό πεδίο και παραμόρφωση αντίστοιχα. Ακόμα, ο εκθέτης  $t$  αναφέρεται στον αναστροφο πίνακα.

Εναλλακτικά μπορούν να αποδοθούν με τους ακόλουθους τρόπους:

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^E \cdot S_{kl} - e_{kij} \cdot E_k \\ D_i &= e_{ikl} \cdot S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S \cdot E_k \end{aligned} \quad (2-34)$$

$$\begin{aligned} T_{ij} &= c_{ijkl}^D \cdot S_{kl} - h_{kij} \cdot D_k \\ E_i &= -h_{ikl} \cdot S_{kl} + \beta_{ik}^S \cdot D_k \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^D \cdot T_{kl} + d_{kij} \cdot E_k \\ E_i &= -g_{ikl} \cdot T_{kl} + \beta_{ik}^T \cdot E_k \end{aligned}$$

όπου,  $c_{ijkl}^E$ ,  $e_{kij}$  και  $\varepsilon_{ik}^S$  είναι οι ελαστικές, οι πιεζοηλεκτρικές και οι σταθερές ηλεκτρικής διαπερατότητας αντίστοιχα. Οι  $d_{ikl}$ ,  $h_{kij}$  και  $g_{ikl}$  είναι εναλλακτικές εκφράσεις των πιεζοηλεκτρικών σταθερών, οι  $s_{ijkl}^E$ ,  $s_{ijkl}^D$  είναι οι σταθερές ενδοτικότητας και οι  $\beta_{ik}^S$ ,  $\beta_{ik}^T$  οι σταθερές αδιαπερατότητας. Οι δείκτες  $D$  και  $T$  αντιστοιχούν σε σταθερές που εκτιμούνται υπό σταθερή τάση και ηλεκτρική μετατόπιση αντίστοιχα.

Από τις παραπάνω εκφράσεις, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, στην πραγματικότητα, λειτουργεί ως ένας μετασχηματιστής μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική. Στη συνέχεια, θα παρατεθεί η μητρική μορφή των εξισώσεων όταν αυτές αφορούν και τις τρεις διαστάσεις του χώρου αλλά και τον τρόπο με τον οποίο το μητρώο αυτό μετατρέπεται στην περίπτωση της λεπτής δοκού.

## Καταστατικές εξισώσεις στις τρεις διαστάσεις

Η μητρική μορφή των εξισώσεων που παρατέθηκαν προηγουμένως φαίνεται στη σχέση που ακολουθεί:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{12}^E & s_{11}^E & s_{13}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{31} \\ s_{13}^E & s_{13}^E & s_{33}^E & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & d_{33} \\ 0 & 0 & 0 & s_{44}^E & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & s_{55}^E & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & s_{66}^E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{11}^T & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

όπου,  $S_i$  ( $i=1,\dots,6$ ) είναι οι παραμορφώσεις του συνεχούς μέσου, 3 ορθές και 3 διαμητικές,  $T$  είναι οι αντίστοιχες τάσεις και  $E_j$  ( $j=1,2,3$ ) είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου στις 3 διευθύνσεις του χώρου.

Στην (2-35) θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μορφή του πίνακα οφείλεται στο γεγονός ότι το πιεζοηλεκτρικό υλικό είναι ισότροπο ως προς τις ελαστικές σταθερές του. Ακόμα, από άποψη συμβολισμού, τα μεγέθη στα δύο διανύσματα της σχέσεως που προηγήθηκε παρατέθηκαν σε σύντημηση. Τα διανύσματα αυτά είναι ίσα με:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} \\ S_{22} \\ S_{33} \\ 2S_{23} \\ 2S_{13} \\ 2S_{12} \\ D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{22} \\ T_{33} \\ 2T_{13} \\ 2T_{23} \\ 2T_{12} \\ E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

## Καταστατικές εξισώσεις για λεπτή δοκό

Στην παρούσα μελέτη, γίνεται η υπόθεση ότι το δοκίμιο που εξετάζεται υπάγεται στην κατηγορία της λεπτής δοκού. Η υπόθεση αυτή, σύμφωνα με τη θεωρία Euler-Bernoulli, οδηγεί στην παραδοχή ότι όλες οι συνιστώσες της μηχανικής τάσης εκτός από τη συνιστώσα της ορθής τάσης  $T_1$ , είναι αμελητέες, δηλαδή:

$$T_2 = T_3 = T_4 = T_5 = T_6 = 0 \quad (2-37)$$

Εάν, επίσης, γίνει και η υπόθεση ότι τα ηλεκτρόδια καλύπτουν τις επιφάνειες του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που είναι κάθετες ως προς τον άξονα-3, τότε οι καταστατικές εξισώσεις απλοποιούνται περαιτέρω και λαμβάνουν τη μορφή:

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & d_{31} \\ d_{31} & \varepsilon_{33}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (2-38)$$

Εναλλακτικά, μπορούν, επίσης, να γραφτούν ως εξής:

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{c}_{11}^E & -\bar{e}_{31} \\ \bar{e}_{31} & \bar{\varepsilon}_{33}^S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ E_1 \end{bmatrix} \quad (2-39)$$

Στην παραπάνω σχέση, η παύλα πάνω από τις σταθερές συμβολίζει ότι τα μεγέθη αφορούν το επίπεδο εντατικό πρόβλημα. Οι σχέσεις που συνδέουν τις σταθερές της (2-39) με τις αντίστοιχες σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν σε προηγούμενους τύπους είναι:

$$\bar{c}_{11}^E = \frac{1}{s_{11}^E}, \bar{e}_{31} = \frac{d_{31}}{s_{11}^E}, \bar{\varepsilon}_{33}^S = \varepsilon_{33}^T - \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E} \quad (2-40)$$

### 2.3.2 Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε ηλεκτρικά κυκλώματα

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από πιεζοηλεκτρικό στοιχείο κατά τη διάρκεια μιας ταλάντωσης, θα πρέπει να διοχετευθεί σε ένα ειδικό κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Για να πραγματοποιηθεί η μελέτη ενός τέτοιου κυκλώματος, είναι απαραίτητη η μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού με τη χρήση συγκεντρωμένων ηλεκτρικών στοιχείων. Για το λόγο αυτό στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστεί η μέθοδος με την οποία δημιουργείται το επιθυμητό μοντέλο αλλά και οι μαθηματικές εξισώσεις που ποσοτικοποιούν τα μεγέθη που εμπλέκονται σε αυτό.

Στην ανάλυση που ακολουθεί, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο συνδέεται με μία αντίσταση. Ακόμα, σύμφωνα με την υπόθεση της λεπτής δοκού που έγινε στην προηγούμενη παράγραφο, η μόνη παραμόρφωση που συνεισφέρει στη δημιουργία ηλεκτρικού πεδίου και ηλεκτρικής μετατόπισης, είναι η ορθή παραμόρφωση που οφείλεται στην κάμψη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης να εκφυλλίζεται σε ένα μονόμετρο μέγεθος το οποίο δίνεται ως:

$$D_3 = \bar{e}_{31} \cdot S_1 + \bar{\varepsilon}_{33}^S \cdot E_3 \quad (2-41)$$

όπου,  $D_3$  είναι η ηλεκτρική μετατόπιση που παράγεται με τις υποθέσεις που έγιναν παραπάνω. Η σταθερά  $\bar{e}_{31}$  είναι η πιεζοηλεκτρική σταθερά του στοιχείου και  $\bar{\varepsilon}_{33}^S$  είναι η διηλεκτρική διαπερατότητα του στοιχείου όταν αυτή μετράται υπό σταθερή παραμόρφωση και με την υπόθεση της επίπεδης εντατικής κατάστασης (αμελείται η ορθή τάση στη διεύθυνση κάθετα στο επίπεδο της δοκού).

Εάν συνδεθεί το πιεζοηλεκτρικό με μία αντίσταση φορτίου  $R_l$ , τότε το ρεύμα που θα παραχθεί από αυτό θα προκαλέσει μια διαφορά δυναμικού  $v(t)$ , η οποία θα ακολουθεί το νόμο Ohm. Το ρεύμα που θα παραχθεί από το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο, υπολογίζεται από την ολοκληρωτική μορφή του νόμου του Gauss. Η σχέση που προκύπτει είναι η εξής:

$$\frac{d}{dt} \left( \int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} dA \right) = \frac{v(t)}{R_l} \quad (2-42)$$

όπου, το  $\mathbf{D}$  είναι το διάνυσμα της ηλεκτρικής μετατόπισης και  $\mathbf{n}$  είναι το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετο στην επιφάνεια  $A$  των ηλεκτροδίων στην οποία γίνεται και η ολοκλήρωση. Λόγω όσων ειπώθηκαν προηγουμένως, η μόνη συνιστώσα του διανύσματος  $\mathbf{D}$  που συνεισφέρει στο εσωτερικό γινόμενο είναι η  $D_3$ . Εκφράζοντας τη μέση παραμόρφωση που παράγεται λόγω της κάμψης στο πιεζοηλεκτρικό στοιχείο σε όρους καμπυλότητας και το ομοιόμορφο ηλεκτρικό πεδίο σε όρους διαφοράς δυναμικού, προκύπτει η (2-43) [3].

$$\frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \cdot \frac{dv(t)}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} + \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{\partial^3 w_{rel}(x,t)}{\partial x^2 \partial t} dx = 0 \quad (2-43)$$

Στην εξίσωση που προηγήθηκε,  $b$  είναι το πλάτος,  $L$  το μήκος και  $h_{\bar{p}}$  το πάχος του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Ακόμα,  $h_{\bar{p}c}$  είναι η απόσταση μεταξύ του ουδέτερου άξονα της ταλάντωσης και του κέντρου του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου. Η βύθιση  $w_{rel}$  της δοκού μπορεί να αντικατασταθεί με την έκφραση της στο χώρο των ιδιομορφών, δηλαδή:

$$w_{rel}(x,t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \cdot \eta_j(t) \quad (2-44)$$

Οπότε η προηγούμενη εξίσωση γράφεται πλέον ως εξής:

$$\frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} + \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} = 0 \quad (2-45)$$

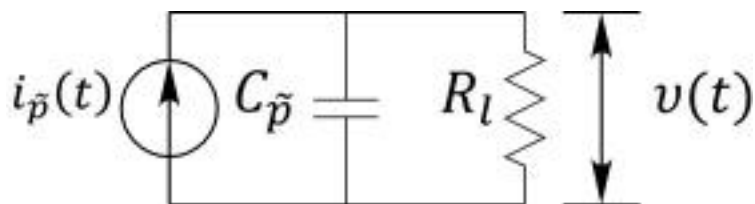
όπου,  $\kappa_j$  είναι ο όρος σύζευξης στο χώρο των ιδιομορφών στην εξίσωση του ηλεκτρικού κυκλώματος και δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί,

$$\kappa_j = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{d^2 \varphi_j(x)}{dx^2} dx = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \left( \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_f} - \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_s} \right) \quad (2-46)$$

όπου,  $x_f$  και  $x_s$  οι θέσεις της δοκού όπου βρίσκονται τα άκρα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου.

Στο σημείο αυτό είναι χρήσιμο να παρατεθεί το ηλεκτρικό υποσύστημα του συζευγμένου συστήματος. Το ηλεκτρικό υποσύστημα μπορεί να απεικονιστεί ως ένα απλό

κύκλωμα το οποίο περιέχει μία πηγή ρεύματος που συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή και μία αντίσταση. Το κύκλωμα αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2-4.



**Σχήμα 2-4.** Ισοδύναμο κύκλωμα πιεζοηλεκτρικού στοιχείου που τροφοδοτεί μία αντίσταση.

Είναι φανερό ότι στο Σχήμα 2-4 παρουσιάζεται μόνο το ηλεκτρικό υποσύστημα. Η σύζευξη του μηχανικού και του ηλεκτρικού υποσυστήματος είναι ένας μετασχηματιστής. Για το λόγο αυτό το πλάτος και η φάση της πηγής ρεύματος δεν είναι σταθερά αλλά εξαρτώνται από το μηχανικό τμήμα του συστήματος. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εξίσωση που περιγράφει τη δυναμική του ηλεκτρικού υποσυστήματος μπορεί να εξαχθεί με χρήση των νόμων του Kirchhoff. Τελικά, ισχύει ότι:

$$C_{\bar{p}} \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{v(t)}{R_l} - i_{\bar{p}}(t) = 0 \quad (2-47)$$

όπου,  $C_{\bar{p}}$  η χωρητικότητα του πιεζοηλεκτρικού στοιχείου,  $i_{\bar{p}}(t)$  η εξαρτημένη από το μηχανικό υποσύστημα πηγή ρεύματος και  $R_l$  το ηλεκτρικό φορτίο. Οι μαθηματικές εξισώσεις με τις οποίες γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός της χωρητικότητας  $C_{\bar{p}}$  και της έντασης της πηγής ρεύματος  $i_{\bar{p}}(t)$ , προκύπτουν μετά από σύγκριση των (2-45) και (2-47).

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}} \quad (2-48)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} \quad (2-49)$$

Σημειώνεται εκ νέου ότι για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα χρησιμοποιηθεί μόνο μία ιδιομορφή του συστήματος, οπότε το άθροισμα της (2-49) εκφυλλίζεται στον αντίστοιχο όρο, δηλαδή,

$$i_{\bar{p}}(t) = \kappa_1 \cdot \frac{d\eta_1(t)}{dt} \quad (2-50)$$

## 3 Μοντελοποίηση συστήματος για απόκριση σε ημιτονοειδές φορτίο

### 3.1 Εισαγωγή

Στην παράγραφο αυτή, θα παρουσιαστεί η μοντελοποίηση των δύο υποσυστημάτων που απαρτίζουν την πειραματική διάταξη, δηλαδή το μηχανικό και το ηλεκτρικό. Αρχικά, θα παρουσιαστεί συνοπτικά η μεθοδολογία που ακολουθείται στην παρούσα εργασία.

Στη συνέχεια, θα ακολουθήσει η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας με την οποία κατασκευάζεται το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus. Το μηχανικό υποσύστημα αποτελείται από το δοκίμιο και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) και έχει ως είσοδο τη δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο άκρο της δοκού και ως έξοδο την τάση που προκύπτει στους ακροδέκτες του επιθέματος.

Έπειτα, θα παρατεθεί το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσυστήματος, και θα αναλυθεί η λειτουργία των επιμέρους τμημάτων του. Το ηλεκτρικό υποσύστημα περιλαμβάνει το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) αλλά και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα που επιτελεί τη λειτουργία ενός μετασχηματιστή ανάμεσα στα δύο υποσυστήματα. Το υποσύστημα αυτό έχει ως είσοδο την τάση του επιθέματος και ως έξοδο τους τετραγωνικούς παλμούς που εξέρχονται από την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, όταν ο πυκνωτής της φορτιστεί επιτυχώς.

Τέλος, ο σκοπός της μοντελοποίησης είναι η δημιουργία ενός υπολογιστικού εργαλείου το οποίο θα μπορεί να προβλέπει εάν η εφαρμογή ενός δεδομένου μηχανικού φορτίου μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, χωρίς να χρειάζεται κάθε φορά η διενέργεια επιπρόσθετων πειραμάτων.

### 3.2 Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας μοντελοποίησης

Στο σημείο αυτό, είναι χρήσιμο να παρατεθούν τα βήματα με τα οποία πραγματοποιείται η μοντελοποίηση στις επόμενες παραγράφους. Τα βήματα αυτά εξηγούν τη λογική με την οποία λειτουργεί συνολικά η μέθοδος που αναπτύσσεται σε αυτό το κεφάλαιο αλλά δικαιολογούν και τη χρήση των μοντέλων που θα ακολουθήσουν. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μέθοδος συνοψίζεται στα ακόλουθα βήματα:

Βήμα 1ο: Δημιουργία μοντέλου μηχανικού υποσυστήματος στο Abaqus

- Προσδιορισμός ελαστικών ιδιοτήτων δοκού μέσω προσαρμογής (fitting)
- Επιβεβαίωση λειτουργικότητας μοντέλου σε εύρος μηχανικών φορτίων
- Λήψη αποτελεσμάτων που αφορούν μεγέθη του μηχανικού υποσυστήματος από Abaqus

Βήμα 2ο: Συνδυασμός των πληροφοριών που προέκυψαν από το 1<sup>ο</sup> Βήμα με τις εξισώσεις από Παράγραφο 2.3.2 για τη μοντελοποίηση του επιθέματος ως μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος

### Βήμα 3ο: Δημιουργία μοντέλου ηλεκτρικού υποσυστήματος στο Pspice

- Χρήση πληροφοριών που προκύπτουν από το 2<sup>ο</sup> Βήμα ως είσοδο στο ηλεκτρικό υποσύστημα
- Ρύθμιση άγνωστων παραμέτρων ηλεκτρικού κυκλώματος
- Έλεγχος ακρίβειας μεθοδολογίας με βάση το πείραμα

### **3.3 Μοντελοποίηση μηχανικού υποσυστήματος**

Το μηχανικό υποσύστημα μοντελοποιήθηκε με τη βοήθεια του Abaqus της Dassault Systemes. Το Abaqus είναι ένα υπολογιστικό πακέτο πεπερασμένων στοιχείων, το οποίο μπορεί να δώσει αριθμητικές λύσεις και προβλέψεις σε μια πληθώρα μηχανολογικών εφαρμογών. Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, το Abaqus προσφέρει στο χρήστη πολλές επιλογές, έτσι ώστε αυτός να δημιουργήσει το μοντέλο του σύμφωνα με τις ανάγκες του φυσικού προβλήματος που τον ενδιαφέρει. Πιο συγκεκριμένα, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τις διαστάσεις και το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται καθένα από τα κομμάτια του μοντέλου του, καθώς και τον τρόπο που αυτά αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Ακόμα, δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να ορίσει το πλέγμα και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιήσει για τη λύση του προβλήματος. Επίσης, ο χρήστης μπορεί να αποφασίσει εάν τον ενδιαφέρει η λύση του δυναμικού ή του στατικού προβλήματος που αφορά την εφαρμογή του. Αυτές είναι κάποιες από τις δυνατότητες του Abaqus που χρησιμοποιήθηκαν και στη μοντελοποίηση του μηχανικού υποσυστήματος σε αυτήν την εφαρμογή.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στο Abaqus δεν είναι δυνατή η απευθείας μοντελοποίηση του κυκλώματος της αποθήκευσης ενέργειας. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο που θα παρουσιαστεί περιγράφει την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος όταν αυτό δεν είναι συνδεδεμένο με την αντίστοιχη πλακέτα. Παρόλα αυτά, χρήσιμες πληροφορίες μπορούν να εξαχθούν από το μοντέλο αυτό και για τη συζευγμένη λειτουργία των δύο υποσυστημάτων μέσω αναλυτικών σχέσεων που έχουν αναφερθεί στην Παράγραφο 2.3.2.

Στις επόμενες παραγράφους περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάστηκε το μοντέλο του δοκιμίου και του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, ενώ ακόμα θα παρουσιαστούν και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την υπολογιστική διαδικασία του Abaqus.

#### **3.3.1 Καθορισμός διαστάσεων του μοντέλου (Part)**

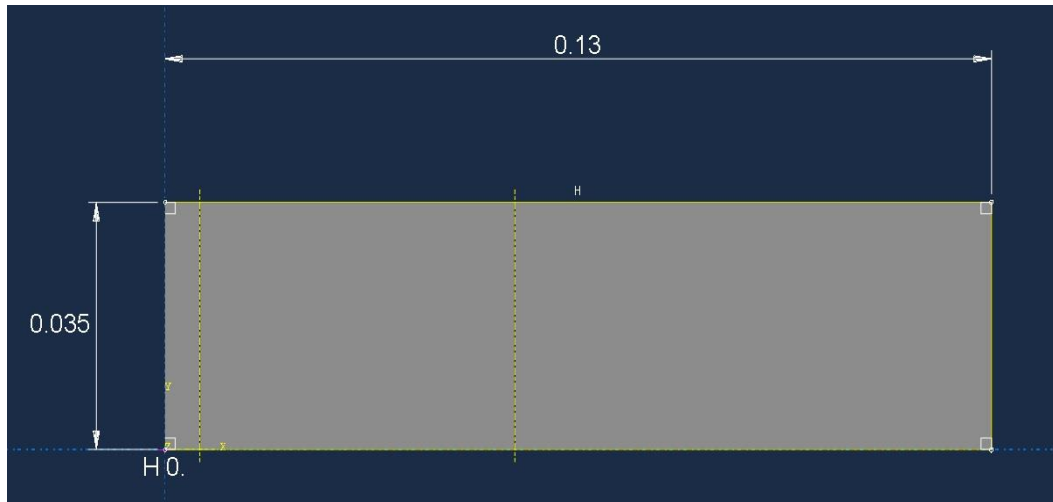
Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου στο Abaqus είναι η δημιουργία του κάθε κομματιού που συμπεριλαμβάνεται στο μοντέλο και η επιλογή των διαστάσεων του. Το παρόν μοντέλο αποτελείται από δύο ξεχωριστά σώματα, το δοκίμιο και το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Το βήμα αυτό υλοποιείται στο module του Abaqus που ονομάζεται part. Τα parts δημιουργούνται με βάση το σχέδιο που εισάγει ο χρήστης.

Το μοντέλο του δοκιμίου προκύπτει από το extrusion του παραλληλογράμμου που φαίνεται στο Σχήμα 3-1. Έτσι οι διαστάσεις του είναι 0.13 X 0.035 X 0.0015m. Το μήκος του δοκιμίου είναι μικρότερο από αυτό που δίνει ο κατασκευαστής (βλέπε 2.1.1) καθώς

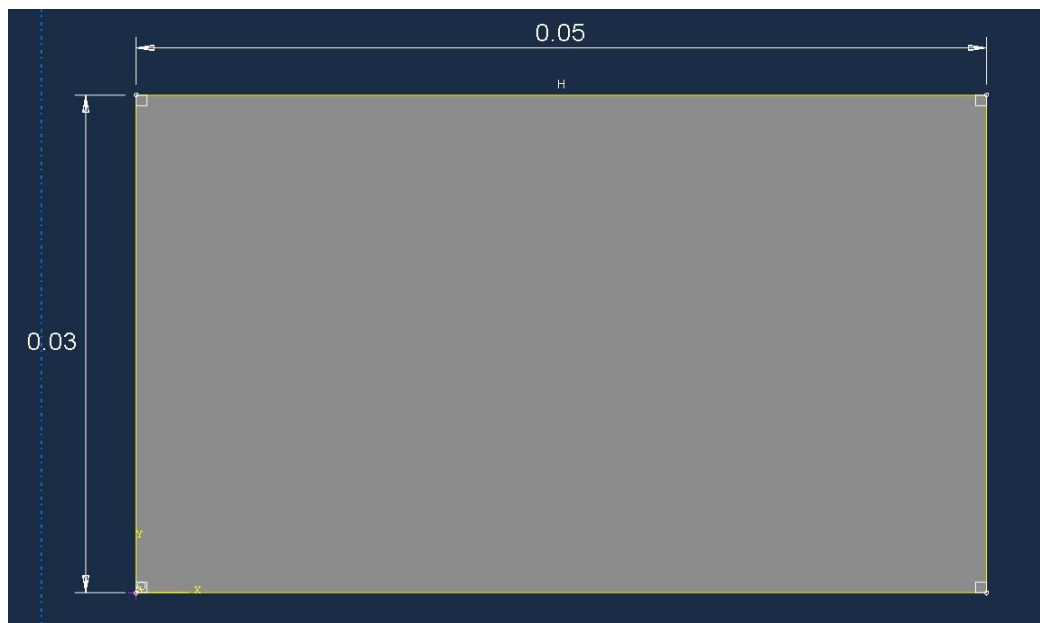


λαμβάνεται υπόψη ότι ένα τμήμα αυτού δεν συμμετέχει στο πείραμα αφού είναι πακτωμένο με τη μέγγενη. Ακόμα, στο μοντέλο του δοκιμίου έχουν δημιουργηθεί και δύο επιμέρους τμήματα (partitions) τα οποία θα εξυπηρετήσουν στον ορισμό της σχετικής θέσης των δύο σωμάτων.

Το μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος προκύπτει από το extrusion του παραλληλογράμμου που εμφανίζεται στο Σχήμα 3-2. Οι διαστάσεις του αντιστοιχούν στις διαστάσεις του ενεργού πιεζοηλεκτρικού όπως αυτές δίνονται από τον κατασκευαστή (βλέπε 2.1.2). Τελικά αυτές είναι  $0.05 \times 0.03 \times 0.0002\text{m}$ .



**Σχήμα 3-1. Διαστάσεις δοκιμίου στο Abaqus.**



**Σχήμα 3-2. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus.**

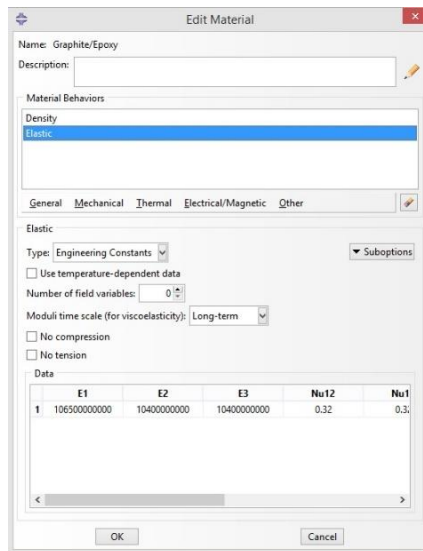
### 3.3.2 Προσδιορισμός των υλικών του μοντέλου (Property)

Το δεύτερο βήμα για την κατασκευή ενός μοντέλου είναι η καταχώρηση των μηχανικών και ηλεκτρικών ιδιοτήτων που χαρακτηρίζουν το εκάστοτε υλικό που θα χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται στο module του Abaqus που ονομάζεται

property. Η λογική με την οποία πραγματοποιείται το βήμα αυτό είναι ότι ο χρήστης πρώτα δημιουργεί τα υλικά που τον ενδιαφέρουν και στη συνέχεια ορίζει σε ποια τμήματα της κατασκευής θα χρησιμοποιηθεί το καθένα. Η δημιουργία ενός υλικού γίνεται με τον καθορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του που σχετίζονται με τη συγκεκριμένη εφαρμογή. Για τη μοντελοποίηση του δοκιμίου το υλικό που χρησιμοποιήθηκε είναι graphite-epoxy (Gr/Ep), ενώ για το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα PIC-255. Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται το παράθυρο επιλογής των ιδιοτήτων ενός υλικού όπως αυτό εμφανίζεται στο Abaqus, ενώ στον Πίνακα 3-1 δίνονται συνοπτικά οι σταθερές που χρησιμοποιήθηκαν.

**Πίνακας 3-1. Μηχανικές και ηλεκτρικές ιδιότητες υλικών.**

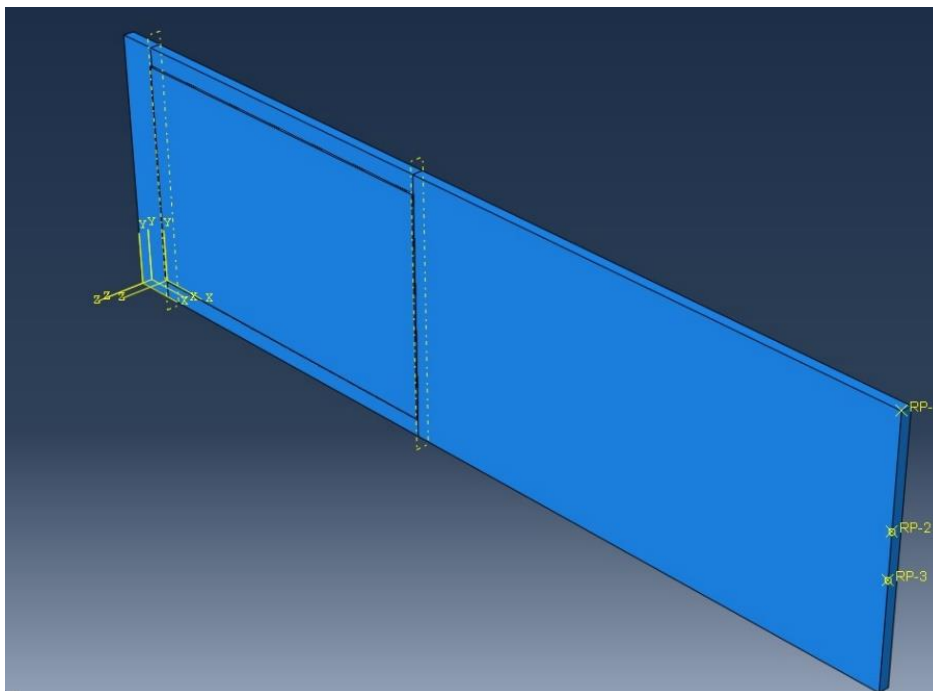
Material Properties	Gr/Ep	PIC 255
Material Density		
$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	1578	7800
Elastic Properties		
E <sub>11</sub> (GPa)	106.5	62.1
E <sub>22</sub> (GPa)	10.4	62.1
E <sub>33</sub> (GPa)	10.4	48.3
G <sub>23</sub> (GPa)	5.1	21.7
G <sub>13</sub> (GPa)	5.1	23.3
G <sub>12</sub> (GPa)	5.1	23.3
$\nu_{12}$	0.32	0.33
$\nu_{13}$	0.32	0.43
$\nu_{23}$	0.32	0.43
Piezoelectric Properties		
$d_{31}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)	-	-180
$d_{32}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)	-	-180
$d_{33}$ (10 <sup>-12</sup> m/V)	-	398
Dielectric Properties		
$\epsilon_{33}$ (10 <sup>-12</sup> Farad/m)	27	15495



**Σχήμα 3-3. Παράθυρο επιλογής υλικού.**

### 3.3.3 Προσδιορισμός σχετικής θέσης των δύο σωμάτων (Assembly)

Αφού τα δύο σώματα έχουν προσδιοριστεί πλήρως ως προς τη γεωμετρία τους και τις μηχανικές τους ιδιότητες, μπορούν πλέον να τοποθετηθούν στο χώρο για να πάρουν την τελική τους θέση. Η σχετική θέση δύο σωμάτων μπορεί να οριστεί με τη βοήθεια των περιορισμών (constraints) που προσφέρει το Abaqus. Στο συγκεκριμένο μοντέλο απαραίτητο ήταν μόνο το constraint εκείνο που διασφαλίζει ότι η μία επιφάνεια του επιθέματος είναι συνεπίπεδη με την επιφάνεια του δοκιμίου (face to face), καθώς οι υπόλοιπες αποστάσεις είχαν δοθεί στο πρώτο βήμα. Στο Σχήμα 3-4 φαίνεται το συναρμολογημένο μοντέλο των δύο σωμάτων.



**Σχήμα 3-4. Συναρμολογημένο μοντέλο (Assembly).**

### 3.3.4 Είδος προβλήματος και συνοριακές συνθήκες (Step)

Το επόμενο βήμα περιλαμβάνει την επιλογή στατικού ή δυναμικού επιλύτη, έτσι ώστε να ακολουθήσει και η αντίστοιχη ανάλυση από το Abaqus. Με βάση τη μορφή της διέγερσης (ημιτονοειδής εξαναγκασμένη ταλάντωση) επιλέχθηκε ο στατικός επιλύτης, καθώς πρόκειται για ένα στατικό πρόβλημα που λύνεται για κάθε χρονική στιγμή. Η διαφορά ανάμεσα στους δύο επιλύτες για την συγκεκριμένη εφαρμογή έχει να κάνει με το γεγονός ότι στον δυναμικό επιλύτη συμμετέχουν περισσότερες ιδιοσυχνότητες του συστήματος ενώ στον στατικό επιλύτη εξετάζεται μόνο η συχνότητα της διέγερσης. Η δεύτερη προσέγγιση φαίνεται να περιγράφει καλύτερα τις πειραματικές μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4.

Στο βήμα αυτό προσδιορίζεται το χρονικό βήμα ανάμεσα σε κάθε επανάληψη του προγράμματος, αλλά και ο συνολικός χρόνος για τον οποίο είναι επιθυμητή η λύση του προβλήματος. Πιο συγκεκριμένα, η επιλέχθηκε η λύση του προβλήματος για 0.2 s με βήμα 0.005 s. Η χρονική διάρκεια της λύσης δεν παίζει σημαντικό ρόλο αφού γνωρίζουμε ότι η απόκριση του επιθέματος είναι ημιτονοειδής, άρα όλη η απαραίτητη πληροφορία περιέχεται σε μία περίοδο του φαινομένου. Τελικά, επιλέχθηκε να λυθεί το πρόβλημα για δύο περιόδους για να γίνει καλύτερα η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Abaqus με τις πειραματικές μετρήσεις.

Δεδομένου ότι πρόκειται για συνεχές μέσο, για την επίλυση των Μερικών Διαφορικών Εξισώσεων που το περιγράφουν είναι απαραίτητη η εφαρμογή συνοριακών συνθηκών. Η πρώτη συνοριακή συνθήκη σχετίζεται με την πάκτωση του μοντέλου. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το δοκίμιο ήταν πακτωμένο με τη βοήθεια μιας μέγγενης. Η πάκτωση αυτή επιβλήθηκε στο άκρο του δοκιμίου που ήταν πλησιέστερα στο πιεζοηλεκτρικό επιθέματος όπως υποδεικνύεται και από την PI. Αυτό οδηγεί στην επιλογή των αντίστοιχων συνοριακών συνθηκών στη βάση του δοκιμίου. Οι συνθήκες αυτές είναι μηδενικές μετατοπίσεις και περιστροφές (encastre) σε όλη την επιφάνεια της βάσης του δοκιμίου. Η δεύτερη συνθήκη αφορά το πιεζοηλεκτρικό. Όπως και στο πείραμα ορίστηκε ότι η επιφάνεια του επιθέματος που εφάπτεται στο δοκίμιο, είναι γειωμένη δηλαδή έχει δυναμικό ίσο με το μηδέν.

### 3.3.5 Αλληλεπίδραση μεταξύ των σωμάτων (Interaction)

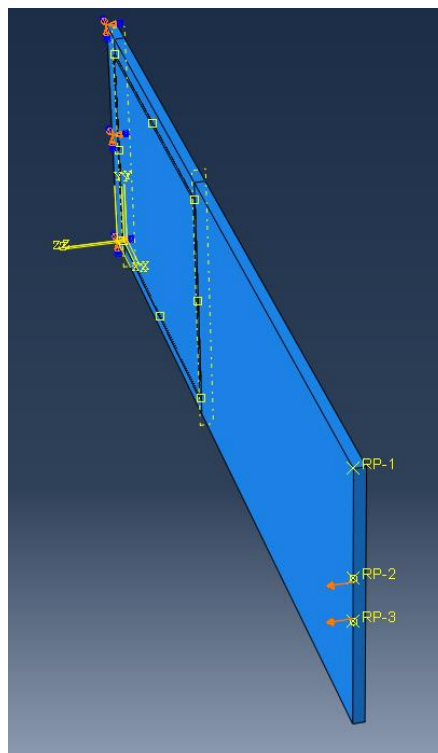
Όταν σε ένα μοντέλο υπάρχουν περισσότερα του ενός σώματα, τότε είναι απαραίτητη η διευκρίνιση της αλληλεπίδρασης που υπάρχει μεταξύ τους. Η διευκρίνιση αυτή επιτυγχάνεται με ένα είδος περιορισμού κίνησης (constraint) διαφορετικό από εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στο assembly, το οποίο υλοποιείται στο module του Abaqus με όνομα interaction. Για την εφαρμογή που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική, κρίθηκε αναγκαία η χρήση του constraint που ονομάζεται tie. Το constraint αυτό επιστρατεύεται έτσι ώστε οι μετατοπίσεις των στοιχείων που βρίσκονται στη διεπιφάνεια των δύο σωμάτων να είναι ίσες. Με αυτόν τον τρόπο, τα δύο σώματα δρουν σαν να είναι κολλημένα μεταξύ τους και επομένως οι παραμορφώσεις του δοκιμίου μεταφράζονται σε δημιουργία δυναμικού στην ελεύθερη επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.

### 3.3.6 Φορτίο (Load)

Μέχρι στιγμής έχει μοντελοποιηθεί όλο το μηχανικό υποσύστημα και έχουν προσδιορισθεί ο τρόπος λύσης του προβλήματος καθώς και οι συνοριακές συνθήκες που το συνοδεύουν. Αυτό που απομένει είναι η επιλογή της εισόδου που θα προκαλέσει την απόκριση του συστήματος. Στα πειράματα που διενεργήθηκαν το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα χρησιμοποιήθηκε ως αισθητήρας, δηλαδή μετέτρεπε την παραμόρφωση που του επιβαλλόταν σε δυναμικό. Επομένως, στο σύστημα που μελετάται, είσοδος είναι το μηχανικό φορτίο, δηλαδή η δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου.

Επομένως τα φορτία που επιλέχθηκαν, είναι όμοια με τις δυνάμεις που εφαρμόστηκαν στα πειράματα που θα παρουσιαστούν στην Παράγραφο 4.4.1, όπου εξετάστηκε η απόκριση του επιθέματος όταν αυτό δεν είναι συνδεδεμένο με την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας. Δηλαδή, συνολικά πραγματοποιήθηκαν τρεις προσωμοιώσεις με τα τρία διαφορετικά φορτία που ασκήθηκαν στα πειράματα αυτά. Πιο αναλυτικά, τα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν στο Abaqus ήταν ημιτονοειδή με συχνότητα 10 Hz και πλάτη 2.25, 1.32 και 0.67N αντίστοιχα.

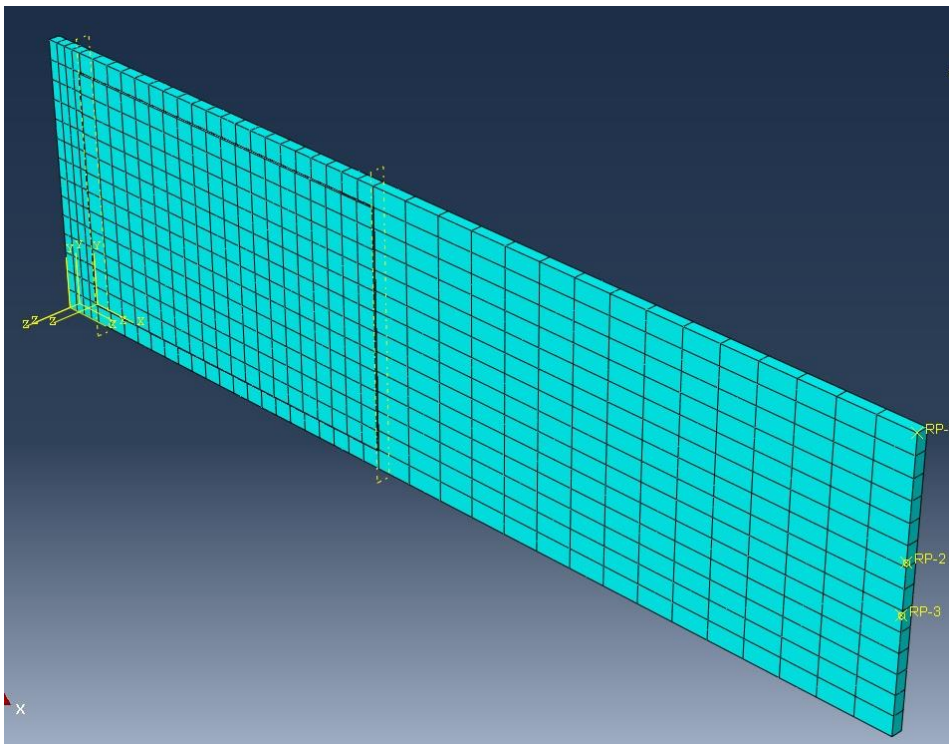
Στο Abaqus, ο προσδιορισμός του επιβαλλόμενου φορτίου γίνεται μέσα από το ειδικό module που διαθέτει το πρόγραμμα και το οποίο ονομάζεται load. Στο module αυτό, πέρα από τη μορφή και το μέγεθος του φορτίου, επιλέγεται ακόμα ο προσανατολισμός του αλλά και ο τρόπος εφαρμογής του. Εδώ τα φορτία που αναφέρθηκαν παραπάνω, εφαρμόστηκαν με τη μορφή δύο συγκεντρωμένων δυνάμεων που ασκούνται στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου. Στο Σχήμα 3-5 φαίνεται ο προσανατολισμός των φορτίων και τα σημεία εφαρμογής τους.



Σχήμα 3-5. Εφαρμογή φορτίου στα reference points 2 και 3.

### 3.3.7 Διακριτοποίηση με πεπερασμένα στοιχεία (Mesh)

Το τελευταίο χαρακτηριστικό του μοντέλου που θα πρέπει να οριστεί είναι το πλέγμα και το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που θα χρησιμοποιηθούν. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί στο αντίστοιχο module του Abaqus που ονομάζεται mesh. Όσον αφορά το πλέγμα, στο Abaqus, είναι δυνατόν να επιλέξει κανείς τη δημιουργία ενός ομοιόμορφου πλέγματος σε όλο το μοντέλο ή ακόμα να διαλέξει ένα πλέγμα το οποίο προσαρμόζεται τοπικά για την κάλυψη ειδικών αναγκών που μπορεί να υπάρχουν σε ένα συγκεκριμένο τμήμα του μοντέλου. Στο μοντέλο που κατασκευάστηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, το πλέγμα επιλέχθηκε να είναι πιο πυκνό κοντά στην πάκτωση και σταδιακά να αραιώνεται μέχρι το ελεύθερο άκρο του δοκιμίου. Στο Σχήμα 3-6 φαίνεται το πλέγμα που χρησιμοποιήθηκε.



Σχήμα 3-6. Πλέγμα μοντέλου μηχανικού υποσυστήματος.

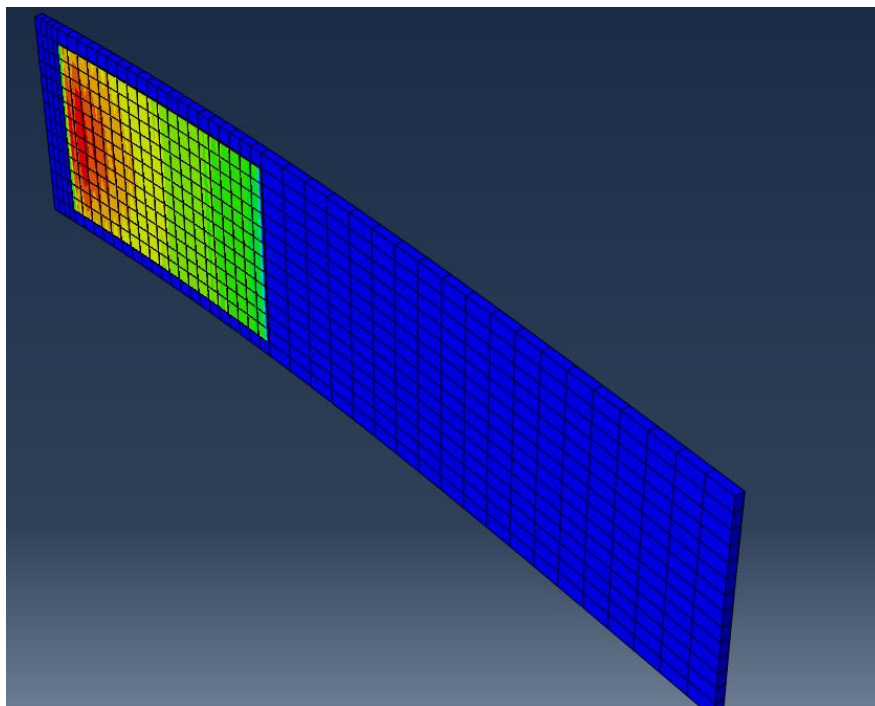
Αναφορικά με το είδος των πεπερασμένων στοιχείων που μπορούν να επιλεγούν, το Abaqus περιλαμβάνει μια πληθώρα επιλογών. Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το δοκίμιο είναι τα C3D20R, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια των 3D stress στοιχείων. Τα στοιχεία που επιλέχθηκαν για το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα είναι τα C3D20RE, τα οποία ανήκουν στην οικογένεια των piezoelectric στοιχείων.

