



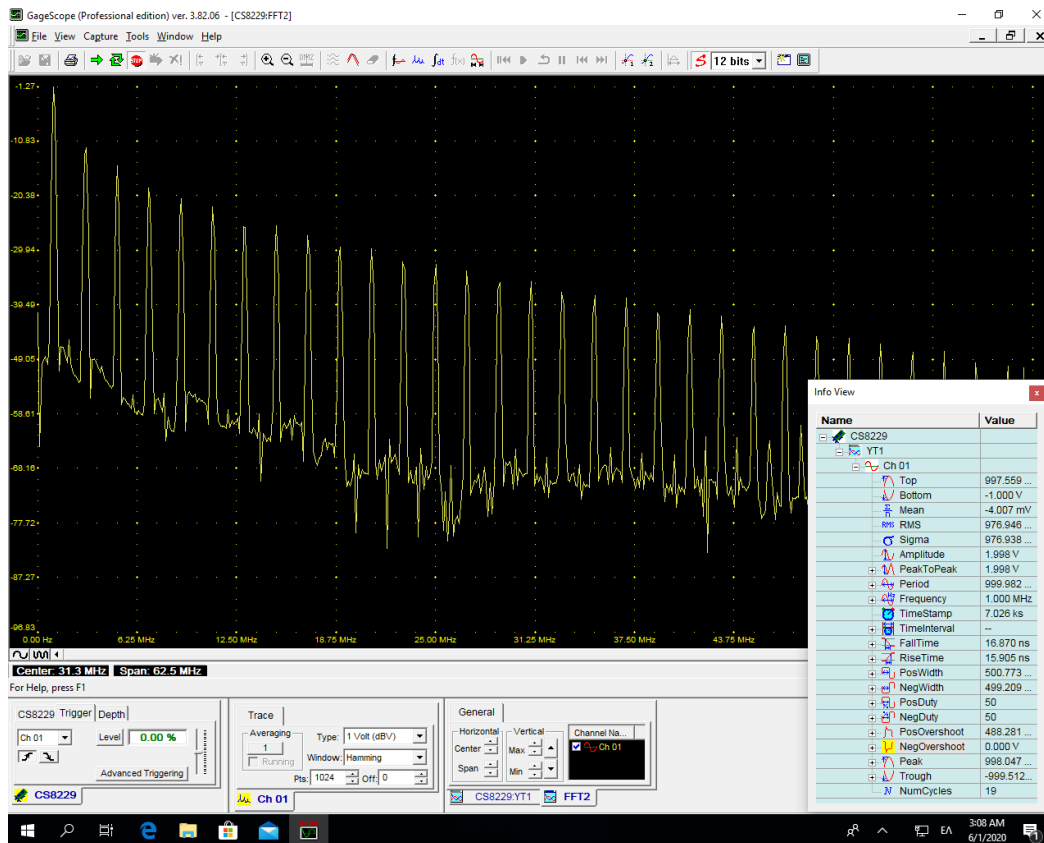
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ & ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

## Διπλωματική Εργασία

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης



Φοιτητής: Σούμας Νικόλαος  
ΑΜ: 48346812

Επιβλέπων Καθηγητής

Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ  
ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, Οκτώβριος 2021

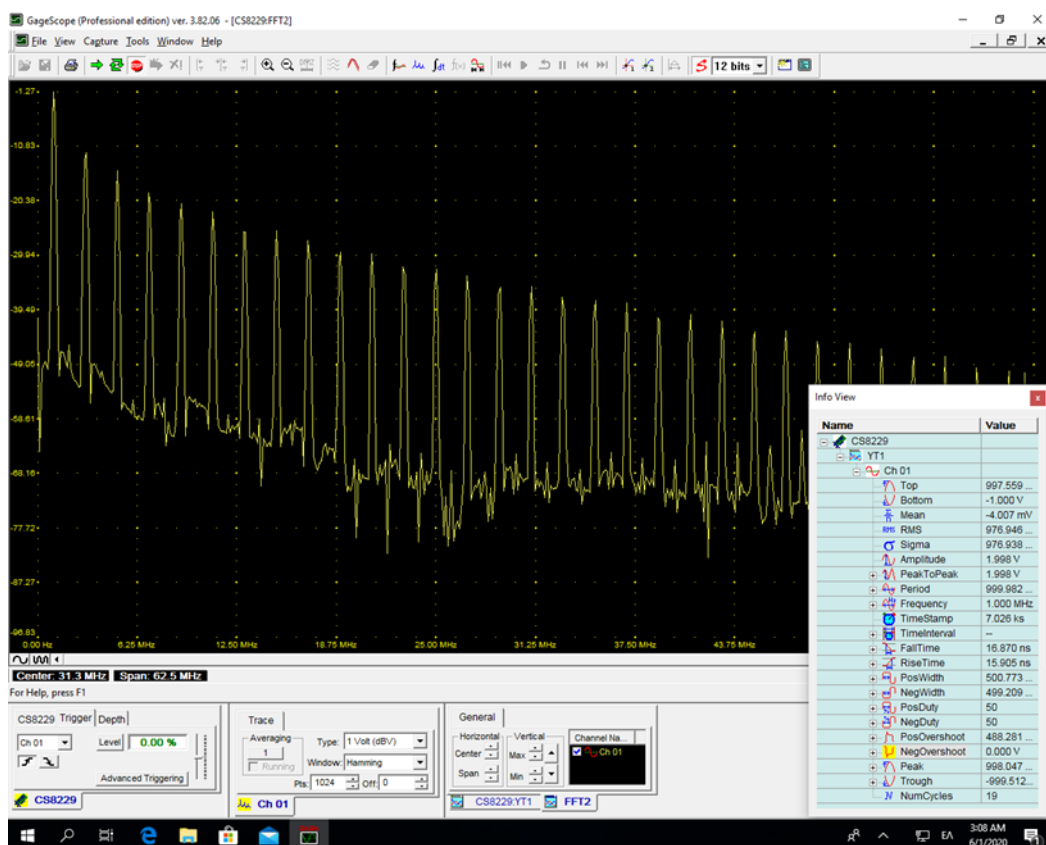
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



**UNIVERSITY OF WEST ATTICA**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**DEPARTMENT OF ELECTRICAL & ELECTRONICS**  
**ENGINEERING**

## Diploma Thesis

# Installation and set-up of an Analog to Digital, high sampling rate measuring system for detecting transient phenomena in High Voltage equipment



**Student: Soumas Nikolaos**  
**Registration Number: 48346812**

**Supervisor**

**C.S. Psomopoulos**  
**PROFESSOR**  
**ATHENS-EGALEO, October 2021**

*Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.*

Η Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή επιτροπή:

Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος, (Καθηγητής)	Νικόλαος Μανουσάκης, Επίκουρος Καθηγητής	Κωνσταντίνος Καλκάνης, Επίκουρος Καθηγητής
(Υπογραφή)	(Υπογραφή)	(Υπογραφή)

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ Νικόλαος Σούμας, Οκτώβριος, 2021**

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

### **ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος **Σούμας Νικόλαος** του Εμμανουήλ με αριθμό μητρώου 48346812 φοιτητής/τρια του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής της Σχολής ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ του Τμήματος ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ,

**δηλώνω υπεύθυνα ότι:**

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του διπλώματός μου.

Επιθυμώ την απαγόρευση πρόσβασης στο πλήρες κείμενο της εργασίας μου μέχρι ..... και έπειτα από αίτησή μου στη Βιβλιοθήκη και έγκριση του επιβλέποντος/ουσας καθηγητή/ήτριας.»

Ο Δηλών

**Νικόλαος Σούμας**

(Υπογραφή φοιτητή/ήτριας)

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θεωρώ δέον να εκφράσω τις ειλικρινείς ευχαριστίες μου σε κάποιους από τους ανθρώπους που γνώρισα κατά την διάρκεια των σπουδών μου, συνεργάστηκα μαζί τους και έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην πραγματοποίησή της.

Αρχικά θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Κ. Ψωμόπουλο ο οποίος και μου ανέθεσε αυτή τη διπλωματική εργασία και με συνέδεσε πιο στενά με τον τομέα των υψηλών τάσεων, των σημάτων και γενικά των μετρήσεων και μου προσέφερε πολύτιμη καθοδήγηση, δείχνοντας μου εμπιστοσύνη και εκτίμηση κατά την εκπόνησή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον υποψήφιο διδάκτορα και Ακαδημαϊκό Υπότροφο κ. Δ. Μπάρκα ο οποίος ήταν δίπλα καθ' όλη την διάρκεια διεκπεραίωσης της Διπλωματικής μου εργασίας και με τα πνευματικά προσόντα και το ήθος του συνεισέφερε πολύτιμα στην ολοκλήρωση της, και μου προσέφερε γνώσεις και καθοδήγηση, καθώς με αφοσίωση και υπομονή στήριξε με την εμπειρία του την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θερμά θέλω να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για όλα αυτά τα χρόνια που μου προσφέρουν συνεχόμενη συμπαράσταση, πολύτιμες συμβουλές και με βοηθούν να εκπληρώσω τους στόχους της ζωής μου, που με υπομονή και κατανόηση πρόσφεραν την απαραίτητη ηθική συμπαράσταση για την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας, και την ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Τέλος , θα ήθελα να ευχαριστήσω την εταιρία ΤΕΚΑΜ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε., και τον όμιλο ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ που μου έδωσαν την ευκαιρία να εργαστώ και να εξασκήσω το επάγγελμα στα πρώτα βήματα της επαγγελματικής μου καριέρας στα διυλιστήρια Βιομηχανικών Εγκαταστάσεων Ασπροπύργου (ΒΕΑ), για την περίοδο shut-down 2020 των διυλιστηρίων, σε ένα περιβάλλον γεμάτο με ηλεκτρολογικά θέματα και εξοπλισμό, υποσταθμούς και ποικίλες μορφές τάσεων, ξεκινώντας από την υψηλή τάση των 150 kV.

## **Περίληψη**

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει εγκατάσταση και θέση σε λειτουργία αναλογικού ψηφιακού μετατροπέα 2/4 καναλιών υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, κατάλληλου για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων που παρουσιάζονται κατά τη διάσπαση καθώς και κατά την παρουσία του φαινομένου των μερικών εκκενώσεων στα ηλεκτρομονωτικά υλικών υψηλών τάσεων. Η θέση σε λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος το οποίο θα μπορεί να δώσει μοναδικές μετρήσεις φαινομένων στην περιοχή των ns απαιτεί πολύ προσεκτική ρύθμιση ώστε να μετριέται το φαινόμενο και όχι ο θόρυβος. Επιπλέον, στην εργασία αυτή γίνεται αναφορά στην δειγματοληψία και στην ανάλυση κρουστικών σημάτων Υψηλών Τάσεων.

## **Λέξεις – κλειδιά**

Αναλογικό σήμα, Ψηφιακό σήμα, Δειγματοληψία, Μετασχηματισμός Fourier, Παλμογράφος, Υψηλές τάσεις, Κρουστικό σήμα, Κάρτα μετρήσεων, Εγκατάσταση, Ρύθμιση, Μετρήσεις

## **Abstract**

In this diploma thesis, an analog to digital converter will be installed and set-up with 2/4 high speed sampling channels, suitable for measurements of impulse phenomena that occur on the electrical insulating materials applied on high voltage during the breaking and during the existence of partial discharges. The commissioning of a system like this, which will be able to give unique measurements of phenomena in the area of ns requires very careful set-up so that the phenomena to be measured with the minimum influence by the noise that always exists.

In addition, this manuscript is referred to the sampling and analysis of high voltage impulse signals.

## **Keywords**

Analog Signal, Digital Signal, Sampling, Fourier Transform, Oscilloscope, High Voltage, Impulse signals, Measurement Card, Installation, Set-up, Measurements

## Περιεχόμενα

<b>Κατάλογος πινάκων .....</b>	<b>13</b>
<b>Κατάλογος εικόνων .....</b>	<b>13</b>
<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>19</b>
<b>Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....</b>	<b>20</b>
<b>Σκοπός και στόχοι .....</b>	<b>20</b>
<b>Μεθοδολογία.....</b>	<b>21</b>
<b>1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Μέτρηση και επεξεργασία σημάτων.....</b>	<b>22</b>
<b>1.1 Εισαγωγή στα Σήματα .....</b>	<b>22</b>
<b>1.2 Είδη και Κατηγορίες Σημάτων.....</b>	<b>22</b>
1.2.1 Σήματα συνεχούς χρόνου ή αναλογικά σήματα.....	23
1.2.2 Σήματα διακριτού χρόνου .....	23
1.2.3 Ψηφιακά Σήματα.....	23
1.2.4 Βηματική Συνάρτηση.....	24
1.2.5 Ορθογωνικοί παλμοί .....	25
1.2.6 Ο τετραγωνικός παλμός .....	26
1.2.7 Σήματα πεπερασμένης και άπειρης διάρκειας .....	27
<b>1.3 Συντελεστές μερικής ή έμμεσης περιγραφής των περιοδικών σημάτων</b> <b>27</b>	
<b>1.4 Κρούση .....</b>	<b>28</b>
1.4.1 Ορισμός κρούσης .....	28
1.4.2 Κρουστική συνάρτηση .....	29
1.4.3 Εφαρμογές της κρουστικής συνάρτησης .....	29
<b>1.5 A/D Μετατροπείς.....</b>	<b>30</b>
1.5.1 Εισαγωγή.....	30
1.5.2 Λειτουργία των A/D Μετατροπέων (ADC).....	31
1.5.3 Dual Slope A/D Converter .....	32
1.5.4 Παράλληλοι Μετατροπείς A/D .....	33
1.5.5 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων .....	34
1.5.6 Μετατροπείς A/D Σίγμα Δέλτα.....	35
1.5.7 Κυκλώματα Συγκράτησης.....	36
1.5.8 Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα των A/D converters.....	38
<b>1.6 Φίλτρα .....</b>	<b>42</b>
1.6.1 Ορισμός.....	42
1.6.2 Φίλτρα διέλευσης ή απόρριψης συχνοτήτων .....	43
1.6.3 Ταξινόμηση φίλτρων σύμφωνα με το είδος δεδομένων διαχείρισης.....	44



1.6.4	Πλεονεκτήματα ψηφιακών φίλτρων .....	45
1.6.5	Είδη Κλασικών Ιδανικών Φίλτρων .....	45
1.6.6	Πραγματικά-Ιδανικά φίλτρα .....	47
1.6.7	Οικογένειες φίλτρων .....	48
1.6.1	Φίλτρα Butterworth .....	48
1.6.2	Φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων – Βαθυπερατά φίλτρα .....	48
1.6.3	Υψηπερατά φίλτρα .....	49
1.6.4	Φίλτρα διέλευσης ζώνης .....	50
1.6.5	Φίλτρα αποκοπής ζώνης.....	51
1.6.6	Ζωνοδιαβατό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης .....	51
1.6.7	Φίλτρα FIR και IIR .....	52
1.6.8	Anti-aliasing filters.....	52
<b>1.7</b>	<b>Ψηφιακή επεξεργασία σήματος.....</b>	<b>54</b>
<b>1.8</b>	<b>Δειγματοληψία αναλογικών σημάτων .....</b>	<b>56</b>
1.8.1	Θεώρημα δειγματοληψίας.....	57
1.8.2	Φαινόμενο της αναδίπλωσης.....	58
1.8.3	Γενίκευση του Θεωρήματος Δειγματοληψίας.....	58
1.8.4	Υπερδειγματοληψία (oversampling).....	58
<b>1.9</b>	<b>Κβάντιση σημάτων συνεχούς πλάτους .....</b>	<b>59</b>
<b>1.10</b>	<b>Κωδικοποίηση των κβαντισμένων δειγμάτων.....</b>	<b>60</b>
<b>2</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Όργανα και διατάξεις πειραματικών μετρήσεων .....</b>	<b>61</b>
<b>2.1</b>	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>61</b>
<b>2.2</b>	<b>Γεννήτριες σήματος.....</b>	<b>61</b>
2.2.1	Ρυθμίσεις σε γεννήτρια σήματος.....	61
2.2.2	Ορισμός της λογαριθμικής μονάδας dB.....	62
2.2.3	Ρύθμιση αντίστασης εξόδου της γεννήτριας.....	62
<b>2.3</b>	<b>Παλμογράφος.....</b>	<b>63</b>
2.3.1	Εισαγωγή.....	63
2.3.2	Είδη παλμογράφων.....	63
2.3.3	Μετρήσεις με τον παλμογράφο .....	64
<b>2.4</b>	<b>Ο παλμογράφος διπλής δέσμης .....</b>	<b>66</b>
2.4.1	Βασικές ρυθμίσεις και χειρισμοί του παλμογράφου διπλής δέσμης.....	66
<b>3</b>	<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Υψηλές τάσεις –κρουστική συνάρτηση .....</b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b>Ιστορική αναδρομή.....</b>	<b>68</b>
<b>3.2</b>	<b>Εισαγωγή-Παρουσίαση.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3</b>	<b>Μορφές Υψηλών Τάσεων Δοκιμής.....</b>	<b>69</b>
<b>3.4</b>	<b>Εναλλασσόμενη Υψηλή Τάση (HVAC).....</b>	<b>70</b>

3.4.1 Εφαρμογές.....	70
<b>3.5 Συνεχής Υψηλή Τάση (HVDC).....</b>	<b>72</b>
<b>3.6 Τα πλεονεκτήματα της Συνεχής Υψηλής τάση.....</b>	<b>73</b>
<b>3.7 Κρουστική Υψηλή Τάση (High Impulse Voltage) .....</b>	<b>75</b>
3.7.1 Ορισμοί και χαρακτηριστικά επί των κρουστικών τάσεων.....	75
3.7.2 Βασικές Κατηγορίες Κρουστικών Τάσεων .....	76
3.7.3 Πηγές κρουστικών τάσεων.....	78
3.7.4 Διπλοεκθετική κρουστική τάση .....	78
3.7.5 Πλήρεις και αποκεκομμένες τάσεις, .....	79
3.7.6 Κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs.....	81
3.7.7 Τυποποιημένες κρουστικές διπλοεκθετικές τάσεις.....	81
<b>3.8 Τρόποι Παραγωγής και μέτρησης Υψηλών Τάσεων .....</b>	<b>83</b>
3.8.1 Παραγωγή και μέτρηση Εναλλασσόμενων Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο .....	83
3.8.2 Μέτρηση Εναλλασσόμενων Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο με Μετασχηματιστές δοκιμών .....	85
<b>3.9 Παραγωγή συνεχών υψηλών τάσεων στο εργαστήριο.....</b>	<b>86</b>
3.9.1 Άλλες ανορθωτικές διατάξεις παραγωγής Συνεχών Υψηλών Τάσεων....	88
3.9.2 Μέτρηση Συνεχών Υψηλών Τάσεων .....	89
<b>3.10 Παραγωγή και μέτρηση Κρουστικών Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο</b>	<b>90</b>
3.10.1 Εισαγωγή.....	90
3.10.2 Παραγωγή Κρουστικών Υψηλών Τάσεων.....	90
3.10.3 Μονοβάθμιες γεννήτριες παραγωγής κρουστικών τάσεων .....	91
3.10.4 Συσκευή trigatron-σπινθηριστής.....	97
3.10.5 Πολυβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων .....	98
<b>3.11 Διατάξεις μετρήσεων υψηλών τάσεων .....</b>	<b>100</b>
3.11.1 Μέτρηση με καταμεριστές τάσεως .....	100
3.11.2 Ωμικός καταμεριστής τάσεως .....	101
3.11.3 Καθαρά χωρητικοί καταμεριστές τάσεως.....	101
3.11.4 Συνδεσμολογίες Καταμεριστών Τάσης.....	102
3.11.5 Μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω σφαιρικών διακένων.....	105
3.11.6 Μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω κρουστικού βολτομέτρου.	
106	
3.11.7 Μέτρηση τάσεων και ρευμάτων με παλμογράφο .....	107
<b>4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Ανάλυση Fourier και μετασχηματισμός Fourier.....</b>	<b>109</b>
<b>4.1 Εισαγωγή.....</b>	<b>109</b>
<b>4.1 Εφαρμογή του Μετασχηματισμού Fourier .....</b>	<b>109</b>

4.1.1	Ανάλυση σήματος και εφαρμογές Fourier .....	109
4.1.2	Μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου .....	110
4.2	<b>Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου .....</b>	<b>112</b>
4.3	<b>Διακριτός μετασχηματισμός Fourier .....</b>	<b>112</b>
4.4	<b>Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier ( FFT ) .....</b>	<b>113</b>
5	<b>Κεφάλαιο 5° : Ρύθμιση και δοκιμή της κάρτας μετρήσεων Octopus CompuScope .....</b>	<b>115</b>
5.1	<b>Εισαγωγή.....</b>	<b>115</b>
5.2	<b>Ρύθμιση και δοκιμή της κάρτας με γεννήτρια σημάτων .....</b>	<b>116</b>
5.2.1	Μέτρηση ημιτονικού σήματος .....	117
5.2.2	Μέτρηση τετραγωνικού σήματος.....	119
5.2.3	Μέτρηση κρουστικού σήματος .....	121
5.2.4	Επιπλέον παρατηρήσεις μετρήσεων.....	123
5.3	<b>Προτεινόμενος τρόπος μετρήσεων σε ένα πραγματικό σύστημα Υψηλών Τάσεων .....</b>	<b>124</b>
5.3.1	Γενικά στοιχεία για τον αισθητήρα τύπου πηνίου Rogowski .....	124
5.3.2	Πλεονεκτήματα και χρήση του πηνίου Rogowski .....	125
5.3.3	Απόδοση-χαρακτηριστικά του CWT .....	125
5.3.4	Διαστάσεις του πηνίου Rogowski .....	126
5.3.5	Αρχή λειτουργίας του πηνίου τύπου Rogowski .....	126
5.3.6	Η απόκριση συχνότητας του πηνίου Rogowski; .....	127
5.3.7	Γραμμικότητα.....	128
5.3.8	Τρόπος τοποθέτησης του πηνίου.....	128
5.3.1	Μειονεκτήματα χρήσης του πηνίου Rogowski CWT .....	129
5.3.2	Χρήσιμες συμβουλές για χρήση των πηνίων Rogowski σε υψηλή τάση	129
6	<b>Κεφάλαιο 6° : Συμπεράσματα.....</b>	<b>130</b>
6.1	<b>Πλεονεκτήματα.....</b>	<b>130</b>
6.2	<b>Θεματικές εργασίες με βάση το μετρητικό σύστημα της παρούσας διπλωματικής.....</b>	<b>130</b>
6.3	<b>Παρατηρήσεις μέσα από την χρήση και το software της κάρτας .....</b>	<b>131</b>
6.4	<b>Μέτρηση Υψηλών Τάσεων - Γενικές Παρατηρήσεις .....</b>	<b>131</b>
6.4.1	Προβλήματα κατά τη μέτρηση με καταμεριστές .....	132
6.4.2	Ατρωσία του εξοπλισμού μέτρησης.....	132
6.4.3	Επίδραση του κλάδου υψηλής τάσης του καταμεριστή τάσης .....	132
6.4.4	Επίδραση του κλάδου χαμηλής τάσης και του καλωδίου μέτρησης.....	133
	<b>Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές .....</b>	<b>135</b>
7.	<b>Παράρτημα Α :Κάρτα μετρήσεων Octopus CompuScope 8229 .....</b>	<b>138</b>

*Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.*

## **8. Παραρτημα Β : Ο ψηφιακός παλμογράφος GDS – 3254 ..... 151**

## Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 1 Ο τρόπος προσδιορισμού των χρόνων  $T_m$  και  $T_h$  σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC και VDE (25) ..... [83]

Πίνακας 2 Απόδοση-χαρακτηριστικά του CWT (33)..... [125]

## Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1-1 Γραφική αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος [3] ..... [23]

Εικόνα 1-2 γραφική αναπαράσταση ενός σήματος διακριτού χρόνου και ενός ψηφιακού σήματος..... [24]

Εικόνα 1-3 Πραγματική μορφή σήματος βήματος [2] ..... [25]

Εικόνα 1-4Απεικόνιση κρουστικού παλμού κατα την χρονική στιγμή  $t=t_0$  [3]..... [26]

Εικόνα 1-5 τετραγωνικός παλμός [3] ..... [26]

Εικόνα 1-6 Επαναλαμβανόμενοι παλμοί με περίοδο  $T_0$  [4]..... [27]

Εικόνα 1-7 Το σήμα  $x(t) = u(t + 2) - u(t - 1)$  [4]..... [28]

Εικόνα 1-8 συνάρτηση dirac [3] ..... [29]

Εικόνα 1-9 Στάδια μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό [6]..... [31]

Εικόνα 1-10 ADC μετατροπέας διπλής κλίσης [6]..... [32]

Εικόνα 1-11 Στάδια μετατροπής της αναλογικής τάσης σε ψηφιακή με Dual Slope A/D[6]..... [33]

Εικόνα 1-12Δομή του παράλληλου ADC με 3bits [6]..... [33]

Εικόνα 1-13 Παραλλαγή του παράλληλου ADC [6] ..... [34]

Εικόνα 1-14 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων [6] ..... [35]

Εικόνα 1-15 Λειτουργικό διάγραμμα του ADC σίγμα-δέλτα με διαμορφωτή πρώτης τάξης και ψηφιακό φίλτρο εξόδου [6] ..... [36]

Εικόνα 1-16 Κύκλωμα συγκράτησης με τη δομή cascade [6]..... [37]

Εικόνα 1-17 Κυκλώματα συγκράτησης με τη δομή ανάδρασης [6]..... [38]

Εικόνα 1-18 Σφάλμα αντιστάθμισης [6]..... [39]

Εικόνα 1-19 Σφάλμα πλήρους κλίμακας [6]..... [39]

Εικόνα 1-20 Σφάλμα κέρδους [6] .....	[39]
Εικόνα 1-21 Διαφορική μη-γραμμικότητα (Differential Non Linearity - DLN) [6] [40]	
Εικόνα 1-22 Ολοκληρωτική μη – γραμμικότητα (Integral Non Linearity - INL) [6] .....	[41]
Εικόνα 1-23 Μη ανίχνευση κώδικα [6] .....	[41]
Εικόνα 1-24 Παράδειγμα μη φιλτραρισμένου ημιτονικού σήματος, και φιλτραρισμένου ημιτονικού σήμα [7].....	[42]
Εικόνα 1-25 Απεικόνιση τεσσάρων φίλτρων [2] .....	[43]
Εικόνα 1-26 Αναλογικό φίλτρο [8].....	[44]
Εικόνα 1-27 Ψηφιακά φίλτρα [8] .....	[45]
Εικόνα 1-28 Συμπεριφορά των ιδανικών φίλτρων στο πεδίο της συχνότητας [7] ...	[46]
Εικόνα 1-29 καμπύλη απόκρισης πραγματικού φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων [10] .....	[47]
Εικόνα 1-30 Καμπύλες απόκρισης ιδανικών φίλτρων [10] .....	[47]
Εικόνα 1-31 Οικογένειες φίλτρων [10] .....	[48]
Εικόνα 1-32 Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων [11] .....	[49]
Εικόνα 1-33 Χαρακτηριστικά ενός βαθυπερατού φίλτρου [12].....	[49]
Εικόνα 1-34 Χαρακτηριστικά ενός υψηπερατού φίλτρου [12] .....	[50]
Εικόνα 1-35 Ζωνοδιαβατά φίλτρα [11] .....	[50]
Εικόνα 1-36 Φίλτρο απόρριψης ζώνης [11] .....	[51]
Εικόνα 1-37 Παράδειγμα υλοποίηση ζωνοδιαβατού φίλτρου πολλαπλής ανατροφοδότησης [11].....	[52]
Εικόνα 1-38 Παράδειγμα anti-aliasing φίλτρου [13].....	[53]
Εικόνα 1-39 Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με χρήση anti- aliasing φίλτρου [13].....	[53]
Εικόνα 1-40 Αναλογικό σήμα και ψηφιακό σήμα [3] .....	[55]
Εικόνα 1-41 Βασικά τμήματα ενός μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό [6] .....	[56]
Εικόνα 1-42 Ομοιόμορφη δειγματοληψία αναλογικού σήματος [14] .....	[57]

Εικόνα 1-43 Υπερδειγματοληψία αναλογικού σήματος με συχνότητα μεγαλύτερη της ελάχιστης απαιτούμενης (Nyquist) [18] .....	[58]
Εικόνα 1-44 Κβάντιση σήματος [19].....	[59]
Εικόνα 1-45 Κωδικοποίηση σήματος και σφάλμα κβάντισης [19].....	[60]
Εικόνα 2-1 Πρόσωση γεννήτριας σήματος [20] .....	[61]
Εικόνα 2-2 Κυκλωματική αναπαράσταση σχετικά με την επιλογή αντίστασης εξόδου της γεννήτριας [20] .....	[63]
Εικόνα 2-3 Απεικόνιση μιας κυματομορφής [22] .....	[64]
Εικόνα 2-4 Μέτρηση διαφοράς φάσης με τη μέθοδο της «διεγειρόμενης σάρωσης» [21] .....	[65]
Εικόνα 2-5 Ψηφιακός παλμογράφος εργαστηρίου - gds – 3254 [23].....	[66]
Εικόνα 2-6 Μετατροπή ήχου σε ηλεκτρικό σήμα. Και γραφική απεικόνιση μέσω του παλμογράφου [24].....	[67]
Εικόνα 3-1 Κόστος μεταφοράς σε διάφορα επίπεδα τάσης ως συνάρτηση της μεταφερόμενης ισχύος [26] .....	[71]
Εικόνα 3-2 Οικονομική τάση μεταφοράς HVAC ως συνάρτηση της ισχύος και της απόστασης [26] .....	[72]
Εικόνα 3-3 Διάταξη δοκιμών καλωδίων Μ.Τ και Υ.Τ. στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π [26] .....	[73]
Εικόνα 3-4 Εσωτερική κρουστική υψηλή τάση (SI), χαρακτηριστικές παράμετροι [26] .....	[75]
Εικόνα 3-5 Εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις , με τάση κορυφής $U_p$ , διάρκεια μετώπου T1 και τη διάρκεια ημίσεως εύρους T2 [27].....	[76]
Εικόνα 3-6 Ορθογωνική μορφή κρουστικής τάσεως [26] .....	[77]
Εικόνα 3-7 Σφηνοειδής μορφή κρουστικής τάσεως [26] .....	[77]
Εικόνα 3-8 Διπλοεκθετική μορφή κρουστικής τάσεως [26].....	[77]
Εικόνα 3-9 Αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων [28].....	[78]
Εικόνα 3-10 Παλμογράφημα υπερτάσεως σε γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [25].....	[79]
Εικόνα 3-11 Διπλοεκθετική κρουστική τάση [29] .....	[79]

Εικόνα 3-12 Καθορισμός ονομαστικών μεγεθών διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων .....	[80]
Εικόνα 3-13 Μέτωπο κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας όπου φαίνονται οι ταλαντώσεις στην αρχή της [26].....	[80]
Εικόνα 3-14 Κρουστική κεραυνική τάση τύπου 1,2/50 [25].....	[81]
Εικόνα 3-15 Κατηγορίες υπερτάσεων ανάλογα με την διάρκεια [28].....	[82]
Εικόνα 3-16 Κατάταξη των υπερτάσεων κατά IEC [28].....	[82]
Εικόνα 3-17 Διάταξη παραγωγής και μέτρησης εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων [26] .....	[84]
Εικόνα 3-18 Διάταξη μετασχηματιστή δοκιμών τριών βαθμίδων.....	[86]
Εικόνα 3-19 Τάση εξόδου απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης [25].....	[87]
Εικόνα 3-20 Διάταξη παραγωγής και μέτρησης συνεχών υψηλών τάσεων [26] .....	[88]
Εικόνα 3-21 Γεννήτρια Van de Graaff [26].....	[89]
Εικόνα 3-22 Γεννήτρια Van de Graaff σε λειτουργία [26].....	[90]
Εικόνα 3-23 Κύκλωμα γεννήτριας κρουστικών τάσεων 1,2/50μs κατά VDE-a και VDE-b [26] .....	[91]
Εικόνα 3-24 Μονοβάθμια διάταξη παραγωγής κρουστικών τάσεων(τύπου α) [25] [92]	[92]
Εικόνα 3-25 Απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας κρουστικών τάσεων. Ισχύει κατά τη διαμόρφωση του μετώπου των κρουστικών τάσεων [25].....	[93]
Εικόνα 3-26 Απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας κρουστικών τάσεων, που ισχύει κατά τη χρονική διάρκεια διαμορφώσεως της ουράς των κρουστικών τάσεων [25].....	[94]
Εικόνα 3-27 Μονοβάθμια διάταξη παραγωγής κρουστικών τάσεων(τύπου β) [25] [96]	[96]
Εικόνα 3-28 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος και φωτορεαλιστική απεικόνιση μονοβάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (τύπου α) καθώς και συνδεσμολογίες κυκλωμάτων μέτρησης [27] .....	[96]
Εικόνα 3-29 Κυκλωματικό διάγραμμα μονοβάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (τύπου α) και συνδεσμολογίες κυκλωμάτων μέτρησης [27].....	[97]
Εικόνα 3-30 Συσκευή trigatron με μεμονωμένο βοηθητικό ηλεκτρόδιο εναύσεως [25] .....	[98]
Εικόνα 3-31 Συσκευή Trigatron [27].....	[98]



Εικόνα 3-32 Πολυβάθμια διάταξη παραγωγής υψηλών κρουστικών τάσεων [25]..	[99]
Εικόνα 3-33 Ωμικός καταμεριστής τάσεως [25] .....	[101]
Εικόνα 3-34 Χωρητικός καταμεριστής τάσεως [25] .....	[102]
Εικόνα 3-35 Συνηθισμένες συνδεσμολογίες 1-11 ωμικών και χωρητικών καταμεριστών τάσης [30] .....	[105]
Εικόνα 3-36 Διάκενα σφαιρών [31].....	[106]
Εικόνα 3-37 Κύκλωμα μονοβάθμιας γεννήτριας κρουστικής τάσης [25].....	[107]
Εικόνα 4-1 Περιγραφή σημάτων στο πεδίο χρόνου και συχνότητας [32].....	[109]
Εικόνα 4-2 Παραδείγματα σημάτων [32] .....	[110]
Εικόνα 4-3 Κρουστική συνάρτηση $\delta(t)$ στο πεδίο του χρόνου και ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής συνάρτησης $\delta(t)$ [4] .....	[111]
Εικόνα 4-4 Χρήσιμες ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier [32] .....	[114]
Εικόνα 5-1 Ομοαξονικό καλώδιο [27].....	[115]
Εικόνα 5-2 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης κατά την καταπόνηση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών [25].....	[116]
Εικόνα 5-3 Μέτρηση του ημιτονικού σήματος. ....	[118]
Εικόνα 5-4 Ο μετασχηματισμός fourier του ημιτονικού σήματος.....	[118]
Εικόνα 5-5 Ο μετασχηματισμός Fourier του ημιτονικού σήματος σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων .....	[119]
Εικόνα 5-6 Μέτρηση του τετραγωνικού σήματος. ....	[120]
Εικόνα 5-7 Ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγωνικού σήματος .....	[120]
Εικόνα 5-8 Ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγωνικού σήματος σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων .....	[121]
Εικόνα 5-9 Μέτρηση του κρουστικού σήματος. ....	[122]
Εικόνα 5-10 Ο μετασχηματισμός Fourier του κρουστικού σήματος σε μικρό εύρος συχνοτήτων .....	[123]
Εικόνα 5-11 Πηνίο Rogowski συνδεδεμένο σε παλμογράφο [33] .....	[124]
Εικόνα 5-12 Διαστάσεις του CWT 30B [33].....	[126]
Εικόνα 5-13 σχηματική αναπαράσταση του πηνίου Rogowski και του ολοκληρωτή [33] .....	[126]

Εικόνα 5-14 Απόκριση συχνότητας του πηνίου Rogowski [33] .....	[127]
Εικόνα 5-15 Το κύκλωμα του ολοκληρωτή μαζί με το βαθυπερατό φίλτρο [33] ..	[127]
Εικόνα 5-16 Διακύμανση της ακρίβειας της μέτρησης σε όλο το πηνίο[33] .....	[128]
Εικόνα 6-1 Κλάδος χαμηλής τάσης ωμικού καταμεριστή [27] .....	[133]
Εικόνα 6-2 Ομοαξονικό καλώδιο μέτρησης [27] .....	[134]
Εικόνα 7-1 Χαρακτηριστικά των καρτών της οικογένειας Octopus 82xx [36].....	[138]
Εικόνα 7-2 Το απλοποιημένο block διάγραμμα της οικογένειας Octopus CompuScore 82XX [36] .....	[138]
Εικόνα 7-3 Επιπλέον στοιχεία για τις κάρτες της οικογένειας Octopus CompuScore 82XX [36] .....	[140]
Εικόνα 7-4: Connectors on the Octopus family cards [36].....	[140]
Εικόνα 7-5 : Απεικόνιση της απόκρισης συχνότητας [36] .....	[142]
Εικόνα 7-6. Απεικόνιση του προγράμματος GageScore 2 καναλιών μαζί με το μενού επιλογών [36] .....	[143]
Εικόνα 7-7 Παράμετροι του πεδίου channel config [36].....	[144]
Εικόνα 7-8 : Δημιουργία ενός σήματος σκανδαλισμού με ενεργοποίηση στην κάθοδο [36].....	[145]
Εικόνα 7-9: Χρήση παραθύρου σκανδαλισμού [36] .....	[146]
Εικόνα 7-10: Παράθυρο InfoView [36].....	[147]
Εικόνα 7-11 Παράμετροι τάσης [36] .....	[148]
Εικόνα 7-12 Παράμετροι χρόνου [36] .....	[149]
Εικόνα 7-13 Παράδειγμα ανάλυσης Fourier [36] .....	[149]
Εικόνα 7-14 Η γραμμή εργαλείων του λογισμικού GageScore [36] .....	[150]
Εικόνα 7-15 Παράθυρο ρυθμίσεων της ανάλυσης φουριερ [36].....	[150]
Εικόνα 8-1 Ο ψηφιακός παλμογράφος GDS – 3254 .....	[151]

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία αποτελείται από πέντε βασικά κεφάλαια και στη συνέχεια ακολουθούν τα συμπεράσματα και δυο παραρτήματα.

Στο **πρώτο κεφάλαιο** γίνεται μια εκτενής περιγραφή στην θεωρία των σημάτων και συστημάτων και στις κατηγορίες τους. Επιπλέον, γίνεται αναφορά στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος, στην δειγματοληψία σημάτων, στις κατηγορίες φίλτρων και κυρίως σε αυτό που αφορά την εν λόγω πτυχιακή, δηλαδή στην μετατροπή ενός σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό.

Στο **δεύτερο κεφάλαιο** γίνεται ανάλυση στον τρόπο λειτουργίας των γεννητριών σήματος και των παλμογράφων. Η χρήση τους ήταν απαραίτητη για τη σωστή ρύθμιση του συστήματος μέτρησης, και για το λόγο αυτό θεωρείται σημαντικό κομμάτι της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Στο  **τρίτο κεφάλαιο** παρατίθενται βασικά στοιχεία πάνω στην θεωρία των υψηλών τάσεων και γίνεται μερική αναφορά στον εξοπλισμό και την τεχνολογία του εργαστηρίου υψηλών τάσεων. Παρουσιάζονται τρόποι μέτρησης και εφαρμογές των υψηλών τάσεων, ενώ δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην παραγωγή και στην μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων.

Στο **τέταρτο κεφάλαιο** παρουσιάζεται η ανάλυση fourier και ο μετασχηματισμός fourier σημάτων συνεχούς χρόνου και διακριτού χρόνου. Παρουσιάζεται ακόμα ο διακριτός μετασχηματισμός fourier, ο γρήγορος μετασχηματισμός fourier, καθώς και οι εφαρμογές τους.

Στο **πέμπτο κεφάλαιο** περιγράφεται το αναλογικό σε ψηφιακό μετρητικό σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στο Εργαστήριο υψηλών τάσεων για την μέτρηση σημάτων κρουστικών υψηλών τάσεων, τα χαρακτηριστικά της κάρτας μετρήσεων και ορισμένες λειτουργίες της κάρτας. Το πέμπτο κεφάλαιο είναι το πειραματικό μέρος αυτής της διπλωματικής και περιγράφεται η διάταξη του συστήματος μετρήσεων καθώς και τα αποτελέσματα της μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν. Ακόμη περιγράφεται η λειτουργία του πηνίου τύπου Rogowski και ο ρόλος του σε τέτοια συστήματα μετρήσεων.

Στο **Παράρτημα Α** δίνονται λεπτομέρειες σχετικά με το λογισμικό που απαιτείται για τον έλεγχο της κάρτας μετρήσεων Octopus CompuScope 8229 128m της εταιρίας GAGE. Γίνεται συνοπτική περιγραφή των επιμέρους υπολογιστικών πακέτων που περιλαμβάνει, ενώ παρουσιάζονται οι σημαντικότερες εντολές που αντιστοιχούν στις επιμέρους λειτουργίες. Επιπλέον, θίγονται επιμελώς ορισμένες από τις δυνατότητες του προγράμματος, οι οποίες θεωρήθηκαν πολύτιμες και αξιοποιήθηκαν για την υλοποίηση των μετρήσεων της παρούσας εργασίας.

Τέλος στο **Παράρτημα Β** γίνεται αναφορά στον παλμογράφο και στην γεννήτρια συχνοτήτων του εργαστηρίου υψηλών τάσεων.

Το πρώτο μέρος των μετρήσεων και η χρήση της κάρτας έγινε με την συμμετοχή μιας γεννήτριας σημάτων μεγάλου εύρους συχνοτήτων, και αυτό για την εξοικείωση της χρήσης της κάρτας υπό ασφαλείς συνθήκες, και την επιβεβαίωση της σωστής ρύθμισης και λειτουργίας της. Για το δεύτερο μέρος των μετρήσεων έγινε μια μικρή μελέτη και προετοιμασία για μελλοντική εφαρμογή στο εργαστήριο Υ.Τ και περιγράφεται στην συνέχεια.

Ο πιο συνηθισμένος και πλήρης τρόπος, για τον προσδιορισμό της κυματομορφής μιας κρουστικής υψηλής τάσης είναι η μείωση της τάσης μέσω ενός Καταμεριστή Τάσης (K/T) και στην συνέχεια η λήψη της από έναν ψηφιακό παλμογράφο. Το σήμα

που μετριέται μεταφέρεται από την πλευρά της χαμηλής τάσεως του Κ/Τ στον παλμογράφο.

Στις υψηλές τάσεις διεξάγεται πλήθος μετρήσεων πολλών κατηγοριών, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δυο κριτήρια:

- α) την τιμή των υπό μέτρηση μεγεθών
- β) την ταχύτητα της χρονικής μεταβολής τους.

Τις περισσότερες φορές στην έξοδο των διατάξεων παραγωγής υψηλών τάσεων συνδέεται καταμεριστής τάσης για τον υποβιβασμό της τάσεως σε επίπεδα που επιβάλλονται από την λειτουργία των οργάνων μέτρησης.

Στη βασική διάταξη ο παλμογράφος αντικαθίσταται με ένα υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένη η κάρτα μέτρησης, αναδεικνύοντας τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν.

### **Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας**

Βασικό αντικείμενο του τομέα των υψηλών τάσεων είναι η επιλογή των βέλτιστων και οικονομικότερα δυνατό μονώσεων μέσα στην εγκατάσταση, ώστε να αποφεύγονται ανεπιθύμητες και καταστροφικές ηλεκτρικές υπερπηδήσεις. Κρίνεται καλό λοιπόν, να είναι γνωστές οι καταπονήσεις που κάνουν την εμφάνιση τους κατά την λειτουργία των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων, το πώς οι μονώσεις ανταποκρίνονται σε αυτές τις καταπονήσεις και τελικά, τι μέθοδοι και τεχνικές εφαρμόζονται για την έγκαιρη πρόληψη και αντιμετώπιση αυτών των μην επιθυμητών ηλεκτρικών φαινομένων πάνω στον εξοπλισμό μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης, ή στον εξοπλισμό ως προς γή με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Γι' αυτόν τον λόγο, ίσως με τον όρο «Υψηλή Τάση» θα μπορούσε να χαρακτηριστεί οποιαδήποτε τιμή τάσης, ικανή να θέσει σε κίνδυνο, άμεσα ή έμμεσα, τη διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων και να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερπήδησης ή διάσπασης των μονωτικών διατάξεων.

Μέσω αυτής της διπλωματικής εργασίας αναλύεται ένα σύστημα το οποίο είναι κατάλληλο για μετρήσεις αυτού του είδους τις ταχύτατες (στην περιοχή των ns) ηλεκτρικές υπερπηδήσεις, και γενικά των κρουστικών φαινομένων από προβλήματα σε υλικά και μονώσεις κατά την γήρανση τους, στις εγκαταστάσεις των Υψηλών Τάσεων.

### **Σκοπός και στόχοι**

Βασική επιδίωξη της μέτρησης και ανάλυσης σημάτων υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας ηλεκτρικών συσκευών ή διατάξεων είναι η μελέτη των διαφόρων φυσικών μεγεθών που εισέρχονται, έτσι ώστε να καθίσταται δυνατός ο έλεγχός τους, όπου αυτό απαιτείται. Η μελέτη αυτή μπορεί να γίνει είτε πειραματικά, μέσω δοκιμών και μετρήσεων, είτε με τη βοήθεια προσομοιώσεων, κάνοντας χρήση κάποιου λογισμικού Η/Υ. Πράγματι, χάρις την ανάπτυξη των αριθμητικών μεθόδων υπολογισμού και την αλματώδη πρόοδο των ηλεκτρονικών υπολογιστών, δίνεται η δυνατότητα μέσω αυτού του αναλογικού ψηφιακού μετατροπέα ο οποίος είναι κατάλληλος για μετρήσεις κρουστικών σημάτων στις υψηλές τάσεις, να γίνεται μελέτη και αποφυγή των φαινομένων που παρουσιάζονται κατά τη γήρανση και διάσπαση ηλεκτρομονωτικών υλικών και.

Μεγάλο πλεονέκτημα αυτού του ψηφιακού οργάνου αποτελεί ο συνδυασμός υψηλής ακρίβειας και ταχείας ανταπόκρισης απ' τη μια, καθώς μετράει και εντοπίζει

σήματα συχνότητας στην περιοχή των MHz και δειγματοληπτεί στην περιοχή των ‘nanosecond’, και σημαντικής εξοικονόμησης χρόνου και εξοπλισμού, από την άλλη, καθώς ικανοποιεί ποικίλα είδη μετρήσεων με ελάχιστο εξοπλισμό.

## **Μεθοδολογία**

Η μεθοδολογία που ακολουθείται σε αυτή την διπλωματική εργασία είναι η μέθοδος «Επιστημονικής /Τεχνολογικής» έρευνας.

Και αυτό γιατί, δίνει μια πιθανή απάντηση ή λύση σε ένα πρόβλημα μέσω των στοιχείων και των θεωριών που συλλέγονται απευθείας από τα ίδια τα «φαινόμενα/αντικείμενα».

Διακρίνονται τρεις φάσεις-στάδια της τεχνολογικής έρευνας [1]:

- Προπαρασκευαστική φάση: Για αρχή, επιλέγεται και διατυπώνεται το ερευνητικό θέμα (ερευνητική ιδέα) αλλά και καθορίζεται η διαδικασία για τη συλλογή του υλικού που χρειάζεται για την πραγματοποίηση αυτής της έρευνας. (σχεδιασμός/προσέγγιση προβλήματος).
- Εκτελεστική φάση: Εδώ γίνεται συλλογή του υλικού και των δεδομένων (αναζήτηση βιβλιογραφίας) και η ανάλυση και ερμηνεία αυτών (ερευνητικό-πειραματικό στάδιο).
- Κοινοποίηση αποτελεσμάτων: Στην τελευταία φάση πραγματοποιείται η τελική συγγραφή του ερευνητικού θέματος και η κοινοποίηση της σε χώρους της επιστημονικής κοινότητας (δημοσιεύσεις-συνέδρια).

## 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup> : Μέτρηση και επεξεργασία σημάτων

### 1.1 Εισαγωγή στα Σήματα

Είναι γνωστό ότι για να λειτουργήσει ένα κύκλωμα χρειάζεται να εφαρμοστεί στην είσοδο του ένα σήμα τάσης ή (έντασης), δηλαδή ένα σήμα διέγερσης, το οποίο οδηγεί στο να εμφανιστεί ένα αντίστοιχο σήμα, (σήμα απόκρισης) στην έξοδο του κυκλώματος. Η περιγραφή αυτή, ουσιαστικά είναι ένας τρόπος μεταφοράς μιας μορφής ενέργειας από μια πηγή σ' ένα φορτίο [2].

Οποιοδήποτε σήμα διέγερσης σε ένα κύκλωμα, εκτός από φορέας ενέργειας είναι και φορέας πληροφορίας για κάποια από τα χαρακτηριστικά της πηγής από την οποία προέρχεται, καθώς όπως είναι γνωστό υπάρχει άμεση σχέση μεταξύ των δύο εννοιών «ενέργεια» και «πληροφορία». Το ίδιο ισχύει και για οποιοδήποτε άλλο τμήμα ενός κυκλώματος στο οποίο υπάρχει μεταφορά κάποιου σήματος [2].

Για την εύρεση των βέλτιστων τεχνικών ανάδειξης και επεξήγησης της πληροφορίας που μεταφέρεται, πολύ σημαντική προϋπόθεση αποτελεί η κατανόηση της λειτουργίας ενός σήματος μέσω της μελέτης αυτού και των χαρακτηριστικών του, καθώς και η διάκριση του και η ταξινόμηση του. Με αυτόν τρόπο είναι δυνατόν να γίνουν γνωστές οι ιδιότητες που χρειάζεται να έχουν τα συστήματα/κυκλώματα για την επιδιωκόμενη επεξεργασία των σημάτων[2].

Στη συνέχεια, γίνεται μια γενική περιγραφή στην θεωρία των σημάτων, στην ταξινόμηση αυτών, στην μαθηματική περιγραφή τους καθώς επίσης και στα βασικά χαρακτηριστικά τους για την διάκριση αυτών σε κατηγορίες, και για τη σωστή χρήση και λειτουργία των κυκλωμάτων-συστημάτων.

### 1.2 Είδη και Κατηγορίες Σημάτων

Κάθε σήμα αποτελείται από ορισμένα φυσικά μεγέθη, όπως το μέτρο του ή η μεταβολή του μέτρου, το οποίο εκφράζει την κατάσταση ή την πορεία ενός συστήματος. Άρα υπό την έννοια αυτή, κάθε σήμα είναι και μια πληροφορία για ένα η περισσότερα χαρακτηριστικά του συστήματος από το οποίο προέρχεται [2].

Ως σήμα ορίζονται οι τιμές που λαμβάνουν δύο μεταβλητές, μία ποσότητα  $y$  και μια ποσότητα  $x$  οι οποίες μαθηματικά είναι γνωστές ως «εξαρτημένη μεταβλητή» και «ανεξάρτητη μεταβλητή» αντίστοιχα. Όταν οι δύο ποσότητες λαμβάνουν συνεχείς τιμές, τότε το σήμα λέγεται αναλογικό ή συνεχές και η συνάρτηση του είναι η  $y(x)$ . Όταν η  $y$  ποσότητα δέχεται συνεχείς τιμές και η  $x$  ποσότητα διακριτές τιμές μόνο, τότε το σήμα είναι γνωστό ως σήμα διακριτού χρόνου με ακολουθία  $y[n]$ , ενώ αν και οι δύο ποσότητες  $x$  και  $y$  δέχονται διακριτές τιμές η ακολουθία είναι πάλι  $y[n]$  και το σήμα λέγεται ψηφιακό. Ένα αναλογικό σήμα μπορεί να γίνει ψηφιακό, μέσω της διαδικασίας γνωστής ως δειγματοληψία, που αποτελεί κομμάτι της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος και περιγράφεται στις επόμενες ενότητες. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι, το σήμα να μπορέσει να αποθηκευτεί και να επεξεργαστεί σε ένα ηλεκτρονικό υπολογιστή [2].

Ένα απλό παράδειγμα αναλογικού σήματος είναι η τιμή που έχει η τάση στα άκρα των οπλισμών ενός πυκνωτή σε ένα κύκλωμα σε συνάρτηση με τον χρόνο, στην διάρκεια φόρτισης και εκφόρτισης του πυκνωτή.

Κάθε σήμα μιας ή και περισσότερων μεταβλητών, αναπαρίσταται από μια μαθηματική συνάρτηση. Άρα, είναι κατανοητό ότι αυτά ταξινομούνται ανάλογα με το πλήθος και τις ιδιότητες των μεταβλητών τους, εξαρτημένων η ανεξάρτητων.

Τα σήματα μίας ανεξάρτητης μεταβλητής ορίζονται ως μονοδιάστατα όταν η μεταβλητή είναι ο χρόνος, η αλλιώς μονοκαναλικά όταν τα συστήματα από τα οποία προέρχονται έχουν μια μόνο έξοδο [2].

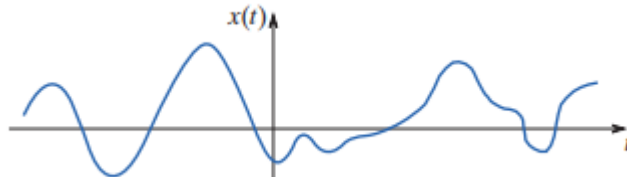
Συνοπτικά, μπορούν να δοθούν οι παρακάτω απλοί ορισμοί για τις έννοιες του σήματος και του συστήματος [2]:

- Σήμα είναι μία συνάρτηση η οποία αντιπροσωπεύει πληροφορίες για την κατάσταση συμπεριφοράς ενός φυσικού συστήματος.
- Σύστημα, είναι η διαδικασία εκείνη που δέχεται, επεξεργάζεται, μετατρέπει, καταγράφει, ή μεταβιβάζει σήματα.

### 1.2.1 Σήματα συνεχούς χρόνου ή αναλογικά σήματα

Τα σήματα συνεχούς χρόνου (CT = Current Time) παίρνουν πραγματικές ή μιγαδικές τιμές και συμβολίζονται ως  $x(t)$ . Δηλαδή ένα σήμα είναι αναλογικό όταν οι δύο μεταβλητές, εξαρτημένη και ανεξάρτητη (π.χ χρόνος και πλάτος), παίρνουν συνεχείς τιμές. Τα περισσότερα σήματα που υπάρχουν στην φύση είναι αναλογικά (π.χ ομιλία, ηλεκτρισμός). Τυπικό παράδειγμα σήματος συνεχούς χρόνου φαίνεται στην Εικόνα 1-1.

Μια σημαντική κατηγορία σημάτων είναι CT είναι τα σήματα της μορφής  $x(t)=e^{st}$ , όπου  $s$  είναι ένας μιγαδικός αριθμός. Το σήμα συνεχούς χρόνου  $x(t)$  είναι μια μιγαδική ποσότητα και έχει ένα πραγματικό και ένα φανταστικό μέρος (μιγαδική αναπαράσταση) ή ένα πλάτος και μια φάση (πολική αναπαράσταση) [3].



Εικόνα 1-1 Γραφική αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφείμ Καραμπογιάς

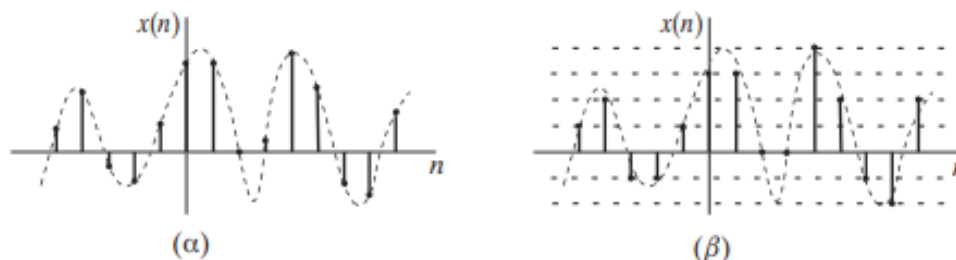
### 1.2.2 Σήματα διακριτού χρόνου

Τα σήματα διακριτού χρόνου (DT = Discrete Time) λαμβάνουν πραγματικές ή μιγαδικές τιμές και συμβολίζονται για παράδειγμα ως  $x(n)$ . Δηλαδή σήμα διακριτού χρόνου είναι μια συνάρτηση κατά την οποία η ανεξάρτητη μεταβλητή (π.χ χρόνος) λαμβάνει μόνο συγκεκριμένες/διακριτές τιμές, ενώ η εξαρτημένη μεταβλητή (π.χ πλάτος) λαμβάνει μόνο συνεχείς τιμές. Αυτά είναι αποτέλεσμα της δειγματοληψίας των αναλογικών σημάτων. Τα σήματα διακριτού χρόνου παράγονται με δειγματοληψία ενός σήματος συνεχούς χρόνου, (π.χ ,φωνή), μέσω αναλογικού-ψηφιακού μετατροπέα. Στην Εικόνα 1-2α φαίνεται η μορφή ενός τέτοιου σήματος [2].

### 1.2.3 Ψηφιακά Σήματα

Τα ψηφιακά σήματα είναι μια συνάρτηση στην οποία και οι δύο μεταβλητές, ανεξάρτητη και εξαρτημένη, λαμβάνουν μόνο διακριτές τιμές. Αυτά είναι αποτέλεσμα

της δειγματοληψίας και της κβαντοποίησης των αναλογικών σημάτων. Είναι ευρέως διαδεδομένα καθώς υλοποιούνται εύκολα είτε μέσω υπολογιστών είτε μέσω ειδικών ψηφιακών κυκλωμάτων, ενώ η ανάλυσή τους μέσω χρήση ειδικών μαθηματικών εργαλείων, όπως για παράδειγμα μέσω μετασχηματισμού Fourier, είναι πολύ πιο εύκολη σε σχέση με την ανάλυση αναλογικών σημάτων. Στην Εικόνα 1-2β φαίνεται η μορφή ενός ψηφιακού σήματος [2].



Εικόνα 1-2 γραφική αναπαράσταση ενός σήματος διακριτού χρόνου (α), και ενός ψηφιακού σήματος(β) [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφείμ Καραμπογιάς

#### 1.2.4 Βηματική Συνάρτηση

Σήμα βήματος η βηματική συνάρτηση είναι ένα σήμα  $x(t)$  το οποίο μαθηματικά μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση [2]:

$$X(t)=A \cdot u(t-t_0) \quad (1.1)$$

όπου  $A$ =σταθερά και  $u(t)$  είναι η συνάρτηση μοναδιαίου βήματος (unit step function) η οποία μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$u(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

Τέτοιου είδους σήματα είναι σήματα ισχύος άπειρης διάρκειας, και χρησιμοποιούνται για την περιγραφή μεταβατικών φαινομένων. Όπως προκύπτει από τον ορισμό τους, ένα σήμα βήματος εκφράζει την ακαριαία μετάβαση, για τη χρονική στιγμή  $t=t_0$ , ενός συστήματος ή μιας διαδικασίας, από τη μια σταθερή κατάσταση σε μια άλλη [2].