### 3.3.8 Αποτελέσματα (Job and Visualization)

Μετά την ολοκλήρωση των παραπάνω βημάτων, το μοντέλο είναι πλέον έτοιμο. Η ανάλυση από το Abaqus γίνεται στο job module και τα αποτελέσματα αυτής παρουσιάζονται στο

visualization module. Τα αποτελέσματα μπορούν οπτικοποιηθούν είτε με τη βοήθεια δαιγραμμάτων, είτε με τη βοήθεια γραφικών αναπαραστάσεων.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η είσοδος του μηχανικού υποσυστήματος είναι το μηχανικό φορτίο που ασκείται στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου και η έξοδος είναι η παραγόμενη τάση από το επιθέμα. Στις συνοριακές συνθήκες θεωρήθηκε ότι η επιφάνεια του επιθέματος που εφάπτεται στο δοκίμιο έχει μηδενικό δυναμικό. Αυτό σημαίνει πως το αποτέλεσμα που συγκεντρώνει ενδιαφέρον σε αυτήν φάση, είναι το δυναμικό στην ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος.



**Σχήμα 3-7. Κατανομή ηλεκτρικού δυναμικού στο Abaqus.**

Όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3-7, το Abaqus προβλέπει ότι το παραγόμενο ηλεκτρικό δυναμικό δεν είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο πάνω στην ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος. Στο πείραμα, όμως, το δυναμικό που μετράται είναι ένα, λόγω της ύπαρξης ηλεκτροδίων που μεσολαβούν ανάμεσα στην επιφάνεια του επιθέματος και του παλμογράφου. Για το λόγο αυτό, επιλέχθηκε η λήψη του μέσου όρου του δυναμικού των κόμβων που βρίσκονται στην ελεύθερη επιφάνεια του επιθέματος, ως αντίστοιχη αυτής που μετράται στο πείραμα.

Προηγουμένως αναφέρθηκε ότι οι ελαστικές σταθερές του δοκιμίου δεν είναι γνωστές και για αυτό έπρεπε να προσαρμοστούν για τη δημιουργία ενός μοντέλου το οποίο να προβλέπει σωστά την απόκριση του συστήματος σε κάθε πιθανό φορτίο. Ο τρόπος με τον οποίο συνέβη αυτό ήταν ο εξής. Πρώτα, έγινε η υπόθεση ότι οι ίνες του υλικού graphite-epoxy έχουν προσανατολισμό  $0^\circ$ . Στη συνέχεια, ξεκινώντας από κάποιες τυπικές τιμές για τις ελαστικές σταθερές του υλικού graphite-epoxy, προσαρμόστηκε το μέτρο ελαστικότητας του υλικού που αφορά την κατεύθυνση του μήκους, δηλαδή την  $E1$ . Η προσαρμογή αυτή

έγινε, έτσι ώστε για τη φόρτιση της πρώτης επανάληψης του πειράματος (βλέπε Κεφάλαιο 6) να προκύψει και υπολογιστικά η ίδια απόκριση με αυτή που παρατηρήθηκε στο πείραμα. Έπειτα, ελέγχθηκε το κατά πόσο το μοντέλο αυτό μπορεί να προβλέψει ορθώς την απόκριση του συστήματος και για τα υπόλοιπα δύο πειράματα. Τελικά, οι σταθερές που προέκυψαν είναι αυτές του Πίνακα 3-1.

Εκ των υστέρων, δόθηκε μια εκτίμηση των ιδιοτήτων του υλικού και από την κατασκευάστρια εταιρεία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, PI. Τα στοιχεία που ελήφθησαν αποδίδουν στο υλικό μια ισότροπη συμπεριφορά που χαρακτηρίζεται από μια σταθερά του Young της τάξεως των 150 GPa και μια πυκνότητα ίση με  $1.65\text{g/cm}^3$ . Το μοντέλο χρησιμοποιήθηκε εκ νέου με τα δεδομένα από την εταιρεία και επειδή τα αποτελέσματα που ελήφθησαν ήταν παρόμοια, τελικά αποφασίστηκε να διατηρηθούν οι σταθερές που προδιορίστηκαν με τον τρόπο που αναλύθηκε προηγουμένως.

### 3.4 Μοντελοποίηση ηλεκτρικού υποσυστήματος

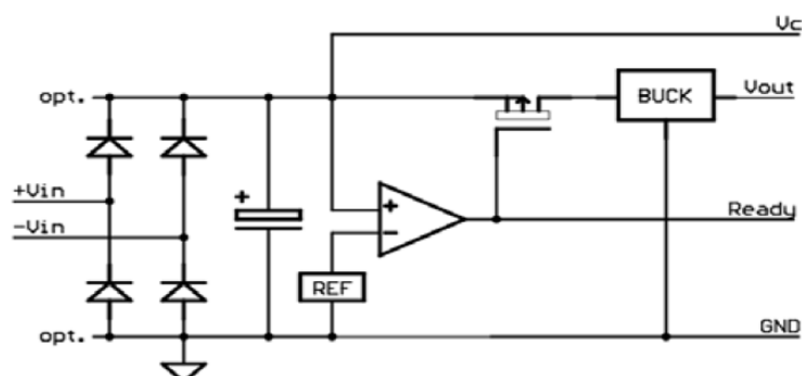
Το μοντέλο που προηγήθηκε αποδίδει ικανοποιητικά την απόκριση του μηχανικού υποσυστήματος όταν αυτό δεν είναι σε σύνδεση με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας (βλέπε Κεφάλαιο 6). Επομένως, είναι απαραίτητη η δημιουργία ενός μοντέλου που θα προβλέπει ικανοποιητικά και τη λειτουργία της πλακέτας όταν αυτή τροφοδοτείται από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Για το λόγο αυτό, κατασκευάστηκε ένα μοντέλο στο υπολογιστικό πρόγραμμα Pspice-Capture της Orcad. Το πρόγραμμα αυτό δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού της απόκρισης ενός κυκλώματος, όταν τα στοιχεία που το απαρτίζουν είναι γνωστά. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δημιουργήθηκε ένα μοντέλο στο οποίο προσομοιώνεται ο τρόπος που αποκρίνεται το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας όταν αυτό φορτίζεται από το επίθεμα. Επειδή το Pspice δεν έχει τη δυνατότητα να αποδώσει το μηχανικό υποσύστημα της διάταξης, το πιεζοηλεκτρικό στοιχείο αντιμετωπίζεται ως μια πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας με μια συγκεκριμένη τάση εισόδου ( $V_{in}$ ).

Η PI δίνει ένα αρχικό δομικό διάγραμμα του κυκλώματος το οποίο όμως χρήζει περαιτέρω διερεύνησης (βλ. Σχήμα 3-8). Στο συγκεκριμένο κύκλωμα, μία τάση εισόδου εφαρμόζεται στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και αφού ανορθωθεί, το εισερχόμενο ηλεκτρικό φορτίο αποθηκεύεται στον πυκνωτή. Με τη συσσώρευση ολοένα και περισσότερου φορτίου στον πυκνωτή η τάση στα άκρα του ανεβαίνει. Όταν φτάσει η τάση αυτή μια ανώτατη τιμή, ο τελεστικός ενισχυτής του κυκλώματος ενεργοποιεί το transistor, το οποίο λειτουργεί ως διακόπτης που κλείνει, και τότε δημιουργείται ένας παλμός σταθερής τάσης, ο οποίος και αποτελεί την αξιοποιήσιμη τάση στην έξοδο του κυκλώματος. Η απόδοση ενέργειας στην έξοδο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας με την μορφή που αναφέρθηκε προηγουμένως, οδηγεί στην σταδιακή μείωση της τάσης στα άκρα του πυκνωτή του κυκλώματος. Όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει σε ένα κατώτατο όριο, ο τελεστικός ενισχυτής προκαλεί το transistor να λειτουργήσει ως ένας διακόπτης που ανοίγει και άρα ο παλμός τάσης εξόδου τερματίζεται. Τέλος, ο παλμός τάσης, που εμφανίζεται στην



έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, λαμβάνει την τελική του μορφή με τη βοήθεια ενός ειδικού υποκυκλώματος το οποίο λειτουργεί ως φίλτρο και ονομάζεται buck converter.



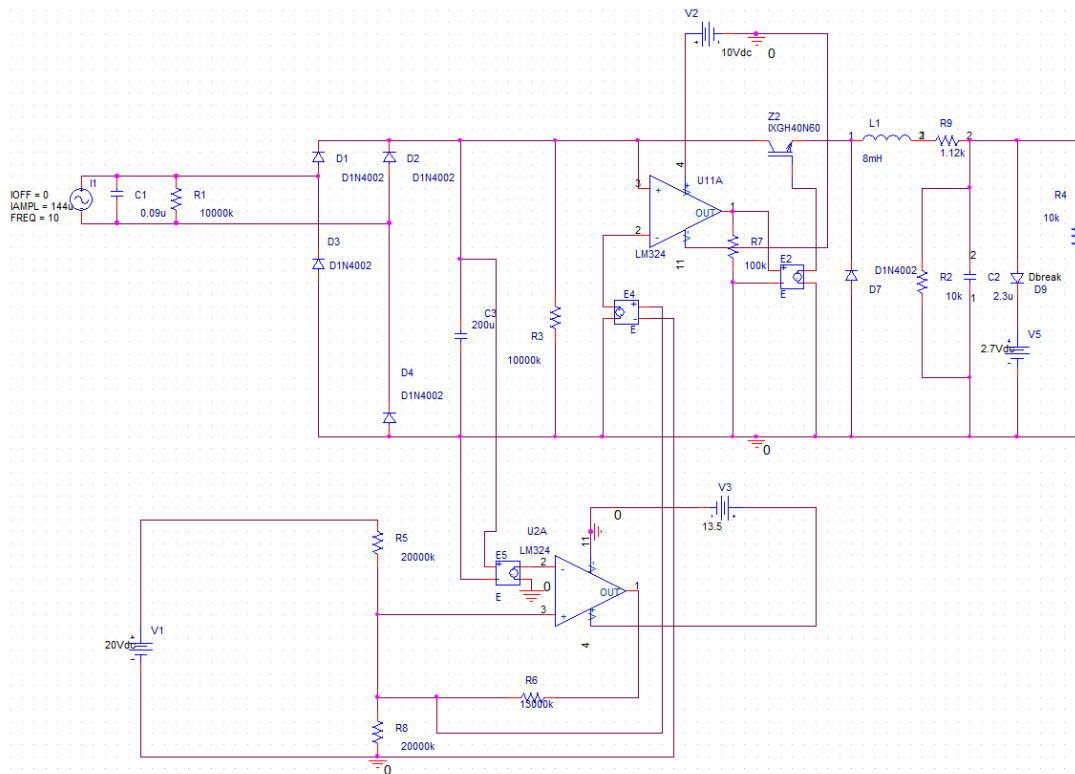
**Σχήμα 3-8. Δομικό διάγραμμα κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 από την PI.**

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εντοπίζεται στη λειτουργία του τελεστικού ενισχυτή. Αυτός λειτουργεί ως συγκριτής της τάσης του πυκνωτή και μιας τάσης αναφοράς (REF), η οποία, όμως με βάση τα παραπάνω, είναι μεταβλητή. Συγκεκριμένα, η REF παίρνει δύο τιμές, οι οποίες αποτελούν το μέγιστο όριο τάσης στο οποίο ξεκινά η αποφόρτιση του πυκνωτή και το ελάχιστο όριο της ίδιας τάσης όπου και η φόρτιση του πυκνωτή εκκινεί εκ νέου.

Από τον κατασκευαστή, ήταν γνωστή η χωρητικότητα του πυκνωτή του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, η οποία είναι ίση με 200μF. Ακόμα, η χωρητικότητα που εμφανίζει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα εκτιμάται, από την PI, ίση με 90nF και το εύρος του ρεύματος που μπορεί να διαχειριστεί η πλακέτα είναι 20mA-40mA.

Ωστόσο, όπως γίνεται αντιληπτό από το Σχήμα 3-8, από τον κατασκευαστή παραλείπονται το υποκύκλωμα που υλοποιεί την μεταβλητή τάση αναφοράς REF και το υποκύκλωμα του buck converter που διαμορφώνει το τελικό σήμα εξόδου. Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, τα υποκυκλώματα αυτά προδιορίστηκαν με την μέθοδο της αντίστροφης μηχανικής (reverse engineering), έτσι ώστε το υπολογιστικό μοντέλο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας να αποδίδει σωστά την μορφή του εισερχόμενου και του εξερχόμενου από την πλακέτα σήματος.

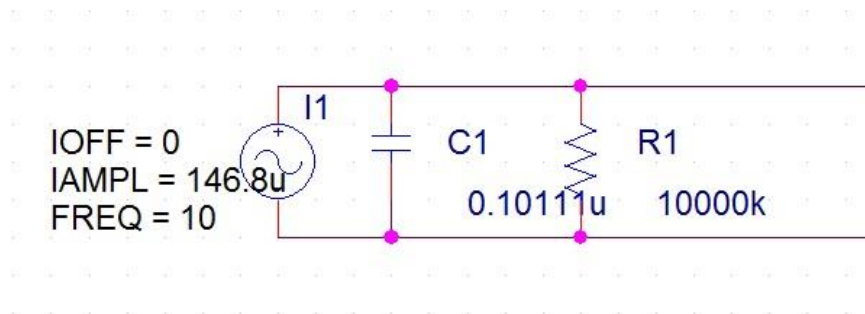
Στη συνέχεια της Παραγράφου 3.4, αρχικά, παρουσιάζονται τα διάφορα επιμέρους τμήματα του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας και εξηγείται η λειτουργία που το κάθε ένα επιτελεί. Έπειτα, περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο προσδιορίζονται τα άγνωστα υποκυκλώματα και αποδίδεται λεπτομερώς η επίδραση των παραμέτρων τους στα σήματα εισόδου και εξόδου από την πλακέτα. Κατά αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας και μέσω αυτού, γίνεται εμφανής ο μηχανισμός με τον οποίο αυτή λειτουργεί. Στο Σχήμα 3-9, παρουσιάζεται το ολοκληρωμένο μοντέλο που δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα Pspice



**Σχήμα 3-9. Μοντέλο επιθέματος-κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας στο Pspice της Orcad.**

### 3.4.1 Πιεζοηλεκτρικό Επίθεμα

Με βάση τη σχετική βιβλιογραφία, τα πιεζοηλεκτρικά επιθέματα μοντελοποιούνται ως μία πηγή ρεύματος που συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-10. Η πηγή ρεύματος στην εφαρμογή αυτή χαρακτηρίζεται από το πλάτος της έντασης της και τη συχνότητα της, αφού η δύναμη που διεγείρει το σύστημα είναι ημιτονοειδής. Η ένταση της πηγής ρεύματος προκύπτει μετά από τη χρήση εξισώσεων που έχουν παρατεθεί στην Παράγραφο 2.3.2. Η συχνότητα της πηγής ρεύματος είναι ίση με 10Hz, όσο και η συχνότητα της διεγείρουσας δύναμης.



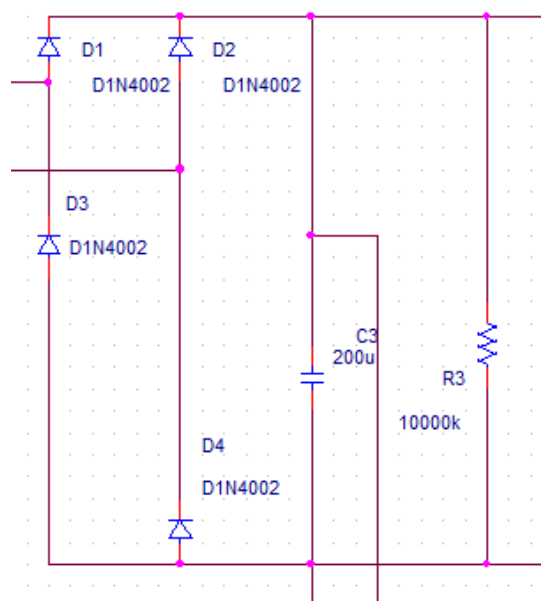
**Σχήμα 3-10. Μοντελοποίηση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.**

Η χωρητικότητα που εμφανίζει το επίθεμα θα εκτιμηθεί μαζί με την ένταση της πηγής του ρεύματος. Αυτή αποδίδεται στον πυκνωτή C1 που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση

του χαρακτηριστικού αυτού. Η αντίσταση R1 δεν επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία του κυκλώματος αλλά είναι μεγάλη για να μοντελοποιεί την αποφόρτιση του επιθέματος όταν αυτό ηρεμεί μετά από μια χρήση του. Η αποφόρτιση αυτή γίνεται με αργούς ρυθμούς.

### 3.4.2 Ανόρθωση τάσης

Η τάση που εφαρμόζεται στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι δυνατόν να οδηγήσει σε αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας όσο είναι εναλλασσόμενη. Για το λόγο αυτό ανορθώνεται. Έτσι, στο τμήμα του κυκλώματος που εμφανίζεται στο Σχήμα 3-11, η τάση που δημιουργείται στα άκρα του επιθέματος ανορθώνεται με τη βοήθεια των διόδων D1, D2, D3 και D4 οι οποίες είναι συνδεδεμένες σε μορφή γέφυρας. Το ανορθωμένο σήμα εισόδου στη συνέχεια φορτίζει τον πυκνωτή της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Η χωρητικότητά του σύμφωνα τον κατασκευαστή είναι ίση με 200μF και αποδίδεται με το ιδανικό στοιχείο συσσώρευσης C3, ενώ οι απώλειες του μοντελοποιούνται με το ιδανικό στοιχείο αντίστασης R3. Η χωρητικότητα του πυκνωτή C3 έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς καθορίζει σε μεγάλο βαθμό αν το σήμα της εισόδου είναι αρκετά ισχυρό για να καταφέρει να τον φορτίσει μέχρι το ανώτερο όριο τάσης που αναφέρθηκε προηγουμένως. Επίσης, αν αυτό τελικά συμβεί, η χωρητικότητα του πυκνωτή καθορίζει και το χρόνο στον οποίο η φόρτιση θα ολοκληρωθεί. Η αντίσταση R3 και πάλι δεν επηρεάζει τη λειτουργία του κυκλώματος και είναι μεγάλη για τους λόγους που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

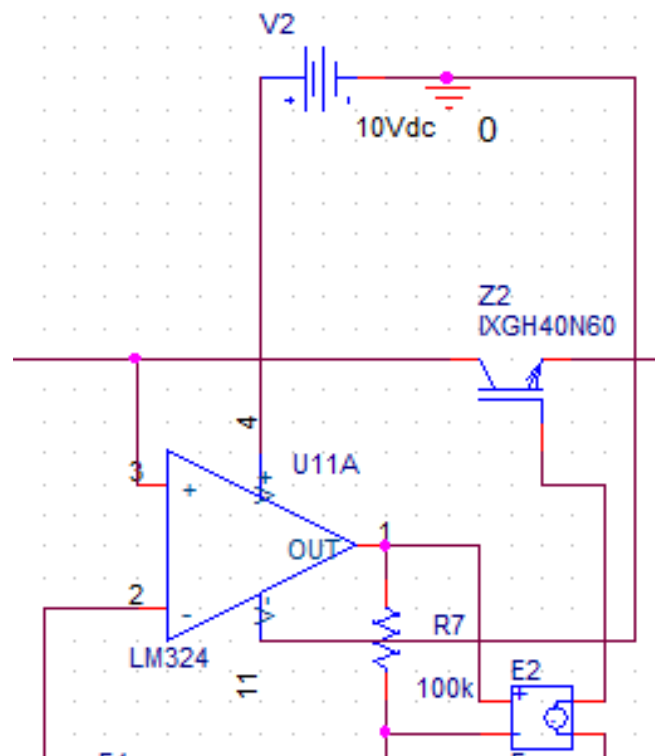


Σχήμα 3-11. Ανορθωτής τάσης.

### 3.4.3 Τελεστικός Ενισχυτής και transistor

Το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας χρειάζεται έναν διακόπτη ο οποίος θα ρυθμίζει το πότε θα εμφανίζεται ο παλμός εξόδου με βάση την τάση του πυκνωτή C3. Αυτό επιτυγχάνεται με τη συνεργασία του transistor Z2 και του τελεστικού ενισχυτή U11A. Ο τελεστικός ενισχυτής συγκρίνει διαρκώς το δυναμικό στον ακροδέκτη 3 με το δυναμικό του ακροδέκτη

2, όπως αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 3-12. Όταν  $V_3 > V_2$ , τότε στον ακροδέκτη 1 εμφανίζεται θετικό δυναμικό το οποίο ενεργοποιεί το transistor και έτσι το φορτίο από τον πυκνωτή C3 μπορεί να μεταφερθεί στον buck converter, αφού το ρεύμα πια διέρχεται ελεύθερα μέσα από το transistor. Στην αντίθετη περίπτωση, ο ενισχυτής δεν στέλνει πια θετικό δυναμικό στην πύλη του transistor και η διέλευση του ρεύματος μέσω αυτού διακόπτεται. Το δυναμικό  $V_2$  είναι μεταβλητό και είναι ίσο με το REF που προαναφέρθηκε και θα επεξηγηθεί παρακάτω. Στο Σχήμα 3-12 φαίνεται και μία εξαρτημένη πηγή τάσης από τάση (E2), η οποία υπάρχει για την εύρυθμη λειτουργία του προγράμματος και εξασφαλίζει ότι το δυναμικό εξόδου του ενισχυτή είναι ίσο με το δυναμικό που εφαρμόζεται στην πύλη του transistor. Στην πραγματικότητα, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο.



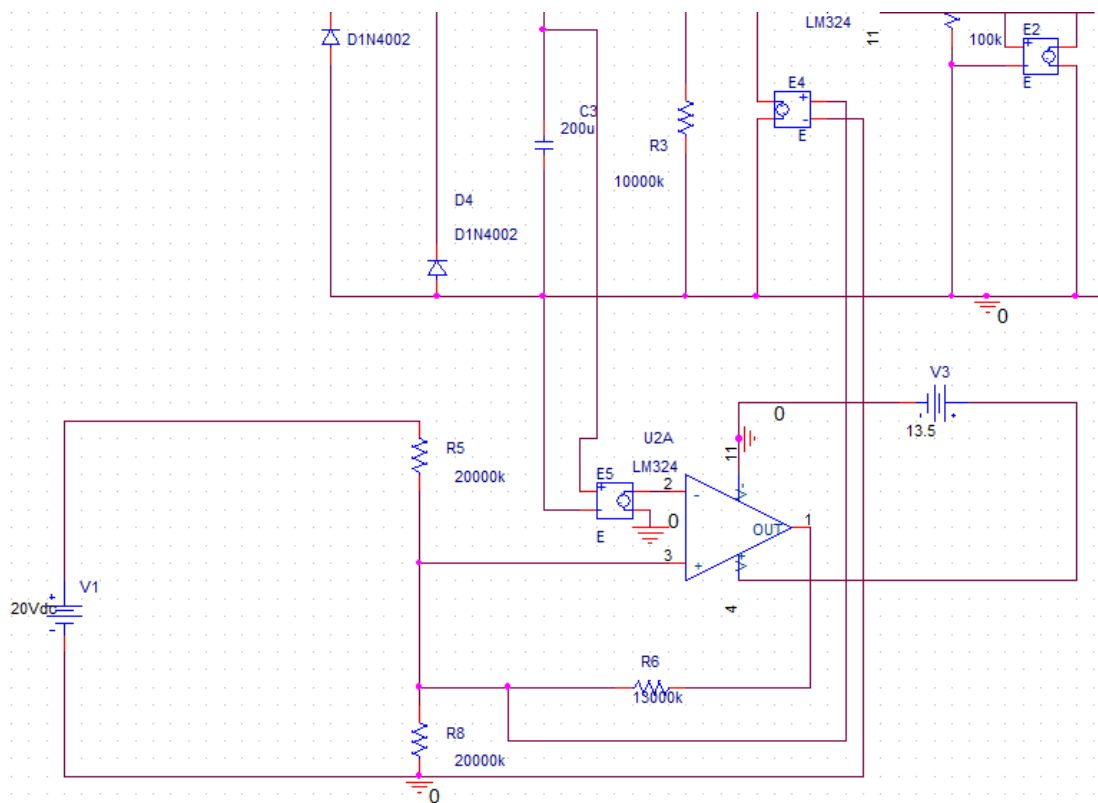
Σχήμα 3-12. Transistor και τελεστικός ενισχυτής.

### 3.4.4 Schmitt trigger και REF

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ένδειξη REF στο δομικό διάγραμμα του κατασκευαστή αναπαριστά μια τάση που μεταβάλλεται παίρνοντας είτε μια υψηλή τιμή είτε μια χαμηλή τιμή. Αρχικά, η τιμή της REF είναι υψηλή και μάλιστα υψηλότερη της τάσης του πυκνωτή, με αποτέλεσμα ο τελεστικός ενισχυτής U11A που ελέγχει το transistor, να το κρατά σε κατάσταση OFF. Όταν η τιμή του πυκνωτή φτάσει την υψηλή τιμή της REF, τότε ο ενισχυτής θέτει το transistor σε κατάσταση ON και ο πυκνωτής C3 αρχίζει να αποφορτίζεται. Ταυτόχρονα, όμως, η REF μεταπηδά στη χαμηλή τιμή της με αποτέλεσμα η τάση του πυκνωτή C3 να είναι μεγαλύτερη από τη REF. Έτσι η αποφόρτιση του πυκνωτή δεν σταματά ακαριαία αλλά συνεχίζεται μέχρι η τάση του πυκνωτή να γίνει ίση με τη χαμηλή

τιμή της REF. Όταν αυτό συμβεί η REF επανέρχεται στην υψηλή της τιμή και η φόρτιση ξεκινά εκ νέου.

Η επίτευξη της παραπάνω μεταβλητής τιμής της τάσης REF οφείλεται σε ένα υποκύκλωμα που ονομάζεται Schmitt trigger. Στο κύκλωμα αυτό ένας δεύτερος ενισχυτής (U2A) συγκρίνει την τιμή του δυναμικού του πυκνωτή C3 με το δυναμικό στο μη γειωμένο άκρο της αντίστασης R8. Όταν το δυναμικό στο εν λόγω άκρο της αντίστασης είναι μεγαλύτερο της τάσης του πυκνωτή C3, τότε τα ρεύματα που διαρρέουν τις αντιστάσεις R5 και R6 προστίθενται και διαρρέουν την R8 που είναι συνδεδεμένη σε σειρά με αυτές. Αντίθετα, όταν είναι μικρότερο, τότε οι αντιστάσεις R8 και R6 είναι συνδεδεμένες παράλληλα και σε σειρά με αυτές συνδέεται η R5. Η αλλαγή αυτή στη συνδεσμολογία των αντιστάσεων οδηγεί στη μεταβολή της τάσης της αντίστασης R8. Η τάση αυτή είναι ίση με τη REF και αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση της εξαρτημένης πηγής τάσης από τάση E4. Στο Σχήμα 3-13 παρουσιάζεται το αντίστοιχο τμήμα του κυκλώματος.

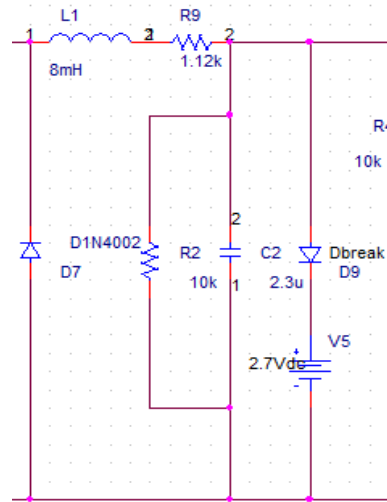


**Σχήμα 3-13. Schmitt trigger και REF.**

### 3.4.5 Buck converter και voltage clipper

Αφού το ρεύμα διαρρέυσει επιτυχώς το transistor Z2 που φαίνεται στο Σχήμα 3-12, το φορτίο εισέρχεται στο δεύτερο τμήμα του κυκλώματος, το οποίο απεικονίζεται στο Σχήμα 3-14. Εκεί υπάρχει ένα buck converter, το οποίο είναι ένα υποκύκλωμα με σκοπό να λειτουργεί ως φίλτρο και να διαμορφώνει το παλμό της τάσης εξόδου. Το κύκλωμα αυτό αποτελείται από ένα πηνίο (L1), μία αντίσταση (R9), έναν πυκνωτή και τις απώλειες του (C2 και R2) και μια δίοδο (D7), η οποία διασφαλίζει τη σωστή φορά του ρεύματος όταν το

transistor σταματά να άγει ρεύμα. Η τάση εξόδου ( $V_{out}$ ) εμφανίζεται στους ακροδέκτες του πυκνωτή C3. Τέλος, υπάρχει μια δίοδος (D10) η οποία συνδέεται με μια πηγή τάσης σε σειρά. Αυτό το κομμάτι του υποκυκλώματος ονομάζεται voltage clipper και σκοπό έχει να κόβει το τμήμα του παλμού που εξέρχεται από τον buck converter που ξεπερνά την επιθυμητή  $V_{out}$ . Έτσι, ο παλμός που εξέρχεται είναι πλήρως τετραγωνικός.



**Σχήμα 3-14. Buck converter και Voltage Clipper.**

### 3.4.6 Ηλεκτρικό φορτίο

Στο πείραμα που πραγματοποιήθηκε η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας τροφοδοτούσε με τάση μια αντίσταση 10kΩ. Αξίζει να σημειωθεί ότι λόγω της ύπαρξης του voltage clipper το φορτίο είτε αυτό είναι αντίσταση είτε είναι κάποια μπαταρία, δεν επηρεάζει την τάση στα άκρα της αλλά μόνο το ρεύμα που το διαρρέει.

### 3.4.7 Προσδιορισμός παραμέτρων άγνωστων υποκυκλωμάτων

Το αρχικό δομικό διάγραμμα που παρέχει ο κατασκευαστής δεν περιλαμβάνει κάποια τμήματα του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. Για το λόγο αυτό, ήταν αναγκαία η επιλογή των κατάλληλων διατάξεων αλλά και η ρύθμιση των παραμέτρων τους, προκειμένου να αποδοθεί σωστά η λειτουργία της υπάρχουσας πλακέτας. Αυτό πραγματοποιήθηκε με τις μεθόδους της αντιστροφής μηχανικής.

Τα δύο υποκυκλώματα, που πρέπει να προσδιοριστούν για να κατασκευαστεί το ολοκληρωμένο μοντέλο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας, είναι η διάταξη Schmitt trigger που υλοποιεί την μεταβλητή τάση αναφοράς REF και το φίλτρο που διαμορφώνει το παλμό εξόδου, δηλαδή ο buck converter με το voltage clipper.

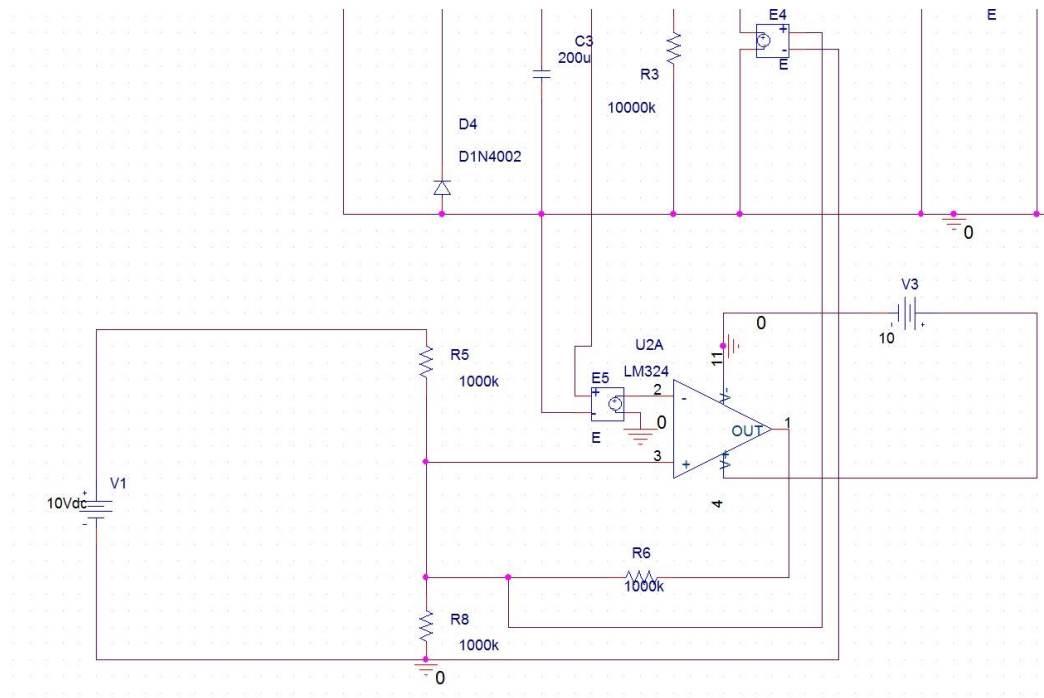
Η μεταβλητή τάση REF επιτυγχάνεται με την χρήση του υποκυκλώματος Schmitt trigger, που φαίνεται στο Σχήμα 3-13. Γενικά, ένα κύκλωμα Schmitt trigger χαρακτηρίζεται από την ικανότητα του να παράγει στην έξοδό του σταθερή τάση σε δύο στάθμες, μία υψηλή και μία χαμηλή. Το κριτήριο με το οποίο η διάταξη αυτή αποδίδει τάση σε μία από τις δύο αυτές στάθμες, είναι το δυναμικό που εισέρχεται στην αντιστρέφουσα είσοδό του τελεστικού

του ενισχυτή (U2A). Πιο συγκεκριμένα, όταν το εισερχόμενο δυναμικό ξεπεράσει μια μέγιστη τιμή τότε το Schmitt trigger παράγει σταθερά μία υψηλή τάση, ενώ όταν το ίδιο δυναμικό είναι χαμηλότερο από μία ελάχιστη τιμή τότε το υποκύκλωμα παράγει σταθερά μια χαμηλή τάση. Η ιδιότητα του Schmitt trigger αυτή, δικαιολογεί την επιλογή του για την εφαρμογή του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. Σε αυτήν την εφαρμογή, το εισερχόμενο δυναμικό είναι η τάση του πυκνωτή C3. Οι δύο ακραίες τιμές του δυναμικού με βάση τις οποίες μεταβάλλεται η απόκριση του υποκυκλώματος καθορίζονται από τις παραμέτρους του. Αυτές είναι η τάση της πηγής V1, η τάση της πηγής V3 και οι τιμές των αντιστάσεων R5, R6 και R8.

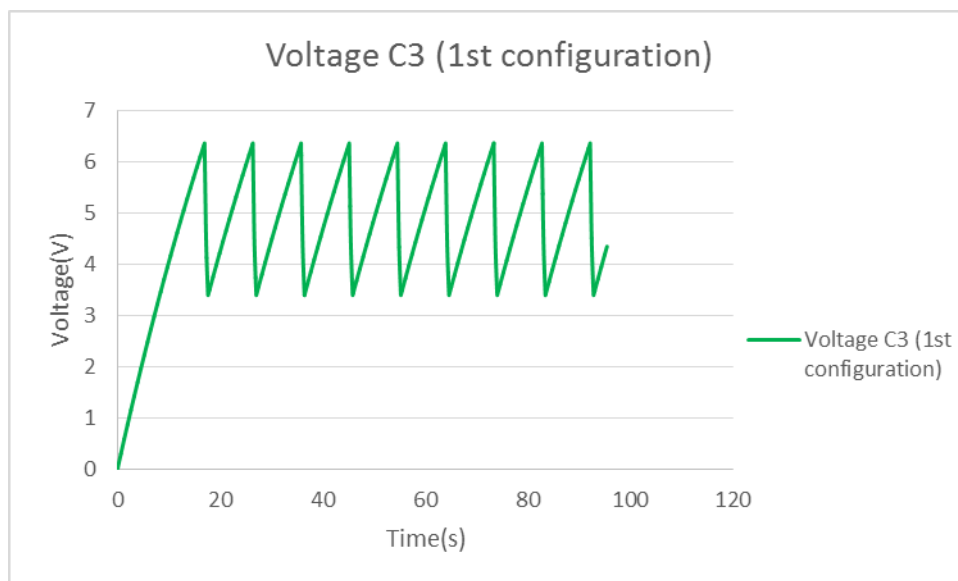
Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.4.4, ο συνδυασμός του υποκυκλώματος Schmitt trigger με τον τελεστικό ενισχυτή U11A που φαίνεται στο Σχήμα 3-12, οδηγεί στον καθορισμό της ανώτατης και της κατώτατης τιμής που μπορεί να λάβει η τάση του πυκνωτή C3. Στο πλαίσιο της μοντελοποίησης του υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, είναι απαραίτητη η εύρεση του κατάλληλου συνδυασμού των παραμέτρων της διάταξης Schmitt trigger, ώστε το υπολογιστικό μοντέλο να αποδίδει με ακρίβεια τα όρια της τάσης του πυκνωτή C3. Τα όρια αυτά μετρήθηκαν κατά την διάρκεια των αντίστοιχων πειραμάτων τα οποία θα περιγραφούν στο Κεφάλαιο 4. Οι επιθυμητές παράμετροι προσδιορίστηκαν μετά από δοκιμές.

Στη συνέχεια, παρατίθενται οι τάσεις που αναπτύσσονται στα άκρα του πυκνωτή C3, σύμφωνα με το υπολογιστικό μοντέλο για δύο διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων προκειμένου να φανεί η επίδραση του κυκλώματος Schmitt trigger στην συνολική λειτουργία της πλακέτας. Οι υπόλοιπες σταθερές του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, καθώς και η ένταση της πηγής ρεύματος που χρησιμοποιείται για την μοντελοποίηση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, διατηρούνται σταθερές.

Στο Σχήμα 3-15 φαίνεται πως διαμορφώνεται το κύκλωμα Schmitt trigger για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. Σε αυτόν τον συνδυασμό, ισχύει  $V1=10V$ ,  $V3=10V$  και  $R5=R6=R8=1000k\Omega$ . Η τάση στα άκρα του πυκνωτή C3, που προκύπτει λόγω του συνδυασμού αυτού, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-16. Για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων η μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα του πυκνωτή C3 είναι περίπου 6.27V, ενώ η ελάχιστη 3.38V. Ακόμα, παρατηρείται ότι ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η φάση της φόρτισης του πυκνωτή για πρώτη φορά είναι περίπου 17s ενώ ο χρόνος που διαρκεί η φάση της αποφόρτισης είναι περίπου 0.65s.



**Σχήμα 3-15. Δομικό διάγραμμα Schmitt trigger για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων.**

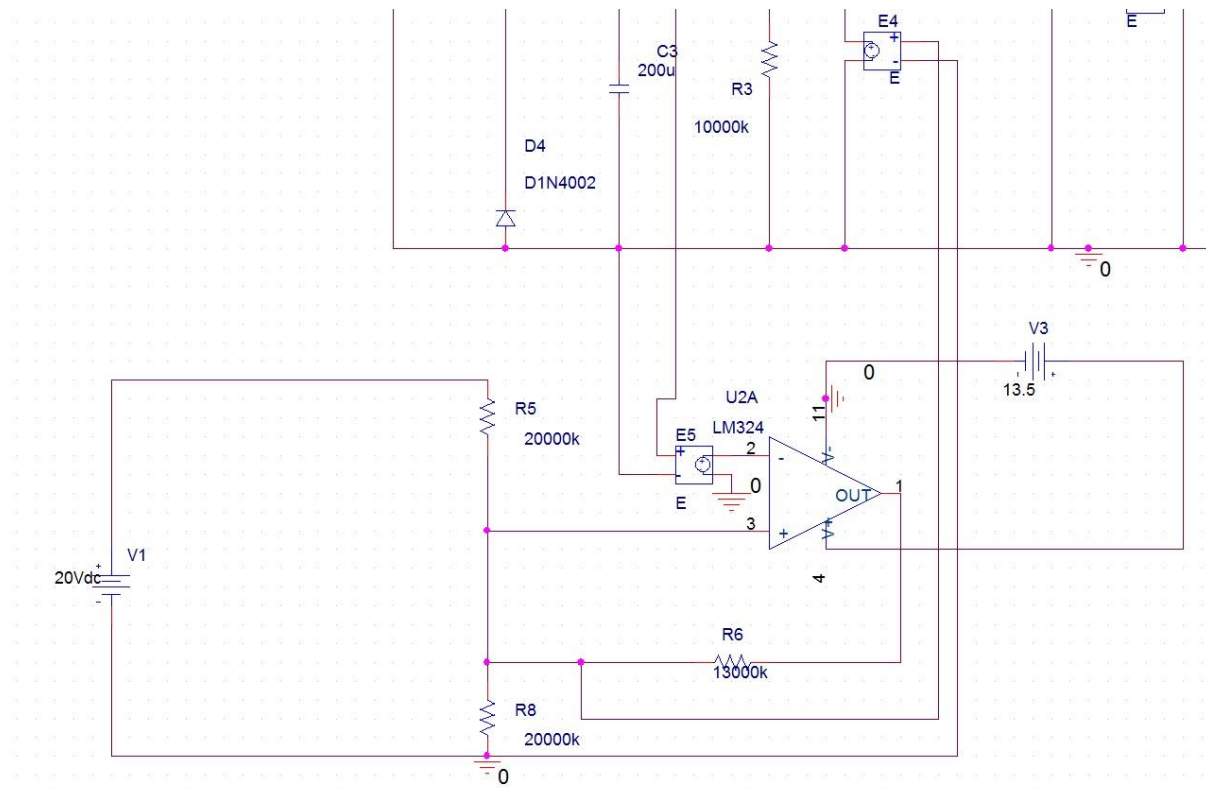


**Σχήμα 3-16. Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων.**

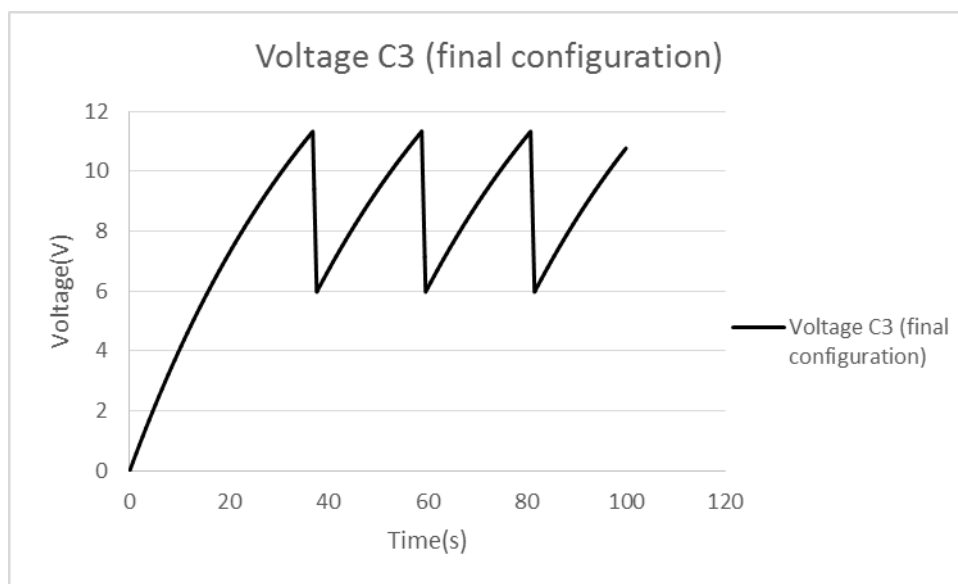
Στο Σχήμα 3-17 παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο διαμορφώνεται το κύκλωμα Schmitt trigger για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων. Σε αυτόν τον συνδυασμό, ισχύει  $V1=20V$ ,  $V3=13.5V$  και  $R5=R8=20000k\Omega$  και  $R6=13000k\Omega$ . Η τάση στα άκρα του πυκνωτή C3, που προκύπτει λόγω του συνδυασμού αυτού, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3-18. Για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων η μέγιστη τιμή της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα του πυκνωτή C3 είναι περίπου 11.23V, ενώ η ελάχιστη 6V. Ακόμα, παρατηρείται ότι ο χρόνος που χρειάζεται για να ολοκληρωθεί η φάση της φόρτισης του πυκνωτή για πρώτη φορά είναι περίπου 37s ενώ ο χρόνος που διαρκεί η φάση της αποφόρτισης είναι περίπου 0.8s.