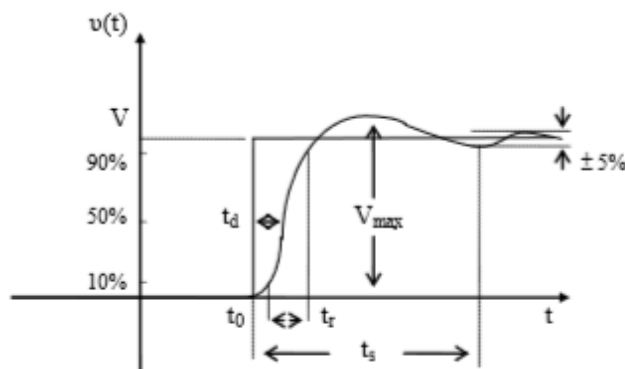
Στην Εικόνα 1-3 δίνεται ένα παράδειγμα σήματος τάσης, όπου φαίνεται η μορφή ενός βηματικού σήματος στην έξοδο ενός κυκλώματος στην πράξη. Το πλάτος δεν μεταβάλλεται ακαριαία αλλά χρειάζεται κάποιο χρονικό διάστημα, ενώ η τελική τιμή του πλάτους καθορίζεται μετά από σειρά αποσβενόμενων ταλαντώσεων με διάρκεια η οποία θεωρητικά τείνει στο άπειρο [2].

Στην συνέχεια παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη του πραγματικού σήματος βήματος με πλάτος  $V$  [2]:

- **ο χρόνος καθυστέρησης  $t_d$  (delay time):** Είναι ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται μέχρι να φτάσει το πλάτος στο 50% της τελικής του τιμής.
- **ο χρόνος ανόδου ή ανύψωσης  $t_r$  (rise time):** Ορίζεται ο χρόνος που απαιτείται για να μεταβληθεί το πλάτος από το 10% έως το 90% της τελική του τιμής.



- **ο χρόνος αποκατάστασης  $t_s$  (settling time):** Είναι ο χρόνος ο οποίος χρειάζεται ώστε το πλάτος να πλησιάζει την τελική του τιμή, δηλαδή η απόκλιση να είναι μικρότερη του 3-5% μεγίστου πλάτους.
- **η υπερύψωση  $M$  (overshoot):** Η υπερύψωση είναι όταν το πλάτος ξεπερνάει τη μέγιστη τιμή του στο μέτωπο του σήματος (άνοδος), και ορίζεται ως  $M=(V_{max}-V)/V$ . Συνήθως μετριέται ως ποσοστό της τελικής τιμής του.



Εικόνα 1-3 Πραγματική μορφή σήματος βήματος [2]  
 ©[https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02\\_chapter\\_02.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02_chapter_02.pdf)

Τέλος όσο πιο μικρές είναι οι τιμές των παραπάνω χαρακτηριστικών ενός αληθινού σήματος βήματος, τόσο πιο πολύ η κυματομορφή θα πλησιάζει την ιδανική [2].

### 1.2.5 Ορθογωνικοί παλμοί

Τα σήματα ορθογωνικών παλμών αποτελούν σημαντική κατηγορία σημάτων, τόσο περιοδικών όσο και μη περιοδικών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό τους είναι η παρουσία επαναλαμβανόμενων ή μη ορθογωνικών παλμών, δηλαδή σημάτων των οποίων η κυματομορφή αποτελείται από διάφορα ορθογώνια σχήματα. Οι πιο συνηθισμένες μορφές αυτών των σημάτων είναι, το μεμονωμένο σήμα ή αλλιώς το σήμα του κρουστικού παλμού ή σήμα συνάρτησης ώσεως (impulse function), καθώς και τα σήματα σειράς παλμών [2].

Ο κρουστικός παλμός είναι μια οριακή μορφή ορθογώνιου παλμού, της μορφής [3]:

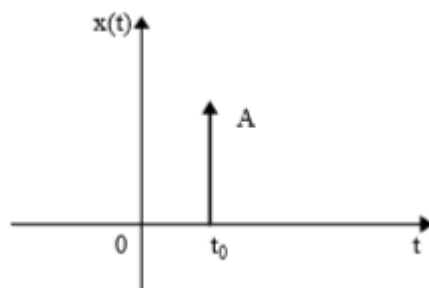
$$x(t) = A \cdot \delta(t - t_0) \quad (1.3)$$

όπου  $\delta(t)$  είναι η συνάρτηση Δέλτα ή Dirac.

Βασικό χαρακτηριστικό της συνάρτησης δέλτα αποτελεί το γεγονός ότι περικλείει μια επιφάνεια στην διεύθυνση της καθέτου στο σημείο  $t=0$ , και το εμβαδόν της είναι ίσο με τη μονάδα. Συμβολίζεται δε με ένα βέλος που δείχνει προς τα θετικά του κατακόρυφου άξονα. Η σταθερά  $A$  έχει να κάνει με το εμβαδόν του κρουστικού σήματος και όχι με το πλάτος του. Στην Εικόνα 1-4, δίνεται γραφικά ένα παράδειγμα κρουστικού παλμού. Η μαθηματική της περιγραφή είναι η ακόλουθη [3]:

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty, & t = 0 \\ 0, & t \neq 0 \end{cases} \quad \text{και} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (1.4)$$

Σημαντικό γνώρισμα της  $\delta(t)$  είναι ότι αποτελεί την πρώτη παράγωγο της βηματικής συνάρτησης, δηλαδή  $\delta(t)=du(t)/dt$ .

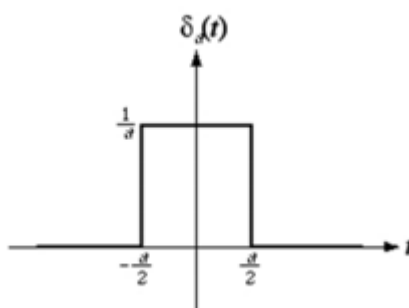


Εικόνα 1-4 Απεικόνιση κρουστικού παλμού κατά την χρονική στιγμή  $t=t_0$  [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφείμ Καραμπογιάς

### 1.2.6 Ο τετραγωνικός παλμός

Ο τετραγωνικός παλμός είναι μια ειδική περίπτωση του ορθογωνικού παλμού. Ο λόγος που εξετάζεται ξεχωριστά είναι ότι βρίσκει εφαρμογή σε πολλά συστήματα, όπως για παράδειγμα τα σήματα ρολογιού στα ψηφιακά συστήματα. Η μορφή ενός τετραγωνικού παλμού φαίνεται στην Εικόνα 1-5. Ο τετραγωνικός παλμός διάρκειας  $\alpha/2$  και πλάτους  $1/\alpha$  περιγράφεται μαθηματικά από τη σχέση [4]:

$$\delta_{\alpha}(t) = \begin{cases} 1/\alpha & , \quad t < |\alpha/2| \\ 0 & , \quad t > |\alpha/2| \end{cases} \quad (1.5)$$



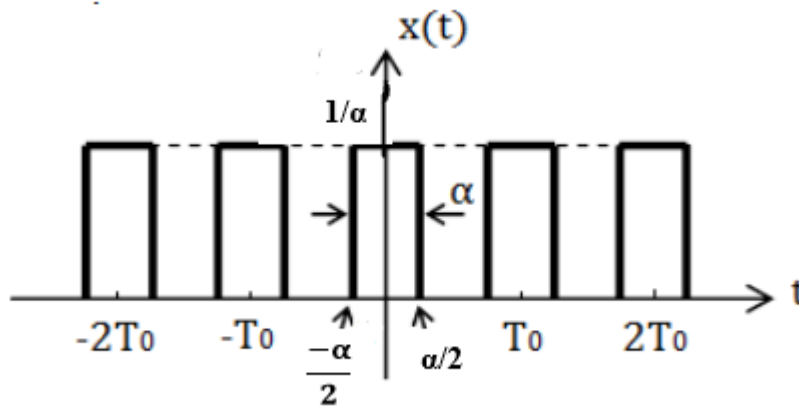
Εικόνα 1-5 τετραγωνικός παλμός [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφείμ Καραμπογιάς

Ο τετραγωνικός παλμός μπορεί να παραχθεί από την αφαίρεση δύο συναρτήσεων μοναδιαίου βήματος, δηλαδή από τη σχέση [4]:

$$\delta_{\alpha}(t) = \frac{1}{\alpha} [ u(t + \frac{\alpha}{2}) - u(t - \frac{\alpha}{2}) ] \quad (1.6)$$

Επαναλαμβανόμενοι παλμοί με περίοδο  $T_0$  δημιουργούν ένα «τραίνο παλμών», το οποίο είναι περιοδικό σήμα με περίοδο  $T_0$  και διάρκεια παλμού  $\alpha/2$ .

Το τραίνο παλμών έχει ενδιαφέρον στις ψηφιακές επικοινωνίες επειδή προσεγγίζει τις μεταδιδόμενες παλμοσειρές που περιγράφουν τα δείγματα ενός ψηφιακού σήματος. Ένα τέτοιο τραίνο παλμών φαίνεται στην Εικόνα 1-6 [4].



Εικόνα 1-6 Επαναλαμβανόμενοι παλμοί με περίοδο  $T_0$  [4] ©Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Τζιόλας/Μιχάλης Παρασκευάς

### 1.2.7 Σήματα πεπερασμένης και άπειρης διάρκειας

Ένα σήμα  $x(t)$  λέγεται σήμα πεπερασμένης διάρκειας όταν ισχύουν οι παρακάτω προϋποθέσεις:

$$x(t) = \begin{cases} 0, & t < \tau_1 \\ 0, & t \geq \tau_2 \end{cases} \quad (1.7)$$

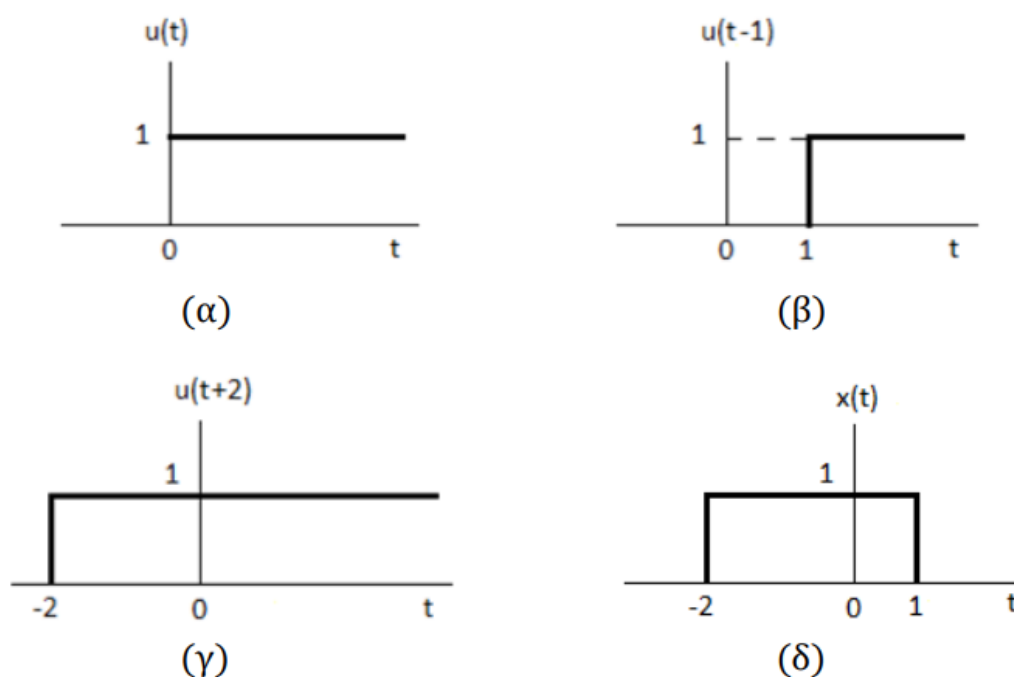
Όπου τα  $\tau_1$  και  $\tau_2$  ( $\tau_1 < \tau_2$ ) είναι πεπερασμένοι αριθμοί δηλαδή αριθμοί που δεν απειρίζουν. Όταν ένας από τους δύο αριθμούς γίνει ίσος με το άπειρο, τότε το σήμα έχει άπειρη διάρκεια [3].

### 1.3 Συντελεστές μερικής ή έμμεσης περιγραφής των περιοδικών σημάτων

Εδώ γίνεται αναφορά στους τρόπους προσδιορισμού των χαρακτηριστικών ενός σήματος όπως, η μέση ή η ενεργός τιμή του σήματος, και αυτός ο προσδιορισμός αποτελεί έναν τρόπο μερικής ή έμμεσης περιγραφής του σήματος. Σε αυτήν την περιγραφή υπάρχουν κάποιοι συντελεστές που βοηθάνε στην περιγραφή των περιοδικών σημάτων όπως φαίνεται παρακάτω. Σε αντίθετη περίπτωση η πλήρης και αναλυτική περιγραφή γίνεται είτε με τον προσδιορισμό όλων των αναλυτικών χαρακτηριστικών των συναρτήσεων του σήματος, είτε μέσω γραφικών παραστάσεων που το χαρακτηρίζουν [3]:

- **Συντελεστής κύκλου εργασίας  $D$** , είναι ο λόγος  $D = \tau/T$ , δηλαδή το χρονικό διάστημα  $\tau$  στο οποίο ένα σήμα έχει μεγαλύτερη τιμή από την μέση τιμή του, προς την περίοδο του σήματος.
- **Συντελεστής μορφής**, είναι ο λόγος της ενεργού τιμής ενός περιοδικού σήματος, προς την απόλυτη μέση τιμή του για το διάστημα μιας περιόδου.
- **Συντελεστής ύψους (CF = crest factor)**, ορίζεται ο λόγος  $CF = X_{\max}/X_{\text{rms}}$  δηλαδή η μέγιστη τιμή ενός περιοδικού σήματος (θετική ή αρνητική), προς την ενεργό τιμή του.

Στη συνέχεια δίνεται ένα απλό παράδειγμα σχεδιασμού απλών σημάτων με βάση τη βηματική συνάρτηση. Σε αυτό το παράδειγμα υπάρχει η ανάγκη σχεδίασης του σήματος  $x(t) = u(t + 2) - u(t - 1)$ . Το σήμα αυτό αποτελείται ουσιαστικά από την αφαίρεση δυο βηματικών συναρτήσεων  $u(t)$ , εκ των οποίων η πρώτη είναι μετατοπισμένη προς τα αριστερά και κατά χρόνο  $t_1 = 2$  μονάδες χρόνου  $u(t+2)$ , ενώ η δεύτερη είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά κατά 1 μονάδα χρόνου  $u(t-1)$ . Συνεπώς θα πρέπει πρώτα να προσδιοριστούν οι  $u(t+2)$  και  $u(t-1)$  και μετά να γίνει η αφαίρεσή τους. Στην Εικόνα 1-7 φαίνεται ο προσδιορισμός του σήματος  $x(t)$  με γραφικό τρόπο [4].



Εικόνα 1-7 Το σήμα  $x(t) = u(t + 2) - u(t - 1)$  [4] ©Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Τζιόλας/ Μιχάλης Παρασκευάς

## 1.4 Κρούση

### 1.4.1 Ορισμός κρούσης

Η κρούση είναι ένα φυσικό φαινόμενο και αναφέρεται στην στιγμιαία προσέγγιση δύο σωμάτων δηλαδή είναι η διαδικασία κατά την οποία για ένα πολύ μικρό χρονικό διάστημα ασκούνται μεγάλες δυνάμεις μεταξύ δύο σωμάτων. Κατά την διάρκεια της κρούσης δύο σωμάτων, όταν δεν ασκούνται εξωτερικές δυνάμεις στα σώματα ή αυτές οι δυνάμεις είναι πολύ μικρές σε σχέση με τις εσωτερικές, ισχύει η αρχή διατήρησης της ορμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην μεταβάλλεται η συνολική ορμή και να μένει σταθερή [3].

Υπάρχουν δύο κατηγορίες κρούσεων ανάλογα με την κατάσταση της κινητικής ενέργειας των σωμάτων. η ελαστική κρούση όταν η κινητική ενέργεια δεν μεταβάλλεται και ανελαστική όταν η κινητική ενέργεια ελαττώνεται. Ακόμη υπάρχει και η πλαστική κρούση κατά της οποίας τα δύο σώματα μετά την κρούση γίνονται συσσωμάτωμα [3].

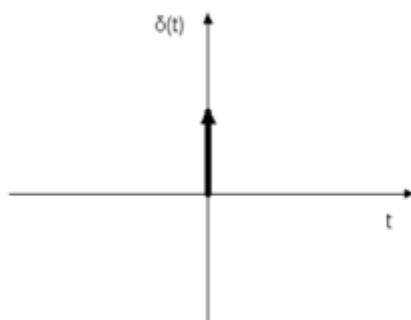
### 1.4.2 Κρουστική συνάρτηση

Η κρουστική συνάρτηση ή συνάρτηση δέλτα ή αλλιώς συνάρτηση ντιράκ είναι η μαθηματική αναπαράσταση μίας ποσότητας η οποία περιγράφει κάποιο φαινόμενο που μοιάζει σε αυτό της κρούσης. Όπως ήδη έχει αναφερθεί, η κρουστική συνάρτηση περιγράφεται μαθηματικά από την συνάρτηση Δέλτα μέσω της ακόλουθης μαθηματικής σχέσης [3]:

$$\delta(x) = \begin{cases} \infty, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases} \quad \text{και} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta(x) dx = 1 \quad (1.8)$$

Ένα σήμα του οποίου η μορφή περιγράφεται μέσω της κρουστικής συνάρτησης, ονομάζεται κρουστικό σήμα. Η μορφή ενός τέτοιου σήματος μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-8. Ένα τέτοιου είδους σήμα επιτρέπει την περιγραφή φαινομένων με στιγμιαία διάρκεια. Επιπλέον, το μοναδιαίο κρουστικό σήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν μια συνάρτηση που μηδενίζεται για κάθε  $t \neq 0$  και το συνολικό εμβαδόν του τμήματος του επιπέδου που περικλείεται από την καμπύλη  $\delta(t)$  και τον άξονα των  $t$  είναι ίσο με την μονάδα, ενώ η μαθηματική περιγραφή του μοναδιαίου κρουστικού σήματος δίνεται από τη σχέση [3]:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & \text{αν } t \neq 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1, \end{cases} \quad (1.9)$$



Εικόνα 1-8 συνάρτηση dirac [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφείμ Καραμπογιάς

### 1.4.3 Εφαρμογές της κρουστικής συνάρτησης

Η κρουστική συνάρτηση μπορεί να εφαρμοστεί για την ανάλυση πολλαπλών συστημάτων, ενώ τυπικά παραδείγματα εφαρμογών της αποτελούν τα ακόλουθα [5]:

- **Μοντέλα:** Η κρουστική συνάρτηση είναι ένα μαθηματικό μοντέλο το οποίο είναι χρήσιμο στην μελέτη φαινομένων, των οποίων τα μεγέθη, γίνονται πολύ μεγάλα για ελάχιστο χρόνο. Ένα φυσικό παράδειγμα είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος σε έναν ανοικτό διακόπτη, όταν εμφανίζεται σπινθήρας.
- **Σύστημα υπό μελέτη:** Σε αυτή την περίπτωση η είσοδος σε ένα σύστημα στο οποίο πρέπει να υπολογιστεί η κρουστική απόκριση του, είναι η κρουστική συνάρτηση, και η έξοδος του συστήματος λέγεται συνάρτηση μεταφοράς του συστήματος.

- **Κβαντική μηχανική:** Στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής, ένα γνωστό πρόβλημα είναι αυτό της κίνησης ενός σωματιδίου σε ένα πηγάδι δυναμικού δέλτα.

## 1.5 A/D Μετατροπείς

### 1.5.1 Εισαγωγή

Στην ενότητα αυτή θα γίνει αναφορά και περιγραφή των βασικών κατηγοριών μετατροπέων των αναλογικών σημάτων σε ψηφιακά (A/D = Analog to Digital). Οι συσκευές αυτές έχουν ως στόχο να μετατρέψουν τα αναλογικά σήματα σε ψηφιακά. Η ανάγκη που υπάρχει για την μετατροπή σημάτων είναι για την επεξεργασία τους την μεταφορά και την αποθήκευση τους σε ηλεκτρονικό υπολογιστή. Οι λόγοι που οδήγησαν στη χρήση των ψηφιακών σημάτων μπορούν να γίνουν περισσότερο κατανοητοί μέσω μια κλασσικής διάταξης μέτρησης με ηλεκτρονικό υπολογιστή. Συγκεκριμένα ένας ηλεκτρονικός υπολογιστής μπορεί να χειρίζεται δεδομένα που είναι σε ψηφιακή μορφή, δηλαδή με ακολουθίες που αναπαρίστανται με τα ψηφία 1 και 0. Γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητη η μετατροπή ενός σήματος/δεδομένου(ήχου, εικόνας) από αναλογική σε ψηφιακή μορφή, ώστε να μπορεί να γίνει σωστά η επεξεργασία τους. Επιπλέον οι υπολογιστές δίνουν τη δυνατότητα εξόδου όπως είναι για παράδειγμα η έξοδος της εικόνας στην οθόνη του υπολογιστή. Κατά τη διαδικασία της εξόδου θα πρέπει να γίνει η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή ,μετατροπή του σήματος από ψηφιακό σε αναλογικό D/A (Digital To Analog) [6].

Όπως για κάθε άλλη περίπτωση, η χρήση των ψηφιακών σημάτων έχει κάποια πλεονεκτήματα αλλά και κάποια μειονεκτήματα. Αυτά μπορούν να συνοψιστούν ως εξής [6]:

#### **Πλεονεκτήματα ψηφιακών σημάτων:**

- Ομοιομορφία (δηλαδή δίνεται η ευκαιρία να μετατραπούν σε ψηφιακή μορφή όλα τα είδη πληροφορίας αλλά και να επεξεργαστούν με τον ίδιο τρόπο.)
- Παρουσιάζουν μικρότερη ευαισθησία στον θόρυβο.
- Η αποκρυπτογράφηση των πληροφοριών είναι πιο εύκολη.
- Πολλά είδη σημάτων και πηγές πολυμεσικές (Multimedia) όπως η φωνή, τα βίντεο και τα δεδομένα, έχουν την δυνατότητα κοινής μετάδοσης μέσω ενός ψηφιακού συστήματος
- Παρέχεται η δυνατότητα να εντοπιστούν τυχών σφάλματα και να διορθωθούν.

#### **Μειονεκτήματα ψηφιακών σημάτων:**

- Τα σήματα μπορεί να παραμορφωθούν λόγω της δειγματοληψίας και της κβάντισης.
- Απαιτούν μεγαλύτερο εύρος ζώνης.

Η μετάδοση και αναπαραγωγή του σήματος σε δυαδική μορφή εξασφαλίζει τη δυνατότητα της επεξεργασίας του σήματος, ακόμα και σε πραγματικό χρόνο. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα σημαντικές βελτιώσεις στην ποιότητα του σήματος και στην δημιουργία ειδικών εφέ. Επιπλέον, με την χρήση μόνιμων η προσωρινών μνημών, είναι δυνατόν να αποθηκευτεί ένα σήμα για παραπέρα επεξεργασία και αναμετάδοση. Ως επακόλουθο, τα ψηφιακά συστήματα επικρατούν σήμερα σε όλες τις μορφές

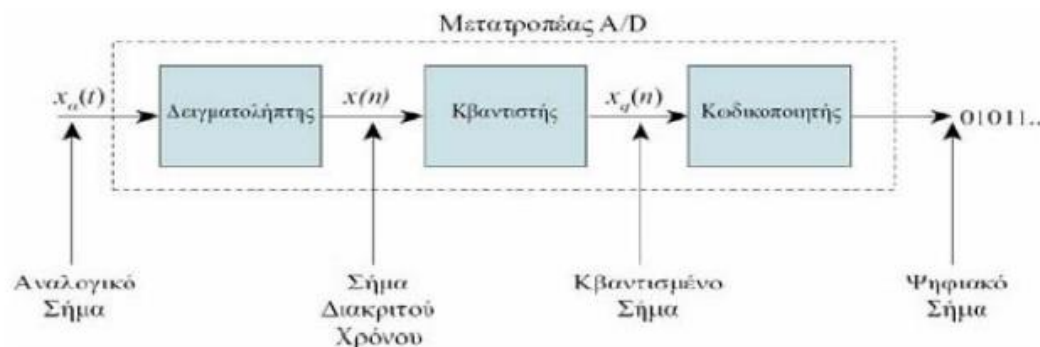
Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

μετάδοσης πληροφορίας, καθώς εξασφαλίζεται ανώτερη ποιότητα και ευκολίες σε συνδυασμό με σχετικά χαμηλό κόστος υλοποίησης [6].

### 1.5.2 Λειτουργία των A/D Μετατροπών (ADC)

Για να μετατραπεί ένα σήμα από αναλογικό σε ψηφιακό απαιτούνται τρία στάδια [7]:

1. Πρώτο στάδιο είναι η δειγματοληψία, δηλαδή η μετατροπή του σήματος σε διακριτό.
2. Μετά ακολουθεί η διαδικασία της κβαντοποίησης δηλαδή της μετατροπής του σε σήμα διακριτού πλάτους.
3. Τελευταίο στάδιο είναι η κωδικοποίηση, δηλαδή η μετατροπή σε ακολουθία δυαδικών ψηφίων όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-9.



Εικόνα 1-9 Στάδια μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

Δύο αποφάσεις που χρειάζεται να ληφθούν υπόψη είναι, το πόσο συχνά θα γίνεται η δειγματοληψία και δεύτερον πόσες τιμές θα έχει το πεδίο τιμών. Αυτές οι δύο αποφάσεις είναι σημαντικές, γιατί καθορίζουν τις προδιαγραφές του ADC καθώς και τα όρια που έχει. Επίσης καθορίζεται και σε ποιον αλγόριθμο από τους γνωστούς μέχρι σήμερα θα πρέπει να καταφύγει κάποιος σχεδιαστής, ώστε να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του [6].

Οι πιο διαδεδομένες κατηγορίες ADC είναι οι ακόλουθες [6]:

- 1.Successive approximation
- 2.Single slope integration
- 3.Dual slope integration
- 4.Flash ADC
- 5.Delta Sigma
- 6.Algorithmic A/D

Οι παραπάνω κατηγορίες μετατροπών βασίζονται στις εξής βασικές ιδέες [6]:

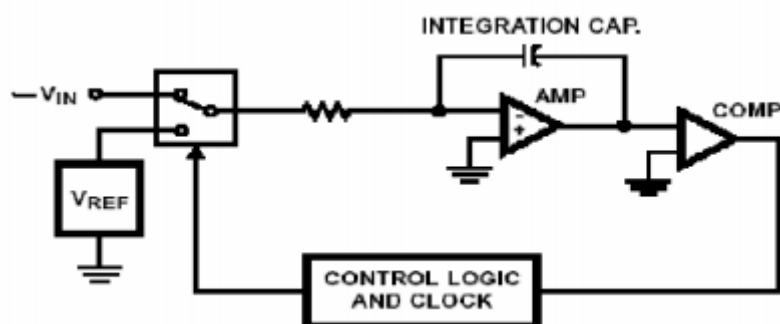
- **Counting or Ramp ADC:** Μια τάση αναφοράς αυξάνεται με σταθερά βήματα μέχρι να γίνει μεγαλύτερη από το δείγμα. Ο δυαδικός αριθμός που αντιστοιχεί στους

παλμούς του ρολογιού που χρειάστηκαν γι' αυτό, είναι η κβαντισμένη τιμή του δείγματος.

- **Serial or Successive Approximation ADC (Σειριακός ADC ή διαδοχικών προσεγγίσεων ADC):** Χρησιμοποιεί δυαδική αναζήτηση (μέχρι να φθάσει στην επιθυμητή ακρίβεια) για να προσδιορίσει την ζώνη κβαντισμού του δείγματος εισόδου.
- **Parallel or Flash ADC (Παράλληλος ή «αστραπιαίος»):** Το δείγμα εισόδου συγκρίνεται ταυτόχρονα με όλα τα δυνατά επίπεδα κβαντισμού.

### 1.5.3 Dual Slope A/D Converter

Στην Εικόνα 1-10 παρουσιάζεται ένας απλοποιημένος Dual Slope A/D converter. Τα κυριότερα στοιχεία που τον αποτελούν είναι δυο ενισχυτές, ο ένας λειτουργεί σαν ολοκληρωτής και ο δεύτερος σαν συγκριτής. Αποτελείται από ένα ψηφιακό μέρος το «Control Logic and Clock» που είναι υπεύθυνο για τον συντονισμό του κυκλώματος. Περιέχει και έναν counter των N bits που δίνει την ακρίβεια του μετατροπέα. Επιπλέον δέχεται την προς μέτρηση τάση  $V_{in}$  και την τάση αναφοράς  $V_{ref}$  [6].

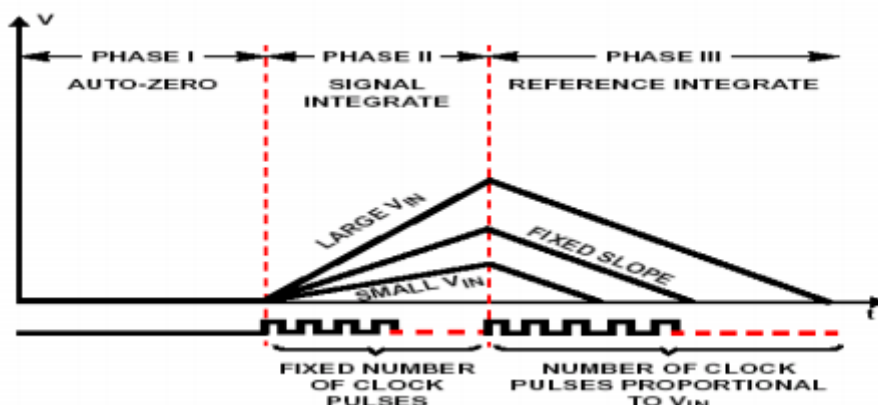


Εικόνα 1-10 ADC μετατροπέας διπλής κλίσης [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

Για την μετατροπή της αναλογικής τάσης σε ψηφιακή ακολουθούνται τρία στάδια, τα οποία τα συγχρονίζει η μονάδα λογικού ελέγχου. Το πρώτο στάδιο είναι το στάδιο ηρεμίας. Εδώ ο διακόπτης είναι συνδεδεμένος με την  $V_{ref}$ , και η έξοδος του ολοκληρωτή και του συγκριτή είναι τέτοιες ώστε η μονάδα ελέγχου να μην επιτρέπει στο μετρητή να ξεκινήσει τη μέτρηση. Στο δεύτερο στάδιο ο διακόπτης συνδέεται με την  $V_{in}$ , και ο ολοκληρωτής αρχίζει να την ολοκληρώνει. Συγχρόνως ο συγκριτής δίνει σήμα στη μονάδα ελέγχου, ώστε να ξεκινήσει ο μετρητής να μετράει  $2N$  παλμούς για ένα χρονικό διάστημα που εξαρτάται από την περίοδο του ρολογιού του  $T_{CLK}$ . Όταν τελειώσει η μέτρηση, ο μετρητής μηδενίζεται και ξεκινά το τρίτο στάδιο, όπου η μονάδα ελέγχου δίνει σήμα να συνδεθεί η  $V_{ref}$ . Τότε αρχίζει πάλι η μέτρηση του μετρητή, και σταματάει όταν η τάση στην έξοδο του ολοκληρωτή γίνει ελάχιστα αρνητική. Το χρονικό διάστημα είναι ίσο με  $T_M = T_{CLK} \cdot K$ , όπου  $K$  είναι οι παλμοί που μετρήσε ο μετρητής, και εξαρτάται από την  $V_{in}$  όπως φαίνεται και από την Εικόνα 1-11 [6].



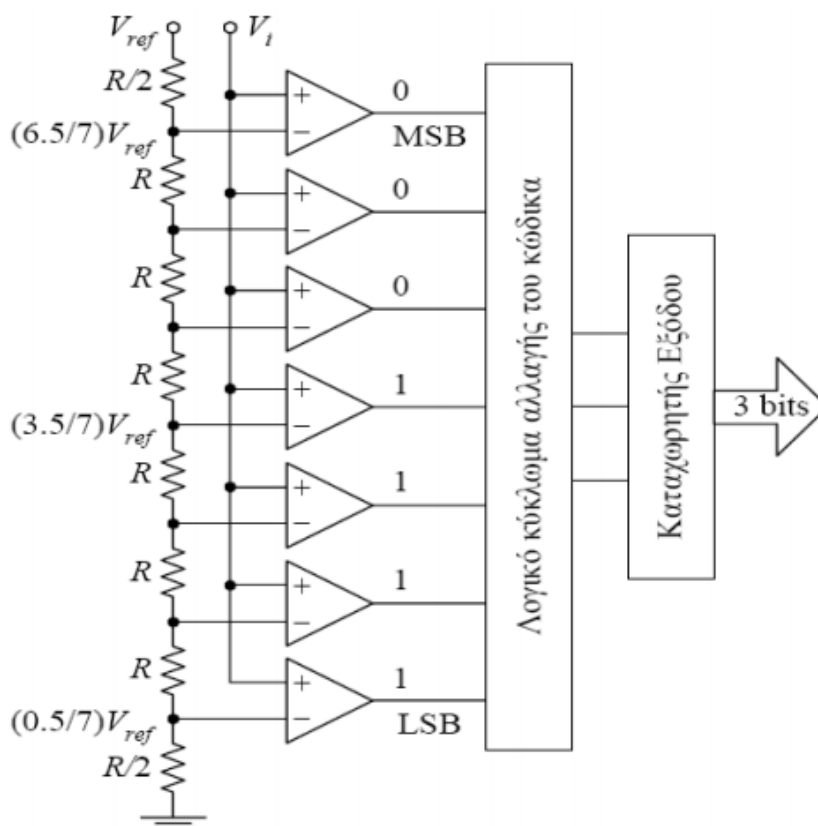
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-11 Στάδια μετατροπής της αναλογικής τάσης σε ψηφιακή με Dual Slope A/D[6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

### 1.5.4 Παράλληλοι Μετατροπείς A/D

Η παράλληλη τεχνική χρησιμοποιείται στην υλοποίηση ADC με πολύ μικρούς χρόνους μετατροπής. Για το σκοπό αυτό η τάση εισόδου συγκρίνεται μέσω συγκριτών με τις επιμέρους τάσεις αναφοράς, οι οποίες παράγονται από την  $V_{ref}$  με ένα ωμικό διαιρέτη τάσης. Άρα, σε κάθε συγκριτή η έξοδος του δείχνει αν η τάση στην είσοδο είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την αντίστοιχη τάση αναφοράς. Όσο μεγαλύτερη είναι η τάση εισόδου τόσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των συγκριτών [6].



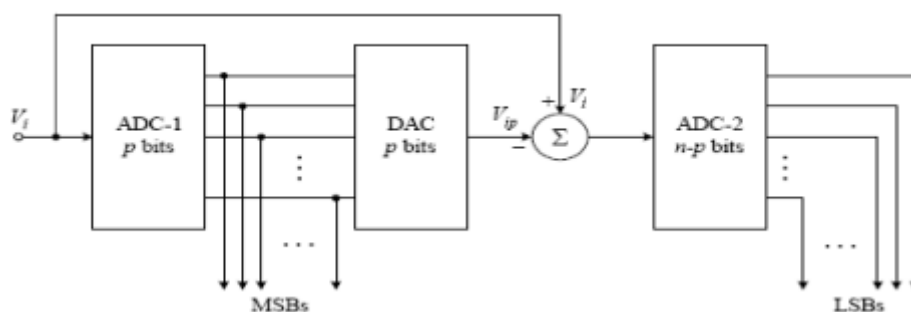
Εικόνα 1-12Δομή του παράλληλου ADC με 3bits. Εικονίζεται η κατάσταση εξόδου των συγκριτών όταν ισχύει  $(3.5/7)V_{ref} < V_i < (4.5/7)V_{ref}$  [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

Επειδή ο ψηφιακός κώδικας στην έξοδο των συγκριτών δεν είναι εύχρηστος, χρησιμοποιείται κάποιο λογικό κύκλωμα για τη μετατροπή του στον επιθυμητό κώδικα. Στους μονοπολικούς DAC χρησιμοποιείται συνήθως ο δυαδικός κώδικας, ο οποίος παρέχει  $2^N$  διακριτές τιμές από  $n$  bits, ενώ άλλοι κώδικες σε χρήση είναι ο BCD και ο Gray. Στους διπολικούς DAC οι πλέον εύχρηστοι κώδικες είναι ο δυαδικός με πόλωση και ο κώδικας με συμπλήρωμα ως προς δύο. Για παράδειγμα στην Εικόνα 1-12 παρουσιάζεται η δομή του παράλληλου ADC με 3bits [6].

Ο δυαδικός κώδικας με πόλωση είναι ισοδύναμος με τον απλό δυαδικό κώδικα, με τη διαφορά ότι το μηδέν αντιστοιχεί στη μέγιστη αρνητική τάση εισόδου [6].

Άλλοι κώδικες είναι «ως προς το πρόσημο και μέγεθος» και ο κώδικας «με συμπλήρωμα ως προς ένα», στους οποίους το μηδέν παριστάνεται με δύο τρόπους και είναι πιο δύσχρηστοι για το ψηφιακό σύστημα επεξεργασίας [6].

Το μειονέκτημα των παράλληλων ADC είναι ο πολύ μεγάλος αριθμός των συγκριτών ( $2^N-1$ ) όταν ο αριθμός των bits της ψηφιακής λέξης εξόδου ( $N$ ) είναι υψηλός. Ως αποτέλεσμα η κατασκευή παράλληλων ADC με πολλά bits είναι δύσκολη και υψηλού κόστους [6].

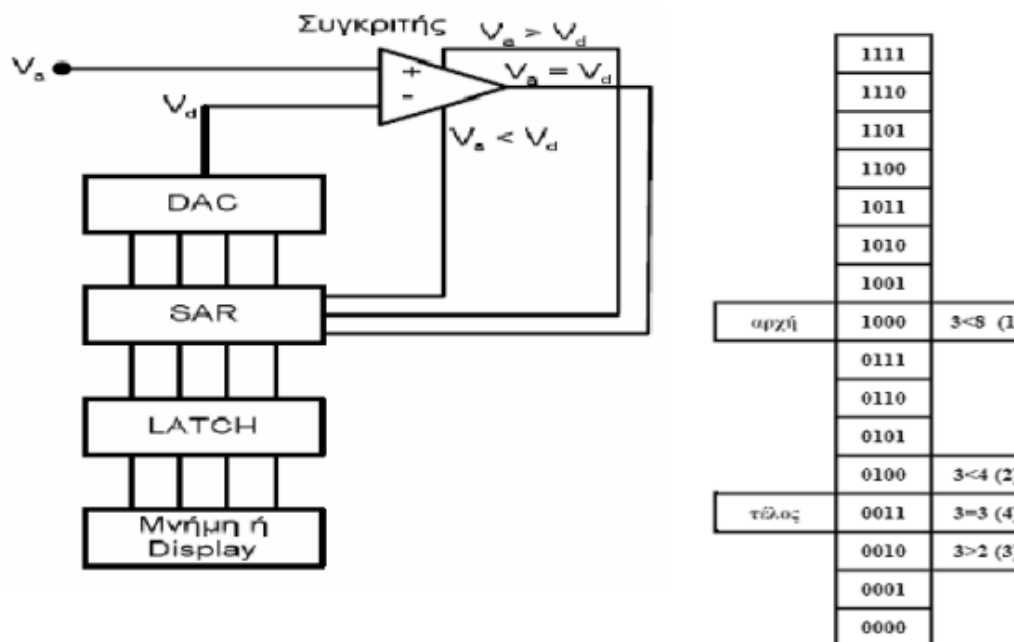


Εικόνα 1-13 Παραλλαγή του παράλληλου ADC [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Γσιάτουρας Κωνσταντίνος

Μια παραλλαγή του παράλληλου ADC παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-13, με δύο στάδια μετατροπής και μειωμένο αριθμό συγκριτών. Ο πρώτος παράλληλος ADC μετατρέπει την τάση εισόδου και παράγει τα  $p$  περισσότερα σημαντικά bits του ψηφιακού κώδικα εξόδου. Τα bits αυτά οδηγούνται σ' ένα DAC, ο οποίος παράγει την αναλογική τάση  $V_{dp}$ . Η αναλογική τάση που προκύπτει από τη διαφορά  $V_i - V_{dp}$  οδηγείται στο δεύτερο ADC, ο οποίος παράγει τα  $n-p$  λιγότερο σημαντικά ψηφία του ψηφιακού κώδικα των  $n$  bits [6].

### 1.5.5 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων

Ένας άλλος τύπος μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό σήμα είναι μετατροπέας AD διαδοχικών προσεγγίσεων (Successive approximation AD converter), το μπλοκ διάγραμμα του οποίου φαίνεται στην Εικόνα 1-14. Η τεχνική των διαδοχικών προσεγγίσεων στηρίζεται σε ένα προγραμματιζόμενο καταχωρητή τον SAR (Successive approximation register). Στην Εικόνα 1-14 δίνεται επιπλέον ένα παράδειγμα μετατροπής ενός αναλογικού σήματος σε 4-bit δυαδικό σήμα, το οποίο λαμβάνει αρχικά την τιμή 1000 [6].



Εικόνα 1-14 Μετατροπέας A/D διαδοχικών προσεγγίσεων [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

Η τιμή αυτή δίνει την αντίστοιχη  $V_d$  τιμή μέσω του ψηφιακού σε αναλογικό σήμα μετατροπέα, η οποία συγκρίνεται με την προς μετατροπή αναλογική τάση εισόδου  $V_a$ . Αν  $V_a > V_d$  κρατάει το 1 στο MSB και προσθέτει ένα 1 στο αμέσως λιγότερο σημαντικό. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να προκύψει ισότητα  $V_a = V_d$ , οπότε η τιμή αυτή δίνεται μέσω του «latch» στην έξοδο και η διαδικασία επαναλαμβάνεται εξ' αρχής. Για παράδειγμα αν η  $V_a$  κυμαίνεται μεταξύ 0 και 15V και έχουμε  $V_a = 3V$ , οι τιμές που θα ακολουθήσει ο SAR μέχρι να καταλήξει στην τιμή 0011 φαίνονται στην Εικόνα 1-14. Ξεκινώντας από τη θέση (1) περνά διαδοχικά από τις θέσεις (2),(3) και καταλήγει στην θέση που υπάρχει ισότητα [6].

### 1.5.6 Μετατροπείς A/D Σίγμα Δέλτα

Για τους μετατροπείς που αναφέρθηκαν παραπάνω ,είναι ανάγκη να διατηρείται σταθερό καθ' όλη την χρονική περίοδο της μετατροπής το αναλογικό σήμα εισόδου. Στην επόμενη παράγραφο περιγράφονται τα κυκλώματα συγκράτησης που χρησιμοποιούνται για το σκοπό. Η συχνότητα δειγματοληψίας  $f_s$  του αναλογικού σήματος εισόδου, με μέγιστη συχνότητα  $f_i$ , περιορίζεται από το χρόνο μετατροπής του ADC [6].

Με βάση το θεώρημα του Nyquist, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να ικανοποιεί τη σχέση  $f_s \geq 2 \cdot f_i$ , έτσι ώστε να είναι δυνατή η επεξεργασία του αναλογικού σήματος εισόδου χωρίς παραμόρφωση, από τη ψηφιακή έξοδο του ADC.

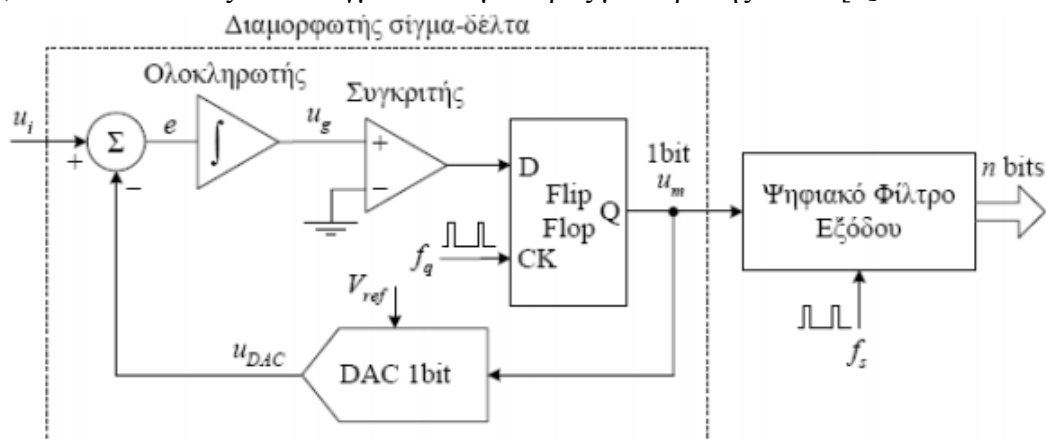
Το αναλογικό σήμα κβαντίζεται σε  $2^N$  στάθμες, όπου  $N$  είναι ο αριθμός των bits του ψηφιακού κώδικα. Οι ADC μετατροπείς τύπου σίγμα δέλτα (sigma-delta ADCs), αποτελούνται από δύο μέρη, το διαμορφωτή σίγμα δέλτα και το ψηφιακό φίλτρο εξόδου (digital decimation filter) [6].

Ο διαμορφωτής σίγμα δέλτα λειτουργεί ως μετατροπέας τάσης σε συχνότητα, επιτελώντας την κβαντοποίηση του αναλογικού σήματος εισόδου. Ο διαμορφωτής παρέχει στην έξοδό του μια παλμοσειρά από λογικά “1” και “0” με διάρκεια  $T = 1/f_q$ ,

όπου  $f_q$  είναι η συχνότητα κβαντοποίησης ή συχνότητα υπερδειγματοληψίας (oversampling frequency) [6].

Το ψηφιακό φίλτρο του ADC σίγμα δέλτα επιτελεί τη μετατροπή της παλμοσειράς εξόδου από το διαμορφωτή (ψηφιακό σήμα του 1bit), σε ψηφιακές λέξεις των N bits [6].

Στον διαμορφωτή πρώτης τάξης περιέχεται ένας ολοκληρωτής, όπου στην είσοδο του οδηγείται η διαφορά  $e$  του αναλογικού σήματος εισόδου από το σήμα που παρέχει ένας DAC του ενός bit. Η τάση αναφοράς ( $V_{ref}$ ) του DAC ορίζει την περιοχή τιμών του σήματος εισόδου  $u_i$ . Έτσι, με τη χρήση ενός διπολικού DAC με τάση αναφοράς 10V, υλοποιείται ένας ADC σίγμα δέλτα με εύρος μετατροπής  $\pm 10V$  [6].



Εικόνα 1-15 Λειτουργικό διάγραμμα του ADC σίγμα-δέλτα με διαμορφωτή πρώτης τάξης και ψηφιακό φίλτρο εξόδου [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

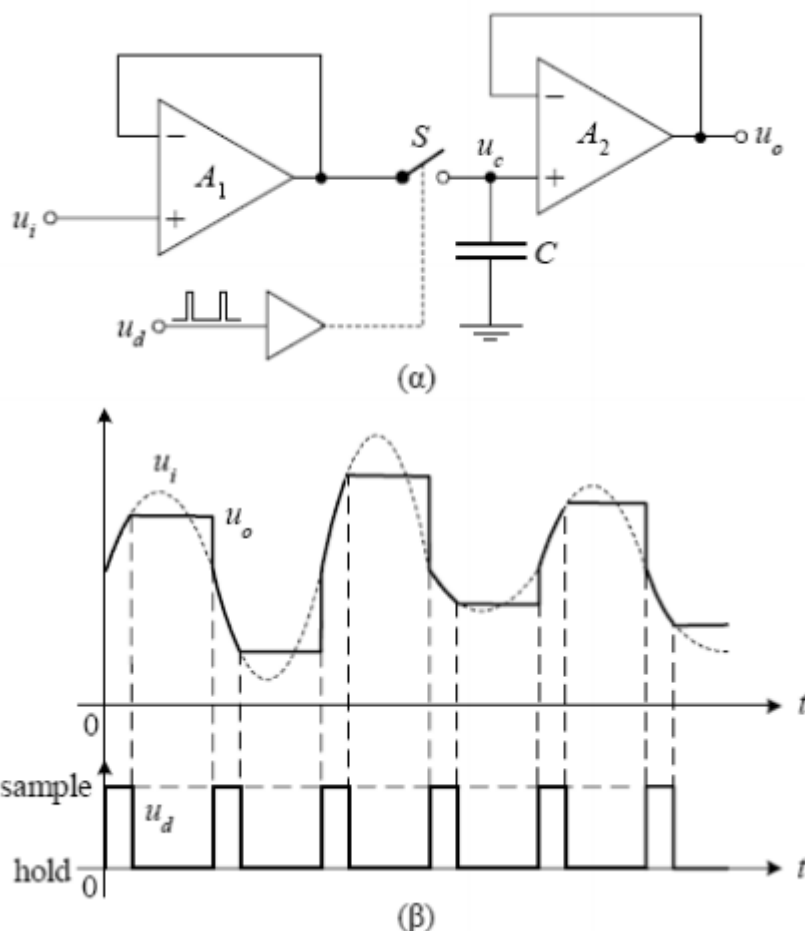
Η έξοδος του ολοκληρωτή  $u_g$  συγκρίνεται με το μηδέν, με τη συχνότητα υπερδειγματοληψίας  $f_q$ , μέσω ενός συγκριτή και ενός D Flip-Flop. Ο συγκριτής και το Flip-Flop επιτελούν την κβαντοποίηση του σήματος εισόδου στο 1bit. Το ψηφιακό σήμα  $u_m$  στην έξοδο του Flip-Flop αποτελεί την είσοδο του DAC και ταυτόχρονα την παλμοσειρά εξόδου του διαμορφωτή σίγμα δέλτα. Όμως λόγω του ότι ο διαμορφωτής λειτουργεί σε κλειστό βρόχο, η μέση τιμή του σήματος στην έξοδο του DAC είναι ίση με το αναλογικό σήμα εισόδου. Στην Εικόνα 1-15 φαίνεται ένα τυπικό παράδειγμα ενός Σίγμα-Δέλτα αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα [6].

### 1.5.7 Κυκλώματα Συγκράτησης

Το αναλογικό σήμα στην είσοδο των ADC μετατροπέων θα πρέπει να μένει σταθερό για το χρονικό διάστημα της μετατροπής. Για το σκοπό αυτό παρεμβάλλονται τα κυκλώματα συγκράτησης (sample and hold circuits, S/H) στην αναλογική είσοδο των ADC. Το βασικό κύκλωμα συγκράτησης αποτελείται από ένα πυκνωτή C και ένα διακόπτη S, ο οποίος οδηγείται από το ψηφιακό σήμα ελέγχου. Στην Εικόνα 1-16α εικονίζεται το απλούστερο πρακτικό κύκλωμα συγκράτησης, με τη δομή cascade (αλληλουχίας). Όταν ο διακόπτης είναι κλειστός (κατάσταση δειγματοληψίας) η τάση στα άκρα του πυκνωτή και η τάση εξόδου είναι ίσες με την τάση εισόδου ( $u_o = u_c = u_i$ ) [6].

Όταν ο διακόπτης ανοίξει (κατάσταση συγκράτησης) ο πυκνωτής συγκρατεί την τρέχουσα τιμή της τάσης εισόδου (την τιμή της  $u_i$  όταν δόθηκε η εντολή συγκράτησης). Οι κυματομορφές της Εικόνα 1-16β επεξηγούν πλήρως τη λειτουργία του κυκλώματος συγκράτησης. Οι τελεστικοί ενισχυτές σε συνδεσμολογία ακολουθητή τάσης, απομονώνουν τον πυκνωτή συγκράτησης C από την είσοδο και την έξοδο του

κυκλώματος S/H. Έτσι, η πηγή εισόδου μπορεί να έχει υψηλή εσωτερική αντίσταση και αντίστοιχα η αντίσταση του φορτίου να είναι μικρής τιμής [6].

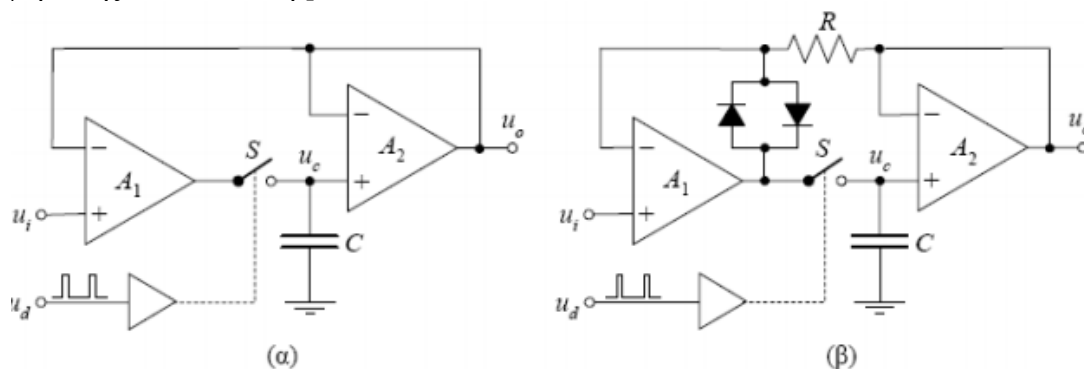


Εικόνα 1-16 Κύκλωμα συγκράτησης με τη δομή cascade (α) και οι κυματομορφές λειτουργίας(β) [6]  
©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

Στο κύκλωμα συγκράτησης με τη δομή cascade, η τάση εξόδου εμφανίζει αποκλίσεις από την τάση εισόδου, εξαιτίας των σφαλμάτων που παρουσιάζουν οι δύο τελεστικοί ενισχυτές. Τα σφάλματα αυτά εξαλείφονται με τη δομή ανάδρασης που εικονίζεται στην Εικόνα 1-16α, στην οποία η τάση εξόδου επιβάλλεται ίση με την τάση εισόδου [6].

Το βασικό κύκλωμα που φαίνεται στην Εικόνα 1-17α έχει το μειονέκτημα ότι ο ενισχυτής A1 οδηγείται στον κόρο στην κατάσταση συγκράτησης, καθώς οι τάσεις στις εισόδους του έχουν μεγάλη διαφορά τιμών. Το αποτέλεσμα είναι ότι ο χρόνος επιστροφής στη γραμμική λειτουργία με τη νέα εντολή δειγματοληψίας είναι πολύ μεγάλος (δεκάδες ms). Το πρόβλημα κορεσμού του ενισχυτή A1 αντιμετωπίζεται με τη δομή που φαίνεται στην Εικόνα 1-17 β. Στην κατάσταση δειγματοληψίας οι δύο διόδοι δεν άγουν και τα δύο κυκλώματα είναι ισοδύναμα. Αντίθετα, στην κατάσταση συγκράτησης άγει η μια από τις δύο διόδους, με αποτέλεσμα ο ενισχυτής A1 να λειτουργεί ως ακόλουθος τάσης. Η διαφορά μεταξύ των τάσεων εισόδου και εξόδου αναπτύσσεται στα άκρα της αντίστασης R. Στα κυκλώματα συγκράτησης ορίζεται ο χρόνος λήψης της τάσης εισόδου (acquisition time), ως ο χρόνος που απαιτείται για να γίνει η τάση εξόδου ίση με την τάση εισόδου, εντός μιας ζώνης σφάλματος, όταν δοθεί η εντολή δειγματοληψίας. Συνήθως ο χρόνος λήψης προδιαγράφεται στην περίπτωση της μέγιστης μεταβολής της τάσης εξόδου. Ο ρυθμός πτώσης (droop rate) εκφράζει το

ρυθμό μεταβολής της τάσης εξόδου στην κατάσταση συγκράτησης, εξαιτίας της εκφόρτισης του πυκνωτή [6].



Εικόνα 1-17 Κυκλώματα συγκράτησης με τη δομή ανάδρασης: (α) Βασική δομή και (β) εξάλειψη του κορεσμού μέσω των διόδων [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

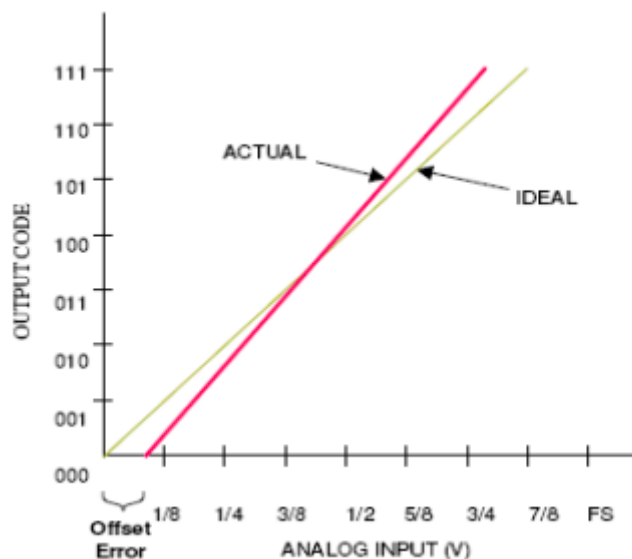
Η επίδραση της τάσης εξόδου από το σήμα εισόδου, όταν το κύκλωμα S/H είναι σε κατάσταση συγκράτησης, εκφράζεται από μια παράμετρο αποκαλούμενη ως «Feedthrough Attenuation Ratio» δηλαδή λόγος εξασθένησης τροφοδοσίας. Η επίδραση οφείλεται στην παρασιτική χωρητική σύζευξη μεταξύ της εισόδου και του πυκνωτή συγκράτησης. Ο χρόνος που απαιτείται για να ισορροπήσει η τάση εξόδου στην τελική της τιμή εντός μιας ζώνης σφάλματος, μετά την εντολή συγκράτησης, ορίζεται από το χρόνο αποκατάστασης συγκράτησης (hold settling time). Ακόμη, λόγω των ατελειών του διακόπτη παρατηρούνται σφάλματα στο σήμα εξόδου κατά τις μεταβάσεις του σήματος ελέγχου  $u_d$  μεταξύ των καταστάσεων δειγματοληψίας και συγκράτησης [6].

### 1.5.8 Χαρακτηρίστηκα Γνωρίσματα των A/D converters.

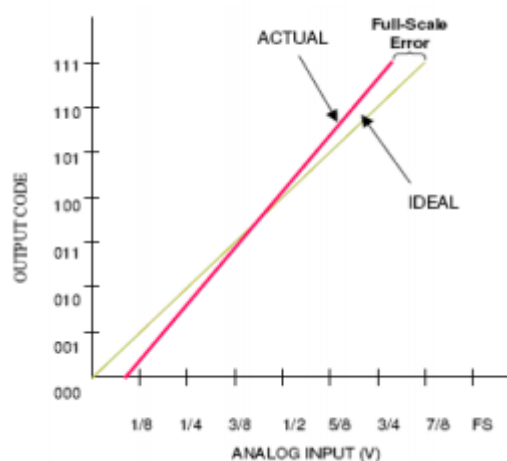
Κάποιες παράμετροι που επηρεάζουν την απόδοση των ADC και οφείλονται ως επί το πλείστον σε κατασκευαστικούς λόγους είναι [6] :

- **Offset Error** (Εικόνα 1-18): Προσδιορίζει το λάθος που προκύπτει από την υπέρθεση μια συνεχής τάσης στην τάση εισόδου. Το αποτέλεσμα λόγω της ύπαρξης της παραμέτρου αυτής είναι ο μετατροπέας να μην δίνει μηδενική έξοδο για τάση εισόδου μηδενική [6].
- **Full Scale Error:** Ένας πραγματικός ADC μπορεί να δώσει στην έξοδό του τη μέγιστη ψηφιακή τιμή, παρόλο που στην είσοδο η αντίστοιχη αναλογική τιμή δεν είναι μέγιστη. Αυτό το είδος λάθους καλείτε Full Scale Error και εκφράζεται σε LSB (Least Significant Bits) ή ως ποσοστό της ιδανικής πλήρους εισαγωγής κλίμακας. Στην Εικόνα 1-19 φαίνεται ο προσδιορισμός της παραμέτρου αυτής [6].
- **Gain Error** (Εικόνα 1-20): Η τάση αναφοράς που εισάγεται στον μετατροπέα δε μεταφέρεται στα ηλεκτρονικά κυκλώματα με λόγο 1:1. Το λάθος Gain Error, ή Full-Scale Gain Error, είναι μια απόκλιση από την ιδανική κλίση της συνάρτησης μεταφοράς. Είναι όπως το full-scale λάθος με το offset λάθος που αφαιρείται. Εάν μετατοπιστεί η πραγματική καμπύλη μεταφοράς έτσι ώστε το scale offset λάθος να γίνει μηδέν, η διαφορά μεταξύ των πραγματικών και ιδανικών μεταβάσεων στη συνολική κλίμακα είναι το Gain Error. Το Gain Error, εκφράζεται σε LSBs, ή ως ποσοστό της ιδανικής πλήρους κλίμακας τάσης [6].

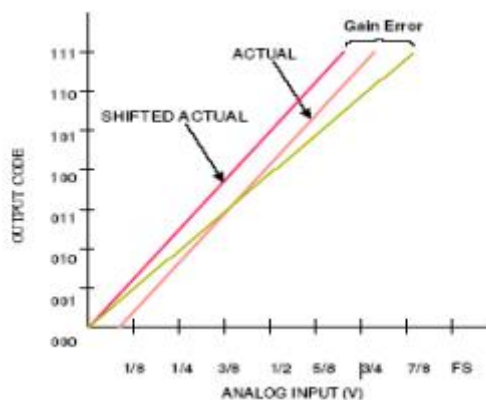
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-18 Σφάλμα αντιστάθμισης [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

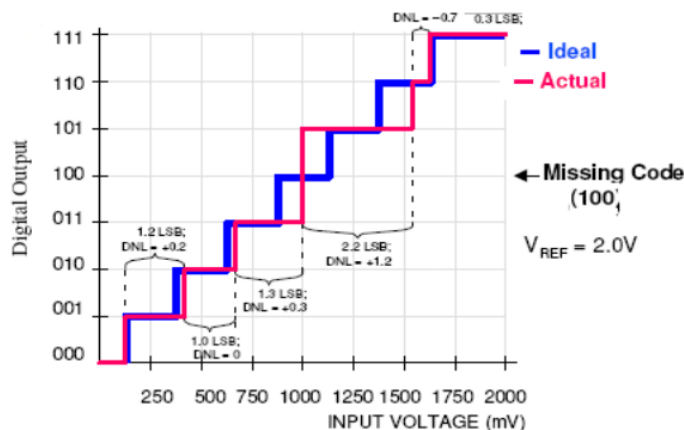


Εικόνα 1-19 Σφάλμα πλήρους κλίμακας [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος



Εικόνα 1-20 Σφάλμα κέρδους [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

- **Differential Non Linearity (DNL):** Αυτό το σφάλμα είναι το μεγαλύτερο σε τιμή σφάλμα που παρατηρείται από στάθμη σε στάθμη. Σε έναν ιδανικό μετατροπέα, οι μεταβάσεις στα σημεία από κώδικα σε κώδικα γίνετε με ακριβώς 1 LSB ανά βήμα. Σε ένα 8 bit A/D μετατροπέα, για παράδειγμα, αυτές οι αλλαγές χωρίζονται η μία από την άλλη από 1 LSB, ή 1/256 ( $256 = 2^8$ ) βήματα. Το DNL μπορεί να διευκρινιστεί χρησιμοποιώντας τη λειτουργία μεταφοράς ενός 3 bit DAC που παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-21. Κάθε βήμα εισαγωγής πρέπει να είναι ακριβώς 1/8 της μέγιστης τιμής εισόδου. Η πρώτη μετάβαση κώδικα (από 000 σε 001) προκαλείται από μια αλλαγή εισαγωγής τάσης FS/8 (250mV με τάση FS 2 Volt), όπου FS είναι η μέγιστη τάση εισόδου. Η συγκεκριμένη μετάβαση έχει γίνει σωστά. Η δεύτερη μετάβαση, από 001 σε 010, έχει μια τάση εισαγωγής που είναι 1.2 LSB, είναι δηλαδή μεγαλύτερη κατά 0.2 LSB. Η τρίτη μετάβαση έχει επίσης το σωστό μέγεθος. Η ψηφιακή λέξη εξόδου παραμένει σταθερή όταν αλλάζει η τάση εισαγωγής από 1000mV σε 1500mV και ο κώδικας 101 δεν μπορεί ποτέ να εμφανιστεί στην έξοδο. Για να αποφευχθεί η μη εμφάνιση κάποιων κωδικών, πρέπει το DNL να είναι μεγαλύτερο από 1.0 LSB [6].

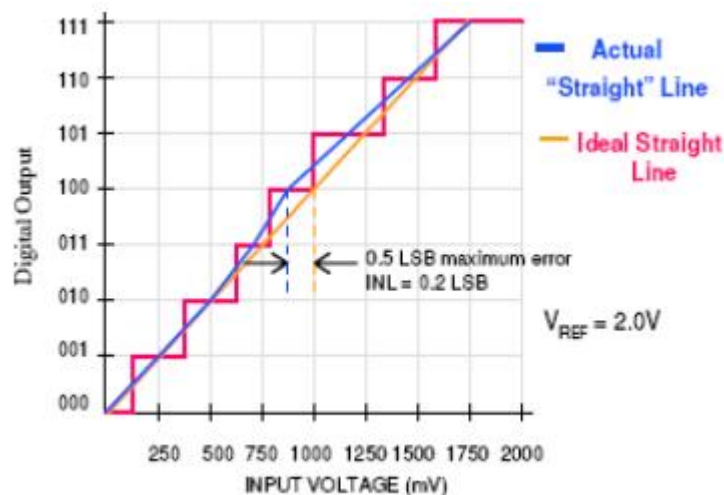


Εικόνα 1-21 Διαφορική μη-γραμμικότητα (Differential Non Linearity - DNL) [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάνουρας Κωνσταντίνος

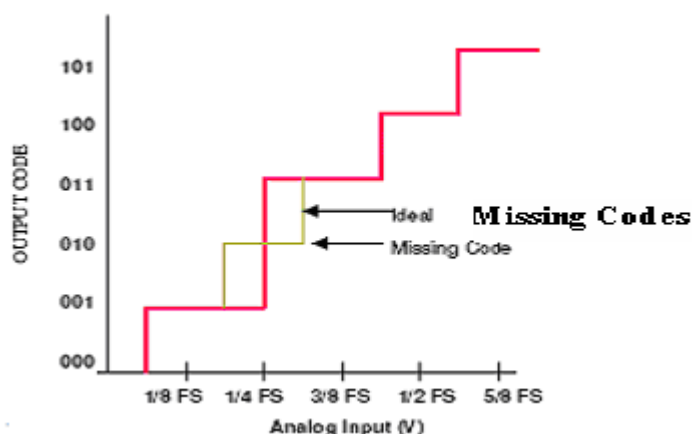
- **Integral Non Linearity (INL):** Ορίζεται σαν το μέγιστο σφάλμα μετατροπής, αφού αφαιρεθεί το Gain και το Offset Error. Το INL, περιγράφει την απόκλιση από μια ιδανική γραμμική καμπύλη μεταφοράς για έναν ADC (ή DAC αντίστοιχα), όπως φαίνεται στην Εικόνα 1-22. Στο INL δεν συμπεριλαμβάνονται τα σφάλματα κβαντοποίησης, το offset error, και το gain error [6].
- **Μονοτονία:** Όταν η έξοδος σε έναν αναλογικό σε ψηφιακό μετατροπέα είναι συνεχώς αυξανόμενη, καθώς και η τάση εισόδου αυξάνεται, τότε καλείται μονοτονικός μετατροπέας. Γενικά ένας μονοτονικός μετατροπέας έχει μικρότερο INL από μισό LSB [6].
- **Missing Codes** (Εικόνα 1-23): Ως missing code ορίζεται μια ψηφιακή λέξη που δεν εμφανίζεται ποτέ στην έξοδο ενός ADC μετατροπέα [6].
- **Conversion Time:** Για να μετατραπεί μια τάση σε ψηφιακό σήμα χρειάζεται κάποιο χρόνο. Αυτός ο χρόνος λέγεται conversion time (χρόνος μετατροπής). Σε μερικούς μετατροπείς απαιτείται να μην μεταβληθεί η τάση εισόδου παραπάνω από 0,5 LSB κατά την διάρκεια της μετατροπής [6].



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-22 Ολοκληρωτική μη – γραμμικότητα (Integral Non Linearity - INL) [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος



Εικόνα 1-23 Μη ανίχνευση κώδικα (Missing Code) [6] ©Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

- **SNDR (Signal-to-Noise-and-Distortion-Ratio):** Το μέγεθος αυτό εκφράζει το πηλίκο της ισχύος του σήματος εισόδου προς το άθροισμα της ισχύος του θορύβου που συγκεντρώνετε στο διάστημα ενδιαφέροντος καθώς και της ισχύος των αρμονικών που προκύπτουν. Η σχέση που προσδιορίζει τον SNDR είναι [6]:

$$SNDR = \frac{\text{ισχύς θεμελιώδους αρμονικής}}{\text{ισχύς αρμονικών} + \text{ισχύς θορύβου ολοκληρωμένου στο εύρος ενδιαφέροντος}} \quad (1.12)$$

- **Effective Number of Bits (ENOB):** Είναι ένα μέγεθος που εκφράζει την πραγματική ακρίβεια ενός ADC (ή DAC αντίστοιχα) σε Bit, ανάλογα το SNR που παρουσιάζουν σαν να ήταν ιδανική. Υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση [6]:

$$\text{ENOB} = \frac{\text{SNR} - 1.76}{6.02} \quad (1.13)$$

- **Dynamic range:** Η δυναμική περιοχή, εκφράζει το πηλίκο της ισχύος του σήματος εξόδου για το μέγιστο σήμα εισόδου προς την ισχύ του θορύβου που συγκεντρώνεται στο διάστημα ενδιαφέροντος [6]:

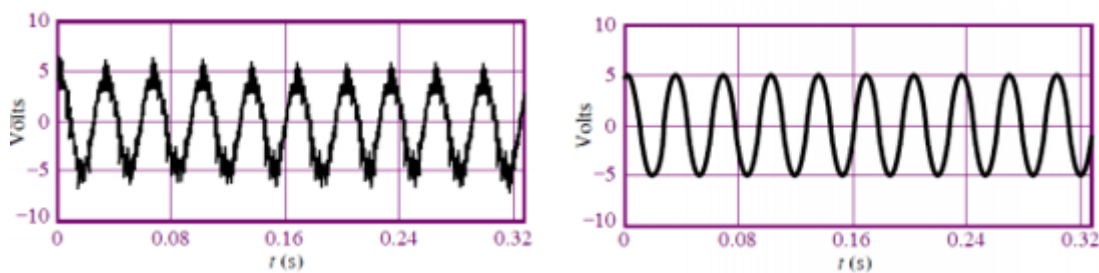
$$\text{DR} = \frac{\text{Ισχύς θεμελιώδους αρμονικής στο εύρος πλήρους κλίμακας}}{\text{Κατώ επίπεδο θορύβου ολοκληρωμένο στο εύρος ενδιαφέροντος}} \quad (1.14)$$

- “End Point” vs. “Best Fit” INL Measurements

## 1.6 Φίλτρα

### 1.6.1 Ορισμός

Φίλτρο είναι είναι μια ηλεκτρονική διάταξη που αλλάζει το σχετικό πλάτος ή απαγορεύει τη διέλευση ορισμένων συχνοτικών συνιστωσών ενός σήματος. Στην Εικόνα 1-24 δίνεται ένα παράδειγμα μη φιλτραρισμένου σήματος αλλά και του αντίστοιχου φιλτραρισμένου σήματος [7].



Εικόνα 1-24 Παράδειγμα (α) μη φιλτραρισμένου ημιτονικού σήματος, (β) φιλτραρισμένου ημιτονικού σήμα [7] ©Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Φίλτρα, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Πατρών/Κ.Ψυχαλινός

Ένα σήμα μπορεί να περιγραφεί τόσο στο πεδίο του χρόνου όσο και στο πεδίο της συχνότητας. Συνήθως προτιμάται η αναπαράσταση στο πεδίο της συχνότητας, λόγω της ευκολίας στην κατανόηση αλλά και την επεξεργασία του. Ένα σήμα μπορεί να περιγραφεί στο πεδίο της συχνότητας μέσω της απόκρισης πλάτους  $|H(\omega)|$  ή/και με της απόκρισης φάσης  $\angle H(\omega)$  [7].

Η τυπική λειτουργία των φίλτρων είναι η απαγόρευση ή/και η επιλογή συγκεκριμένων συχνοτήτων. Η αλλαγή του πλάτους ενός σήματος με χρήση τελεστικών ενισχυτών, που πολύ συχνά εμφανίζεται, έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία κέρδους στο σήμα. Ορισμένα φίλτρα εισάγουν ωστόσο και αλλαγή στη φάση του σήματος [7]. Ένα φίλτρο χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση μεταφοράς  $h(t)$  η οποία μέσω κατάλληλου μετασχηματισμού Fourier μπορεί να οριστεί στο πεδίο της συχνότητας ως  $H(f)$ .

Τα φίλτρα ανάλογα με τη συμπεριφορά τους μπορούν να χωριστούν στις παρακάτω βασικές κατηγορίες [8]:

- Γραμμικό φίλτρο
- Μη γραμμικό φίλτρο
- Αιτιατό φίλτρο

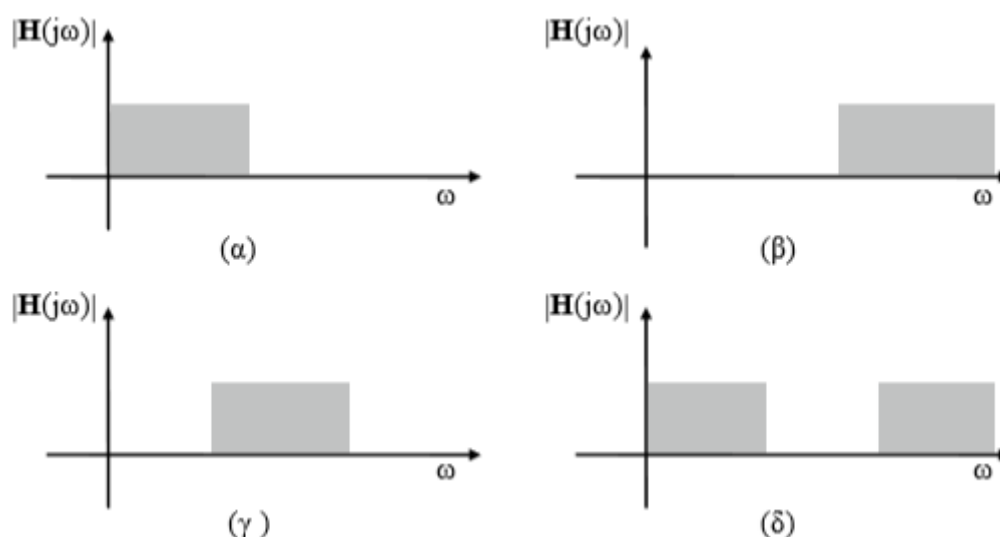
- Μη αιτιατό φίλτρο
- Φίλτρο αναλλοίωτο στον χρόνο
- Προσαρμοστικό φίλτρο
- Σταθερά φίλτρα
- Ασταθή φίλτρα
- Φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (finite impulse response, FIR)
- Φίλτρο άπειρης κρουστικής απόκρισης (infinite impulse response, IIR)

Τα φίλτρα συνηθίζεται να αναπαρίστανται από μπλοκ διαγράμματα, τα οποία στη συνέχεια μπορούν να οδηγήσουν σε έναν αλγόριθμο επεξεργασίας δειγμάτων, ο οποίος μπορεί να υλοποιηθεί σε επίπεδο υλικού (hardware) αλλά και σε επίπεδο λογισμικού (software) ή και σε συνδυασμό τους. Ένα φίλτρο μπορεί επίσης να περιγραφεί σαν εξίσωση διαφορών (difference equation), από ένα σύνολο από μηδενικά και πόλους ή, αν είναι φίλτρο FIR όπως περιγράφεται στην συνέχεια, σαν κρουστική ή βηματική απόκριση [8].

Η έξοδος του ψηφιακού φίλτρου σε κάποια είσοδο στο πεδίο του χρόνου  $h(t)$  βρίσκεται μέσω της συνέλιξης του σήματος με την κρουστική απόκριση του σήματος. Αντίστοιχα στο πεδίο της συχνότητας, η έξοδος του φίλτρου υπολογίζεται ως η κρουστική απόκριση του φίλτρου στο πεδίο της συχνότητας πολλαπλασιασμένη με το σήμα εισόδου το οποίο επίσης έχει μεταφερθεί στο πεδίο της συχνότητας. Το γεγονός του ότι ο πολλαπλασιασμός είναι μια πολύ ευκολότερη πράξη σε σχέση με τη συνέλιξη είναι και ένας από τους βασικούς λόγους της ψηφιακής επεξεργασίας των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας.

### 1.6.2 Φίλτρα διέλευσης ή απόρριψης συχνοτήτων

Τα φίλτρα που χρησιμοποιούνται συνήθως στην επεξεργασία σημάτων είναι τα φίλτρα διέλευσης ή απόρριψης συχνοτήτων και ο λόγος που λέγονται έτσι περιγράφεται στην συνέχεια.



Εικόνα 1-25 Απεικόνιση τεσσάρων φίλτρων: α) διέλευσης χαμηλών ή απόρριψης υψηλών συχνοτήτων, β) διέλευσης υψηλών ή απόρριψης χαμηλών συχνοτήτων, γ) διέλευσης ζώνης συχνοτήτων, και δ) απόρριψης ζώνης συχνοτήτων [2]  
©[https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02\\_chapter\\_02.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02_chapter_02.pdf)

Τα φίλτρα είναι κυκλώματα με χαρακτηριστικά γραμμικότητας, αναλλοίωτα στον χρόνο και αιτιατά. Η λειτουργία τους είναι να επιλέγουν τα σήματα εισόδου ανάλογα με την συχνότητα τους. Η λειτουργία αυτή στο πεδίο της συχνότητας ονομάζεται φιλτράρισμα και ο σκοπός του είναι να επιτρέπει την διέλευση ενός μέρους του φάσματος συχνοτήτων του σήματος εισόδου, ενώ ταυτόχρονα να απορρίπτει το υπόλοιπο μέρος του φάσματος να περάσει στην έξοδο του κυκλώματος, μειώνοντας ή μηδενίζοντας το πλάτος των μη επιθυμητών στην έξοδο συχνοτικών συνιστωσών [9].

Όπως για κάθε κύκλωμα, έτσι και στην περίπτωση των φίλτρων, η έξοδος του φίλτρου μπορεί να περιγραφεί μαθηματικά στο πεδίο του χρόνου ως η συνέλιξη της κρουστικής απόκρισης του φίλτρου με το σήμα εισόδου. Αντίστοιχα, στο πεδίο της συχνότητας είναι ο πολλαπλασιασμός της κρουστικής απόκρισης στο πεδίο της συχνότητας, με το σήμα εισόδου επίσης εκφρασμένο στο πεδίο της συχνότητας.

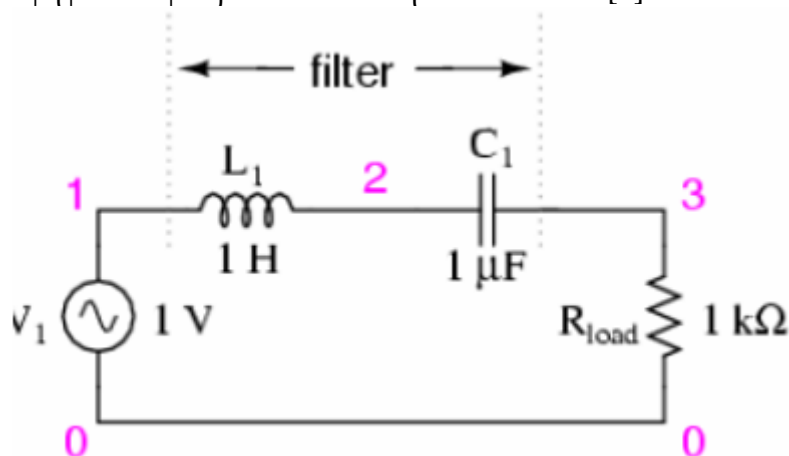
Στην Εικόνα 1-25, δίνεται η γραφική παράσταση της συνάρτησης μεταφοράς  $H(j\omega)$ , τεσσάρων ειδών φίλτρων όπου φαίνεται η συχνοτική συμπεριφορά του κάθε ενός φίλτρου [9].

### 1.6.3 Ταξινόμηση φίλτρων σύμφωνα με το είδος δεδομένων διαχείρισης

Όπως αναφέρθηκε, η βασική λειτουργία των φίλτρων είναι η απομάκρυνση των μη επιθυμητών συνιστωσών του σήματος όπως ο ανεπιθύμητος θόρυβος [8].

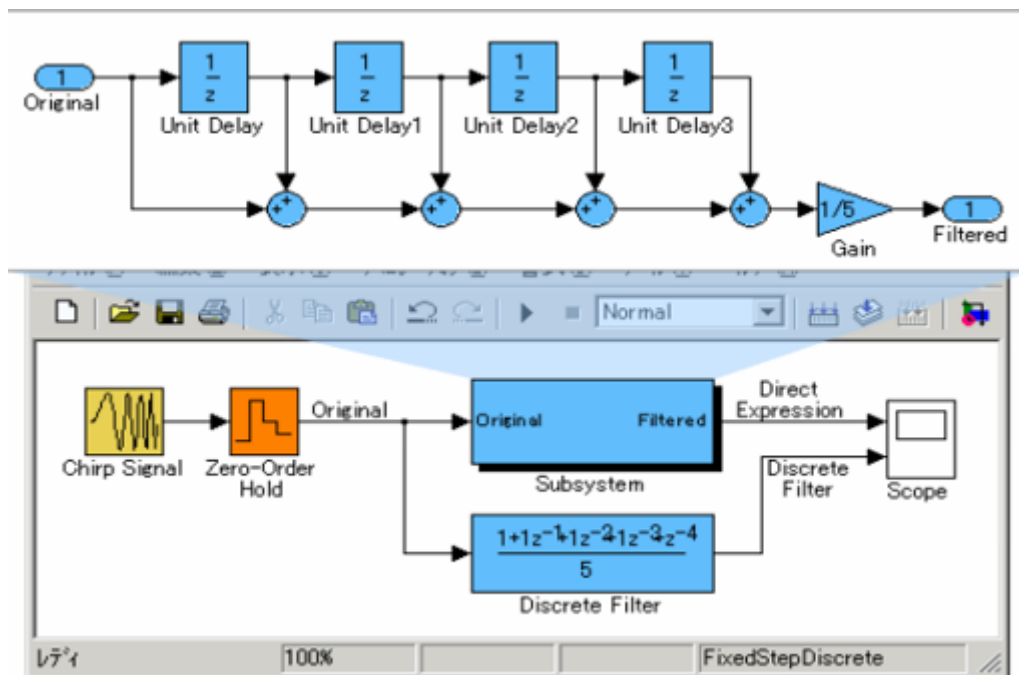
Δύο βασικές κατηγορίες φίλτρων υπάρχουν στην επεξεργασία σημάτων, τα αναλογικά και τα ψηφιακά. Μεταξύ τους είναι πολύ διαφορετικά ως προς την δομή τους, την κατασκευή τους καθώς και στον τρόπο λειτουργίας τους [8].

- Αναλογικά Φίλτρα: Ένα αναλογικό φίλτρο (Εικόνα 1-26) υλοποιείται με παθητικά ή/και ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία, τα κυκλώματα των οποίων περιέχουν αντιστάσεις, πυκνωτές, τελεστικούς ενισχυτές και άλλα όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-26 [8].
- Ψηφιακά Φίλτρα: Ένα ψηφιακό φίλτρο υλοποιείται με ψηφιακούς υπολογιστές ή εξειδικευμένο ψηφιακό υλικό. Η δειγματοληψία και οι υπολογισμοί γίνονται μέσω ενός ψηφιακού επεξεργαστή γενικού σκοπού όπως για παράδειγμα μέσω ενός Η/Υ ή ενός επεξεργαστή ειδικού σκοπού DSP (Digital Signal Processor). Ένα παράδειγμα ψηφιακού φίλτρου δίνεται στην Εικόνα 1-27 [8].



Εικόνα 1-26 Αναλογικό φίλτρο [8] © Στοιχεία επεξεργασίας σημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών/ Β.Βεσκούκης, Δ.Παραδείσης, Δ.Αργιαλάς, Δ.Δεληκαράογλου, Β.Καραθανάση, Β.Μασσίνας

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-27 Ψηφιακά φίλτρα [8] © Στοιχεία επεξεργασίας σημάτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών/ Β.Βεσκούκης, Δ.Παραδείσης, Δ.Αργυριάς, Δ.Δεληκαράογλου, Β.Καραθανάση, Β.Μασσίνας

#### 1.6.4 Πλεονεκτήματα ψηφιακών φίλτρων

Βασικό πλεονέκτημα των ψηφιακών φίλτρων είναι ότι μπορεί να προγραμματιστεί στην μνήμη του επεξεργαστή. Αυτό δίνει τη δυνατότητα εύκολης τροποποίησης των φίλτρων χωρίς να υπάρχει η απαίτηση να αλλάξει κάτι άλλο στο υπόλοιπο κύκλωμα (hardware). Αντίθετα, στην περίπτωση των αναλογικών φίλτρων, η οποιαδήποτε τροποποίηση του φίλτρου έχει ως άμεσο αποτέλεσμα την αλλαγή στα στοιχεία του κυκλώματος. Επιπλέον τα ψηφιακά φίλτρα προσφέρουν εύκολη και γρήγορη σχεδίαση, δοκιμή και υλοποίηση σε ένα υπολογιστή. Σημαντικό ρόλο επίσης παίζει και η αναισθησία που παρουσιάζουν τόσο στη θερμοκρασία, όσο και στην τάση(υπερτάσεις η πτώση τάσης), την υγρασία, και τον χρόνο, καθώς δεν περιέχουν ευαίσθητα ενεργά στοιχεία σε αντίθεση με τα αναλογικά φίλτρα. Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα είναι και η ευρεία χρήση γρήγορων επεξεργαστών DSP, μέσω των οποίων και με τη χρήση των ψηφιακών φίλτρων, μπορεί να γίνει ανάλυση σε ένα πολύ μεγάλο εύρος συχνοτήτων, από πολύ χαμηλές έως και πολύ υψηλές. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα της σχεδίασης ψηφιακών φίλτρων με δυνατότητα να προσαρμόζονται στις αλλαγές των χαρακτηριστικών του σήματος [8].

#### 1.6.5 Είδη Κλασικών Ιδανικών Φίλτρων

Τα φίλτρα σύμφωνα με την υλοποίησή τους μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες [8]:

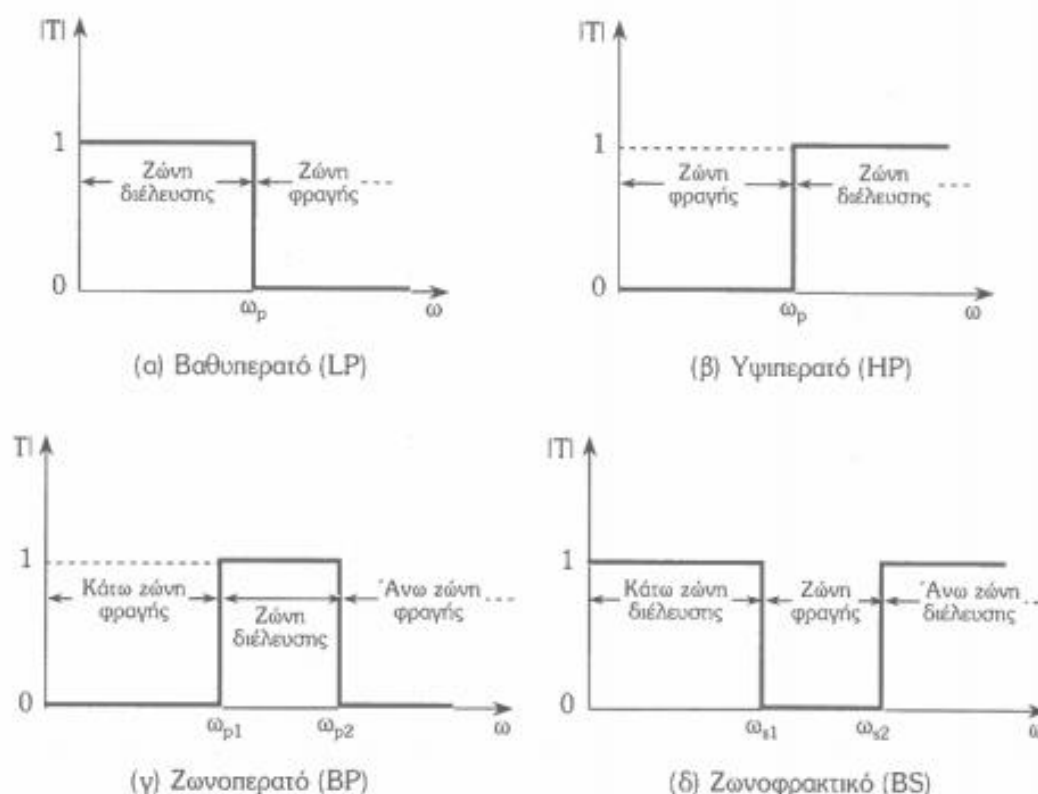
- **Παθητικά φίλτρα:** Η υλοποίηση γίνεται με παθητικά στοιχεία R, L και C. Θα πρέπει να αποφεύγονται ωστόσο οι αυτεπαγωγές λόγω μεγέθους και δυσκολίας στην ολοκλήρωσή τους.

- **Ενεργά φίλτρα:** Εκτός από τη χρήση παθητικών στοιχείων R,L και C, γίνεται χρήση και ενεργών στοιχείων όπως είναι για παράδειγμα οι τελεστικοί ενισχυτές.

Ακόμη, ανάλογα με τη ζώνη διάβασης, τα φίλτρα μπορούν να ταξινομηθούν στις εξής κατηγορίες [7]:

- **Βαθυπερατά ή χαμηλοπερατά (Lowpass Filters):** Επιτρέπουν τη διάβαση σε σήματα με συχνότητες έως τη συχνότητα αποκοπής.
- **Υψιπερατά (Highpass Filters):** Επιτρέπουν τη διάβαση σε σήματα με συχνότητες άνω της συχνότητας αποκοπής.
- **Ζωνοπερατά (Bandpass Filters):** Επιτρέπουν τη διάβαση σε σήματα με συχνότητες από την κάτω συχνότητα αποκοπής έως την άνω συχνότητα αποκοπής, δηλαδή επιτρέπουν τη διάβαση μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων.
- **Ζωνοαπαγορευτικά ή ζώνης αποκοπής (Bandreject ή Band-elimination ή Notch Filters):** Επιτρέπουν τη διάβαση σε σήματα με συχνότητες μικρότερες της κάτω συχνότητας αποκοπής και μεγαλύτερες της άνω συχνότητας αποκοπής.

Ο τρόπος συμπεριφοράς των παραπάνω φίλτρων στο πεδίο της συχνότητας μπορεί εύκολα να συνοψιστεί στην Εικόνα 1-28.



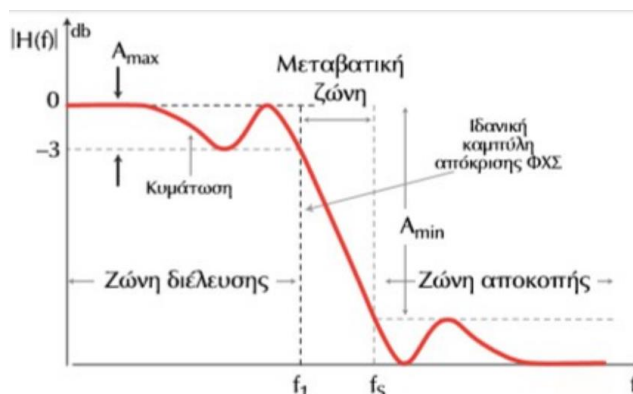
Εικόνα 1-28 Συμπεριφορά των ιδανικών φίλτρων στο πεδίο της συχνότητας [7] ] ©Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Φίλτρα, Τμήμα Φυσικής Πανεπιστήμιο Πατρών/Κ.Ψυχαλινός

Οι παραπάνω αποκρίσεις δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν από ηλεκτρονικά κυκλώματα, γιατί απαιτούνται μη αιτιατά συστήματα [8].

### 1.6.6 Πραγματικά-Ιδανικά φίλτρα

Τα πραγματικά φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων, των οποίων η απόκριση συχνότητας μοιάζει με αυτή της Εικόνα 1-29 έχουν τα παρακάτω χαρακτηριστικά [10]:

- Η μετάβαση δεν είναι απότομη
- Η ενίσχυση και η αποκοπή δεν είναι σταθερή
- Η κλίση της καμπύλης εξαρτάται άμεσα από την τάξη ή τον βαθμό του φίλτρου.

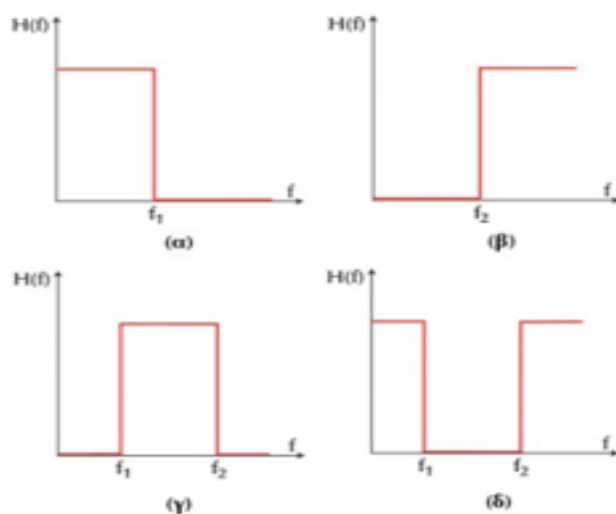


Εικόνα 1-29 καμπύλη απόκρισης πραγματικού φίλτρου χαμηλών συχνοτήτων [10] © [http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH\\_kef6-energa%20 filtra.pdf](http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH_kef6-energa%20filtra.pdf)

Τα πραγματικά φίλτρα προσεγγίζουν τα ιδανικά αυξάνοντας την τάξη του φίλτρου. Η αλλαγή στην τάξη του φίλτρου θα μπορούσε να επιτευχθεί με αλλαγή στον αριθμό των χωρητικοτήτων και των αυτεπαγωγών [10].

Τα ιδανικά φίλτρα, παραδείγματα των οποίων φαίνονται στην Εικόνα 1-30, λόγω της συνάρτησης μεταφοράς τους λέγονται και φίλτρα τοίχου (“brickwall” filters). Ιδανικό θεωρείται το φίλτρο που έχει τα εξής χαρακτηριστικά [10]:

- Έχει απολαβή  $A=1$  για όλη τη ζώνη του
- Αποκόπτει τελείως όλες τις συχνότητες στη ζώνη αποκοπής
- Η μετάβαση είναι απότομη
- Δε δημιουργεί καμία παραμόρφωση.



Εικόνα 1-30 Καμπύλες απόκρισης ιδανικών φίλτρων [10] © [http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH\\_kef6-energa%20 filtra.pdf](http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH_kef6-energa%20 filtra.pdf)



### 1.6.7 Οικογένειες φίλτρων

Τα φίλτρα μπορούν με βάση τη μορφή τους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-31, να ταξινομηθούν στις εξής οικογένειες [10]:

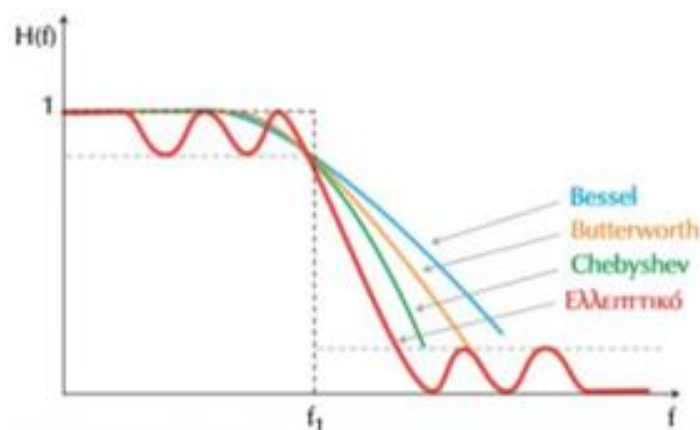
- Butterworth
- Bessel
- Chebyshev
- Ελλειπτικά

#### 1.6.1 Φίλτρα Butterworth

Η απόκριση μέτρου ενός φίλτρου Butterworth δίνεται από τη σχέση [11]:

$$A(f) = \frac{K}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 \cdot \left(\frac{f}{f_c}\right)^{2 \cdot n}}} \quad (1.15)$$

όπου,  $\varepsilon$  είναι μια σταθερά και  $n$  ο βαθμός του πολυωνύμου, που φανερώνει και το πλήθος των πόλων του φίλτρου ) [11].



Εικόνα 1-31 Οικογένειες φίλτρων [10] ©[http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou-/AH\\_kef6-energa%20 filtra.pdf](http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou-/AH_kef6-energa%20filtra.pdf)

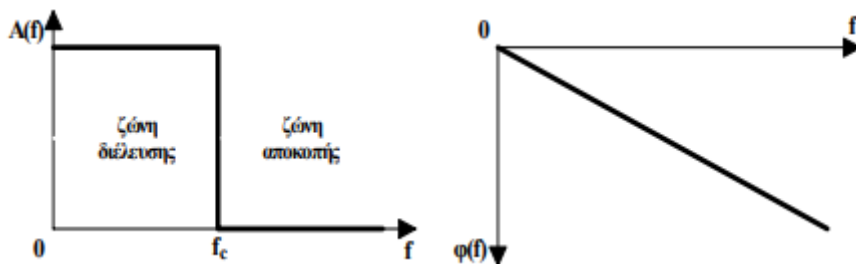
#### 1.6.2 Φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων – Βαθυπερατά φίλτρα

Για να περιοριστεί το εύρος ζώνης ενός σήματος και για να γίνει διεύθυνση μόνο των χαμηλών συχνοτήτων του σήματος, χρησιμοποιούνται τα φίλτρα χαμηλών συχνοτήτων. Τα φίλτρα αυτά είναι γνωστά και ως βαθυπερατά φίλτρα ενώ τυπικό παράδειγμα απόκρισης τέτοιων φίλτρων φαίνεται στην Εικόνα 1-32. Το πηλίκο της τάσης εξόδου προς την τάση εισόδου δίνει την συνάρτηση μεταφοράς του φίλτρου και είναι της μορφής [11]:

$$H(s) = K \cdot \frac{N(s)}{D(s)} \quad (1.16)$$

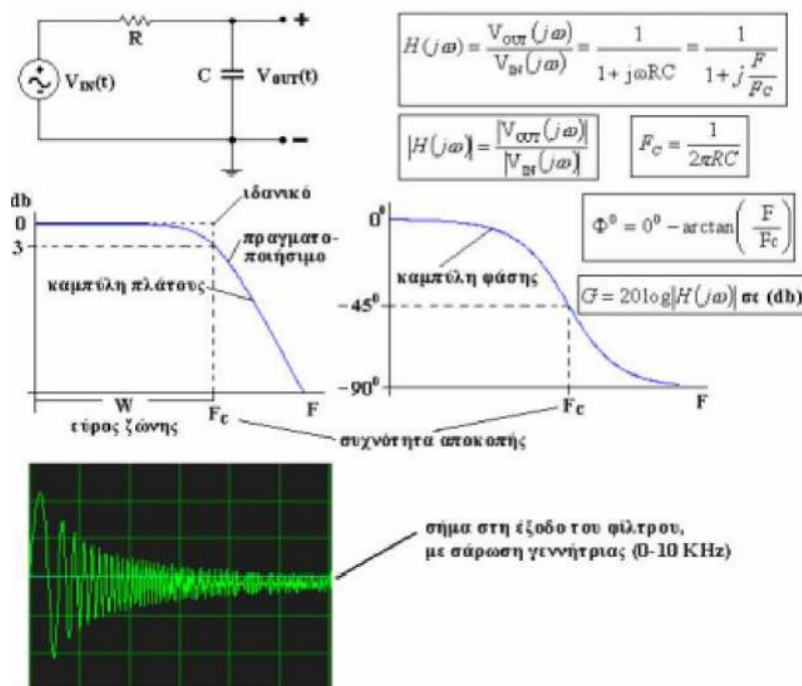


Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-32 Φίλτρα Χαμηλών Συχνοτήτων [11] © Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων, Σύγχρονη Εκδοτική/Τσελές Ι. Δημήτριος

Όπως παρατηρείται στην Εικόνα 1-33 αυτό το είδος φίλτρου έχει μια συγκεκριμένη συχνότητα αποκοπής ( $F_c$ =cutoff frequency) και όσες συχνότητες είναι υψηλότερες από αυτή δεν περνάνε στην έξοδο του φίλτρου [12]. Το κέρδος ( $G$ ) της συχνότητας αποκοπής είναι ίσο με  $-3\text{db}$ , και η διαφορά φάσης του σήματος εξόδου με αυτό στην είσοδο είναι ίσο με  $(-45^\circ)$  [12].

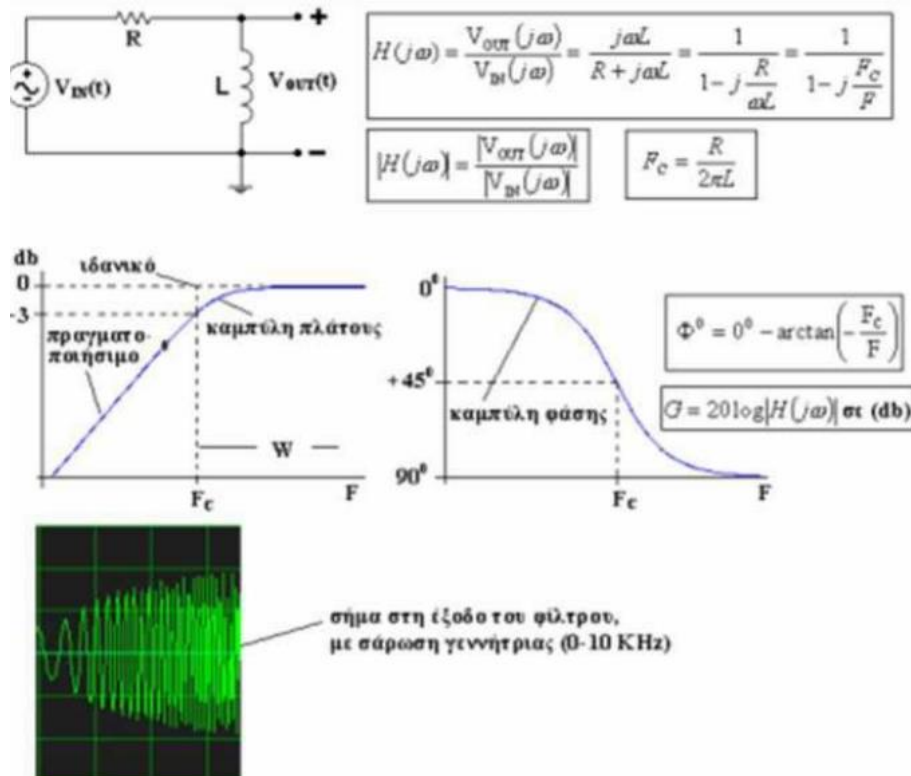


Εικόνα 1-33 Χαρακτηριστικά ενός βαθυπερατού φίλτρου [12] ©Υλοποίηση τράπεζας φίλτρων για την ανάλυση ηχητικών σημάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab ,Τμήμα μηχανικών πληροφορικής Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας/Δρίβας Παναγιώτης

### 1.6.1 Υψηλερατά φίλτρα

Σε αυτή την κατηγορία φίλτρων γίνεται διέλευση μόνο των υψηλών συχνοτήτων του σήματος, ενώ αποκόπτονται όσες συχνότητες βρίσκονται κάτω από την συχνότητα αποκοπής ( $F_c$ ). Στην Εικόνα 1-34 δίνονται τα χαρακτηριστικά των υψηλερατών φίλτρων. Το κέρδος ( $G$ ) της συχνότητας αποκοπής είναι ίσο με  $-3\text{db}$ , ενώ σε αυτή την περίπτωση η διαφορά φάσης του σήματος εξόδου με αυτό στην είσοδο είναι ίσο με  $(+45^\circ)$ . Όσον αφορά το το εύρος ζώνης ( $W$ ), αυτό έχει εύρος ( $F_c, +\infty$ ) [12].

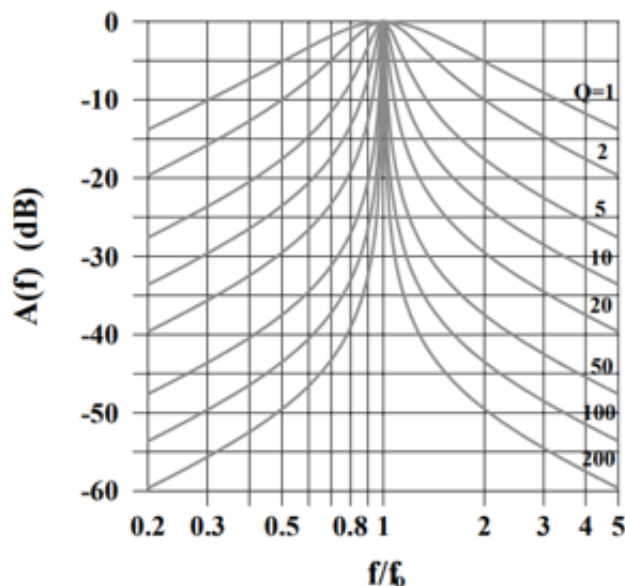
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 1-34 Χαρακτηριστικά ενός υπερπυκνωτή φίλτρου [12] ©Υλοποίηση τράπεζας φίλτρων για την ανάλυση ηχητικών σημάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab ,Τμήμα μηχανικών πληροφορικής Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας/Δρίβας Παναγιώτης

### 1.6.2 Φίλτρα διέλευσης ζώνης

Σε αρκετές πρακτικές εφαρμογές, υπάρχει πολλές φορές η ανάγκη να γίνετε διέλευση μιας συγκεκριμένης ζώνης συχνοτήτων μέσα από ένα σύστημα. Για το λόγο αυτό έχουν σχεδιαστεί τα φίλτρα διέλευσης ζώνης συχνοτήτων ή ζωνοδιαβατά φίλτρα. Τα φίλτρα αυτά έχουν το χαρακτηριστικό ότι περιγράφονται από μια κεντρική συχνότητα  $f_0$  και από ένα εύρος  $B$ , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-35.



Εικόνα 1-35 Ζωνοδιαβατά φίλτρα [11] © Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων ,Σύγχρονη Εκδοτική/Τσελές Ι. Δημήτριος

Η συνάρτηση μεταφοράς ενός ζωνοδιαβατού φίλτρου δίνεται από τη σχέση [11]:

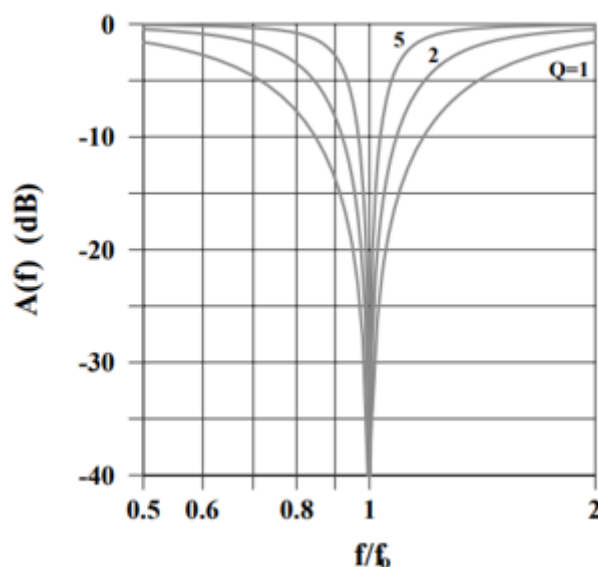
$$H(s) = K \cdot \frac{\frac{2 \cdot \pi \cdot f_0}{Q} \cdot s}{s^2 + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0}{Q} \cdot s + (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2} \quad (1.17)$$

όπου το Q ονομάζεται παράγοντας ποιότητας του φίλτρου.

### 1.6.3 Φίλτρα αποκοπής ζώνης

Σε αντίθεση με τα ζωνοδιαβατά φίλτρα υπάρχουν και τα φίλτρα αποκοπής ζώνης ή απόρριψης ζώνης (bandreject ή band-elimination ή notch filter). Σε ένα τέτοιο φίλτρο επιτρέπεται να διέρχονται όλες οι συχνότητες, πέρα από αυτές που είναι γύρω από την κεντρική συχνότητα  $f_0$ , όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-36. Η συνάρτηση μεταφοράς είναι ενός τέτοιου φίλτρου δίνεται από τη σχέση [12]:

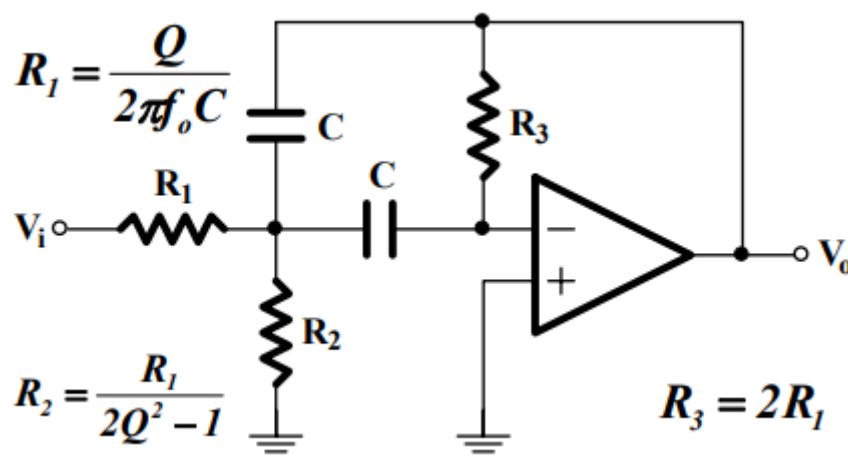
$$H(s) = K \cdot \frac{s^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2}{s^2 + \frac{2 \cdot \pi \cdot f_0}{Q} \cdot s + (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2} \quad (1.18)$$



Εικόνα 1-36 Φίλτρο απόρριψης ζώνης (bandreject ή band-elimination ή notch filter) [11] © Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων ,Σύγχρονη Εκδοτική/Τσελές Ι. Δημήτριος

### 1.6.4 Ζωνοδιαβατό φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης

Μια κατηγορία ζωνοδιαβατού φίλτρου είναι και το φίλτρο πολλαπλής ανατροφοδότησης (Tow-Thomas biquad). Μια τυπική υλοποίηση ενός τέτοιου φίλτρου με ηλεκτρονικά στοιχεία φαίνεται στην Εικόνα 1-37. Τέτοια φίλτρα χρησιμοποιείται με σκοπό την αύξηση του παράγοντα ποιότητας φίλτρου Q, και αποτελείται συνήθως από τρεις τελεστικούς ενισχυτές. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να επιτευχθεί ανεξάρτητη ρύθμιση τόσο της κεντρικής συχνότητας του φίλτρου  $f_0$ , όσο και του παράγοντα Q καθώς και της ενίσχυσης [11].



Εικόνα 1-37 Παράδειγμα υλοποίηση ζωνοδιαβατού φίλτρου πολλαπλής ανατροφοδότησης [11]  
© Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων ,Σύγχρονη Εκδοτική/Τσελές Ι. Δημήτριος

### 1.6.5 Φίλτρα FIR και IIR

Τα FIR φίλτρα είναι μη αναδρομικά φίλτρα καθώς η τρέχουσα έξοδος υπολογίζεται μεμονωμένα από τις τρέχουσες και τις προηγούμενες εισαγόμενες τιμές [12].

Το φίλτρο IIR είναι ένα αναδρομικό φίλτρο, το οποίο χρησιμοποιεί ως εισαγόμενες τιμές τις προηγούμενες εξαγόμενες τιμές. Και οι δύο τιμές αποθηκεύονται στην μνήμη ενός επεξεργαστή [12].

Ο όρος αναδρομικά προκύπτει από το γεγονός ότι οι τιμές που έχουν υπολογιστεί από την έξοδο επιστρέφουν ως εισόδοι για να γίνει υπολογισμός των νέων τιμών. Με άλλα λόγια ένα αναδρομικό φίλτρο εμπεριέχει, εκτός από τις νέες εισαγόμενες τιμές ( $x[n]$ ,  $x[n-1]$ ,  $x[n-2]$ , ...) και τις προηγούμενες εξαγόμενες τιμές  $y[n-1]$ ,  $y[n-2]$ , .. [12]

Οι όροι “Finite Impulse Response” και “Infinite Impulse Response” αναφέρονται στη διαφοροποίηση που υπάρχει στην κρουστική απόκριση των δύο τύπων φίλτρου. Στα ψηφιακά φίλτρα η ακολουθία που εξάγεται λέγεται κρουστική απόκριση, και είναι η ακολουθία που εξάγεται από το φίλτρο, όταν μία μοναδιαία κρουστική συνάρτηση εφαρμοστεί στην είσοδό του. Σε ένα FIR φίλτρο, η κρουστική απόκριση έχει πεπερασμένο μέγεθος σε αντίθεση με τα IIR φίλτρα στα οποία θεωρητικά η κρουστική απόκριση έχει άπειρο μέγεθος [12].

Συνοπτικά:

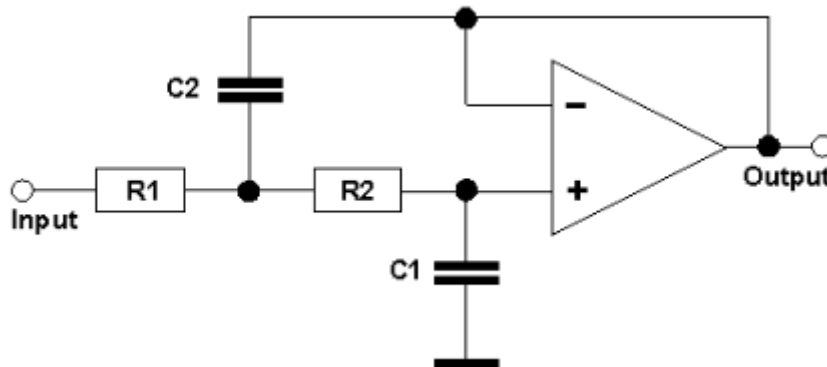
- Το φίλτρο πεπερασμένης κρουστικής απόκρισης (FIR) χρησιμοποιεί μόνο τα σήματα εισόδου,
- Το φίλτρο άπειρης κρουστικής απόκρισης (IIR) χρησιμοποιεί τόσο το σήμα εισόδου όσο και προηγούμενα δείγματα από το σήμα εξόδου.
- Τα φίλτρα FIR είναι πάντα σταθερά, ενώ τα φίλτρα IIR μπορεί να είναι ασταθή

### 1.6.6 Anti-aliasing filters

Τα φίλτρα κατά της αλλοίωσης (Anti-aliasing) είναι πάντα αναλογικά φίλτρα καθώς επεξεργάζονται το σήμα πριν από τη δειγματοληψία. Ένα παράδειγμα υλοποίησης ενός anti-aliasing φίλτρου φαίνεται στην Εικόνα 1-38. Στις περισσότερες περιπτώσεις, είναι

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

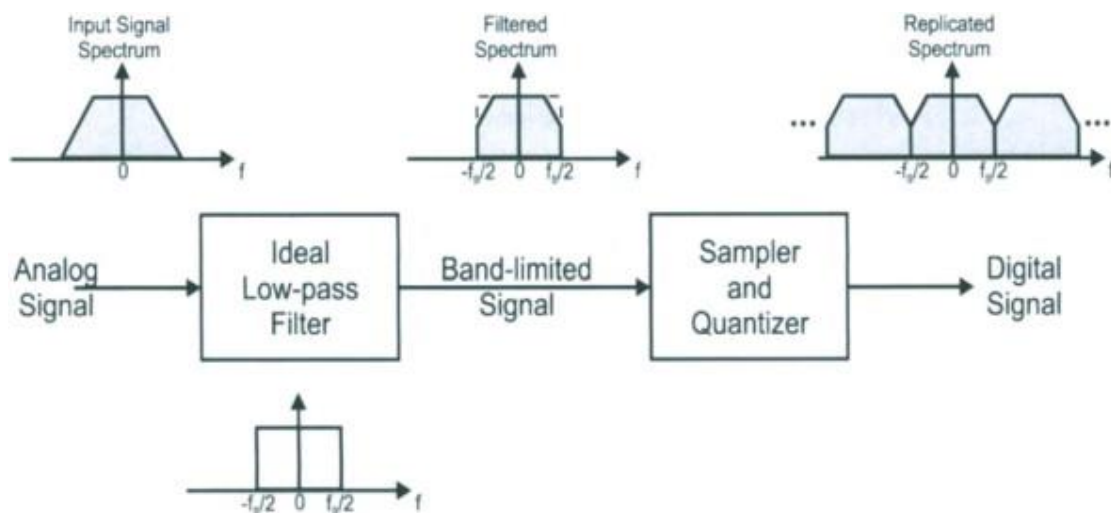
επίσης φίλτρα χαμηλής διέλευσης εκτός εάν χρησιμοποιούνται ζωνοπερατές τεχνικές δειγματοληψίας [13].