Ο συνδυασμός αυτός προσεγγίζει με πολύ καλή ακρίβεια της πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 6 όπου και παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα της εργασίας.



**Σχήμα 3-17. Δομικό διάγραμμα Schmitt trigger για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων.**



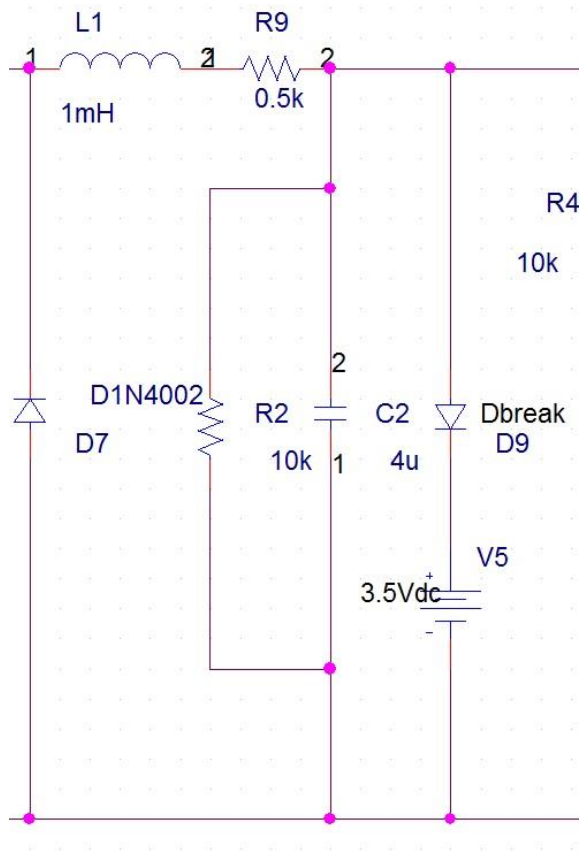
**Σχήμα 3-18. Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων.**

Από τα παραδείγματα που παρουσιάστηκαν, είναι φανερή η επίδραση του κυκλώματος Scmitt trigger στα όρια της τάσης που αναπτύσσεται στα άκρα του πυκνωτή C3. Ακόμα, γίνεται αντιληπτή και μια δευτερεύουσα επίδραση η οποία έχει να κάνει με τον χρόνο φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή. Όπως είναι φυσικό, ο χρόνος της φόρτισης και της εκφόρτισης του πυκνωτή είναι συνάρτηση της διαφοράς μεταξύ της μέγιστης και της ελάχιστης τιμής της τάσης στα άκρα του πυκνωτή C3.

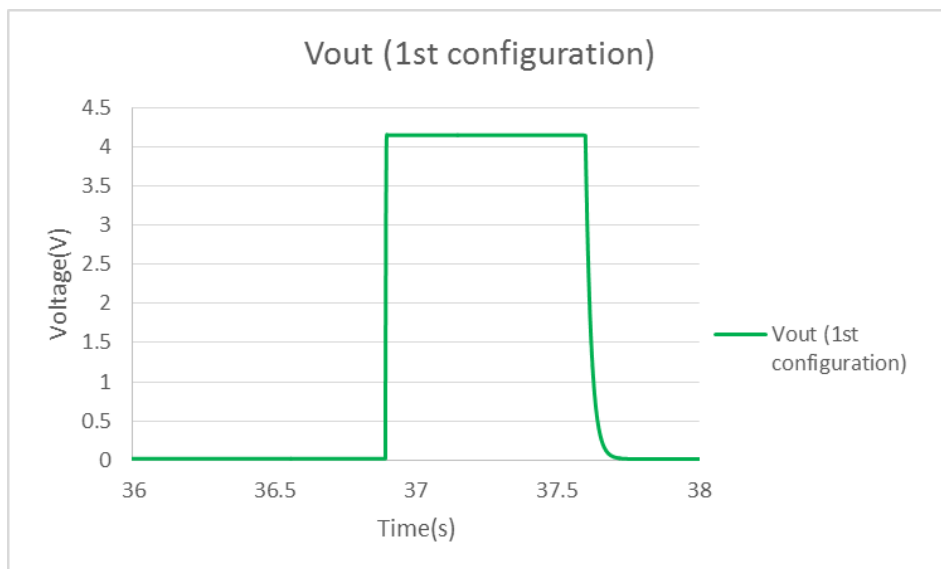
Το δεύτερο υποκύκλωμα που πρέπει να προσδιοριστεί είναι το φίλτρο από το οποίο διέρχεται ο παλμός εξόδου. Σύμφωνα με το αρχικό δομικό διάγραμμα του κατασκευαστή, το φίλτρο αποτελείται από έναν buck converter. Η διάταξη του buck converter φαίνεται στο Σχήμα 3-14 και περιλαμβάνει μία αντίσταση (R9), ένα πηνίο(L1), μία δίοδο (D7) και ένα πυκνωτή (C2 και R2). Το φίλτρο αυτό μπορεί να απομακρύνει μέρος του θορύβου που μπορεί να υπάρχει στο σήμα εξόδου, ωστόσο δεν μπορεί να προσδώσει την τετραγωνική μορφή σε αυτό. Για το λόγο αυτό στο μοντέλο προστέθηκε και ένας voltage clipper. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο buck converter μέσω των παραμέτρων του διαμορφώνει την διάρκεια του παλμού εξόδου αλλά και την ποιότητα του σήματος, ενώ ο voltage clipper εξασφαλίζει την τετραγωνική μορφή και την επιθυμητή τάση του παλμού εξόδου. Η τελική ρύθμιση των παραμέτρων πραγματοποιήθηκε έτσι ώστε το σήμα εξόδου που μετρήθηκε στα αντίστοιχα πειράματα να προβλέπεται με ακρίβεια από το υπολογιστικό μοντέλο.

Όπως και προηγουμένως παρατίθενται δύο παραδείγματα για να γίνει αντιληπτή η επίδραση των παραμέτρων του υποκυκλώματος αυτού στην λειτουργία της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Στο Σχήμα 3-19 απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα του buck converter και του voltage clipper για τον πρώτο συνδυασμό παραμέτρων. Για τις παραμέτρους ισχύει ότι  $L1=1\text{mH}$ ,  $C2=4\mu\text{F}$ ,  $R2=10\text{k}\Omega$ ,  $R9=0.5\text{k}\Omega$  και  $V5=3.5\text{V}$ . Ο παλμός που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 3-20. Η τάση του παλμού εξόδου είναι ίση με  $4.15\text{V}$  και η διάρκεια του  $0.7\text{s}$ .

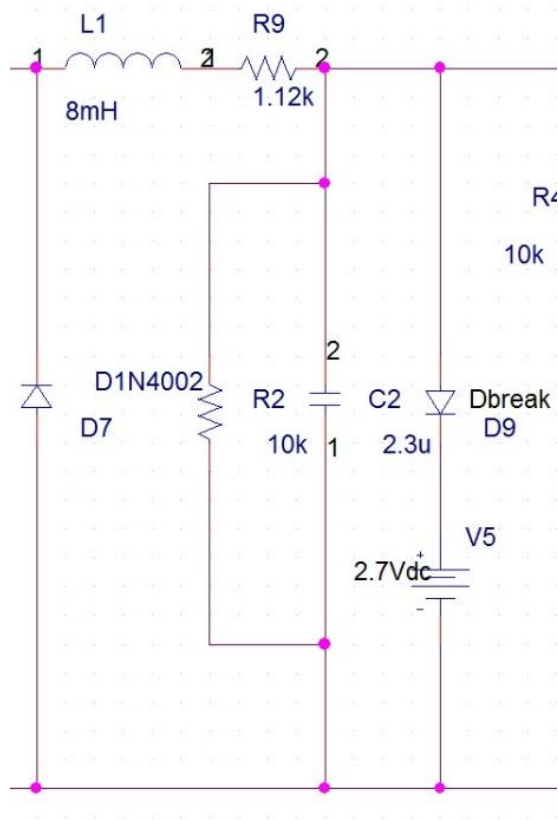
Στο Σχήμα 3-21 απεικονίζεται το δομικό διάγραμμα του buck converter και του voltage clipper για τον τελικό συνδυασμό παραμέτρων. Για τις παραμέτρους ισχύει ότι  $L1=8\text{mH}$ ,  $C2=2.3\mu\text{F}$ ,  $R2=10\text{k}\Omega$ ,  $R9=1.12\text{k}\Omega$  και  $V5=2.7\text{V}$ . Ο παλμός που προκύπτει φαίνεται στο Σχήμα 3-22. Η τάση του παλμού εξόδου είναι ίση με  $3.3\text{V}$  και η διάρκεια του  $0.8\text{s}$ . Ο συνδυασμός αυτός προσεγγίζει με πολύ καλή ακρίβεια της πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 6 όπου και παρατίθενται τα τελικά αποτελέσματα της εργασίας.



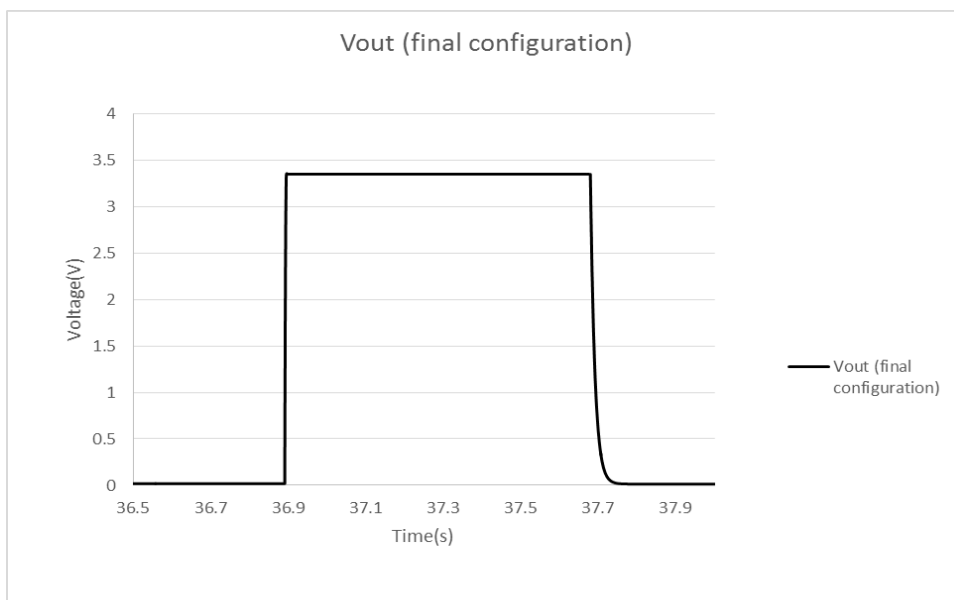
Σχήμα 3-19. Δομικό διάγραμμα buck converter και voltage clipper για πρώτο συνδυασμό παραμέτρων.



Σχήμα 3-20. Παλμός εξόδου για πρώτο συνδυασμό παραμέτρων.

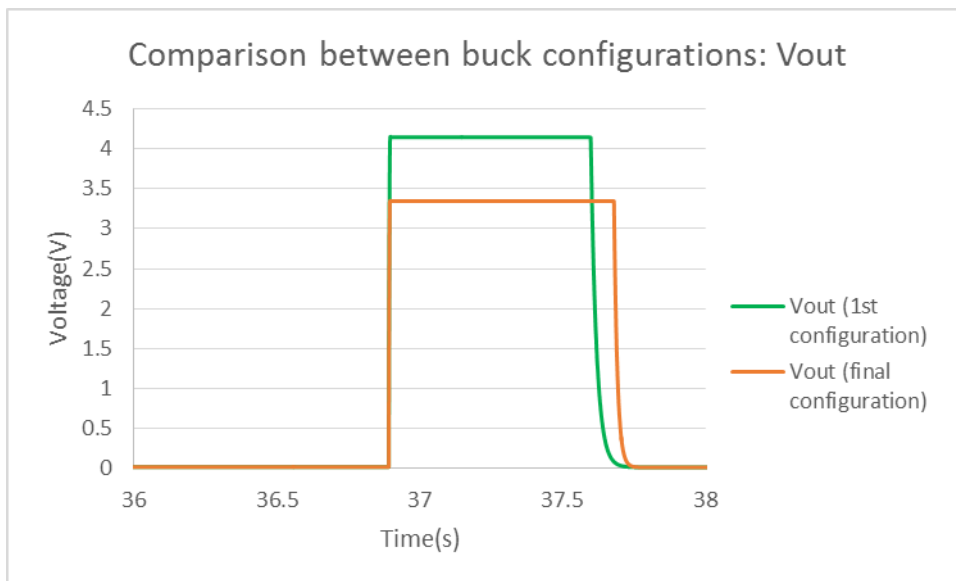


**Σχήμα 3-21. Δομικό διάγραμμα buck converter και voltage clipper για τελικό συνδυασμό παραμέτρων.**



**Σχήμα 3-22. Παλμός εξόδου για τελικό συνδυασμό παραμέτρων.**

Για μια αμεσότερη σύγκριση των δύο παλμών εξόδου παρατίθεται και το Σχήμα 3-23.



**Σχήμα 3-23. Σύγκριση παλμών εξόδου για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων.**

## 4 Πειράματα παραγωγής ενέργειας με ημιτονοειδές φορτίο

### 4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, θα περιγραφεί η πειραματική διαδικασία που ακολουθήθηκε για τον προσδιορισμό της ενέργειας που παράγεται όταν ένα δεδομένο ημιτονοειδές μηχανικό φορτίο ασκείται πάνω σε μία δοκό που φέρει πιεζοηλεκτρικό στοιχείο (patch). Για το λόγο αυτό θα παρατεθεί αρχικά, η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των επιμέρους εξαρτημάτων που την απαρτίζουν. Ακόμα, θα παρουσιαστεί συνοπτικά ο τρόπος με τον οποίο τα εξαρτήματα της διάταξης συνεργάζονται για να έρθουν εις πέρας τα πειράματα που εξετάζονται στην ενότητα αυτή.

Στη συνέχεια, έπεται η περιγραφή των δύο διαφορετικών πειραμάτων που έλαβαν χώρα κατά τη συγκεκριμένη φάση της διπλωματικής εργασίας. Το πρώτο πείραμα αφορά τη μέτρηση του παραγόμενου, από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, δυναμικού με σκοπό τον προσδιορισμό των ελαστικών σταθερών του δοκιμίου και την επιβεβαίωση της επιτυχούς λειτουργίας του μοντέλου, που δημιουργήθηκε στο Abaqus, σε ένα μεγάλο εύρος δυνάμεων.

Το δεύτερο πείραμα αφορά τη μέτρηση της ηλεκτρικής τάσης που παράγεται στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, όταν αυτό συνδέεται με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Η τάση αυτή ταυτίζεται με την τάση στην είσοδο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας και μαζί με αυτήν μετράται και η τάση στην έξοδο της πλακέτας. Το πείραμα αυτό σκοπό έχει τη ρύθμιση των σταθερών στο μοντέλο του κυκλώματος που κατασκευάστηκε στο Pspice, ενώ λειτουργεί και ως μέτρο σύγκρισης για την επιτυχία ή μη της μεθόδου που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

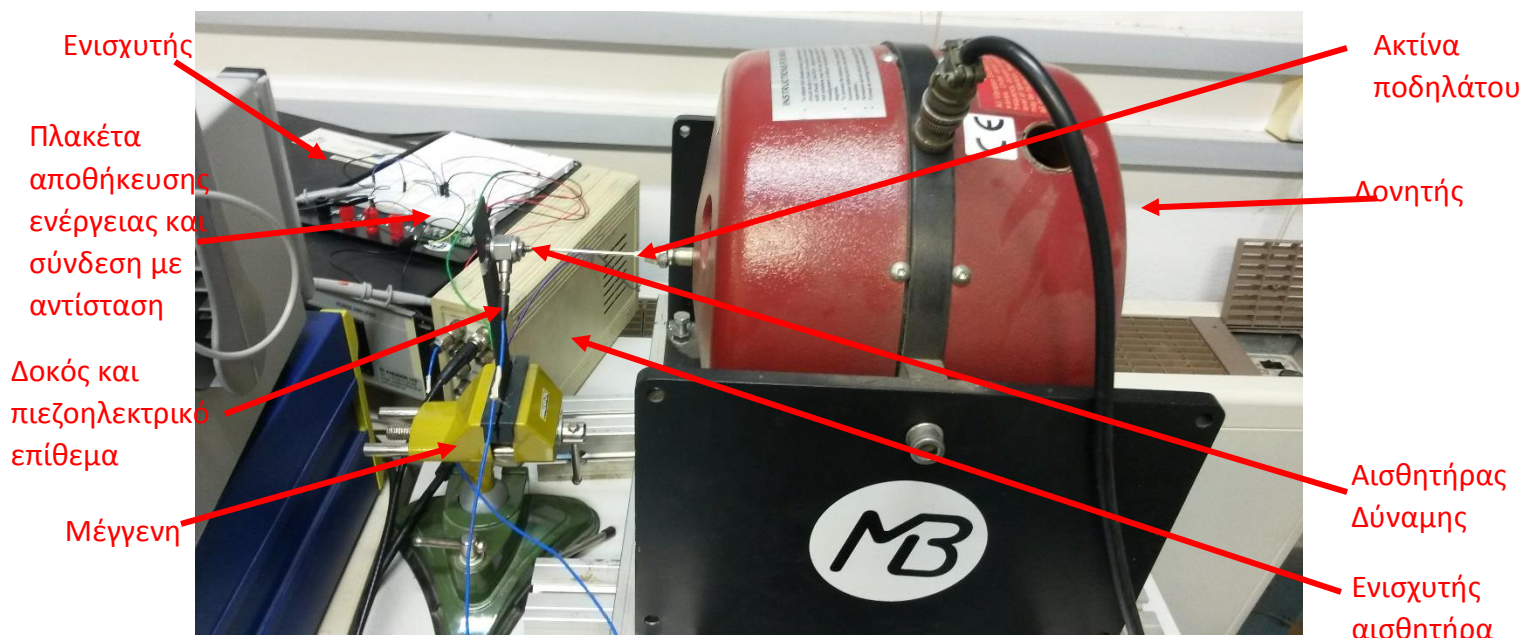
Επιπλέον, στο κεφάλαιο αυτό θα παρατεθούν και οι πειραματικές μετρήσεις που ελήφθησαν κατά τη διάρκεια των εν λόγω πειραμάτων. Οι πειραματικές μετρήσεις θα χρησιμοποιηθούν μαζί με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα υπολογιστικά μοντέλα που περιγράφηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, για να υλοποιηθεί η τελική τους σύγκριση στο Κεφάλαιο 6.

### 4.2 Περιγραφή διάταξης

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από τμήματα τα οποία θα περιγραφούν λεπτομερώς. Ονομαστικά αυτά είναι: ένα δοκίμιο από σύνθετο υλικό και γεωμετρία δοκού, ένα πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (piezoelectric patch) P-876.A12 της PI, ένας δονητής της MB Dynamics, ένας ενισχυτής για το σήμα διέγερσης, ένας παλμογράφος, το πρόγραμμα σε λογισμικό LabVIEW της NI, η ολοκληρωμένη πλατφόρμα c-RIO της ίδιας εταιρείας, ένας αισθητήρας δύναμης (PCB 208C03), ένας ενισχυτής (PCB 482A16) για το σήμα από τον αισθητήρα δύναμης, και η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI για την εκμετάλλευση της ενέργειας. Για καλύτερη εποπτεία της διάταξης παρατίθεται ο Πίνακας 4-1 και το Σχήμα 4-1.

**Πίνακας 4-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης.**

A/A	Στοιχείο	Κατασκευαστής	Λειτουργία
1	Δοκίμιο από σύνθετο υλικό	PI	Πραγματοποίηση ταλάντωσης για παραγωγή ενέργειας
2	Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch P-876.A12)	PI	Μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική
3	Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (Harvesting module E-821.00 της PI)	PI	Αποθήκευση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
4	LabVIEW VI και C-RIO	National Instruments	Δημιουργία ημιτονοειδούς σήματος διέγερσης του δοκιμίου
5	Ενισχυτής 2050E05	The Modal Shop inc.	Ενίσχυση σήματος διέγερσης
6	Δονητής MB Modal 110	MB dynamics	Επιβολή ημιτονοειδούς φορτίου στο δοκίμιο
7	Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03 και ενισχυτής PCB 482A16	PCB Piezotronics	Μέτρηση ασκούμενης δύναμης και ενίσχυση μετρούμενου σήματος
8	Παλμογράφος MS06014A	Agilent Technologies	Μέτρηση σημάτων ηλεκτρικού δυναμικού και αποθήκευση μετρήσεων



**Σχήμα 4-1. Διάταξη πειράματος με ημιτονοειδές φορτίο.**

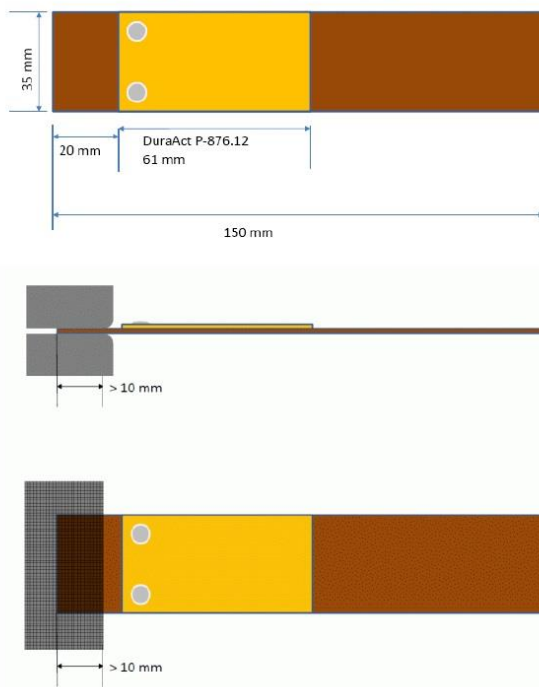
#### 4.2.1 Δοκίμιο από σύνθετο υλικό

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που θα περιγραφούν στη συνέχεια, δίδεται μαζί με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα και την πλακέτα για την αποθήκευση ενέργειας κατά την αγορά των τελευταίων. Το δοκίμιο αυτό κατά τη διάρκεια των πειραμάτων ήταν πακτωμένο στο ένα άκρο του με τη βοήθεια μιας μέγγενης. Η PI δίδει της πληροφορίες που αφορούν της διαστάσεις του δοκιμίου, το υλικό της κατασκευής του, καθώς και το προτεινόμενο σημείο εφαρμογής της μέγγενης. Συγκεκριμένα, το δοκίμιο είναι ορθογωνικής διατομής με διαστάσεις 150mm X 35mm X 1.5mm και αποτελείται από πλεκτό σύνθετο υλικό με ίνες άνθρακα και εποξική ρυτίνη (Graphite/Epoxy), οι ιδιότητες του οποίου δεν δίνονται. Ο υποκατασκευαστής της PI έδωσε ένα μέτρο ελαστικότητας κατά προσέγγιση, όπως θα αναφερθεί στην ενότητα της μοντελοποίησης της δοκού. Οι ελαστικές ιδιότητες του υλικού ήταν αρχικά άγνωστες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το εν λόγω υλικό είναι σύνθετο και επομένως οι ιδιότητες του εξαρτώνται από τη δομή του συγκεκριμένου δοκιμίου.

Ακόμα, το υλικό αυτό αποτελείται από ίνες. Σε υλικά όπως αυτό, οι ιδιότητες δίνονται σε σχέση με τους άξονες του υλικού. Από τους άξονες του υλικού στο επίπεδο, ο ένας είναι παράλληλος με τις ίνες και ο άλλος κάθετος σε αυτές. Επομένως, ο προσανατολισμός των ινών αυτών μπορεί να αλλάξει τη διεύθυνση στην οποία εμφανίζονται οι ιδιότητες του υλικού. Το Σχήμα 4-2 είναι μέρος του φύλλου του κατασκευαστή και δίνει σχηματικά τις διαστάσεις του δοκιμίου.

##### Clamping the P-876KEHD Plate

- Chamfer the ends of the clamping bar which point to the plate to avoid a notch effect, see figure below.
- Clamp the plate at the short end as near as possible to the DuraAct patch transducer, see figure below.
  - Clamping depth: minimum 10 mm
  - Clamping width: 35 mm (i.e. clamping over the complete width of the plate)

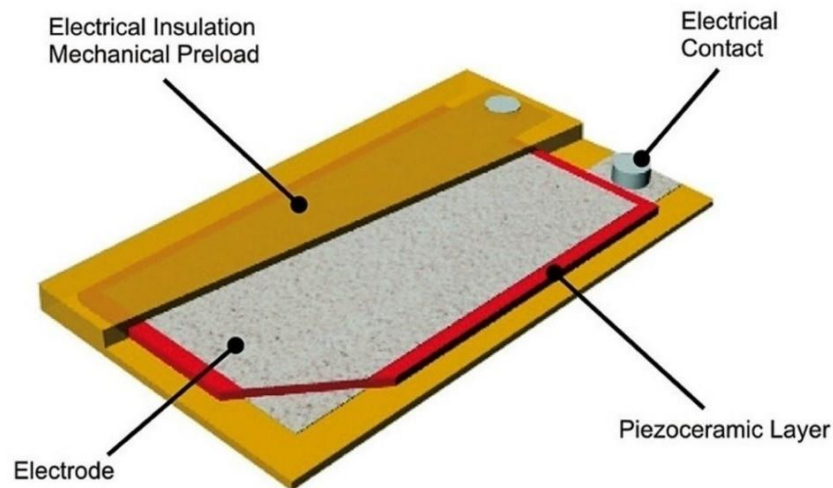


Σχήμα 4-2. Διαστάσεις δοκιμίου από την PI.

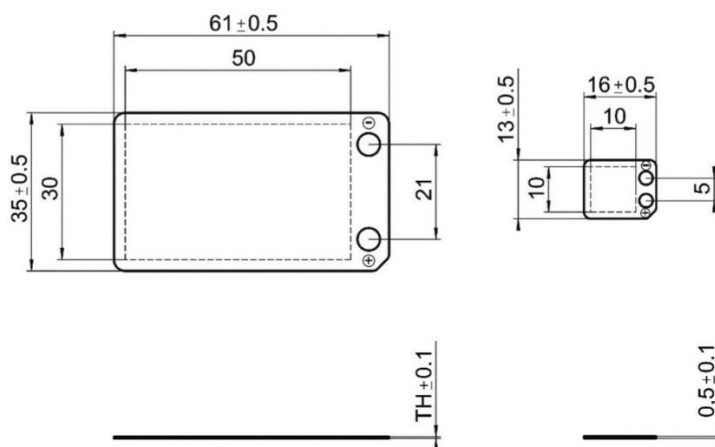


#### 4.2.2 Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI

Το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI είναι ίσως το βασικότερο από τα εξαρτήματα της πειραματικής διάταξης, αφού αυτό μετατρέπει την ενέργεια παραμόρφωσης του δοκιμίου σε αποθηκεύσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Το πιεζοηλεκτρικό συνοδεύεται από το αντίστοιχο φύλλο του κατασκευαστή, στο οποίο αναφέρονται οι διαστάσεις του και το υλικό του, καθώς και πληροφορίες που οριοθετούν το εύρος συνθηκών εργασίας του. Το συγκεκριμένο πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) είναι κατασκευασμένο από πιεζοκεραμικό υλικό PIC-255, το οποίο περιβάλλεται από ένα πλαστικό περίβλημα με μηχανική προένταση, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4-3. Η σύνθετη αυτή δομή του επιθέματος, του προσδίδει μεγαλύτερη ευλυγισία και ευρωστία. Οι διαστάσεις του πιεζοκεραμικού υλικού είναι 50mm X 30mm X 0.2mm (Σχήμα 4-4). Πληροφορίες που αφορούν τις μηχανικές, διηλεκτρικές και πιεζοηλεκτρικές ιδιότητες του υλικού PIC-255 είναι διαθέσιμες στο διαδίκτυο από την κατασκευάστρια εταιρεία και δόθηκαν στον Πίνακα 3-1.



Σχήμα 4-3. Δομή πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.



Σχήμα 4-4. Διαστάσεις πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πιεζοκεραμικού υλικού.

### 4.2.3 Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) E-821.00 της PI

Η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI (Σχήμα 4-5) είναι ένα ηλεκτρονικό κύκλωμα που αποθηκεύει προσωρινά την ενέργεια που δέχεται από ηλεκτρικά σήματα τυχαίας μορφής και αναπαράγει μέρος αυτής με τη μορφή παλμών σταθερής τάσης. Οι παλμοί σταθερής τάσης διευκολύνουν την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάποια μπαταρία, που θα συνδεθεί με το ηλεκτρονικό αυτό κύκλωμα. Το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 αποτελείται από έναν ανορθωτή, έναν πυκνωτή όπου αποθηκεύεται σε πρώτη φάση η ηλεκτρική ενέργεια που εισέρχεται και ένα υποκύκλωμα που αποδίδει την ενέργεια αυτή με τη μορφή παλμών. Η ύπαρξη του ανορθωτή επιτρέπει στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας να δέχεται ως είσοδο τόσο σήματα συνεχούς όσο και σήματα εναλλασσόμενης τάσης. Ο παλμός εξόδου όπως προαναφέρθηκε είναι σταθερής τάσης, η τιμή της οποίας μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη μεταξύ των τιμών 1.8 V, 3.3 V και 5.5 V. Ο πυκνωτής όπου αποθηκεύεται προσωρινά η εισερχόμενη ηλεκτρική ενέργεια διαθέτει χωρητικότητα της τάξης των 200μF. Η ενέργεια που αποδίδεται με κάθε παλμό που εξέρχεται από την πλακέτα είναι 8.7 mJ, σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Πέρα από τον παλμό της εξόδου (ονομάζεται  $V_{out}$ ), ο χρήστης μπορεί να λαμβάνει και ένα επιπρόσθετο σήμα, το οποίο τον ενημερώνει πότε το κύκλωμα είναι έτοιμο να αποδώσει ενέργεια και πότε όχι. Το σήμα αυτό ονομάζεται ready. Ακόμα, δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη να χρησιμοποιεί την ανορθωμένη τάση που αποθηκεύεται στον πυκνωτή με την προϋπόθεση ότι το φορτίο που χρησιμοποιεί συνδέεται και αποσυνδέεται με χρήση του σήματος ready. Η δυνατότητα αυτή μπορεί να φανεί χρήσιμη σε εφαρμογές όπου η επιθυμητή τάση εξόδου ξεπερνά τις προεπιλεγμένες από τον κατασκευαστή τιμές. Το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται, επιπλέον, και από άλλα ηλεκτρονικά στοιχεία, η λειτουργία των οποίων έχει περιγραφεί εκτενώς στις Παραγράφους 3.4.1 έως 3.4.6 όταν και παρουσιάστηκε το σχετικό μοντέλο. Ένα αρχικό δομικό διάγραμμα δίνεται από τον κατασκευαστή και φαίνεται στο Σχήμα 3-8.



Σχήμα 4-5. Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας E-821.00 της PI.

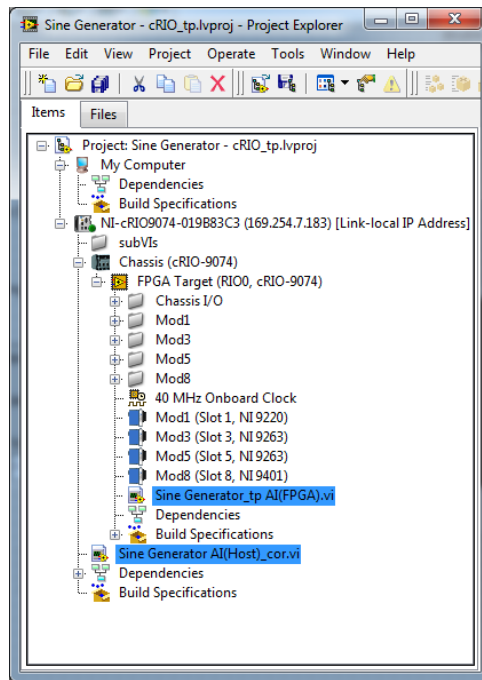
#### 4.2.4 LabVIEW και C-RIO από την NI

Το LabVIEW είναι ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού που συναντάται ευρέως σε μηχανολογικές και άλλου είδους εφαρμογές. Το LabVIEW είναι ιδιαίτερα φιλικό προς το χρήστη και η National Instruments παρέχει υπηρεσίες υποστήριξης στους χρήστες καθώς και πολλά έτοιμα προγράμματα για εκπαιδευτικούς σκοπούς, τα οποία όμως φαίνονται συχνά πολύ χρήσιμα στην πράξη. Ένα πρόγραμμα γραμμένο στη LabVIEW ονομάζεται VI (Virtual Instrument) και αποτελείται από δύο τμήματα το Front Panel και το Block Diagram. Το Front Panel περιλαμβάνει τις εισόδους και τις εξόδους του προγράμματος ενώ το Block Diagram περιλαμβάνει τον κώδικα του προγράμματος ο οποίος είναι γραμμένος σε μορφή δομικού διαγράμματος. Αν δύο ή περισσότερα Vis πρέπει να συνεργαστούν μεταξύ τους σε μία εφαρμογή, τότε αυτά οργανώνονται σε ομάδες που ονομάζονται projects.

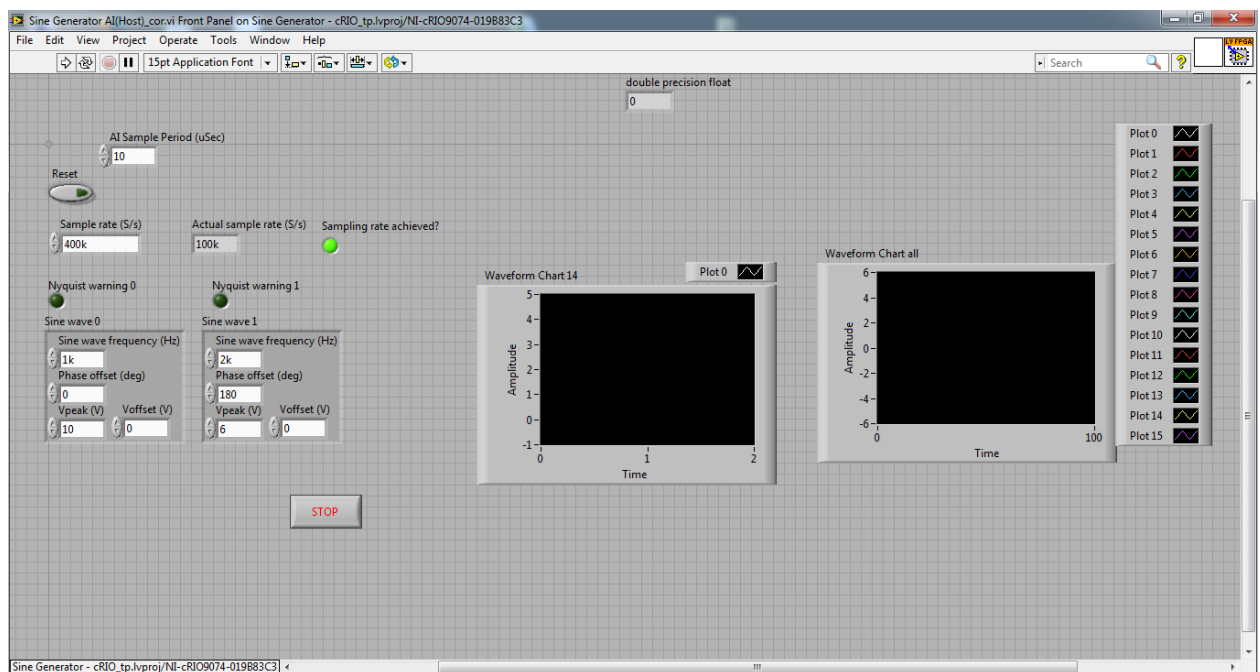
Το C-RIO είναι ολοκληρωμένη πλατφόρμα με επεξεργαστή και ανεξάρτητη μνήμη, στην οποία τοποθετούνται κάρτες συλλογής δεδομένων (Data Acquisition Boards) και εξαγωγής σημάτων διέγερσης (output) σε αναλογική ή ψηφιακή μορφή, επικοινωνεί με το LabVIEW, και είναι κατασκευασμένο από την ίδια εταιρεία. Το C-RIO στη συγκεκριμένη εφαρμογή δίνει τη δυνατότητα ένα project να διεκπεραιώνεται σε επίπεδο hardware, με αποτέλεσμα η εκτέλεση του να υλοποιείται με μεγαλύτερη ταχύτητα, στοιχείο ιδιαίτερα χρήσιμο για εφαρμογές κρούσης.

Όταν μια εφαρμογή υλοποιείται σε επίπεδο hardware, τότε το project διαθέτει τουλάχιστον δύο VIs. Το ένα εκ των δύο λαμβάνει το χαρακτηρισμό FPGA (Field Programmable Gate Array) και είναι αυτό που εργάζεται σε επίπεδο hardware, ενώ το άλλο ονομάζεται Host και τρέχει σε επίπεδο software. Το FPGA VI είναι υπεύθυνο για τη δειγματοληψία η οποία πρέπει να γίνεται όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Στο Host VI γίνεται η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν και η απόδοση εντολής από το χρήστη. Περισσότερα σχετικά με το LabVIEW και το C-RIO θα παρατεθούν στο Παράρτημα Α της εργασίας.

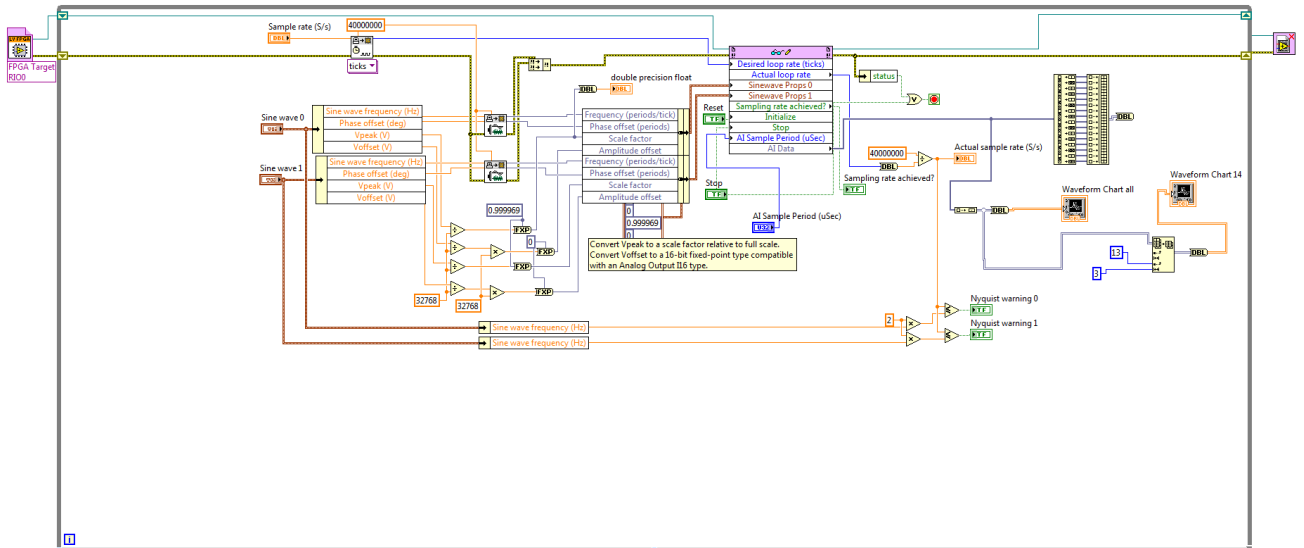
Σχετικά με τα πειράματα που θα περιγραφούν στο παρόν κεφάλαιο, η διέγερση του shaker έγινε με τη βοήθεια ενός έτοιμου project που παρείχε η NI και το οποίο ονομάζεται Sine Generator. Το συγκεκριμένο project έχει τη δυνατότητα να κατασκευάζει ημιτονοειδή σήματα τάσης σε επίπεδο hardware μέσω του C-RIO και στη συνέχεια τα αποστέλλει στον ενισχυτή του δονητή. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το πλάτος και τη συχνότητα του εξερχόμενου σήματος, καθώς και τον αριθμό των σημείων στη μονάδα του χρόνου με τον οποίο το σήμα αυτό θα δημιουργηθεί. Στο Σχήμα 4-6, το Σχήμα 4-7, το Σχήμα 4-8, το Σχήμα 4-9 και το Σχήμα 4-10 φαίνονται ο Project Explorer, το Front Panel και το Block Diagram που αντιστοιχούν σε κάθε VI του project.