Εικόνα 1-38 Παράδειγμα anti-aliasing φίλτρου [13] ©[https://www.sciencedirect.com/topics-engineering/anti-aliasing-filter](https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anti-aliasing-filter)

Η διαδικασία δειγματοληψίας που ενσωματώνει ένα ιδανικό φίλτρο χαμηλής διέλευσης, όπως για παράδειγμα γίνεται στην περίπτωση των anti-aliasing φίλτρων, παρουσιάζεται στην Εικόνα 1-39. Το ιδανικό φίλτρο έχει μια επίπεδη ζώνη διέλευσης και η αποκοπή είναι πολύ απότομη.

Δεδομένου ότι η συχνότητα αποκοπής αυτού του φίλτρου είναι το ήμισυ αυτής της συχνότητας δειγματοληψίας, το προκύπτον αναδιπλασιαζόμενο φάσμα του δειγματοληπτημένου σήματος δεν επικαλύπτεται το ένα από το άλλο. Επομένως, δεν επέρχεται αλλοίωση [13].



Εικόνα 1-39 Η διαδικασία μετατροπής αναλογικού σήματος σε ψηφιακό με χρήση anti-aliasing φίλτρου [13]© <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anti-aliasing-filter>

Τα πρακτικά φίλτρα χαμηλής διέλευσης δεν μπορούν να επιτύχουν τα αντίστοιχα ιδανικά χαρακτηριστικά.

Η προσπάθεια υλοποίησης ενός ιδανικού φίλτρου θα σήμαινε ότι θα έπρεπε η δειγματοληψία του φιλτραρισμένου σήματος να γίνεται με ρυθμό υψηλότερο από τον ρυθμό Nyquist έτσι ώστε να βελτιώνεται το εύρος μετάβασης του φίλτρου προς την αποκοπή. Το εύρος ζώνης ενός φίλτρου χαμηλής διέλευσης ορίζεται συνήθως ως το σημείο των 3 dB (η συχνότητα με την οποία η απόκριση μεγέθους είναι 3 dB κάτω από

το επίπεδο κορυφής στη ζώνη διέλευσης). Ωστόσο, τα επίπεδα σήματος κάτω από 3 dB εξακολουθούν να είναι αρκετά σημαντικά για τις περισσότερες εφαρμογές [13].

## 1.7 Ψηφιακή επεξεργασία σήματος

Ο ρόλος της ψηφιακής επεξεργασίας σήματος (ΨΕΣ ή DSP-Digital signal processing) είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς μέσω της ΨΕΣ γίνεται, η ανάλυση, η τροποποίηση και η αναπαράσταση ενός σήματος σε ψηφιακή μορφή. Επιπλέον, μέσω της ΨΕΣ είναι δυνατή η άντληση επιπλέον πληροφοριών σχετικά με το σήμα, οι οποίες μπορεί σε αρκετές περιπτώσεις να είναι απαραίτητες για τη διόρθωση αλλά και για την αντιμετώπιση πολλών προβλημάτων σε συστήματα. Ένα από τα πιο γνωστά τέτοια προβλήματα είναι ο θόρυβος σε ασύρματες επικοινωνίες, ενώ ένα από τα εργαλεία που συνήθως χρησιμοποιούνται κατά της ΨΕΣ είναι ο μετασχηματισμός Fourier. Όλα τα συστήματα ΨΕΣ γίνονται με τη χρήση ψηφιακών επεξεργαστών [14].

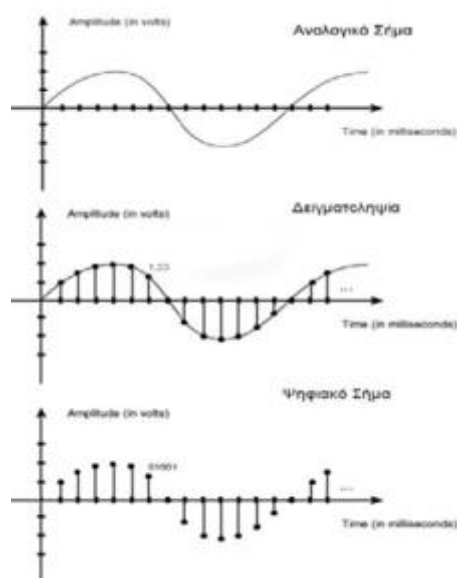
Κάποιες από τις πιο γνωστές εφαρμογές που εφαρμόζεται η ΨΕΣ είναι η επεξεργασία σημάτων από σόναρ ή ραντάρ, η αναγνώριση φωνή, η επεξεργασία ήχου, ο έλεγχος συστημάτων, η εκτίμηση φάσματος, η στατιστική επεξεργασία σήματος, η επεξεργασία σήματος στις τηλεπικοινωνίες, η ανάλυση της ποιότητας του ηλεκτρικού δικτύου, και η επεξεργασία σεισμικών δεδομένων [3].

Αν και είναι εφικτή σε έναν βαθμό και η αναλογική επεξεργασία σημάτων, εντούτοις η ψηφιακή επεξεργασία έχει επικρατήσει λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων που εμφανίζει έναντι της αναλογικής. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ΨΕΣ είναι τα εξής [14]:

- Υπάρχει μεγάλη ευελιξία και ευκολία στην εφαρμογή διορθώσεων και τροποποιήσεων σε πράξεις που μπορεί να υλοποιούνται ψηφιακά.
- Παρέχεται αρκετά μεγάλη ακρίβεια κατά την επεξεργασία του σήματος.
- Τα στοιχεία ενός αναλογικού κυκλώματος έχουν συγκεκριμένη ανοχή, και ο κύκλος ζωής τους επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες.
- Στα ψηφιακά σήματα πραγματοποιούνται ευκολότερα μαθηματικοί υπολογισμοί και πράξεις μεγάλης ακρίβειας, σε σχέση με την περίπτωση της αναλογικής επεξεργασίας σήματος.
- Τα συστήματα ψηφιακής επεξεργασίας σήματος είναι πλέον αρκετά φθηνότερα σε σχέση με τα αντίστοιχα αναλογικά.

Το πρώτο που πρέπει να γίνει για την ψηφιακή επεξεργασία ενός αναλογικού σήματος, είναι να μετατραπεί αυτό σε ψηφιακό σήμα μέσω μιας διαδικασίας που είναι γνωστή ως δειγματοληψία και σε επόμενο βήμα θα πρέπει να γίνει η διαδικασία της κβάντισης του σήματος. Συνήθως αυτά τα δυο στάδια υλοποιούνται στην πράξη μέσω ενός αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα σημάτων. Σε πολλές περιπτώσεις χρειάζεται στην έξοδο ενός συστήματος, και μετά τη διαδικασία της ΨΕΣ, να υπάρχει αναλογικό σήμα, άρα εκεί απαιτείται η αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή η μετατροπή του ψηφιακού σήματος σε αναλογικό μέσω ενός ψηφιακού σε αναλογικό [3].

Οι αλγόριθμοι ΨΕΣ πραγματοποιούνται μέσω υπολογιστών, και συνήθως με ψηφιακούς επεξεργαστές σήματος σε υλικό (hardware) που κατασκευάζονται ειδικά για αυτόν τον σκοπό, όπως τα ολοκληρωμένα κυκλώματα εφαρμογών (Application-Specific Integrated Circuits, ASIC). Στις ημέρες μας γίνεται χρήση και άλλων τεχνολογιών για την ψηφιακή επεξεργασία σήματος όπως, οι ψηφιακοί ελεγκτές σήματος (κυρίως σε εφαρμογές στη βιομηχανία, όπως ο έλεγχος κινητήρων), οι ισχυροί μικροεπεξεργαστές γενικής χρήσης, καθώς και συσκευές FPGA (Field Programmable Gate Arrays) [3].



Εικόνα 1-40 Αναλογικό σήμα και ψηφιακό σήμα [3] © Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Κάλλιπος/Σεραφεΐμ Καραμπογιάς

Στην Εικόνα 1-40 φαίνεται η διαφορά που υπάρχει μεταξύ των δύο σημάτων αναλογικού και ψηφιακού [3].

Στην ψηφιακή επεξεργασία σήματος οι μηχανικοί συνήθως αναλύουν και μελετούν τα ψηφιακά σήματα είτε στο πεδίο του χρόνου, είτε στο χώρο, είτε στα πεδία της συχνότητας, της αυτοσυσχέτισης (autocorrelation), και των κυματιδίων (wavelet domains). Επιλέγουν το πεδίο στο οποίο θα γίνει η επεξεργασία του σήματος με βάση το ποιο πεδίο αναπαριστά καλύτερα τα βασικά χαρακτηριστικά του σήματος [8].

Μια ακολουθία από δείγματα από μια συσκευή μετρήσεων έχει σαν αποτέλεσμα μια αναπαράσταση στο χρόνο ή στο χώρο, ενώ ένας διακριτός μετασχηματισμός Fourier παράγει πληροφορία στο πεδίο της συχνότητας. Η αυτοσυσχέτιση ορίζεται σαν η συσχέτιση μεταξύ του σήματος και του εαυτού του ανά μεταβαλλόμενα χωρικά ή χρονικά διαστήματα [8]. Στα πλαίσια τους παρούσας εργασίας θα δοθεί έμφαση στα πεδία του χρόνου και της συχνότητας.

Η έννοια της συχνότητας είναι ιδιαίτερα βασική. Από τη φυσική είναι γνωστό ότι η συχνότητα περιγράφεται από ημιτονοειδής συναρτήσεις καθώς είναι αποτέλεσμα περιοδικών κινήσεων γνωστών ως αρμονικών ταλαντώσεων. Η συχνότητα σχετίζεται με τον χρόνο καθώς η διάσταση της είναι αντίστροφη της διάστασης του χρόνου. [8].

Η ανάλυση που γίνεται σε στο πεδίο της συχνότητας ονομάζεται φασματική ανάλυση (spectrum analysis). Η μετατροπή του σήματος από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας γίνεται μέσω του μετασχηματισμού Fourier [8].

Μέσω του μετασχηματισμού Fourier και την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, είναι εφικτή η μελέτη και ο εντοπισμός του φάσματος των συχνοτήτων που υπάρχουν στο σήμα εισόδου [8].

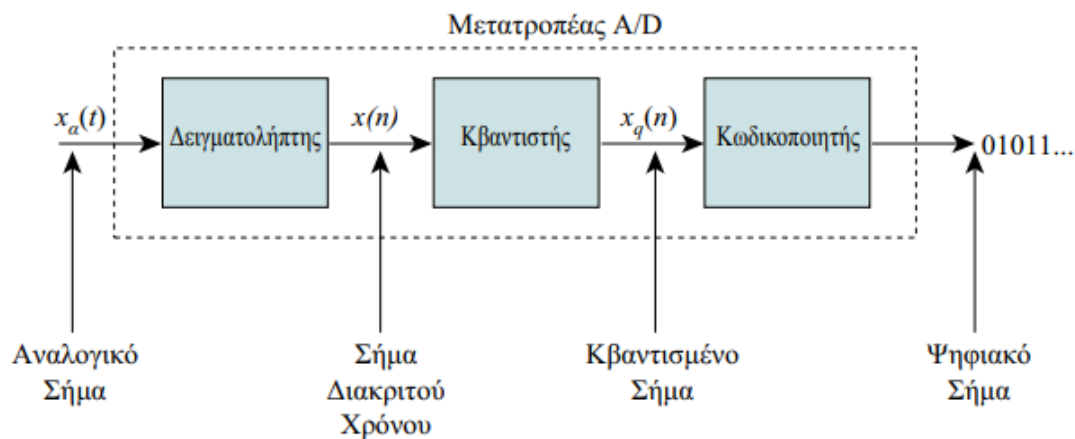
Η διαδικασία μετατροπής σήματος από αναλογική σε ψηφιακή μορφή μπορεί συνοπτικά να περιγραφεί από το μπλοκ διάγραμμα που φαίνεται στην Εικόνα 1-41. Τα βασικά στάδια της μετατροπής του αναλογικού σήματος σε ψηφιακό σήμα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής [14]:

- Το **χαμηλοπερατό φίλτρο** που περιορίζει το φάσμα του αναλογικού



Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

- Τον **δειγματολήπτη** ο οποίος επιλέγει δείγματα από το αναλογικό σήμα ανά τακτά χρονικά διαστήματα
- Ο **κβαντιστής** που αντιστοιχίζει τις τιμές των δειγμάτων σε συγκεκριμένα επίπεδα τιμών
- Ο **κωδικοποιητής** που μετατρέπει την ακολουθία των επιπέδων πλάτους του κβαντιστή σε δυαδικές κωδικολέξεις



Εικόνα 1-41 Βασικά τμήματα ενός μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό [6] ©Μελέτη Μετατροπέων Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με την τεχνική Σίγμα Δέλτα, Πανεπιστήμιο Πατρών/Τσιάτουρας Κωνσταντίνος

## 1.8 Δειγματοληψία αναλογικών σημάτων

Το πρώτο κύριο βήμα στη μετατροπή ενός αναλογικού σήματος σε ψηφιακό είναι η δειγματοληψία. Δειγματοληψία είναι η διαδικασία της μετατροπής ενός σήματος συνεχούς χρόνου σε ένα σήμα διακριτού χρόνου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί λαμβάνοντας δείγματα του σήματος συνεχούς χρόνου σε διακριτές χρονικές στιγμές. [14].

Ένα δείγμα είναι πρακτική η τιμή που έχει το συνεχές αναλογικό σήμα μια συγκεκριμένη στιγμή. Η διαδικασία της λήψης των δειγμάτων γίνεται μέσω μιας διάταξης γνωστής ως δειγματολήπτης [14].

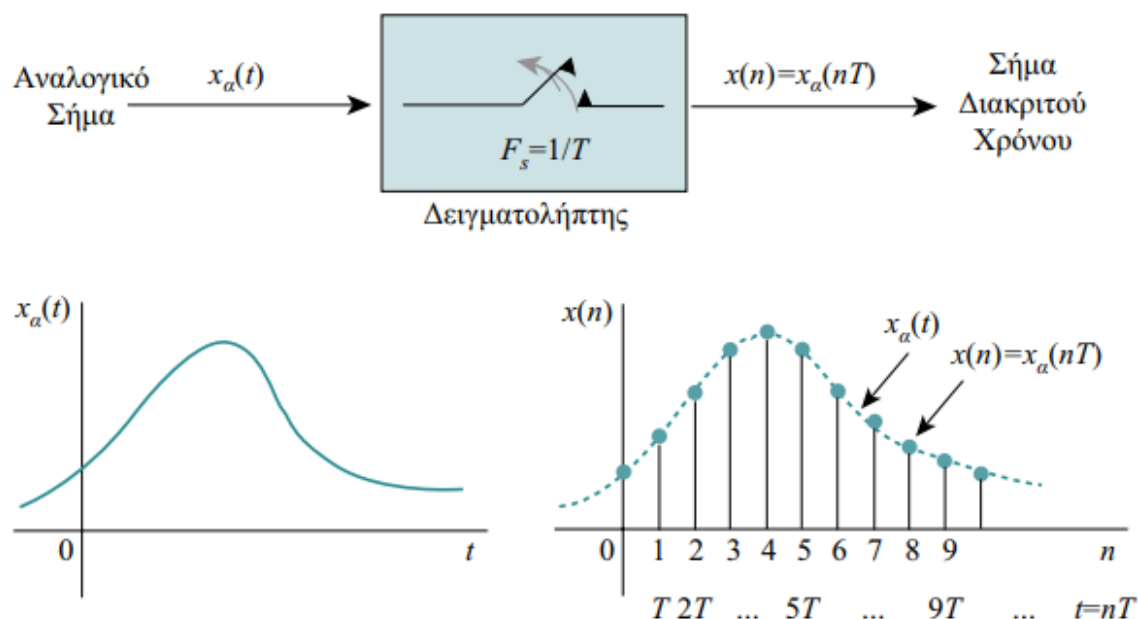
Η διαδικασία της δειγματοληψίας ενός αναλογικού σήματος  $x_a(t)$  είναι εφικτή με τη λήψη των δειγμάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα μήκους  $T$  μονάδων χρόνου. Οι μονάδες χρόνου συνήθως είναι sec, msec, usec ή nsec, και εξαρτάται από την εκάστοτε εφαρμογή. Έτσι το σήμα διακριτού χρόνου που προκύπτει μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$x(n) = x_a(nT), -\infty < n < \infty \quad (1.19)$$

όπου  $x(n)$  είναι το σήμα διακριτού χρόνου που προκύπτει.

Η παράμετρος  $T$  που παραπάνω ορίστηκε, είναι γνωστή ως περίοδος της δειγματοληψίας  $T$ . Το αντίστροφο μέγεθος της περιόδου ονομάζεται συχνότητα δειγματοληψίας, και δίνεται από τη σχέση  $F_s=1/T$ . Η συχνότητα δειγματοληψίας περιγράφει το ρυθμό δειγματοληψίας (sampling rate) και εκφράζεται σε μονάδες Hz ή πολλαπλάσια αυτής. Στην Εικόνα 1-42 φαίνεται ο τρόπος λειτουργίας του δειγματολήπτη [14].





Εικόνα 1-42 Ομοιόμορφη δειγματοληψία αναλογικού σήματος [14] ©Βασικές Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας/ Πανεπιστήμιο Πατρών

### 1.8.1 Θεώρημα δειγματοληψίας

Το θεώρημα της δειγματοληψίας δίνει ορίζει πρακτικά εκείνες τις συνθήκες που θα πρέπει να τηρούνται προκειμένου ένα αναλογικό σήμα να παρασταθεί τελικά μονοσήμαντα από τα δείγματα του [6].

Το θεώρημα της δειγματοληψίας είναι ένα από τα σημαντικότερα που χρησιμοποιούνται σήμερα σε συστήματα ΨΕΣ και καθορίζει ότι η συχνότητα δειγματοληψίας  $F_s$  θα πρέπει να είναι τουλάχιστον διπλάσια από την υψηλότερη συχνότητα  $F_{max}$  που περιέχεται στο σήμα, και η οποία απαιτείται από τις προδιαγραφές του μετρητικού συστήματος να μπορεί να εντοπιστεί, δηλαδή θα πρέπει να ισχύει η ανισότητα  $F_s \geq 2 F_{max}$ . Η συγκεκριμένη ανισότητα ονομάζεται κριτήριο της δειγματοληψίας κατά Nyquist και αποτελεί τη μικρότερη δυνατή συχνότητα δειγματοληψίας που επιτρέπει την ακριβή ανακατασκευή ενός αναλογικού σήματος, πεπερασμένου εύρους ζώνης, από τα δείγματά του [15].

Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερη είναι η συχνότητα δειγματοληψίας του σήματος, τόσο πιο ακριβής θα μπορεί να γίνει και η ανακατασκευή του αρχικού σήματος. Η μεγαλύτερη συχνότητα δειγματοληψίας απαιτεί σε επίπεδο υλικού (hardware) και μεγαλύτερη χωρητικότητα μνημών, καθώς περισσότερα δείγματα απαιτούν και μεγαλύτερο αποθηκευτικό χώρο [16].

Σαν παράδειγμα, εάν υπάρχει η απαίτηση σε μια εφαρμογή για την αναγνώριση, ανάλυση και πλήρη ακριβή αναπαράσταση ενός αναλογικού σήματος στο οποίο απαιτείται η αναγνώριση συχνοτήτων έως και 150kHz, αυτό σημαίνει ότι η δειγματοληψία θα πρέπει να γίνεται με μια συχνότητα τουλάχιστον των 300kHz [16].

### 1.8.2 Φαινόμενο της αναδίπλωσης

Ένα από τα κύρια φαινόμενα που συχνά μπορεί να εμφανιστεί κατά τη διαδικασία της δειγματοληψίας του αναλογικού σήματος, είναι η αναδίπλωση της συχνότητας (aliasing) ή αλλιώς αλλοίωση. Συγκεκριμένα, μετά τη δειγματοληψία κάποιες υψηλές συχνότητες ενός αναλογικού σήματος εμφανίζονται ως χαμηλές συχνότητες στο ψηφιακό σήμα [17].

### 1.8.3 Γενίκευση του Θεωρήματος Δειγματοληψίας

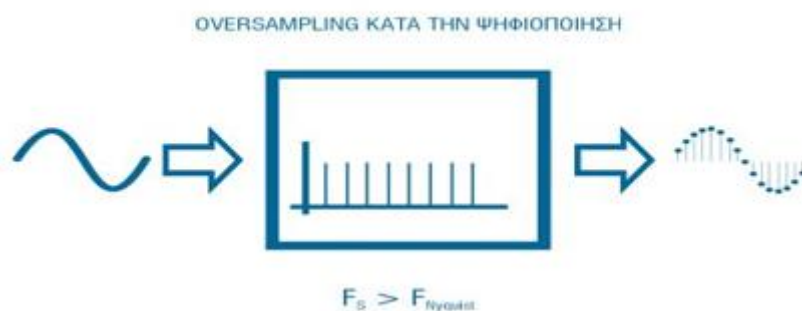
Όπως ήδη αναφέρθηκε και πιο πάνω η ακριβής ανακατασκευή του αναλογικού σήματος επιτυγχάνεται εφόσον η συχνότητα δειγματοληψίας  $F_s$  είναι τουλάχιστον διπλάσια από τη μέγιστη συχνότητα  $f_m$  του σήματος. Αυτό , ισχύει και στην περίπτωση για την οποία η μόνη διαθέσιμη πληροφορία για το αναλογικό σήμα είναι ότι περιέχει συχνότητες στο διάστημα  $[0, f_m]$ . Με βάση αυτό το διάστημα τιμών συχνοτήτων είναι προφανές ότι οι επιτρεπόμενες τιμές για τη σωστή δειγματοληψία είναι το διάστημα  $[2f_m, \infty)$  [15].

### 1.8.4 Υπερδειγματοληψία (oversampling)

Κατά τη διαδικασία της ψηφιακής επεξεργασία σήματος, υπάρχει περίπτωση να δημιουργηθεί και το φαινόμενο της υπερδειγματοληψίας. Σαν υπερδειγματοληψία ορίζεται η κατάσταση κατά την οποία ένα σήμα δειγματοληπτείται με μια συχνότητα πολύ μεγαλύτερη από αυτή που ορίζεται από το θεώρημα του Nyquist. Στην Εικόνα 1-43 φαίνεται ένα παράδειγμα υπερδειγματοληψίας επάνω σε ένα σήμα συγκεκριμένης συχνότητας [5].

Υπάρχουν τρεις βασικοί λόγοι που πολλές φορές καθιστούν απαραίτητη την υπερδειγματοληψία [5]:

- Αποφυγή της αλλοιώσεως του αναλογικού σήματος
- Βελτίωση της ανάλυσης (Resolution)
- Μείωση του θορύβου μέσω των μετατροπών Delta-sigma



Εικόνα 1-43 Υπερδειγματοληψία αναλογικού σήματος με συχνότητα μεγαλύτερη της ελάχιστης απαιτούμενης (Nyquist) [18] ©<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anti-aliasing-filter>

Ωστόσο η υπερδειγματοληψία θα πρέπει να εφαρμόζεται σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις, όταν η εκάστοτε εφαρμογή το απαιτεί. Αυτό γιατί εκτός των σημαντικών πλεονεκτημάτων που έχει, δημιουργεί και σημαντικά μειονεκτήματα όπως είναι για παράδειγμα η απαίτηση για πιο γρήγορα ψηφιακά κυκλώματα, που σημαίνει αύξηση του κόστους, της κατανάλωσης ισχύος επεξεργασίας αλλά και αύξηση του απαιτούμενου υλικού (hardware) καθώς περισσότερα δείγματα σημαίνει μεγαλύτερους

ψηφιακούς επεξεργαστές και περισσότερη απαιτούμενη μνήμη για την αποθήκευση των παραπάνω δειγμάτων.

## 1.9 Κβάντιση σημάτων συνεχούς πλάτους

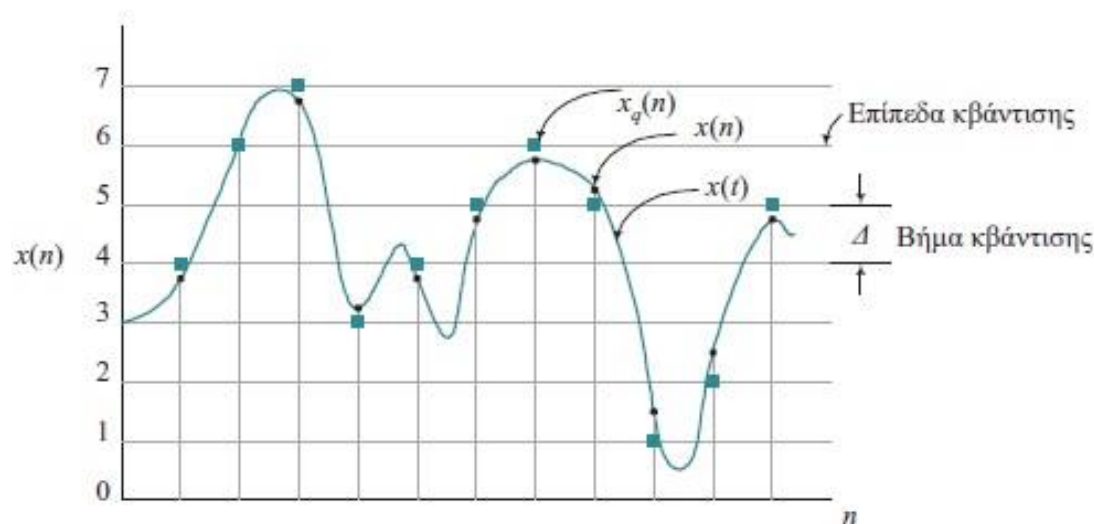
Μετά τη φάση της δειγματοληψίας ακολουθεί η κβάντιση (quantisation) του σήματος διακριτού χρόνου. Κατά τη φάση της κβάντισης το σήμα διακριτού χρόνου και συνεχών τιμών μετατρέπεται σε ψηφιακό σήμα, δηλαδή σε ένα σήμα διακριτού χρόνου και διακριτών τιμών, όπου οι τιμές κάθε δείγματος εκφράζονται ως ένας αριθμός με πεπερασμένο πλήθος ψηφίων [19].

Στη συγκεκριμένη διαδικασία υπεισέρχεται και ένα σφάλμα, το λεγόμενο σφάλμα κβάντισης ή θόρυβος κβάντισης, και περιγράφει πρακτικά την απόκλιση της πραγματικής τιμής από την κβαντισμένη τιμή λόγω του πεπερασμένου πλήθους ψηφίων που χρησιμοποιούνται από την κβαντισμένη τιμή του σήματος. Το σφάλμα κβάντισης  $e_q(n)$  μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση [19]:

Στην συνέχεια ορίζεται το σφάλμα κβάντισης  $e_q(n)$ , το οποίο είναι η διαφορά της πραγματικής τιμής (δείγματα εισόδου  $x(n)$ ) από την κβαντισμένη τιμή (δείγματα κβαντισμένα  $x_q(n)$ ), δηλαδή

$$e_q(n) = x(n) - x_q(n). \quad (1.21)$$

όπου  $x(n)$  είναι η πραγματική τιμή του αναλογικού σήματος την διακριτή χρονική στιγμή  $n$ , και  $x_q(n)$  είναι η κβαντισμένη τιμή για το αντίστοιχο δείγμα στην αντίστοιχη διακριτή χρονική στιγμή. Στην Εικόνα 1-44 δίνεται η απεικόνιση ενός αναλογικού σήματος μαζί με τις κβαντισμένες τιμές σε διακριτές τιμές χρόνου [19].



Εικόνα 1-44 Κβάντιση σήματος [19]© <http://eclass.teiion.gr/modules/document/file.php/-TPT146/ADC%20%20CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%2010.pdf>

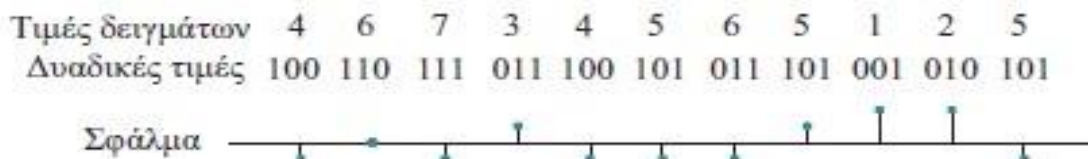
Ο περιορισμός του κάθε δείγματος στο επιθυμητό πεπερασμένο πλήθος ψηφίων μπορεί να γίνει είτε με την μέθοδο της αποκοπής (truncation) είτε με τη μέθοδο της στρογγυλοποίησης (rounding), στην οποία ο κβαντιστής δίνει στην συνεχή τιμή, την τιμή του πιο κοντινού επιπέδου κβάντισης, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1-45 [19].

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Τα επίπεδα κβάντισης εκφράζουν τις τιμές που επιτρέπεται να πάρει κάθε δείγμα. Η απόσταση μεταξύ δυο διαδοχικών επιπέδων κβάντισης ονομάζεται βήμα κβάντισης ή διακριτική ικανότητα ή ανάλυση, και δίνεται από τη σχέση [19]:

$$\Delta = \frac{X_{max} - X_{min}}{L - 1} \quad (1.22)$$

όπου  $X_{max}$  και  $X_{min}$  είναι η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή των αντίστοιχων επιπέδων κβάντισης, και  $L$  είναι το πλήθος των επιπέδων κβάντισης.



Εικόνα 1-45 Κωδικοποίηση σήματος και σφάλμα κβάντισης [19] ©<http://eclass.teiion.gr/modules/document/file.php/TPT146/ADC%20%20CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%2010.pdf>

### 1.10 Κωδικοποίηση των κβαντισμένων δειγμάτων

Το τελικό βήμα για τη δημιουργία του ψηφιακού σήματος, είναι η αντιστοίχιση των κβαντισμένων τιμών σε αντίστοιχες δυαδικές τιμές (λέξεις από bit). Η διαδικασία μετατροπής των κβαντισμένων τιμών σε τιμές στο δυαδικό σύστημα ονομάζεται κωδικοποίηση και μέσω αυτής κάθε διακριτή τιμή  $x_q(n)$  αντιπροσωπεύεται από έναν αριθμό αποτελούμενο από  $n$ -bits [19].

Αν τα επίπεδα κβάντισης είναι  $L$ , τότε χρειάζονται τουλάχιστον  $L$  τέτοιοι διαφορετικοί δυαδικοί αριθμοί. Αν κάθε δυαδική λέξη αποτελείται από  $n$  bits τότε συνολικά μπορούν να δημιουργηθούν  $2^n$  διαφορετικοί δυαδικοί αριθμοί. Άρα, ισχύει ότι [19]:

$$2^n \geq L \Rightarrow n \geq \log_2 L \quad (1.23)$$

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup> : Όργανα και διατάξεις πειραματικών μετρήσεων

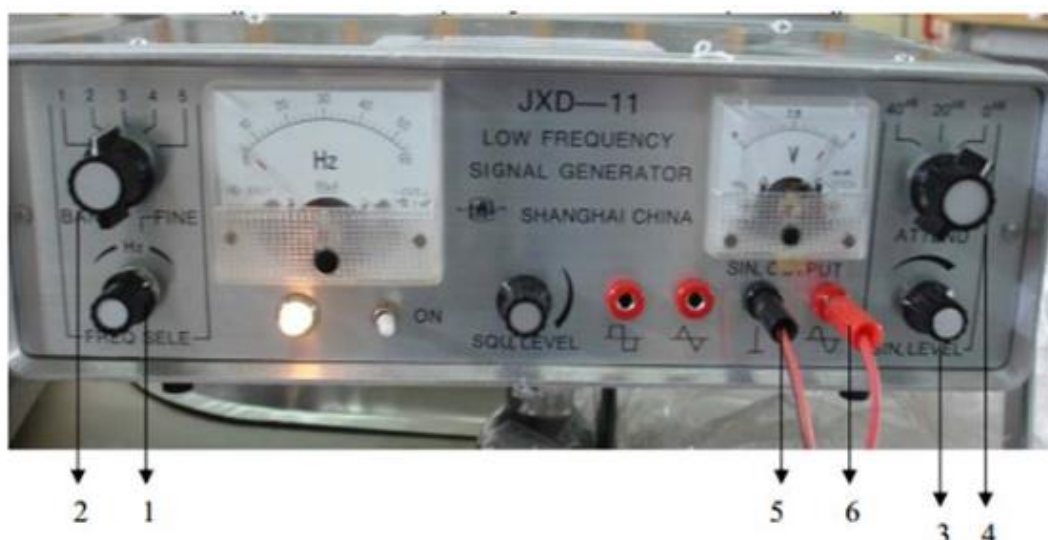
### 2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μια μικρή αναφορά στον τρόπο λειτουργίας των γεννητριών σήματος και των παλμογράφων μέτρησης, καθώς έπαιξαν καθοριστικό ρόλο για την διεκπεραίωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

### 2.2 Γεννήτριες σήματος

Οι γεννήτριες σήματος, τυπικό παράδειγμα των οποίων φαίνεται στην Εικόνα 2-1, είναι ηλεκτρικές συσκευές οι οποίες δίνουν στην έξοδο τους διάφορα είδη σημάτων όπως, ημιτονικό, τετραγωνικό και τριγωνικό σήμα μεταβαλλόμενου πλάτους και συχνότητας.

Κάθε γεννήτρια έχει πάνω της δύο ή και περισσότερες εξόδους για την απόκτηση του σήματος. Σε κάθε έξοδο, ο ένας είναι ο ακροδέκτης γείωσης και, ο άλλος είναι ο ακροδέκτης.



Εικόνα 2-1 Πρόσωση γεννήτριας σήματος [20] © [www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/exc1.htm](http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/exc1.htm)

#### 2.2.1 Ρυθμίσεις σε γεννήτρια σήματος.

Στην παραπάνω εικόνα υπάρχουν διάφοροι περιστροφικοί διακόπτες για τη ρύθμιση της συχνότητας (1,2) φαίνεται ο ρυθμιστής συχνότητας. Ο ένας περιστροφικός διακόπτης ονομάζεται πολλαπλασιαστής και ο άλλος πολλαπλασιαστέος αριθμός της συχνότητας. Η συχνότητα του τελικού σήματος στην έξοδο είναι το γινόμενο αυτών των δύο ρυθμίσεων [20].

Επιπλέον υπάρχει πάντα και ένας περιστροφικός διακόπτης για τη ρύθμιση του πλάτους του σήματος εξόδου (ρυθμιστής 3). Σε πολλές γεννήτριες δίνεται επιπλέον η δυνατότητα της μεγάλης εξασθένησης του σήματος εξόδου, και για το λόγο αυτό υπάρχει μια επιπλέον ρύθμιση εξασθένησης που μετρείται σε dB (ρυθμιστής 4)Επιπλέον ο ρυθμιστής attenuate (4). Κάποιες συνηθισμένες τιμές εξασθένησης είναι τα -10 dB, -20dB, και -40dB. Η μεγάλη εξασθένηση του σήματος από τις γεννήτριες

αποτελεί μια πολύ σημαντική ρύθμιση καθώς μπορεί να προσομοιώνει πραγματικά συστήματα, όπως για παράδειγμα η παραγωγή ενός σήματος επικοινωνίας, το οποίο όπως εξασθενεί λόγω της διάδοσής του στον αέρα. Η μονάδα dB είναι μια πολύ σημαντική λογαριθμική μονάδα σύγκρισης μεταξύ τιμών σήματος, καθώς μπορεί να περιγράψει εξασθενίσεις και ενισχύσεις σημάτων που σε γραμμική κλίμακα μπορεί να πάρει εξαιρετικά μικρές ή και εξαιρετικά μεγάλες τιμές αντίστοιχα.

### 2.2.2 Ορισμός της λογαριθμικής μονάδας dB.

Το 1 dB είναι όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, μια λογαριθμική μονάδα σύγκρισης μεγεθών, και συγκεκριμένα για την ισχύ ορίζεται ως:

$$dB=10\log\frac{P_1}{P_2} \quad (2.1)$$

όπου  $P_1$  είναι η ισχύς εισόδου και  $P_2$  είναι η ισχύς εξόδου. Μέσω αυτού του ορισμού μπορούν να προκύψουν οι μονάδες dBW και dBm που είναι πολύ γνωστές στην ανάλυση σημάτων. Η μονάδα dBW ορίζει τη σύγκριση ενός σήματος με ισχύ  $P_1$  σε W σε σχέση με την ισχύ  $P_2 = 1W$ . Αντίστοιχα η μονάδα dBm συγκρίνει ένα σήμα ισχύος  $P_1$  σε mW, σε σχέση με την ισχύ  $P_2 = 1mW$ .

Μέσω της σχέσης (2.1) μπορεί να οριστεί μια αντίστοιχη σχέση που αντί για τις ισχύς να συσχετίζει τις τάσεις τροφοδοσίας, ή τα ρεύματα που ρέουν μέσα σε ένα φορτίο επίσης σε dB. Συγκεκριμένα για την τάση, και αν αυτή για κάθε περίπτωση εφαρμόζεται στην ίδια αντίσταση, μπορεί να γραφεί [20]:

$$dB = 10 \cdot \log\left(\frac{\frac{V_{out}^2}{R}}{\frac{V_{in}^2}{R}}\right) = 20 \cdot \log\left(\frac{V_{out}}{V_{in}}\right) \quad (2.2)$$

Αντίστοιχα για την περίπτωση των ρευμάτων και για ίδιες αντιστάσεις ισχύει:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{I_{out}}{I_{in}}\right) \quad (2.3)$$

Έτσι το σήμα που έχει υποβιβαστεί κατά 10 dB έχει μειωθεί κατά:

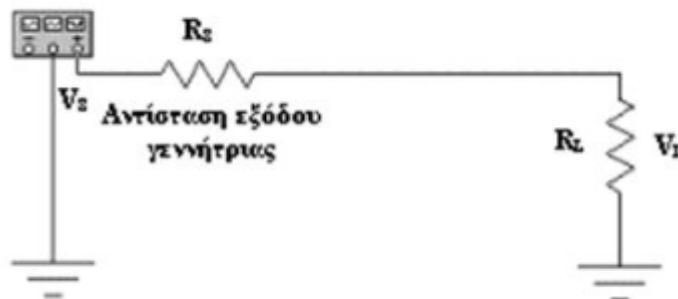
$$-10dB = 20\log\frac{V_{out}}{V_{in}} \Rightarrow \log\frac{V_{out}}{V_{in}} = -0.5 \Rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = 10^{-0.5} \Rightarrow V_{out} = 0.316V_{in} \quad (2.4)$$

### 2.2.3 Ρύθμιση αντίστασης εξόδου της γεννήτριας.

Η έξοδος κάθε γεννήτριας χαρακτηρίζεται εκτός των άλλων και από την τιμή της αντίστασης εξόδου της γεννήτριας. Η γνώση της τιμής αυτής είναι σημαντική καθώς βοηθά στην κατάλληλη επιλογή του καλωδίου μέτρησης έτσι ώστε τελικά να γίνεται προσαρμογή του φορτίου στο οποίο θα εφαρμοστεί το σήμα.

Από το παρακάτω κύκλωμα της Εικόνα 2-2 προκύπτει η σχέση από τον διαιρέτη τάσης:

$$V_L = V_S \frac{R_L}{R_S + R_L} \quad (2.5)$$



Εικόνα 2-2 Κυκλωματική αναπαράσταση σχετικά με την επιλογή αντίστασης εξόδου της γεννήτριας [20] ©www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/exc1.htm

Για να ισχύει η σχέση  $V_L = V_S$ , ώστε να εφαρμοστεί όλο το σήμα της γεννήτριας στα άκρα του φορτίου, θα πρέπει να ισχύει:

$$\frac{R_L}{R_S + R_L} = 1 \rightarrow R_S \ll R_L \quad (2.6)$$

Άρα είναι ανάγκη η εσωτερική αντίσταση της γεννήτριας να είναι όσο γίνεται μικρότερη. (βλ. συμπεράσματα 6.3)

## 2.3 Παλμογράφος

### 2.3.1 Εισαγωγή

Για να μετρηθούν διάφορα είδη σημάτων, χρειάζεται να υπάρχει στο κύκλωμα ένα μετρητικό σύστημα που κάνει αυτή τη δουλειά. Αυτό το ηλεκτρονικό όργανο μέτρησης λέγεται παλμογράφος. Κάποιες βασικές μετρήσεις που μπορούν να γίνουν με έναν παλμογράφο είναι η εύρεση της συχνότητας μιας κυματομορφής, η διαφορά φάσης μεταξύ δύο κυματομορφών, το σχήμα και το πλάτος μια κυματομορφής, καθώς επίσης και κάποιες μαθηματικές πράξεις όπως ο γρήγορος μετασχηματισμός Fourier που συνήθως όλοι οι ψηφιακοί παλμογράφοι τις υποστηρίζουν [21].

### 2.3.2 Είδη παλμογράφων

#### 2.3.2.1 Αναλογικός Παλμογράφος

Οι αναλογικοί παλμογράφοι, αν και ακόμα και σήμερα χρησιμοποιούνται τείνουν να εκτοπιστούν λόγω των υψηλών δυνατοτήτων των ψηφιακών παλμογράφων. Στους αναλογικούς παλμογράφους μια δέσμη ηλεκτρονίων δημιουργείται από το σήμα εισόδου, και στην συνέχεια η δέσμη προσπίπτει στην φθορίζουσα οθόνη του παλμογράφου. Με αυτό τον τρόπο χοντρικά αποτυπώνεται το σήμα εισόδου στην οθόνη του αναλογικού παλμογράφου [21]. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

έγινε χρήση ψηφιακού παλμογράφου, και η περεταίρω ανάλυση της λειτουργίας των αναλογικών παλμογράφων θεωρείται περιττή.

### 2.3.2.2 Ψηφιακός Παλμογράφος

Στους ψηφιακούς παλμογράφους το αναλογικό σήμα εισόδου υπόκειται σε ψηφιοποίηση. Στην συνέχεια το σήμα αποτυπώνεται στην οθόνη του παλμογράφου. Οι σύγχρονοι παλμογράφοι είναι ψηφιακοί και διαφέρουν από τους αναλογικούς [21].

Κάποια από τα πλεονεκτήματα των ψηφιακών παλμογράφων έναντι των αναλογικών είναι τα εξής:

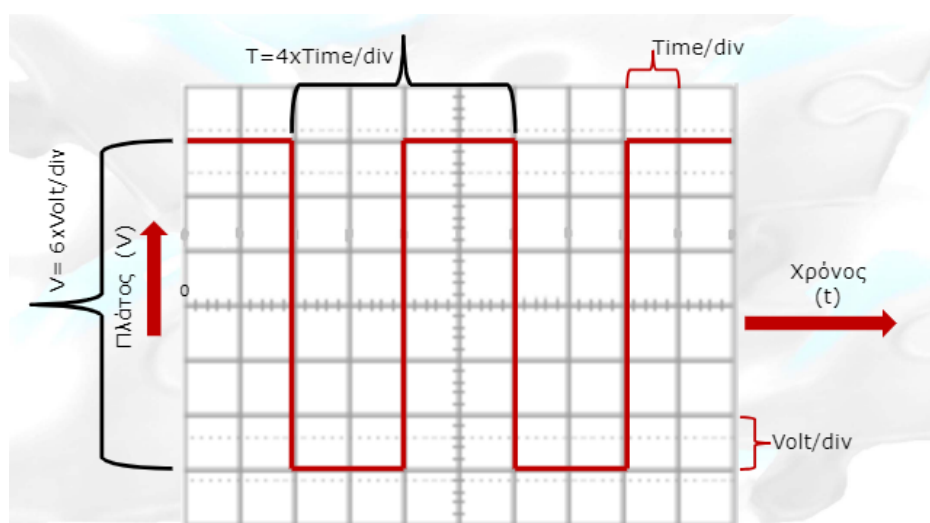
Οι ψηφιακοί παλμογράφοι παρέχουν πολλές χρήσιμες δυνατότητες για όσους ασχολούνται με τον τομέα των μετρήσεων όλων των ειδικοτήτων και αυτές είναι οι παρακάτω [21]:

- ❖ Παρέχει τη δυνατότητα να υποβληθεί το προβαλλόμενο σήμα σε επεξεργασία και αποθήκευση.
- ❖ Πραγματοποιεί αυτόματες μετρήσεις και προσαρμόζεται αυτόματα
- ❖ Προσφέρει καλύτερη απομόνωση στο επιθυμητό σήμα και καλύτερη ποιότητα σήματος καθώς έχει χαμηλότερα επίπεδα θορύβου
- ❖ Τέλος πραγματοποιεί μαθηματικούς μετασχηματισμούς.

### 2.3.3 Μετρήσεις με τον παλμογράφο

Οι μετρήσεις που μπορούν να πραγματοποιηθούν με έναν παλμογράφο είναι οι εξής [22]:

• **Μέτρηση Τάσης.** Αυτή γίνεται με μέτρηση των κατακόρυφων υποδιαιρέσεων που καταλαμβάνει το σήμα επί της οθόνης, και με πολλαπλασιασμό τους επί τον συντελεστή της ένδειξης του ρυθμιστή VOLT/DIV του παλμογράφου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2-3.



Εικόνα 2-3 Απεικόνιση μιας κυματομορφής [22] © Σημειώσεις - Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες, Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών, Σχολή Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος

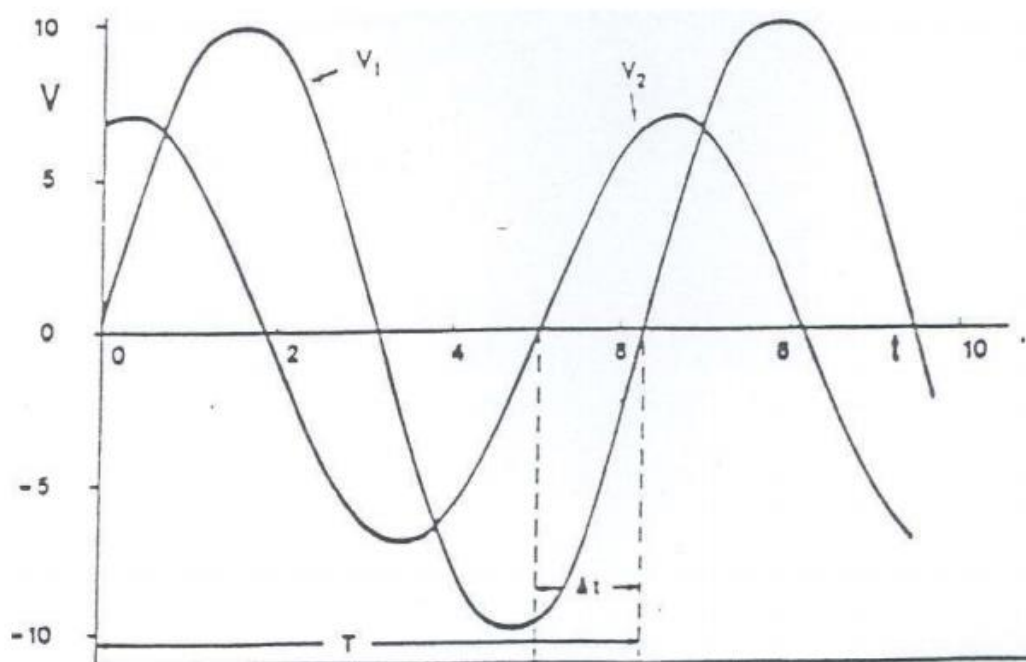


• **Μέτρηση Συχνότητας.** Γίνεται με μέτρηση των οριζόντιων υποδιαίρεσεων που καταλαμβάνει μια περίοδος του σήματος άγνωστης συχνότητας, και θα πρέπει ναγίνεται με τον αντίστοιχο πολλαπλασιασμό τους με την ένδειξη του ρυθμιστή TIME/DIV. Η γνωστή πλέον περίοδος  $T$  μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε συχνότητα μέσω της σχέση  $f = 1/T$ , αν και οι ψηφιακοί παλμογράφοι συνήθως αυτόματα αναγνωρίζουν τη συχνότητα.

• **Μέτρηση Φάσης :** Είναι γνωστό ότι η τάση και το ρεύμα, σε ένα ωμικό φορτίο  $R$  όταν αυτό τροφοδοτηθεί με εναλλασσόμενη τάση, είναι συμφασικά μεγέθη. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει σε χωρητικά φορτία όπου το ρεύμα προπορεύεται της τάσης, όπως επίσης δεν ισχύει και σε επαγωγικά φορτίο, στα οποία το ρεύμα έπεται της.

### 2.3.3.1 Μέτρηση διαφοράς φάσης

Αν σε δυο εισόδους του παλμογράφου εφαρμοστούν δύο κυματομορφές της μορφής  $V_1 = V_{10} \cdot \sin \omega t$  και  $V_2 = V_{20} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  τότε η εικόνα που θα προκύψει στην οθόνη του παλμογράφου θα είναι όμοια αυτής στην Εικόνα 2-4 [21].



Εικόνα 2-4 Μέτρηση διαφοράς φάσης με τη μέθοδο της «διεγειρόμενης σάρωσης» [21] © Παλμογράφος Διπλής Δέσμης - Μελέτη & Ανάπτυξη, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, Ε. Χατζηκρανιώτης, Κ. Χρυσάφης, Ανασύνθεση: Δ. Ευαγγελινός, Ο. Βαλασιάδης,

Οι κυματομορφές είναι μετατοπισμένες χρονικά κατά  $\Delta t$  και η διαφορά φάσης  $\varphi$  θα βρίσκεται από τη σχέση:

$$\varphi = 2\pi \left( \frac{\Delta t}{T} \right) \quad (2.7)$$

όπου  $T$  η κοινή περίοδος των κυματομορφών.

Με τη μέθοδο αυτή μπορεί εύκολα να μετρηθεί η διαφορά φάσης μεταξύ τάσης και ρεύματος που διαρρέει ένα κύκλωμα  $RC$  [21].

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

## 2.4 Ο παλμογράφος διπλής δέσμης

Η βασική διαφορά του παλμογράφου διπλής δέσμης είναι ότι μέσω αυτού μπορούν να απεικονιστούν στην οθόνη του συγχρόνως δύο κυματομορφές. Μια τυπική εικόνα ενός παλμογράφου διπλής δέσμης φαίνεται στην Εικόνα 2-5, οποίος είναι και ο παλμογράφος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Εικόνα 2-5 Ψηφιακός παλμογράφος εργαστηρίου - gds – 3254 [23]  
©[https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product\\_id=395](https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product_id=395)

### 2.4.1 Βασικές ρυθμίσεις και χειρισμοί του παλμογράφου διπλής δέσμης

Βασικοί χειρισμοί του παλμογράφου θεωρούνται αυτοί που επιτρέπουν την απεικόνιση και μέτρηση ενός απλού σήματος, ενώ κάποιες βασικές ρυθμίσεις είναι [21]:

- α) Αρχικές ρυθμίσεις που θέτουν τον παλμογράφος στην βασική κατάσταση λειτουργίας μιας δέσμης, ώστε να εξασφαλίζεται ο εύκολος εντοπισμός της δέσμης
- β) Ρύθμιση της φωτεινότητας και της εστίασης της δέσμης
- γ) Ρύθμιση της οριζόντιας και κατακόρυφης θέσης της δέσμης
- δ) Επιλογή κατάλληλης ενίσχυσης του σήματος κατά τον άξονα Y
- ε) Επιλογή κατάλληλης βάσης χρόνου

Τα χαρακτηριστικά του συγκεκριμένου παλμογράφου παρουσιάζονται στο παράρτημα 2 της διπλωματικής εργασίας.

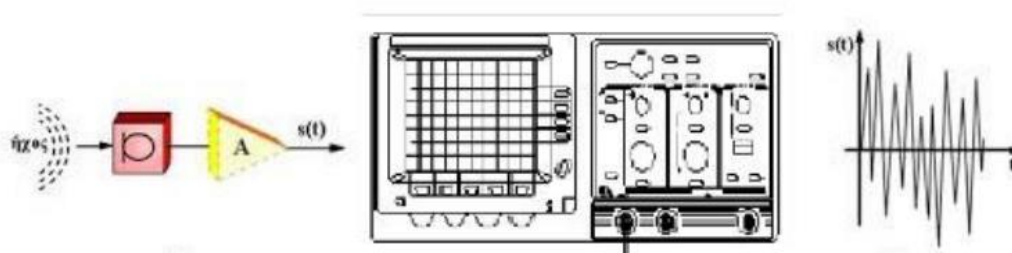
Η χρήση του παλμογράφου δεν περιορίζεται μόνο στον τομέα της ηλεκτρολογίας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τους τεχνικούς της τηλεόρασης μέχρι τους φυσικούς. Χαρακτηρίζεται ως ένα από τα πιο χρήσιμα όργανα για την επισκευή, συντήρηση και μελέτη ενός ηλεκτρονικού ή ηλεκτρολογικού κυκλώματος. Ο τρόπος με τον οποίο μπορεί να ελεγχθεί ένα ηλεκτρονικό σύστημα είναι μέσω της μέτρησης

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

των σημάτων στην είσοδο και στην έξοδο των υπό μέτρηση κυκλωμάτων, κάτι το οποίο είναι μια από τις δυνατότητες του παλμογράφου [24].

Σε σχέση με αλλά όργανα, που η λειτουργία τους στηρίζεται σε μηχανικά μέσα που παρουσιάζουν μεγάλη αδράνεια, στον παλμογράφο η αδράνεια είναι μηδενική και έτσι μπορούν να μελετηθούν μεγέθη που μεταβάλλονται πολύ γρηγορά σε σχέση με τον χρόνο [24].

Όπως έχει αναφερθεί η χρήση του παλμογράφου δεν περιορίζεται μόνο στον τομέα της ηλεκτρολογίας και της ηλεκτρονικής. Χρησιμοποιώντας έναν μετατροπέα οι δυνατότητες του παλμογράφου είναι ατέλειωτες, μετρώντας πολλά και διαφορά φυσικά μεγέθη. Ο μετατροπέας είναι μια συσκευή η οποία μετατρέπει σε ηλεκτρικό ένα φυσικό μέγεθος όπως το φως, ο ήχος, η πίεση και η θερμότητα. Ένα παράδειγμα μέτρησης ηχητικού σήματος με χρήση μετατροπέα και παλμογράφου φαίνεται στην Εικόνα 2-6 [24].



Εικόνα 2-6 Μετατροπή ήχου σε ηλεκτρικό σήμα. Και γραφική απεικόνιση μέσω του παλμογράφου [24]  
© Μετατροπή Υπολογιστή Σε Παλμογράφο, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, Γεωργούλιας Βασίλης, Μπατζάκης Έκτορας

### 3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup> : Υψηλές τάσεις –κρουστική συνάρτηση

#### 3.1 Ιστορική αναδρομή

Μετά την απότομη εξέλιξη της βιομηχανίας, από τα τέλη του 18<sup>ου</sup> αιώνα έως και σήμερα η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται ταχύτατα παγκοσμίως. Η ενέργεια αυτή για να μεταφερθεί από τους σταθμούς παραγωγής χρειάζεται να περάσει από πολλά στάδια έως την κατανάλωση, και απαιτούνται ηλεκτρικές γραμμές, μήκους μερικών εκατοντάδων χιλιομέτρων ή και περισσότερο. Όσο μεγαλύτερη σε μέγεθος είναι η μεταφερόμενη ισχύς και όσο μεγαλύτερη η απόσταση μεταφοράς, τόσο υψηλότερη πρέπει να είναι η ονομαστική τάση λειτουργίας της γραμμής. Το τελευταίο καθορίζεται από διάφορους τεχνικούς και οικονομικούς παράγοντες [25].

Το 1882 στο Λονδίνο τέθηκε σε λειτουργία ο πρώτος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος παρήγαγε συνεχές ρεύμα χαμηλής τάσης για φωτισμό. Εξαιτίας της χαμηλής συνεχής τάσης εμφανίστηκαν πολλοί περιορισμοί στην μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι στα τέλη της δεκαετίας του 1880 κατασκευάστηκε η πρώτη γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης στον κόσμο, η οποία μετέφερε 100kW με τάση 2kV σε απόσταση 20km, κοντά στο Cerchi της Ιταλίας και πάλι για φωτισμό δημόσιων κτιρίων. Το 1890 στο Deptford τέθηκε σε λειτουργία ο πρώτος κύριος σταθμός παραγωγής εναλλασσόμενου ρεύματος ο οποίος τροφοδοτούσε με ισχύ το κεντρικό Λονδίνο μέσω γραμμής 10kV, σε μια απόσταση 45km. Μετά από χρόνια, και συγκεκριμένα το 1952, κατασκευάστηκε μία γραμμή 400kV στη Σουηδία (η πρώτη των 400kV στην Ευρώπη) και το 1965 μία γραμμή των 735kV. Σημειώνεται ότι εναλλασσόμενες υπερυψηλές τάσεις από 735kV έως 765kV χρησιμοποιούνται σήμερα στα συστήματα μεταφοράς σε Καναδά, Βραζιλία, Ρωσία, Νότια Αφρική, Νότια Κορέα και Η.Π.Α [26].

Πιο συγκεκριμένα, την ανάγκη χρήσης ακόμη υψηλότερων επιπέδων τάσης έφεραν η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος, ιδιαίτερα σε χώρες του αναπτυγμένου κόσμου, όπου πραγματοποιείται μεταφορά ηλεκτρικής ισχύος μεγέθους άνω των 10GW σε απόσταση άνω των 500km, με μία γραμμή [26].

Στο Ελληνικό δίκτυο (ΣΗΕ), το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από εναέριες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης (150kV) μονού και διπλού κυκλώματος, καθώς και εναέριες γραμμές υπερυψηλής τάσης (400kV) διπλού κυκλώματος. Εκτός από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς, στο ελληνικό σύστημα λειτουργεί ένα μεγάλο δίκτυο υπογείων και υποβρυχίων καλωδίων 150kV και 400kV εναλλασσόμενου ρεύματος [26].

Παρά το γεγονός ότι με τη συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας η υψηλή τάση βρίσκει συνεχώς νέα πεδία εφαρμογών, η κυριότερη χρήση της παραμένει στα δίκτυα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας. Η εισαγωγή των υψηλών τάσεων στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται, κυρίως σε οικονομικούς λόγους [26].

#### 3.2 Εισαγωγή-Παρουσίαση

Στον τεχνολογικό τομέα υπάρχουν υψηλές τάσεις, οι οποίες άλλοτε είναι επιθυμητές και άλλοτε ανεπιθύμητες. Επιθυμητές γίνονται όταν είναι απαραίτητες ώστε να λειτουργήσουν σωστά ορισμένες ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, και ανεπιθύμητες όταν κατά την εφαρμογή τους προκαλούν κάποια αναπόφευκτα φαινόμενα τα οποία πολλές φορές είναι καταστροφικά για την ομαλή λειτουργία των εγκαταστάσεων. Βασικές

εφαρμογές χρήσης της υψηλής τάσης για λειτουργία εγκαταστάσεων ή και μηχανημάτων, είναι η μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, η ηλεκτρική έλξη, οι εγκαταστάσεις ακτινών Rontgen, τα φίλτρα αιωρημάτων, τα πηνία ανάφλεξης βενζινοκινητήρων, τα εργαστήρια πυρηνικής φυσικής καθώς και πολλές άλλες [26].

Η βιομηχανία του ηλεκτρισμού χωρίζεται σε κατηγορίες ανάλογα με τις απαιτήσεις της ηλεκτρικής ισχύος. Για μεγάλα ποσά ισχύος, η κατηγορία αυτή αντιστοιχεί στον τομέα των «ισχυρών ρευμάτων» όπου στην αγγλική βιβλιογραφία είναι γνωστή με το όνομα «Power», ενώ για μικρά ποσά ισχύος η αντίστοιχη κατηγορία εμπίπτει στον τομέα των «ασθενών ρευμάτων» όπου επίσης στην ξένη βιβλιογραφία δίνονται εξειδικευμένα ονόματα όπως, electronics ,computer,communications, controls, κ.λ.π [26].

Μεγάλα ποσά ισχύος απαιτούνται επίσης και στην παραγωγή ,μεταφορά και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου και αυτά ανήκουν στον τομέα των ισχυρών ρευμάτων διότι αφορούν μεγάλα ποσά ηλεκτρικής ισχύος. Σε αυτόν τον τομέα έχει εισχωρήσει και ο κλάδος των «Υψηλών Τάσεων» όπου ασχολείται με την μελέτη των προβλημάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή της υψηλής τάσης σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις και εξοπλισμό, με τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλων αποστάσεων, αλλά είναι εξίσου χρήσιμος και σε πολλές καθημερινές εφαρμογές [26].

Δύο είναι οι βασικές κατηγορίες που προκύπτουν προς μελέτη, έρευνα και αντιμετώπιση σε αυτό τον τομέα και περιγράφονται στην συνέχεια.

Αρχική κατηγορία είναι οι ηλεκτρικές καταπονήσεις που κάνουν την εμφάνισή τους σε διάφορα σημεία μια εγκατάστασης με αποτέλεσμα να προκαλούν πολλά τεχνοοικονομικά προβλήματα. Επόμενη κατηγορία είναι η συμπεριφορά των υλικών με τα οποία έχουν κατασκευαστεί τα στοιχεία και τα μέρη μιας ηλεκτρικής εγκατάστασης. Τα υλικά υπάρχουν για λόγους μόνωσης και για λόγους αποφυγής καταστροφικών φαινομένων, όπως ηλεκτρικές υπερπηδησεις, ηλεκτρικές διατρήσεις στον εξοπλισμό, βαριά βραχυκυκλώματα και άλλα, τα οποία πέρα από υλικές καταστροφές προκαλούν οικονομικές επιβαρύνσεις [26].

Με βάση τις παραπάνω παρατηρήσεις είναι προφανής η ανάγκη για ανάπτυξη και χρήση διαφόρων ψηφιακών συστημάτων, όπως είναι και αυτό που θα παρουσιαστεί στην παρούσα διπλωματική εργασία. Στόχος τέτοιων συστημάτων είναι η ανίχνευση και η καταγραφή των ταχύτατα εμφανιζόμενων φαινομένων που προκύπτουν μέσα από την χρήση των υψηλών τάσεων, έτσι ώστε να περιορίζονται οι καταστροφές και οι αστοχίες. Επιπλέον η σωστή μέτρηση μπορεί άμεσα να οδηγήσει τελικά στη χρήση των κατάλληλων διατάξεων μέσα σε μια ηλεκτρική εγκατάσταση, καθώς επίσης και των κατάλληλων μονώσεων με τον οικονομικότερο δυνατό τρόπο, ώστε να προλαμβάνονται ανεπιθύμητες ηλεκτρικές υπερπηδησεις [26].

Για να επιτευχθούν λοιπόν τα παραπάνω, δηλαδή για να υπάρξει «διαβάθμιση των μονώσεων», χρειάζεται να υποβληθούν τα υλικά και ο εξοπλισμός σε συνεχόμενη μελέτη των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών, η οποία πραγματοποιείται σε εργαστήρια στα οποία υπόκεινται σε καταπονήσεις παρόμοιες ή και ισοδύναμες με αυτές που επρόκειτο να υποστούν κατά την κανονική λειτουργία τους [26].

Συμπερασματικά, με τον όρο «Υψηλή Τάση» (Υ.Τ.) θα μπορούσε να χαρακτηριστεί οποιαδήποτε τιμή τάσης, ικανή να θέσει σε κίνδυνο, τη διηλεκτρική αντοχή των μονώσεων, και να οδηγήσει σε φαινόμενα υπερπήδησης ή διάσπασης των μονωτικών διατάξεων [26].

### **3.3 Μορφές Υψηλών Τάσεων Δοκιμής**

Οι υψηλές τάσεις δοκιμής χωρίζονται στις πάρα κάτω μορφές [26]:

- Εναλλασσόμενες ημιτονοειδείς τάσεις, συχνότητας 50 Hz αλλά και υψηλής συχνότητας.
- Συνεχείς τάσεις, συνήθως προς την γη.
- Κρουστικές τάσεις

Ενδεικτικά αναφέρονται οι ελάχιστες αποστάσεις ασφαλείας μεταξύ ενεργών μεταλλικών στελεχών υπό υψηλή τάση και γειωμένων αντικειμένων [26]:

- 50cm/100kV για εναλλασσόμενες και συνεχείς τάσεις, αλλά κατ' ελάχιστον 50cm από τα ενεργά μέρη υπό υψηλή τάση.
- 0cm/100kV για κρουστικές τάσεις, αλλά κατ' ελάχιστον 50cm από τα ενεργά μέρη υπό υψηλή τάση.

### 3.4 Εναλλασσόμενη Υψηλή Τάση (HVAC)

#### 3.4.1 Εφαρμογές

Οι υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις απαιτούνται στα εργαστήρια υψηλών τάσεων, τόσο για πειραματισμούς και δοκιμές σε εναλλασσόμενη τάση, όσο και στις διατάξεις παραγωγής υψηλών συνεχών και κρουστικών τάσεων. Οι περισσότερες δοκιμές, ή πειραματισμοί με υψηλή εναλλασσόμενη τάση, απαιτούν ακριβή γνώση της τιμής της τάσεως [26].

Όπως προαναφέρθηκε, η εναλλασσόμενη υψηλή τάση χρησιμοποιείται κυρίως στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Αν  $U_\phi$  είναι η φασική τάση της γραμμής,  $I$  το ρεύμα ανά φάση,  $\phi$  η γωνία φάσεως και  $R$  η ωμική αντίσταση ανά φάση σε μία τριφασική γραμμή μεταφοράς, τότε η ενεργός ισχύς που μεταφέρεται από τη γραμμή είναι [26] :

$$P = 3 \cdot U_\phi \cdot I \cdot \cos \phi \quad (3,1)$$

Οι απώλειες ισχύος κατά μήκος της γραμμής λόγω του φαινομένου Joule, είναι:

$$P_j = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3,2)$$

Η σχέση (3,2), κατόπιν της (3,1), γράφεται:

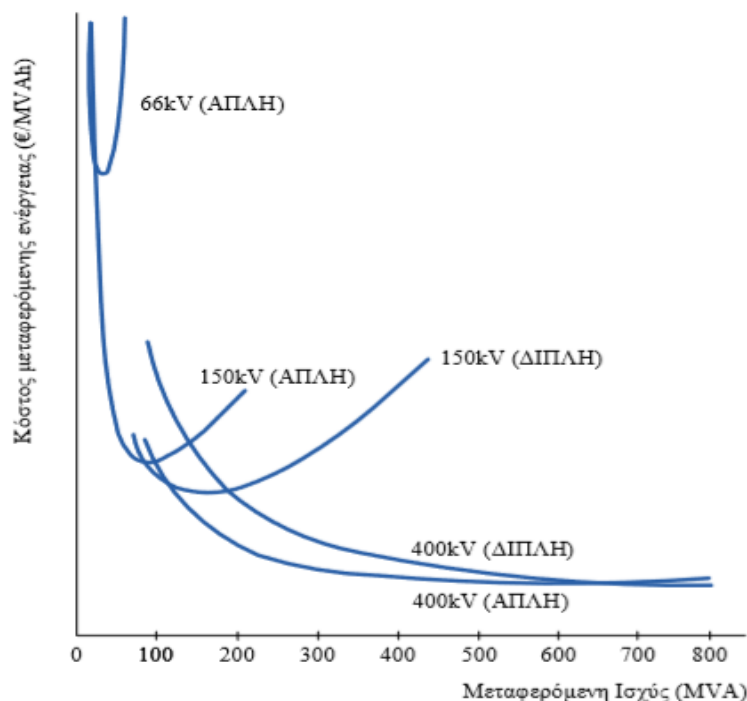
$$P_j = P^2 \frac{R}{3 \cdot U_\phi^2 \cdot \cos^2 \phi} \quad (3,3)$$

ή αλλιώς, αν  $r$  η ωμική αντίσταση/km της γραμμής και  $l$  το μήκος της γραμμής σε km, τότε η (3,3) γράφεται:

$$P_j = P^2 \frac{r \cdot l}{3 \cdot U_\phi^2 \cdot \cos^2 \phi} \quad (3,4)$$

Με βάση τις παραπάνω σχέσεις είναι προφανές ότι οι απώλειες ισχύος είναι ανάλογες προς την ωμική αντίσταση ανά φάση  $r$ , και αντιστρόφως ανάλογες προς το τετράγωνο της φασικής τάσεως της γραμμής  $U_\phi$ . Άρα όσο αυξάνεται η τάση της γραμμής τόσο μειώνονται οι απώλειες.

Λόγω των οικονομικών και λειτουργικών προτερημάτων που παρουσιάζει η υψηλή τάση στα δίκτυα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οδήγησαν την Υ.Τ. σε ταχεία ανάπτυξη. Στην Εικόνα 3-1 διακρίνεται το κόστος για την μεταφορά της ενέργειας ανά MVAh και 100km γραμμής, για τις διάφορες γραμμές μεταφοράς στο σύστημα μεταφοράς της Ελλάδας [26].



Εικόνα 3-1 Κόστος μεταφοράς σε διάφορα επίπεδα τάσης ως συνάρτηση της μεταφερόμενης ισχύος [26]  
© Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Πέρα από την οικονομική λειτουργία μιας γραμμής, μεγάλη σημασία έχει και η σωστή και ευσταθής λειτουργία της, η οποία εξαρτάται από την ικανότητα μεταφοράς ισχύος  $P_n$  της γραμμής. Η ικανότητα μεταφοράς ισχύος δίνεται από τον τύπο [26]:

$$P_n = \frac{U^2}{Z} \quad (3,5)$$

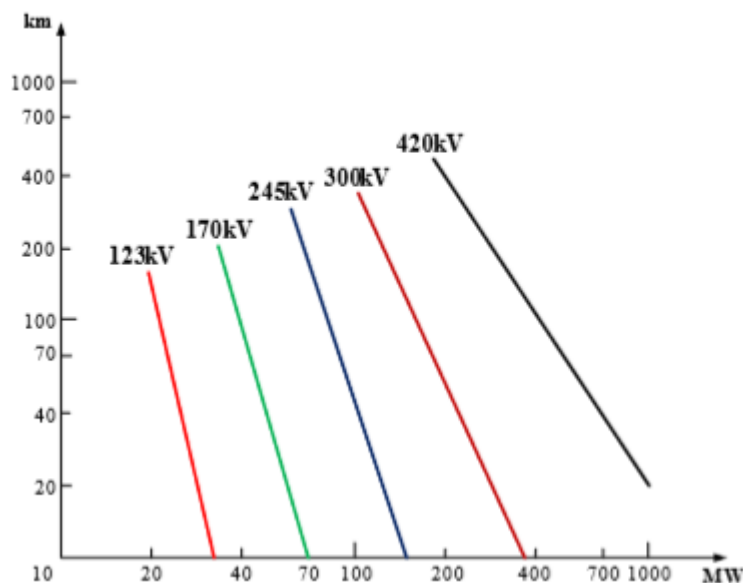
όπου  $Z$  η κυματική σύνθετη αντίσταση της γραμμής. Εδώ επίσης προκύπτει το συμπέρασμα της απαίτησης υψηλότερης τιμής τάσης για μεγαλύτερη μεταφερόμενη ισχύ [26].

Τα παραπάνω φαίνονται στο διάγραμμα της Εικόνα 3-2 με μορφή γραφήματος, στο οποίο φαίνεται το ποσό της μεταφερόμενης ισχύος σε συνάρτηση με την απόσταση μεταφοράς (μήκος γραμμής), για οικονομική μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις υπό υψηλή εναλλασσόμενη τάση [26].

Πέραν των προαναφερόμενων πλεονεκτημάτων (χαμηλών απωλειών ισχύος, αυξημένη ευστάθεια κ.ο.κ) που επιφέρει η αύξηση του επιπέδου τάσεως στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν και σημαντικά μειονεκτήματα όπως η αύξηση στο κόστος κατασκευής και συντήρησης του δικτύου μεταφοράς, λόγω του υψηλού κόστους του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται στις εγκαταστάσεις υψηλής τάσης [26].



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-2 Οικονομική τάση μεταφοράς HVAC ως συνάρτηση της ισχύος και της απόστασης [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Εκτός από την εφαρμογή της υψηλής εναλλασσόμενης τάσεως στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλές εναλλασσόμενες τάσεις (βιομηχανικής συχνότητας αλλά και πολύ χαμηλών συχνοτήτων) χρησιμοποιούνται επίσης και σε πολλές εφαρμογές όπως οι παρακάτω [26]:

1. Στον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής των μονωτικών ελαίων, με χρήση ειδικής συσκευής στην οποία τοποθετείται το δείγμα ελαίου και η οποία ανυψώνει την τάση με σταθερό και προκαθορισμένο από τα εφαρμοζόμενα πρότυπα, ρυθμό.
2. Στη μέτρηση του συντελεστή απωλειών μονωτικών υλικών.
3. Στην ανίχνευση και μέτρηση των μερικών εκκενώσεων σε μονωτικά υλικά.
4. Στον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ.
5. Στον έλεγχο και την ανίχνευση πιθανών σφαλμάτων και τραυματισμών της μόνωσης, των συνδέσεων και των ακροκιβωτίων των καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ., μετά την εγκατάστασή τους, ή στην επιβεβαίωση της ακεραιότητας των καλωδίων, με δοκιμή σε υψηλή εναλλασσόμενη τάση πολύ χαμηλής συχνότητας (VLF) της τάξεως του 0,1Hz .

Στην Εικόνα 3-3 εικονίζεται ως παράδειγμα η διάταξη δοκιμών υπό εναλλασσόμενη υψηλή τάση σε καλώδια Μ.Τ. και Υ.Τ. που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Ε.Μ.Π [26].

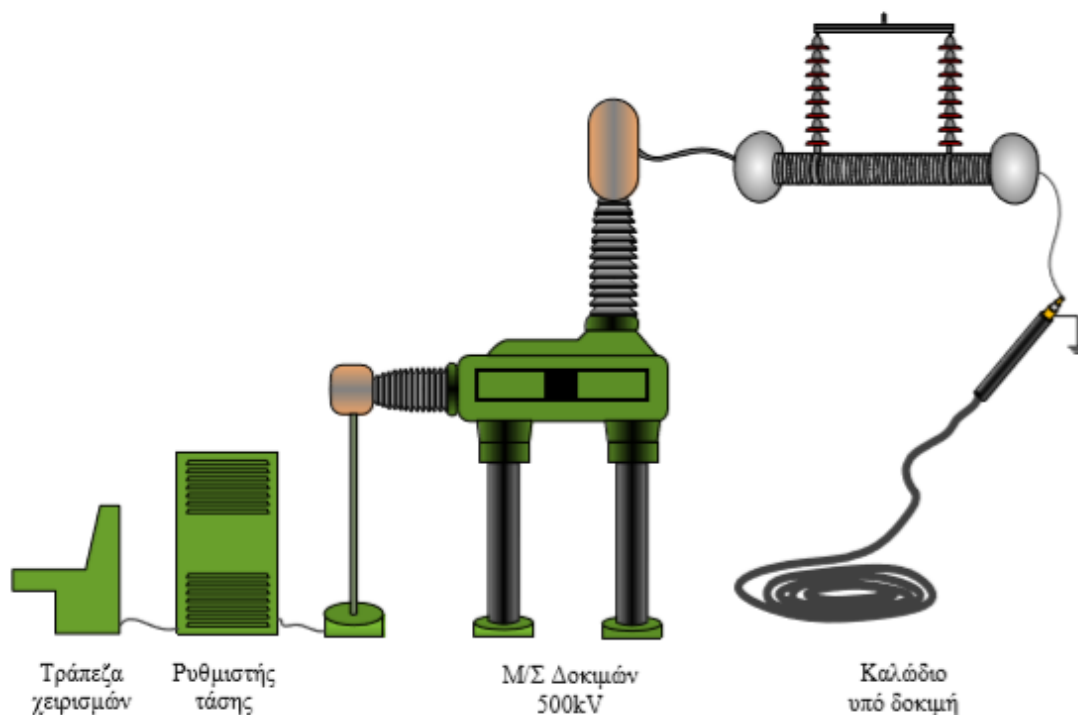
### 3.5 Συνεχής Υψηλή Τάση (HVDC)

Παρόλο που η εναλλασσόμενη υψηλή τάση είναι πρωταρχική στον τομέα της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως, δεν εγκαταλείφθηκε ποτέ η ιδέα της χρήσης συνεχούς υψηλής τάσης (Σ.Υ.Τ.) στα συστήματα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Βασικός λόγος που η εναλλασσόμενη τάση έχει προβάδισμα στην μεταφορά της ενέργειας έναντι της συνεχής τάσης είναι η ύπαρξη των επόμενων στοιχείων στα δίκτυα παραγωγής και μεταφοράς της Η.Ε. Κάποια από τα στοιχεία που απαιτούν



εναλλασσόμενη τάση είναι οι μετασχηματιστές, οι ατμοστροβίλοι (για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας), οι διακόπτες ισχύος κ.ο.κ [26].

Υπάρχουν όμως και εφαρμογές όπου η Σ.Υ.Τ παρέχει μία πολύ καλή εναλλακτική λύση για μαζική μεταφορά τεράστιας ποσότητας ισχύος. Εφαρμογές όπως, η μεταφορά με Σ.Υ.Τ. από εναέριες γραμμές, υποθαλάσσια καλώδια και από εγκαταστάσεις τύπου πλάτη-με-πλάτη (back-to-back). Η χρήση Σ.Υ.Τ. στις γραμμές μεταφοράς επιτρέπει τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις, και αυτό γιατί είναι πιο οικονομικές στην κατασκευή, δεν αναπτύσσονται χωρητικά ρεύματα, εμφανίζουν μικρότερες πτώσεις τάσεως και μικρότερες απώλειες ισχύος [26].



Εικόνα 3-3 Διάταξη δοκιμών καλωδίων Μ.Τ και Υ.Τ. στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων Ε.Μ.Π [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

### 3.6 Τα πλεονεκτήματα της Συνεχής Υψηλής τάση.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται κάποια βασικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η Σ.Υ.Τ έναντι της Ε.Υ.Τ., στη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας[26]:

1. Πιο οικονομικές ως προς το κόστος κατασκευής των εναέριων γραμμών λόγω μικρότερου πλήθους αγωγών.
2. Λιγότερες απώλειες ενέργειας.
3. Μια γραμμή DC είναι πιο εύκολη ως προς την μεταφορά και την εγκατάσταση της έναντι μιας αντίστοιχης της Α.С.
4. Επειδή στο συνεχές ρεύμα δεν υφίστανται τα μεγέθη της αυτεπαγωγής και της χωρητικότητας, η μεταφορά υπό συνεχή υψηλή τάση ενδείκνυται για πολύ μεγάλες αποστάσεις, χωρίς ενδιάμεσες λήψεις και ενδιάμεσους σταθμούς διασύνδεσης .
5. Δεν υπάρχουν ενδιάμεσοι σταθμοί διασύνδεσης με διατάξεις αντιστάθμισης ισχύος.

6. Εξαιτίας της μεγάλης χωρητικότητας προς γη που παρουσιάζουν τα καλώδια υψηλής τάσης, προκαλείται επικίνδυνη ανύψωση της τάσης κατά μήκος του καλωδίου και στην άφιξή του. Το φαινόμενο είναι ιδιαίτερο στα υποθαλάσσια καλώδια μεγάλων αποστάσεων λόγω της πολύ ενισχυμένης μόνωσής τους. Έτσι γίνεται αναγκαία η μεταφορά με Σ.Υ.Τ. Χαρακτηριστικό παράδειγμα στον ελλαδικό χώρο αποτελεί η διασύνδεση Ελλάδας – Ιταλίας με υποβρύχιο καλώδιο 400kV DC.
7. Μια DC σύνδεση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ευστάθειας των AC συστημάτων.
8. Αύξηση της ικανότητας μεταφοράς ισχύος και βελτίωση της αξιοποίησης του συστήματος μεταφοράς, με την ανάπτυξη των ευέλικτων συστημάτων μεταφοράς (Flexible AC Transmission Systems-FACTS) τα οποία στηρίζονται σε πρόσφατα αναπτυσσόμενα ηλεκτρονικά στοιχεία υψηλής ισχύος όπως είναι τα «GTOs» και τα «IGBTs». Αυτές οι διατάξεις λειτουργούν υπό συνεχή υψηλή τάση, βελτιώνοντας και κάνοντας πιο άμεσο τον έλεγχο της τάσης και της ισχύος του συστήματος μεταφοράς [26].

Από την άλλη οι Σ.Υ.Τ. παρουσιάζουν και μειονεκτήματα στη χρήση τους για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία αφορούν κυρίως τη μετατροπή και τα διακοπτικά στοιχεία όπως [26]:

1. Το κόστος και οι απώλειες στα διακοπτικά στοιχεία και στους τερματικούς σταθμούς των γραμμών DC είναι υψηλότερο από τα αντίστοιχα στο AC.
2. Η μετατροπή της εναλλασσόμενης σε συνεχή τάση και το αντίστροφο, συνοδεύονται από ένα όριο υπερφόρτισης.
3. Για μικρές και μεσαίες αποστάσεις μεταφοράς, οι απώλειες στους μετατροπείς ισχύος στο DC είναι αρκετά μεγαλύτερες απ' ό τι σε μία γραμμή A.C.
4. Υπάρχει μεγάλη δυσκολία στον σχεδιασμό και στην κατασκευή διακοπών ισχύος Σ.Υ.Τ., λόγω των εξαιρετικά μεγάλων τόξων που δημιουργούνται σε αυτούς κατά τους χειρισμούς ζεύξης και απόζευξης.

Παρά την ύπαρξη των παραπάνω μειονεκτημάτων, και μέσω της αλματώδους εξέλιξης της τεχνολογίας των υλικών και των διατάξεων των υψηλών τάσεων, οι δυσκολίες αυτές υπερνικούνται και το αποτέλεσμα είναι η κατασκευή και η παρουσία υπερυψηλής DC τάσης σε γραμμές τεραστίων αποστάσεων στη σύγχρονη ιστορία των γραμμών μεταφοράς [26].

Εκτός από την εφαρμογή τους στις γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι Σ.Υ.Τ βρίσκουν εφαρμογή και σε άλλους τομείς της σύγχρονης τεχνολογίας, όπως [26]:

- Στις δοκιμές καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ για τη μέτρηση της αντίστασης του εξωτερικού μανδύα των καλωδίων .
- Στη δοκιμή διαφόρων μονωτικών υλικών.
- Στα ηλεκτροστατικά φίλτρα.
- Στις ηλεκτροστατικές βαφές.
- Στην παραγωγή ακτινών X

### 3.7 Κρουστική Υψηλή Τάση (High Impulse Voltage)

Μια τρίτη μορφή υψηλής τάσης η οποία παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στον τομέα των υψηλών τάσεων και ιδιαίτερα στις δοκιμές ηλεκτροτεχνικού εξοπλισμού και μονωτικών υλικών είναι η κρουστική τάση.

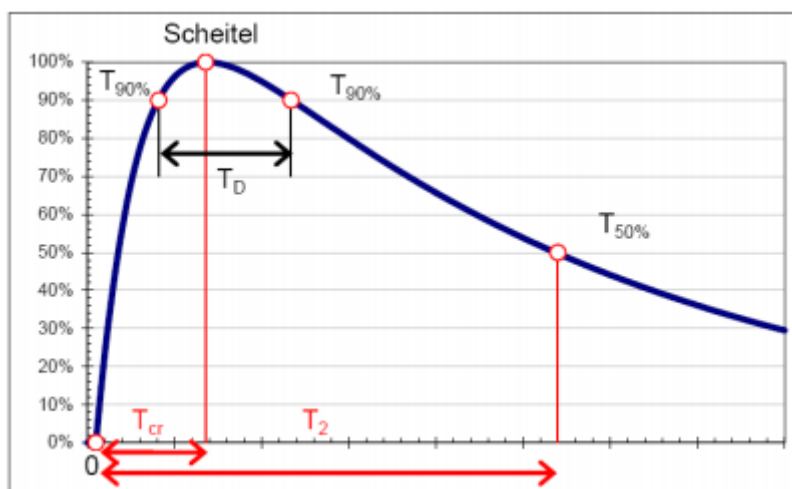
Ένας συνοπτικός ορισμός της κρουστικής τάσης θα μπορούσε να είναι ο επόμενος. «Όποια τάση είναι μονόφορη και μικρής διάρκειας χαρακτηρίζεται σαν «κρουστική τάση» [25].

Αυτή η τάση συναντάται κυρίως στα εργαστήρια δοκιμών, όπου εκεί η κρουστική τάση παράγεται με κρουστικές γεννήτριες, και μέσω της μελέτης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων της γίνεται κατανοητή [25].

#### 3.7.1 Ορισμοί και χαρακτηριστικά επί των κρουστικών τάσεων

Σύμφωνα με την θεωρία, κρούση θεωρείται κάθε απεριοδικός μεταβατικός παλμός τάσης ή ρεύματος που επιβάλλεται σκοπίμως, ο οποίος συνήθως αυξάνει γρήγορα μέχρι ένα μέγιστο, και κατόπιν φθίνει με βραδύτερο ρυθμό προς τη μηδενική τιμή [27].

Βασικό χαρακτηριστικό στοιχείο για την αναγνώριση μιας κρουστικής τάσης είναι η χαρακτηριστική μορφή της η οποία φαίνεται στην Εικόνα 3-4 και στην οποία διακρίνονται δυο περιοχές, το μέτωπο και η ουρά. Έτσι, προκύπτει η διαμόρφωση του μετώπου της τάσης αυτής όταν αυξάνεται ταχύτατα από την μηδενική της τιμή μέχρι ενός μεγίστου, και όταν η τάση μειώνεται διαμορφώνεται η ουρά της. Πιο αναλυτικά τα στοιχεία αυτά θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες [25].



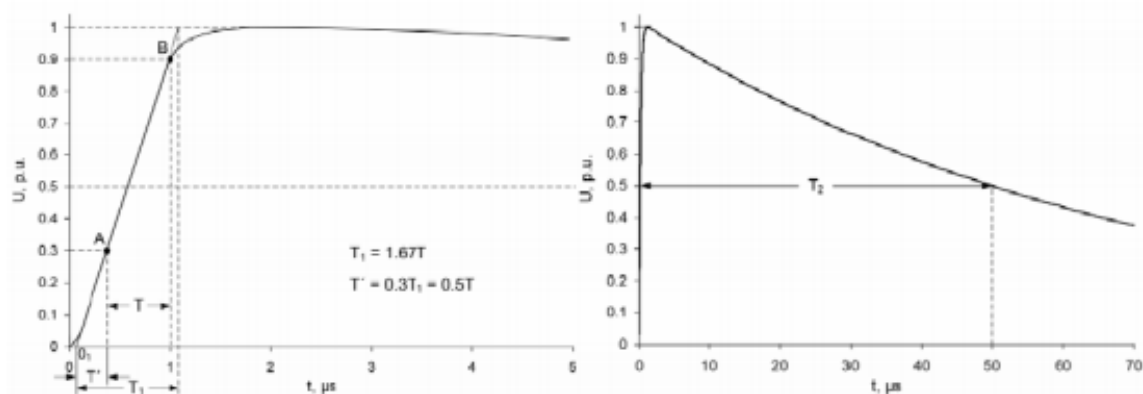
Εικόνα 3-4 Εσωτερική κρουστική υψηλή τάση (SI), χαρακτηριστικές παράμετροι [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Ως κρουστική τάση, λοιπόν, χαρακτηρίζεται ένας μοναδιαίος και ενιαίος πολικότητας παλμός τάσης. Η κρουστική τάση επειδή έχει αυτά τα δύο βασικά χαρακτηριστικά, δηλαδή το μέτωπο και την ουρά, χαρακτηρίζεται από το λόγο  $T_m / T_t$  (χρόνος μετώπου/χρόνος ουράς), και συνήθως δίνεται σε ( $\mu s$ ). Συνήθεις μορφές κρουστικών τάσεων είναι 1,2/5-1,2/50-1,2/200. Και στις τρεις περιπτώσεις η διάρκεια μετώπου είναι 1,2  $\mu s$ , ενώ η διάρκεια ημίσεως εύρους είναι αντίστοιχα 5, 50 και 200  $\mu s$  [26].

Στην Εικόνα 3-5, φαίνονται η διάρκεια του μετώπου μιας κρουστικής τάσης, καθώς και το διάστημα μεταξύ των χρονικών στιγμών που αντιστοιχούν στο 30% και 90% της τιμής της τάσης κορυφής [27].

Αντίστοιχα, ο χρόνος ημίσεως εύρους είναι το χρονικό διάστημα από την αρχή των χρόνων μέχρι τη χρονική στιγμή που η τάση έχει μειωθεί στο 50% της τιμής της τάσης κορυφής. Η τάση κορυφής είναι εύκολα εμφανής όταν γύρω της δεν υπάρχουν ταλαντώσεις ή υπερψώσεις [27].

Οι κρουστικές τάσεις χρησιμοποιούνται κατά τη διεξαγωγή τεχνικών δοκιμών υψηλών τάσεων, με στόχο την προσομοίωση των διηλεκτρικών καταπονήσεων που υφίστανται οι εγκατεστημένες στα ηλεκτρικά δίκτυα διατάξεις και στοιχεία, κατά την ανάπτυξη επί των δικτύων εσωτερικών και εξωτερικών υπερτάσεων, καθώς επίσης και κατά τη βασική έρευνα που αφορά στη μελέτη της διασπάσεως των μονωτικών υλικών [26].



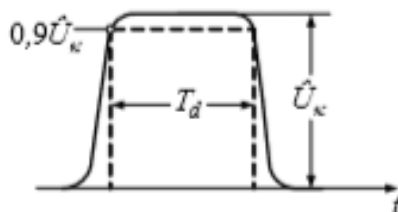
Εικόνα 3-5 Εξωτερικές κρουστικές υψηλές τάσεις, με τάση κορυφής  $U_p$ , διάρκεια μετώπου  $T_1$  και τη διάρκεια ημίσεως εύρους  $T_2$  [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

### 3.7.2 Βασικές Κατηγορίες Κρουστικών Τάσεων

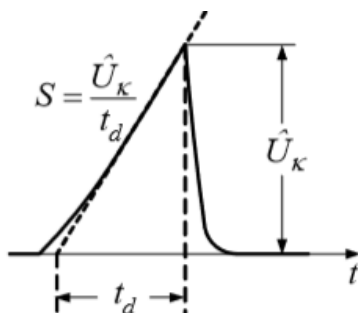
Οι κρουστικές τάσεις διακρίνονται σε δύο μεγάλες βασικές κατηγορίες, τις εξωτερικές και τις εσωτερικές κρουστικές τάσεις. Στη συνέχεια ακολουθούν οι υπερτάσεις από υπερπηδήσεις, και κατηγορίες ανάλογα με το σχήμα της κυματομορφής τους [26]:

1. Εξωτερικές κρουστικές τάσεις μικρής διάρκειας ή απλώς κεραυνικές τάσεις (lightning impulses): Οι εξωτερικές κρουστικές τάσεις προκαλούνται από πλήγματα κεραυνών πάνω στις εναέριες γραμμές μεταφοράς και διανομής Η.Ε, στους ζυγούς των υπαίθριων υποσταθμών, ή ακόμα και στο έδαφος. Τα πλάτη των κεραυνικών τάσεων, οι οποίες μεταδίδονται υπό τη μορφή οδοντών κυμάτων πάνω στις γραμμές, μπορούν να λάβουν τιμή άνω των 1000kV, ενώ η μέγιστη τιμή έντασης των κεραυνικών ρευμάτων λαμβάνει συνήθως τιμές μεταξύ 100kA και 300kA.
2. Εσωτερικές κρουστικές τάσεις μεγάλης διάρκειας ή διακοπτικές κρουστικές τάσεις (switching impulses): Αυτές προκαλούνται από διακοπτικά φαινόμενα και κυρίως κατά τους χειρισμούς ζεύξεως και αποζεύξεως στους διακόπτες ισχύος του συστήματος. Τα πλάτη τους σχετίζονται πάντα με την τάση λειτουργίας, και η μορφή τους διαμορφώνεται ανάλογα με τις αντιστάσεις του συστήματος, αλλά και από τον τρόπο διακοπής τους.

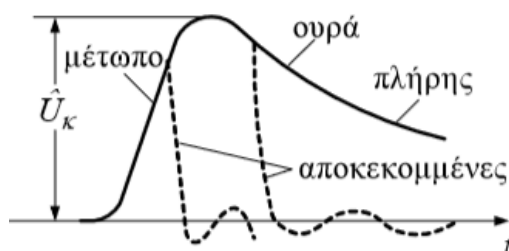
3. Υπερτάσεις από υπερπηδήσεις: Οι υπερτάσεις αυτές εμφανίζονται κατά τη διάσπαση των μονώσεων ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσης, οπότε το κύκλωμα με τη χαμηλότερη τάση τίθεται ξαφνικά υπό τάση υψηλότερη από την τάση λειτουργίας του. Τέτοιες υπερτάσεις εμφανίζονται κυρίως στους μετασχηματιστές.
4. Κρουστικές τάσεις, ανάλογα με την κυματομορφή τους: Έτσι λοιπόν διακρίνονται σε ορθογωνικές, σφηνοειδείς και διπλοεκθετικές (Εικόνα 3-6, Εικόνα 3-7 και Εικόνα 3-8) με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:
  - Για τις ορθογωνικές υπάρχει ο χρόνος  $T_d$  κατά τον οποίο έχουν τιμή μεγαλύτερη του  $90\% \cdot U_K$
  - Οι σφηνοειδείς έχουν τη διάρκεια ανόδου  $t_d$  και την κλίση μετώπου  $S$
  - Οι διπλοεκθετικές έχουν ως χαρακτηριστικό τον χρόνο μετώπου  $T1$  (ή  $T_m$ ) και τον χρόνο ημίσεως εύρους  $T2$  (ή  $T_n$ ).
  - Τέλος, όλες μαζί έχουν σαν χαρακτηριστικό μέγεθός τους την τιμή κορυφής  $U_K$



Εικόνα 3-6 Ορθογωνική μορφή κρουστικής τάσεως [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία



Εικόνα 3-7 Σφηνοειδής μορφή κρουστικής τάσεως [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία



Εικόνα 3-8 Διπλοεκθετική μορφή κρουστικής τάσεως [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Οι δύο πρώτες μορφές κρουστικών τάσεων χρησιμοποιούνται σε εργασίες έρευνας, ενώ για τη διεξαγωγή δοκιμών (προσομοιώνοντας τις υπερτάσεις από τους κεραυνούς και από τους διάφορους χειρισμούς ζεύξης και απόξευξης σε ένα δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας) χρησιμοποιούνται προτυποποιημένες διπλοεκθετικές κρουστικές τάσεις, μικρής ή μεγάλης διάρκειας [26].

### 3.7.3 Πηγές κρουστικών τάσεων

Οι πηγές των κρουστικών τάσεων μπορεί να είναι είτε φυσικές ή τεχνητές. Έτσι κατηγοριοποιούνται ως εξής [28]:

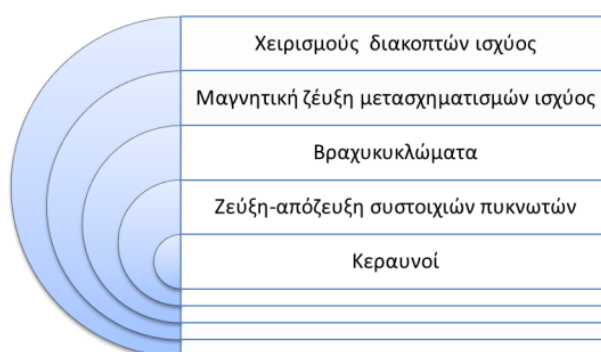
Φυσικές πηγές κρουστικών υπερτάσεων:

- Κεραυνοί
- Αστραπές
- Ηλεκτροστατικές εκφορτίσεις

Τεχνητές πηγές κρουστικών υπερτάσεων:

- Χειρισμοί διακοπών
- Βραχυκυκλώματα
- Έναυση ημιαγωγικών στοιχείων όπως για παράδειγμα των thiristors

Τα αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων φαίνονται στην Εικόνα 3-9.



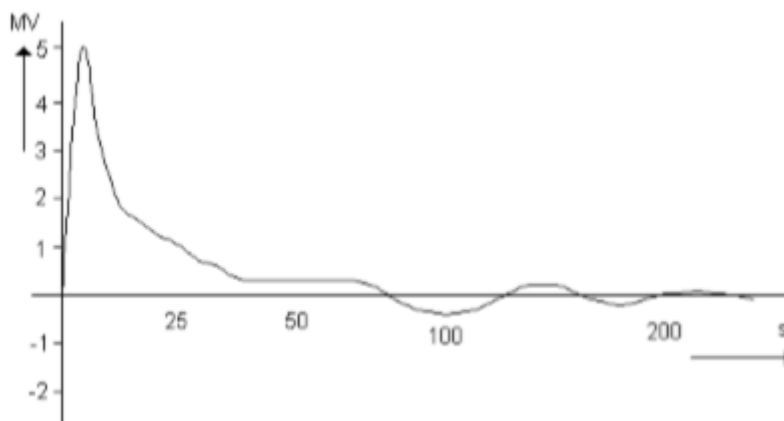
Εικόνα 3-9 Αίτια δημιουργίας κρουστικών υπερτάσεων [28]© Παρουσίαση και Ταξινόμηση Μεταβατικών Φαινομένων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. καβάλας/Παπαναστασίου Γεώργιος, Πασχάλης Γεώργιος

### 3.7.4 Διπλοεκθετική κρουστική τάση

Κατά τις πτώσεις κεραυνών στις εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ή στο έδαφος πλησίον αυτών, αναπτύσσονται πάνω στους αγωγούς υπερτάσεις που η μορφή τους μοιάζει με την τυποποιημένη μορφή που παράγεται από γεννήτριες κρουστικών τάσεων όπως φαίνεται στην εικόνα 3.10.2. Το παλμογράφημα της συγκεκριμένης εικόνας είναι αποτέλεσμα μέτρησης σε γραμμή μεταφοράς [25].

Οι τάσεις από κεραυνούς είναι σχεδόν πάντοτε επικίνδυνες γιατί υπερβαίνουν, όταν δεν λαμβάνονται κατάλληλα μέτρα προστασίας, την αντοχή των μονώσεων των γραμμών και των εγκαταστάσεων [25].

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



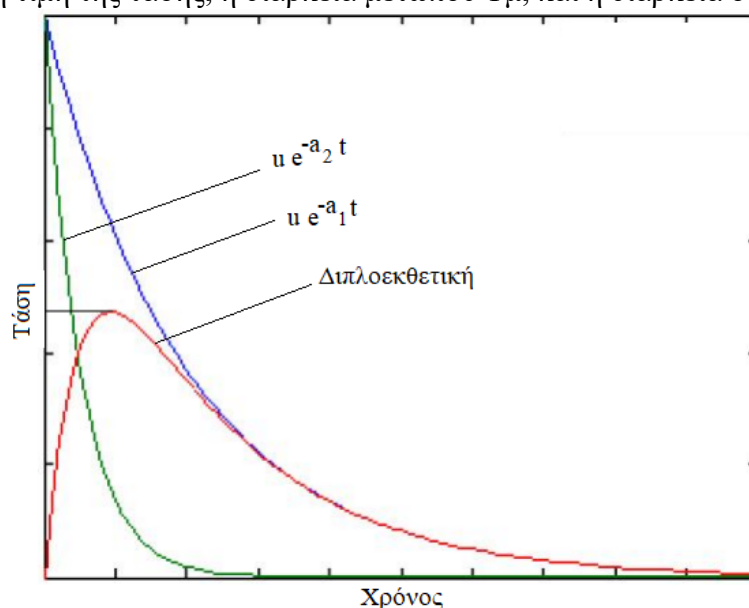
Εικόνα 3-10 Παλμογράφημα υπερτάσεως σε γραμμή μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρησή τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Οι κρουστικές τάσεις μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά σαν διαφορά εκθετικών συναρτήσεων Η μορφή μιας διπλοεκθετικής τάσης , παριστάνεται στην Εικόνα 3-11 και έχει την ακόλουθη μαθηματική έκφραση

$$V = V(t) = U \cdot (e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) \quad (3,6)$$

Όπου το  $U$  έχει διαστάσεις τάσεως και οι συντελεστές  $a_1, a_2$  είναι πραγματικοί αριθμοί.

Οι παράμετροι μιας δικπλοεκθετικής κρουστικής τάσης είναι το εύρος  $U$  το οποίο είναι η μέγιστη τιμή της τάσης, η διάρκεια μετώπου  $T_m$ , και η διάρκεια ουράς  $T_h$  [29].



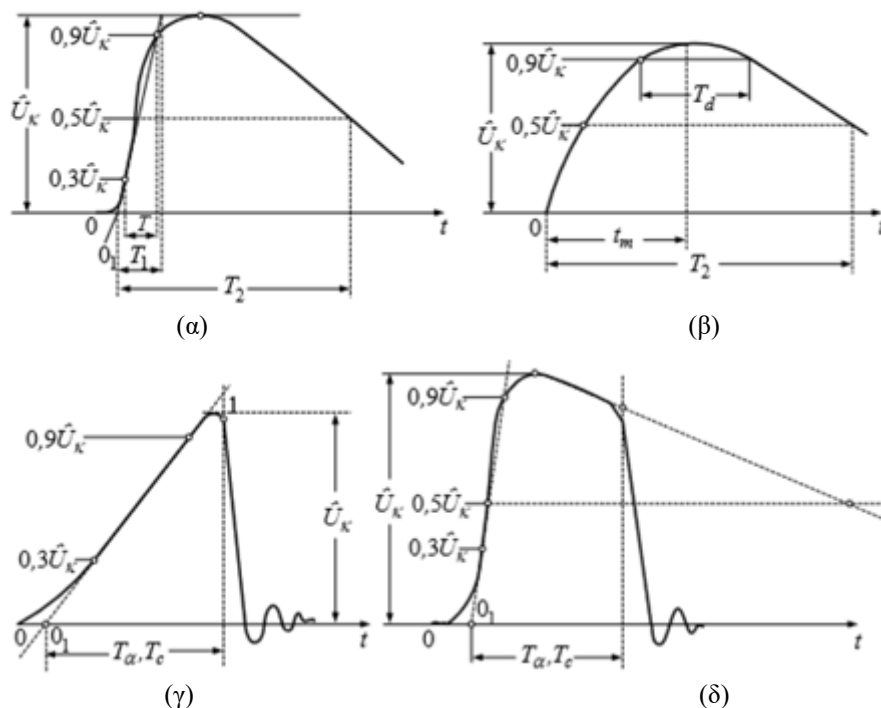
Εικόνα 3-11 Διπλοεκθετική κρουστική τάση [29]

### 3.7.5 Πλήρεις και αποκεκομμένες τάσεις.

Όταν κατά την επιβολή μιας κρουστικής τάσης σε ένα δοκίμιο συμβεί διάσπαση στο δοκίμιο που είναι συνδεδεμένο στην κρουστική γεννήτρια, ή στο κύκλωμα υψηλής τάσης, τότε εμφανίζεται απότομος μηδενισμός της τάσης, δηλαδή αποκεκομμένη τάση, ο οποίος συνεπάγεται την εμφάνιση ταλάντωσης της τάσης [26].

Εξαιτίας των αναπόφευκτων ταλαντώσεων που εμφανίζονται στην αρχή των κρουστικών τάσεων μικρής διάρκειας, είναι δύσκολος ο υπολογισμός των χρόνων, έτσι

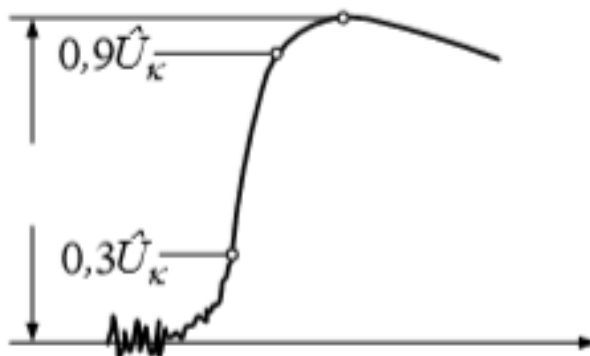
έχει προσδιοριστεί για τον ορισμό του χρόνου μετώπου  $T_m$  να λαμβάνονται υπ' όψιν τα σημεία του μετώπου που βρίσκονται στο 30% και στο 90% της τιμής κορυφής [26].



Εικόνα 3-12 Καθορισμός ονομαστικών μεγεθών διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων: α) Κρουστική τάση μικρής διάρκειας, β) Κρουστική τάση μεγάλης διάρκειας, γ) Αποκεκομμένη στο μέτωπο κρουστική τάση μικρής διάρκειας, δ) Αποκεκομμένη στην ουρά κρουστική τάση μικρής διάρκειας [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Στην Εικόνα 3-12 φαίνονται τα βασικά χαρακτηριστικά των διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων. Στην περίπτωση αποκεκομμένων κρουστικών τάσεων (εικόνα 4.12γ και εικόνα 4.12δ) ως  $T_a$  και  $T_c$  ορίζονται ο χρόνος αποκοπής στις περιπτώσεις διάσπασης στο κύκλωμα υψηλής τάσης [26].

Οι υψίσυχνες ταλαντώσεις που εμφανίζονται στην αρχή μιας διπλοεκθετικής κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-13 δεν επιτρέπεται να υπερβαίνουν το 5% της μέγιστης τιμής  $U_k$  [26].



Εικόνα 3-13 Μέτωπο κρουστικής τάσης μικρής διάρκειας όπου φαίνονται οι ταλαντώσεις στην αρχή της [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία



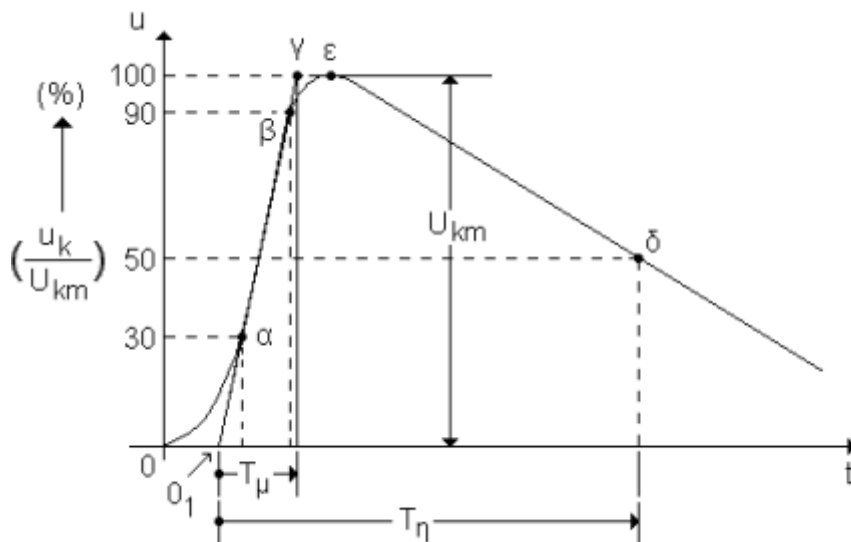
### 3.7.6 Κρουστική τάση της μορφής 1,2/50μs

Συνήθως, όπως έχει αναφερθεί για τις ατμοσφαιρικές υπερτάσεις και τις υπερτάσεις χειρισμών, χρησιμοποιείται στα εργαστήρια η κρουστική τάση της μορφής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-14, η οποία παράγεται από κρουστικές γεννήτριες. Αυτές είναι μικρής διάρκειας (κεραυνικές) κρουστικές τάσεις, χρόνου διάρκειας μετώπου  $T_{\mu}=1,2\mu s$  και χρόνου ημίσεος εύρους  $T_{\eta}=50\mu s$ , και χαρακτηρίζονται ως κρουστικές τάσεις μορφής 1,2/50μs.

Για τις συγκεκριμένες κρουστικές υπερτάσεις σε εν κενώ λειτουργία της γεννήτριας κρουστικών τάσεων, ισχύει από την βιβλιογραφία ότι έχουν επιτρεπτές ανοχές  $\pm 30\%$  στον χρόνο μετώπου και  $\pm 20\%$  στον χρόνο ημίσεος εύρους, και διάρκειας ουράς  $T_o=50\mu s$  [26].

Οι κρουστικές τάσεις, της μορφής 1,2/50μs, βρίσκουν εφαρμογή σε πλήθος εργαστηριακών δοκιμών μέσω κρουστικής καταπόνησης, όπως για παράδειγμα [26]:

- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών υλικών, όπως έλαια .
- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης και των ακροκιβωτίων καλωδίων Μ.Τ. και Υ.Τ.
- Για τον έλεγχο της διηλεκτρικής αντοχής των μετασχηματιστών (Μ/Σ) μέτρησης, καθώς και σε πολλές άλλες δοκιμές.



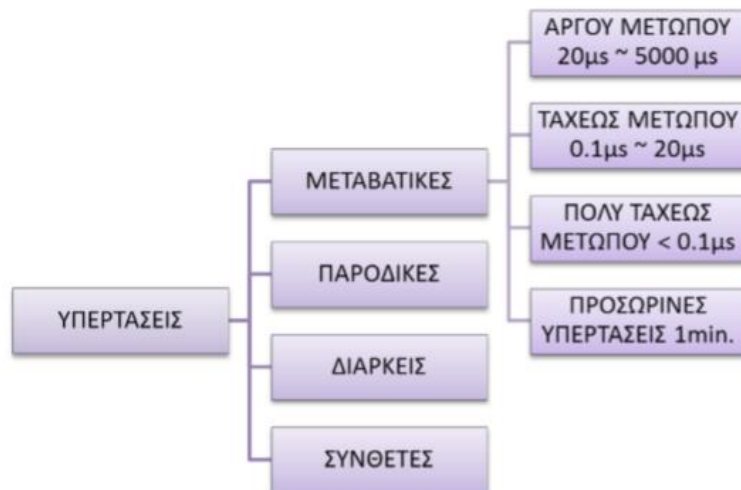
Εικόνα 3-14 Κρουστική κεραυνική τάση τύπου 1,2/50 [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Αξίζει να σημειωθεί ότι η διάρκεια της κρουστικής τάσης καθορίζεται από την ουρά της, αλλά μέχρι ένα σημείο, διότι ο χρόνος ουράς ξεκινάει από την αρχή της τάσης διάσπασης έως το μισό της μέγιστης τιμής της, δηλαδή το μισό εύρος της τάσης. Τέλος να σημειωθεί ότι ο χρόνος μετώπου είναι πολύ πιο μικρός από το χρόνο ουράς [25].

### 3.7.7 Τυποποιημένες κρουστικές διπλοεκθετικές τάσεις

Στον Πίνακα 1 φαίνεται ο τρόπος προσδιορισμού των χρόνων που αναλύθηκαν παραπάνω, σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC και VDE. Για τις διάρκειες  $T_{\mu}$  και  $T_{\eta}$  οι κανονισμοί προβλέπουν ορισμένες τιμές οι οποίες δίνονται σε μs και γράφονται υπό την μορφή του λόγου  $T_{\mu}/T_{\eta}$  [25].

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-15 Κατηγορίες υπερτάσεων ανάλογα με την διάρκεια [28] © Παρουσίαση και Ταξινόμηση Μεταβατικών Φαινομένων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. καβάλας/ Παπαναστασίου Γεώργιος, Πασχάλης Γεώργιος

Είδος	Κυματομορφή	Εύρος χρόνου ή συχνότητα	Διάρκεια
Χαμηλής Συχνότητας	Συνεχείς	$f=50 \text{ Hz or } 60 \text{ Hz}$	$T_1 \geq 3600\text{s}$
	Παροδικές	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$	$3600 \text{ s} \geq T_1 \geq 0.03 \text{ s}$
Μεταβατικές	Αργού μετώπου	$5000 \mu\text{s} \geq T_p \geq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	
	Γρήγορου μετώπου	$20 \mu\text{s} \geq T_1 \geq 0,1 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	
	Πολύ γρήγορου μετώπου	$100 \text{ ns} \geq T_1 \geq 3 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$	$T_1 \leq 3\text{ms}$

Εικόνα 3-16 Κατάταξη των υπερτάσεων κατά IEC [28] © Παρουσίαση και Ταξινόμηση Μεταβατικών Φαινομένων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Τ.Ε.Ι. καβάλας, Παπαναστασίου Γεώργιος, Πασχάλης Γεώργιος

Για δοκιμές σε έτοιμες κατασκευές (μετασχηματιστές, διακόπτες κ.τ.λ.) απαιτούνται τάσεις δοκιμής που πολλές φορές υπερβαίνουν και τα 2000 KV. Ερευνητικές όμως

δοκιμές σε απλά δοκίμια από μονωτικά υλικά, διεξάγονται συνήθως με τάση τιμών από 10 μέχρι 100 KV [25].

$\frac{T\mu}{T\eta}$	1,2/5	1,2/50	1,2/200
$\frac{1}{\kappa}$	1,49	2,96	3,15
$\frac{1}{\xi}$	1,44	0,73	0,70

Πίνακας 1 Ο τρόπος προσδιορισμού των χρόνων  $T\mu$  και  $T\eta$  σύμφωνα με τους κανονισμούς IEC και VDE [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Οι υπερτάσεις μπορούν να διακριθούν ανάλογα με την διάρκεια και το σχήμα κυματομορφής τους στις πάρα κάτω κατηγορίες όπως φαίνεται στις εικόνες Εικόνα 3-15 και Εικόνα 3-16.

### 3.8 Τρόποι Παραγωγής και μέτρησης Υψηλών Τάσεων

Οι πιο συνηθισμένοι τρόποι για την παραγωγή εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων στα εργαστήρια δοκιμών είναι οι μετασχηματιστές, ενώ για την παραγωγή κρουστικών υψηλών τάσεων είναι οι κρουστικές γεννήτριες τύπου Marx. Τέλος, για την παραγωγή συνεχών υψηλών τάσεων χρησιμοποιούνται ανορθωτές πολλών βαθμίδων με ξηρά ανορθωτικά στοιχεία. Στο παρελθόν, σε χρήση ήταν οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες, η συνηθέστερη από τις οποίες είναι η γεννήτρια Van-de-Graaf. Σήμερα η χρήση των γεννητριών αυτών σπανίζει [26].

#### 3.8.1 Παραγωγή και μέτρηση Εναλλασσόμενων Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο

Είναι φανερό ότι υπάρχουν διαφορές στην παραγωγή εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων (E.Y.T.) στα εργαστήρια υψηλών τάσεων, διότι η παραγωγή γίνεται με διαφορετικά κριτήρια και σκοπούς, άρα και προδιαγραφές, απ' ότι στα συστήματα παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας [26].

Στα εργαστήρια, η παραγωγή E.Y.T. αποτελεί ύψιστη προτεραιότητα και μέλημα του προσωπικού των εργαστηρίων, αφού η συγκεκριμένη μορφή τάσης δε χρησιμοποιείται μόνο για τη διεξαγωγή δοκιμών, αλλά αποτελεί και μέρος στα πρώτα στάδια παραγωγής άλλων μορφών υψηλής τάσης, όπως η συνεχής και η κρουστική, μιας και η E.Y.T είναι πάντοτε η τάση εισόδου στις διατάξεις παραγωγής συνεχών και κρουστικών υψηλών τάσεων [26].

Ο ορισμός της ενεργού τιμής της εναλλασσόμενης τάσεως είναι

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (3,7)$$

και στην περίπτωση που η τάση είναι καθαρά ημιτονοειδής, η εξίσωση (3,7) δίνει:

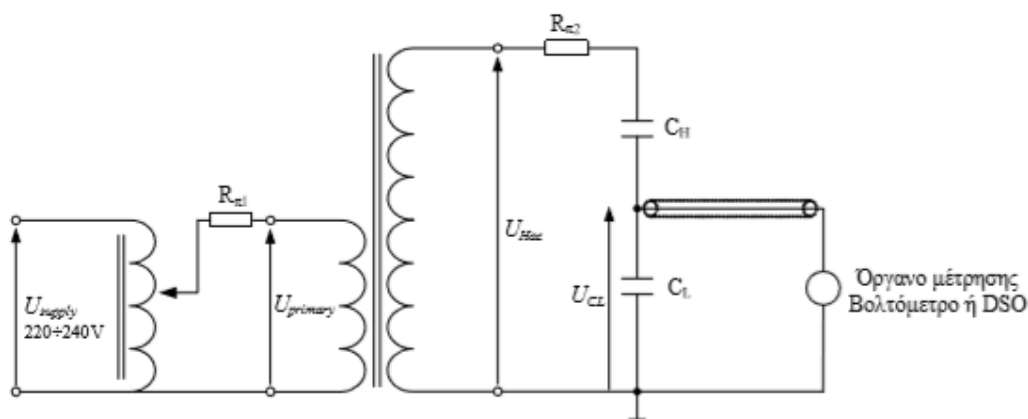
$$U = \frac{U_{peak}}{\sqrt{2}} \quad (3,8)$$

Η ονομαστική τιμή της τάσης δοκιμής ορίζεται από τη σχέση (3,8). Μια ημιτονοειδής εναλλασσόμενη υψηλή τάση, συνήθως βιομηχανικής συχνότητας, που παράγεται εντός εργαστηρίου υψηλών τάσεων, προκειμένου να γίνει αποδεκτή για δοκιμές, θα πρέπει να πληροί τις προδιαγραφές κατά IEC, μία εκ των οποίων είναι η τιμή του πλάτους  $U_m$  να μην υπερβαίνει το  $\pm 5\%$  του γινομένου  $\sqrt{2} \cdot U_m$ . Επίσης, η αρμονική παραμόρφωση και η ενεργός τιμή των αρμονικών συνιστωσών να μην υπερβαίνει το  $\pm 5\%$  της ενεργού τιμής της θεμελιώδους [26].