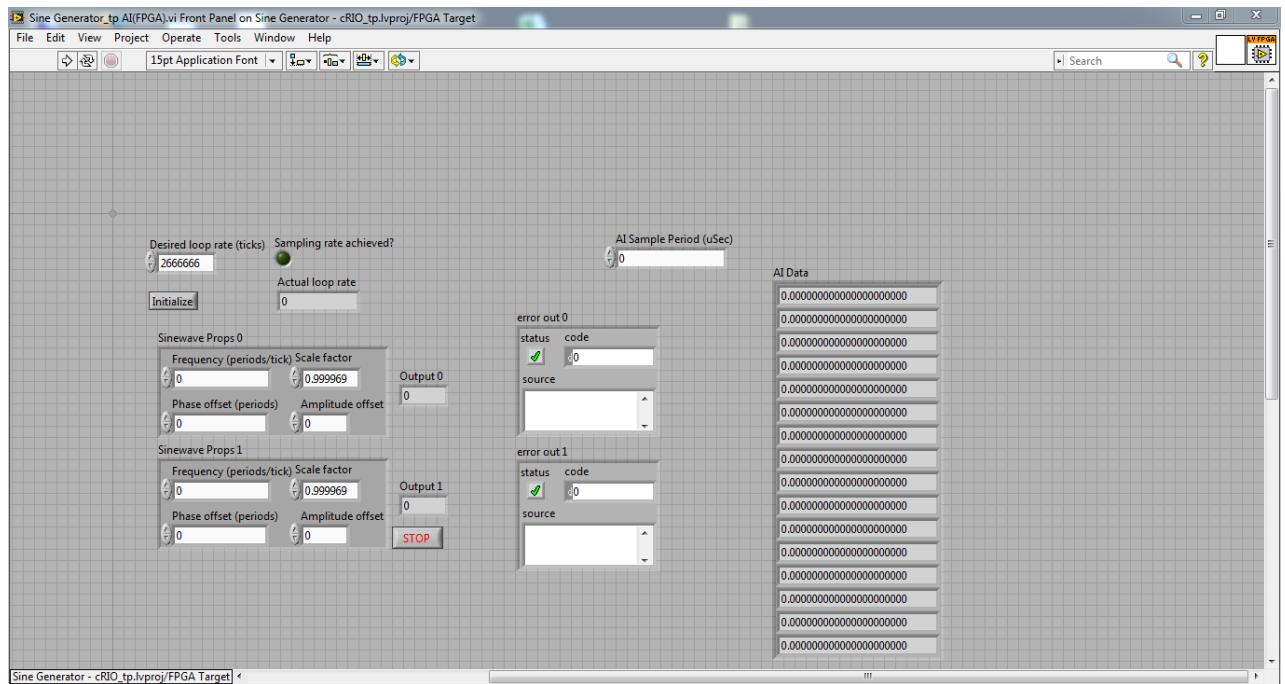
Σχήμα 4-6. Project Explorer του Sine Generator Project.



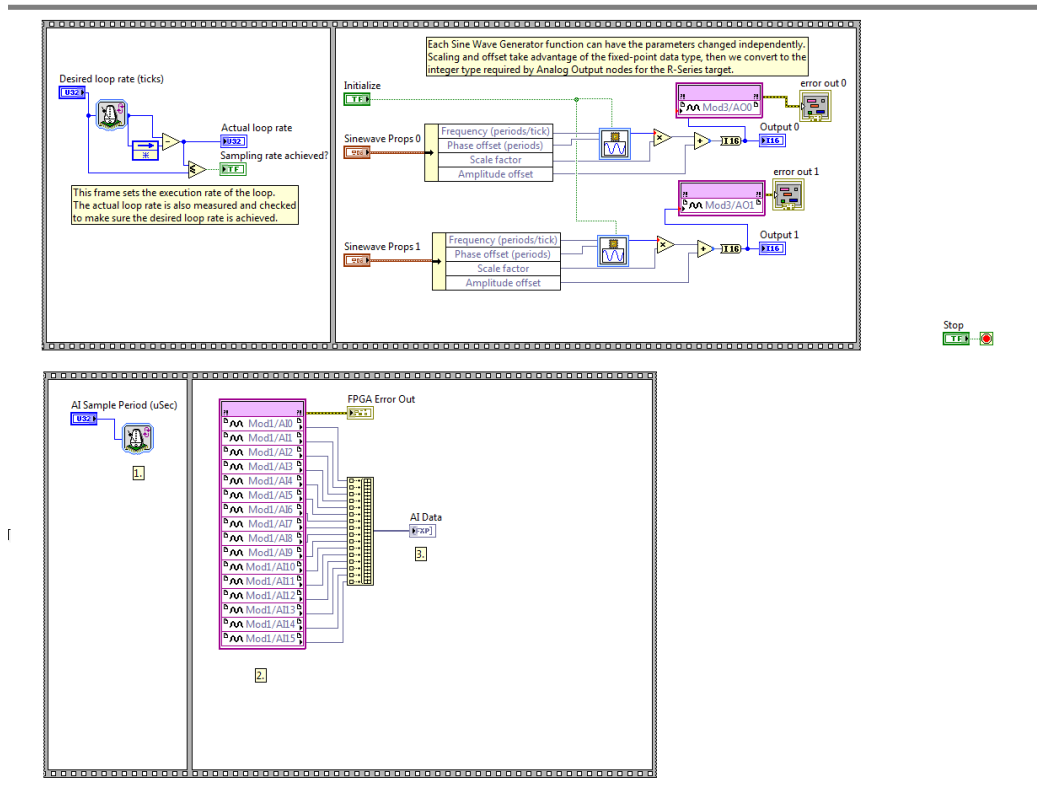
Σχήμα 4-7. Front Panel του Sine Generator Host VI.



Σχήμα 4-8. Block Diagram του Sine Generator Host VI.



Σχήμα 4-9. Front Panel του Sine Generator FPGA VI.



Σχήμα 4-10. Block Diagram του Sine Generator FPGA VI.

#### 4.2.5 Ενισχυτής 2050E05 από τη The modal shop inc.

Η λειτουργία του δονητή (shaker) ρυθμίζεται από τον υπολογιστή ο οποίος στέλνει ένα ηλεκτρικό σήμα που τον διεγείρει. Το σήμα αυτό πριν φθάσει στον δονητή (shaker) θα πρέπει πρώτα να ενισχυθεί. Το έργο εκπληρώνει στη συγκεκριμένη διάταξη ο ενισχυτής 2050E05 από τη The Modal Shop inc (Σχήμα 4-11). Ο ενισχυτής αυτός είναι σχεδιασμένος κατά κύριο λόγο για δονήσεων. Το κέρδος του ενισχυτή ρυθμίζεται αναλογικά από ένα κομβίο. Ο δονητής μπορεί να ελέγχεται είτε μέσω τάσης είτε μέσω ρεύματος. Στα πειράματα της εργασίας, ο ενισχυτής ελεγχόταν μέσω τάσης.



Σχήμα 4-11. Ενισχυτής 2050E05 από τη The Modal Shop inc.

#### 4.2.6 Δονητής (Shaker) MB Modal 110 από την MB Dynamics

Ο δονητής MB Modal 110 (Σχήμα 4-12) χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα που διενεργήθηκαν για να επιβάλει ένα συνεχόμενο ημιτονοειδές χρονικά φορτίο στο δοκίμιο στα πλαίσια της μέλετης της απόκρισης σε εξαναγκασμένη ταλάντωση. Ο δονητής αυτός μπορεί να εφαρμόσει ημιτονοειδείς δυνάμεις με πλάτος μέχρι και 250 N (RMS) σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Στη συγκεκριμένη εφαρμογή, τα φορτία που επέβαλε ήταν της τάξης των 2.5N, ενώ η συχνότητα τους ήταν 10Hz. Για να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη δύναμη στο δοκίμιο, στο δονητή συνδέθηκε μία ακτίνα ποδηλάτου (stinger). Ανάμεσα στο δοκίμιο και την ακτίνα (stinger) υπήρχε αισθητήρας δύναμης για να μετράται η δύναμη που εφαρμόζεται.



Σχήμα 4-12. Shaker MB Modal 110.

#### 4.2.7 Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03 και conditioner PCB 482A16

Ο αισθητήρας PCB 208C03 μπορεί να μετρήσει δυνάμεις μέχρι και 2.224 kN, έχει ανώτατο όριο συχνότητας τα 36 kHz, ενώ η ευαισθησία του ανέρχεται στα 2248 mV/kN. Ακόμα, ο αισθητήρας αυτός αποδίδει 10 mV/lb. Ο αισθητήρας φαίνεται στο Σχήμα 4-13.

Το σήμα που παρέχεται από τον αισθητήρα διέρχεται πρώτα από ενισχυτή και φίλτρο (conditioner PCB 482A16) (Σχήμα 4-14) και ενισχύεται 100 φορές πριν εισέλθει στον παλμογράφο όπου και γίνεται η καταγραφή της μέτρησης. Ο ενισχυτής αυτός διαθέτει 4 κανάλια και παρέχει την επιλογή ανάμεσα σε τρεις συντελεστές ενίσχυσης, οι οποίοι είναι x1, x10 ή x100.



Σχήμα 4-13. Αισθητήρας δύναμης PCB 208C03.

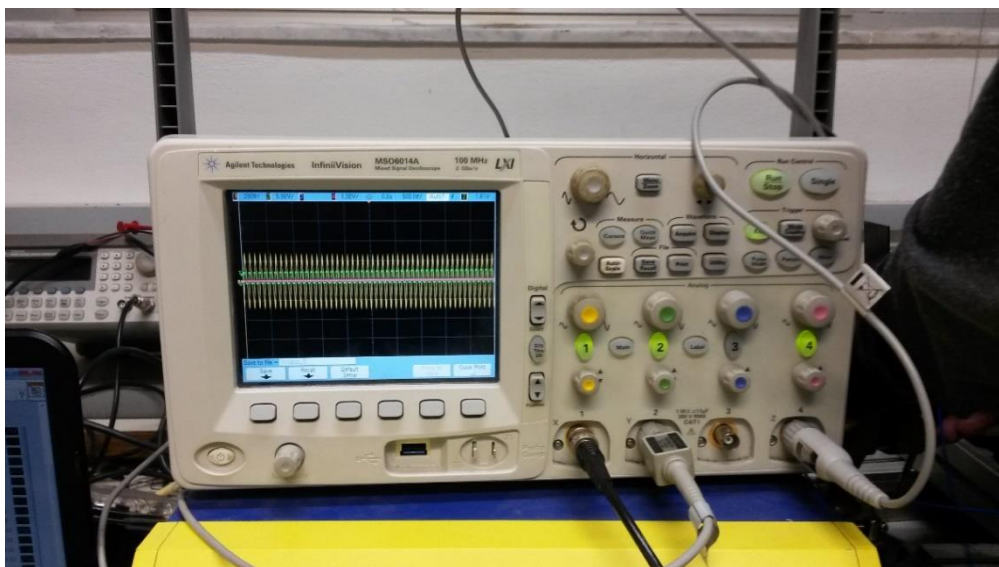




Σχήμα 4-14. Ενισχτής (Conditioner) PCB 482A16.

#### 4.2.8 Παλμογράφος MS06014A από την Agilent Technologies

Στα πειράματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω, ήταν απαραίτητη η μέτρηση διαφόρων σημάτων τάσης. Οι μετρήσεις των σημάτων αυτών έγιναν με τη βοήθεια του παλμογράφου MS06014A από την Agilent Technologies ο οποίος φαίνεται στο Σχήμα 4-15. Ο παλμογράφος διαθέτει τέσσερα κανάλια μέσω των οποίων μπορεί να δεχτεί τα προς μέτρηση σήματα. Ακόμα, σύμφωνα με τα στοιχεία που παρέχει η κατασκευάστρια εταιρεία, ο παλμογράφος έχει βάθος μνήμης 8 Mpts, μέγιστο ρυθμό δειγματοληψίας 2 GSa/s και εύρος συχνοτήτων 100 MHz. Ο συγκεκριμένος παλμογράφος δίνει πολλές δυνατότητες στο χρήστη, όπως η ρύθμιση της δειγματοληψίας αλλά και η αποθήκευση των στοιχείων της οθόνης σε flash drive.



Σχήμα 4-15. Παλμογράφος MS06014A από την Agilent Technologies.



### 4.3 Περιγραφή Λειτουργίας Διάταξης

Η λειτουργία της παραπάνω πειραματικής διάταξης βασίζεται στο συντονισμό του εξοπλισμού που περιγράφηκε παραπάνω. Το πείραμα ξεκινάει όταν μέσω του Sine Generator project δίνεται η εντολή για τη δημιουργία του ημιτονοειδούς ηλεκτρικού σήματος που θα διεγείρει το δονητή (shaker). Στα πειράματα που διεξήχθησαν, επιλέχθηκε πλάτος ηλεκτρικού σήματος 1V, συχνότητα 10Hz και αριθμός σημείων 100kSamples/s. Το σήμα αυτό στη συνέχεια ενισχύεται από τον ενισχυτή 2050E05 και στη συνέχεια εισέρχεται στο δονητή. Ο δονητής προκαλεί την ταλάντωση της ακτίνας του ποδηλάτου (stinger), η οποία στην άκρη της φέρει τον αισθητήρα δύναμης. Ο αισθητήρας δύναμης είναι κολλημένος με κυανοακρυλική κόλλα πάνω στο ελεύθερο άκρο του (Σχήμα 4-1) που ταλαντώνεται σύμφωνα με το φορτίο που ασκεί ο δονητής. Το άλλο άκρο του δοκιμίου είναι πακτωμένο με τη βοήθεια μιας μέγγενης. Από την ταλάντωση προκύπτει η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, η οποία μετράται με τη βοήθεια του παλμογράφου. Ταυτόχρονα, στον παλμογράφο, μετράται και η δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου χάρη στον αισθητήρα δύναμης και τον αντίστοιχο ενισχυτή (conditioner) ο οποίος ενισχύει το σήμα του αισθητήρα.

### 4.4 Περιγραφή πειραμάτων

Στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκαν δύο διαφορετικά πειράματα. Το ένα πείραμα είναι η ημιτονοειδής φόρτιση του δοκιμίου που φέρει το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα αλλά με το επίθεμα να μην είναι συνδεδεμένο στο ηλεκτρονικό κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Στο δεύτερο πείραμα, εξετάζεται η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επίθεμα στην ίδια φόρτιση αλλά με το επίθεμα να είναι συνδεδεμένο στην πλακέτα. Ο λόγος για τον οποίο υπάρχει η ανάγκη να γίνουν δύο διαφορετικά πειράματα, είναι ότι στην πράξη η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού μεταβάλλεται σημαντικά όταν αυτό πρέπει να τροφοδοτήσει κάποιο φορτίο. Παρακάτω θα παρουσιαστούν οι αποκρίσεις του πιεζοηλεκτρικού στις δύο αυτές περιπτώσεις.

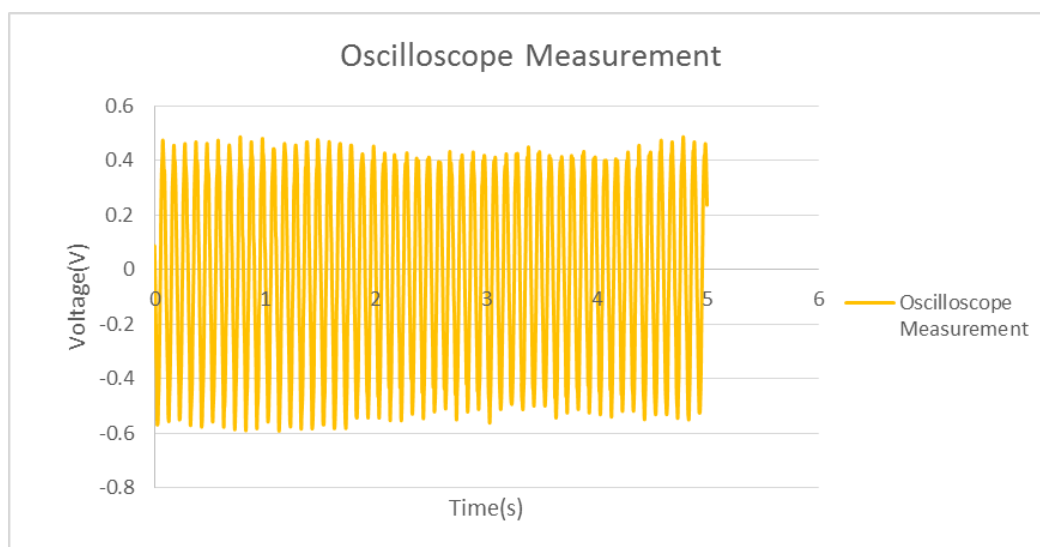
#### 4.4.1 Απόκριση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος χωρίς το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας

Στο συγκεκριμένο πείραμα, το ζητούμενο είναι η τάση που προκύπτει στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος για ένα δεδομένο μηχανικό φορτίο. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί η αξιοπιστία της μοντελοποίησης που αναλύεται στο Κεφάλαιο 3, το πείραμα επαναλήφθηκε 3 φορές. Όλες τις φορές το φορτίο είχε ημιτονοειδή μορφή με συχνότητα 10Hz. Το μέγεθος που μεταβαλλόταν σε κάθε πείραμα ήταν το πλάτος της δύναμης που ασκείται στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου. Το πλάτος της δύναμης μετριέται με τη βοήθεια του παλμογράφου στον οποίον εισέρχεται το σήμα του αισθητήρα δύναμης αφού αυτό ενισχυθεί στον αντίστοιχο ενισχυτή (conditioner). Έτσι η μέτρηση της δύναμης γίνεται έμμεσα με τη μέτρηση της τάσης στα άκρα του αισθητήρα που απεικονίζεται στον παλμογράφο. Για να προκύψει η τιμή της δύναμης που αντιστοιχεί στην τάση που

αναγράφεται στον παλμογράφο, ακολουθούνται τα εξής βήματα. Πρώτα, η τιμή της τάσης που μετράται (Σχήμα 4-16) διαιρείται με το συντελεστή ενίσχυσης του conditioner, ώστε να βρεθεί η πραγματική τάση που αποδίδει ο αισθητήρας (Σχήμα 4-17). Στη συνέχεια, ο κατασκευαστής δίνει το λόγο της τάσης του αισθητήρα σε mV ως προς τη δύναμη που αντιστοιχεί σε lb. Έτσι, υπολογίζεται η δύναμη που ασκείται στο δοκίμιο σε lb (Σχήμα 4-18), η οποία μετατρέπεται, τελικά, σε N (Σχήμα 4-19). Ο conditioner στα πειράματα που έγιναν, επιλέχθηκε να μεγεθύνει το σήμα του αισθητήρα 100 φορές. Ο λόγος μετατροπής της τάσης του αισθητήρα σε δύναμη είναι 10mV/lb. Με βάση τα παραπάνω παρατίθενται τα αποτελέσματα των τριών επαναλήψεων του πειράματος.

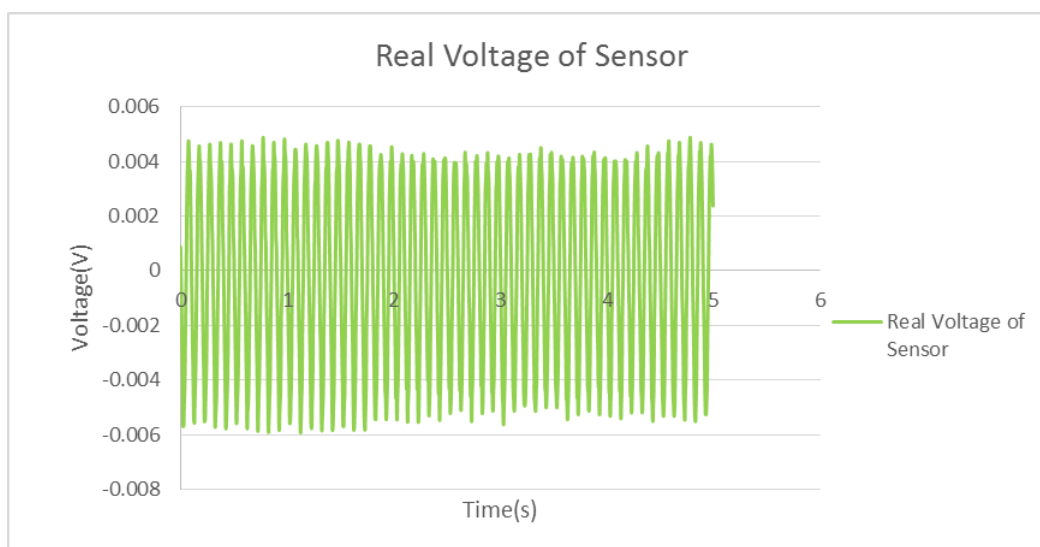
### 1<sup>η</sup> επανάληψη:

Η τάση που μετρήθηκε στον παλμογράφο είναι:



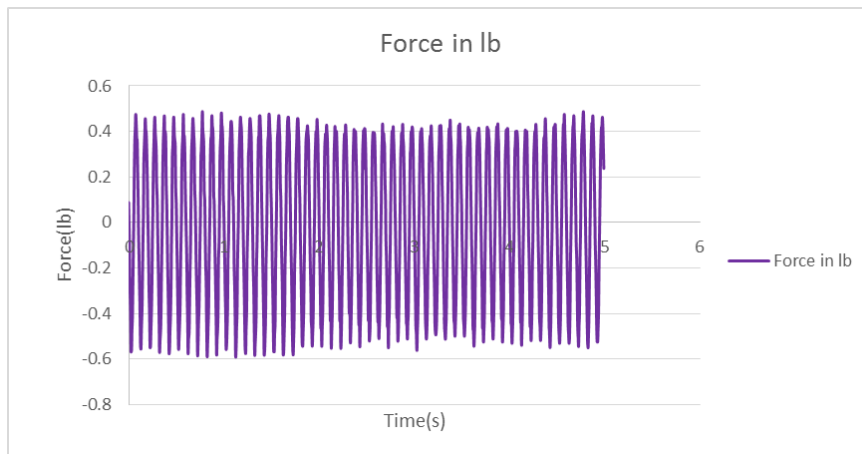
**Σχήμα 4-16. Μέτρηση δύναμης στον παλμογράφο σε V.**

Επομένως, η πραγματική τάση του αισθητήρα είναι:



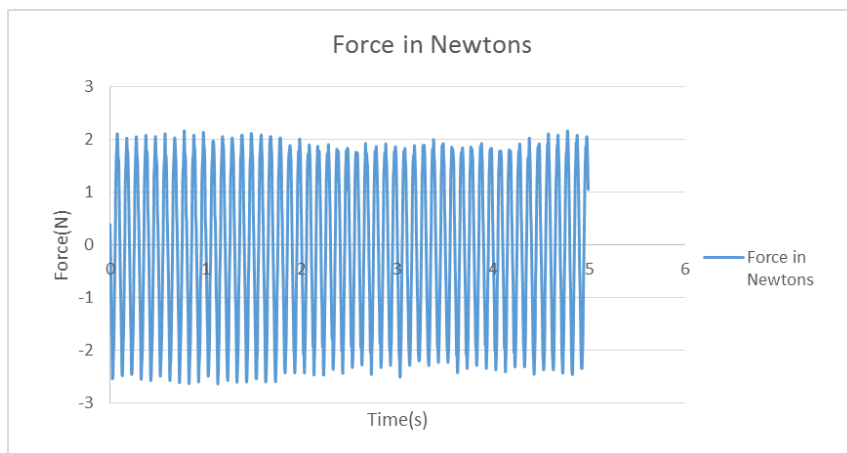
**Σχήμα 4-17. Πραγματική μέτρηση αισθητήρα.**

Με το λόγο μετατροπής που δίνει ο κατασκευαστής, η τάση αυτή αντιστοιχεί σε δύναμη:



**Σχήμα 4-18. Μέτρηση δύναμης σε lb.**

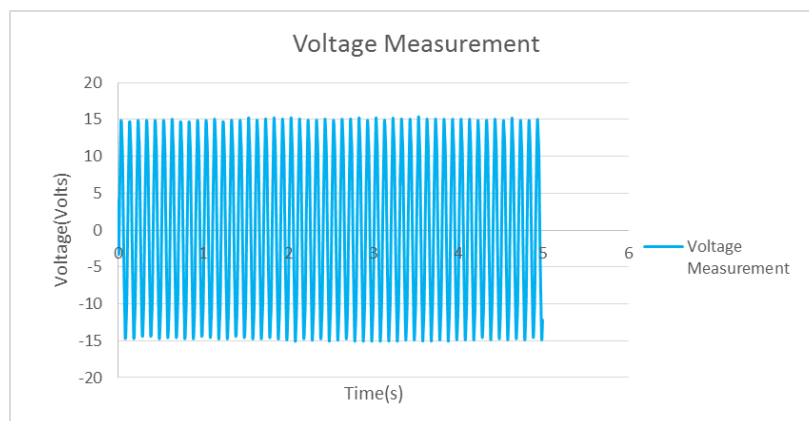
Μετά τη μετατροπή της δύναμης από lb σε N, έχουμε:



**Σχήμα 4-19. Μέτρηση δύναμης σε N (1<sup>η</sup> επανάληψη).**

Τελικά, η δύναμη που εφαρμόστηκε στη συγκεκριμένη επανάληψη του πειράματος είναι ημιτονοειδής με πλάτος 2.25N και συχνότητα 10Hz.

Η δύναμη που εφαρμόστηκε σε αυτή την επανάληψη είχε ως αποτέλεσμα την απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος που φαίνεται στο Σχήμα 4-20.

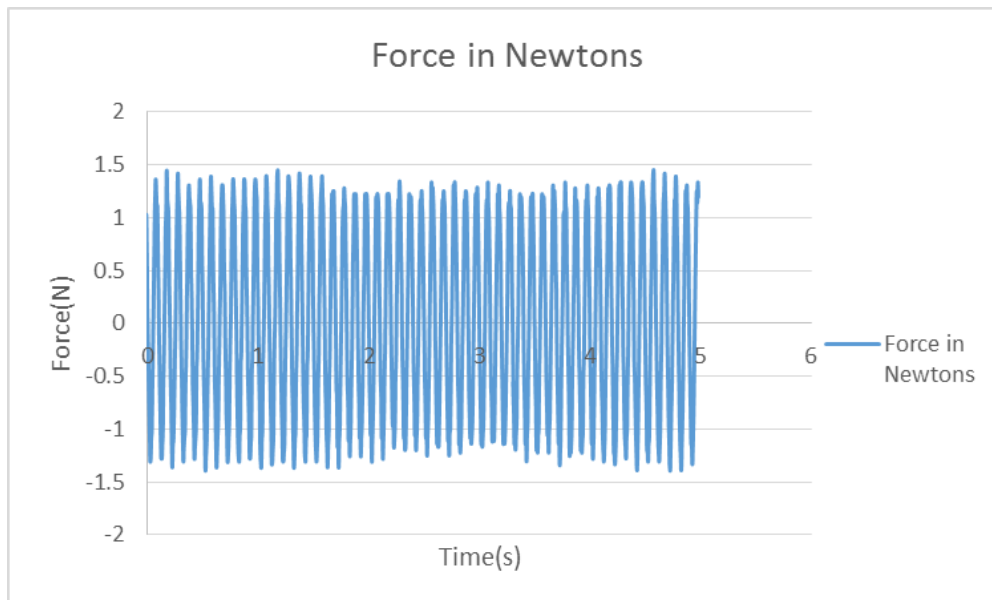


**Σχήμα 4-20. Μέτρηση δυναμικού (1<sup>η</sup> επανάληψη).**

Παρατηρούμε ότι η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού είναι επίσης ημιτονοειδής με την ίδια συχνότητα και πλάτος 14.73V.

### 2<sup>η</sup> επανάληψη:

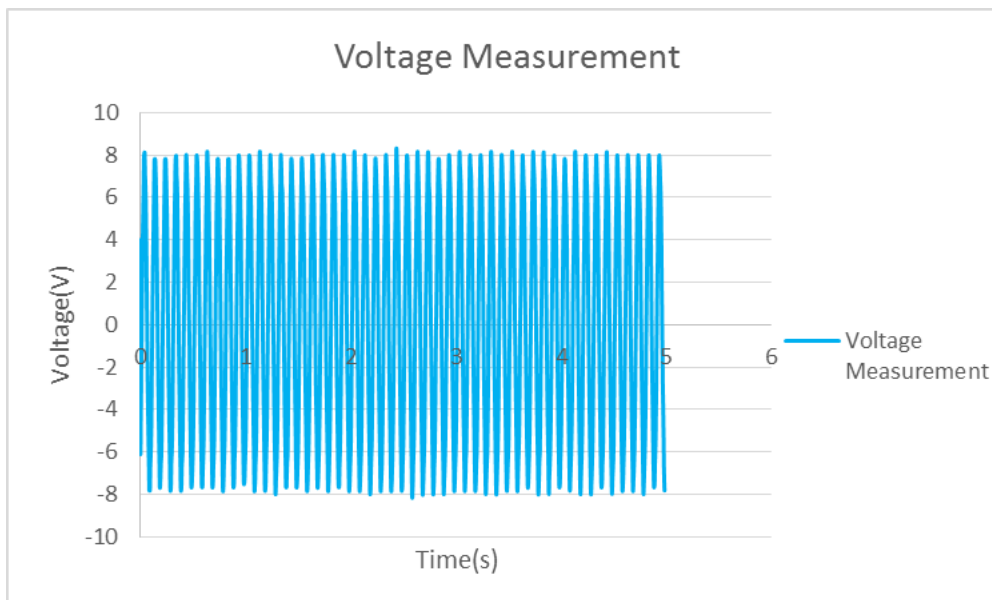
Ακολουθώντας τα ίδια βήματα η δύναμη στη 2<sup>η</sup> επανάληψη, σύμφωνα με το Σχήμα 4-21, είναι:



### **Σχήμα 4-21. Μετρηση δύναμης σε N (2<sup>η</sup> επανάληψη).**

Αυτή τη φορά η δύναμη έχει πλάτος 1.32N και συχνότητα 10Hz.

Η απόκριση που προκαλείται από αυτήν τη δύναμη παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-22.

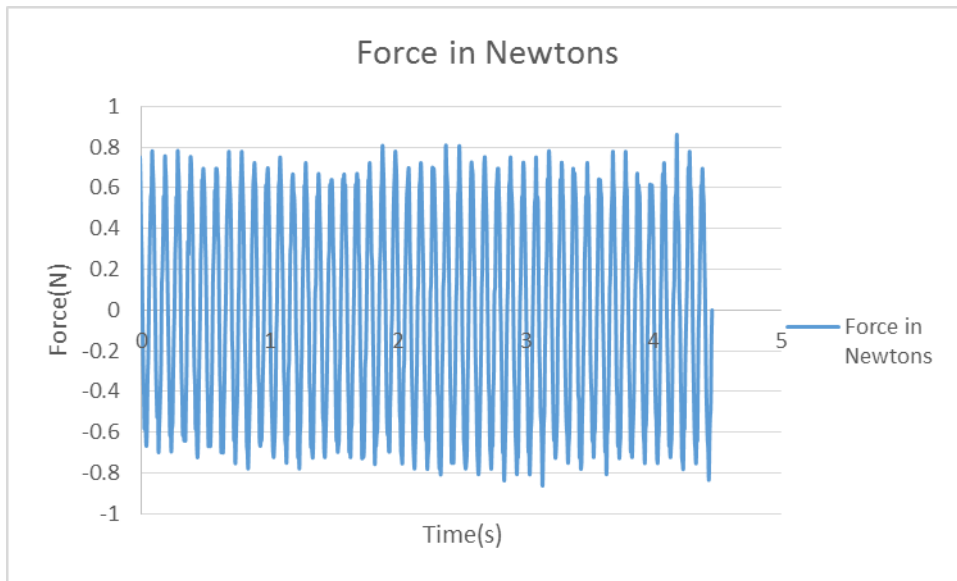


### **Σχήμα 4-22. Μέτρηση δυναμικού (2<sup>η</sup> επανάληψη).**

Παρατηρούμε ότι η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού είναι επίσης ημιτονοειδής με την ίδια συχνότητα και πλάτος 7.85V.

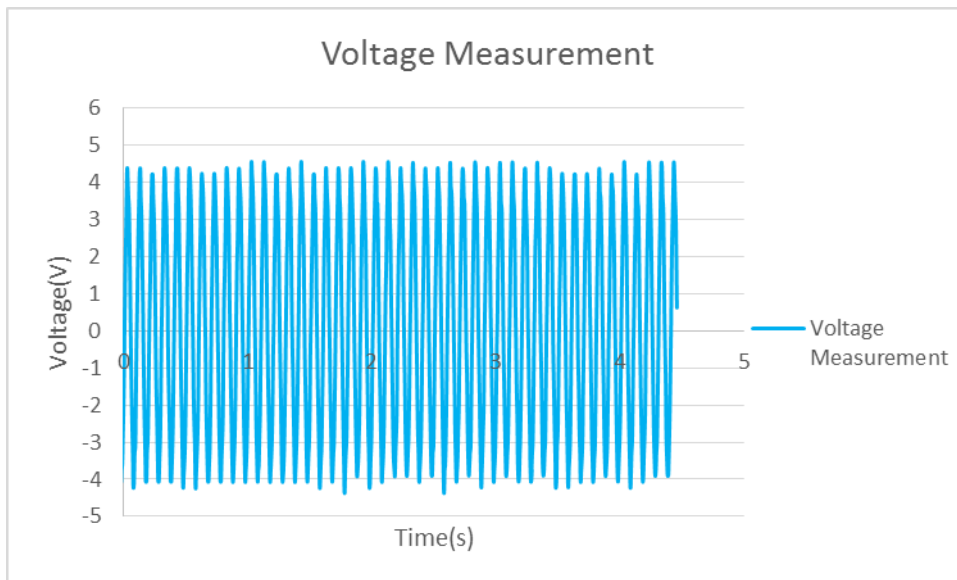
### 3<sup>η</sup> επανάληψη:

Ακολουθώντας τα ίδια βήματα η δύναμη στην 3<sup>η</sup> επανάληψη, σύμφωνα με το Σχήμα 4-23, είναι:



**Σχήμα 4-23. Μετρηση δύναμης σε Newton (3<sup>η</sup> επανάληψη).**

Αυτή τη φορά η δύναμη είναι ημιτονοειδής με συχνότητα 10Hz και πλάτος 0.67N. Η απόκριση που προκαλείται από αυτήν τη δύναμη φαίνεται στο Σχήμα 4-24.

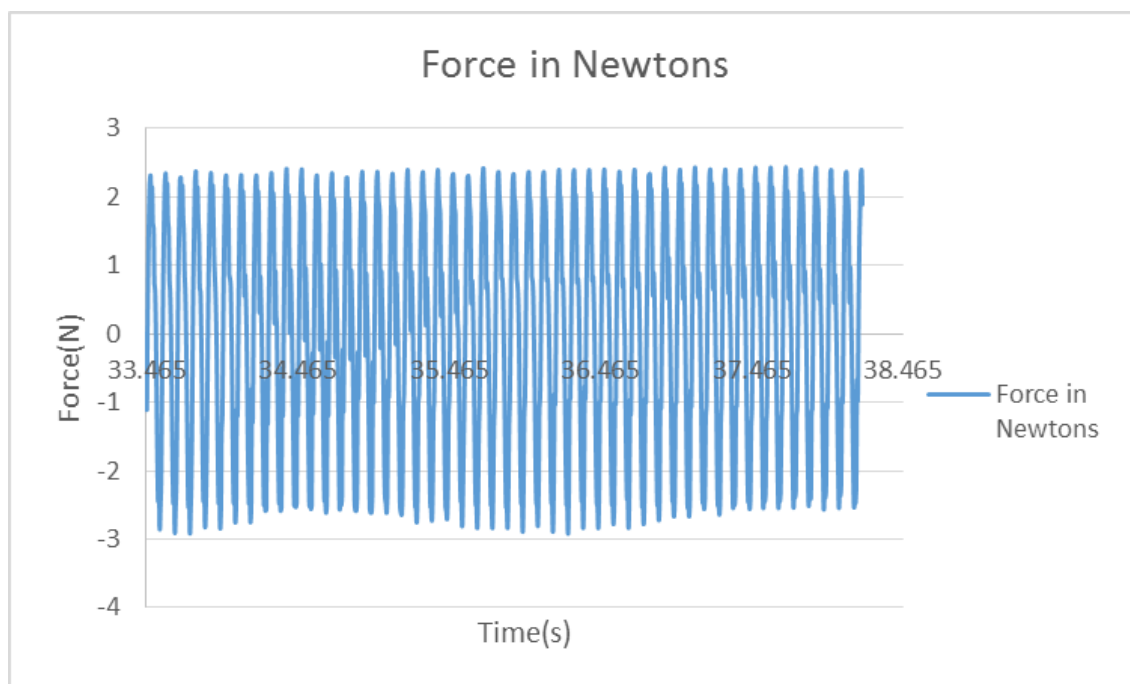


**Σχήμα 4-24. Μέτρηση δυναμικού (3<sup>η</sup> επανάληψη).**

Παρατηρούμε ότι η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού είναι επίσης ημιτονοειδής με την ίδια συχνότητα και πλάτος 4.75V .

#### 4.4.2 Απόκριση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας

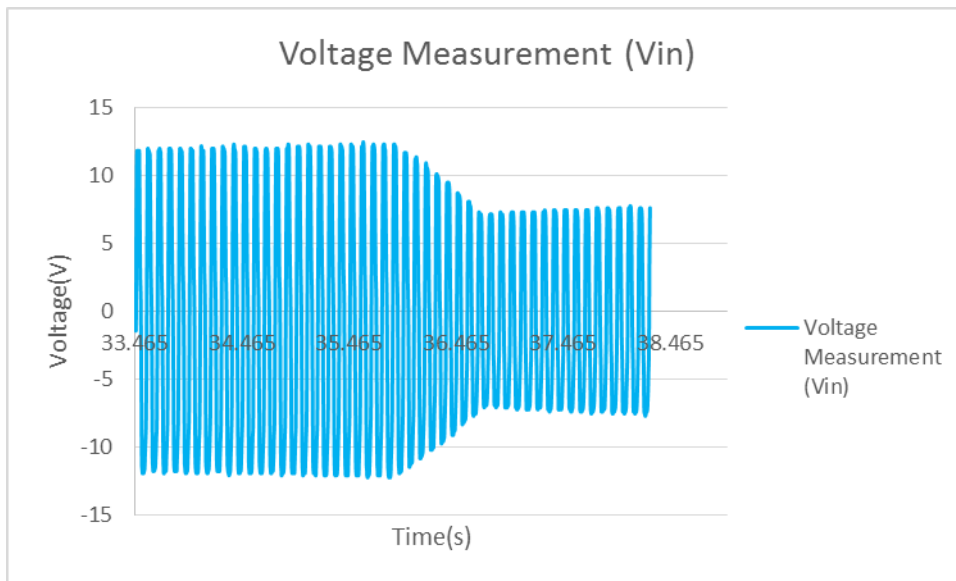
Σε αυτή την παράγραφο θα παρουσιαστεί η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όταν αυτό συνδέεται με την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και ενώ δέχεται ημιτονοειδή φόρτιση. Σύμφωνα με αυτά που αναφέρθηκαν στην περιγραφή του κυκλώματος, σε αυτό υπάρχει ένας πυκνωτής στον οποίο αποθηκεύεται προσωρινά η ενέργεια που εισέρχεται. Η ενέργεια που συσσωρεύεται στον πυκνωτή αρχίζει να αποδίδεται στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας όταν η τάση του πυκνωτή φτάσει ένα ανώτατο όριο. Στόχος του πειράματος είναι να δούμε ποια είναι η τάση αυτή αλλά και σε πόσο χρόνο αυτή επιτυγχάνεται για ένα δεδομένο μηχανικό φορτίο. Το συγκεκριμένο πείραμα έγινε μία φορά και το μηχανικό φορτίο μετρήθηκε με τον ίδιο τρόπο που αναλύθηκε στην Παράγραφο 4.4.1. Έτσι, η δύναμη που ασκήθηκε στο συγκεκριμένο πείραμα φαίνεται στο Σχήμα 4-25.



**Σχήμα 4-25. Μετρηση δύναμης σε Newton (σύνδεση με πλακέτα).**

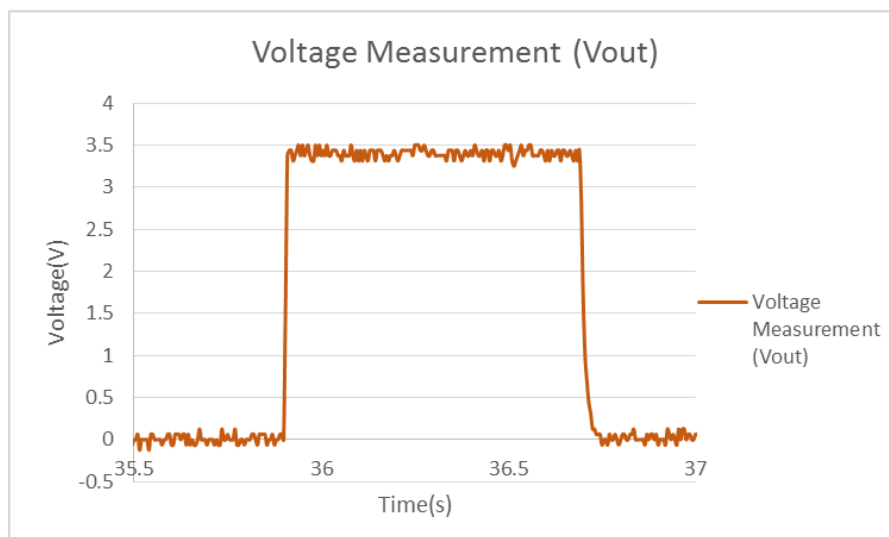
Η δύναμη που ασκήθηκε πάνω στο δοκίμιο σε αυτό το πείραμα ήταν ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 10Hz και πλάτος 2.50N.

Η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος διαφέρει σημαντικά σε σχέση με την απόκριση που είδαμε στην Παράγραφο 4.4.1. Στο Σχήμα 4-26 φαίνεται ένα τμήμα της απόκρισης, αφού ο παλμογράφος δεν ήταν δυνατόν να αποθηκεύσει όλα τα δεδομένα του πειράματος λόγω της αυξημένης διάρκειάς του. Υπενθυμίζεται ότι η απόκριση του επιθέματος αποτελεί ταυτόχρονα και την τάση εισόδου στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, αφού αυτά είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους.



**Σχήμα 4-26. Μέτρηση τάσης εισόδου (σύνδεση με πλακέτα).**

Παρατηρούμε ότι η απόκριση αυτήν τη φορά δεν είναι ημιτονοειδής. Στην πραγματικότητα, η απόκριση είναι περιοδική με συχνότητα και πάλι τα 10Hz αλλά το πλάτος της είναι διαρκώς αυξανόμενο μέχρι η τάση να φτάσει την τιμή 12V. Τότε, το κύκλωμα εκκινεί την απόδοση ενέργειας στην έξοδό του και ο πυκνωτής προσωρινά αποφορτίζεται μέχρι η τάση στην είσοδο της πλακέτας να φθάσει τα 7V. Παράλληλα με την τάση εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας καταγράφηκε και η τάση εξόδου. Αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 4-27.



**Σχήμα 4-27. Μέτρηση τάσης εξόδου (σύνδεση με πλακέτα).**

Η έξοδος όπως ήταν αναμενόμενο είναι ένας τετραγωνικός παλμός με πλάτος τα 3.3V. Ο χρόνος στον οποίο εμφανίζεται ο πρώτος παλμός εξόδου είναι τα 35.9 s. Ο χρόνος αυτός είναι σημαντικός, καθώς η σωστή πρόβλεψη του από το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο Κεφάλαιο 3, επιβεβαιώνει και την ορθότητα της μοντελοποίησης που έχει προηγηθεί.