Για την παραγωγή, αλλά και τη μέτρηση, εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων στο εργαστήριο, χρησιμοποιείται το κύκλωμα της Εικόνα 3-17. Αποτελείται από τους πυκνωτές  $C_H$  και  $C_L$  οι οποίοι είναι οι χωρητικότητες υψηλής και χαμηλής τάσης, αντίστοιχα, του χωρητικού καταμεριστή, από τις αντιστάσεις  $R_{\pi 1}$  και  $R_{\pi 2}$  οι οποίες είναι αντιστάσεις προστασίας, και τέλος από το όργανο μέτρησης (βολτόμετρο ή ψηφιακός παλμογράφος) που συνδέεται στον καταμεριστή μέσω ομοαξονικού καλωδίου σύνθετης αντίστασης  $Z$  [26].

Ο λόγος καταμερισμού του χωρητικού καταμεριστή δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\frac{U_{Hac}}{U_{CL}} = \frac{Z_H + Z_L}{Z_L} \rightarrow K_C = \frac{C_H + C_L}{C_H} \quad (3,9)$$



Εικόνα 3-17 Διάταξη παραγωγής και μέτρησης εναλλασσόμενων υψηλών τάσεων [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Η μέτρηση των Ε.Υ.Τ μπορεί να πραγματοποιηθεί με τους επόμενους τρόπους και διατάξεις [26]:

1. Μετασχηματιστές δοκιμών (επαγωγικοί και χωρητικοί).
2. Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.
3. Καταμεριστές τάσεως (χωρητικοί).
4. Σπινθηριστή σφαιρών.
5. Χωρητικότητα εν σειρά με μιλιαμερόμετρο.
6. Μέθοδος Chubb-Fortescue (Βολτόμετρο μέγιστου) για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης. Περιλαμβάνει χωρητικότητα εν σειρά με διάταξη αντιπαράλληλων διόδων και μιλιαμερόμετρο για τη μέτρηση της έντασης του ανορθωμένου ρεύματος.
7. Μέθοδος Boeck (παραλλαγή της Chubb-Fortescue) για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης.

8. Μέθοδος Bowdler για τη μέτρηση της μέγιστης τιμής της εναλλασσόμενης υψηλής τάσης, η οποία περιλαμβάνει χωρητικό καταμεριστή και ανορθωτικές διατάξεις.

### 3.8.2 Μέτρηση Εναλλασσόμενων Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο με Μετασχηματιστές δοκιμών

Ο συνηθέστερος τρόπος παραγωγής των Ε.Υ.Τ. στα εργαστήρια Υ.Τ είναι με τη χρήση των μετασχηματιστών δοκιμών. Κύρια χαρακτηριστικά των Μ/Σ δοκιμών είναι [26]:

- Υψηλοί λόγοι μετασχηματισμού. Για παράδειγμα, Μ/Σ δοκιμών των 500kV κατασκευάζονται με τάση πρωτεύοντος λίγων εκατοντάδων Volts.
- Αντοχή σε βραχυκυκλώματα.

Όσον αφορά τα τυλίγματα, λόγω πιθανών συχνών διασπάσεων των δοκιμίων, τα εμφανιζόμενα βραχυκυκλώματα προκαλούν ισχυρά μεταβατικά φαινόμενα και μηχανικές καταπονήσεις στα τυλίγματα του Μ/Σ δοκιμών. Προκειμένου να αποφευχθούν τοπικές καταπονήσεις, απαιτείται η καλύτερη δυνατή κατανομή δυναμικού στα τυλίγματα. Γι' αυτόν τον λόγο, η περιέλιξη των τυλιγμάτων υλοποιείται σε στρώσεις, των οποίων το μήκος είναι αντιστρόφως ανάλογο της διατομής τους, έτσι ώστε η χωρητικότητα μεταξύ των στρωμάτων να διατηρείται σταθερή και οι μεταβατικές υπερτάσεις να ισοκατανέμονται σε αυτά. Επίσης, το τύλιγμα υψηλής του Μ/Σ δοκιμών θα πρέπει να διαθέτει πολύ καλή μόνωση, ικανή να αντέχει όχι μόνο στην ονομαστική τάση λειτουργίας του Μ/Σ, αλλά και στις ισχυρές μεταβατικές υπερτάσεις που προκαλούνται στα τυλίγματα λόγω διασπάσεων στα δοκίμια [26].

Υπάρχουν λοιπόν, δύο κατηγορίες μετασχηματιστών δοκιμών ανάλογα με τον τρόπο και τη στάθμη μόνωσης των τυλιγμάτων τους [26]:

- **Αέρος:** Χαρακτηρίζονται από μικρότερο βάρος, δε χρειάζονται μονωτήρες διελεύσεως, αλλά παρουσιάζουν μεγάλη ευαισθησία σε σκόνη και υγρασία
- **Ελαίου:** Τα τυλίγματά τους βρίσκονται εντός μεταλλικού δοχείου με μονωτικό έλαιο, διαθέτουν μονωτήρες διελεύσεως, και έχουν τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας.

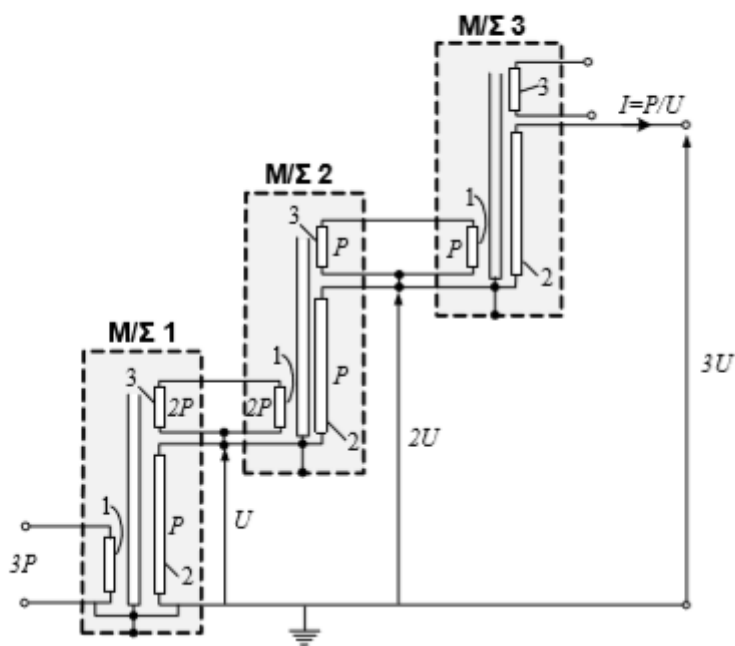
Υπάρχουν κάποιες βασικές διαφορές ανάμεσα στους Μ/Σ δοκιμών και τους Μ/Σ ισχύος, οι οποίες συνοπτικά είναι [26]:

1. Είναι συνήθως μονοφασικοί.
2. Έχουν μικρή ονομαστική ισχύ.
3. Δεν έχουν συνεχή λειτουργία, παρά μόνο για δοκιμές.
4. Η τάση εξόδου δεν είναι σταθερή όπως στους Μ/Σ ισχύος αλλά μπορεί να μεταβάλλεται από το μηδέν μέχρι την ονομαστική τιμή του τυλίγματος υψηλής τάσης.

Οι διατάξεις παραγωγής Υ.Τ. με Μ/Σ δοκιμών κατηγοριοποιούνται σε πολυβάθμιες και μονοβάθμιες. Στην κατηγορία πολυβάθμιων Μ/Σ δοκιμών, όπου η κάθε βαθμίδα τροφοδοτείται από την προηγούμενη, κάθε μονή βαθμίδα, εκτός από τα δύο κύρια τυλίγματα, διαθέτει και ένα τριτεύον τύλιγμα διέγερσης στην πλευρά της υψηλής τάσης, ονομαστικής τάσης 220V–240V, όταν πρόκειται για μονοφασικούς Μ/Σ. Η

συνδεσμολογία μεταξύ των μονών βαθμίδων πραγματοποιείται κατά τέτοιο τρόπο ώστε, το τριτεύον τύλιγμα της προηγούμενης βαθμίδας (πλευρά υψηλής) να συνδέεται με το πρωτεύον τύλιγμα της επόμενης βαθμίδας, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-18 [26].

Τέλος, αναφορικά με τη ρύθμιση της τιμής της τάσεως στο τύλιγμα χαμηλής των Μ/Σ δοκιμών, για Μ/Σ μερικών kVA αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε μέσω ρυθμιζόμενων ωμικών αντιστάσεων με χαμηλό κόστος, ευκολία στη χρήση και χαμηλή αρμονική παραμόρφωση, αλλά με υψηλές απώλειες Joule, είτε με χρήση μικρών αυτομετασχηματιστών (AM/Σ ή Variac). Για Μ/Σ όμως ισχύος δεκάδων kVA και υψηλής φόρτισης, λόγω δοκιμών υψηλής χωρητικότητας, οι απλοί AM/Σ κρίνονται ακατάλληλοι για τον έλεγχο της τάσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται επαγωγικοί ρυθμιστές (induction regulators) για τον έλεγχο της τάσης στο τύλιγμα χαμηλής. Αυτές οι διατάξεις είναι παρόμοιες στη σχεδίαση με τους επαγωγικούς κινητήρες τυλιγμένου δρομέα, αλλά ουσιαστικά πρόκειται για μετασχηματιστές, των οποίων η τάση εξόδου μεταβάλλεται με περιστροφή του δευτερεύοντος τυλίγματος της σε σχέση με το πρωτεύον τους. Ο στάτης, που ουσιαστικά είναι το πρωτεύον τύλιγμα, μεταφέρει το ρεύμα, ενώ ο δρομέας, που λειτουργεί ως το δευτερεύον τύλιγμα, συνδέεται μεταξύ της κύριας τροφοδοσίας και του πρωτεύοντος του Μ/Σ δοκιμών [26].



Εικόνα 3-18 Διάταξη μετασχηματιστή δοκιμών τριών βαθμίδων . (1) Πρωτεύον τύλιγμα, (2), Δευτερεύον τύλιγμα, (3) Τριτεύον τύλιγμα διέγερσης [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

### 3.9 Παραγωγή συνεχών υψηλών τάσεων στο εργαστήριο

Η παραγωγή των συνεχών υψηλών τάσεων γίνεται στα εργαστήρια Υ.Τ ως εξής: Αρχικά με ανόρθωση της ημιτονοειδούς εναλλασσόμενης τάσης μέσω μονοβάθμιων διατάξεων, γεφυρών ανόρθωσης και διατάξεων πολλαπλασιασμού της τάσης. Επιπλέον μέσω ηλεκτροστατικών γεννητριών. Η συνεχής τάση δοκιμής  $U_{dc}$  ορίζεται από τη σχέση (3,10), η οποία, ουσιαστικά, ορίζει και την αριθμητική μέση τιμή της ανορθωμένης κυματομορφής  $u(t)$  [26]:

$$U_{dc} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3,10)$$

Επειδή οι συνεχείς υψηλές τάσεις δοκιμής προέρχονται από μονοφασική ή τριφασική ανόρθωση της εναλλασσόμενης τάσης, η κυματομορφή της τάσης που προκύπτει από ανόρθωση δεν είναι απολύτως σταθερή, αλλά ταλαντώνεται με αποτέλεσμα να αποκλίνει από τη μέση τιμή της, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3-19.

Η διαφορά που υπάρχει μεταξύ της στιγμιαίας τιμής της ανορθωμένης τάσης από τη μέση τιμή της  $U_{dc}$ , δηλαδή μεταξύ μιας μέγιστης  $U_{max}$  και μιας ελάχιστης τιμής  $U_{min}$ , ονομάζεται κυμάτωση.

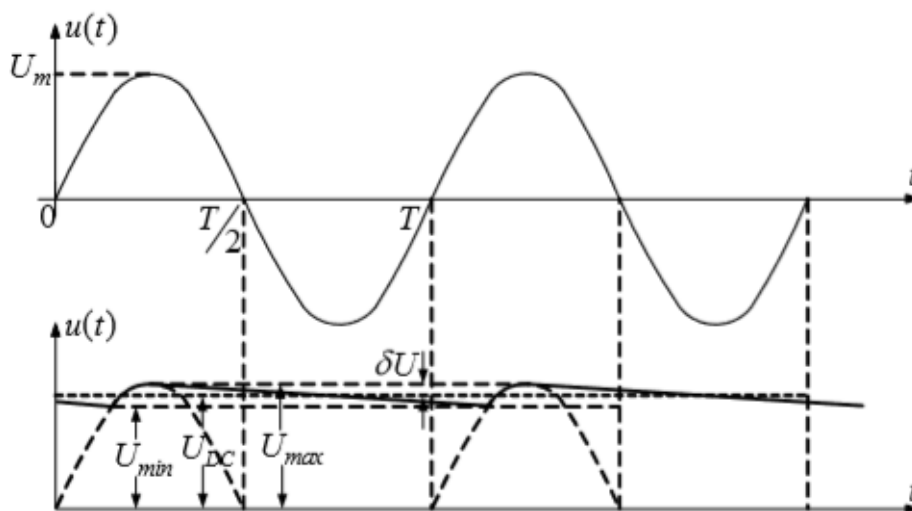
Το πλάτος της κυμάτωσης  $\delta U$  ορίζεται ως το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ  $U_{max}$  και  $U_{min}$  [26].

$$\delta U = \frac{1}{2}(U_{max} - U_{min}) \quad (3,11)$$

ενώ ο συντελεστής κυμάτωσης (ripple factor) ορίζεται ως:

$$RF = \frac{\delta U}{U_{dc}} \quad (3,12)$$

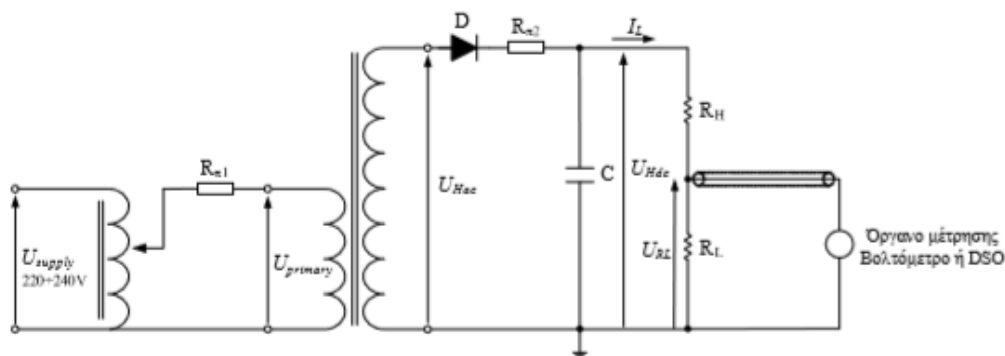
Σύμφωνα με τη διεθνή τυποποίηση, για να είναι μια συνεχής υψηλή τάση αποδεκτή μορφής για δοκιμές, θα πρέπει ο συντελεστής κυμάτωσης να μην υπερβαίνει το  $\pm 3\%$ , ενώ για δοκιμές με διάρκεια μικρότερη από 60s η ανοχή της τιμής της τάσης είναι  $\pm 1\%$  [26].



Εικόνα 3-19 Τάση εξόδου απλής ανόρθωσης με πυκνωτή εξομάλυνσης [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Η απλούστερη διάταξη παραγωγής Σ.Υ.Τ. στο εργαστήριο, είναι η απλή ανόρθωση, η οποία πραγματοποιείται με τη χρήση μίας και μόνης διόδου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-20. Ακόμη, η χωρητικότητα  $C$  που υπάρχει στο κύκλωμα του σχήματος έχει σκοπό την εξομάλυνση της κυματομορφής της τάσης που προέρχεται από την ημιανόρθωση, η τιμή της οποίας καθορίζει και το ύψος της εξομάλυνσης [26].

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-20 Διάταξη παραγωγής και μέτρησης συνεχών υψηλών τάσεων [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Οι σχέσεις που προκύπτουν από τις προηγούμενες εικόνες για την απλή ανόρθωση με πυκνωτή εξομάλυνσης είναι οι ακόλουθες [26]:

$$U_{max} = \sqrt{2} \cdot U_{Hac(rms)} \quad (3,13)$$

$$U_{dc} = U_{max} - \delta U \quad (3,14)$$

$$U_i \sim 2\sqrt{2} \cdot U_{Hac(rms)} \quad (3,15)$$

όπου  $U_{Hac(rms)}$  είναι η rms τιμή της εναλλασσόμενης τάσης εξόδου του Μ/Σ,  $U_{dc}$  η μέση τιμή της συνεχούς υψηλής τάσης,  $U_i$  η μέγιστη ανάστροφη τάση της διόδου και  $\delta U$  το πλάτος κυμάτωσης το οποίο δίνεται από τη σχέση [26]:

$$\delta U = \frac{I_L \cdot T}{2C} = \frac{I_L}{2fC} \quad (3,16)$$

όπου  $I_L$  η μέση τιμή της έντασης του ρεύματος εξόδου της διάταξης, και  $f$  η συχνότητα της τάσης τροφοδοσίας. Όπως φαίνεται από την εξίσωση (3,16) οι τρόποι για να μειωθεί η κυμάτωση της ανορθωμένης τάσης είναι η αύξηση της τιμής είτε της χωρητικότητας  $C$  είτε της συχνότητας  $f$  [26].

### 3.9.1 Άλλες ανορθωτικές διατάξεις παραγωγής Συνεχών Υψηλών Τάσεων.

Εκτός της απλής ανόρθωσης, υπάρχουν και άλλες διατάξεις παραγωγής Σ.Υ.Τ. μέσω ανόρθωσης της εναλλασσόμενης τάσης, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρύτατα στα εργαστήρια υψηλών τάσεων. Επιγραμματικά οι διατάξεις αυτές είναι [26]:

1. Διάταξη διπλής ανόρθωσης
2. Γέφυρα Graetz
3. Διάταξη τριφασικής ανόρθωσης
4. Διάταξη Villard
5. Διάταξη Liebenow-Greinacher
6. Διάταξη Cockroft-Walton



Οι τελευταίες τρεις ανορθωτικές διατάξεις (Villard, Liebenow-Greinacher, και Cockroft-Walton) έχουν το χαρακτηριστικό γνώρισμα του διπλασιασμού της τάσεως. Η τελευταία διάταξη, Cockroft-Walton, είναι πολυβάθμια και χρησιμοποιείται για ανόρθωση και πολλαπλασιασμό της εναλλασσόμενης τάσης, όταν υπάρχει ανάγκη για παραγωγή πολύ υψηλής τιμής συνεχούς τάσης [26].

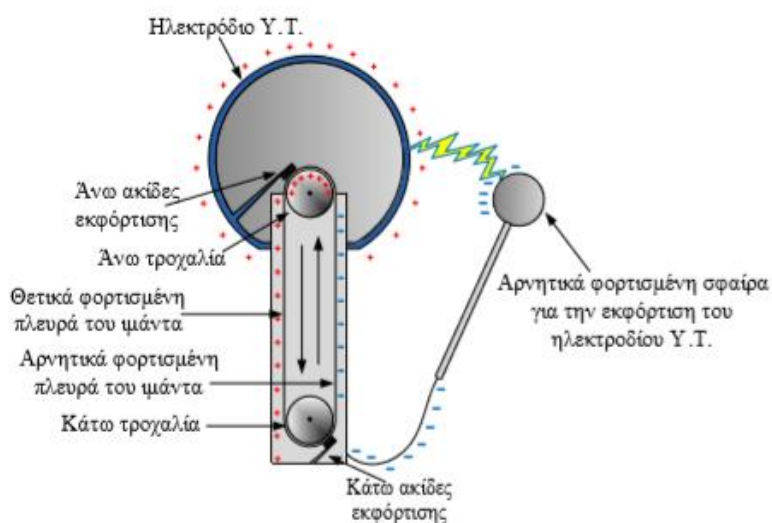
Μια άλλη κατηγορία διατάξεων παραγωγής συνεχών υψηλών τάσεων είναι, οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες οι οποίες μετατρέπουν τη μηχανική ενέργεια σε ηλεκτρική. Καταναλώνουν μεγάλα ποσά μηχανικής ενέργειας καθώς τα ηλεκτρικά φορτία μέσα σε αυτές τις γεννήτριες κινούνται αντίθετα προς τη δύναμη των ηλεκτρικών πεδίων, κερδίζοντας έτσι υψηλότερες δυναμικές ενέργειες [26].

Μια κλασική περίπτωση ηλεκτροστατική γεννήτριας Σ.Υ.Τ. είναι η γεννήτρια Van de Graaff που λειτουργεί με χρήση ιμάντα για οδηγό. Οι γεννήτριες αυτού του τύπου κατασκευάζονται συνήθως για τάσεις έως το πολύ 10MV, αλλά για πολύ μικρές ισχύεις της τάξεως μερικών δεκάδων kW. Βασικό πλεονέκτημα αυτών των γεννητριών είναι ότι η παραγόμενη τάση παρουσιάζει μηδενική κυμάτωση [26]. Οι γεννήτριες αυτές χρησιμοποιούνται για [26]:

- ηλεκτροστατικά φίλτρα,
- ηλεκτροστατικές βαφές
- και οι επιταχυντές σωματιδίων κυρίως στα εργαστήρια πυρηνικής φυσικής.

Η λειτουργία της γεννήτριας Van de Graaff φαίνεται στην

Εικόνα 3-21, και το σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας με τα κύρια μέρη των γεννητριών Van de Graaff φαίνεται στην Εικόνα 3-22 [26].



Εικόνα 3-21 Γεννήτρια Van de Graaff [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

### 3.9.2 Μέτρηση Συνεχών Υψηλών Τάσεων

Η μέτρηση των Σ.Υ.Τ μπορεί να πραγματοποιηθεί με χρήση των ακόλουθων οργάνων και διατάξεων [26]:

1. Σπινθηριστή σφαιρών.
2. Ηλεκτροστατικό βολτόμετρο.
3. Παραγωγό (ή περιστροφικό) βολτόμετρο.
4. Ωμικοί καταμεριστές τάσεως.

## 5. Ωμικός αντιστάτης εν σειρά με μιλιαμερόμετρο.



Εικόνα 3-22 Γεννήτρια Van de Graaff σε λειτουργία [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσανέας, Νικολέτα Χ. Ηλία,

## 3.10 Παραγωγή και μέτρηση Κρουστικών Υψηλών Τάσεων στο εργαστήριο

### 3.10.1 Εισαγωγή

Όπως έχει αναφερθεί με τον όρο υπέρταση εννοείται κάθε τάση που η τιμή της είναι μεγαλύτερη από την τάση λειτουργίας του εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός στο δίκτυο και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, πέρα από την συνεχή τάση λειτουργίας ,πρέπει να αντέχουν και σε ορισμένες καταπονήσεις από υπερτάσεις που εμφανίζονται πάνω του. Στην συνέχεια περιγράφεται ο τρόπος δημιουργίας αυτών των υπερτάσεων, και πως επηρεάζουν τον εξοπλισμό.

### 3.10.2 Παραγωγή Κρουστικών Υψηλών Τάσεων

Για να παραχθεί αυτή η ξεχωριστή κυματομορφή μια κρουστικής τάσης, δηλαδή απότομη και γρήγορη αύξηση της τάσης έως ενός ορίου και στην συνέχεια η μείωση της με πιο αργό ρυθμό έως ότου μηδενιστεί, χρειάζεται μια μαθηματική διαφορά δύο φθινουσών εκθετικών συναρτήσεων όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3.

Χρειάζονται λοιπόν, κυκλώματα φόρτισης και εκφόρτισης πυκνωτών και αντιστάσεων, κατάλληλων τιμών ώστε να παραχθεί η επιθυμητή κυματομορφή της τάσης. Αυτά τα κυκλώματα είναι οι μονοβάθμιες ή πολυβάθμιες γεννήτριες κρουστικών υψηλών τάσεων, των οποίων τα βασικά κυκλώματα περιγράφονται στην συνέχεια.

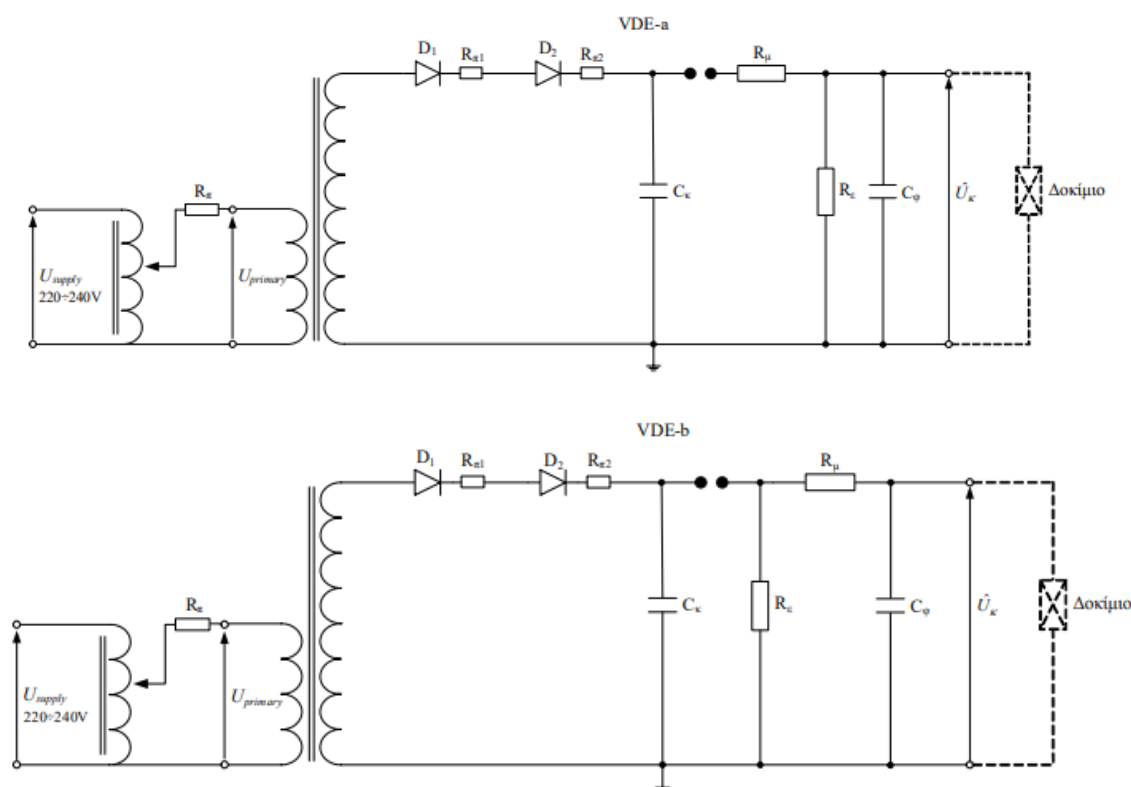
Κατά κανόνα οι κρουστικές τάσεις παράγονται μέσω της εκφόρτισης πυκνωτών υψηλής τάσεως, διαμέσου σπινθηριστών εναύσεως, σε ένα κύκλωμα αντιστάσεων και χωρητικοτήτων [26].

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Η παραγωγή των διπλοεκθετικών κρουστικών τάσεων γίνεται είτε μέσω μονοβάθμιων, είτε μέσω πολυβάθμιων γεννητριών κρουστικών τάσεων. Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζονται βασικά χαρακτηριστικά και εξισώσεις που αφορούν τις μονοβάθμιες γεννήτριες.

### 3.10.3 Μονοβάθμιες γεννήτριες παραγωγής κρουστικών τάσεων

Οι μονοβάθμιες κρουστικές γεννήτριες έχουν συνήθως τη μορφή ενός εκ των δύο κυκλωμάτων κατά VDE, τα οποία φαίνονται στην Εικόνα 3-23, δηλαδή γεννήτριες «τύπου α» και «τύπου β» όπως φαίνονται στην Εικόνα 3-24 [26].



Εικόνα 3-23 Κύκλωμα γεννήτριας κρουστικών τάσεων 1,2/50μs κατά VDE-a και VDE-b [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία,

Και στα δύο αυτά κυκλώματα περιλαμβάνονται τα εξής τέσσερα βασικά στοιχεία για την ορθή λειτουργία της κρουστικής γεννήτριας:

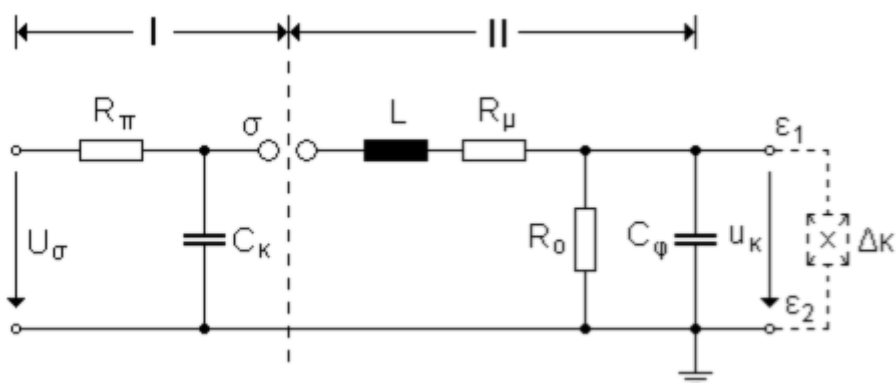
- Ο πυκνωτής κρούσεως  $C_{\kappa}$
- Ο πυκνωτής φόρτισης  $C_{\phi}$  ή πυκνωτή μετώπου
- Η αντίσταση αποσβέσεως ή αντίσταση μετώπου  $R_{\mu}$
- Η αντίσταση εκφορτίσεως ή αντίσταση ουράς  $R_{\epsilon}$  ή  $R_{\epsilon}$

Εκτός από τα παραπάνω βασικά λειτουργικά στοιχεία, υπάρχουν και κάποια επιπλέον βοηθητικά αλλά και προκύπτοντα από το κύκλωμα στοιχεία όπως [25]:

- Η προστατευτική αντίσταση  $R_{\rho}$ ,

- Η συνολική παράσιτη αυτεπαγωγή  $L$  των διαφόρων στοιχείων του κυκλώματος (αντιστάσεων, πυκνωτών και συνδετικών αγωγών), η οποία επιδιώκεται να είναι όσο το δυνατό μικρότερη,
- Ο σπινθηριστής σφαιρών  $\sigma$  μεταβλητού διακένου, μέσω του οποίου το κύκλωμα χωρίζεται σε δύο τμήματα I και II, τα οποία καλούνται αντίστοιχα "τμήμα φορτίσεως" και "τμήμα εκφορτίσεως" της γεννήτριας κρουστικών τάσεων.

Η κρουστική τάση παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, δηλαδή είναι η τάση που εμφανίζεται, στον πυκνωτή  $C_{\phi}$ .



Εικόνα 3-24 Μονοβάθμια διάταξη παραγωγής κρουστικών τάσεων (τύπου α) [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρησή τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Η μεταβολή της τάσης φόρτισης του  $C_{\phi}$  εξαρτάται κυρίως από τον λόγο  $C_{\kappa}/C_{\phi}$ . Στις γεννήτριες κρουστικών τάσεων επιδιώκεται να ισχύει γενικά  $C_{\kappa} \gg C_{\phi}$ , ώστε να απαιτείται μικρό μέρος του φορτίου του  $C_{\kappa}$  για τη φόρτιση του  $C_{\phi}$ . Έτσι εξασφαλίζεται ότι, για συνεχή τάση  $U_c$  φορτίσεως του  $C_{\kappa}$ , η παραγόμενη κρουστική τάση θα είναι πιο μικρή της  $U_c$ , επομένως ο συντελεστής χρησιμοποίησης, που δίνεται από τη σχέση (3,17) της γεννήτριας, θα έχει σχετικά μεγάλη τιμή [26].

$$\eta = \frac{U_{\kappa}}{U_{dc}} \quad (3,17)$$

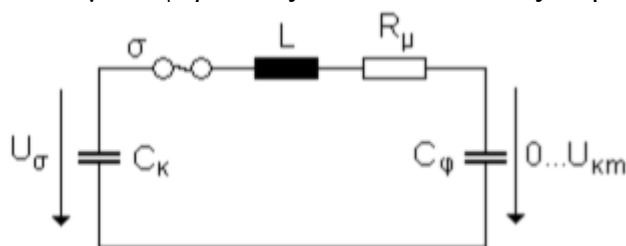
Στην περίπτωση του κυκλώματος της γεννήτριας τύπου α, και για την παραγωγή της κρουστικής τάσης, διακρίνονται δυο στάδια [25]:

1. Το στάδιο φορτίσεως και
2. Το στάδιο εκφορτίσεως.

Κατά το στάδιο φορτίσεως, ο πυκνωτής  $C_{\kappa}$  φορτίζεται από μια υψηλή συνεχή τάση  $U_{\sigma}$  (μέσω μιας ανορθωτικής διάταξης). Στη συνέχεια παύει η επιβολή της  $U_{\sigma}$ . Κατά το στάδιο αυτό η τάση φόρτισης του πυκνωτή  $C_{\kappa}$  επιβάλλεται και στον σπινθηριστή  $\sigma$ , το διάκενο του οποίου πρέπει να είναι τουλάχιστο τόσο, ώστε να μη διασπάται μέχρι και την επιδιωκόμενη τάση  $U_{\sigma}$  φορτίσεως του  $C_{\kappa}$ . Το στάδιο φορτίσεως τελειώνει όταν ο  $C_{\kappa}$  αποκτήσει την τάση  $U_{\sigma}$  [25].

Κατά το στάδιο εκφορτίσεως, αφού ο  $C_{\kappa}$  έχει αποκτήσει την τάση  $U_{\sigma}$ , τότε ο σπινθηριστής διασπάται υπό την τάση αυτή. Εκείνη τη στιγμή ξεκινά το στάδιο της

εκφορτίσεως. Κατά την πρώτη στιγμή της διασπάσεως του  $\sigma$ , ο  $C\varphi$  είναι τελείως αφόρτιστος ( $U_{C\varphi}=U_k=0$ ) και εμφανίζει ελάχιστη αντίδραση στην δίοδο, δι' αυτού, του ρεύματος φορτίσεως. Κατά το στάδιο αυτό η  $R_0$  μπορεί, σε πρώτη προσέγγιση, να παραλειφθεί και το κύκλωμα εκφορτίσεως απλοποιείται όπως στην Εικόνα 3-25 [25].



Εικόνα 3-25 Απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας κρουστικών τάσεων. Ισχύει κατά τη διαμόρφωση του μετώπου των κρουστικών τάσεων [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Υπό αυτές τις προϋποθέσεις ο  $C\varphi$  φορτίζεται μέσω της  $R_\mu$  καθώς έχει παραληφθεί η  $R_0$ , οπότε η τάση  $u_k$  θα εμφανίζει εκθετική μεταβολή, της οποίας η μέγιστη (τελική) τιμή της θα διαφέρει ελάχιστα από την  $U_\sigma$  [25].

Για να μην έχει η  $u_k$  μορφή αποσβενυμμένης ταλαντώσεως αποδεικνύεται ότι πρέπει να ισχύει [25].

$$R_\mu \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L \cdot (C_k + C_\varphi)}{C_k \cdot C_\varphi}} \quad (3,18)$$

όμως ισχύει ότι  $C_k \gg C_\varphi$ , επομένως προκύπτει:

$$R_\mu \geq 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C_\varphi}} \quad (3,19)$$

Με το παραπάνω μεταβατικό φαινόμενο διαμορφώνεται το μέτωπο της κρουστικής τάσεως. Αυτό, τελειώνει όταν οι  $C_k$  και  $C_\varphi$  αποκτήσουν την ίδια τάση  $U_{km}$ , που είναι και η μέγιστη τιμή της κρουστικής τάσεως.

Στην περίπτωση αυτή, δεδομένου ότι η  $R_\mu$  είναι πολύ μικρή, ώστε να αμελείται, μπορεί να θεωρηθεί ότι οι  $C_k$  και  $C_\varphi$  συνδέονται παράλληλα [25].

Οπότε προκύπτει η αναλυτική έκφραση της κρουστικής τάσης, μετά από απλοποιητικές παραδοχές [25]:

$$U_{km} = \frac{U_\sigma \cdot C_k}{C_k + C_\varphi} \quad (3,20)$$

και ο συντελεστής χρησιμοποίησης προκύπτει αντίστοιχα:

$$\eta = \frac{C_k}{C_k + C_\varphi} \quad (3,21)$$

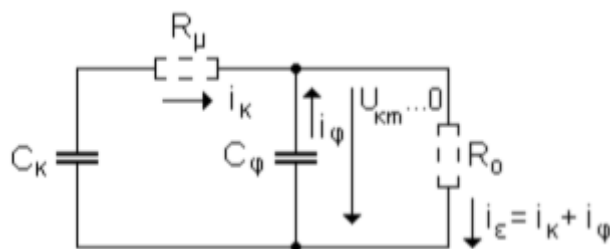
Στη συνέχεια ακολουθεί η διαμόρφωση της ουράς της κρουστικής τάσης. Η διαμόρφωση της ουράς αρχίζει όταν οι  $C_k$  και  $C_\varphi$  αποκτήσουν την ίδια τάση  $U_{km}$ . Άρα μπορεί να θεωρηθεί ότι οι  $C_k$  και  $C_\varphi$  συνδέονται παράλληλα και εκφορτίζονται

$$U_o = \frac{U_\sigma \cdot R_o \cdot C_k}{\frac{1}{\alpha_2} - \frac{1}{\alpha_1}} \quad (3,24)$$

Όπου

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \frac{R_o \cdot (C_k + C_\varphi) + R_\mu \cdot C_k \pm \sqrt{[R_o \cdot (C_k + C_\varphi) + R_\mu \cdot C_k]^2 - 4 \cdot C_k \cdot C_\varphi \cdot R_o \cdot R_\mu}}{2 \cdot C_k \cdot C_\varphi \cdot R_o \cdot R_\mu} \quad (3,25)$$

στην  $R_o$ , όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-26, με αποτέλεσμα η κρουστική τάση να μεταβάλλεται μεταξύ  $U_{km}$  και μηδέν [25].



Εικόνα 3-26 Απλοποιημένο κύκλωμα της γεννήτριας κρουστικών τάσεων, που ισχύει κατά τη χρονική διάρκεια διαμορφώσεως της ουράς των κρουστικών τάσεων [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Το φαινόμενο τελειώνει μετά την πλήρη εκφόρτιση των  $C_k$  και  $C_\varphi$ , οπότε η κρουστική τάση μηδενίζεται και ο  $C_k$  μπορεί να φορτιστεί πάλι από την πηγή συνεχούς τάσεως για παραγωγή της επόμενης κρουστικής τάσεως, σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε.

Συνεπώς με βάση τα προηγούμενα προκύπτει ότι για τη διάρκεια μετώπου  $T_\mu$  της κρουστικής τάσεως σημασία έχουν κυρίως τα μεγέθη  $R_\mu$  και  $C_\varphi$ , ενώ για τη διάρκεια της ουράς σημασία έχουν τα μεγέθη  $C_k$  και  $R_o$  [25].

Με βάση τα παραπάνω μπορούν να προκύψουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$T_\mu = \frac{R_\mu \cdot C_k \cdot C_\varphi}{C_k + C_\varphi} \sim R_\mu \cdot C_\varphi \quad (3,22)$$

και

$$T_o = R_o \cdot (C_k + C_\varphi) \sim R_o \cdot C_k \quad (3,23)$$

Επίσης η ενέργεια φορτίσεως της γεννήτριας κρουστικών τάσεων υπολογίζεται ως εξής:

$$W_k = \frac{1}{2} \cdot C_k \cdot U_\sigma^2 \quad (3,26)$$

Η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε θερμότητα στις αντιστάσεις  $R_o$  και  $R_\mu$ , όμως επειδή ισχύει ότι  $R_o > R_\mu$ , η περισσότερη ενέργεια απορροφάται από την  $R_o$  [25].

Για την αντιστροφή διαδικασία, δηλαδή με δεδομένη την επιθυμητή κυματομορφή, και με την απαίτηση να επιλεγούν τα στοιχεία της προς σύνθεση κρουστικής γεννήτριας, ειδικά για τον υπολογισμό των στοιχείων γεννήτριας κρουστικής τάσης της μορφής  $1,2/50\mu s$  που είναι από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες, υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής μιας μεθόδου για την επιλογή των τιμών των αντιστάσεων

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

μετώπου και ουράς, εφόσον έχουν επιλεγεί οι χωρητικότητες του κυκλώματος. Οι σχέσεις που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι οι εξής [26]:

$$R_o = 1410 \cdot \eta \cdot \frac{T_o}{C_k} \quad (3,27)$$

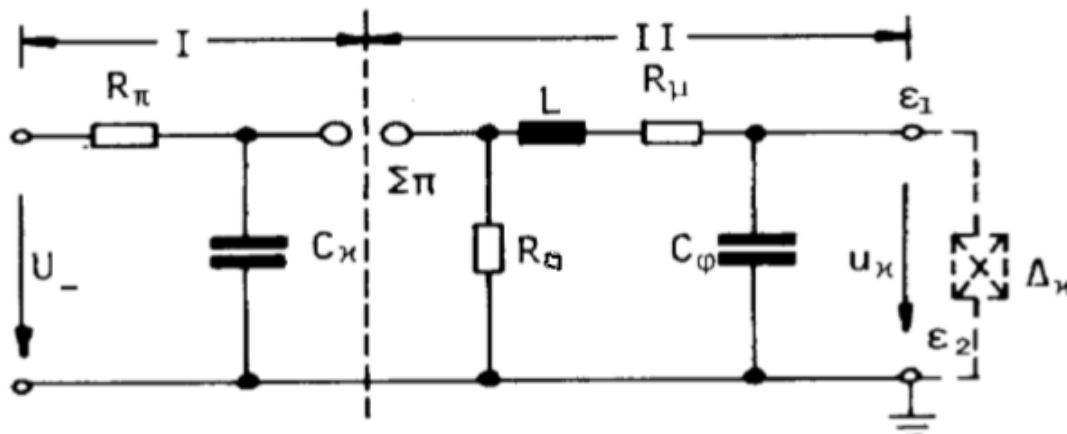
$$R_\mu = \left(\frac{333}{\eta}\right) \cdot \frac{T_\mu}{C_\varphi} \quad (3,28)$$

Για τις σχέσεις (3,27) και (3,28) η τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης προσδιορίζεται από τον Πίνακα 2. Να σημειωθεί ότι οι σχέσεις αυτές ισχύουν για συγκεκριμένες μονάδες μέτρησης των μεγεθών, δηλαδή Ω για τις ωμικές αντιστάσεις, nF για τις χωρητικότητες και ms για τον χρόνο [26].

		$\frac{C_\varphi}{C_k}$				
		0,04	0,08	0,12	0,16	0,20
η	VDE-a	0,85	0,82	0,81	0,80	0,77
	VDE-b	0,932	0,899	0,868	0,837	0,810

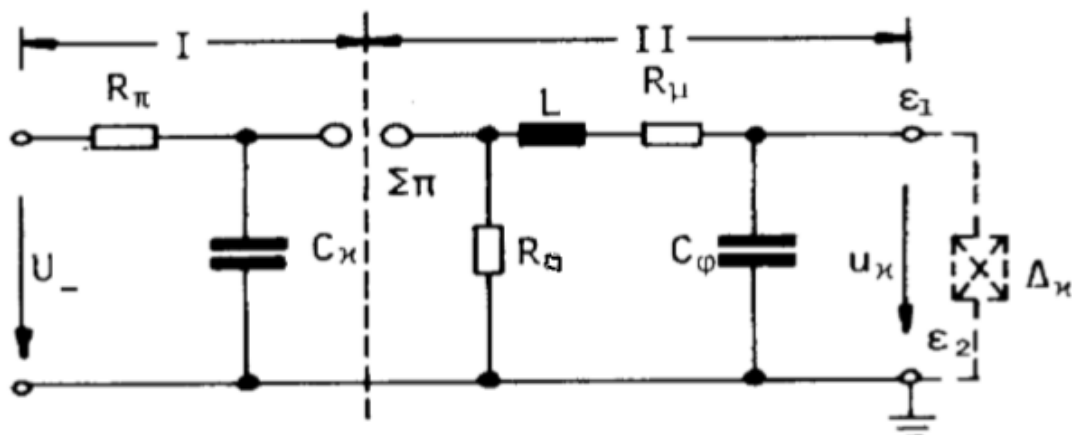
Πίνακας 2 η τιμή του συντελεστή χρησιμοποίησης [26] © Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, /Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία

Όπως έχει αναφερθεί υπάρχουν και οι μονοβάθμιες γεννήτριες παραγωγής κρουστικών τάσεων τύπου β της οποίας η διάταξη φαίνεται στην



Εικόνα 3-27. Υπάρχουν κάποιες βασικές διαφορές μεταξύ των δύο τύπων τόσο κυκλωματικά όσο και μαθηματικά [25].

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-27 Μονοβάθμια διάταξη παραγωγής κρουστικών τάσεων(τύπου β) [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρησή τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

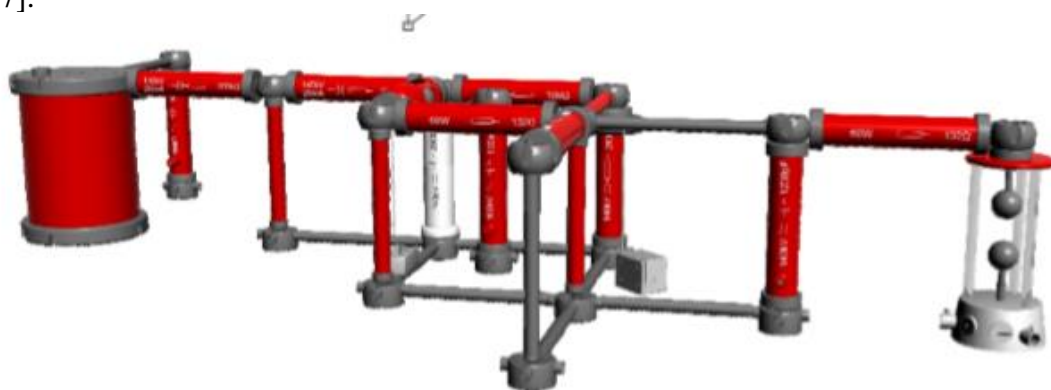
- Αρχικά ο συντελεστής χρησιμοποίησης για την γεννήτρια τύπου α είναι:

$$\eta = \frac{C_k}{C_k + C_\phi} \quad (3,29)$$

Ενώ στην περίπτωση του κυκλώματος τύπου β είναι :

$$\eta = \left(\frac{R_t}{R_t + R_\mu}\right) \left(\frac{C_k}{C_k + C_\phi}\right) \quad (3,30)$$

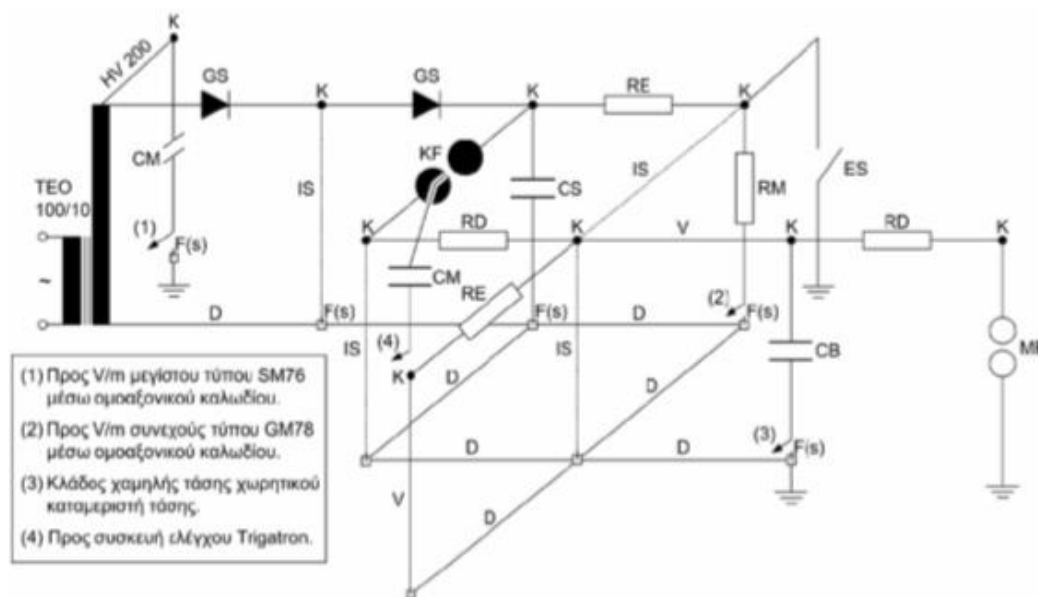
Στις εικόνες Εικόνα 3-28 και Εικόνα 3-29 φαίνεται μια φωτορεαλιστική απεικόνιση μονοβάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (τύπου α), καθώς επίσης και ο εξοπλισμός που υπάρχει σε ένα εργαστήριο μετρήσεων υψηλής τάσης [27].



Εικόνα 3-28 Σχηματικό διάγραμμα κυκλώματος και φωτορεαλιστική απεικόνιση μονοβάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (τύπου α) καθώς και συνδεσμολογίες κυκλωμάτων μέτρησης [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-29 Κυκλωματικό διάγραμμα μονοβάθμιας γεννήτριας παραγωγής κρουστικών υψηλών τάσεων (τύπου α) και συνδεσμολογίες κυκλωμάτων μέτρησης [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

Για την ίδια συνεχή τάση φόρτισης η συνδεσμολογία «τύπου α» δίνει υψηλότερη κρουστική τάση σε σχέση με τη συνδεσμολογία «τύπου β», αν θεωρηθεί ότι για τις δύο συνδεσμολογίες χρησιμοποιούνται τα ίδια στοιχεία. Σημαντική επίσης διαφορά προκύπτει και όσον αφορά την καταπόνηση των αντιστάσεων σε τάση και ισχύ [25]:

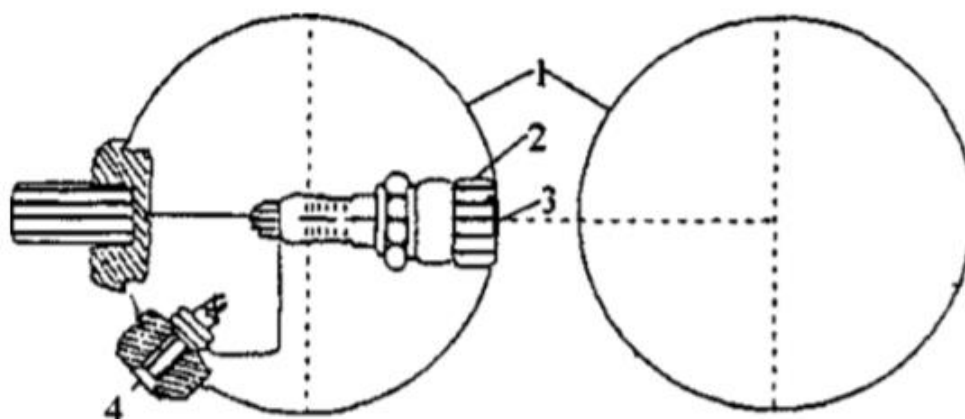
1. Στο κύκλωμα α η  $R_o$ , η οποία είναι συνδεδεμένη παράλληλα προς τον πυκνωτή φορτίου, καταπονείται στην κρουστική τάση, της οποίας η μέγιστη τιμή είναι μικρότερη από τη συνεχή τάση φορτίσεως της γεννήτριας.
2. Στην περίπτωση του κυκλώματος β, η  $R_o$  δέχεται τη μέγιστη καταπόνηση τάσεως τη στιγμή διασπάσεως του σπινθηριστή  $\sigma_{\pi}$ .

### 3.10.4 Συσκευή trigatron-σπινθηριστής

Στο πρώτο στάδιο που περιγράφηκε, το στάδιο φόρτισης, έγινε αναφορά στον σπινθηριστή  $\sigma_{\pi}$  στον οποίο επιβάλλεται η τάση φόρτισης του πυκνωτή  $C_k$  και διασπάται στην τάση αυτή, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένας σπινθήρας στον σπινθηριστή  $\sigma_{\pi}$  μέσω της συσκευής trigatron, όπως λέγεται και φαίνεται στην Εικόνα 3-30, η οποία είναι ενσωματωμένη σε μια από τις δύο σφαίρες του σπινθηριστή. Ο σπινθηριστής αυτός αποτελείται από [25]:

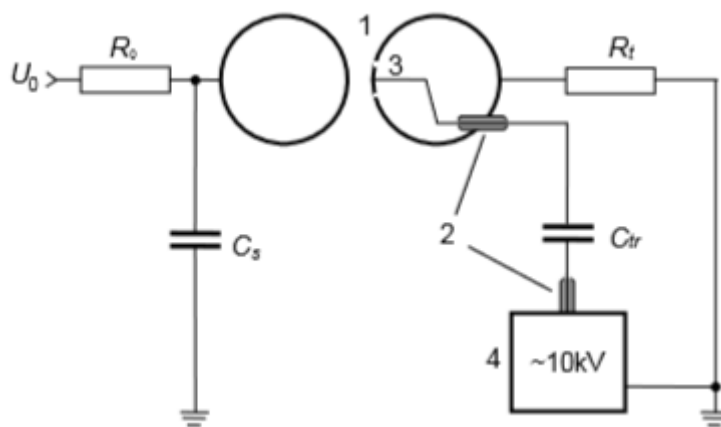
1. Διάκενο σπινθηριστή,
2. Μονωτήρας διελεύσεως ,
3. Μονωμένο βοηθητικό ηλεκτρόδιο εναύσεως ,
4. Είσοδος παλμού εναύσεως.

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-30 Συσκευή trigatron με μεμονωμένο βοηθητικό ηλεκτρόδιο ενάυσεως [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Η σφαίρα του διακένου είναι γειωμένη και εκεί βρίσκεται το βοηθητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο σχηματίζει με την σφαίρα ένα διάκενο. Για την προστασία του χειριστή υπάρχει ο πυκνωτής ζεύξης,  $C_{tr}$  όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-31 [25].



Εικόνα 3-31 Συσκευή Trigatron [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

### 3.10.5 Πολυβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων

Εκτός από τις μονοβάθμιες γεννήτριες κρουστικών τάσεων, χρησιμοποιούνται και γεννήτριες πολλών βαθμίδων για την παραγωγή κρουστικών τάσεων πάνω από 200 KV γνωστές ως πολυβάθμιες γεννήτριες τύπου Marx. Η λειτουργία τους βασίζεται στην παράλληλη φόρτιση πυκνωτών οι οποίοι στην συνέχεια, μέσω σπινθηριστών, εκφορτίζονται σε κατάλληλο κύκλωμα [27].

Συνεπώς η κρουστική τάση που παράγεται φτάνει την τιμή του συνόλου των τάσεων των πυκνωτών. Η αρχή λειτουργίας τους, δηλαδή φόρτιση και εκφόρτιση, είναι ίδια με τις μονοβάθμιες γεννήτριες, δηλαδή τα στοιχεία τους φορτίζονται υπό συνεχή υψηλή τάση και ακολούθως εκφορτίζονται, μέσω της διάσπασης των σφαιρικών διακένων, συνδεδεμένοι εν σειρά σε ένα πυκνωτή φορτίου  $C_f$ . Με τον τρόπο αυτό η τάση εξόδου

της γεννήτριας Marx είναι πολλαπλάσια της τάσης φόρτισης, κατ' αναλογία με τον αριθμό των βαθμίδων της [27].

Όπως και η μονοβάθμια γεννήτρια κρουστικών υψηλών τάσεων, οι γεννήτριες Marx συνδυάζουν επιπλέον των κρουστικών πυκνωτών, αντιστάσεις μετώπου και ουράς καθώς και βοηθητικά σφαιρικά διάκενα [27].

Η αρχή λειτουργίας φαίνεται στην Εικόνα 3-32, όπου το κύκλωμα εκφόρτισης αποτελείται από τα στοιχεία  $R_o$ ,  $R_\mu$ , και  $C_\phi$ .

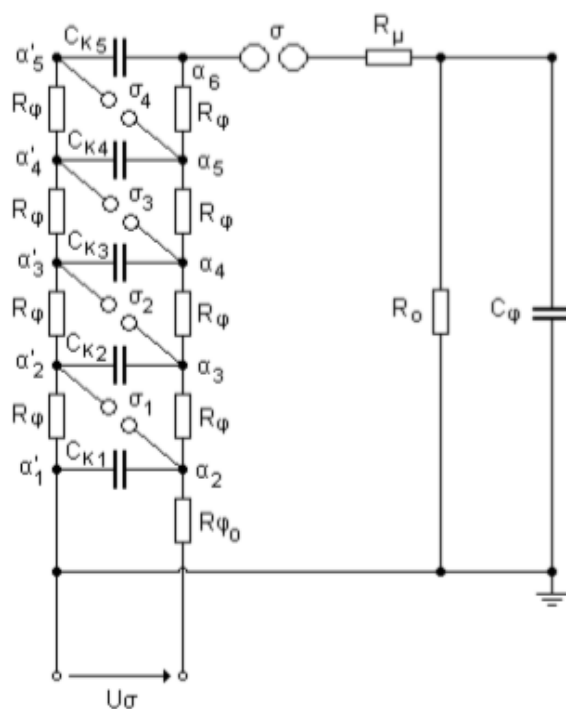
Στη διάταξη των  $R_o$  και  $C_\phi$  εφαρμόζεται τάση ίση με το άθροισμα των τάσεων των πυκνωτών δηλαδή:

$$v \cdot U_\sigma \quad (3,31)$$

Η μέγιστη τιμή της αποκτούμενης στα άκρα του  $C_\phi$  κρουστικής τάσεως δίνεται από τη σχέση [25]:

$$U_{km} = \eta \cdot (v \cdot U_\sigma) \quad (3,32)$$

όπου  $\eta$  ο συντελεστής χρησιμοποίησης της γεννήτριας και  $v$  ο αριθμός των πυκνωτών της πολυβάθμιας διάταξης.



Εικόνα 3-32 Πολυβάθμια διάταξη παραγωγής υψηλών κρουστικών τάσεων [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Αντίστοιχα με τη χωρητικότητα  $C_k$  της μονοβάθμιας γεννήτριας, στις πολυβάθμιες γεννήτριες ισχύει:

$$(3,33)$$

$$C_k = \frac{1}{\frac{1}{C_{k1}} + \frac{1}{C_{k2}} + \dots + \frac{1}{C_{kv}}}$$

Και επειδή κατά κανόνα είναι  $C_{k1}=C_{k2}=\dots=C_{kv}$ , ισχύει :

$$C_k = \frac{C_{k1}}{v} \quad (3,34)$$

Τέλος, ενέργεια της γεννήτριας μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$W_k = \left(\frac{1}{2} \cdot C_{k1} \cdot U_{\sigma}^2\right) \cdot v \quad (3,35)$$

### 3.11 Διατάξεις μετρήσεων υψηλών τάσεων

Ο επικρατέστερος και σωστότερος τρόπος για να μελετηθεί η κυματομορφή μιας υψηλής κρουστικής τάσης με όλα τα χαρακτηριστικά μεγέθη της, είναι η μέτρησή της με χρήση καταμεριστή, συνήθως χωρητικού, με την βοήθεια ενός ψηφιακού παλμογράφου [25].

Σύμφωνα με τα προηγούμενα, είναι σαφές ότι πρέπει να λαμβάνεται ιδιαίτερη μέριμνα για τις διατάξεις μετρήσεων υψηλών τάσεων. Στις υψηλές τάσεις διεξάγεται πλήθος κατηγοριών μετρήσεων, οι οποίες μπορούν να ταξινομηθούν με βάση δυο κριτήρια [25]:

1. Την τιμή των υπό μέτρηση μεγεθών
2. Την ταχύτητα της χρονικής μεταβολής τους.

Τις περισσότερες φορές, στην έξοδο των διατάξεων παραγωγής υψηλών τάσεων συνδέεται καταμεριστής τάσης για τον υποβιβασμό της τάσεως σε επίπεδα που επιβάλλονται από την λειτουργία των οργάνων μέτρησης [25].

#### 3.11.1 Μέτρηση με καταμεριστές τάσεως

Για να μετρηθεί μια υψηλή τάση και να μελετηθούν τα χαρακτηριστικά της χρειάζεται στο τέλος του συστήματος μετρήσεων μια διάταξη καταμεριστή. Μ' ένα καταμεριστή τάσεως επιδιώκεται η μείωση του εύρους των υψηλών τάσεων υπό την προϋπόθεση ότι η μορφή τους παραμένει αναλλοίωτη. Μια τέτοια διάταξη μέτρηση αποτελείται από [25]:

- Τον καταμεριστή τάσης,
- Το καλώδιο μέτρησης που συνδέει την έξοδο του καταμεριστή τάσης και την είσοδο του οργάνου καταγραφής και
- Το όργανο καταγραφής.

Γενικά, για καλύτερη ακρίβεια μετρήσεων των κρουστικών υψηλών τάσεων, χρησιμοποιούνται χωρητικοί καταμεριστές τάσης, όμως πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν η επίδραση της παράσιτης χωρητικότητας στο λόγο καταμερισμού και η όποια παράσιτη αυτεπαγωγή στην απόκριση του καταμεριστή [25].

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Αν  $u_1=u_1(t)$  η αρχική τάση και  $u_2=u_2(t)$  η τάση στην πλευρά χαμηλής τάσεως του καταμεριστή, τότε μπορεί να οριστεί η σχέση καταμερισμού ως το πηλίκο [25]:

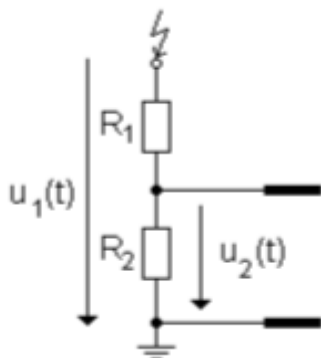
$$K = \frac{u_1}{u_2} = \frac{u_1(t)}{u_2(t)} \quad (3,36)$$

το οποίο πρέπει για κάθε τιμή του  $t$  να είναι σταθερό και ανεξάρτητο του  $t$ .

### 3.11.2 Ωμικός καταμεριστής τάσεως

Στην Εικόνα 3-33 παρουσιάζεται ένας ωμικός καταμεριστής τάσης ο οποίος αποτελείται από δύο αντιστάσεις, μια υψηλής τάσεως  $R_1$  και μία χαμηλής τάσεως  $R_2$ . Για τον συγκεκριμένο καταμεριστή ισχύει ο λόγος καταμερισμού:

$$K = \frac{u_1}{u_2} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} \quad (3,37)$$



Εικόνα 3-33 Ωμικός καταμεριστής τάσεως [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

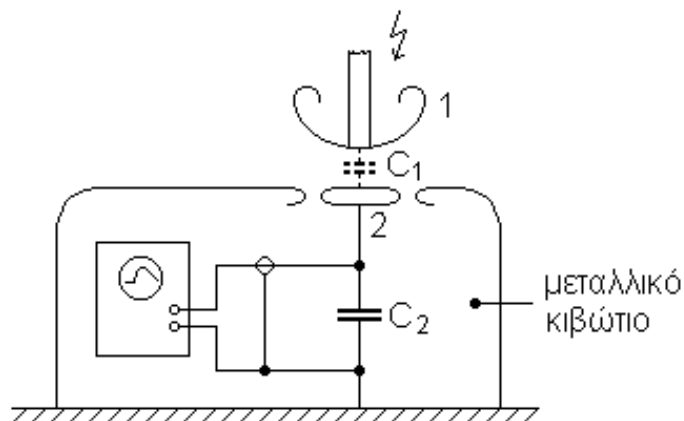
### 3.11.3 Καθαρά χωρητικοί καταμεριστές τάσεως

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-34 παρουσιάζεται ένας χωρητικός καταμεριστής τάσης που αποτελείται από δυο χωρητικότητες, μια υψηλής τάσεως  $C_1$  και μια χαμηλής τάσεως  $C_2$ . Ο πυκνωτής υψηλής τάσεως σχηματίζεται, ως πυκνωτής αέρος, μεταξύ ενός ηλεκτροδίου υψηλής τάσεως 1 και ενός ενδιάμεσου ηλεκτροδίου 2, ενώ μεταξύ του τελευταίου και της γης παρεμβάλλεται η χωρητικότητα χαμηλής τάσεως  $C_2$ . Η  $C_2$  βρίσκεται μέσα σε μεταλλικό κιβώτιο, το οποίο περιλαμβάνει και τον παλμογράφο [25].

Σε αυτή την περίπτωση η σχέση καταμερισμού μπορεί να περιγραφεί από τη σχέση:

$$K = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (3,38)$$

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 3-34 Χωρητικός καταμεριστής τάσεως [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρησή τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

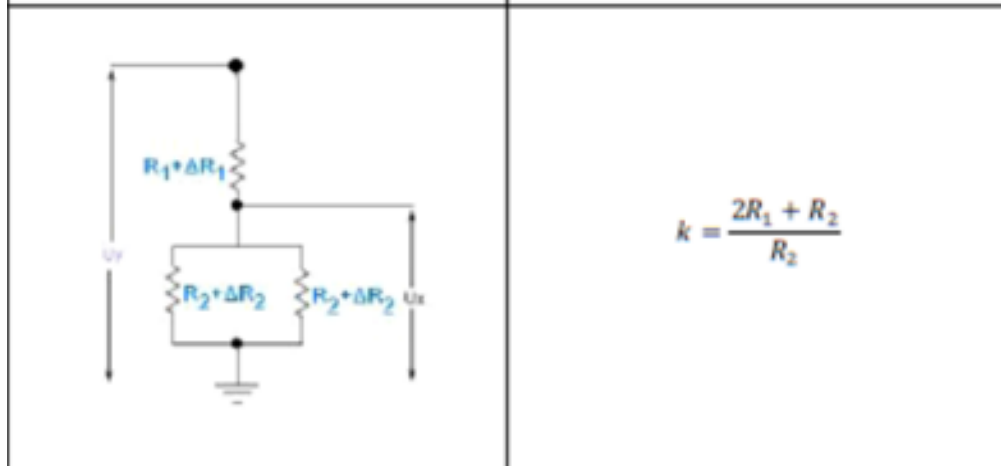
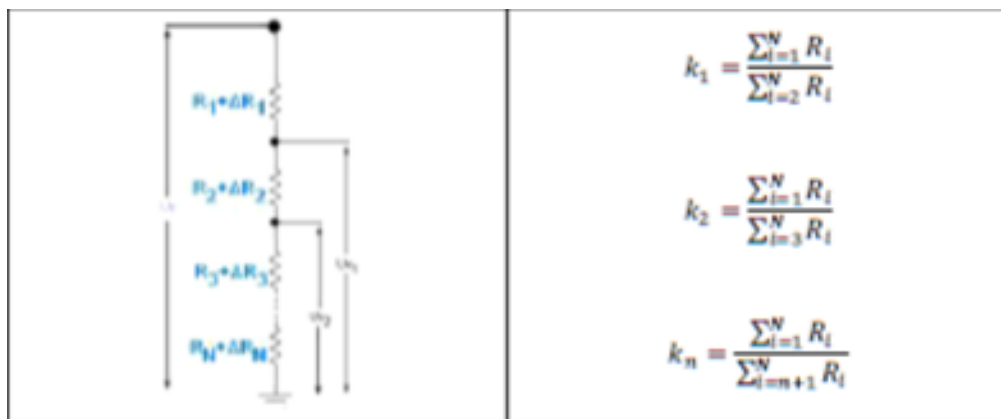
### 3.11.4 Συνδεσμολογίες Καταμεριστών Τάσης

Στην Εικόνα 3-35 φαίνονται κάποιες συνηθισμένες συνδεσμολογίες καταμεριστών τάσης, τόσο ωμικών όσο και χωρητικών. Για κάθε μια συνδεσμολογία φαίνεται και η αντίστοιχη σχέση καταμερισμού.

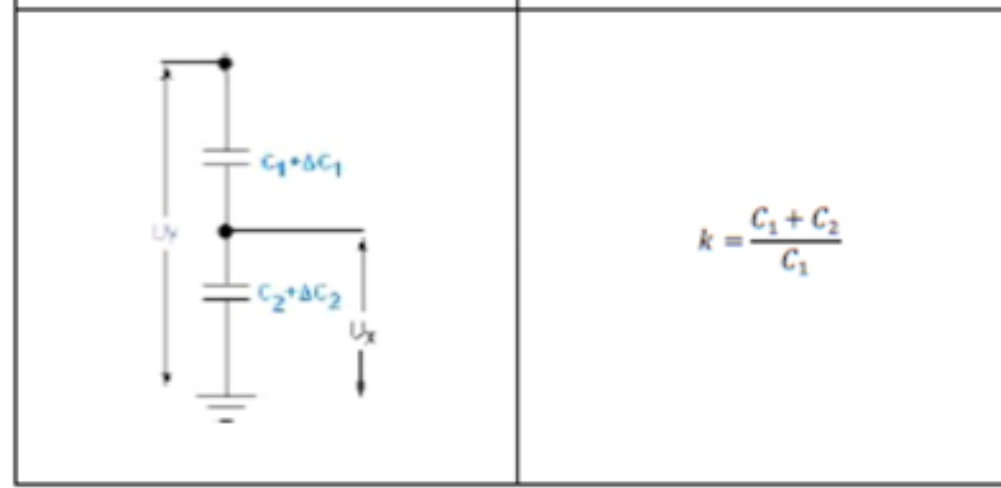
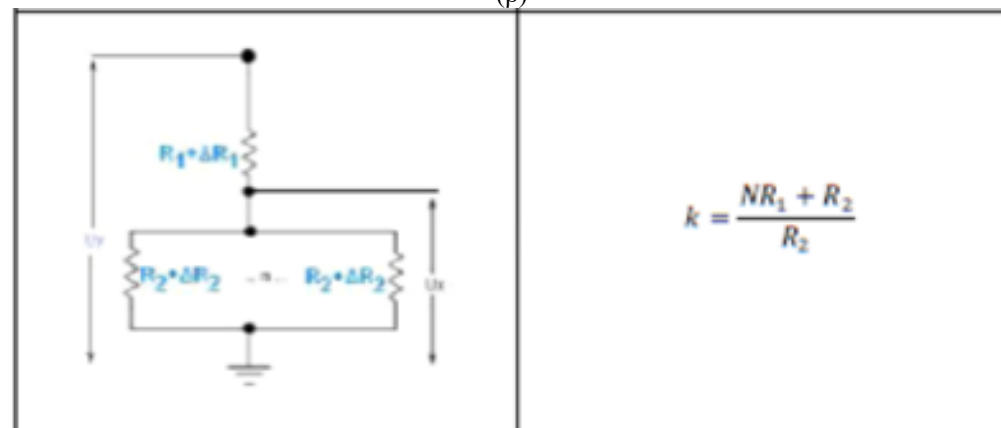
ΔΙΑΤΑΞΗ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΤΗ ΤΑΣΗΣ	ΣΧΕΣΗ/ΕΙΣ ΚΑΤΑΜΕΡΙΣΙΜΟΥ $k$
	$k = \frac{R_2 + R_1}{R_2}$
	$k_1 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2 + R_3}$ $k_2 = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_3}$

(α)

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



(β)



(γ)

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

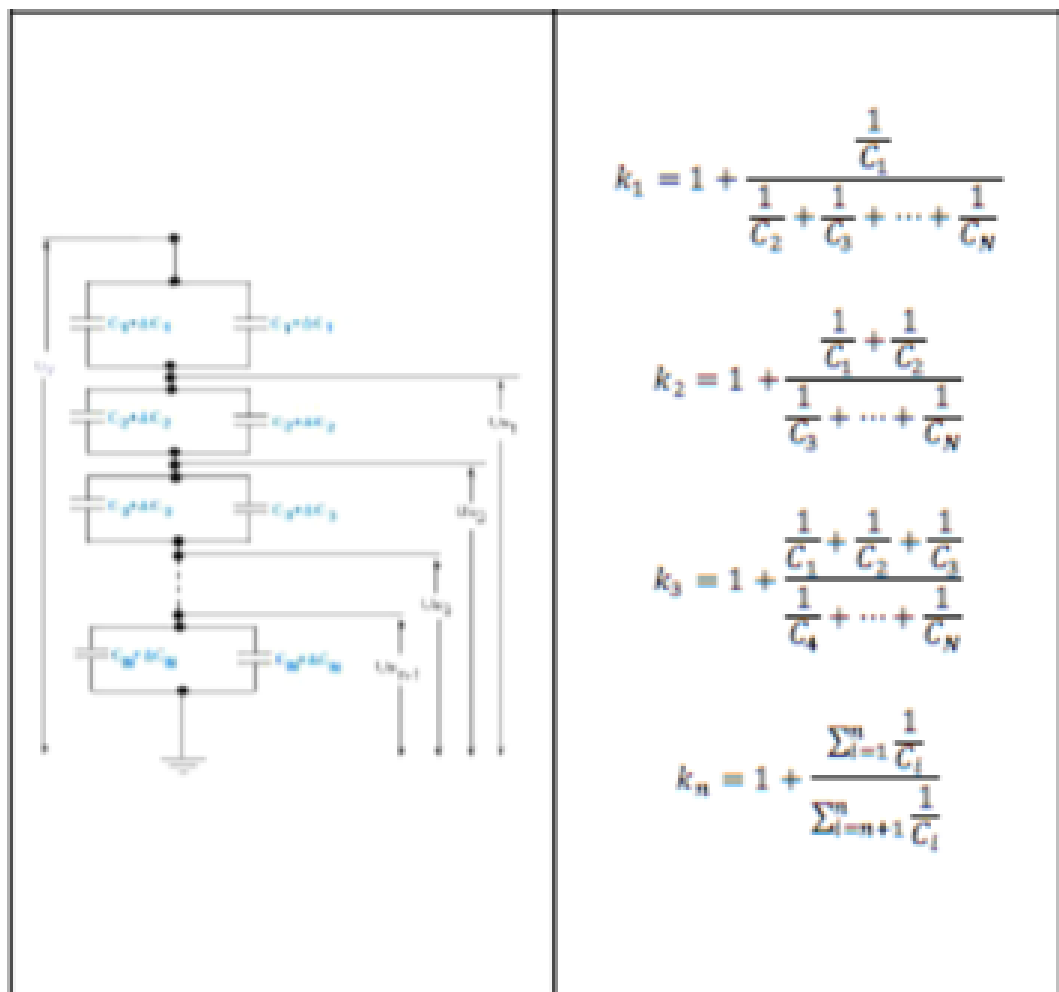
	$k = \frac{C_1 + 2C_2}{C_1}$
	$k = \frac{C_1 + NC_2^{N-1}}{C_1}$

(δ)

	$k = \frac{1 + RC}{RC}$
	$k = \frac{C_1 + C_2}{C_1}$

(ε)





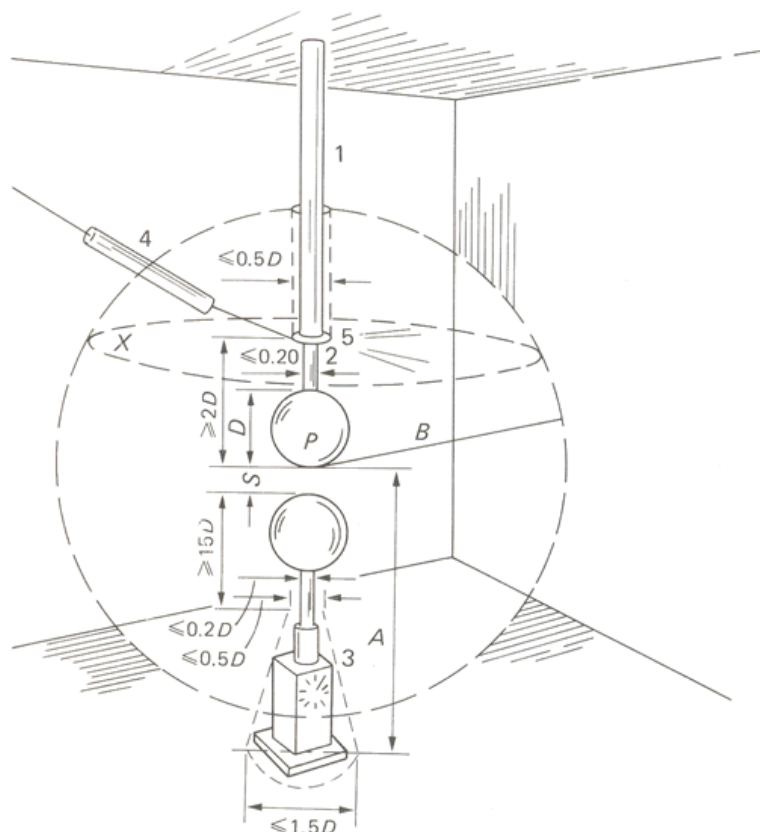
(στ)

Εικόνα 3-35 Συνηθισμένες συνδεσμολογίες 1-11 ωμικών και χωρητικών καταμεριστών τάσης [30] © Μελέτη και Σχεδίαση Καταμεριστών και Δοκιμών για το Νέο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά /Σταμούλιας Π. Γεώργιος

### 3.11.5 Μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω σφαιρικών διακένων

Ένας τρόπος μέτρησης κρουστικών Υ.Τ είναι με χρήση σφαιρικών διακένων και χρησιμοποιείται για τάσεις άνω των 10 kV. Εδώ το πλάτος της τάσης καθορίζεται από τα διάκενα σπινθηρισμού, είναι ένα αξιόπιστο και απλό σύστημα και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την βαθμονόμηση και άλλων μετρητικών διατάξεων. Στην Εικόνα 3-36 φαίνεται μια τυπική περίπτωση σφαιρικού διακένου μαζί με τα βασικά του χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι [31]:

- Μικρή απόσταση μεταξύ των σφαιρών.
- Οι διαστάσεις των σφαιρών και γενικότερα της διάταξης καθώς και οι διαστάσεις των ελεύθερων χώρων γύρω από αυτήν είναι αυστηρά καθορισμένες από τους κανονισμούς.
- Οι σφαίρες πρέπει να είναι λείες.
- Σημαντικός παράγοντας που πρέπει να ληφθεί υπόψιν είναι και η πυκνότητα του αέρα.



Εικόνα 3-36 Διάκενα σφαιρών [31] ©<https://slideplayer.gr/slide/6193101/>

Επιπρόσθετα, όταν χρησιμοποιείται σφαιρικό διάκενο με σφαίρες είτε μεγάλης διαμέτρου είτε μικρής διαμέτρου, αλλά ο αγωγός σύνδεσης με την έξοδο της γεννήτριας είναι μεγάλου μήκους, τότε θα πρέπει να συνδέεται σε σειρά με τη σφαίρα υψηλής τάσης και μια αντίσταση προστασίας τιμής μικρότερης των  $500 \Omega$  και μικρής αυτεπαγωγής (τυπικά  $<30 \mu\text{H}$ ). Η αντίσταση αυτή προορίζεται για τον περιορισμό αφενός των ανεπιθύμητων υπερτιθέμενων ταλαντώσεων στην επιβαλλόμενη τάση, οι οποίες μπορεί να οδηγήσουν σε σφάλματα κατά τη μέτρηση, αφετέρου δε της απότομης κατάρρευσης της τάσης κατά τη διάσπαση του διακένου [27].

Να σημειωθεί ότι, η τιμή της απόκλισης επηρεάζεται από την κατάσταση των σφαιρών, τη διαθεσιμότητα των αρχικών ηλεκτρονίων, την παρουσία σκόνης πάνω στην επιφάνεια των σφαιρών ή/και σωματιδίων στον αέρα αλλά και από την ίδια τη διαδικασία μέτρησης [27].

### 3.11.6 Μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω κρουστικού βολτομέτρου.

Η χρήση κρουστικών βολτομέτρων για τη μέτρηση των κρουστικών υψηλών τάσεων είναι μια σχετικά σύγχρονη διάταξη μέτρησης, που συνδυάζει παθητικά και ενεργά ηλεκτρονικά στοιχεία. Η προς μέτρηση κρουστική υψηλή τάση υποβιβάζεται μέσω ενός καταμεριστή τάσης γνωστού και σταθερού λόγου καταμερισμού. Η τάση εξόδου του καταμεριστή τάσης, η οποία αποτελεί την τάση εισόδου του κρουστικού βολτομέτρου, αποθηκεύεται μέσω ανορθωτικών διατάξεων και πυκνωτών και κατόπιν καταγράφεται σε ένα ψηφιακό όργανο ένδειξης. Το ψηφιακό όργανο βαθμονομείται κατάλληλα ώστε λαμβάνοντας υπόψη το λόγο καταμερισμού του καταμεριστή τάσης να δείχνει τη μετρηθείσα κρουστική τάση απευθείας σε kV ή MV [31].

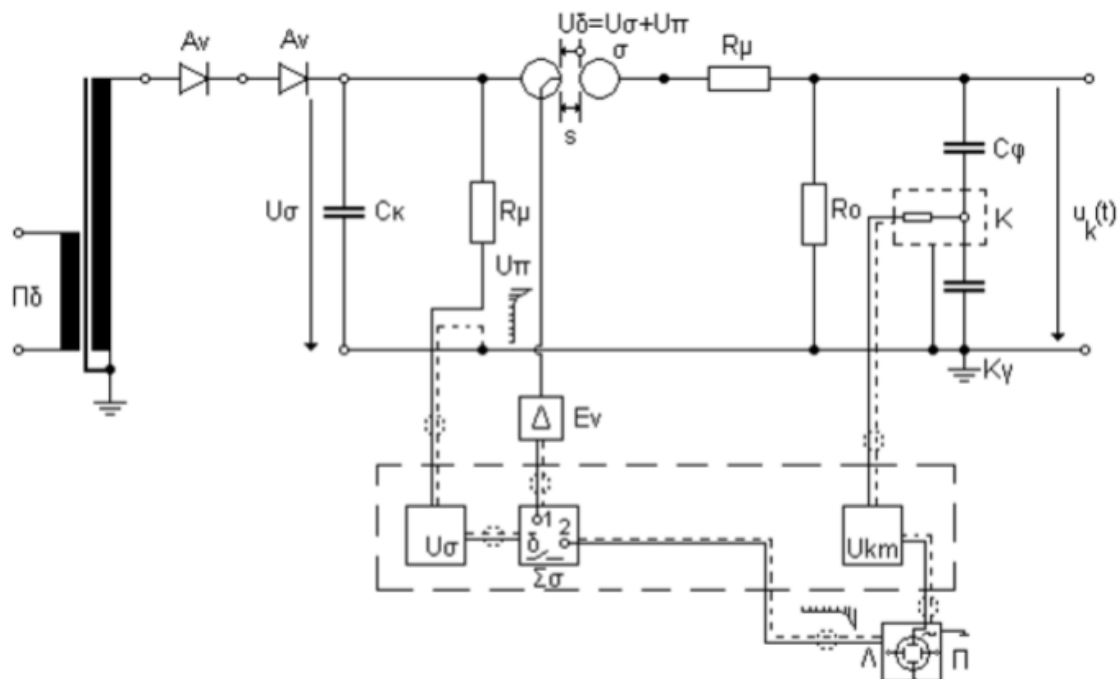
### 3.11.7 Μέτρηση τάσεων και ρευμάτων με παλμογράφο

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται, ο τρόπος μέτρησης υψηλών κρουστικών τάσεων με παλμογράφο.

Στην μονοβάθμια γεννήτρια της Εικόνα 3-37, η μία από τις δύο σφαίρες του σπινθηριστή  $\sigma$  φέρει ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο εφάπτεται στην εσωτερική μεταλλική επιφάνεια της σφαίρας. Το βοηθητικό αυτό ηλεκτρόδιο συνδέεται, μέσω του ενισχυτή τάσης "Εν" με την γεννήτρια σημάτων "Σσ", η οποία παράγει παλμούς χαμηλής τάσης κρουστικής μορφής. Προκειμένου να μπορέσει να αποκτηθεί κρουστική υψηλή τάση στα άκρα εξόδου της γεννήτριας κρουστικών τάσεων, σε επιθυμητές χρονικές στιγμές είναι αναγκαία η τοποθέτηση της πρόσθετης διάταξης "βοηθητικό ηλεκτρόδιο ενισχυτής τάσης - παλμογεννήτρια"[25].

Αν  $U_{\delta}$  είναι η τάση διασπάσεως του σπινθηριστή  $\sigma$  που αντιστοιχεί σε συγκεκριμένη απόσταση των σφαιρών του, θα πρέπει να επιβληθεί μια τάση φόρτισης του πυκνωτή κρούσης  $C_k$  (η οποία τάση θα επιβάλλεται και μεταξύ των σφαιρών του  $\sigma$ ) η οποία θα είναι συνεχής τάση, συμβολίζεται με  $U_{\sigma}$  και είναι μικρότερη της  $U_{\delta}$ . Ισχύει δηλαδή η ανισότητα  $U_{\sigma} < U_{\delta}$ . Εφ' όσον ισχύει η σχέση αυτή, είναι αδύνατη η διάσπαση του σπινθηριστή και συνεπώς είναι αδύνατη η εκφόρτιση της κρουστικής γεννήτριας, οπότε δεν παράγεται κρουστική τάση στην έξοδο της [25].

Για να γίνει διάσπαση του σπινθηριστή, ώστε να επακολουθήσει, εκφόρτιση της κρουστικής γεννήτριας και επομένως παραγωγή κρουστικής τάσης, πρέπει στη συνεχή τάση  $U_{\sigma}$  η οποία επικρατεί στα άκρα του σπινθηριστή, να προστεθεί και μία άλλη τάση μεγέθους  $U_{\pi}$ , υπό μορφή παλμού, σε τρόπο ώστε για το σύντομο χρονικό διάστημα που διαρκεί ο παλμός να ισχύει η ανισότητα  $U_{\sigma} + U_{\pi} \geq U_{\delta}$  [25].



Εικόνα 3-37 Κύκλωμα μονοβάθμιας γεννήτριας κρουστικής τάσης [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

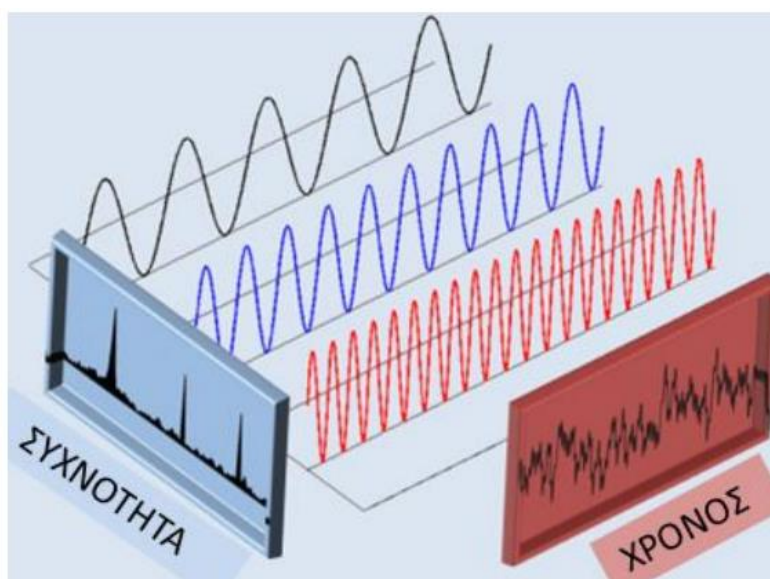
Εφόσον ισχύσει η παραπάνω σχέση, πραγματοποιείται διάσπαση του σπινθηριστή, η κρουστική γεννήτρια εκφορτίζεται, και στα άκρα εξόδου της εμφανίζεται η κρουστική τάση  $u_k = u_k(t)$ . Αν η επιβολή της  $U_\pi$  διαρκεί χρόνο μικρότερο της διάρκειας της κρουστικής τάσης, τότε μόλις εκφορτιστεί πλήρως η κρουστική γεννήτρια (δηλαδή μόλις συμπληρωθεί η παραγωγή ενός κρουστικού κύματος τάσης), είναι αδύνατη η εκ νέου παραγωγή κρουστικής τάσης και τούτο γιατί στα άκρα του σπινθηριστή επικρατεί η τάση  $U_\sigma$ , άρα και πάλι ισχύει η σχέση  $U_\sigma < U_\delta$  και συνεπώς δεν είναι δυνατή η διάσπαση του σπινθηριστή ώστε να είναι δυνατή η επανάληψη του προαναφερθέντος κύκλου και η παραγωγή δεύτερου κρουστικού κύματος τάσης. Για να γίνει αυτό πρέπει στα άκρα του σπινθηριστή να επιβληθεί πάλι για πολύ σύντομο χρονικό διάστημα η πρόσθετη τάση μεγέθους  $U_\pi$ , ώστε να ισχύσει εκ νέου η σχέση  $U_\sigma + U_\pi \geq U_\delta$ , να διασπαστεί ο σπινθηριστής και να επαναληφθεί ο κύκλος εκφόρτισης της κρουστικής γεννήτριας που θα οδηγήσει στην παραγωγή δεύτερης κρουστικής τάσης [25].

## 4 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup> : Ανάλυση Fourier και μετασχηματισμός Fourier.

### 4.1 Εισαγωγή

Η αναπαράσταση των σημάτων μέσω μετασχηματισμού Fourier παίζει σημαντικό ρόλο, τόσο στην επεξεργασία σημάτων συνεχούς χρόνου, όσο και στην επεξεργασία σημάτων διακριτού χρόνου [4]. Η περιγραφή των σημάτων μπορεί να γίνει με δυο τρόπους, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-1:

- Περιγραφή στον χρόνο
- Περιγραφή στην συχνότητα



Εικόνα 4-1 Περιγραφή σημάτων στο πεδίο χρόνου και συχνότητας [32] © Σήματα και Συστήματα στο Πεδίο της Συχνότητας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Ανοιχτά ακαδημαϊκά μαθήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών /Αθανάσιος Ν. Σκόδρας, Γεώργιος Α. Βασκαντήρας

### 4.1 Εφαρμογή του Μετασχηματισμού Fourier

Στο πεδίο αυτό της συχνότητας γίνεται μελέτη στους τρόπους ανάπτυξης ενός σήματος σε σήματα μιας συχνότητας, δηλαδή σε άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων συγκεκριμένης συχνότητας [4].

Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί η έξοδος του συστήματος ως άθροισμα σημάτων που έχουν τις ίδιες συχνότητες με αυτές που περιέχει το σήμα εισόδου, των οποίων όμως το πλάτος και η φάση έχει υποστεί κάποια αλλαγή, που προκαλείται από το σύστημα. Η ανάλυση των σημάτων στο πεδίο της συχνότητας βασίζεται στην αναπαράσταση των σημάτων με μεταβλητή την συχνότητα [4].

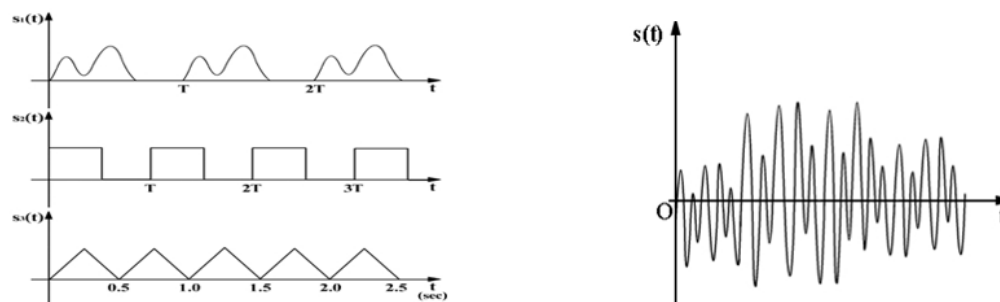
Η ανάλυση αυτή μπορεί να γίνει μέσω των σειρών Fourier και του μετασχηματισμού Fourier.

#### 4.1.1 Ανάλυση σήματος και εφαρμογές Fourier

Όπως έχει αναφερθεί, ένας τρόπος για την μετάβαση από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας μπορεί να γίνει μέσω της ανάλυση Fourier. Ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε περιοδικά όσο και σε μη περιοδικά σήματα.

Χαρακτηριστικά παραδείγματα αυτών των σημάτων φαίνονται στην Εικόνα 4-2. Όσον αφορά τον ορισμό των περιοδικών και μη περιοδικών σημάτων ισχύει:

1. Περιοδικό σήμα: Όταν επαναλαμβάνεται στο χρόνο, δηλαδή παίρνει μετά από συγκεκριμένο χρόνο τις ίδιες τιμές.
2. Μη περιοδικό σήμα: Τα τυχαία σήματα που δεν παρουσιάζουν επαναληπτικότητα.



Εικόνα 4-2 Παραδείγματα σημάτων α) περιοδικά σήματα και β) απεριοδικό σήμα [32] © Σήματα και Συστήματα στο Πεδίο της Συχνότητας, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Ανοικτά ακαδημαϊκά μαθήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών /Αθανάσιος Ν. Σκόδρας, Γεώργιος Α. Βασκαντήρας

Η συχνοτική αναπαράσταση των σημάτων και των συστημάτων είναι ιδιαίτερος χρήσιμη σε εφαρμογές τηλεπικοινωνιών και επεξεργασίας σήματος, όπως είναι για παράδειγμα η αφαίρεση του σήματος θορύβου, το φιλτράρισμα σημάτων, η διαμόρφωση σημάτων προκειμένου να μεταδοθούν, και η μετατροπή σήματος από αναλογική σε ψηφιακή μορφή μέσω δειγματοληψίας [4].

Ο μετασχηματισμός Fourier μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην ανάλυση σημάτων διακριτού χρόνου μέσω του Διακριτού Μετασχηματισμού Fourier (Discrete Fourier Transform – DFT). Στην πράξη, και λόγω της υπολογιστικής πολυπλοκότητας και των απαιτήσεων σε υλικό – hardware για τον υπολογισμό του DFT ενός σήματος, έχουν αναπτυχθεί ταχείς αλγόριθμοι υπολογισμού του. Ο πιο γνωστός αλγόριθμος είναι ο Γρήγορος Μετασχηματισμός Fourier (Fast Fourier Transform – FFT), που επιτρέπει την εύκολη και φθηνή υλοποίηση του σε hardware γενικού σκοπού, ακόμη και σε εφαρμογές πραγματικού χρόνου[4].

#### 4.1.2 Μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου

Στην πράξη δεν υπάρχουν περιοδικά σήματα επειδή δεν ικανοποιείται η προϋπόθεση της άπειρης διάρκειας τους. Ο μετασχηματισμός Fourier είναι μια επέκταση των σειρών Fourier που όπως ήδη αναφέρθηκε εφαρμόζεται τόσο σε περιοδικά όσο και σε απεριοδικά σήματα.

Αποδεικνύεται ότι οποιοδήποτε σήμα μπορεί να αναπτυχθεί στο διάστημα  $(-\infty, +\infty)$  μέσω του μετασχηματισμού Fourier ως ένας γραμμικός συνδυασμός άπειρων αρμονικών εκθετικών σημάτων. Στο μετασχηματισμό Fourier τα σήματα εκφράζονται με την βοήθεια μιγαδικών εκθετικών συναρτήσεων διαφόρων συχνοτήτων, και οι συχνοότητες είναι συνεχείς και όχι διακριτές [4].

Ως μετασχηματισμός Fourier συνεχούς χρόνου μια συνάρτησης  $x(t)$ , ορίζεται η μιγαδική συνάρτηση  $X(\omega)$  της πραγματικής μεταβλητής  $\omega$ , που δίνεται από τη σχέση [4]:

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (4.1)$$

με την προϋπόθεση ότι το ολοκλήρωμα υπάρχει.

Από τη συνάρτηση  $X(\omega)$  μπορεί εύκολα να προκύψει η αρχική συνάρτηση  $x(t)$  χρησιμοποιώντας την σχέση [4]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) \cdot e^{i\omega t} d\omega \quad (4.2)$$

η οποία ονομάζεται αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier.

Αν αντί της κυκλικής συχνότητας  $\omega$  χρησιμοποιηθεί ή γραμμική συχνότητα  $f$ , όπου  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  τότε ισχύει [4]:

$$x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i2\pi ft} dt \quad (4.3)$$

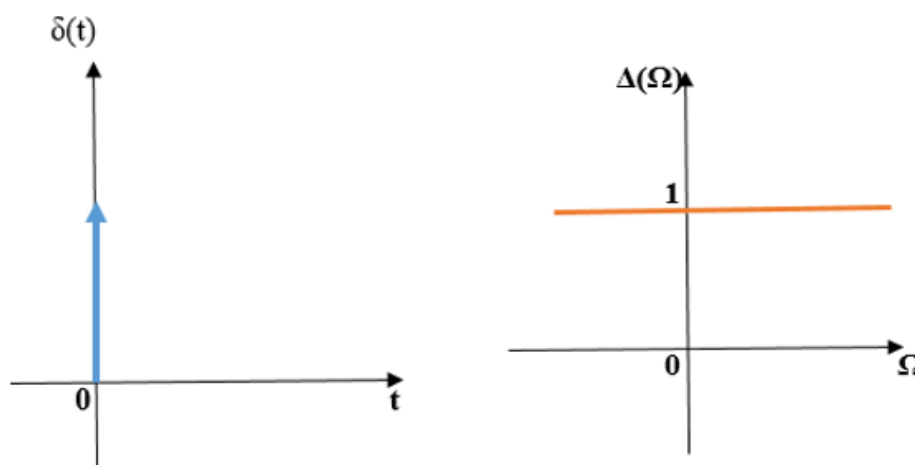
Και ο αντίστροφος μετασχηματισμός είναι :

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(f) \cdot e^{i2\pi ft} df \quad (4.4)$$

Ο μετασχηματισμός Fourier έχει νόημα για όλο το διάστημα χρόνου  $(-\infty, +\infty)$  και αναπαριστά περιοδικά και μη περιοδικά σήματα με την βοήθεια μιγαδικών εκθετικών σημάτων. Μέσω αυτού αναδεικνύεται το φασματικό περιεχόμενο των σημάτων. Το φάσμα που παράγεται από τον μετασχηματισμό Fourier είναι ένα συνεχές φάσμα περιοδικών εκθετικών σημάτων [4].

Στην παρούσα διπλωματική εξετάζονται τα μεταβατικά φαινόμενα στις εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων, ένα από τα οποία είναι και οι κρουστικές τάσεις. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαίο να δοθεί στη συνέχεια η φασματική ανάλυση της κρουστικής συνάρτησης  $\delta(t)$  σε θεωρητικό επίπεδο κάνοντας χρήση της ιδιότητας του μετασχηματισμού Fourier. Στην Εικόνα 4-3 φαίνεται η κρουστική συνάρτηση στο πεδίο του χρόνου αλλά και στο πεδίο της συχνότητας.

$$\Delta(\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) \cdot e^{-i\Omega t} dt = e^0 = 1$$



Εικόνα 4-3 α) Κρουστική συνάρτηση  $\delta(t)$  στο πεδίο του χρόνου και β) Ο μετασχηματισμός Fourier της κρουστικής συνάρτησης  $\delta(t)$  [4] ©Σήματα και Συστήματα, Εκδόσεις Τζιόλας/ Μιχάλης Παρασκευάς

## 4.2 Μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου

Ο μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (Discrete Time Fourier Transform – DTFT ) προσφέρει έναν αποδοτικό τρόπο υπολογισμού της εξόδου ενός συστήματος διακριτού χρόνου, καθώς μετατρέπει την υπολογιστικά δύσκολη πράξη της συνέλιξης σημάτων διακριτού χρόνου, στην υπολογιστική απλή πράξη του πολλαπλασιασμού [4].

Ο ευθύς μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου ενός σήματος διακριτού χρόνου  $x[n]$  με περίοδο  $2\pi$ , υπολογίζεται από την σχέση [4]:

$$X(e^{i\omega}) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x(n) \cdot e^{-in\omega} \quad (4.5)$$

Ο αντίστροφος μετασχηματισμός Fourier διακριτού χρόνου (Inverse DTFT - IDTFT) παράγει την ακολουθία  $x[n]$  όταν είναι γνωστή η συνάρτηση  $X(e^{i\omega})$ , σύμφωνα με την σχέση [4]:

$$x(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} X(e^{i\omega}) \cdot e^{in\omega} d\omega \quad (4.6)$$

Στον αντίστροφο DTFT ισχύουν οι συχνότητες στο διάστημα  $-\pi < \omega < +\pi$  [4].

Ο DTFT βρίσκει εφαρμογή στην ανάλυση σημάτων και συστημάτων διακριτού χρόνου. Χαρακτηριστικές εφαρμογές είναι [4]:

- Ο υπολογισμός της απόκρισης συχνότητας ενός γραμμικού και αμετάβλητου, κατά τη μετατόπιση, συστήματος που περιγράφεται από μια εξίσωση διαφορών
- Ο υπολογισμός συνέλιξεων
- Η σχεδίαση αντίστροφων συστημάτων.

## 4.3 Διακριτός μετασχηματισμός Fourier

Έχει αναφερθεί ότι για τον μετασχηματισμό Fourier διακριτού χρόνου η συνάρτηση  $X(e^{i\omega})$ , που παράγει ο DTFT, είναι μια συνεχής και περιοδική συνάρτηση που υπολογίζεται στο διάστημα συχνοτήτων  $(-\pi, +\pi)$  για άπειρες τιμές. Επιπλέον ο αντίστροφος DTFT υπολογίζεται με την χρήση ολοκληρώματος [4].

Οι λόγοι αυτοί καθιστούν τον DTFT ακατάλληλο για υπολογισμό με την χρήση ενός υπολογιστή ή ενός ψηφιακού επεξεργαστή σήματος [4].

Για το λόγο αυτό, για την επίλυση του προβλήματος, αναπτύχθηκε ο Διακριτός Μετασχηματισμός Fourier ( Discrete Fourier Transform – DFT), ο οποίος για ένα σήμα τιμών παράγει μια ακολουθία τιμών (φάσμα) σε ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες [4].

Ο υπολογισμός τόσο του ευθύ όσο και του αντίστροφου DFT είναι ιδιαίτερα εύκολος, μέσω ενός αλγορίθμου που ονομάζεται γρήγορος μετασχηματισμός Fourier, ο οποίος οδηγεί σε θεαματική μείωση του πλήθους πράξεων που απαιτούνται για τον υπολογισμό του [4].

Ο DFT ενός διακριτού σήματος μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης [4]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-i\frac{2\pi}{N}nk} , \quad 0 \leq k \leq N - 1, \quad (4.7)$$

Η ακολουθία  $X(k)$  ονομάζεται διακριτός μετασχηματισμός Fourier  $N$  σημείων της ακολουθίας  $x[n]$ .

Αντίστοιχα, για τον αντίστροφο DFT ισχύει η σχέση [4]:



$$x[n] = \frac{1}{N} \int_{\kappa=0}^{N-1} X[\kappa] \cdot e^{i\frac{2\pi}{N}nk} , \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (4.8)$$

Θέτοντας  $W_n = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$ , όπου  $W_n$  ο παράγοντας φάσης, προκύπτουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} \{x(n) \cdot W_n^{nk}\} , \quad 0 \leq k \leq N - 1 \quad (4.9)$$

και:

$$x[n] = \frac{1}{N} \int_{\kappa=0}^{N-1} X[\kappa] \cdot W_n^{nk} , \quad 0 \leq n \leq N - 1 \quad (4.10)$$

Εξαιτίας του όρου  $e^{-i\frac{2\pi}{N}}$  η ακολουθία  $X[\kappa]$  είναι περιοδική, με περίοδο ίση με το πλήθος  $N$  των δειγμάτων της ακολουθίας  $x[n]$ . Τα δείγματα της  $X[\kappa]$  ξεκινούν από  $\kappa=0$  που αντιστοιχεί στην συχνότητα  $\omega=0$ , και φθάνουν έως  $\kappa=N-1$ , ενώ δεν περιλαμβάνουν το  $\kappa=N$  που αντιστοιχεί στη συχνότητα  $\omega=2\pi$  και περιλαμβάνεται στην επόμενη περίοδο [4].

#### 4.4 Γρήγορος μετασχηματισμός Fourier ( FFT )

Όπως αναφέρθηκε, ο διακριτός μετασχηματισμός Fourier έχει ορισμένα χαρακτηριστικά που τον καθιστούν πολύτιμο για τις εφαρμογές της ψηφιακής επεξεργασίας σημάτων. Διαθέτει ιδιότητες όπως αυτές της συμμετρίας και της περιοδικότητας του παράγοντα φάσης, που οδηγούν σε αλγόριθμους ταχείας υλοποίησης του, όπως ο FFT που προτάθηκε το 1965 από τους Cooley και Tukey [33].

Σύμφωνα με τον ορισμό του, ο DFT  $N$ -σημείων μιας ακολουθίας  $x[n]$   $N$  σημείων, (οπού  $W_n = e^{-i\frac{2\pi}{N}}$ ), μπορεί να υπολογιστεί μέσω της σχέσης [4]:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_n^{nK} = x[0] \cdot W_n^{0K} + x[1] \cdot W_n^{1K} + \dots + x[N-1] \cdot W_n^{(N-1)K} \quad (4.11)$$

, με  $k = 0, 1, \dots, N - 1$

Είναι εμφανές ότι για τον υπολογισμό κάθε σημείου  $X[\kappa]$  απαιτούνται  $N$  στο πλήθος μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί και  $(N-1)$  μιγαδικές προσθέσεις. Επομένως, για τον υπολογισμό όλων των  $N$  τιμών του DFT απαιτούνται  $N^2$  μιγαδικοί πολλαπλασιασμοί και  $N \cdot (N-1) \approx N^2$  μιγαδικές προσθέσεις [4].

Ακόμη, για την αποθήκευση των παραγόντων φάσης  $W_n^{nk}$  απαιτούνται  $N^2$  θέσεις μνήμης. Επομένως το υπολογιστικό κόστος του DFT είναι  $N^2$  και είναι απαγορευτικά υψηλό για μεγάλες τιμές του  $N$  [4].

Για το λόγο αυτό έχουν προταθεί και χρησιμοποιούνται στρατηγικές κατασκευής αλγορίθμων υπολογισμού  $N$  σημείων. Αυτό μπορεί να γίνει με την διάσπαση της ακολουθίας  $x[n]$  των  $N$  σημείων, σε 2 επιμέρους ακολουθίες  $x_1[n]$  και  $x_2[n]$  μήκους  $N/2$  σημείων η κάθε μία [4].

Ο DFT N/2 σημείων έχει υπολογιστικό κόστος N<sup>2</sup>/4 και για τις 2 ακολουθίες. Επομένως, το κόστος είναι μικρότερο για N/2 σημεία DFT. Συνεπώς, το ζητούμενο είναι να βρεθεί ένας τρόπος υπολογισμού του DFT N σημείων από τον DFT N/2 σημείων. Ακολούθως, ο DFT N/2 σημείων μπορεί να διασπαστεί σε DFT N/4 σημείων και να συνεχίσει αυτός ο κύκλος διάσπασης των σημείων, στη λογική του «διαίρει και βασίλευε». Οι πιο δημοφιλείς τεχνικές για την υλοποίηση του FFT είναι [4]:

- Η διαίρεση στο χρόνο (Decimation in Time )
- Η διαίρεση στην συχνότητα (Decimation in Frequency).

Στην Εικόνα 4-4 δίνονται κάποια χρήσιμα ζεύγη μεταφοράς των σημάτων από το πεδίο του χρόνου στο πεδίο της συχνότητας, με χρήση του μετασχηματισμού Fourier [32].

Χρήσιμα Ζεύγη Μετασχηματισμών Fourier	
Σήμα x(t)	MF X(Ω)
$\delta(t)$	1
1	$2\pi\delta(\Omega)$
$u(t)$	$\frac{1}{j\Omega} + \pi\delta(\Omega)$
$\delta(t - t_0)$	$e^{-j\Omega t_0}$
$e^{j\Omega_0 t}$	$2\pi\delta(\Omega - \Omega_0)$
$\cos \Omega_0 t$	$\pi[\delta(\Omega - \Omega_0) + \delta(\Omega + \Omega_0)]$
$\sin \Omega_0 t$	$\frac{\pi}{j}[\delta(\Omega - \Omega_0) - \delta(\Omega + \Omega_0)]$
$\begin{cases} 1, &  t  < T/2 \\ 0, &  t  > T/2 \end{cases}$	$T \frac{\sin(\frac{\Omega T}{2})}{\frac{\Omega T}{2}}$
$\frac{\sin \Omega_0 t}{\pi t}$	$\begin{cases} 1, &  \Omega  < \Omega_0 \\ 0, &  \Omega  > \Omega_0 \end{cases}$
$e^{-at}u(t), \text{Re}(a) > 0$	$\frac{1}{j\Omega + a}$
$te^{-at}u(t), \text{Re}(a) > 0$	$\frac{1}{(j\Omega + a)^2}$
$\frac{t^{n-1}}{(n-1)!}e^{-at}u(t), \text{Re}(a) > 0$	$\frac{1}{(j\Omega + a)^n}$

Εικόνα 4-4 Χρήσιμες ιδιότητες μετασχηματισμού Fourier [32] © Σήματα και Συστήματα στο Πεδίο της Συχνότητας, Τμήμα Η&ΗΜ, Διπλωματική Εργασία, Νικόλαος Σούμας.

## 5 Κεφάλαιο 5<sup>ο</sup> : Ρύθμιση και δοκιμή της κάρτας μετρήσεων Octurus CompuScope

Για την εκπόνηση αυτής τη διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε η κάρτα μετρήσεων (η οποία περιέχει και μετατροπείς αναλογικού σήματος σε ψηφιακό ADCs) Octurus CompuScope 8229 128 MB μνήμη της εταιρίας GAGE APPLIED TECHNOLOGIES. Ο μετατροπέας αυτός έχει την μορφή κάρτας επέκτασης υπολογιστή και συνδέεται με μέσω ενός PCI SINGLE-SLOT full length. Η ταχύτητα δειγματοληψίας είναι 125Ms/s, ενώ η ανάλυση μετρήσεων (resolution) είναι 12 bit. Η κάρτα έχει ακόμη τη δυνατότητα αποθήκευσης των δεδομένων σε ενσωματωμένη μνήμη η οποία έχει μέγεθος 64MB.

### 5.1 Εισαγωγή

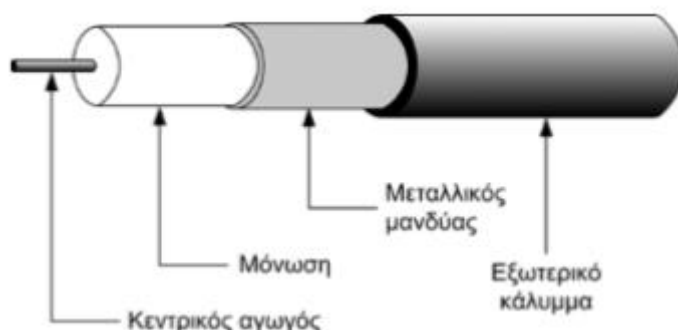
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται αναλυτικά οι διαδικασίες και οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος GaGescape της κάρτας μετρήσεων Octurus CompuScope 8229.

Αφού γίνει σωστά η εγκατάσταση του μετρητικού συστήματος και των hardware τμημάτων στον ηλεκτρονικό υπολογιστή, και αφού προηγηθούν κάποιες απαραίτητες ενέργειες για την εγκατάσταση και χρήση του software και των προγραμμάτων της κάρτας, τότε το σύστημα θα είναι σε θέση να μετρά αξιόπιστα.

Συγκεκριμένα, ενδιαφέρον έχει η δυνατότητα του συστήματος για μέτρηση κρουστικών σημάτων όπως είναι οι κρουστικές υψηλές τάσεις. Η διάταξη θα υλοποιηθεί στο Εργαστήριο υψηλών τάσεων και ενεργειακών συστημάτων του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

**Το πρώτο μέρος** του κεφαλαίου αυτού αφορά τις μετρήσεις και τη χρήση της κάρτας με τη βοήθεια μιας γεννήτριας σημάτων μεγάλου εύρους συχνοτήτων και αυτό για την εξοικείωση της χρήσης της κάρτας υπό ασφαλείς συνθήκες και την απόδειξη της σωστής λειτουργίας της.

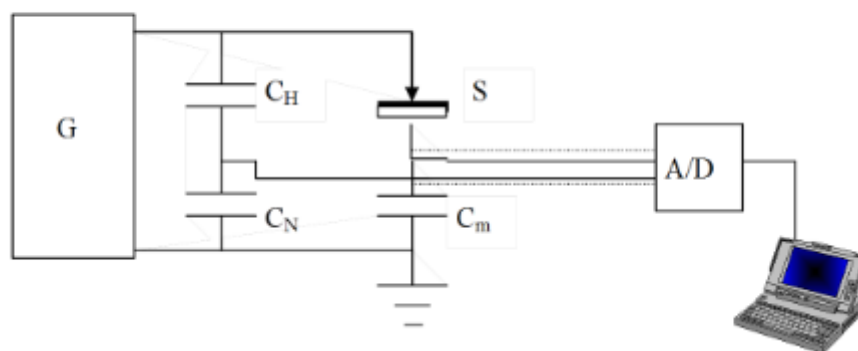
**Το δεύτερο μέρος** του κεφαλαίου αφορά στη μελέτη του συστήματος μέτρησης κρουστικών τάσεων σε πραγματικό εξοπλισμό, για μελλοντική υλοποίηση και χρήση από το ερευνητικό εργαστήριο Υψηλών Τάσεων και Ενεργειακών Συστημάτων.



Εικόνα 5-1 Ομοαξονικό καλώδιο [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

Μια γενική περιγραφή των συστημάτων μέτρησης κρουστικών τάσεων δίνεται στη συνέχεια. Ο πιο συνηθισμένος και πλήρης τρόπος για τον προσδιορισμό της

κυματομορφής μιας κρουστικής υψηλής τάσης είναι η μείωσή της τάσης μέσω ενός καταμεριστή τάσης, και στην συνέχεια η λήψη της από έναν ψηφιακό παλμογράφο. Το σήμα που μετριέται μεταφέρεται από την πλευρά της χαμηλής τάσεως του καταμεριστή στον παλμογράφο, μέσω ενός ομοαξονικού καλωδίου, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-1. Στην βασική διάταξή που μελετάται στην παρούσα διπλωματική, ο παλμογράφος αντικαθίσταται με ένα υπολογιστή στον οποίο είναι εγκατεστημένη η κάρτα μέτρησης, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-2.



Εικόνα 5-2 Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα της διάταξης μέτρησης κατά την καταπόνηση των στερεών ηλεκτρομονωτικών υλικών [25] © Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής / Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος

Στη βασική διάταξη μέτρησης της Εικόνα 5-2 μπορούν να αναγνωριστούν τα ακόλουθα λειτουργικά και μετρητικά στοιχεία [25]:

- G: Η γεννήτρια κρουστικών ή εναλλασσόμενων τάσεων,
- CH και CN: Ο χωρητικός καταμεριστής της εφαρμοζόμενης υψηλής τάσης
- S: Το δοκίμιο ως προς μέτρηση
- Cm: Ο πυκνωτής μέτρησης
- A/D: Ο αναλογικός – ψηφιακός μετατροπέας, δηλαδή η κάρτα μετρήσεων GageScope

## 5.2 Ρύθμιση και δοκιμή της κάρτας με γεννήτρια σημάτων

Σε αυτό το στάδιο γίνεται πραγματοποίηση μετρήσεων οι οποίες έχουν σκοπό την απόδειξη της σωστής ρύθμισης και λειτουργικότητας της κάρτας μετρήσεων compscope που έχει εγκατασταθεί και ρυθμιστεί. Τα σήματα προς μέτρηση ρυθμίζονται ως προς την συχνότητα και το πλάτος και στέλνονται από τη γεννήτρια σημάτων, ενώ στην συνέχεια λαμβάνονται στην κάρτα μετρήσεων σε αναλογική μορφή. Η κάρτα είναι υπεύθυνη σε πρώτη φάση για την ψηφιοποίηση του σήματος, ενώ παρέχει τη δυνατότητα να γίνεται αυτόματος FFT μετασχηματισμός ώστε μέσω του μετασχηματισμού και της αναπαράστασης του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, να είναι εφικτή η ανάλυση η μελέτη και ο εντοπισμός του φάσματος των συχνοτήτων που υπάρχουν στο σήμα εισόδου.

Όπως έχει αναφερθεί οι γεννήτριες σημάτων είναι όργανα εργαστηρίου, που είναι ικανά να παράγουν μια ποικιλία από επαναλαμβανόμενες κυματομορφές.

Η βασική κυματομορφή που μπορεί να παράγει μια γεννήτρια σήματος είναι η ημιτονοειδής, ενώ έχει τη δυνατότητα να παράγει κι άλλες επαναλαμβανόμενες κυματομορφές όπως πριονωτή, τριγωνική και τετραγωνική.