## 5 Παραγωγή ενέργειας από κρούση

### 5.1 Εισαγωγή

Στα προηγούμενα κεφάλαια, ολοκληρώθηκε η παρουσίαση των μοντέλων και των πειραμάτων που σχετίζονται με την ενέργεια που αποθηκεύεται μέσω του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας, όταν το δοκίμιο υφίσταται εξαναγκασμένη αρμονική ταλάντωση. Το ερώτημα που προκύπτει πλέον, είναι αν το σύστημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτούσιο για την εκμετάλλευση της ενέργειας που παράγεται κατά τη διάρκεια μιας κρούσης. Επίσης, αν αυτό δεν καταστεί δυνατό, χρήσιμο θα ήταν να προταθούν εκείνες οι αλλαγές στο υπάρχον σύστημα, που θα μπορούσαν να αποδώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Αρχικά, στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για τη μελέτη της αποθήκευσης ενέργειας μέσω κρούσης. Ακόμα, παρουσιάζεται η διαδικασία που ακολουθήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων καθώς και οι μετρήσεις που προέκυψαν από αυτά. Με βάση τις μετρήσεις του πειράματος, αποδεικνύεται ότι η κρούση που παρατηρήθηκε είναι δυνατόν να μελετηθεί προσεγγιστικά, χρησιμοποιώντας τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια της εργασίας.

Έπειτα, παρατίθεται η μεθοδολογία που επιστρατεύεται στα πλαίσια του κεφαλαίου αυτού, για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από την κρούση, με βάση το υπάρχον κύκλωμα αποθήκευσής της. Η υλοποίηση της συγκεκριμένης πρόβλεψης βασίζεται στα υπολογιστικά εργαλεία που έχουν ήδη δημιουργηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στην αρχή του κεφαλαίου εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο αυτά χρησιμοποιούνται.

Τα υπάρχοντα μοντέλα, ωστόσο, δεν εξυπηρετούν μόνο την ανάγκη πρόβλεψης της απόκρισης του συγκεκριμένου συστήματος. Επιπλέον, προσφέρουν τη δυνατότητα του επανασχεδιασμού του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, κατά τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να είναι λειτουργικό στις συνθήκες της κρούσης, εάν αυτό είναι δυνατό.

### 5.2 Περιγραφή διάταξης πειράματος κρούσης

Για τη μελέτη της παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας κρούσης, χρησιμοποιήθηκε διαθέσιμη φορητή πειραματική διάταξη κρούσης [8]. Σε αυτήν την εφαρμογή, η διάταξη περιελάμβανε ένα πλαίσιο στήριξης, έναν βραχίονα, έναν επικρουστήρα, έναν αισθητήρα δύναμης και ένα νέο VI στο LabVIEW. Ακόμα, χρησιμοποιήθηκαν η δοκός, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και το C-RIO του προηγούμενου πειράματος. Για μια πιο εποπτική παρουσίαση των παραπάνω εξαρτημάτων του πειράματος, παρατίθεται ο Πίνακας 5-1. Στη συνέχεια, ακολουθεί μια αναλυτικότερη περιγραφή των επίμερους τμημάτων της διάταξης.

**Πίνακας 5-1. Στοιχεία πειραματικής διάταξης κρούσης.**



A/A	Στοιχείο	Κατασκευαστής	Λειτουργία
1	Δοκίμιο από σύνθετο υλικό	PI	Πραγματοποίηση ταλάντωσης για παραγωγή ενέργειας
2	Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch P-876.A12)	PI	Μετατροπή μηχανικής ενέργειας σε ηλεκτρική
3	Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (Harvesting module E-821.00 της PI)	PI	Αποθήκευση παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
4	Πλαίσιο	Intracom	Σταθερή στήριξη δοκιμίου
5	Βραχίονας	Κατασκευασμένος στο εργαστήριο	Επιβολή κρουστικού φορτίου στο δοκίμιο
6	Αισθητήρας δύναμης και επικρουστήρας	CSL/Lika [7]	Μέτρηση ασκούμενης δύναμης και ενίσχυση μετρούμενου σήματος
7	LabVIEW VI και C-RIO	National Instruments	Καταγραφή και αποθήκευση της κρουστικής απόκρισης

### 5.2.1 Δοκίμιο από σύνθετο υλικό

Το δοκίμιο που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της κρούσης είναι το ίδιο με αυτό που περιγράφηκε στην Παράγραφο 4.2.1.

### 5.2.2 Πιεζοηλεκτρικό επίθεμα (patch) P-876.A12 της PI

Πληροφορίες για το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, το οποίο ήταν επίσης κοινό σε όλα τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, υπάρχουν στην Παράγραφο 4.2.2.

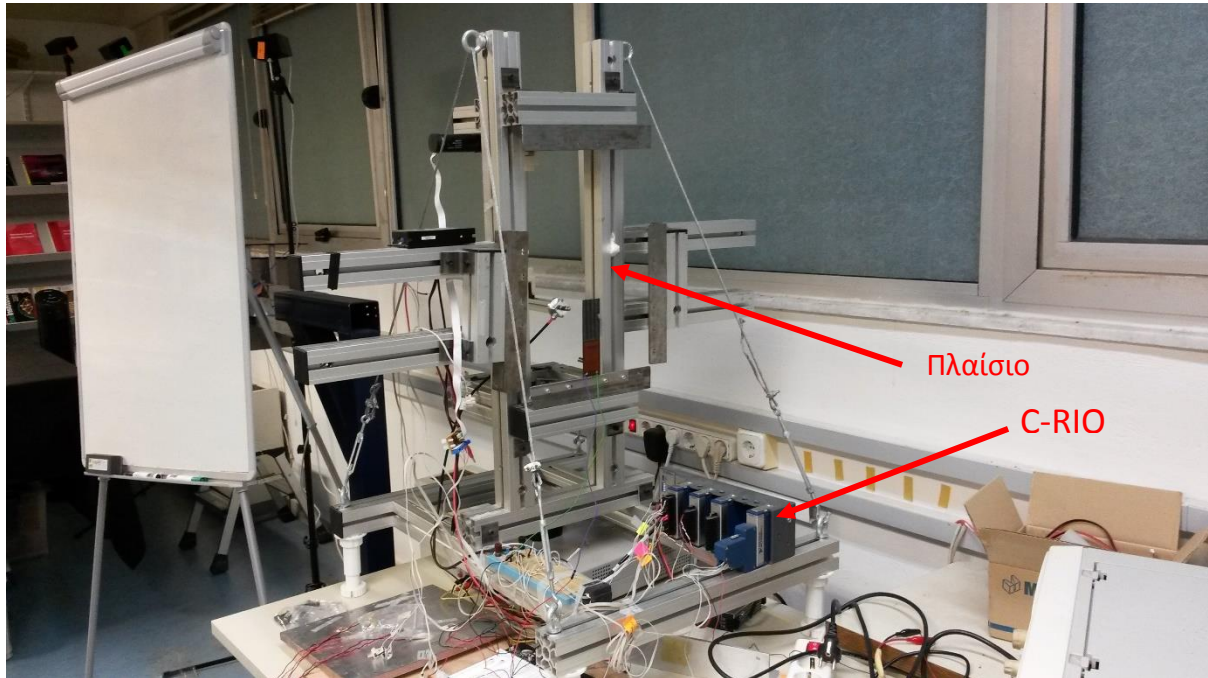
### 5.2.3 Πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας (harvesting module) E-821.00 της PI

Όπως και στα δύο προηγούμενα εξαρτήματα της διάταξης, στοιχεία για την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, παρατίθενται στο Κεφάλαιο 4 και συγκεκριμένα στην Παράγραφο 4.2.3.

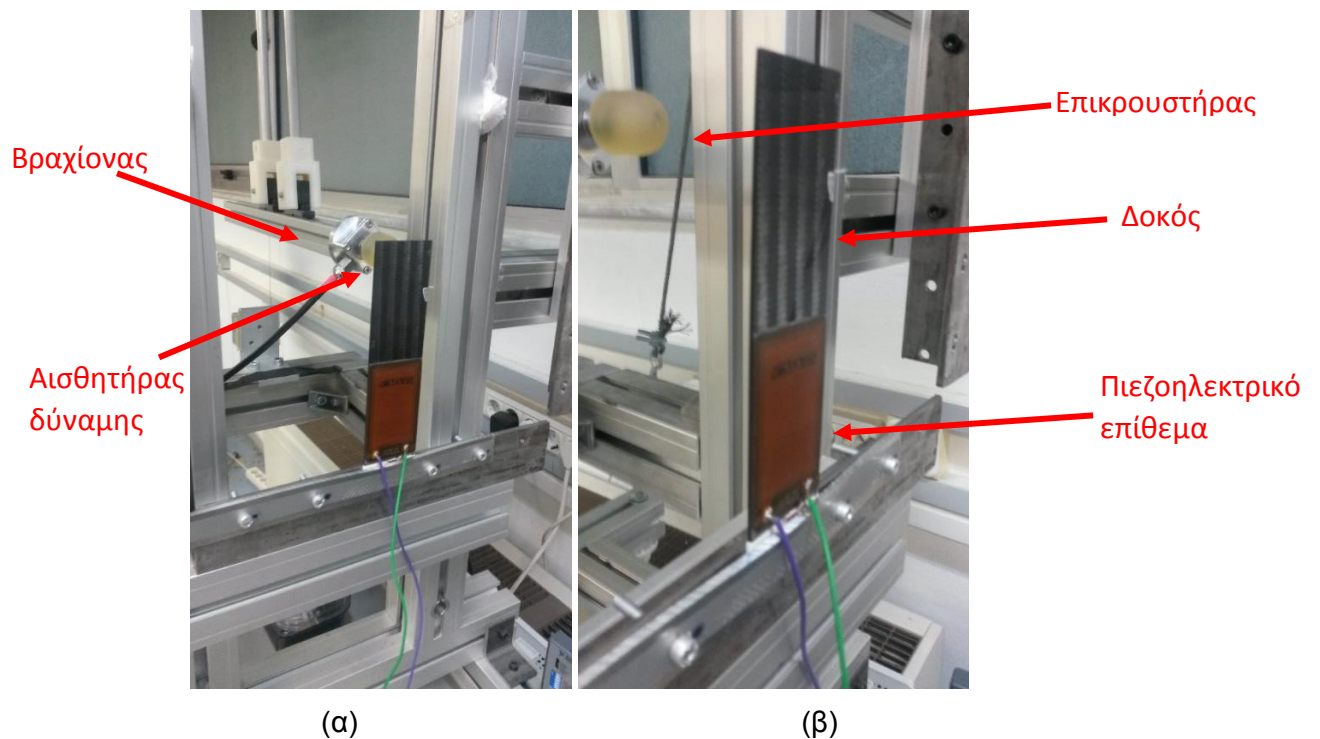
### 5.2.4 Πλαίσιο

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για την αποθήκευση ενέργειας με ημιτονοειδές φορτίο, το δοκίμιο ήταν πακτωμένο στο ένα άκρο του με τη βοήθεια μίας μέγγενης. Στα πειράματα που αφορούν την κρούση επιλέχθηκε η χρήση μιας προϋπάρχουσας διάταξης του εργαστηρίου στην οποία έχουν πραγματοποιηθεί ανάλογες εργασίες στο παρελθόν. Η διάταξη αυτή περιλαμβάνει ένα πλαίσιο κατασκευασμένο από αλουμίνιο, το οποίο διαθέτει επιπλέον στιβαρότητα χάρη στη μηχανική προένταση των ασάλινων συρμάτων που το συγκρατούν. Το πλαίσιο έχει κατασκευαστεί με σκοπό τη διενέργεια πειραμάτων που αφορούν κρούση σε πλάκα, ωστόσο στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιείται για τη στήριξη μίας δοκού. Η πάκτωση της δοκού επιτυγχάνεται με τον

εγκλωβισμό αυτής ανάμεσα στο πλαίσιο και σε μία λάμα η οποία βιδώνεται πάνω σε αυτό. Στο Σχήμα 5-1 απεικονίζεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την πραγματοποίηση του πειράματος της κρούσης. Ακόμα, στο Σχήμα 5-2(α) φαίνεται μια κοντινή άποψη της διάταξης, ενώ η στήριξη της δοκού πάνω στο πλαίσιο απεικονίζεται στο Σχήμα 5-2(β).



Σχήμα 5-1. Διάταξη για το πείραμα της κρούσης



Σχήμα 5-2. (α) Κοντινή άποψη της διάταξης, (β) Πάκτωση δοκού πάνω στο πλαίσιο.

### 5.2.5 Βραχίονας

Η διάταξη αυτή πέρα από το πλαίσιο περιλαμβάνει και έναν βραχίονα. Ο βραχίονας αυτός είναι κατασκευασμένος από αλουμίνιο και μπορεί να εκτελεί κίνηση όμοια με αυτή ενός εκκρεμούς. Η κίνηση του αυτή, όταν αφεθεί από ένα δεδομένο ύψος, οδηγεί σε κρούση μεταξύ του ενός άκρου του και του δοκιμίου. Στο άκρο του βραχίονα, υπάρχει ειδική διαμόρφωση για την εισαγωγή αισθητήρα δύναμης. Ακόμα, μέσω του μηχανισμού παραλληλογράμμου που τον συγκρατεί, διασφαλίζεται η καθετότητα της κρούσης μεταξύ του βραχίονα και του στόχου του.

### 5.2.6 Αισθητήρας δύναμης και επικρουστήρας

Ο αισθητήρας δύναμης που χρησιμοποιείται στο συγκεκριμένο πείραμα έχει κατασκευαστεί στο Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου (Lika 2013) και παρέχει το χρονικό προφίλ της δύναμης που ακείται μεταξύ των δύο σωμάτων κατά τη διάρκεια της κρούσης. Η μέτρηση αυτή, όπως θα εξηγηθεί παρακάτω, δεν χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη εργασία. Ο αισθητήρας αυτός προδένεται με τη μία του πλευρά πάνω στο άκρο του βραχίονα που συμμετέχει στην κρούση. Να επισημανθεί στο σημείο αυτό ότι ο λόγος μετατροπής του αισθητήρα είναι 384 N/Volt.

Στην άλλη του πλευρά, τοποθετείται ο επικρουστήρας (tip), ο οποίος έρχεται σε επαφή με το δοκίμιο, όταν πραγματοποιείται η κρούση. Όσον αφορά τον επικρουστήρα, υπήρχαν δύο επιλογές. Ο ένας ήταν κατασκευασμένος από μαλακότερο υλικό (βλέπε Σχήμα 5-3), ενώ ο άλλος από σκληρότερο. Τελικά, επιλέχθηκε ο σκληρότερος επικρουστήρας, καθώς οι μετρήσεις που προσέδιδε ήταν ευνοϊκότερες για τη μελέτη που θα ακολουθήσει.



Σχήμα 5-3. Σύνδεση βραχίονα, αισθητήρα δύναμης και επικρουστήρα.

### 5.2.7 LabVIEW VI και C-RIO

Κάποια εισαγωγικά στοιχεία σχετικά με το LabVIEW έχουν παρατεθεί στην Παράγραφο 4.2.4, όπου το LabVIEW χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ενός ημιτονοειδούς σήματος. Στο πείραμα που εξετάζεται στο παρόν κεφάλαιο, το LabVIEW χρησιμοποιείται για τη λήψη των μετρήσεων που προκύπτουν καθόλη τη διάρκειά του. Συγκεκριμένα, αξίζει να αναφερθεί ότι το project που χρησιμοποιείται αυτή τη φορά, έχει δημιουργηθεί με βάση ένα έτοιμο πρόγραμμα που παρέχει η εταιρεία NI και το οποίο ονομάζεται DMA MCA project. Το project αυτό, τροποποιήθηκε στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, έτσι ώστε να ικανοποιεί τις απαιτήσεις που έχει ένα πείραμα κρούσης. Το τελικό project το οποίο και ονομάστηκε DMA with encoder project δίνει τη δυνατότητα λήψης μετρήσεων από τέσσερα αναλογικά κανάλια και δύο ψηφιακά ταυτόχρονα. Ακόμα, παρέχει διαγράμματα τα οποία ενημερώνονται με το πέρασ του χρόνου και δίνουν μια καλύτερη εικόνα του πειράματος στον ερευνητή. Επίσης, το εν λόγω project δεν λειτουργεί για μια προκαθορισμένη χρονική διάρκεια όπως τα περισσότερα αντίστοιχα projects. Αντιθέτως, ξεκινάει να λειτουργεί με το πάτημα ενός κουμπιού και συνεχίζει να εκτελείται έως ότου το ίδιο κουμπί πατηθεί ξανά. Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι όπως και το Sine Generator project, έτσι και το DMA with encoder project είναι υλοποιημένο σε επίπεδο FPGA και επομένως, δίνει τη δυνατότητα μιας πολύ συχνής δειγματοληψίας, στοιχείο με κομβική σημασία για πειράματα με έντονη δυναμική φύση όπως αυτά της κρούσης. Περισσότερα στοιχεία σχετικά με το LabVIEW, το C-RIO αλλά και τη λειτουργία του DMA with encoder project θα δοθούν στο Παράρτημα Α.

### 5.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

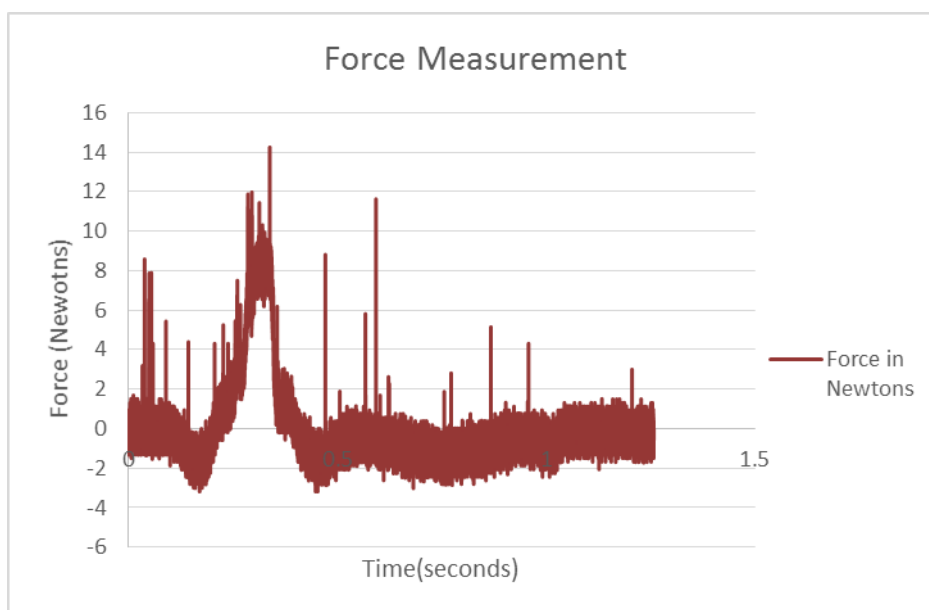
Για τη μελέτη της παραγωγής ενέργειας που προκύπτει μετά από κρούση, πραγματοποιήθηκε ένα αρχικό πείραμα. Κατά τη διάρκεια του πειράματος αυτού, η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας δεν ήταν συνδεδεμένη με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Το πείραμα ξεκινάει όταν ο βραχίονας αφήνεται από ένα δεδομένο ύψος να προσκρούσει πάνω στο ελεύθερο άκρο του δοκιμίου. Η κρούση πραγματοποιείται ανάμεσα στον επικρουστήρα και το δοκίμιο, ενώ η δύναμη που ασκείται στον επικρουστήρα μετράται από τον αισθητήρα δύναμης πάνω στον οποίο είναι προσαρμοσμένος. Ταυτόχρονα με τη μέτρηση της δύναμης, παραλαμβάνεται και η μέτρηση του παραγόμενου δυναμικού μέσω του C-RIO και στη συνέχεια του ειδικά διαμορφωμένου project στο LabVIEW.

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι να μετρηθεί η διαφορά δυναμικού που αναπτύσσεται στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά διάρκεια της κρούσης. Η μορφή του παραγόμενου δυναμικού, καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το κατά πόσο τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια είναι κατάλληλα για την περιγραφή του φαινομένου της κρούσης. Επιπλέον, η πληροφορία του παραγόμενου δυναμικού οδηγεί, μέσα από ορισμένα βήματα που επεξηγούνται στην επόμενη παράγραφο, στην εκτίμηση της ικανότητας του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας να αξιοποιήσει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια. Αν αυτό δεν καταστεί δυνατό, η γνώση της παραγόμενης τάσης στα

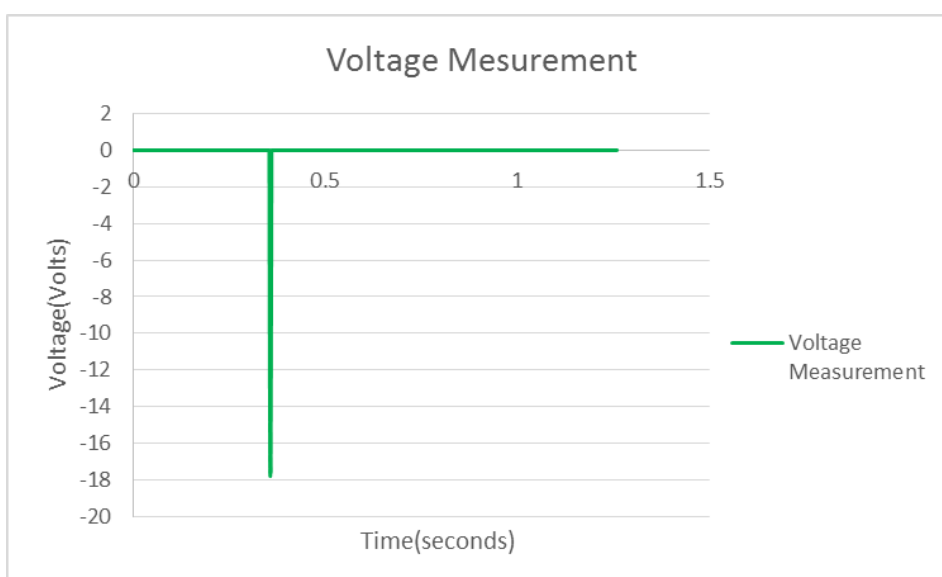
άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος θα οδηγούσε στην τροποποίηση των κατάλληλων παραμέτρων του κυκλώματος, έτσι ώστε να υπάρξει κάποια εκμετάλλευση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 5.4 Πειραματικές μετρήσεις

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος που περιγράφηκε παραπάνω, παραλαμβάνονται οι σχετικές μετρήσεις, οι οποίες αφορούν τη δύναμη που αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια της κρούσης και τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Από αυτές εξήχθησαν σημαντικά συμπεράσματα. Στο Σχήμα 5-4 φαίνεται η μέτρηση της δύναμης και στο Σχήμα 5-5 η αντίστοιχη μέτρηση της παραγόμενης τάσης κατά τη διάρκεια του ίδιου πειράματος.

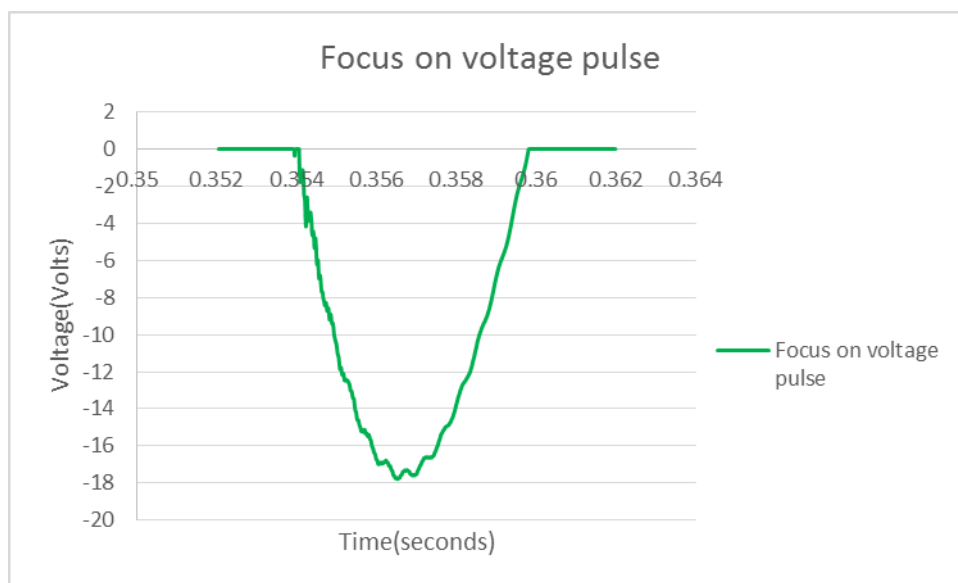


Σχήμα 5-4. Μέτρηση δύναμης κατά τη διάρκεια της κρούσης.



Σχήμα 5-5. Μέτρηση παραγόμενης τάσης στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος.

Στο Σχήμα 5-6, παρουσιάζεται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια το τμήμα του παραπάνω διαγράμματος όπου εμφανίζεται η παραγωγή ηλεκτρικής τάσης.



**Σχήμα 5-6. Εστίαση στο σημείο εμφάνισης της παραγόμενης ηλεκτρικής τάσης.**

Παρατηρώντας προσεκτικά την απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά τη διάρκεια της κρούσης, είναι φανερό ότι το παραγόμενο δυναμικό χαρακτηρίζεται από μία συχνότητα κατά κύριο λόγο, και άρα θα μπορούσε να προσεγγιστεί με μία ημιτονοειδή συνάρτηση. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η κρούση που λαμβάνει χώρα μπορεί να θεωρηθεί ημιστατική λόγω της μεγάλης μάζας επικρουστήρα σε σχέση με τη δυσκαμψία επαφής (contact stiffness) μεταξύ των 2 σωμάτων [11]. Η θεώρηση αυτή επιτρέπει τη μελέτη του φαινομένου αυτού ως στατικού μέσω της μετατόπισης της δοκού και άρα τα υπολογιστικά μοντέλα που αναπτύχθηκαν προηγουμένως μπορούν να βρουν και εδώ εφαρμογή. Ωστόσο, η μέτρηση της δύναμης που ελήφθη δεν θα χρησιμοποιηθεί στην ανάλυση που θα ακολουθήσει αφού το πλάτος του παλμού της δύναμης εάν εφαρμοστεί στατικά οδηγεί σε πολύ μεγαλύτερες μετατοπίσεις από τις πραγματικές (προσδιορισμένες μέσω του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού δυναμικού) λόγω παράλειψης των αδρανειακών φαινομένων της πλάκας. Συνεπώς, η σωστή μοντελοποίηση του ισοδύναμου στατικού συστήματος απαιτεί τον υπολογισμό μιας ισοδύναμης στατικής δύναμης που επιφέρει στο δοκίμιο την ίδια μετατόπιση με αυτή που προσδιορίστηκε πειραματικά.

Θα πρέπει να σημειωθεί στο σημείο αυτό, ότι δεν υπάγονται όλες οι κρούσεις στην κατηγορία των στατικών κρούσεων που αναφέρθηκε παραπάνω. Εν γένει, οι κρούσεις είναι εντόνως δυναμικά φαινόμενα που περιέχουν περισσότερες ιδιομορφές ταλάντωσης και δύο φάσεις, επαφής και διαχωρισμού, των σωμάτων και επομένως, τα υπολογιστικά εργαλεία που έχουν δημιουργηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας δεν επαρκούν για μια λεπτομερή μελέτη. Ωστόσο, στην περίπτωση της κρούσης που εξετάζεται εδώ, η εφαρμογή τους μπορεί να οδηγήσει σε αρκετά αξιόπιστες εκτιμήσεις.



## 5.5 Συνοπτική παρουσίαση μεθοδολογίας για τη μελέτη παραγωγής ενέργειας από κρούση

Υπενθυμίζεται ότι ο σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι η δημιουργία μιας μεθοδολογίας, με βάση την οποία θα είναι δυνατή η πρόβλεψη της λειτουργικότητας ή μη του υπάρχοντος κυκλώματος ενέργειας σε ένα δεδομένο κρουστικό φορτίο, πριν το κύκλωμα συνδεθεί με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Όπως αναφέρθηκε ήδη, η μεθοδολογία αυτή θα πρέπει να στηρίζεται στα μοντέλα που έχουν κατασκευαστεί σε προηγούμενο κεφάλαιο. Για να συμβεί αυτό, είναι απαραίτητη η πραγματοποίηση των παρακάτω βημάτων.

### Βήμα 1<sup>ο</sup>:

Χρήση μοντέλου στο Abaqus για εύρεση ισοδύναμης στατικής δύναμης που προκαλεί την παραγωγή της αντίστοιχης ηλεκτρικής τάσης με αυτήν του πειράματος

### Βήμα 2<sup>ο</sup>:

Εισαγωγή ευρεθείσας δύναμης στις εξισώσεις του κεφαλαίου 2 για προσδιορισμό ισοδύναμης πηγής ρεύματος για το ηλεκτρικό μοντέλο του επιθέματος

### Βήμα 3<sup>ο</sup>:

Εκτίμηση απόκρισης μέσω του μοντέλου στο Pspice με βάση τις πληροφορίες του προηγούμενου βήματος

### Βήμα 4<sup>ο</sup>:

Εάν δεν υπάρχει παραγωγή ενέργειας για το συγκεκριμένο φορτίο, χρήση του μοντέλου στο Pspice ως σχεδιαστικού εργαλείου για τον προσδιορισμό των παραμέτρων του κυκλώματος που θα το κάνουν λειτουργικό στις επικρατούσες συνθήκες

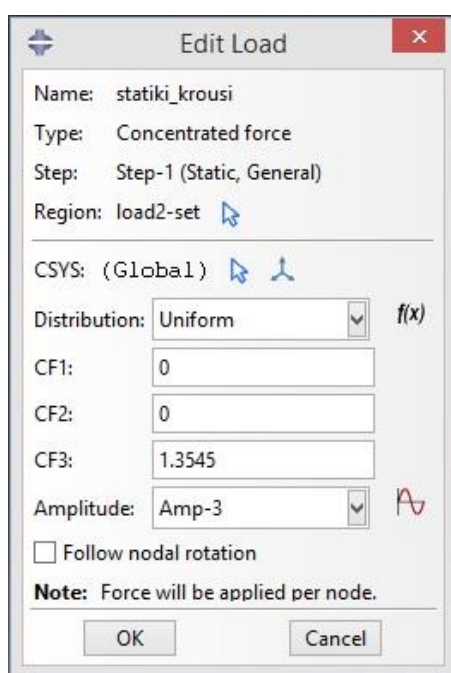
## 5.6 Χρήση μοντέλου στο Abaqus για την κρούση

Το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο Abaqus (βλέπε Κεφάλαιο 3), πραγματοποιεί την επίλυση του στατικού προβλήματος της εξαναγκασμένης ταλάντωσης (forced harmonic response) της δοκού η οποία φέρει πιεζοηλεκτρικό επίθεμα. Η είσοδος του συγκεκριμένου μοντέλου είναι η δύναμη που ασκείται στο ελεύθερο άκρο της πακτωμένης δοκού και η έξοδος που εξετάζεται είναι η παραγωγή ηλεκτρικής τάσης στους ακροδέκτες του επιθέματος. Στο μοντέλο δεν συμπεριλαμβάνεται το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας.

Ωστόσο, η κρούση είναι ένα δυναμικό φαινόμενο και επομένως οι δυνάμεις που ασκούνται κατά τη διάρκειά του, προκαλούν διαφορετικές αποκρίσεις από αυτές που προβλέπει ένα στατικό μοντέλο. Για το λόγο αυτό, το μοντέλο που έχει κατασκευαστεί στο Abaqus δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας. Το γεγονός που επιτρέπει, τελικά, τη χρήση του, είναι η παρατήρηση ότι η παραγόμενη τάση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος μπορεί να προσεγγιστεί με μια ημιτονοειδή συνάρτηση που η διάρκεια της είναι ίση με τη μισή περίοδό της. Την ίδια απόκριση θα μπορούσε να προκαλέσει και μία ισοδύναμη στατική δύναμη η οποία θα ασκείτο πάνω στη δοκό. Κατά αυτόν τον τρόπο, το μοντέλο που έχει κατασκευαστεί στο Abaqus μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση αυτής της ισοδύναμης στατικής δύναμης που προκαλεί την απόκριση που φαίνεται στο

Σχήμα 5-6. Επομένως, η ανάλυση για τον προσδιορισμό της λειτουργικότητας του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας δεν αξιοποιεί τη μέτρηση της δύναμης που ελήφθη κατά τη διάρκεια του πειράματος και η οποία φαίνεται στο Σχήμα 5-4. Αντιθέτως, ξεκινά με την εύρεση της αντίστοιχης στατικής δύναμης που προκαλεί την ίδια απόκριση, όταν η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι συνδεδεμένη με το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα.

Το μοντέλο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.3 δεν χρειάζεται να τροποποιηθεί καθώς οι ιδιότητες και η γεωμετρία του συστήματος δεν έχουν μεταβληθεί. Αυτό που ρυθμίζεται είναι το πλάτος της ασκούμενης δύναμης και αυτό γίνεται μέσω του βήματος Load. Η ρύθμιση γίνεται με δοκιμές έως ότου να αποδοθεί στην έξοδο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος η επιθυμητή απόκριση. Όταν συμβεί αυτό, η δύναμη που δόθηκε στο μοντέλο ως είσοδος, είναι η ζητούμενη ισοδύναμη στατική δύναμη. Στο Σχήμα 5-7 φαίνεται το παράθυρο του Abaqus όπου γίνεται η επιλογή του πλάτους της δύναμης.



**Σχήμα 5-7. Παράθυρο επιλογής Φορτίου στο Abaqus.**

Η δύναμη, που προσδιορίζεται με τον τρόπο που επεξηγήθηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται στις εξισώσεις του Κεφαλαίου 2, για τον προσδιορισμό της ισοδύναμης πηγής ρεύματος που χρησιμοποιείται στο μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Pspice. Με άλλα λόγια γίνεται η θεώρηση πως η κρούση ισοδυναμεί με μία εξαναγκασμένη αρμονική ταλάντωση της οποίας η διάρκεια είναι ίση με τη μισή περίοδο του ημιτόνου που προσεγγίζει την απόκριση που μετρήθηκε στο πείραμα της κρούσης.

## 5.7 Χρήση μοντέλου στο Pspice για την κρούση

Η συνέχεια της μεθοδολογίας απαιτεί τη χρήση του μοντέλου του ηλεκτρικού υποσυστήματος που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, το οποίο ολοκληρώθηκε στο πρόγραμμα Pspice. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας και ένα υποκύκλωμα που μοντελοποιεί τη λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όταν



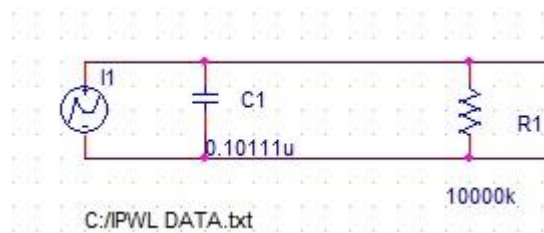
αυτό είναι συνδεδεμένο με την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας. Το υποκύκλωμα αυτό μοντελοποιείται ως μία πηγή ρεύματος που συνδέεται παράλληλα με ένα πυκνωτή (βλέπε Παράγραφο 3.4.1). Τα δύο αυτά ισοδύναμα ηλεκτρικά στοιχεία προσδιορίζονται με τη βοήθεια των εξισώσεων που παρατίθενται στην Παράγραφο 2.3.2. Για να αξιοποιηθούν οι εξισώσεις αυτές στη μελέτη της παραγωγής ενέργειας από κρούση, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η ισοδύναμη στατική δύναμη που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την παραπάνω διαδικασία καθορίζουν την είσοδο του μοντέλου στο Pspice. Η είσοδος αυτή είναι η ισοδύναμη πηγή ρεύματος που σε συνδυασμό με τον ισοδύναμο πυκνωτή μοντελοποιούν το επίθεμα.

Το μοντέλο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας στο Pspice μπορεί να επιτελέσει δύο λειτουργίες που είναι απαραίτητες για τη μελέτη της παραγωγής ενέργειας από κρούση. Η πρώτη εκ των δύο, είναι ο έλεγχος της λειτουργικότητας της υπάρχουσας πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας στις δεδομένες συνθήκες του πειράματος. Εάν αποδειχθεί ότι η πλακέτα δεν είναι ικανή να εκμεταλλευτεί την ενέργεια της ταλάντωσης του δοκιμίου, τότε το μοντέλο στο Pspice μπορεί να εκπληρώσει και το δεύτερο σκοπό του, ο οποίος είναι ο επανασχεδιασμός του κυκλώματος της πλακέτας, έτσι ώστε αυτή να είναι αποδοτική για το συγκεκριμένο μηχανικό φορτίο που ασκείται στη δοκό.

### **5.7.1 Έλεγχος λειτουργικότητας πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας**

Σε αυτό το βήμα της μεθοδολογίας το μοντέλο που κατασκευάστηκε στο Pspice, χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί το κατά πόσο το συγκεκριμένο κρουστικό φορτίο μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία παλμού τάσης στη έξοδο του υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας.

Οι παράμετροι και ο τρόπος λειτουργίας του μοντέλου δεν τροποποιούνται σε αυτήν τη φάση της μελέτης, οπότε το κύκλωμα είναι αυτό που παρουσιάζεται στις Παραγράφους 3.4.1 έως 3.4.6. Η μόνη αλλαγή, που επιβάλλεται στο υπάρχον κύκλωμα, αφορά την πηγή ρεύματος. Στην Παράγραφο 3.4.1, η πηγή που χρησιμοποιείται είναι μια ημιτονοειδής πηγή ρεύματος στην οποία επιλέγεται το πλάτος, η συχνότητα και το offset του σήματος. Ωστόσο, στην κρούση η πηγή του ρεύματος πρέπει να τροφοδοτεί το υπόλοιπο κύκλωμα μόνο για μισή περίοδο. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιείται μια πηγή ρεύματος η οποία ονομάζεται IPWL\_FILE. Η τιμή του ρεύματος που αποδίδει αυτή η πηγή κάθε χρονική στιγμή, περιέχεται σε ένα αρχείο txt. Το αρχείο αυτό δομείται έτσι ώστε να εμπεριέχει δύο στήλες, μία για το χρόνο και μία για το ρεύμα. Κατά αυτόν τον τρόπο, ορίζονται σημεία στο διάγραμμα ρεύματος-χρόνου που περιγράφει τη λειτουργία της πηγής. Τα σημεία αυτά ενώνονται μεταξύ τους με ευθύγραμμα τμήματα έτσι ώστε να ορίζονται και τα ενδιάμεσα σημεία λειτουργίας. Αν ο χρόνος λειτουργίας της πηγής είναι μικρότερος από τη χρονική διάρκεια του προβλήματος, τότε η τελευταία τιμή του ρεύματος που καταχωρείται στο αρχείο txt, χρησιμοποιείται από το πρόγραμμα και για το υπόλοιπο της επίλυσης. Το μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος σε αυτήν τη φάση της μεθοδολογίας φαίνεται στο Σχήμα 5-8.



**Σχήμα 5-8. Μοντέλο πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με πηγή ρεύματος IPWL\_FILE.**

Από φυσικής απόψεως, υπενθυμίζεται ότι προκειμένου να υπάρξει απόδοση ενέργειας στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, θα πρέπει η τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 (βλέπε Παράγραφο 3.4.2) να φτάσει τα 12V. Όπως θα φανεί και από τα αποτελέσματα που παρατίθενται στο Κεφάλαιο 6, το φορτίο που εξετάζεται σε αυτό το κεφάλαιο δεν είναι αρκετό για να επιτύχει τέτοια φόρτιση.

### 5.7.2 Επανασχεδιασμός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας

Στην προηγούμενη παράγραφο ολοκληρώθηκε ο έλεγχος της λειτουργικότητας του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας και τελικά το μηχανικό φορτίο δεν επαρκεί για να φορτίσει πλήρως τον πυκνωτή C3, όπως φαίνεται στο Κεφάλαιο 6. Αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι του κυκλώματος που φέρει η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, δεν είναι κατάλληλα ρυθμισμένοι για να υπάρχει παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις συγκεκριμένες συνθήκες.

Σε περιπτώσεις όπως αυτή που μελετάται στο παρόν κεφάλαιο, είναι χρήσιμο να υπάρχει η δυνατότητα επανασχεδιασμού του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, προκειμένου αυτό να μπορεί να καλύψει τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί τροποποιώντας τις κατάλληλες παραμέτρους του κυκλώματος στο μοντέλο του Pspice μέχρι να προκύψει το επιθυμητό αποτέλεσμα. Οι βασικότερες παράμετροι του κυκλώματος που καθορίζουν την αποδοτικότητά του είναι η χωρητικότητα του πυκνωτή C3 και το ανώτατο και το κατώτατο όριο φόρτισης αυτού, τα οποία καθορίζονται από το υποκύκλωμα Schmitt trigger (βλέπε Παράγραφο 3.4.4). Είναι, λοιπόν, σημαντικό να κατανοηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι δύο αυτές παράμετροι επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας αποδίδει ενέργεια στην έξοδο της, όταν ο πυκνωτής C3 φορτιστεί μέχρι την ανώτατη τάση που ορίζει το υποκύκλωμα Schmitt trigger. Η χωρητικότητα του πυκνωτή C3 καθορίζει την αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα του για ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτό μπορεί να επεξηγηθεί με το ακόλουθο σκεπτικό. Έστω  $E_{c_3}$  η ενέργεια του πυκνωτή  $C_3$  όταν στα άκρα του αναπτύσσεται τάση  $V_{c_3}$ . Η εξίσωση που συνδέει τα παραπάνω μεγέθη είναι:

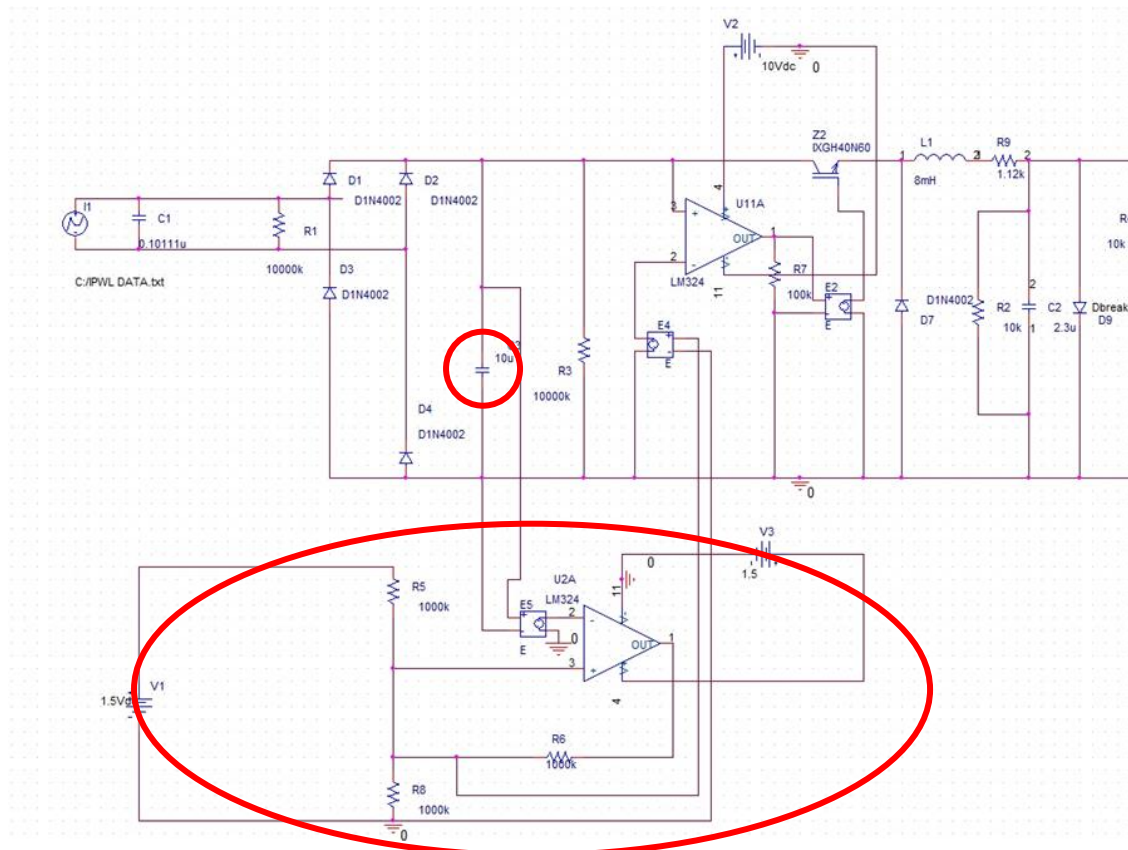
$$E_{c_3} = \frac{1}{2} C_3 V_{c_3}^2$$

Με βάση αυτήν την εξίσωση, προκύπτει το συμπέρασμα ότι αν στη θέση του πυκνωτή C3 επιλεγεί ένας πυκνωτής με μικρότερη χωρητικότητα, τότε η τάση που θα παραχθεί στα άκρα

για το ίδιο ποσό εισερχόμενης ενέργειας, θα είναι μεγαλύτερη. Άρα, η πρώτη δυνατότητα ρύθμισης του κυκλώματος συνδέεται με τη μείωση της χωρητικότητας του πυκνωτή C3.

Η άλλη δυνατότητα ρύθμισης του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας σχετίζεται με τα όρια της τάσης που ορίζει το υποκύκλωμα Schmitt trigger. Δηλαδή, τροποποιώντας το υποκύκλωμα αυτό, είναι δυνατόν το ανώτατο όριο της τάσης του πυκνωτή C3 να μεταβεί σε χαμηλότερες τιμές. Η μετάβαση αυτή σημαίνει ότι πλέον το κύκλωμα μπορεί να αποδίδει ενέργεια στην έξοδο του με μικρότερα μηχανικά φορτία αλλά φυσικά το ποσό της ενέργειας αυτής θα είναι, επίσης, μικρότερο. Είναι προφανές ότι αλλάζοντας το ανώτατο όριο της τάσης του πυκνωτή C3, ταυτόχρονα μεταβάλλεται και το κατώτατο όριο.

Η τελική ρύθμιση του κυκλώματος μπορεί να υλοποιηθεί είτε επιλέγοντας τη μεταβολή της χωρητικότητας του πυκνωτή C3, είτε με την τροποποίηση του υποκυκλώματος Schmitt trigger, είτε ακόμα, με κάποιον συνδυασμό των παραπάνω επιλογών. Επιπλέον, ρυθμίσεις που αφορούν τη χρονική διάρκεια της εξόδου ή τη μορφή του σήματος εξόδου μπορούν, επίσης, να επιβληθούν. Το τελικό αποτέλεσμα πρέπει να επιλέγεται με βάση τις ανάγκες της εκάστοτε εφαρμογής. Στο Κεφάλαιο 6 παρατίθεται ένα παράδειγμα τροποποίησης του υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε να αποδίδεται ενέργεια στην έξοδο του για το μηχανικό φορτίο που επιβλήθηκε στο πείραμα της κρούσης που εξετάζεται στο παρών κεφάλαιο. Στο Σχήμα 5-9 φαίνονται οι επιλογές ρύθμισης του κυκλώματος.



Σχήμα 5-9. Επιλογές ρύθμισης του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας.

## 6 Αποτελέσματα

### 6.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αρχικά, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της αποθήκευσης ενέργειας όταν στο σύστημα ασκείται ημιτονοειδές φορτίο ακολουθώντας την μεθοδολογία που παρατέθηκε στην Παράγραφο 3.2. Η μεθοδολογία αυτή περιλαμβάνει, πρώτον, την μοντελοποίηση του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος στο Abaqus, όταν το σύστημα δεν αποδίδει ηλεκτρική ενέργεια στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Δεύτερον, την εύρεση των απαραίτητων μεγεθών για την μοντελοποίηση του επιθέματος ως μέρος του ηλεκτρικού κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, με βάση τις εξισώσεις της παραγράφου 2.3.2. Και τρίτον, την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος που εμπεριέχει και το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας με χρήση του μοντέλου στο Pspice. Η πρόβλεψη αυτή συγκρίνεται και με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις.

Επιλέον, με βάση τα υπολογιστικά αποτελέσματα θα γίνει εκτιμάται ο βαθμός απόδοσης του συνολικού συστήματος. Η εκτίμηση αυτή μπορεί να δώσει σημαντικές πληροφορίες για το κατά πόσο αυτή η μέθοδος παραγωγής ενέργειας είναι αρκετά συμφέρουσα και άρα οικονομικά βιώσιμη.

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την αποθήκευση ενέργειας όταν στο σύστημα ασκείται κρουστικό φορτίο. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται αυτήν την φορά, έχει παρατεθεί στην Παράγραφο 5.5. Με βάση αυτήν, προσδιορίζεται η ισοδύναμη στατική δύναμη που παράγει την ίδια απόκριση στο σύστημα δοκού-επιθέματος και χρησιμοποιώντας τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν στο Κεφάλαιο 3, θα προκύψει η πρόβλεψη που αφορά την λειτουργικότητα ή μη της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας στις συγκεκριμένες συνθήκες του πειράματος της κρούσης. Τέλος, θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο στο Pspice ως ένα σχεδιαστικό εργαλείο και μέσω αυτού θα προταθεί ένα σύνολο αλλαγών στις παραμέτρους του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας που θα το καταστήσουν λειτουργικό για τη συγκεκριμένη εφαρμογή.

### 6.2 Αποτελέσματα μελέτης αποθήκευσης ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο

Η πρόβλεψη της απόκρισης του συνολικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας αποτελείται από τρία κυρίως βήματα. Πρώτον, θα πρέπει να κατασκευαστεί ένα μοντέλο στο Abaqus το οποίο θα περιγράφει την λειτουργία του συστήματος για ένα ικανοποιητικό εύρος ημιτονοειδών φορτίων, όταν το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι συνδεδεμένο με την υπόλοιπη διάταξη. Δεύτερον, θα προσδιοριστούν τα ηλεκτρικά στοιχεία που μοντελοποιούν την λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όταν αυτό συνδέεται με την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό θα γίνει με χρήση των εξισώσεων της Παραγράφου 2.3.2. Και τρίτον, με βάση το μοντέλο του κυκλώματος αποθήκευσης

ενέργειας στο Pspice θα πραγματοποιηθεί η πρόβλεψη της απόκρισης του συνολικού συστήματος, η οποία και θα συγκριθεί με τις πειραματικές μετρήσεις.

### **6.2.1 Μοντέλο μηχανικού υποσυστήματος στο Abaqus**

Στις Παραγράφους 3.3.1 έως και 3.3.8 περιγράφεται αναλυτικά ο τρόπος με τον οποίο κατασκευάζεται ένα μοντέλο στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus όταν είναι γνωστές οι σταθερές των επιμέρους τμημάτων του μοντέλου. Ωστόσο, κατά την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής, δεν ήταν γνωστό το σύνολο των σταθερών που χαρακτηρίζουν τις ιδιότητες του συστήματος. Συγκεκριμένα, ήταν άγνωστες οι ελαστικές σταθερές της δοκού πάνω στην οποία ασκείτο το μηχανικό φορτίο.

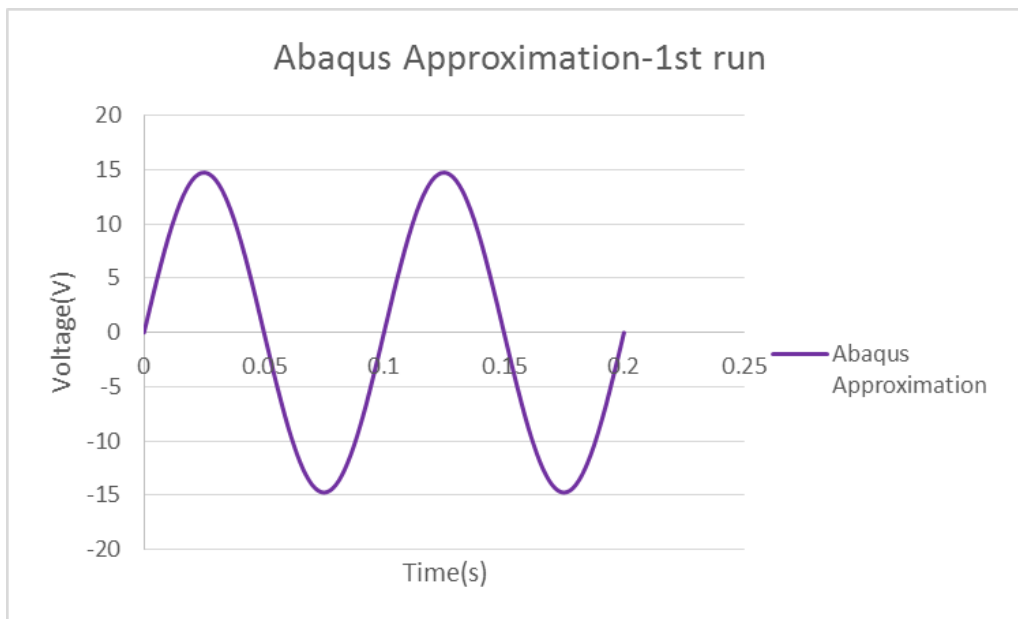
Για τον προσδιορισμό τους, διενεργήθηκαν τρεις επαναλήψεις του πειράματος, στο οποίο το σύστημα δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος δεχόταν ημιτονοειδή φορτία ενώ δεν ήταν συνδεδεμένο με το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό που εξετάζεται μέσω των πειραμάτων αυτών, είναι το μέγεθος της ηλεκτρικής τάσης που παράγεται στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος λόγω ενός συσγκεκριμένου μηχανικού φορτίου. Κατά αυτόν τον τρόπο, η πρώτη επανάληψη χρησιμοποιείται για την προσαρμογή των ελαστικών σταθερών της δοκού εντός του μοντέλου στο Abaqus, έτσι ώστε για το ίδιο μηχανικό φορτίο που ασκείται στο πείραμα, το μοντέλο να προβλέπει με ακρίβεια την παραγόμενη τάση στους ακροδέκτες του επιθέματος. Οι επόμενες δυο επαναλήψεις επαληθεύουν ότι το μοντέλο που έχει κατασκευαστεί με βάση τις προσαρμοσμένες ελαστικές σταθερές μπορεί να προβλέπει με ικανοποιητική ακρίβεια την παραγόμενη τάση και σε άλλα μηχανικά φορτία. Οι σταθερές που προσδιορίστηκαν με τον παραπάνω τρόπο παρουσιάζονται στον Πίνακα 3-1, και αντιστοιχούν σε ορθότροπο υλικό.

Στο σημείο αυτό υπενθυμίζεται ότι η κατασκευάστρια εταιρεία απέστειλε μία εκτίμηση των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού της δοκού. Με βάση αυτήν την εκτίμηση το υλικό ήταν ισότροπο με μία σταθερά Young της τάξης των 150GPa. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση της εκτίμησης της PI ήταν παρόμοια με αυτά που δίνει η διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω και για αυτό επιλέχθηκε να διατηρηθούν οι σταθερές του Πίνακα 3-1 στο μοντέλο του Abaqus.

Στην συνέχεια, παρατίθενται οι προβλέψεις του Abaqus για την απόκριση του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Δηλαδή, παρουσιάζεται η ηλεκτρική τάση που παράγεται στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος για κάθε ένα από τα τρία διαφορετικά φορτία που ασκήθηκαν στο ελεύθερο άκρο της δοκού κατά την διάρκεια των αντίστοιχων επαναλήψεων του πειράματος. Ακόμα, παρατίθεται και η σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με τις πειραματικές μετρήσεις της παραγόμενης τάσης για τα ίδια μηχανικά φορτία, για να διαπιστωθεί η ακρίβεια του μοντέλου που κατασκευάστηκε στο Abaqus σε ένα ικανοποιητικό εύρος δυνάμεων.

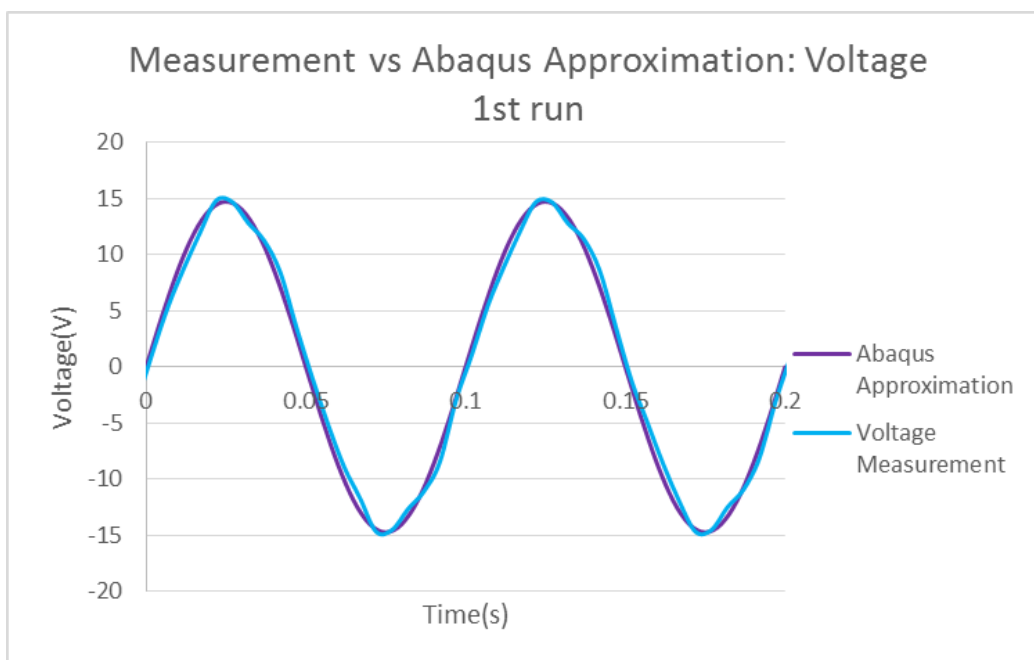
Αποτελέσματα Abaqus-επανάληψη 1<sup>η</sup>:

Για φορτίο ημιτονοειδές με συχνότητα 10 Hz και πλάτος δύναμης ίσο με 2.25N, το Abaqus δίνει την ηλεκτρική τάση μεταξύ των ακροδεκτών του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όπως αυτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-1.



**Σχήμα 6-1. Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 2.25N.**

Παρατηρείται ότι η απόκριση που προκύπτει είναι ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 10 Hz και πλάτος 14.74V. Συγκρίνοντας την απόκριση αυτή με τις πειραματικές μετρήσεις, προκύπτει το διάγραμμα στο Σχήμα 6-2.



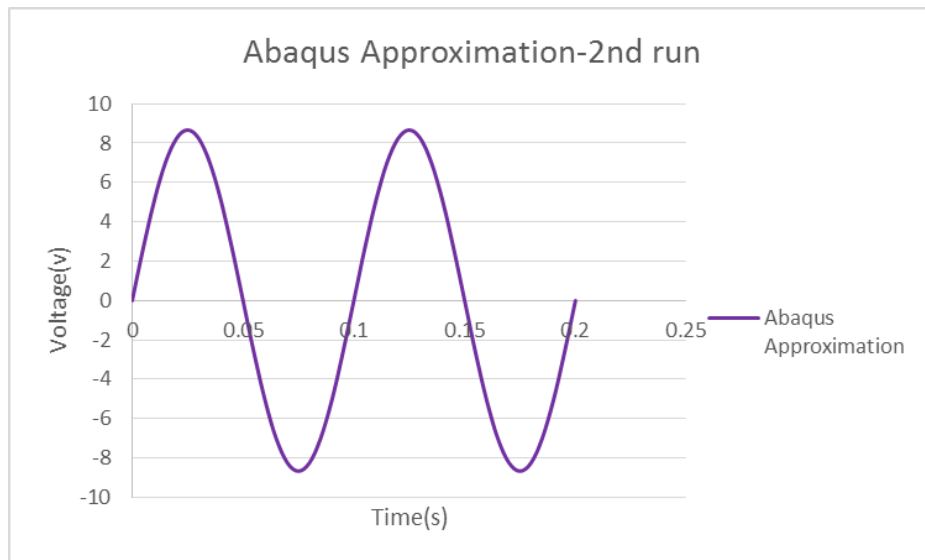
**Σχήμα 6-2. Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 2.25N.**

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων του Abaqus με τις μετρήσεις, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η προσαρμογή των ελαστικών σταθερών έχει γίνει με επιτυχία και μένει

μόνο να επαληθευθεί η ικανότητα του μοντέλου να προβλέπει σωστά την απόκριση του συστήματος και σε άλλα φορτία.

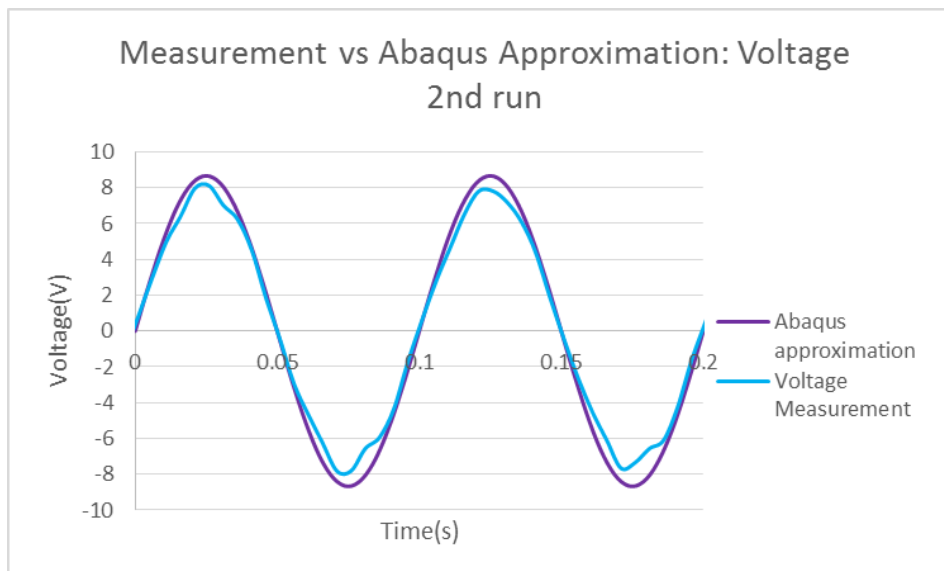
#### Αποτελέσματα Abaqus-επανάληψη 2<sup>η</sup>:

Για φορτίο ημιτονοειδές με συχνότητα 10 Hz και πλάτος δύναμης ίσο με 1.32N, το Abaqus δίνει το μέσο δυναμικό στην ελεύθερη επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος που εμφανίζεται στο Σχήμα 6-3.



**Σχήμα 6-3. Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 1.32N.**

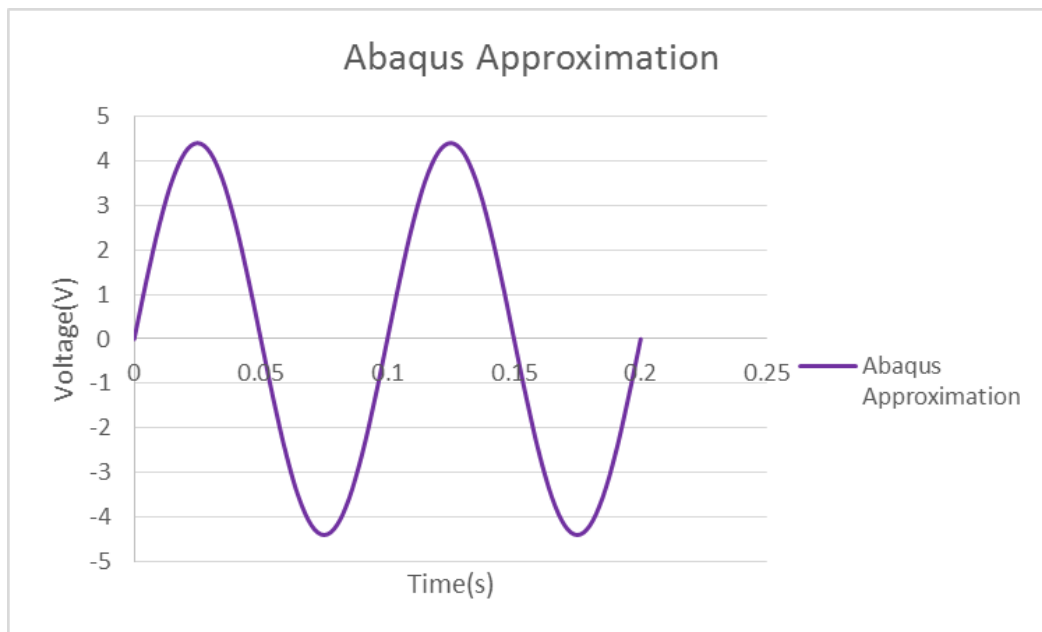
Παρατηρείται ότι η απόκριση που προκύπτει είναι ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 10 Hz και πλάτος 8.67V. Συγκρίνοντας την απόκριση αυτή με τις πειραματικές μετρήσεις, προκύπτει το διάγραμμα στο Σχήμα 6-4.



**Σχήμα 6-4. Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 1.32N.**

#### Αποτελέσματα Abaqus-επανάληψη 3<sup>η</sup>:

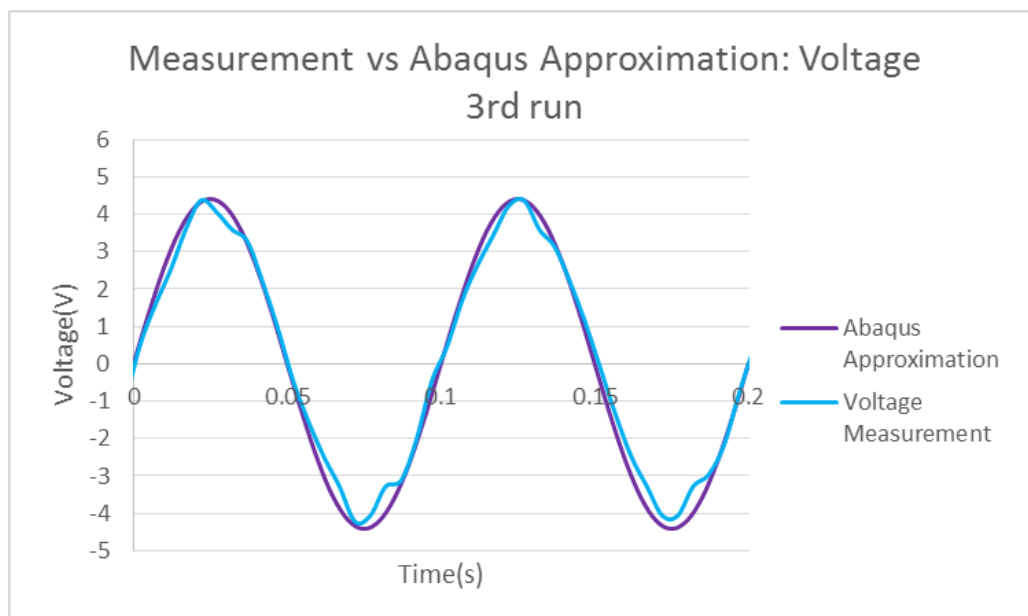
Για φορτίο ημιτονοειδές με συχνότητα 10 Hz και πλάτος δύναμης ίσο με 0.67N, το Abaqus δίνει το μέσο δυναμικό στην ελεύθερη επιφάνεια του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-5.



**Σχήμα 6-5. Εκτίμηση ηλεκτρικής τάσης από μοντέλο στο Abaqus για δύναμη 0.67N.**

Παρατηρείται ότι η απόκριση που προκύπτει είναι ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 10 Hz και πλάτος 4.41V.

Συγκρίνοντας την απόκριση αυτή με τις πειραματικές μετρήσεις, προκύπτει το διάγραμμα στο Σχήμα 6-6.



**Σχήμα 6-6. Σύγκριση απόκρισης μοντέλου στο Abaqus και πειραματικών μετρήσεων για δύναμη 0.67N.**



Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του Abaqus και για τα επόμενα δύο φορτία, εξάγεται το συμπέρασμα ότι το μοντέλο, με τις ελαστικές σταθερές του Πίνακα 3-1, μπορεί με ικανοποιητική ακρίβεια να εκτιμήσει την τάση στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού τουλάχιστον για εύρος φορτίων ίσο με αυτό των μετρήσεων. Είναι πλέον δυνατόν το μοντέλο να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη και άλλων μεγεθών. Τέτοιο μέγεθος είναι η κλίση της βύθισης του δοκιμίου σε κάποια συγκεκριμένη θέση. Ακόμα, από το μοντέλο αυτό μπορούν να ανακτηθούν τα μητρώα μάζας και ελαστικότητας για την πρώτη ιδιομορφή της ελεύθερης ταλάντωσης του δοκιμίου τα οποία χρησιμοποιούνται στην επόμενη παράγραφο.

### 6.2.2 Προσδιορισμός ισοδύναμων ηλεκτρικών στοιχείων για την μοντελοποίηση της λειτουργίας του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την αποθήκευση ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο

Όπως επεξηγήθηκε στην Παράγραφο 2.3.2, η λειτουργία του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, όταν αυτό αποδίδει ενέργεια στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, μοντελοποιείται ως μία πηγή ρεύματος η οποία συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή (βλέπε Σχήμα 3-10). Επομένως, για να είναι πλήρως ορισμένο το μοντέλο, είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της έντασης της πηγής ρεύματος και η χωρητικότητα του πυκνωτή. Οι μαθηματικές εξισώσεις που ποσοτικοποιούν τις παραμέτρους αυτές είναι οι ακόλουθες.

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}}, \quad (6-1)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} \quad (6-2)$$

Οι παράμετροι που εμφανίζονται στις δύο εξισώσεις αναφέρονται στην Παράγραφο 2.3.2.

Από την Εξίσωση (6-1), προκύπτει το συμπέρασμα ότι η χωρητικότητα του ισοδύναμου πυκνωτή, εξαρτάται από την γεωμετρία και την διηλεκτρική σταθερά του υλικού. Τα δεδομένα αυτά είναι γνωστά και επομένως ο υπολογισμός της χωρητικότητας είναι απλός. Τελικά, η χωρητικότητα είναι ίση με:

$$C_{\bar{p}} = 101nF$$

Η Εξίσωση (6-2) περιέχει τον όρο  $\kappa_j$ . Αυτός είναι ο όρος σύζευξης στον χώρο των ιδιομορφών στην εξίσωση του ηλεκτρικού κυκλώματος και δίνεται από τον τύπο που ακολουθεί,

$$\kappa_j = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \int_{x_s}^{x_f} \frac{d^2\varphi_j(x)}{dx^2} dx = \bar{\epsilon}_{31} \cdot h_{\bar{p}c} \cdot b \cdot \left( \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_f} - \left. \frac{d\varphi_j(x)}{dx} \right|_{x_s} \right) \quad (6-3)$$

Τόσο στην Εξίσωση (6-2), όσο και στον όρο σύζευξης (Εξίσωση (6-3)) εμφανίζεται ο δείκτης  $j$ . Ο δείκτης αυτός αναφέρεται στην αντίστοιχη ιδιομορφή του συστήματος. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, γίνεται η παραδοχή ότι η μόνη ιδιομορφή που επηρεάζει το φαινόμενο είναι η πρώτη. Για τον λόγο αυτό, το άθροισμα της Εξίσωσης (6-2) εκφυλλίζεται στον πρώτο όρο του αρχικού αθροίσματος και το ρεύμα υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$i_{\bar{p}}(t) = \kappa_1 \cdot \frac{d\eta_1(t)}{dt} \quad (6-4)$$

Όπως και προηγουμένως η ένταση της πηγής ρεύματος καθορίζεται σε κάποιο βαθμό από την γεωμετρία και τις ηλεκτρικές σταθερές του συστήματος. Ωστόσο, επηρεάζεται, επίσης, και από την βύθιση του δοκιμίου λόγω του εξωτερικού φορτίου. Η εξάρτηση αυτή οφείλεται στις παραγώγους των μεγεθών  $\eta$  και  $\varphi$ . Τα μεγέθη αυτά συνδέονται με την βύθιση της δοκού ως εξής:

$$w_{rel}(x, t) = \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j(x) \cdot \eta_j(t) \quad (6-5)$$

όπου,  $w_{rel}(x, t)$  είναι η βύθιση της δοκού. Το μέγεθος  $\varphi_j$  αναφέρεται στο μέρος της βύθισης που εξαρτάται από την εκάστοτε ιδιομορφή και  $\eta_j(t)$  είναι το κομμάτι της βύθισης που οφείλεται στο ασκούμενο μηχανικό φορτίο. Όπως και προηγουμένως, για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας το άθροισμα εκφυλλίζεται σε τον πρώτο όρο του αρχικού αθροίσματος.

Οι παράμετροι που αφορούν την γεωμετρία και τις ηλεκτρικές ιδιότητες του συστήματος είναι γνωστές. Πρέπει, λοιπόν, να προσδιοριστούν οι παράγωγοι των μεγεθών που συνδέονται με την βύθιση του δοκιμίου. Οι τιμές της παραγώγου  $\varphi'(x)$  μπορούν να προσδιοριστούν με χρήση ενός πακέτου πεπερασμένων στοιχείων όπως το Abaqus. Στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, οι τιμές ελήφθησαν με χρήση του κώδικα των Plagiannakos και Sarvanos [9].

Όσον αφορά το μέγεθος  $\eta$  αυτό προσδιορίζεται από την διαφορική εξίσωση που ακολουθεί.

$$[M_{ffmod}] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [K_{ffmod}] \cdot \{\eta\} = \{F_{sfmod}\} \cdot u \quad (6-6)$$

Τα μητρώα  $[M_{ffmod}]$ ,  $[K_{ffmod}]$  και το διάνυσμα  $\{F_{sfmod}\}$  αντιστοιχούν στη μάζα και την ελαστικότητα του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και την προσαρμογή της μοναδιαίας δύναμης αντίστοιχα. Η προέλευση της εξίσωσης αυτής επεξηγείται στην Παράγραφο 2.2.2. Για την εξίσωση αυτή πρέπει να ανφερθεί ότι τα μητρώα και τα

διανύσματα έχουν εκφυλλιστεί σε αριθμούς λόγω της παραδοχής ότι η μόνη ιδιοσυχνότητα που επηρεάζει το φαινόμενο είναι η πρώτη.

Επιλύοντας την εξίσωση αυτή, προκύπτει η συνάρτηση του μεγέθους  $\eta$  ως προς τον χρόνο. Με παραγωγή της συνάρτησης αυτής προκύπτει η ζητούμενη παράγωγος  $\dot{\eta}(t)$ .

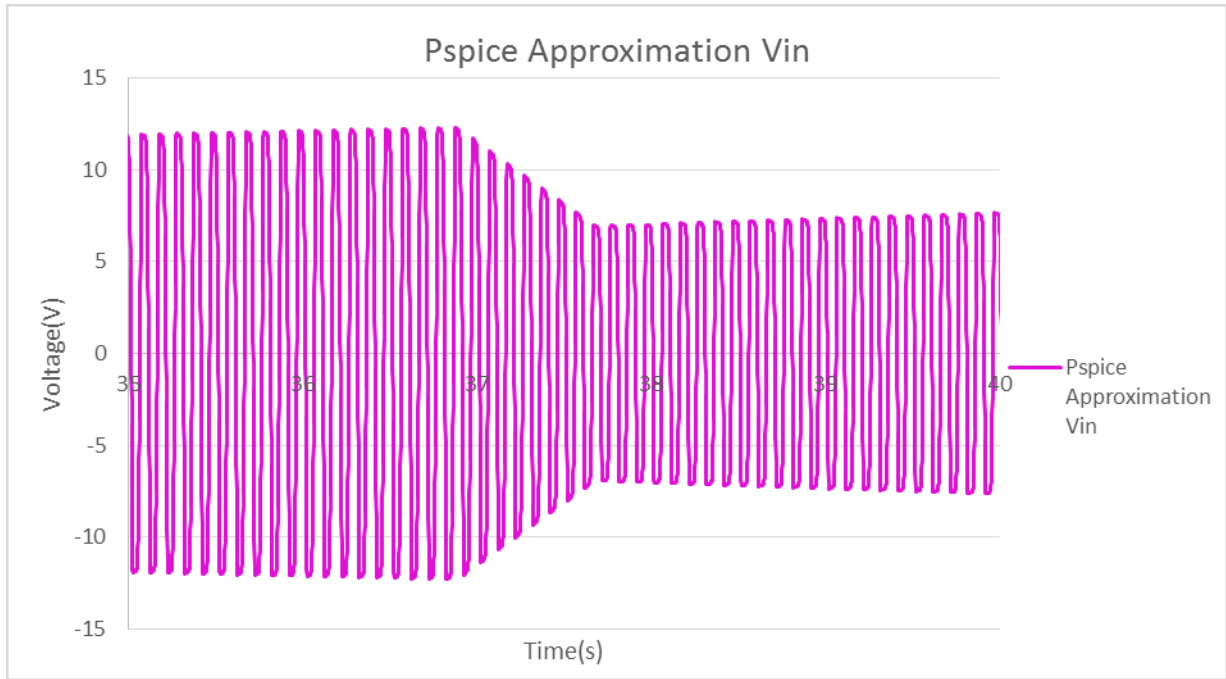
Πλέον όλα τα μεγέθη είναι γνωστά και επομένως η ένταση της πηγής ρεύματος, για ασκούμενο μηχανικό φορτίο με πλάτος 2.5N και συχνότητα 10Hz είναι ίση με:

$$i_p(t) = 147\mu A \cdot \sin(2\pi \cdot 10 \cdot t)$$

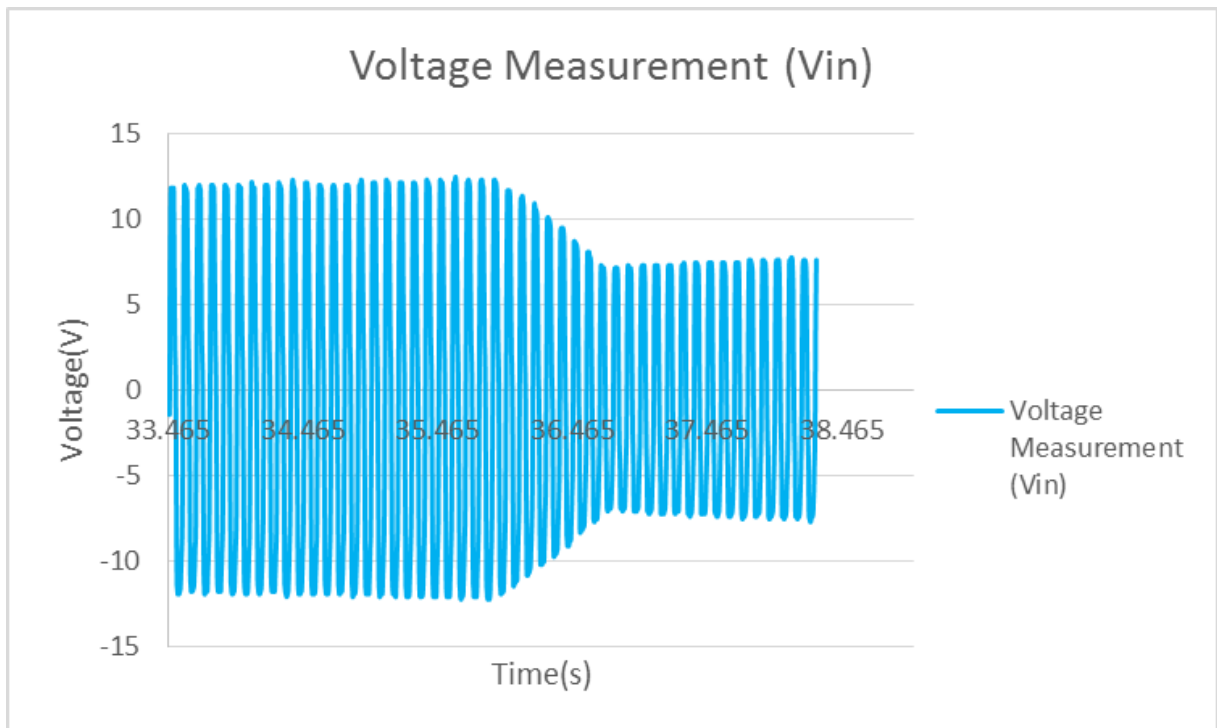
### 6.2.3 Πρόβλεψη απόκρισης συνολικού συστήματος με χρήση του μοντέλου στο Pspice

Στην παράγραφο 6.2.1, ολοκληρώθηκε το μοντέλο στο Abaqus με σκοπό την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος δοκίμιο-πιεζοηλεκτρικό επίθεμα σε ένα μεγάλο εύρος μηχανικών φορτίων. Στην συνέχεια, χρησιμοποιήθηκαν μαθηματικές εξισώσεις από την βιβλιογραφία που αντλούν πληροφορίες από το μοντέλο των πεπερασμένων στοιχείων ώστε αυτές να χρησιμοποιηθούν ως είσοδος στο μοντέλο του ηλεκτρικού κυκλώματος στο Pspice. Συγκεκριμένα, η είσοδος του μοντέλου στο Pspice είναι η χρονική κατανομή του ρεύματος που παράγεται από την αντίστοιχη πηγή και η χωρητικότητα του πυκνωτή του ισοδύναμου κυκλώματος του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Έχοντας παραγματοποιήσει την παραπάνω ανάλυση, αυτό που μένει είναι να συγκριθούν η πειραματική απόκριση του συστήματος όταν η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας είναι συνδεδεμένη με το υπόλοιπο σύστημα, με αυτήν που προκύπτει από την χρήση της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

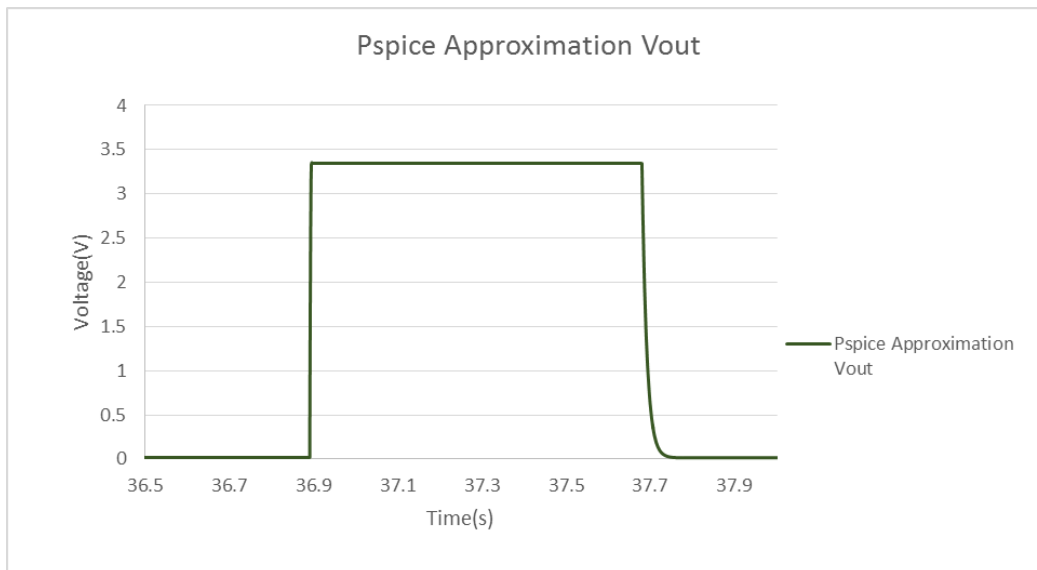
Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνεται η απόκριση του συνολικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη ημιτονοειδούς μορφής με συχνότητα 10 Hz και πλάτος 2.5N. Το Σχήμα 6-7 απεικονίζει την εκτίμηση της τάσης εισόδου ( $V_{in}$ ) στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας όπως προκύπτει από το μοντέλο στο Pspice και το Σχήμα 6-9 απεικονίζει την τάση εξόδου ( $V_{out}$ ). Τα αποτελέσματα αυτά συγκρίνονται με τις αντίστοιχες πειραματικές μετρήσεις που φαίνονται στο Σχήμα 6-8 και το Σχήμα 6-10.



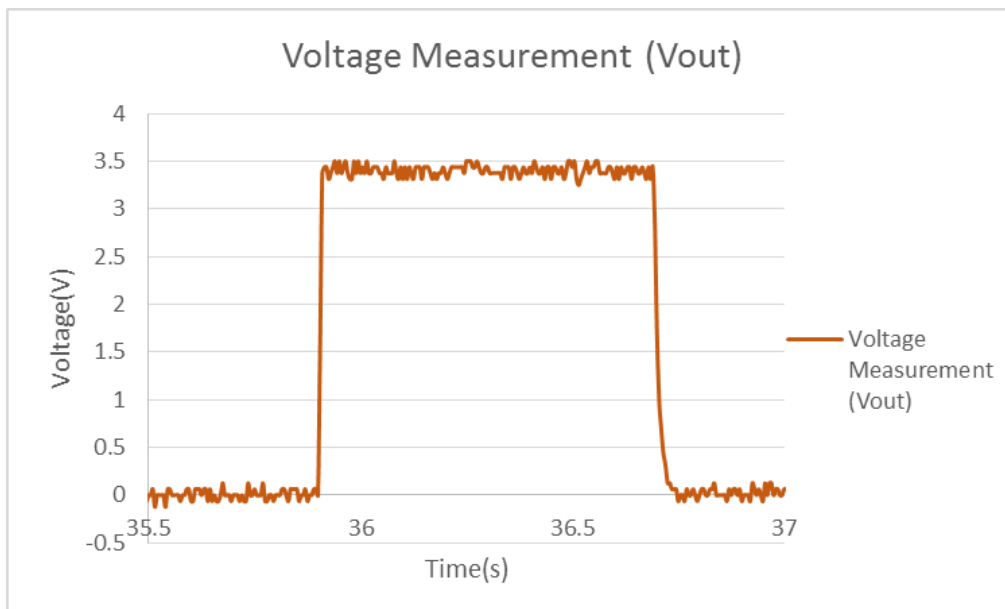
Σχήμα 6-7. Εκτίμηση τάσης εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N.



Σχήμα 6-8. Μέτρηση τάσης εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N.



**Σχήμα 6-9. Εκτίμηση τάσης εξόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N.**



**Σχήμα 6-10. Μέτρηση τάσης εξοδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας για δύναμη 2.5N.**

Συγκρίνοντας τα παραπάνω σχήματα, είναι φανερό ότι η μέθοδος που έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση του συνολικού συστήματος για ένα δεδομένο μηχανικό φορτίο. Το συμπέρασμα αυτό προκύπτει καθώς το μοντέλο αποδίδει με ακρίβεια την μορφή και το μέγεθος του δυναμικού που παράγεται από το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα αλλά και της τάσης που εξέρχεται από το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας. Επιπλέον, ο πρώτος παλμός εξόδου από την πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας εμφανίζεται στα 35.9s στις πειραματικές μετρήσεις, ενώ το μοντέλο προβλέπει την εμφάνισή του στα 36.8s. Η διαφορά αυτή είναι γενικά αποδεκτή και επομένως, η μέθοδος που περιγράφηκε θεωρείται επιτυχημένη.

#### 6.2.4 Εκτίμηση βαθμού απόδοσης του συστήματος

Επειδή η είσοδος του συστήματος, δηλαδή το μηχανικό φορτίο τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια το σύστημα ενώ η έξοδος του εμφανίζεται με διακριτό τρόπο, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος είναι δύσκολο να υπολογιστεί με άμεσο τρόπο. Ωστόσο, είναι σημαντικό να υπάρχει μια αίσθηση για το ποσοστό της μηχανικής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική και μπορεί να αποθηκευτεί στην έξοδο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε να ληφθεί η απόφαση για το κατά πόσο η χρήση του συστήματος αυτού είναι συμφέρουσα. Για το λόγο αυτό ο βαθμός απόδοσης ορίζεται για μία ώρα λειτουργίας. Ο βαθμός απόδοσης είναι, λοιπόν, το πηλίκο με αριθμητή την ηλεκτρική ενέργεια που λαμβάνεται στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας επί τον χρόνο για τον οποίο αυτή εμφανίζεται και παρονομαστή την μηχανική ενέργεια που προσφέρεται επί την μία ώρα λειτουργίας. Τελικά, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος υπολογίζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\eta = \frac{E_{out} \cdot \Delta t \cdot N}{E_{μηχ} \cdot 3600s} \quad (6-7)$$

όπου,  $E_{out}$  είναι η αξιοποιήσιμη ενέργεια στην έξοδο του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας και  $\Delta t \cdot N$  είναι ο συνολικός χρόνος εμφάνισης. Πιο συγκεκριμένα,  $\Delta t$  είναι το χρονικό διάστημα που διαρκεί ένας παλμός εξόδου και  $N$  είναι ο αριθμός των παλμών εξόδου που εμφανίζονται σε μία ώρα συνεχούς λειτουργίας του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. Ακόμα,  $E_{μηχ}$  είναι η RMS τιμή της μηχανικής ενέργειας που προσφέρεται στο σύστημα.

Για τον παλμό εξόδου είναι γνωστό πως έχει σταθερή διάρκεια ίση με 0.8s. Οι φορές που εμφανίζεται ένας τέτοιος παλμός σε μία ώρα λειτουργίας υπό φορτίο σταθερού πλάτους και συχνότητας, υπολογίζεται ως εξής. Είναι γνωστό από το μοντέλο στο Abaqus ότι το χρονικό διάστημα ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς παλμούς εξόδου, υπό τις παραπάνω συνθήκες, είναι σταθερό και ίσο με 22s. Ο χρόνος αυτός είναι μικρότερος από τον χρόνο της πρώτης φόρτισης καθώς ο πυκνωτής δεν αποφορτίζεται πλήρως ανάμεσα σε δύο διαδοχικούς παλμούς. Άρα, αν αφαιρεθεί ο χρόνος εμφάνισης του πρώτου παλμού από την μία ώρα λειτουργίας και η διαφορά αυτή διαρευθεί με τα 22s, τότε υπολογίζεται ο αριθμός των εμφανίσεων του παλμού εξόδου χωρίς να προσμετράται η πρώτη εμφάνιση. Άρα, τελικά, προκύπτει:

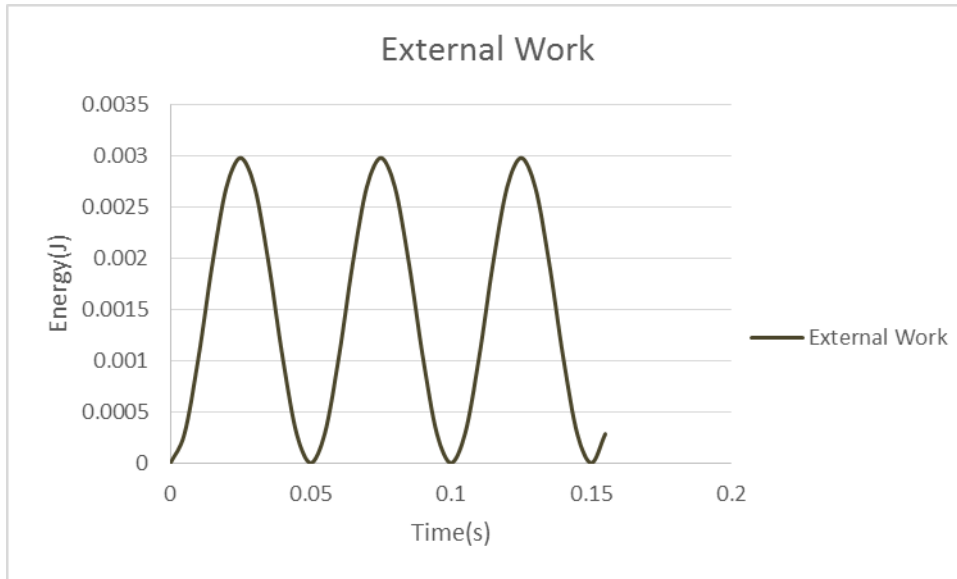
$$N = \frac{3600 - 36}{22} + 1 = 163 \text{ φορές}$$

Η ενέργεια που είναι διαθέσιμη στην έξοδο της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας υπολογίζεται ως εξής:

$$E_{out} = \frac{1}{2} \cdot C_3 \cdot (V_{C_3,max}^2 - V_{C_3,min}^2) = 8.7 \text{ mJ}$$

όπου,  $C_3$  η χωρητικότητα του πυκνωτή που αναφέρθηκε στο μοντέλο του Pspice, και  $V_{C_3,max}$ ,  $V_{C_3,min}$  η μέγιστη τιμή της τάσης που επιτυγχάνεται κατά την διάρκεια της φόρτισης και η ελάχιστη τιμή της τάσης που επιτυγχάνεται κατά την διάρκεια της αποφόρτισης, στον ίδιο πυκνωτή, αντίστοιχα.

Η προσφερόμενη μηχανική ενέργεια μπορεί να απεικονιστεί ως συνάρτηση του χρόνου με χρήση του μοντέλου στο Abaqus. Στο Σχήμα 6-11 φαίνεται η απεικόνιση αυτή.



**Σχήμα 6-11. Προσφερόμενη μηχανική ενέργεια ως συνάρτηση του χρόνου από μοντέλο στο Abaqus.**

Παρατηρείται ότι το έργο που προσφέρεται στο σύστημα έχει περιοδική μορφή με πλάτος τα 3mJ. Για το λόγο αυτό ως  $E_{μηχ}$  χρησιμοποιείται η RMS τιμή της, η οποία ισούται με το μέγιστο πλάτος δια τον όρο  $\sqrt{2}$ .

Άρα, με βάση όλα τα παραπάνω, τελικά, ο βαθμός απόδοσης είναι:

$$\eta = \frac{8.7 \text{ mJ} \cdot 0.8 \text{ sec} \cdot 163 \text{ φορές}}{\frac{3}{\sqrt{2}} \text{ mJ} \cdot 3600 \text{ sec}} = 14.9\%$$

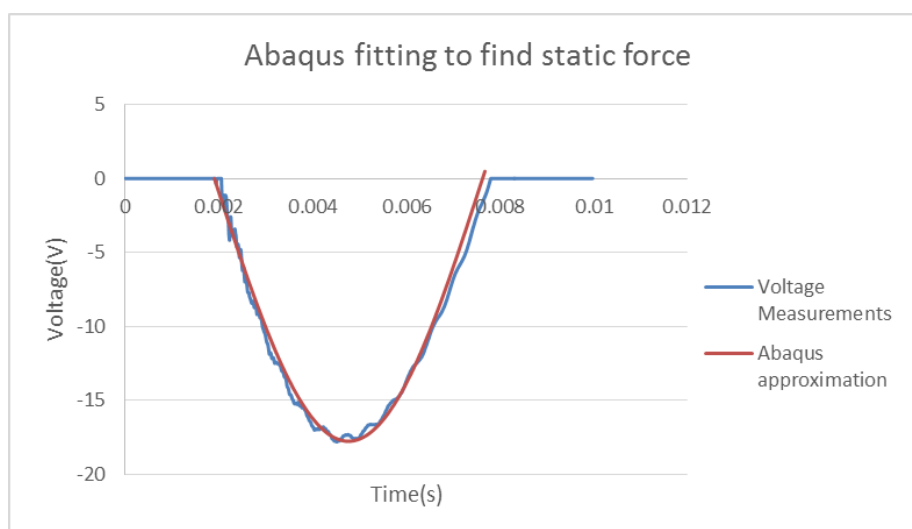
Ο παραπάνω βαθμός απόδοσης κρίνεται ικανοποιητικός. Ωστόσο, λόγω του έμμεσου τρόπου με τον οποίο έχει οριστεί, δεν είναι απευθείας συγκρίσιμος με τους βαθμούς απόδοσης άλλων μεθόδων αποθήκευσης ενέργειας. Το συγκριτικό πλεονέκτημα της αποθήκευσης ενέργειας με πιεζοηλεκτρικό αισθητήρα και πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας είναι ότι σε πολλές εφαρμογές δεν υπάρχει εναλλακτικός τρόπος εκμετάλλευσης ενέργειας η οποία διαφορετικά θα παρέμενε αναξιοποίητη.

### 6.3 Αποτελέσματα μελέτης αποθήκευσης ενέργειας από κρουστικό φορτίο

Η μεθοδολογία που ακολουθείται για την μελέτη της αποθήκευσης ενέργειας όταν στο σύστημα ασκείται κρουστικό φορτίο έχει παρουσιαστεί στην Παράγραφο 5.5. Αρχικά, θεωρείται ότι η κρούση μπορεί να προσεγγιστεί ως μία εξαναγκασμένη ταλάντωση της οποίας η διάρκεια είναι ίση με την μισή περίοδο ενός ημιτόνου. Στην συνέχεια, θα πρέπει να υπολογιστεί η ισοδύναμη στατική δύναμη η οποία προκαλεί την ίδια ηλεκτρική τάση στους ακροδέκτες του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος με αυτήν που έχει μετρηθεί και φαίνεται στο Σχήμα 5-6. Η στατική δύναμη, που υπολογίστηκε, χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της έντασης της πηγής ρεύματος που περιέχεται στο ισοδύναμο ηλεκτρικό μοντέλο του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος. Για να πραγματοποιηθεί αυτό χρησιμοποιούνται οι εξισώσεις της Παραγράφου 2.3.2 όπως ακριβώς συνέβει και στην περίπτωση του ημιτονοειδούς φορτίου. Έπειτα, με βάση το υπάρχον μοντέλο στο Pspice ελέγχεται η λειτουργικότητα του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας. Επειδή, στην συγκεκριμένη εφαρμογή, η πλακέτα δεν μπορεί να αποδώσει ενέργεια υπό τις συνθήκες της κρούσης, το μοντέλο στο Pspice χρησιμοποιείται ως σχεδιαστικό εργαλείο για να προταθούν οι αλλαγές εκείνες στο υπάρχον κύκλωμα που θα οδηγήσουν στην επιτυχή αποθήκευση ενέργειας.

#### 6.3.1 Εύρεση ισοδύναμης στατικής δύναμης μέσω του μοντέλου στο Abaqus

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.6, η κρούση είναι ένα δυναμικό φαινόμενο. Όμως, σε περιπτώσεις όπως αυτή που μελετάται στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας, η απόκριση του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος, κατά την διάρκεια της κρούσης, μπορεί να αποδοθεί σε μια ισοδύναμη στατική δύναμη. Η δύναμη αυτή μπορεί να προσδιοριστεί με δοκιμές μέσω του μοντέλου που έχει ήδη δημιουργηθεί στο Abaqus. Κατά αυτόν τον τρόπο, στο μοντέλο του Abaqus εισάγονται διαφορετικά φορτία μέχρι να επιτευχθεί μια έξοδος που να προσεγγίζει την μέτρηση της παραγόμενης τάσης στο Σχήμα 5-6. Στο Σχήμα 6-12 φαίνεται η προσέγγιση που έχει επιτευχθεί με την παραπάνω διαδικασία.



Σχήμα 6-12. Προσέγγιση τάσης μετρήσεων με ισοδύναμη στατική δύναμη στο μοντέλο του Abaqus.



Είναι εμφανές ότι η προσέγγιση επιτυγχάνεται σε ικανοποιητικό βαθμό. Η στατική δύναμη που οδηγεί στην παραπάνω προσέγγιση έχει πλάτος 2.7N. Η μορφή της δύναμης αυτής αντιστοιχεί σε μια ημιτονοειδή συνάρτηση με συχνότητα 87.34Hz και χρονική διάρκεια μισής περιόδου.

### 6.3.2 Προσδιορισμός παραμέτρων του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος κατά την αποθήκευση ενέργειας από κρουστικό φορτίο

Όπως και στην μελέτη αποθήκευσης ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο, έτσι και σε αυτήν την εφαρμογή το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μοντελοποιείται ως μια πηγή ρεύματος που συνδέεται παράλληλα με έναν πυκνωτή. Ο τρόπος με τον οποίο υπολογίζονται η ένταση της πηγής ρεύματος και η χωρητικότητα του πυκνωτή είναι τελείως ανάλογος με αυτόν που παρουσιάστηκε στην Παράγραφο 6.2.2. Οι εξισώσεις από τις οποίες προκύπτουν τα δύο αυτά μεγέθη είναι και πάλι οι Εξισώσεις (6-1) και (6-2) αντίστοιχα.

$$C_{\bar{p}} = \frac{\bar{\epsilon}_{33}^S \cdot b \cdot L}{h_{\bar{p}}}, \quad (6-8)$$

$$i_{\bar{p}}(t) = - \sum_{j=1}^{\infty} \kappa_j \cdot \frac{d\eta_j(t)}{dt} \quad (6-9)$$

Η χωρητικότητα του πυκνωτή δεν μεταβάλλεται σε σχέση με την προηγούμενη εφαρμογή, αφού τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και η διηλεκτρική σταθερά του δοκιμίου δεν έχουν αλλάξει. Επομένως, ισχύει:

$$C_{\bar{p}} = 101nF$$

Αναφορικά με την Εξίσωση (6-9), θα πρέπει να αναφερθεί ότι και πάλι εφαρμόζεται η παραδοχή ότι η απόκριση εξαρτάται μόνο από την πρώτη ιδιομορφή του συστήματος και άρα μεταπίπτει στην εξής μορφή:

$$i_{\bar{p}}(t) = \kappa_1 \cdot \frac{d\eta_1(t)}{dt} \quad (6-10)$$

Ακόμα, θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο όρος σύζευξης παραμένει ο ίδιος αφού η ιδιομορφή του συστήματος δεν επηρεάζεται από το είδος του φορτίου. Αυτό σημαίνει πως το επιλυτικό ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στην εξίσωση που ακολουθεί από την οποία υπολογίζεται το μέγεθος  $\eta$ .

$$[M_{ffmod}] \cdot \{\ddot{\eta}\} + [K_{ffmod}] \cdot \{\eta\} = \{F_{sfmod}\} \cdot u \quad (6-11)$$

Τα μητρώα μάζας και ελαστικότητας και το διάνυσμα της προσαρμογής της μοναδιαίας δύναμης εκφυλλίζονται και πάλι σε αριθμούς. Αυτό που διαφέρει είναι η είσοδος  $u$ . Η είσοδος προσδιορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Με βάση τα παραπάνω, η ένταση της πηγής ρεύματος είναι ίση με:

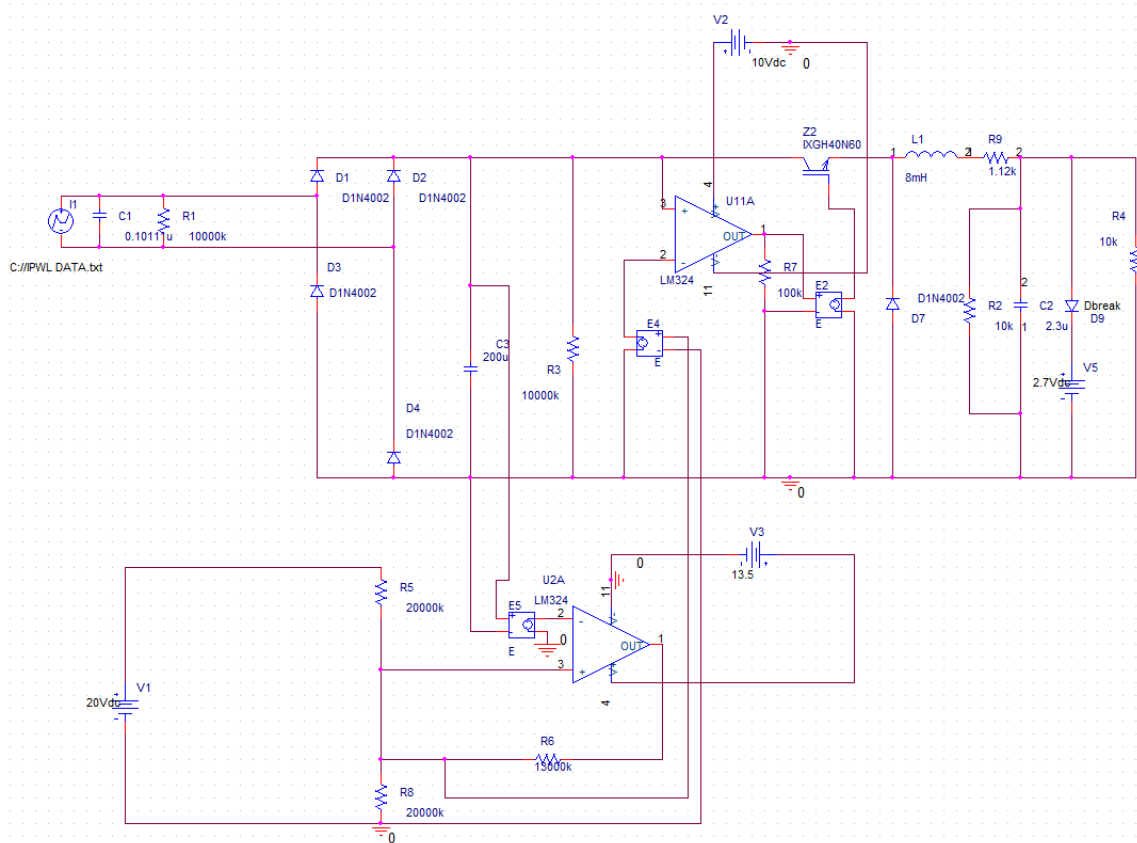
$$i_p(t) = 2.3825mA \cdot \sin(2\pi \cdot 87.34 \cdot t)$$

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σημαντική παρατήρηση. Η διαφορική που λύνεται στο πλαίσιο της διπλωματικής αυτής, δεν περιέχει όρους απόσβεσης. Αυτό σημαίνει πως αν η απόκριση μιας κρούσης έχει συχνότητα κοντά στην ιδιοσυχνότητα του συστήματος, η οποία είναι 134Hz, τότε το ρεύμα που θα υπολογιστεί θα είναι άπειρο κάτι που δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα. Η συχνότητα της κρούσης που μελετάται, όμως, είναι επαρκώς μακριά από την ιδιοσυχνότητα, επομένως τα αποτελέσματα που προκύπτουν δεν είναι εσφαλμένα.

### 6.3.3 Έλεγχος λειτουργικότητας υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας σε συνθήκες κρούσης

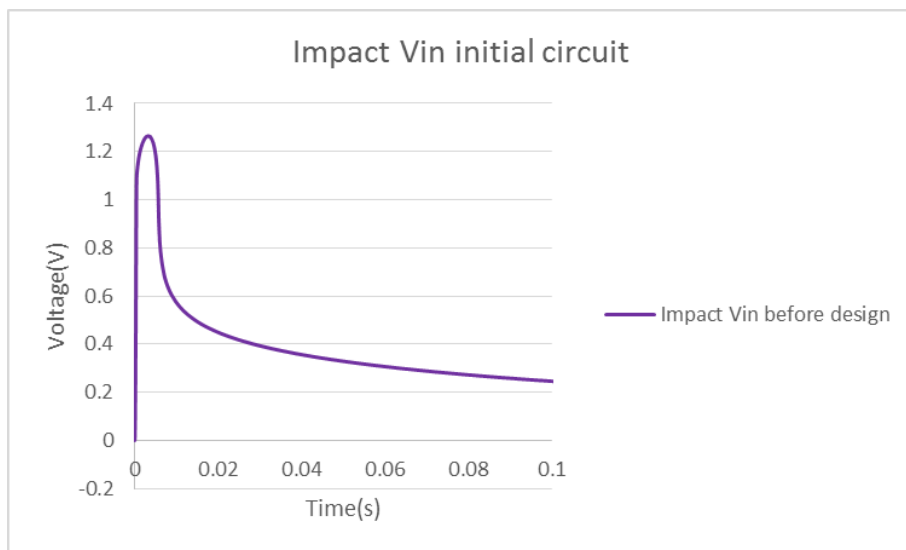
Έχοντας υπολογίσει την ένταση της πηγής ρεύματος και την χωρητικότητα του πυκνωτή που μοντελοποιούν το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, είναι πλέον δυνατή η χρήση του μοντέλου στο Pspice για την πρόβλεψη της απόκρισης του συνολικού συστήματος. Αν αποδειχθεί ότι υπάρχει παλμός εξόδου για το συγκεκριμένο κρουστικό φορτίο, αυτό σημαίνει ότι η υπάρχουσα πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας επαρκεί για την εκμετάλλευση της ενέργειας που δημιουργείται από την ταλάντωση του δοκιμίου. Αν, ωστόσο, δεν εμφανιστεί παλμός εξόδου τότε αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι κατάλληλα ρυθμισμένες για μια τέτοια εφαρμογή. Κατά αυτόν τον τρόπο, πραγματοποιείται ο έλεγχος της λειτουργικότητας της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο Pspice για την διενέργεια του παραπάνω ελέγχου, είναι ίδιο με αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην μελέτη αποθήκευσης ενέργειας από ημιτονοειδές φορτίο. Η μόνη διαφορά είναι ότι χρησιμοποιείται η πηγή ρεύματος IPWL\_FILE (βλέπε Παράγραφο 5.7.1). Η πηγή αυτή αποδίδει ρεύμα σύμφωνα με τα στοιχεία που περιέχονται σε ένα επιλεγμένο από τον χρήστη αρχείο txt. Για το λόγο αυτό, έχει δημιουργηθεί το αντίστοιχο αρχείο εντός του οποίου υπάρχουν τα δεδομένα που αποδίδουν την ένταση της πηγής ρεύματος ως συνάρτηση του χρόνου σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Στο Σχήμα 6-13 απεικονίζεται το πλήρες μοντέλο στο Pspice που χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της λειτουργικότητας.

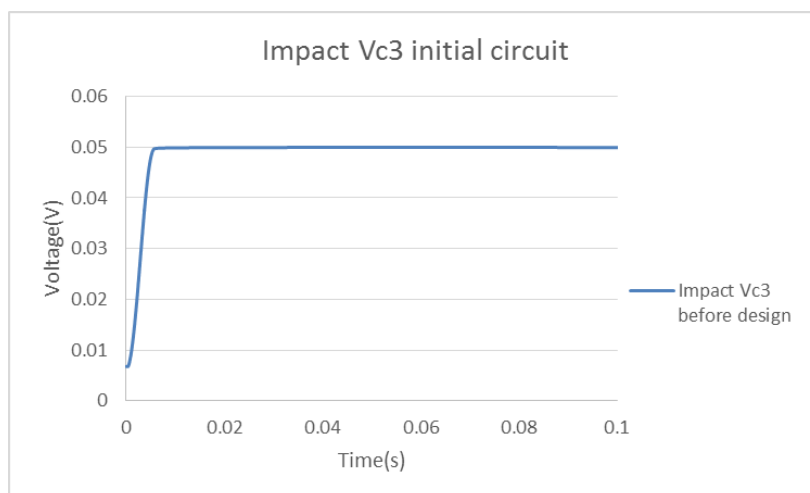


**Σχήμα 6-13. Πλήρες μοντέλο στο Pspice για τον έλεγχο της λειτουργικότητας του υπάρχοντος κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας.**

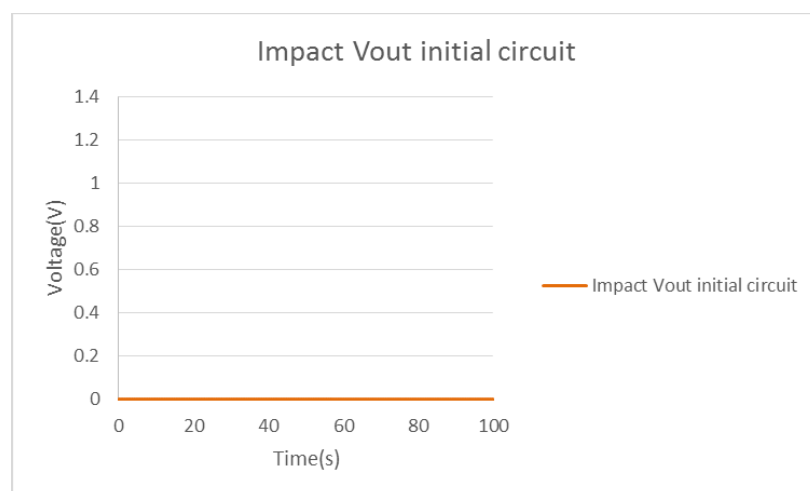
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το μοντέλο του Pspice, απεικονίζονται στο Σχήμα 6-14, το Σχήμα 6-15 και το Σχήμα 6-16, όπου φαίνεται η τάση εισόδου στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας, η τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 και η τάση εξόδου από την πλακέτα αντίστοιχα.



**Σχήμα 6-14. Τάση εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας.**



**Σχήμα 6-15. Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 του κυλώματος αποθήκευσης ενέργειας.**



**Σχήμα 6-16. Τάση εξόδου από το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας.**

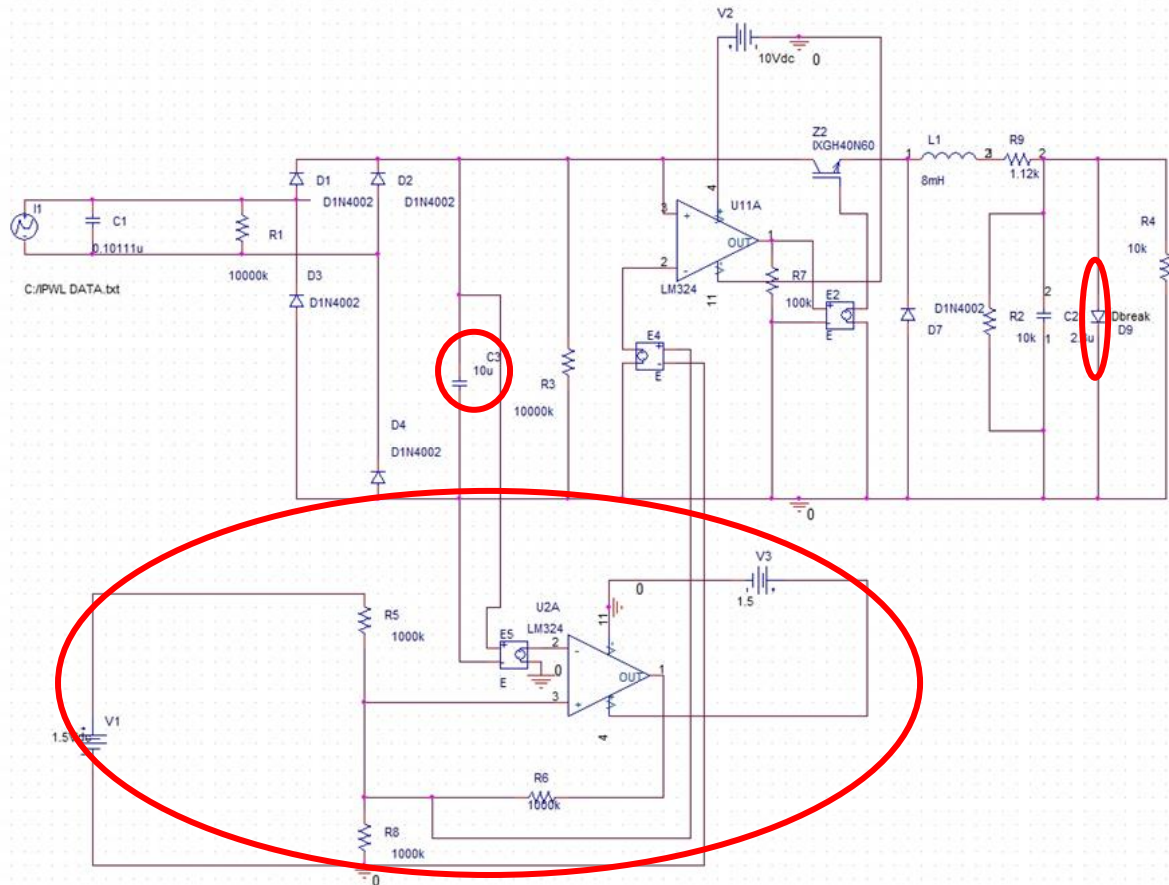
Επειδή το κρουστικό φορτίο δεν έχει την απαραίτητη χρονική διάρκεια για να ανεβάσει την τάση στους ακροδέκτες του κυκλώματος στα 12V, το οποίο είναι και το όριο για την απόδοση ενέργειας, από τα παραπάνω αποτελέσματα είναι εμφανές ότι δεν υπάρχει παλμός εξόδου. Αυτό είναι αναμενόμενο. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το υπάρχον κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι σχεδιασμένο για εφαρμογές όπως αυτή της κρούσης που μελετάται στο Κεφάλαιο 5.

#### **6.3.4 Επανασχεδιασμός κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας**

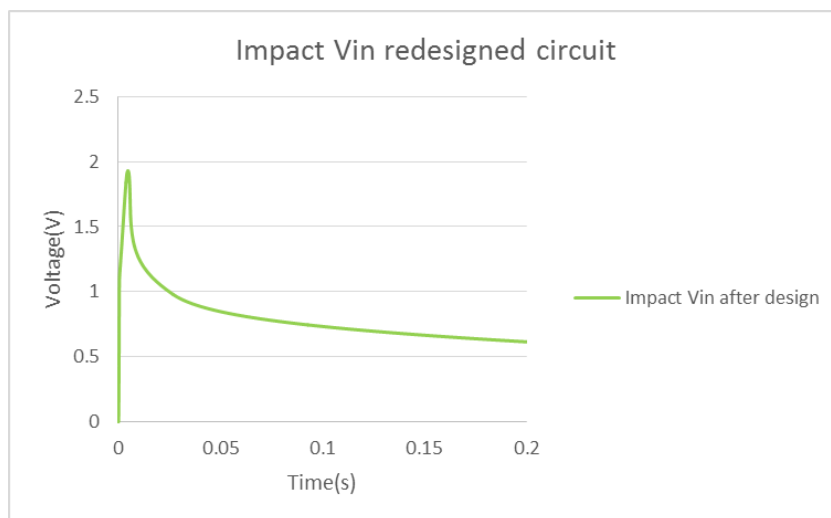
Τα αποτελέσματα της μέχρι τώρα ανάλυσης καταδεικνύουν ότι η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι κατάλληλη για τη συγκεκριμένη κρούση. Επομένως, θα ήταν χρήσιμο να προταθούν οι κατάλληλες αλλαγές που θα το καταστήσουν αποδοτικό. Για το λόγο αυτόν, το μοντέλο στο Pspice θα χρησιμοποιηθεί ως σχεδιαστικό εργαλείο όπως περιγράφεται στην Παράγραφο 5.7.2.

Στην συνέχεια, θα εξετασθεί η απόκριση του κυκλώματος εάν σε αυτό επιβληθούν οι ακόλουθες αλλαγές. Πρώτον, η χωρητικότητα του πυκνωτή C3 θα μεταβληθεί από τα

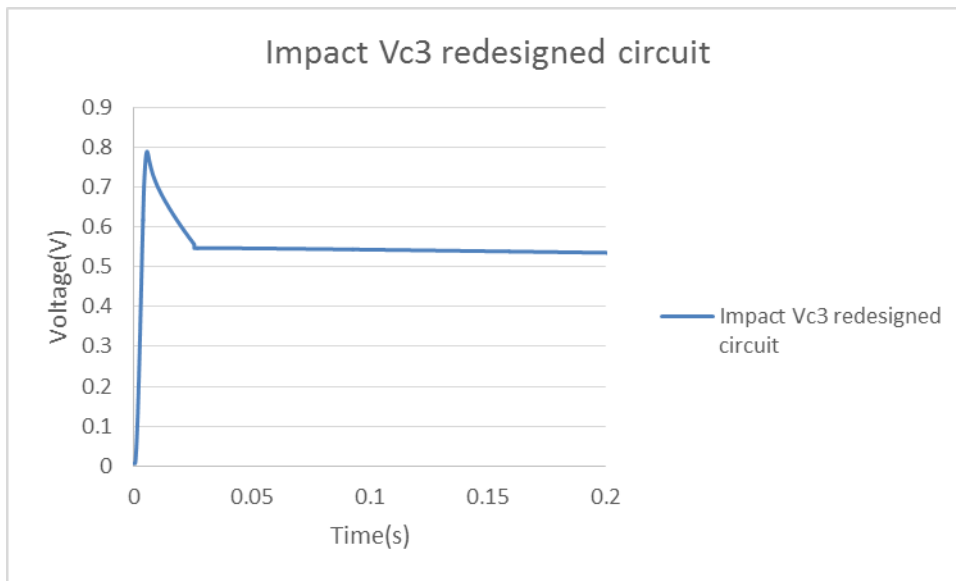
200μF στα 10 μF και δεύτερον τα όρια της τάσης για την φόρτιση και την αποφόρτιση του πυκνωτή C3 τίθενται στα 0.5V και τα 1.3V αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6-17 φαίνεται το κύκλωμα με τις αλλαγές που έχει υποστεί και στο Σχήμα 6-18, το Σχήμα 6-19 και το Σχήμα 6-20 απεικονίζονται η τάση εισόδου στην πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας και η τάση εξόδου από αυτήν αντίστοιχα.



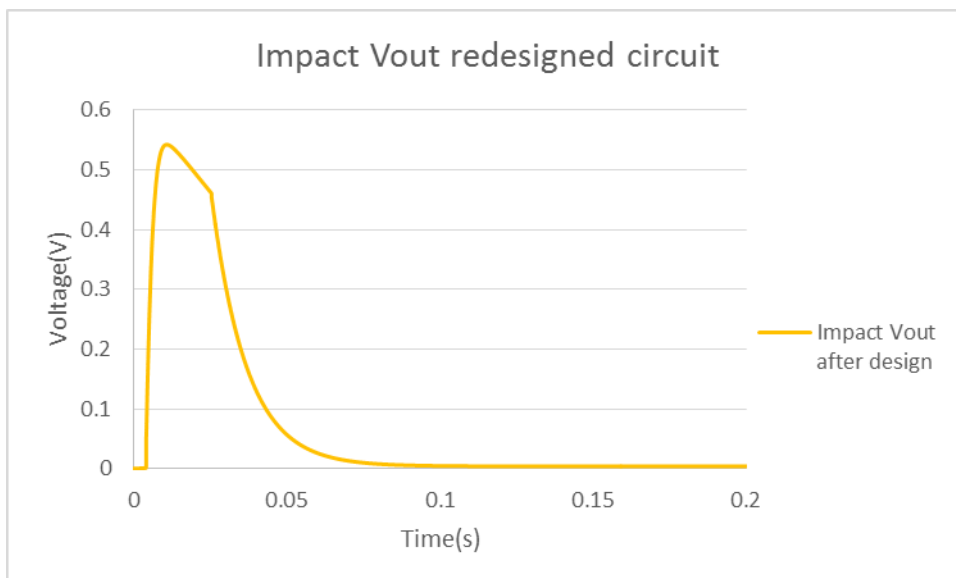
**Σχήμα 6-17. Αλλαγές στο υπάρχον κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας κατά την φάση του σχεδιασμού.**



**Σχήμα 6-18. Τάση εισόδου στο κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του.**



**Σχήμα 6-19. Τάση στα άκρα του πυκνωτή C3 του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του.**



**Σχήμα 6-20. Τάση εξόδου από το κύκλωμα αποθήκευσης ενέργειας μετά τον επανασχεδιασμό του.**

Παρατηρούμε ότι μετά τις παραπάνω αλλαγές, παρατηρείται η εμφάνιση παλμού εξόδου. Αυτό σημαίνει ότι ο επανασχεδιασμός του κυκλώματος κατέληξε σε ένα λειτουργικό κύκλωμα. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν πολλοί συνδυασμοί μετατροπών που θα μπορούσαν να αποδώσουν το επιθυμητό αποτέλεσμα. Η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού μεταβολών δεν είναι το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

Επιπλέον, αξίζει να σημειωθεί ότι στο συγκεκριμένο νέο κύκλωμα έχει μεταβληθεί και το υποκύκλωμα του voltage clipper γιατί η τάση εξόδου δεν ξεπερνάει τα 3.3V.

## 7 Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

Στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μελετήθηκε η απόκριση ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο εκμεταλλεύεται την μηχανική ενέργεια που εμπεριέχεται στην ταλάντωση μίας δοκού με χρήση πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Η απόκριση του συστήματος εξετάστηκε για τις περιπτώσεις που η δοκός δεχόταν ημιτονοειδές ή κρουστικό φορτίο. Για την πραγματοποίηση της μελέτης, αναπτύχθηκε μία μεθοδολογία η οποία περιελάμβανε την κατασκευή ενός μοντέλου του μηχανικού υποσυστήματος στο πακέτο πεπερασμένων στοιχείων Abaqus και ενός μοντέλου του ηλεκτρικού υποσυστήματος στο πρόγραμμα επίλυσης ηλεκτρικών κυκλωμάτων Pspice.

Το μοντέλο του μηχανικού υποσυστήματος προβλέπει την συμπεριφορά του συστήματος δοκού-πιεζοηλεκτρικού επιθέματος όταν η πλακέτα αποθήκευσης ενέργειας δεν είναι συνδεδεμένη με την υπόλοιπη διάταξη. Το μοντέλο αυτό δημιουργήθηκε, αρχικά, για την πρόβλεψη της απόκρισης του συστήματος όταν σε αυτό ασκείται ημιτονοειδές φορτίο. Για την κατασκευή του μοντέλου έχει γίνει η παραδοχή ότι η χρήση στατικού επιλύτη επαρκεί για την προσέγγιση αυτού του προβλήματος καθώς και ότι οι αποσβέσεις μπορούν να αμεληθούν λόγω της εξαναγκασμένης ταλάντωσης που λαμβάνει χώρα. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε περιπτώσεις κρούσεων οι οποίες χαρακτηρίζονται ως ημιστατικές με μεγάλη μάζα επικρουστήρα όπως αυτή που μελετάται στο Κεφάλαιο 5.

Το μοντέλο του ηλεκτρικού υποσυστήματος μπορεί να προβλέψει την απόκριση της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας για οποιαδήποτε ηλεκτρική είσοδο. Η είσοδος του, στη συγκεκριμένη εφαρμογή, είναι το ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα του επιθέματος. Οι παράμετροι του κυκλώματος αυτού προσδιορίζονται χάρη σε μαθηματικές εξισώσεις από την διεθνή βιβλιογραφία. Επιπλέον, το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει σχεδιαστικό εργαλείο για την τροποποίηση του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας, έτσι ώστε αυτό να είναι αποδοτικό στις εκάστοτε συνθήκες εργασίας του.

### 7.1 Συμπεράσματα

Με την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας, εξάγονται ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Το πρώτο εξ αυτών είναι ότι η μεθοδολογία, που αναπτύχθηκε, μπορεί να προβλέψει με ικανοποιητική ακρίβεια την απόκριση του συνολικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας πάρα την χρήση στατικού επιλύτη και την παραδοχή μη ύπαρξης αποσβέσεων.

Ακόμα, η ίδια μεθοδολογία μπορεί να παρέχει παραδεκτές εκτιμήσεις και σε ορισμένες περιπτώσεις κρούσης. Αυτό είναι δυνατό όταν η απόκριση του συστήματος λόγω κρούσης μπορεί να αποδοθεί σε μία αντίστοιχη αρμονική δύναμη και όταν η συχνότητα της προς εξέταση απόκρισης δεν ταυτίζεται με κάποια ιδιομορφή του συστήματος.

Το επόμενο συμπέρασμα, αφορά την λειτουργία της πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Τόσο οι πειραματικές μετρήσεις όσο και τα υπολογιστικά αποτελέσματα, καταδεικνύουν ότι για την αποτελεσματική χρήση της πλακέτας, το επιβαλλόμενο φορτίο

πρέπει να είναι ικανό να φορτίσει τον πυκνωτή της πλακέτας έτσι ώστε η τάση στους ακροδέκτες του να ανέλθει στα 12V. Αυτό σημαίνει ότι όχι μόνο θα πρέπει το μέγεθος του επιβαλλόμενου φορτίου να είναι αρκούντως μεγάλο, αλλά θα πρέπει, επίσης το φορτίο να έχει μεγάλη χρονική διάρκεια. Αν αυτές οι δύο προϋποθέσεις τηρούνται τότε η αποθήκευση ενέργειας ολοκληρώνεται επιτυχώς.

Συνεπώς το τέταρτο συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι η συγκεκριμένη πλακέτα δεν είναι κατάλληλα ρυθμισμένη για την εκμετάλλευση ενέργειας σε εφαρμογές όπου το φορτίο χαρακτηρίζεται από μικρότερα χρονικά διαστήματα εμφάνισης όπως συμβαίνει στις κρούσεις. Προκειμένου το σύστημα να καταστεί αποδοτικό σε συνθήκες κρούσης θα πρέπει να τροποποιηθούν οι κατάλληλες σταθερές του κυκλώματος αποθήκευσης ενέργειας.

Η σκέψη αυτή οδηγεί στο τελευταίο συμπέρασμα, το οποίο έχει ιδιαίτερη σημασία. Το μοντέλο που έχει δημιουργηθεί στο Pspice έχει την ικανότητα να δέχεται τροποποιήσεις. Αυτό το στοιχείο, το καθιστά κατάλληλο να λειτουργεί και ως σχεδιαστικό εργαλείο, καθώς ο χρήστης του μπορεί να αλλάζει τις παραμέτρους του κυκλώματος έως ότου καταλήξει στο κύκλωμα εκείνο που εξυπηρετεί καλύτερα την εφαρμογή του.

Επομένως, στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής έχει πραγματοποιηθεί μια καλή πρώτη προσέγγιση της εκμετάλλευσης ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή ανοίγει το δρόμο για την περαιτέρω διερεύνηση αυτού του επιστημονικού πεδίου.

## **7.2 Μελλοντική Εργασία**

Η μελλοντική εργασία που μπορεί να υλοποιηθεί πλέον, αφορά τόσο την βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας όσο και την μελέτη της λειτουργίας των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων σε άλλες διατάξεις είτε με τον ρόλο του αισθητήρα είτε με αυτόν του επενεργητή.

Η βελτίωση της υπάρχουσας μεθοδολογίας εστιάζει περισσότερο στην δημιουργία ενός μοντέλου που λαμβάνει υπόψη τις υπάρχουσες αποσβέσεις και χρησιμοποιεί δυναμικό επιλύτη. Ένα τέτοιο μοντέλο υπόσχεται την ακριβέστερη πρόβλεψη της αποθήκευσης ενέργειας λόγω ημιτονοειδούς φορτίου. Ταυτοχρόνως, καθιστά δυνατή την πρόβλεψη της απόκρισης του συνολικού συστήματος μόνο με την μέτρηση του επιβαλλόμενου κρουστικού φορτίου και σε περιπτώσεις κρούσεων που δεν χαρακτηρίζονται ως ημιστατικές.

Όσον αφορά την διεύρυνση του πεδίου μελέτης, οι δυνατότητες που υπάρχουν είναι πολλές. Πρώτον, είναι δυνατό να μελετηθεί η εκμετάλλευση ενέργειας μέσω πιεζοηλεκτρικού επιθέματος και πλακέτας αποθήκευσης ενέργειας και σε δοκίμια με διαφορετικές μορφές όπως παραδείγματος χάρη σε μία πλάκα.

Επίσης, το ίδιο σύστημα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και για την αποστολή ασύρματων σημάτων. Δηλαδή, αν σε μία εφαρμογή υπάρχει κίνδυνος το δοκίμιο που χρησιμοποιείται να αστοχήσει λόγω των μηχανικών φορτίων που δέχεται, τότε το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα μπορεί να ενεργοποιεί ένα σύστημα που θα προειδοποιεί για την εμφάνιση του κινδύνου αυτού.



Τέλος, το πιεζοηλεκτρικό επίθεμα, λόγω της διπλής του φύσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως επενεργητής σε εφαρμογές που είναι απαραίτητη η ελεγχόμενη απόσβεση των δονήσεων που δέχεται μία κατασκευή.

Αυτές είναι μόνο κάποιες από τις πιθανές εφαρμογές των πιεζοηλεκτρικών στοιχείων και αυτό αποδεικνύει τις ανεξάντλητες δυνατότητες περαιτέρω μελέτης αυτού του επιστημονικού πεδίου.

## 8 Βιβλιογραφία

- [1] Chandrasekharan, Nataraj, Jaehyung Ju, and Lonny Thompson. "Effects of Geometric and Material Properties on Electrical Power Harvested From a Bimorph Piezoelectric Cantilever Beam." Volume 1: *23rd Biennial Conference on Mechanical Vibration and Noise*, Parts A and B (2011): n. pag. Web.
- [2] Chrysochoidis, Nikolaos, Eugenio Gutierrez, and Graziano Renaldi. "Evaluation of the Performance of an Energy Harvesting Chain Based on Piezopolymer Sensors." *Structural Health Monitoring 2015* (2015): n. pag. Web.
- [3] Erturk, Alper, and Daniel J. Inman. *Piezoelectric Energy Harvesting*. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. Print.
- [4] Guan, M. J., and W. H. Liao. "On the Efficiencies of Piezoelectric Energy Harvesting Circuits towards Storage Device Voltages." *Smart Materials and Structures* 16.2 (2007): 498-505. Web.
- [5] Kim, Heung Soo, Joo Hyong Kim, and Jaehwan Kim. "A Review of Piezoelectric Energy Harvesting Based on Vibration." *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12.6 (2011): 1129-141. Print.
- [6] Kwon, Young W., and Hyochoong Bang. *The Finite Element Method Using MATLAB*. Boca Raton, FL: CRC, 2000. Print.
- [7] Lika K, 2013."Σχεδιασμός και κατασκευή αισθητήρα δύναμης/ροπής 5 αξόνων." *Διπλωματική Εργασία*, Εργαστήριο Αυτομάτου Ελέγχου - Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ.
- [8] Plagianakos, Theofanis S., Klajd Lika, and Evangelos G. Papadopoulos. "Low-velocity Impact Response of Smart Sandwich Composite Plates with Piezoelectric Transducers: Modeling and Experiments." *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 27.6 (2016): 774-85. Web.
- [9] Plagianakos, Theofanis S. and Dimitris A. Saravanos, 2008. "Coupled high-order layerwise laminate theory for sandwich composite plates with piezoelectric actuators and sensors." *19th International Conference on Adaptive Structures Technologies (ICAST 2008)*, Ascona, CH.
- [10] Thomson, William Tyrrell., and Marie Dillon. Dahleh. *Theory of Vibration with Applications*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2014. Print.
- [11] Yigit, A.s., and A.p. Christoforou. "Impact Dynamics of Composite Beams." *Composite Structures* 32.1-4 (1995): 187-95. Web.

## 9 Παράρτημα Α

### 9.1 LabVIEW

Το LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) είναι μία πλατφόρμα σχεδιασμού συστημάτων και ταυτόχρονα ένα περιβάλλον γραφικού προγραμματισμού κατασκευασμένο από την National Instruments. Το LabVIEW χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές όπου είναι απαραίτητη η ανάκτηση δεδομένων, ο έλεγχος οργάνων ή ακόμα και σε εφαρμογές βιομηχανικών αυτοματισμών. Επιπλέον, το LabVIEW είναι διαθέσιμο για μια σειρά λειτουργικών συστημάτων.

Η γραφική γλώσσα που χρησιμοποιείται στα πλαίσια του LabVIEW είναι η γλώσσα G. Η γλώσσα αυτή εξυπηρετεί τους σκοπούς ενός είδους προγραμματισμού που στηρίζεται στην ροή των δεδομένων. Η εκτέλεση ενός προγράμματος στο LabVIEW καθορίζεται από το αντίστοιχο δομικό του διάγραμμα το οποίο κατασκευάζει ο εκάστοτε προγραμματιστής. Η επεξεργασία της πληροφορίας πραγματοποιείται με την χρήση συναρτήσεων-κόμβων (function-nodes) στις οποίες το σήμα εισέρχεται και εξέρχεται με την χρήση εικονικών συρμάτων (wires). Το βασικό πλεονέκτημα του γραφικού προγραμματισμού είναι ότι επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεση εντολών, σε αντίθεση με τις κλασσικές γλώσσες προγραμματισμού όπου η υλοποίηση τους γίνεται με σειριακό τρόπο. Ένα, ακόμα, πλεονέκτημα είναι ότι, στην γλώσσα G, η δημιουργία διεπαφής με τον χρήστη (user interface) είναι αναπόσπαστο τμήμα της ανάπτυξης του ίδιου προγράμματος. Αυτό συμβαίνει λόγω της μορφής που έχουν τα προγράμματα που γράφονται με χρήση του LabVIEW.

Πιο συγκεκριμένα, τα προγράμματα που υλοποιούνται στο LabVIEW ονομάζονται εργασίες (projects) τα οποία απαρτίζονται από υποπρογράμματα ή υπορουτίνες που αποκαλούνται εικονικά όργανα (Vis-virtual instruments). Τα εικονικά όργανα αποτελούνται από δύο βασικά συστατικά. Το πρώτο είναι η πρόσοψη (front panel) του προγράμματος όπου τοποθετούνται οι ρυθμιστές (controls) και οι δείκτες (indicators). Οι ρυθμιστές επιτελούν τον ρόλο των εισόδων (inputs) του προγράμματος και μέσω αυτών το εικονικό όργανο τροφοδοτείται με τις πληροφορίες που εισάγει ο χρήστης. Οι ρυθμιστές μπορούν να λάβουν διάφορες μορφές όπως κομβία, διακόπτες και μπάρες, δίνοντας έτσι την δυνατότητα εισαγωγής της πληροφορίας και με ψηφιακό και με αναλογικό τρόπο. Οι δείκτες αντιστοιχούν στις εξόδους του συστήματος και οπτικοποιούν το αποτέλεσμα της εκτέλεσης του κώδικα του εικονικού εργαλείου. Τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν και ψηφιακά αλλά και σε μορφή διαγραμμάτων.

Το δεύτερο συστατικό ενός εικονικού οργάνου στο LabVIEW είναι το δομικό του διάγραμμα (block diagram). Στο δομικό διάγραμμα περιέχεται ο κώδικας του προγράμματος ο οποίος αποτελείται από διάφορες δομές και συναρτήσεις. Ακόμα, στο δομικό διάγραμμα οι ρυθμιστές και οι δείκτες εμφανίζονται με την μορφή τερματικών. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι πληροφορίες εισέρχεται στο δομικό διάγραμμα μέσω των ρυθμιστών και μετά την

επεξεργασία που δέχεται μέσω των δυναρτήσεων καταλήγει στους δείκτες οι οποίοι και εμφανίζουν το αποτέλεσμα της επεξεργασίας που προηγήθηκε.

Με βάση τα παραπάνω, ο χρήστης ενός εικονικού οργάνου, ανάλογα με την εξοικείωση του με τον προγραμματισμό, μπορεί να το χρησιμοποιεί είτε με την ιδιότητα του προγραμματιστή είτε με αυτήν του απλού αποδέκτη της επεξεργασίας που επιτελείται εντός του εικονικού οργάνου, αφού η πρόσοψη (front panel) του λειτουργεί και ως διεπαφή χρήστη (user interface). Στα πλαίσια αυτά, η National Instruments παρέχει διάφορα έτοιμα εικονικά εργαλεία για άμεση χρήση ή και για εκπαιδευτικούς σκοπούς.

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μεταξύ των υπολοίπων δυνατοτήτων που παρέχει το LabVIEW είναι και ο προγραμματισμός σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (Real time) και σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA-Field Programmable Gate Array). Ο προγραμματισμός σε επίπεδο πραγματικού χρόνου επιτρέπει την υλοποίηση προγραμμάτων που σκοπό έχουν την λήψη δεδομένων από αυτόνομες συσκευές-στόχους hardware ή και τον έλεγχό τους σε ταχύτητες που σχετίζονται με τις δυνατότητες του επεξεργαστή του υπολογιστή όπου εκτελείται το πρόγραμμα. Δηλαδή, τα εικονικά εργαλεία που είναι προγραμματισμένα σε επίπεδο πραγματικού χρόνου, τρέχουν σε επίπεδο software.

Σε αντιπαράθεση με το επίπεδο πραγματικού χρόνου, το επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), επιτρέπει την εκτέλεση παρόμοιων προγραμμάτων σε επίπεδο hardware. Αυτό σημαίνει ότι ο προγραμματισμός στο επίπεδο αυτό απαιτεί την ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (compact RIO). Οι πλατφόρμες αυτές είναι αυτόνομες και φέρουν ανεξάρτητο επεξεργαστή ο οποίος, εν γένει, χαρακτηρίζεται από ανώτερες ικανότητες από αυτές που αντιστοιχούν στον επεξεργαστή ενός υπολογιστή. Κατά αυτόν τον τρόπο, η δειγματοληψία ή η παραγωγή δεδομένων που θα εξαχθούν, ανάλογα με την εφαρμογή, πραγματοποιούνται με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα, γεγονός το οποίο είναι απαραίτητο όπως στη λήψη μετρήσεων στο πείραμα της κρούσης όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5.

Σχετικά με την δομή μιας εργασίας (project) σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA), θα πρέπει να αναφερθεί ότι αποτελείται από τουλάχιστον δυο διαφορετικά εικονικά όργανα. Το ένα από αυτά έχει συνταχθεί (compiled) σε επίπεδο πραγματικού χρόνου ενώ το άλλο σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών. Τα δύο αυτά εικονικά εργαλεία ανταλλάσσουν πληροφορίες μεταξύ τους μέσω ενός FIFO (First In First Out) bus. Το εικονικό εργαλείο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών αναλαμβάνει την λήψη ή την παραγωγή δεδομένων. Το εικονικό εργαλείο που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου αξυπηρετεί στην επεξεργασία των δεδομένων που θα ληφθούν ή θα παραχθούν από το έτερο εικονικό εργαλείο.

## 9.2 Ολοκληρωμένη πλατφόρμα εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων (Compact RIO)

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές εργασίες (projects) στο LabVIEW. Το πρώτο ήταν το Sine Generator project για την παραγωγή ενός ημιτονοειδούς σήματος τάσης στα πειράματα που αφορούσαν το ημιτονοειδές φορτίο και το δεύτερο, ήταν το dma with encoder project που δημιουργήθηκε για τις ανάγκες των πειραμάτων της κρούσης. Κοινός παρανομαστής των δύο εργασιών (projects) είναι ο προγραμματισμός τους σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, ένα τέτοιο είδος προγραμματισμού απαιτεί την ύπαρξη μιας ολοκληρωμένης πλατφόρμας εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων. Μία τέτοια πλατφόρμα αποτελείται από τον συνδυασμό ενός ελεγκτή που εργάζεται σε πραγματικό χρόνο, ορισμένων καρτών εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων, μίας μονάδας FPGA (FPGA module) και ενός σκελετού (chassis) που συνδέεται με καλώδιο Ethernet.

Για τις ανάγκες της διπλωματικής αυτής εργασίας, χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα C-RIO 9074 της National Instruments. Η πλατφόρμα αυτή διαθέτει επεξεργαστή 400MHz που εργάζεται σε πραγματικό χρόνο, 512MB μνήμης, 128 MB DRAM και 2M θύρα FPGA. Επιπλέον, παρέχει την δυνατότητα σύνδεσης έως και οκτώ διαφορετικών καρτών εισαγωγής και εξαγωγής δεδομένων στις αντίστοιχες υποδοχές. Από τα παραπάνω χαρακτηριστικά, σημαντικότερο ρόλο επιτελεί το μέγεθος του επεξεργαστή το οποίο είναι δέκα φορές μεγαλύτερο από αυτό του επεξεργαστή του υπολογιστή και επομένως εξασφαλίζει μεγαλύτερη δειγματοληψία η οποία είναι απαραίτητη στα πειράματα της κρούσης.

Στην παραπάνω πλατφόρμα συνδέθηκαν οι κάρτες NI 9220, NI9263 και NI 9401. Η κάρτα NI 9220 χρησιμοποιείται για την λήψη μετρήσεων από αναλογικές εισόδους τάσης. Η μέγιστη δειγματοληψία που υποστηρίζει είναι 100 kSamples/s/channel και διαθέτει 16 κανάλια. Η κάρτα αυτή είναι χρήσιμη στο dma with encoder project όπου γίνεται η λήψη των μετρήσεων από το πείραμα της κρούσης. Στην μέγιστη δειγματοληψία μπορεί να παράγει 3.2 MB/s δεδομένων.

Η κάρτα NI 9263 επιτελεί την λειτουργία παραγωγής σημάτων τάσης εξόδου. Η συχνότητα με την οποία παράγει τάση εξόδου είναι 100 kSamples/s/channel και διαθέτει 4 κανάλια. Η κάρτα αυτή χρησιμοποιείται από το Sine Generator project για την παραγωγή του ημιτονοειδούς σήματος τάσης που διεγείρει τον δονητή.

Τέλος, η κάρτα NI 9401 μπορεί να διαχειριστεί ψηφιακά σήματα εισόδου και εξόδου. Διαθέτει 8 διαφορετικά κανάλια διπλής κατεύθυνσης με χρόνο δειγματοληψίας 100ns. Όπως θα αναφερθεί στην επόμενη παράγραφο, στο dma with encoder project δίνεται η δυνατότητα λήψης μετρήσεων από το ψηφιακό σήμα που στέλνει ένας encoder.

## 9.3 Εργασία (project) dma with encoder στο LabVIEW

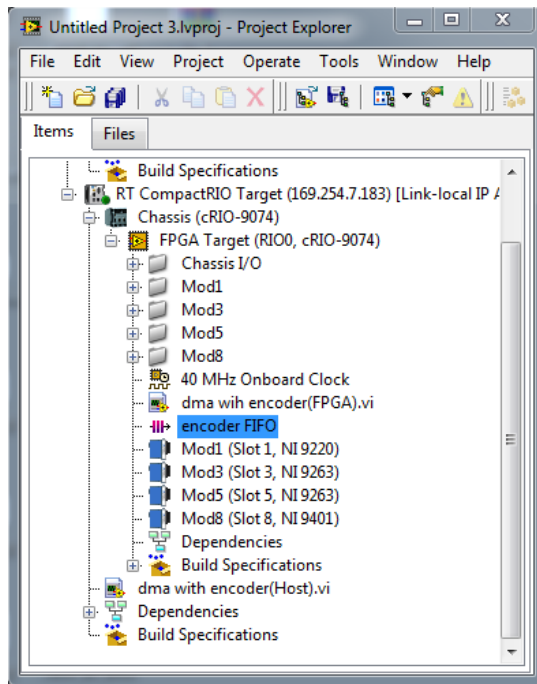
Στο Κεφάλαιο 5 αναφέρεται η συμβολή του dma with encoder project στην λήψη μετρήσεων που αφορούν τόσο την δύναμη που αναπτύσσεται κατά την διάρκεια της κρούσης όσο και

την ηλεκτρική τάση που παράγεται στα άκρα του πιεζοηλεκτρικού επιθέματος λόγω της παραμόρφωσης που αυτό υφίσταται. Η εργασία (project) αυτή βασίζεται σε ένα έτοιμο πρόγραμμα που διατίθεται από την National Instruments και το οποίο φέρει το όνομα DMA MCA project. Το πρόγραμμα αυτό εμπλουτίστηκε κατά την διάρκεια της παρούσας διπλωματικής έτσι ώστε να καλύπτει καλύτερα τις ανάγκες του πειράματος της κρούσης.

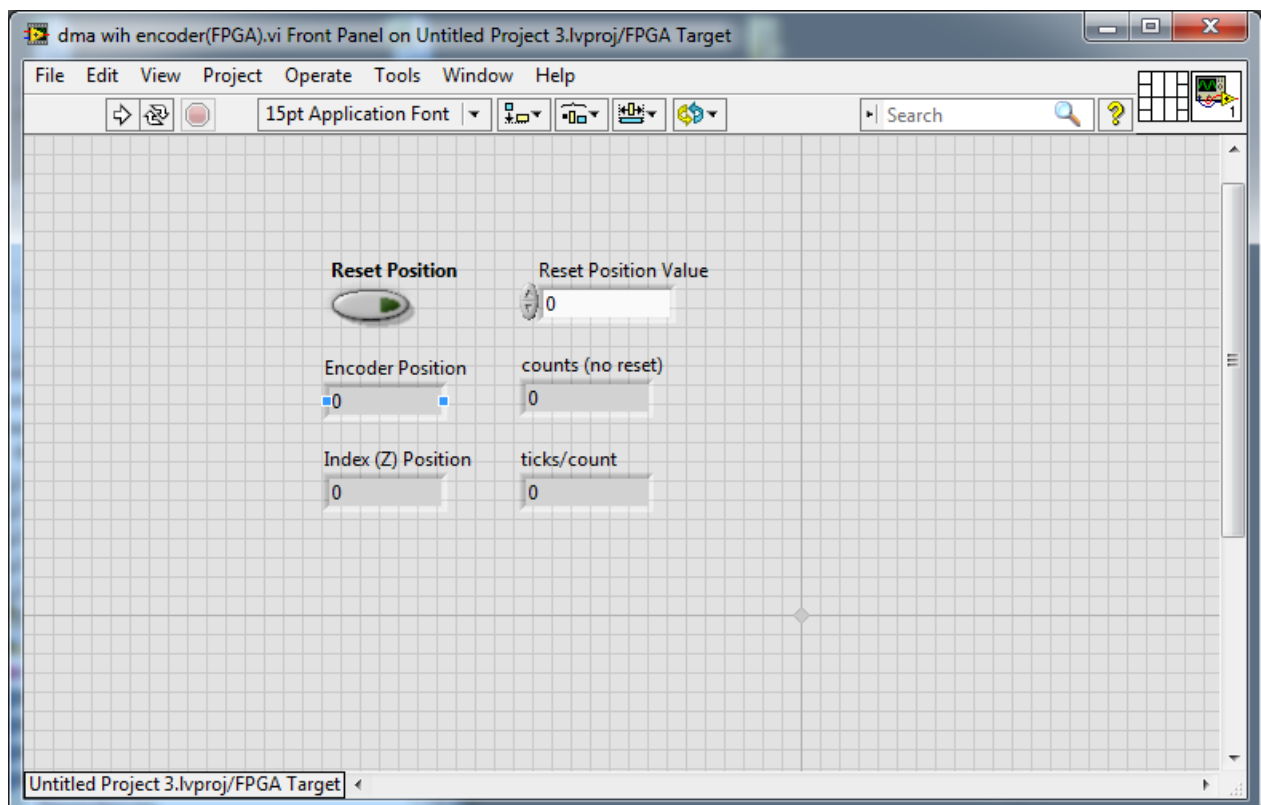
Το dma with encoder project, όπως και το DMA MCA project, είναι εργασίες οι οποίες εκμεταλλεύονται την δυνατότητα του που προσφέρει το LabVIEW για προγραμματισμό σε επίπεδο συστοιχίας επίτοπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA). Αυτό το χαρακτηριστικό των εν λόγω προγραμμάτων τους επιτρέπει να λαμβάνουν μετρήσεις με μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας, γεγονός που τα καθιστά ιδανικά για την παρακολούθηση πειραμάτων κρούσης. Η ανάγκη για μεγάλη συχνότητα δειγματοληψίας επιβάλλεται από το γεγονός ότι οι κρούσεις, εν γένει, είναι βίαια φαινόμενα και προκαλούν ταλαντώσεις σε πολλές ιδιοσυχνότητες κάποιες εκ των οποίων είναι ιδιαίτερα υψηλές.

Αν και το dma with encoder project, στην παρούσα διπλωματική, εξυπηρετεί τις ανάγκες του πειράματος της κρούσης όπως αυτό παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5, στην πραγματικότητα, διαθέτει περισσότερες δυνατότητες οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε πιο περίπλοκα πειράματα. Συγκεκριμένα, η εργασία δύναται να πραγματοποιεί την ταυτόχρονη λήψη μετρήσεων από 4 αναλογικά κανάλια και 2 ψηφιακά, ενώ με μικρές τροποποιήσεις και το κατάλληλο hardware, οι αριθμοί των καναλιών μπορούν να αυξηθούν σημαντικά. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, τα 2 από τα αναλογικά κανάλια χρησιμοποιήθηκαν για την ταυτόχρονη μέτρηση της δύναμης και του παραγόμενου ηλεκτρικού δυναμικού κατά την διάρκεια της κρούσης. Τα υπόλοιπα 2 μπορούν να φανούν χρήσιμα σε πειράματα κρούσης σε πλάκα όπου υπάρχουν περισσότεροι πιεζοηλεκτρικοί αισθητήρες για τον καθορισμό της θέσης πάνω στην πλάκα που έλαβε χώρα η μελετούμενη πρόσκρουση. Επιπλέον, υπάρχουν και 2 ψηφιακά κανάλια τα οποία μπορούν να λαμβάνουν μετρήσεις που προέρχονται από κωδικοποιητή (encoder). Αυτά τα κανάλια είναι ιδανικά για την μέτρηση της ταχύτητας και της θέσης του βραχίονα που εκτελεί την κρούση σε πειράματα που η κίνησή του οφείλεται στην ύπαρξη κάποιου κινητήρα.

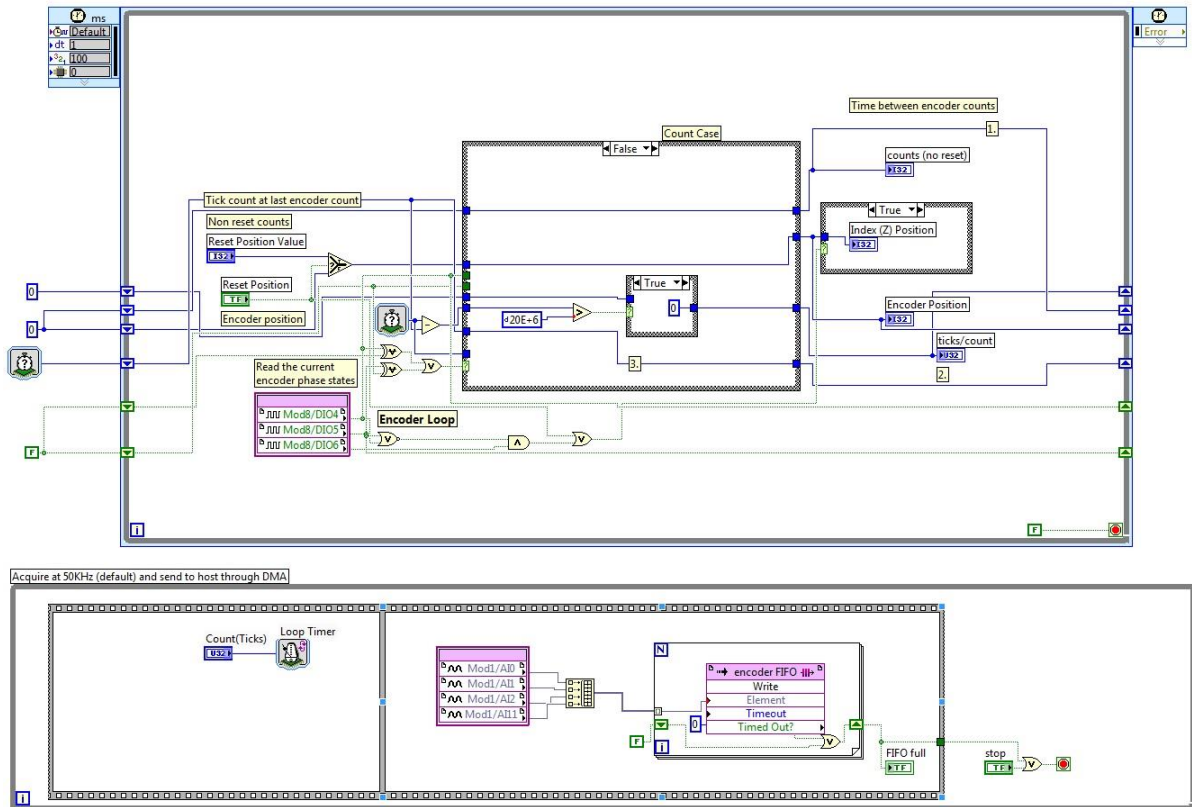
Αναφορικά με την δομή του προγράμματος, όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, η εργασία (project) αποτελείται από ένα εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επίτοπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), ένα εικονικό όργανο που υλοποιείται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (Real Time VI), ενώ η πληροφορία μεταξύ των δύο διέρχεται από ένα bus που ονομάζεται encoder FIFO. Στο Σχήμα 9-1 έως και το Σχήμα 9-5 παρουσιάζονται ο project explorer της εργασίας και οι προσόψεις και τα δομικά διαγράμματα των δύο συνεργαζόμενων εικονικών οργάνων.



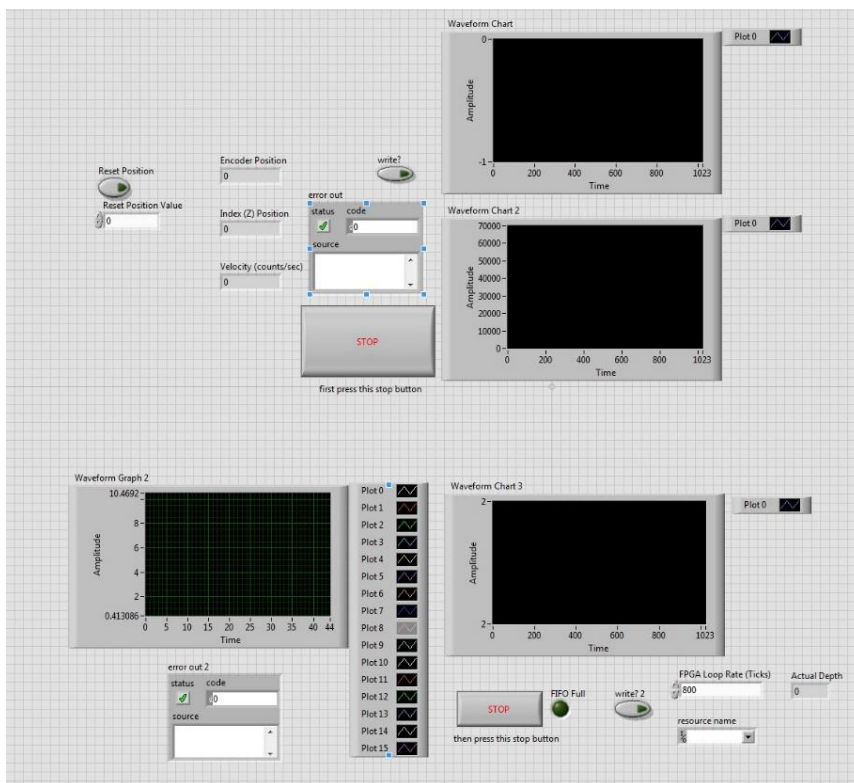
Σχήμα 9-1. Project explorer του dma with encoder project.



Σχήμα 9-2. Πρόσωση (front panel) του dma with encoder FPGA VI.

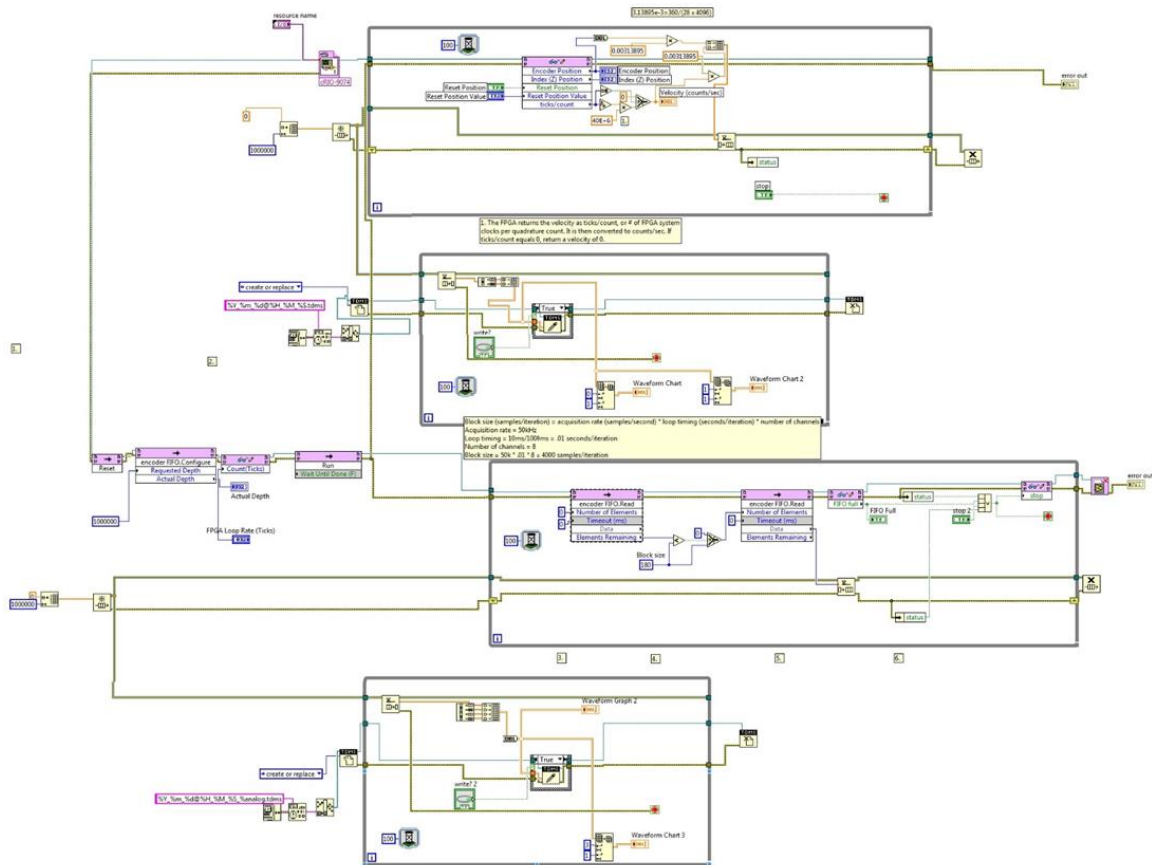


Σχήμα 9-3. Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder FPGA VI.



Σχήμα 9-4. Πρόσωση (front panel) του dma with encoder Real Time VI.





**Σχήμα 9-5. Δομικό διάγραμμα (block diagram) του dma with encoder Real Time VI.**

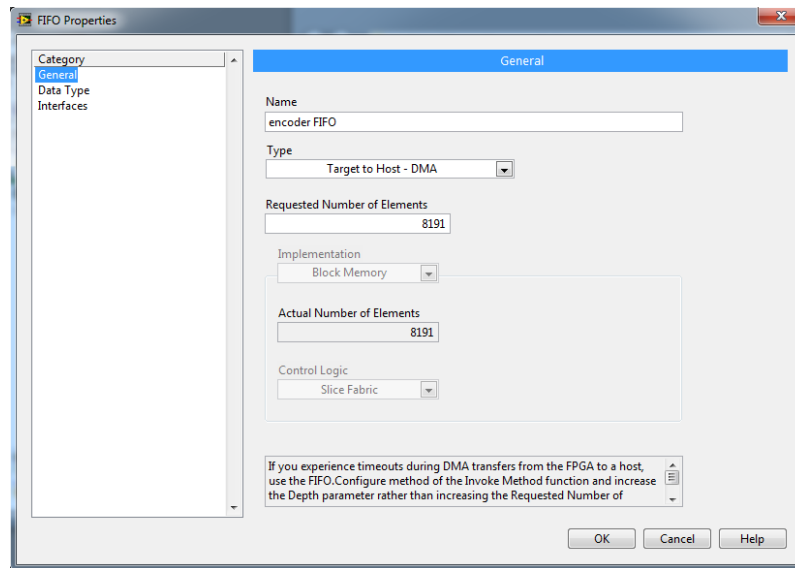
Στο δομικό διάγραμμα του εικονικού οργάνου που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), είναι εμφανές ότι υπάρχουν δύο μεγάλες δομές ανάδρασης (loops). Η δομή που εμφανίζεται στο Σχήμα 9-3, και συγκεκριμένα στο ανώτερο τμήμα του, αντιστοιχεί στο κομμάτι του οργάνου που σχετίζεται με την λήψη μετρήσεων από τα ψηφιακά κανάλια. Η δομή στο κατώτερο τμήμα εξυπηρετεί την εισαγωγή δεδομένων από τα αναλογικά κανάλια. Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο συστοιχίας επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI) εκτελεί μόνο την συλλογή των δεδομένων τα οποία αποθηκεύονται σε μορφή πίνακα. Ο γραφικός κώδικας που περιέχεται σε αυτό το εικονικό όργανο επιβεβαιώνει επίσης ότι η δειγματοληψία πραγματοποιείται χωρίς σφάλματα.

Το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (real time VI), είναι το όργανο το οποίο χρησιμοποιείται απευθείας από τον χρήστη. Παρατηρώντας την πρόσοψη του (front panel) που παρατίθεται στο Σχήμα 9-4, είναι εμφανές ότι σε αυτήν παρουσιάζονται διάφορες επιλογές στον χρήστη με την μορφή ρυθμιστών (controls), ενώ παράλληλα φαίνονται και τα αποτελέσματα του προγράμματος μέσω των δεικτών (indicators) σε μορφή διαγραμμάτων. Η βασικότερη επιλογή που γίνεται σε αυτό το επίπεδο από τον χρήστη αφορά την περίοδο της δειγματοληψίας που αντιστοιχεί στα αναλογικά κανάλια. Ακόμα, αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο πρόγραμμα εκκινεί την λειτουργία του με το πάτημα ενός κουμπιού και λήψη των μετρήσεων τερματίζεται με χρήση των δύο

κομβίων STOP, ένα για τα ψηφιακά και ένα για τα αναλογικά κανάλια. Αυτό το χαρακτηριστικό του προγράμματος το διαφοροποιεί σημαντικά από άλλα προγράμματα που επιτελούν αντίστοιχη λειτουργία καθώς στα περισσότερα από αυτά ο συνολικός χρόνος της διάρκειας του πειράματος πρέπει να δηλωθεί εκ των προτέρων από τον χρήστη. Κατά αυτόν τον τρόπο, η εργασία (project) που παρουσιάζεται, υπερτερεί έναντι των υπολοίπων ως προς την χρηστικότητα της.

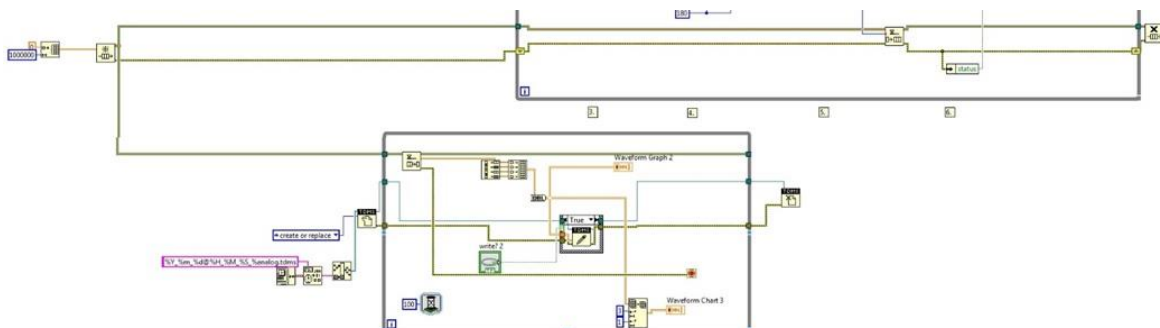
Το αντίστοιχο δομικό διάγραμμα του εικονικού οργάνου που συντάσσεται σε επίπεδο πραγματικού χρόνου (real time VI) είναι πιο περίπλοκο από αυτό που περιγράφηκε προηγουμένως. Σε αυτό το εικονικό όργανο πραγματοποιείται η επεξεργασία των δεδομένων που συλλέγονται στο προηγούμενο εικονικό όργανο. Στο Σχήμα 9-5, είναι εμφανής η ύπαρξη τεσσάρων επαναληπτικών δομών (loops). Η δομή που βρίσκεται στο ανώτερο τμήμα του εικονικού οργάνου αντιστοιχεί στην ανάκτηση των δεδομένων που συλλέγονται από τα ψηφιακά κανάλια. Η τρίτη εξ αυτών, μετρώντας από τα πάνω προς τα κάτω, πραγματοποιεί την αντίστοιχη λειτουργία προκειμένου να γίνουν διαθέσιμα τα δεδομένα των αναλογικών καναλιών. Οι υπόλοιπες δύο δομές είναι παρόμοιες μεταξύ τους και εκεί πραγματοποιείται η επεξεργασία των ανακτηθέντων δεδομένων. Η επεξεργασία αυτή περιλαμβάνει την παρουσίαση των μετρήσεων σε διαγράμματα τα οποία εμφανίζονται στην πρόσοψη (front panel) του οργάνου, και την αποθήκευση τους σε δύο αρχεία, ένα για τα δεδομένα των ψηφιακών καναλιών και ένα για αυτά των αναλογικών.

Τα δεδομένα που συλλέγονται από το πρώτο εικονικό εργαλείο (FPGA VI) μεταφέρονται στο δεύτερο (Real time VI) μέσω ενός bus που έχει μορφή πίνακα και του οποίου η διάσταση καθορίζεται από τον χρήστη. Τα δεδομένα εισέρχονται στον πίνακα αυτό το ένα μετά το άλλο και αν ο πίνακας αυτός πληρωθεί, τότε η επόμενη τιμή που θα εισέλθει θα εκτοπίσει την πρώτη τιμή που τοποθετήθηκε σε αυτόν. Αυτού του είδους, τα bus ονομάζονται FIFO (First In First Out). Όπως θα εξηγηθεί στην συνέχεια αυτό μπορεί να οδηγήσει σε απώλεια δεδομένων αν το πρόγραμμα δεν έχει συνταχθεί κατάλληλα. Τα χαρακτηριστικά του FIFO καθορίζονται από τον προγραμματιστή σε αντίστοιχο παράθυρο όπως αυτό που φαίνεται στο Σχήμα 9-6.



**Σχήμα 9-6. Παράθυρο προσδιορισμού χαρακτηριστικών FIFO.**

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι δομές που επιτελούν την επεξεργασία των δεδομένων, έχουν συνταχθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής και βασίζονται σε μία τεχνική που ονομάζεται επαναληπτική δομή παραγωγού-καταναλωτή. Η τεχνική αυτή εξυπηρετεί στην εύρυθμη λειτουργία του προγράμματος αφού χωρίς αυτήν θα υπήρχε απώλεια δεδομένων. Η απώλεια των δεδομένων οφείλεται στο γεγονός ότι οι λειτουργίες που επιτελούνται στο εικονικό όργανο που συντάσσεται σε συστοιχία επιτόπια προγραμματιζόμενων πυλών (FPGA VI), ολοκληρώνονται στον επεξεργαστή των 400MHz της πλατφόρμας C-RIO, ο οποίος είναι σαφώς πιο γρήγορος από τον αντίστοιχο του υπολογιστή. Το πρόβλημα αυτό αντιμετωπίζεται επιτυχώς με την τεχνική που αναφέρθηκε καθώς τα δεδομένα που εξέρχονται από το πρώτο εικονικό όργανο (FPGA VI) τοποθετούνται σε μία σειρά αναμονής (queue) και αξιοποιούνται από το εικονικό όργανο που συντάσσεται σε πραγματικό χρόνο (Real time VI) όταν αυτό είναι δυνατό. Η υλοποίηση της παραπάνω τεχνικής έχει ως αποτέλεσμα οι μετρήσεις να παρουσιάζονται με καθυστέρηση στον χρήστη, ωστόσο δεν υπάρχει απώλεια δεδομένων. Το τμήμα του δομικού διαγράμματος που αντιστοιχεί στην προαναφερθείσα τεχνική παρουσιάζεται στο Σχήμα 9-7.



**Σχήμα 9-7. Τεχνική παραγωγού-καταναλωτή (producer-consumer).**