Μαζί με την επιλογή της κυματομορφής, στη γεννήτρια σήματος υπάρχουν και οι επόμενες ρυθμίσεις, όπως:

- **Συχνότητα:** Με αυτή την επιλογή καθορίζεται η συχνότητα της κυματομορφής.
- **Πλάτος κυματομορφής:** Με αυτή την επιλογή ορίζεται το μέγεθος του σήματος εξόδου. Το πλάτος είναι το ύψος του ημιτόνου, η διακύμανση ή η από κορυφή σε κορυφή πλάτος (peak – peak) είναι το διπλάσιο του πλάτος (ύψος μεταξύ αρνητικής και θετικής τιμής).
- **DC offset:** Με την επιλογή αυτή καθορίζεται η μέση τιμή της κυματομορφής ως προς την τάση μηδέν, δηλαδή επιτρέπει να προστεθεί στο αρχικό σήμα μια dc συνιστώσα αλλάζοντας την μορφή της ή μεταβάλλοντας την σε σχέση με την τάση μηδέν ή ακόμη μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ δύο σημάτων.
- **Duty cycle:** Με την επιλογή αυτή ορίζεται ο λόγος της διάρκειας του θετικού παλμού του σήματος προς την περίοδο του σήματος επί της εκατό. Αν για παράδειγμα το Duty cycle είναι 50% σημαίνει ότι η διάρκεια του θετικού και του αρνητικού παλμού είναι ίσες. Αν αυξηθεί το duty cycle +25% τότε σημαίνει ότι η διάρκεια του θετικού παλμού είναι τριπλάσια από του αρνητικού.

Τα σήματα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν προς μέτρησης στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής είναι:

- Ημιτονικό σήμα (sine signal)
- Τετραγωνικό σήμα (square signal)
- Κρουστικό σήμα (inpulse signal)

### 5.2.1 Μέτρηση ημιτονικού σήματος

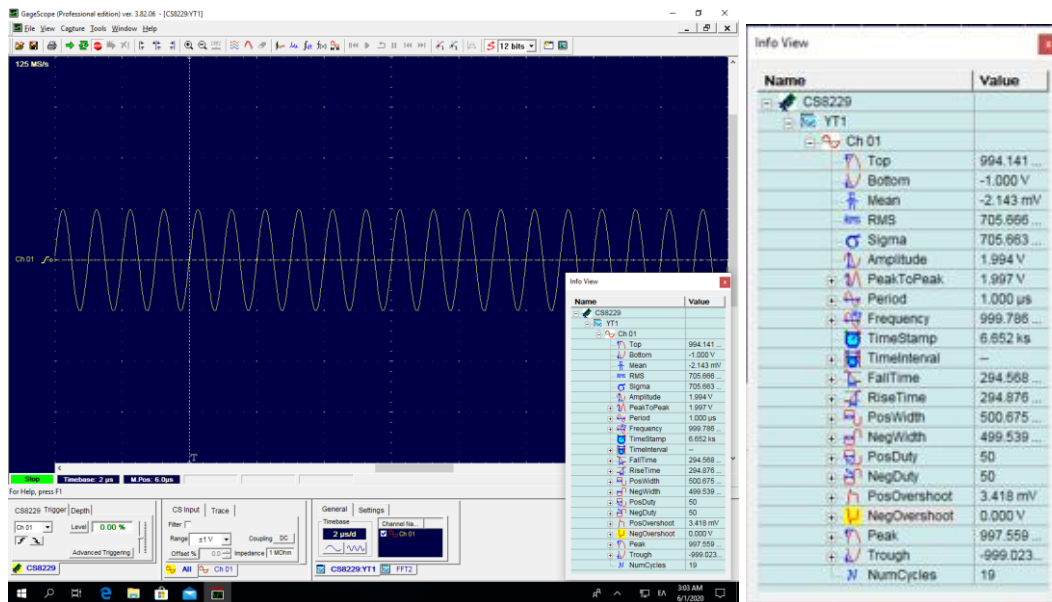
Για την πραγματοποίηση της μέτρησης του ημιτονικού σήματος, επιλέγεται από την γεννήτρια σημάτων η επιλογή 'sine' και στην συνέχεια ορίζονται οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους του σήματος.

Έτσι, τα χαρακτηριστικά του ημιτονικού σήματος είναι τα εξής :

- Συχνότητα 1 Mhz.
- Πλάτος  $V_p-p = 2 \text{ Volt peak-peak}$ .

Στην Εικόνα 5-3 φαίνεται το αποτέλεσμα της μέτρησης του αναλογικού ημιτονικού σήματος μαζί με τα αναλυτικά στοιχεία του σήματος που αποκτήθηκε σε συγκεκριμένο χρόνο. Τα στοιχεία αυτά μεταβάλλονται με τον χρόνο έχοντας ελάχιστες ή μηδαμινές αποκλίσεις.

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

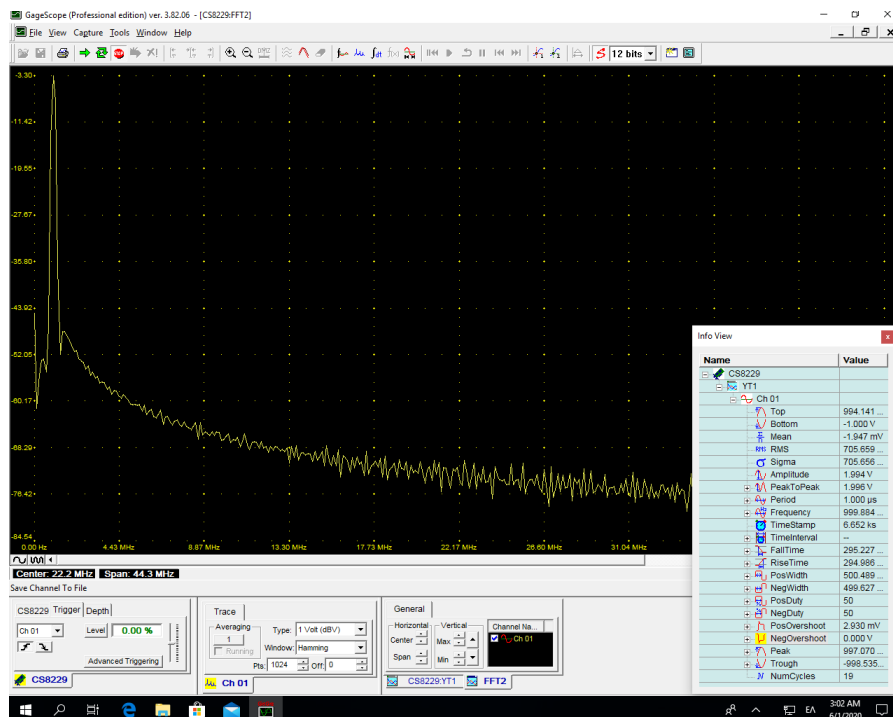


Εικόνα 5-3 Μέτρηση του ημιτονικού σήματος.

Σύμφωνα με την παραπάνω μέτρηση (σχηματικά) και τις πληροφορίες που παρέχονται από το παραθύρου info view, αποδεικνύεται σε πρώτη φάση η σωστή λειτουργία και ρύθμιση του συστήματος μέτρησης.

Έτσι, για το ημιτονικό σήμα η τιμή κορυφής  $V_{\text{peak-to-peak}} = 1,997\text{V} \approx 2\text{V}$ . Η συχνότητα είναι ίση με  $999.786\text{ KHz} \approx 1\text{ Mhz}$  και η περίοδος  $T=1/f = 1\mu\text{s}$ .

Ακόμη, ο πίνακας αυτός περιέχει τιμές όπως ο χρόνος ανύψωσης (Rise Time), ο χρόνος πτώσης (Fall Time), όπως επίσης και η ενεργός τιμή της τάσης (RMS).



Εικόνα 5-4 Ο μετασχηματισμός fourier του ημιτονικού σήματος

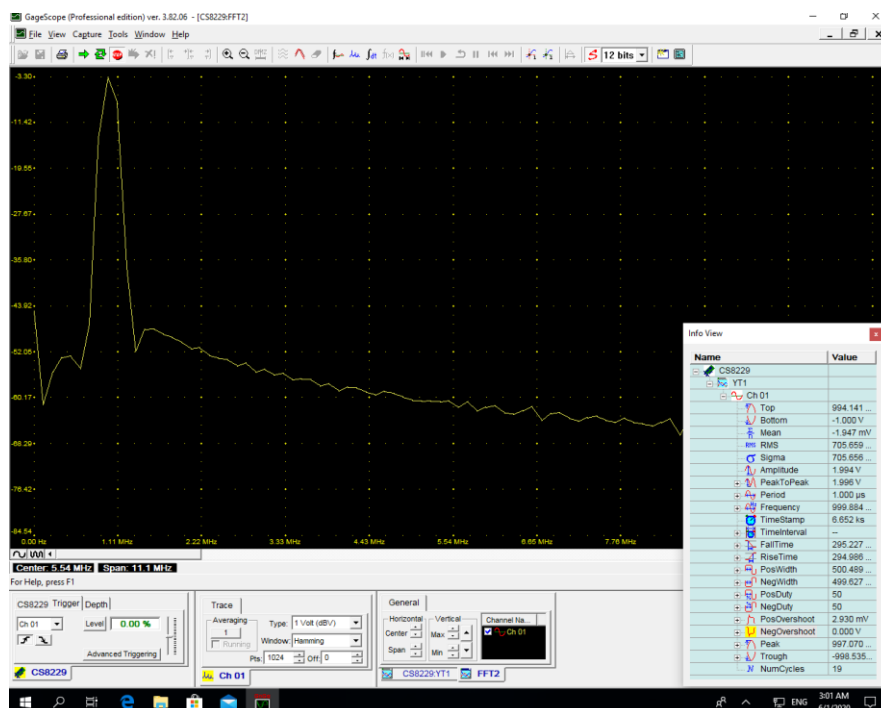
Η ενεργός τιμή της εναλλασσόμενης τάσης ή rms (root mean square) ορίζεται ως η τιμή συνεχούς τάσης που παράγει την ίδια μέση ισχύ με την εναλλασσόμενη.

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

$$V_{rms} = \frac{V_{max}}{\sqrt{2}} = 705,66 \text{ mV} \quad (5,1)$$

Φυσικά, αν υπήρχε και άλλο σήμα προερχόμενο από το δεύτερο κανάλι θα εμφανιζόταν και αυτό μαζί με τα χαρακτηριστικά του.

Στην Εικόνα 5-4 δίνεται ο μετασχηματισμός Fourier του σήματος σε μεγάλο εύρος συχνοτήτων και στην Εικόνα 5-5 ο ίδιος μετασχηματισμός εστιασμένος στην συχνότητα που παρουσιάζει την μέγιστη τιμή.



Εικόνα 5-5 Ο μετασχηματισμός Fourier του ημιτονικού σήματος σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων

Όπως παρατηρείται οι τιμές στο παράθυρο info view δεν έχουν μεταβληθεί που είναι και λογικό. Ακόμη μέσω του μετασχηματισμού Fourier και την αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας, είναι εφικτή η μελέτη και ο εντοπισμός του φάσματος των συχνοτήτων που υπάρχουν στο σήμα εισόδου. Έτσι όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-5 η μέγιστη συχνότητα του σήματος που δόθηκε από την γεννήτρια είναι στα 1 Mhz ενώ στο υπόλοιπο φάσμα συχνοτήτων πρακτικά δεν υπάρχει κάποιο φασματικό περιεχόμενο.

### 5.2.2 Μέτρηση τετραγωνικού σήματος

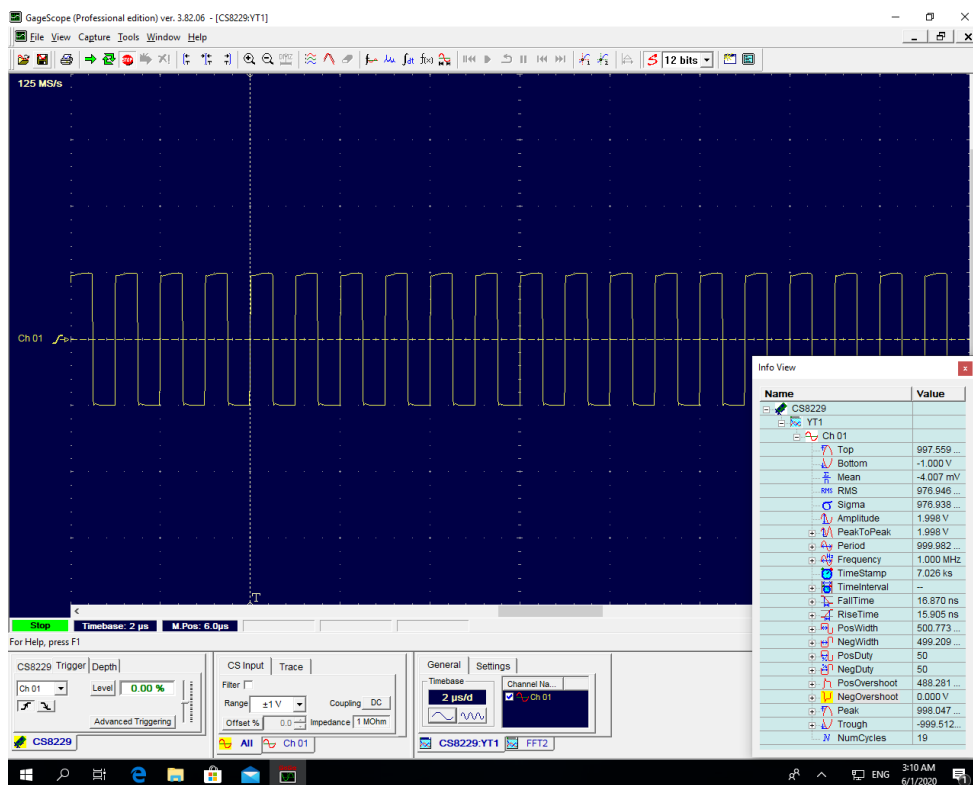
Για την πραγματοποίηση της μέτρησης του τετραγωνικού σήματος, επιλέγεται από την γεννήτρια σημάτων η επιλογή 'square' και στην συνέχεια ορίζονται οι τιμές της συχνότητας και του πλάτους του σήματος.

Έτσι, τα χαρακτηριστικά του τετραγωνικού σήματος που δόθηκαν είναι τα εξής :

- Συχνότητα 1 Mhz.
- Πλάτος  $V_{p-p} = 2 \text{ Volt}$

Στην Εικόνα 5-6 φαίνεται η επιτυχημένη απόκτηση του αναλογικού σήματος μέσω του μετρητικού συστήματος της κάρτας μαζί με τα χαρακτηριστικά του σήματος.

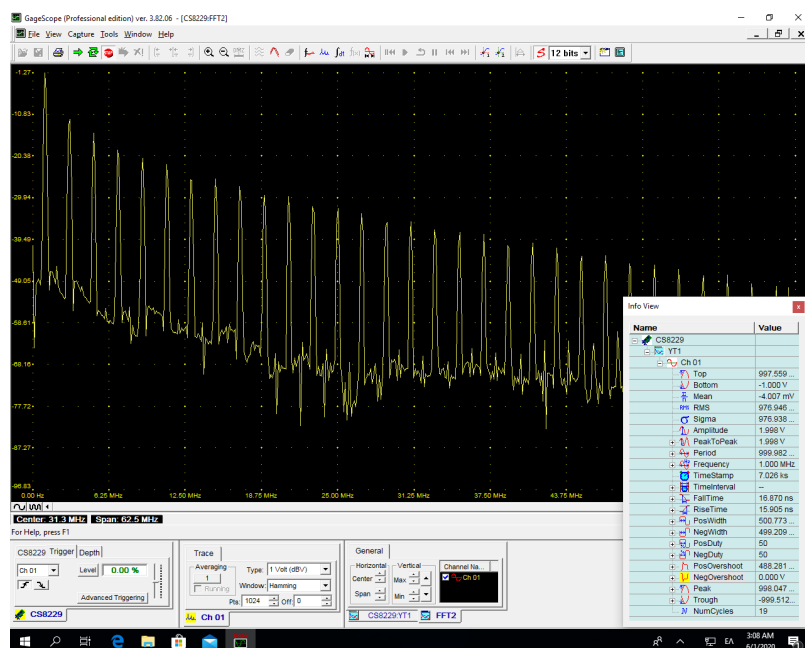
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 5-6 Μέτρηση του τετραγωνικού σήματος.

Έτσι, για την τετραγωνική κυματομορφή η τιμή από κορυφή σε κορυφή του σήματος είναι στα 1,998V. Η συχνότητα είναι ίση με 1 Mhz και η περίοδος  $T=1/f \approx 1\mu s$ .

Για την ενεργό τιμή της τάσης στις τετραγωνικές κυματομορφές υπάρχει η διαφορά ότι αυτή είναι ίση με το πλάτος, αφού να μεν η τάση εναλλάσσεται από θετικές σε αρνητικές τιμές αλλά η απόλυτη τιμή του πλάτους μένει σταθερή. Είναι δηλαδή,  $V_{rms}=V_{max}=V_p =976,946 mV$ .

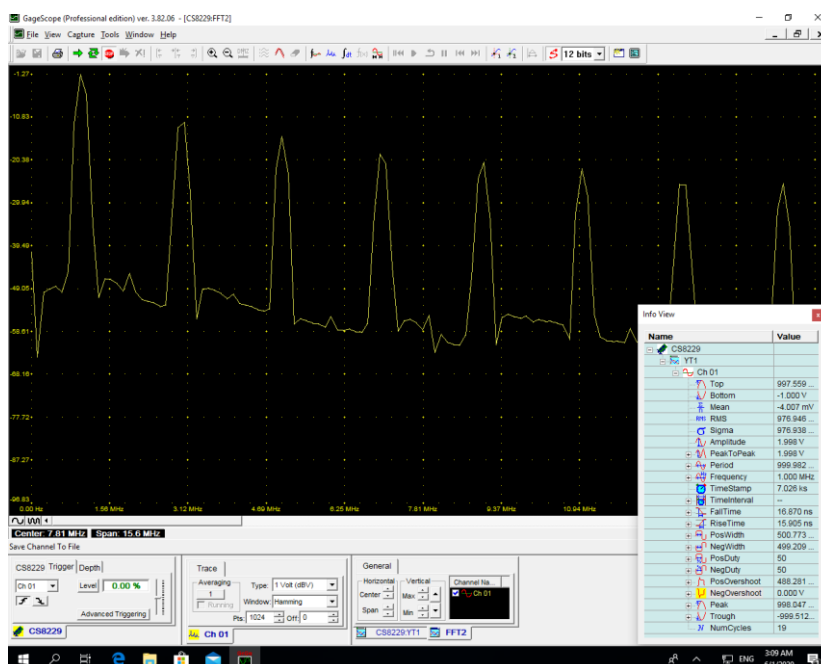


Εικόνα 5-7 Ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγωνικού σήματος



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Στην Εικόνα 5-7 παρουσιάζεται το τετραγωνικό σήμα στο πεδίο της συχνότητας με εύρος συχνοτήτων στα 62,5 Mhz αλλά και ο ίδιος μετασχηματισμός εστιασμένος σε μικρότερο φάσμα τιμών συχνοτήτων στα 15,6 Mhz όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5-8, ώστε να διακρίνονται καλύτερα τα επίπεδα τιμών κάθε συχνότητας.



Εικόνα 5-8 Ο μετασχηματισμός Fourier του τετραγωνικού σήματος σε μικρότερο εύρος συχνοτήτων

Όπως παρατηρείται οι τιμές στο παράθυρο info view δεν έχουν μεταβληθεί που είναι και λογικό. Το φάσμα που παράγεται από τον μετασχηματισμό Fourier είναι ένα συνεχές φάσμα περιόδων εκθετικών σημάτων ο οποίος για ένα σήμα τιμών παράγει μια ακολουθία τιμών (φάσμα) σε ισαπέχουσες διακριτές συχνότητες. Όλες οι κορυφές δηλαδή τα σημεία που παρουσιάζεται μέγιστη συχνότητα, ισαπέχουν μεταξύ τους. Κάθε υποδιαίρεση (division) είναι ίση με 1,56 Mhz οπότε κάθε frequency/div = 0,26 Mhz.

Η πρώτη μέγιστη συχνότητα είναι στα  $(4*0,26)= 1 \text{ MHz}$  η δεύτερη είναι στα 2,56 Mhz κ.ο.κ.

Δηλαδή αυτό το σήμα αναπτύσσεται από το άθροισμα διαφορετικών ημιτόνων διαφορετικής συχνότητας (και πλάτους), δηλαδή από άθροισμα ημιτονοειδών συναρτήσεων συγκεκριμένης συχνότητας όπως διακρίνεται και στην Εικόνα 5-8 και όπως προκύπτει από την θεωρία η έξοδος του συστήματος προσεγγίζει το τετράγωνο.

Έτσι, μπορεί να προσδιοριστεί η έξοδος του συστήματος ως άθροισμα σημάτων που έχουν τις ίδιες συχνότητες με αυτές που περιέχει το σήμα εισόδου, των οποίων όμως το πλάτος και η φάση έχει υποστεί κάποια αλλαγή, που προκαλείται από το σύστημα.

### 5.2.3 Μέτρηση κρουστικού σήματος

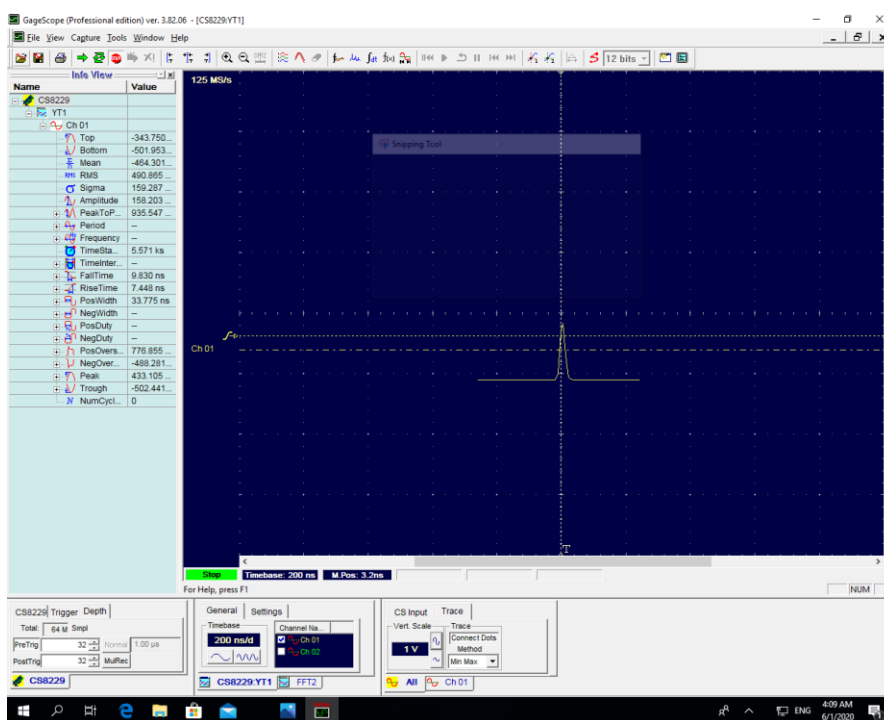
Στην τελευταία μέτρηση της πειραματικής διαδικασίας για την μέτρηση ενός σήματος κρουστικής μορφής, επιλέγεται από την γεννήτρια σημάτων η επιλογή 'impulse' και στην συνέχεια ορίζονται οι παρακάτω ρυθμίσεις για να προκύψει αυτό το σήμα στην έξοδο της γεννήτριας. Έτσι, τα χαρακτηριστικά του κρουστικού σήματος που δόθηκαν είναι τα εξής :

- Συχνότητα 1 Mhz.

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

- Το **trigger level** ορίζεται στο 20%, δηλαδή την χρονική στιγμή που η κυματομορφή του σήματος ακουμπάει το επίπεδο του trigger που έχει οριστεί τότε ενεργοποιείται η καταγραφή του σήματος ή το στιγμιότυπο του σήματος. Κάθε φορά που το σήμα ακουμπάει αυτό το επίπεδο, το μετρητικό σύστημα της κάρτας κάνει και μια καταγραφή.
- Τέλος, για το **Depth** της καταγραφής τόσο το **pre triggering** όσο και το **post triggering** ορίζονται σε εύρος 32 Msample. Αυτές οι επιλογές έχουν να κάνουν με την απόσταση του σήματος από τη κεντρική κάθετη (vertical) γραμμή της οθόνης μέτρησης στην θέση μηδέν. Το pre triggering επιτρέπει την καταγραφή του σήματος πριν τη στιγμή της λήψης του trigger και είναι αριστερά της κάθετης γραμμής. Η εντολή αυτή είναι χρήσιμη για την ανάλυση του σήματος μέχρι την στιγμή του trigger event αλλά και των αιτιών του event. Αντίθετα το post trigger αφορά την διάρκεια καταγραφής δεδομένων μετά το trigger και διαρκεί όσο το εύρος του μετρητή και είναι δεξιά την κεντρικής κάθετης γραμμής.
- Οι δύο προηγούμενες εντολές δεν είναι απαραίτητες να ενεργοποιηθούν για την μέτρηση του κρουστικού σήματος, αλλά ενεργοποιήθηκαν αρχικά για να φαίνεται πιο καθαρά το σήμα πριν και μετά το trigger.

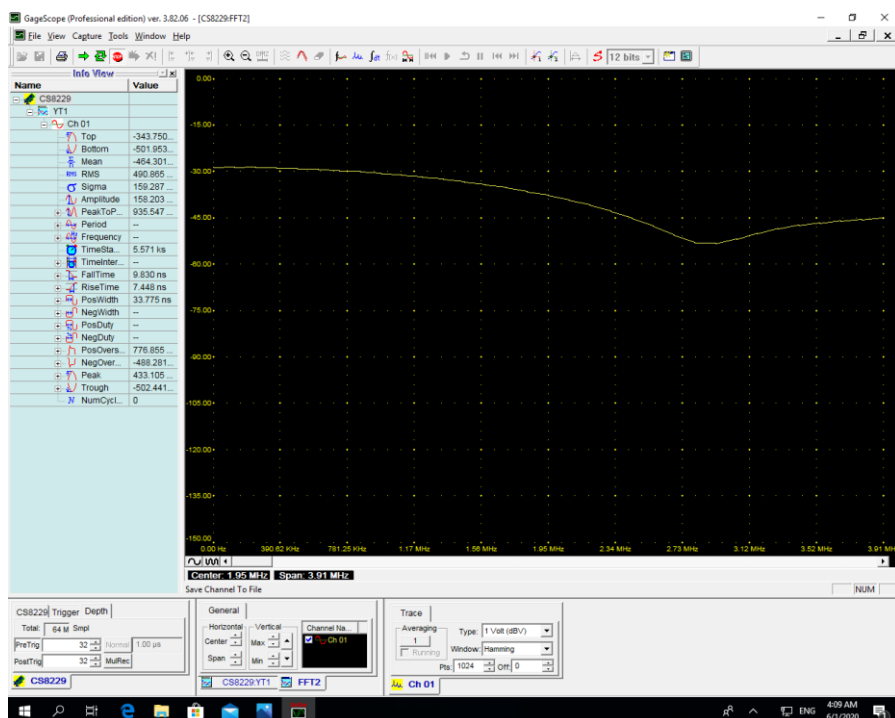
Το αποτέλεσμα της μέτρησης της κάρτας για το κρουστικό σήμα μαζί με τα χαρακτηριστικά του φαίνονται στην Εικόνα 5-9



Εικόνα 5-9 Μέτρηση του κρουστικού σήματος.

Παρατηρείται ότι στην πειραματική μέτρηση η αναπαράσταση του σήματος στο πεδίο της συχνότητας δεν προκύπτει καθαρά ευθεία γραμμή λόγω αδυναμίας της γεννήτριας να παράγει στην έξοδο της τον ιδανικό κρουστικό παλμό. Ο μετασχηματισμός Fourier του κρουστικού σήματος φαίνεται στην Εικόνα 5-10 με εύρος συχνοτήτων από 0-3,91 Mhz.

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 5-10 Ο μετασχηματισμός Fourier του κρουστικού σήματος σε μικρό εύρος συχνότητας

Από την μορφή του μετασχηματισμού Fourier προκύπτει ότι το κρουστικό σήμα μπορεί να θεωρηθεί σαν το αποτέλεσμα της υπέρθεσης/άθροισης ίδιου πλάτους ημιτονοειδών σημάτων όλων των δυνατών συχνοτήτων.

#### 5.2.4 Επιπλέον παρατηρήσεις μετρήσεων

- 1) Τα δύο πρώτα σήματα που δόθηκαν προς μέτρηση ,δηλαδή το ημιτονικό και το τετραγωνικό σήμα, είναι περιοδικά και αυτό φαίνεται και στα αποτελέσματα των μετρήσεων και του αντίστοιχου μετασχηματισμού τους σε Fourier.
- 2) Όσο αφορά το κρουστικό σήμα ένα τέτοιου είδους σήμα επιτρέπει την περιγραφή φαινομένων με στιγμιαία διάρκεια γι' αυτό και προκύπτει αυτή η κυματομορφή.
- 3) Στις ρυθμίσεις της κάρτας που έγιναν για τον υπολογισμό του Μ/Σ Fourier επιλέχθηκαν οι εξής ρυθμίσεις :
  - **Number of points:** 1024 (αφορά τον αριθμό των σημείων/δειγμάτων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση του σήματος)
  - **FFT type:** 1 volt (dBV)
  - **Window type:** Hamming (έγινε επιλογή του φίλτρου hamming μέσα από άλλες επιλογές φίλτρων διότι με αυτό το φίλτρο φαίνονται πιο καθαρά τα spikes και οι κορυφές που αναμένονται να εμφανιστούν θεωρητικά σε κάθε μία από τις παραπάνω μετρήσεις).

Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις φαίνεται ότι η εγκατάσταση της κάρτας (hardware και Software) αλλά και η λειτουργία της δουλεύουν αποτελεσματικά. Στην επόμενη παράγραφο δίνεται ένα προπαρασκευαστικό στάδιο για τη μελέτη και τη σχεδίαση συστημάτων μέτρησης κρουστικών τάσεων σε πραγματικό εξοπλισμό, όπως μέτρηση χαρακτηριστικών των ρευμάτων διαρροής ή σε κάποιο δοκίμιο του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων με την βοήθεια ειδικών αισθητήρων ρεύματος τύπου Rogowski.

### 5.3 Προτεινόμενος τρόπος μετρήσεων σε ένα πραγματικό σύστημα Υψηλών Τάσεων

Σε αυτή την ενότητα γίνεται μια μικρή μελέτη και αναφορά σε ένα προτεινόμενο τρόπο μετρήσεων ρευμάτων διαρροής σε σύστημα υψηλών τάσεων με τη χρήση αισθητήρα μέτρησης τύπου Rogowski.

#### 5.3.1 Γενικά στοιχεία για τον αισθητήρα τύπου πηνίου Rogowski

Το πηνίο τύπου Rogowski είναι ένα ηλεκτρικό όργανο που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) όπως παλμικά ρεύματα ή ημιτονοειδή ρεύματα υψηλής συχνότητας και πήρε το όνομα του από τον Γερμανό φυσικό Walter Rogowski [33]. Το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής διαθέτει τέτοιου είδους όργανο, ενώ το προτεινόμενο Rogowski πηνίο είναι το “CWT 30B” και φαίνεται στην Εικόνα 5-11. Το συγκεκριμένο πηνίο έχει τη δυνατότητα σύνδεσης και με παλμογράφο.



Εικόνα 5-11 Πηνίο Rogowski συνδεδεμένο σε παλμογράφο [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>

Πιο συγκεκριμένα ο CWT είναι ένας υπερσύγχρονος ανιχνευτής ρεύματος με μεγάλο εύρος ζώνης που κυμαίνεται στην περιοχή από 1Hz έως 16MHz. Το πηνίο Rogowski αποτελείται από το καλώδιο περιέλιξης το οποίο συνδέεται στο σημείο του κεντρικού άξονα και από το καλώδιο που συνδέεται με τα ηλεκτρονικά συστήματα επεξεργασίας σήματος όπως για παράδειγμα ένας παλμογράφος ή στην περίπτωση

αυτής της διπλωματικής εργασίας, η σύνδεση του με την κάρτα μετρήσεων Octurus CompuScope 8229 [33].

### 5.3.2 Πλεονεκτήματα και χρήση του πηνίου Rogowski

Αυτό το πηνίο μετρήσεων παρέχει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλους ανιχνευτές ρεύματος όπως [33, 34]:

- Υψηλή αντοχή στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Δεν παρουσιάζει κορεσμό (καθώς δεν έχει πυρήνα σιδήρου) κατά τη μέτρηση υψηλών ρευμάτων (και κατά συνέπεια ελάχιστη θερμοκρασία), με αποτέλεσμα να είναι αρκετά γραμμικό στις μετρήσεις μεγάλων ρευμάτων όπως αυτά που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμογές συγκόλλησης και άλλα.
- Αυτή η γραμμικότητα ακόμη επιτρέπει την βαθμονόμηση (calibrate) του πηνίου Rogowski υψηλών ρευμάτων με χαμηλές τιμές ρεύματος.
- Έχει χαμηλή επαγωγικότητα, με αποτέλεσμα να μπορεί να ανταποκριθεί σε γρήγορα μεταβαλλόμενα ρεύματα, σε μερικά nanoseconds.
- Είναι ελαφρύ και ευέλικτο.
- Έχει χαμηλότερο κόστος κατασκευής.
- Το πηνίο είναι λεπτό για πιο εύκολη εισαγωγή σε κυκλώματα και χώρους με περιορισμένη πρόσβαση.
- Πραγματοποιεί γαλβανικά απομονωμένη μέτρηση.
- Είναι μικρότερο και πιο εύκολο στην χρήση σε σχέση με έναν μετασχηματιστή ρεύματος ο οποίος για μεγαλύτερο ρεύμα εξόδου χρειάζεται περισσότερα τυλίγματα. Επομένως, ένα πηνίο Rogowski για μεγάλο ρεύμα είναι μικρότερο από έναν ισοδύναμο μετασχηματιστή ρεύματος.
- Είναι ιδανικό για εφαρμογή σε συστήματα μεγάλης ισχύος, καθώς συνδυάζει ένα εύχρηστο, λεπτό, εύκαμπτο, σπειροειδές πηνίο με την ικανότητα να αναπαράγει με ακρίβεια κυματομορφές ρεύματος ταχείας εναλλαγής, όπως ημιτονοειδείς, σχεδόν ημιτονοειδείς ή παλμικές/κρουστικές.

Τα πηνία Rogowski χρησιμοποιούνται για παρακολούθηση σε συστήματα ακριβείας συγκόλλησης, φούρνους τήξης τόξου ή ηλεκτρομαγνητικούς εκτοξευτές. Χρησιμοποιούνται επίσης σε δοκιμές βραχυκυκλώματος ηλεκτρικών γεννητριών και ως αισθητήρες σε συστήματα προστασίας ηλεκτρικών εγκαταστάσεων [34].

### 5.3.3 Απόδοση-χαρακτηριστικά του CWT

Τα χαρακτηριστικά του μετρητικού οργάνου Rogowski παρουσιάζονται στον Πίνακα 2

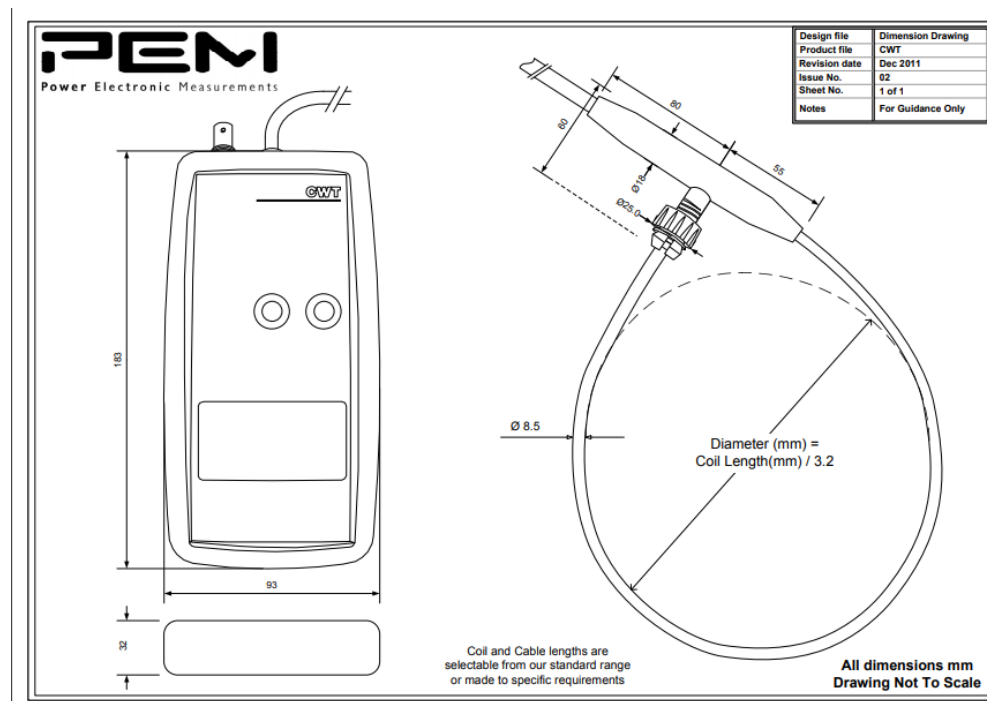
<b>Peak current</b>	30A peak to 600kA peak
<b>Output</b>	±6.0V peak
<b>High Frequency Bandwidth (-3dB)</b>	16MHz (300mm coil), 10MHz (700mm coil)
<b>Low Frequency Bandwidth (-3dB)</b>	~1Hz
<b>Accuracy (typ.)</b>	±1.0% (±0.2% με ειδικό τρόπο εγκατάστασης)
<b>Output load</b>	≥ 100.0 kΩ (για ονομαστική ακρίβεια)

Πίνακας 2 Απόδοση-χαρακτηριστικά του CWT [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

### 5.3.4 Διαστάσεις του πηνίου Rogowski

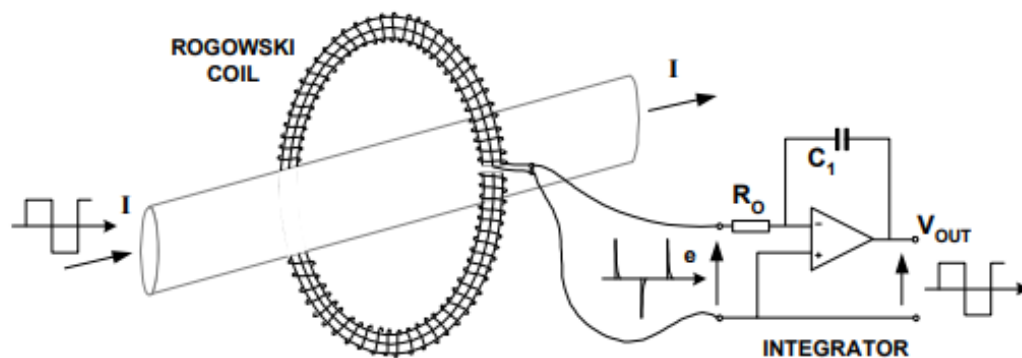
Οι διαστάσεις του CWT 30B φαίνονται στην Εικόνα 5-12 στην μονάδα μέτρησης των χιλιοστών (mm). Τα μήκη του καλωδίου και του πηνίου έχουν σχεδιαστεί για συγκεκριμένες απαιτήσεις και ανάγκες.



Εικόνα 5-12 Διαστάσεις του CWT 30B [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>

### 5.3.5 Αρχή λειτουργίας του πηνίου τύπου Rogowski

Η τάση που δημιουργείται σε ένα πηνίο Rogowski είναι ανάλογη με τον ρυθμό μεταβολής του ρεύματος που φέρει ο αγωγός του οποίο το ρεύμα πρόκειται να μετρηθεί. Επομένως, είναι απαραίτητο να συνδεθεί ένα κύκλωμα ολοκλήρωσης (integrator) στην έξοδο του πηνίου, έτσι ώστε να προκύψει ένα σήμα τάσης ανάλογο του προς μέτρηση ρεύματος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5-13 [34].



Εικόνα 5-13 σχηματική αναπαράσταση του πηνίου Rogowski και του ολοκληρωτή [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Όπου η τάση εξόδου  $V_{out}$  δίνεται από τον παρακάτω τύπο

$$V_{out} = \frac{1}{T_i} \cdot \int e \cdot dt = R_{SH} \cdot I \quad (5,1)$$

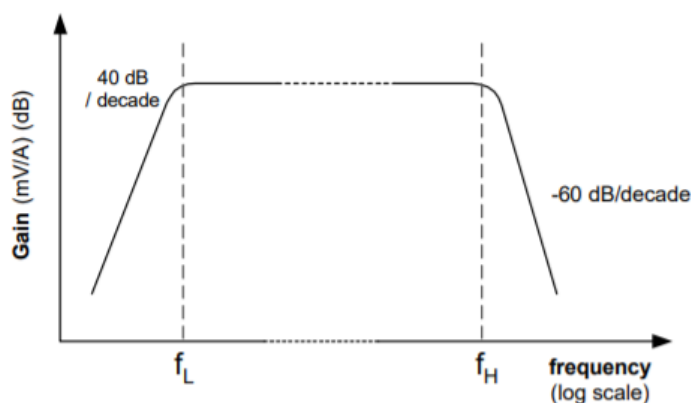
Όπου

$$T_i = R_o \cdot C_1 \text{ και } R_{sh} = \frac{H}{T_i}$$

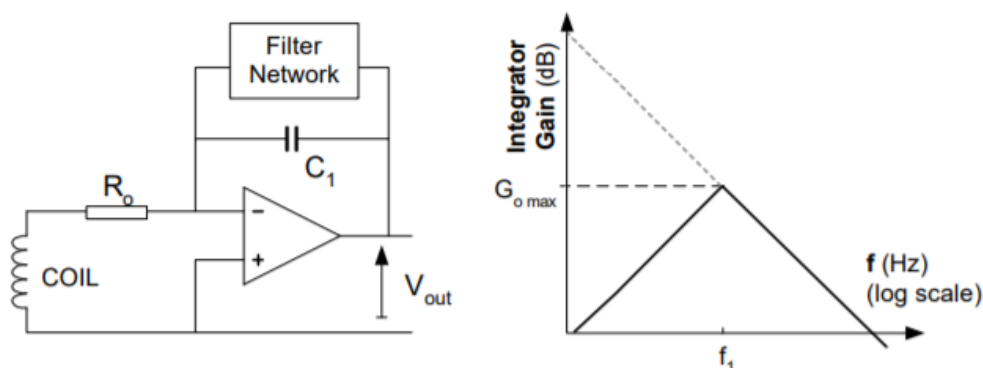
$R_{sh}$  είναι η ευαισθησία του CWT σε (mV/A),  $H$  είναι η ευαισθησία του πηνίου σε (Vs / A) και  $I$  είναι το ρεύμα που πρέπει να μετρηθεί περνώντας από τον βρόχο.

### 5.3.6 Η απόκριση συχνότητας του πηνίου Rogowski;

Στην Εικόνα 5-14 δίνεται σε γράφημα η απόκριση συχνότητας του πηνίου Rogowski για ημιτονοειδή ρεύματα για ένα εύρος συχνοτήτων  $f_L$  έως  $f_H$  και για την προκαθορισμένη ευαισθησία του αισθητήρα.



Εικόνα 5-14 Απόκριση συχνότητας του πηνίου Rogowski [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>



Εικόνα 5-15 Το κύκλωμα του ολοκληρωτή μαζί με το βαθυπερατό φίλτρο το οποίο αποκόβει όλες τις συχνότητες που είναι πάνω από την ζώνη διέλευσης [33] ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>



Σε χαμηλές συχνότητες, το κέρδος του ολοκληρωτή αυξάνεται και θεωρητικά θα γίνει άπειρο καθώς η συχνότητα πλησιάζει το μηδέν. Αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την παρουσία DC σήματος ,όπως επίσης και την παρουσία θορύβου χαμηλής συχνότητας. Αυτός ο περιορισμός επιτυγχάνεται τοποθετώντας ένα χαμηλοπερατό φίλτρο παράλληλα με τον πυκνωτή ολοκλήρωσης. Το φίλτρο χαμηλής διέλευσης ορίζει το εύρος ζώνης χαμηλής συχνότητας  $f_L$ , και συνήθως αυτό είναι μικρότερο από 1Hz. Στη Εικόνα 5-15 φαίνεται μια απλοποιημένη έκδοση του ολοκληρωτή μαζί με το χαμηλοπερατό φίλτρο και δεξιά τους περιορισμούς που προκύπτουν [33].

### 5.3.7 Γραμμικότητα

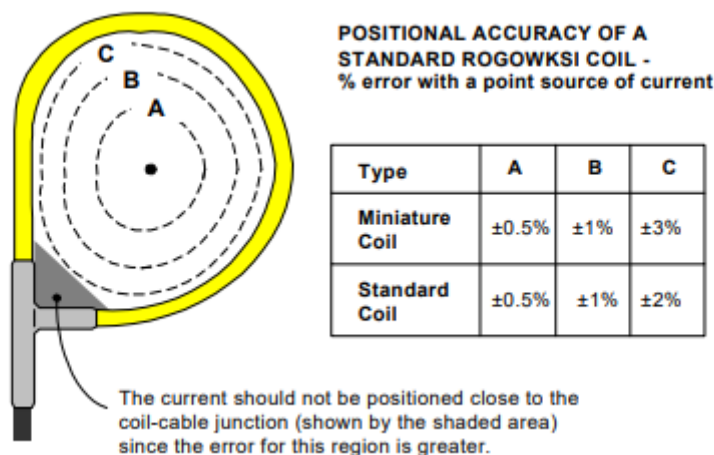
Το σφάλμα γραμμικότητας είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής τιμής του ρεύματος  $I$ , και της μετρούμενης τιμής  $V_{out} / R_{SH}$  [33].

Επειδή οι τρέχοντες μετατροπείς Rogowski δεν περιέχουν μαγνητικά υλικά, αναμένεται να είναι πολύ γραμμικοί, δεδομένου ότι δεν υπάρχει κορεσμός και δεν υπάρχουν μη γραμμικές επιδράσεις που σχετίζονται με το μέγεθος του ρεύματος [33].

### 5.3.8 Τρόπος τοποθέτησης του πηνίου

Εξαιτίας των μικρών διακυμάνσεων στην περιέλιξη και στην διατομή του πηνίου, η έξοδος του cwt διαφέρει ελαφρώς ανάλογα με τη θέση του ρεύματος εντός του βρόχου πηνίου. Κατα την διάρκεια μιας μέτρησης υπάρχει το εξής σφάλμα το οποίο έχει να κάνει με την κίνηση/θέση του υπο δοκιμή αγωγού γύρω από τον τρέχοντα βρόχο και είναι συνήθως  $\pm 1\%$  της τιμής, και για μικροσκοπικά πηνία τυπικά  $\pm 2\%$  της βαθμονομημένης τιμής [33].

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη διακύμανση της ακρίβειας της μέτρησης σε όλο το πηνίο (Εικόνα 5-16). Η διαφορά είναι μεγαλύτερη όταν το ρεύμα είναι τοποθετημένο κοντά στη διασταύρωση του καλωδίου σύνδεσης και του πηνίου, όπου και το σφάλμα εδώ μπορεί να είναι συνήθως 4%. Δεδομένου ότι στις περισσότερες εφαρμογές το ρεύμα διανέμεται σε ένα σημαντικό μέρος της περιοχής που περιέχεται από το πηνίο η μέτρηση θα είναι πολύ κοντά στην τιμή βαθμονόμησης [33].



Εικόνα 5-16 Διακύμανση της ακρίβειας της μέτρησης σε όλο το πηνίο[33]  
 ©<http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>



### 5.3.1 Μειονεκτήματα χρήσης του πηνίου Rogowski CWT

Παρόλα τα προηγούμενα πλεονεκτήματα που αναφέρθηκαν, είναι ανάγκη να αναφερθούν και κάποια σημαντικά μειονεκτήματα που παρουσιάζει αυτό το όργανο, έναντι άλλων τύπων μετασχηματιστών ρεύματος [34]:

- Παίζει σημαντικό ρόλο η τοποθέτηση του αγωγού μέτρησης καθώς έχει αποδειχθεί μέσω εύκαμπτων αισθητήρων, ότι η επίδραση της θέσης στην ακρίβεια των μετρήσεων κυμαίνεται από 1 έως 3%.
- Για την λειτουργία του κυκλώματος του ολοκληρωτή χρειάζεται ισχύ, συνήθως 3 έως 24V DC, την οποία και λαμβάνουν από μπαταρίες ώστε να ληφθεί η μέτρηση.

### 5.3.2 Χρήσιμες συμβουλές για χρήση των πηνίων Rogowski σε υψηλή τάση

Για μέτρηση ρευμάτων σε υψηλή τάση με χρήση των πηνίων Rogowski, προτείνονται οι παρακάτω σωστές πρακτικές [33]:

- I. Όσον αφορά την πλειοψηφία των πλαστικών, το υλικό που χρησιμοποιείται για τη μόνωση των πηνίων Rogowski μπορεί να υποστεί ζημιά λόγω έκθεσης σε φαινόμενο κορώνα για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.
- II. Τα πηνία Rogowski έχουν σχεδιαστεί για διαλείπουσα χρήση. Η τάση λειτουργίας να μην ξεπερνάει την μέγιστη ονομαστική τάση προς τη γείωση που έχει καθοριστεί.
- III. Το πηνίο μπορεί και πρέπει να επιθεωρείται για ζημιά στη μόνωση κάθε φορά που χρησιμοποιείται κυρίως σε φαινόμενα κορώνα.
- IV. Για χρήση σε τάσεις στο έδαφος/γη κάτω από 3kV peak (δηλαδή 2kV rms για ημιτονοειδή τάση), οι επιδράσεις του φαινομένου κορώνα θα είναι αμελητέες και επιτρέπεται η συνεχής λειτουργία και χρήση του οργάνου.
- V. Για τάσεις στο έδαφος άνω των 3kV peak, το πηνίο πρέπει να απέχει αρκετά από τον αγωγό υψηλής τάσης ή τη συσκευή, χρησιμοποιώντας αέρα και / ή μονωτικά υλικά έτσι ώστε το φαινόμενο κορώνα να μην εμφανίζεται κοντά στο πηνίο.
- VI. Οι αιχμηρές γωνίες πρέπει να αποφεύγονται στις δομές υψηλής τάσης κοντά στο πηνίο Rogowski, καθώς οι αιχμηρές γωνίες μειώνουν την τάση στην οποία ξεκινά το φαινόμενο κορώνα ενώ μπορεί να είναι και καταστροφικές
- VII. Η δοκιμή «one minute flash test», που εφαρμόζεται σε όλα τα πηνία κατά την κατασκευή, επιβεβαιώνει την ακεραιότητα της μόνωσης του πηνίου όταν αποστέλλεται και δεν προορίζεται να εφαρμοστεί για συνεχή έκθεση σε τάσεις άνω των 3kV peak όταν ο αγωγός / συσκευή υψηλής τάσης μπορεί να είναι πολύ κοντά στο πηνίο ή να το αγγίζουν.

Όλες οι παραπάνω παρατηρήσεις και η χρήση των Rogowski πηνίων σε συνδυασμό με την ψηφιακή κάρτα μετρήσεων Octopus CompuScope 8229 128MB της εταιρίας GAGE που δειγματοληπτεί στα 125Ms/s και αναλύθηκε, συνδυάζουν υψηλή ακρίβεια και ταχεία ανταπόκριση, με δυνατότητα ποικίλων μετρήσεων και αναλύσεων, με ελάχιστο εξοπλισμό και σημαντική εξοικονόμηση χρόνου.

## 6 Κεφάλαιο 6<sup>ο</sup>: Συμπεράσματα

### 6.1 Πλεονεκτήματα

Πρώτο βήμα είναι η εκτίμηση των πλεονεκτημάτων που προκύπτουν από την χρήση του A/D μετατροπέα για μετρήσεις σημάτων κρουστικών υψηλών τάσεων. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

- Αρχικά, πολύ σημαντικό προσόν είναι ότι προσφέρει ηλεκτρική απομόνωση ανάμεσα στο κύριο κύκλωμα Υψηλής Τάσης και στα ευαίσθητα και ακριβά όργανα μετρήσεων και καταγραφής.
- Μειώνει την ανάγκη για υπερπροστασία και υπερβολική και κοστοβόρα μόνωση, η οποία θα προστατεύσει το προσωπικό και τον εξοπλισμό στον χώρο των πειραματικών μετρήσεων καταγραφής.
- Χρήση του κυκλώματος σκανδαλισμού, triggering, καθώς παρέχει της δυνατότητα αποθήκευσης των μετρήσεων στην μνήμη του. Έτσι υπάρχει δυνατότητα λήψης μετρήσεων πριν την έναρξη ενός φαινομένου, στην διάρκεια αυτού και μετά την λήξη του. Τα δεδομένα αυτά μπορούν να αποθηκευτούν και να αναλυθούν και σε άλλα λογισμικά.
- Η μέθοδος ανίχνευσης κάποιων απότομων μεταβολών και φαινομένων με χρήση αναλογικού σε ψηφιακού μετατροπέα με υπολογιστή προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με την χρήση παλμογράφου. Ένα πλεονέκτημα είναι η μεγάλη ταχύτητα δειγματοληψίας με υψηλή ακρίβεια, η λήψη μετρήσεων μεγάλης λεπτομέρειας, και η αντιμετώπιση κάποιων ανεπιθύμητων προβλημάτων όπως ο θόρυβος.

### 6.2 Θεματικές εργασίες με βάση το μετρητικό σύστημα της παρούσας διπλωματικής

Το ψηφιακό μετρητικό σύστημα δοκιμάστηκε με χρήση γεννήτριας σημάτων, και φαίνεται να αποκρίνεται σωστά στις υψηλές συχνότητες, δεν κατέστη όμως δυνατή η καταγραφή σημάτων κρουστικών υψηλών τάσεων μετά τον υποβιβασμό τους μέσω καταμεριστών τάσης καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα δια ζώσης μέτρησης λόγω των συνθηκών και των μέτρων της πανδημίας covid-19. Μελλοντικά προτείνεται να γίνουν μετρήσεις επάνω στον εξοπλισμό υψηλής τάσης, με τη βοήθεια του συστήματος μέτρησης.

Συνίσταται επίσης, η διερεύνηση των ακόλουθων θεμάτων ως αυτοτελείς μελλοντικές εργασίες που σχετίζονται με τις εφαρμογές αυτού του A/D μετατροπέα σε συστήματα υψηλών τάσεων :

Μέτρηση στις γειώσεις της γεννήτριας κρουστικών τάσεων η οποία αποτελεί κομμάτι του εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων με την βοήθεια ειδικών καλωδίων probes τύπου Rogowski .

- Έλεγχος συσκευής Trigatron (μέτρηση του παλμού έναυσης και των χαρακτηριστικών του).
- Μετρήσεις ποιότητας ισχύος σε φωτοβολταϊκά συστήματα και σε συστήματα ανεμογεννητριών
- Μετρήσεις σε μετασχηματιστές ισχύος Υ.Τ
- Μετρήσεις φυσικών μεγεθών, όπως φορτίο ηλεκτρικών μερικών εκκενώσεων, στην υψηλή τάση.
- Αξιοποίηση του μετρητικού συστήματος σε Βιομηχανίες με υποσταθμούς μέσης και υψηλής τάσης.

Τέλος σημαντική είναι η αξιοποίηση του συστήματος αυτού σε θέματα που αφορούν τα πλοία όπως:

- Αξιοποίηση του μετρητικού συστήματος στα πολλαπλά ηλεκτρικά και ηλεκτρονικά συστήματα των σύγχρονων πλοίων, σε διατάξεις υψηλών τάσεων του πλοίου, στα ηλεκτρικά συστήματα πρόωσης, στον έλεγχο της ποιότητας της ηλεκτρικής ισχύος αυτών, στον έλεγχο και την μέτρηση των χωρητικών ρευμάτων διαρροής ή αξιοποίηση του σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα συστήματα μετρήσεων στα πλοία με εγκατεστημένη ισχύ πολλών MW .

### 6.3 Παρατηρήσεις μέσα από την χρήση και το software της κάρτας

Μέσα στις ρυθμίσεις που πρέπει να γίνουν στο λογισμικό της κάρτας μετρήσεων "CStest+" και συγκεκριμένα στην επιλογή παραμέτρων της διαμόρφωσης του καναλιού (channel config), υπάρχει η επιλογή της τιμής αντίστασης (impedance) εισόδου της κάρτας, με πρώτη επιλογή το 1MΩ και δεύτερη επιλογή τα 50 Ohms. Η επιλογή αυτής της αντίστασης εισόδου είναι κρίσιμη για τη σωστή μέτρηση του σήματος. Αυτό μπορεί εύκολα να επεξηγηθεί με το θεώρημα της μέγιστης μεταφοράς ισχύος [35].

Το θεώρημα αυτό εφαρμόζεται στις περιπτώσεις που είναι επιθυμητό να εξασφαλιστεί μέγιστη μεταφορά ισχύος από το σύστημα (ηλεκτρικό κύκλωμα ή ηλεκτρικό δίκτυο) προς το φορτίο. Όταν η αντίσταση φορτίου είναι ίση με την αντίσταση της πηγής τότε εξασφαλίζεται η μέγιστη μεταφορά ισχύος από την πηγή προς το φορτίο ή γενικότερα από τη μία βαθμίδα στην άλλη, εφόσον η πρώτη έχει το ρόλο πηγής τροφοδοσίας και η δεύτερη το ρόλο φορτίου [35].

Αρα λοιπόν αφού η τιμή της αντίστασης της κάρτας είναι στα 50Ω , και η τιμή των καλωδίων μέτρησης (τύπου Probe) είναι 50Ω για να ισχύσει η μέγιστη μεταφορά ισχύος πρέπει και η τιμή της αντίστασης του οργάνου ( ή γεννήτριας ) που θα μετρηθεί να είναι επίσης στα 50Ω [35].

### 6.4 Μέτρηση Υψηλών Τάσεων - Γενικές Παρατηρήσεις

Αν και στην παρούσα διπλωματική δεν έγιναν μετρήσεις στο πεδίο υψηλών τάσεων, επειδή το προτεινόμενο σύστημα μέτρησης στοχεύει στη χρήση του σε μετρήσεις στην υψηλή τάση, κρίνεται απαραίτητη η αναφορά σε κάποιες γενικές παρατηρήσεις επί των μετρήσεων στην υψηλή τάση. Όπως έχει αναφερθεί οι μετρήσεις στις υψηλές τάσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερα προβλήματα σε σχέση με τις ηλεκτρικές μετρήσεις σε κυκλώματα χαμηλής τάσης. Κάποια από αυτά τα ζητήματα είναι τα ακόλουθα [31]:

- Στους καταμεριστές τάσης η αντίσταση στον κλάδο της υψηλής τάσης αποτελείται από διάφορες ανεξάρτητες αντιστάσεις συνδεδεμένων σε σειρά.
- Οι πιο συχνοί αντιστάτες είναι άνθρακα, συνθετικού άνθρακα και αντιστάτες υμενίου οξειδίου μετάλλου. Δεν χρησιμοποιούνται μεταλλικοί αντιστάτες περιελιγμένου σύρματος.
- Μέχρι τα 100kV τα στοιχεία των αντιστατών έχουν μόνωση αέρα. Για υψηλότερες τάσεις χρησιμοποιούνται άλλα μονωτικά υγρά ή αέρια.
- Το ύψος του καταμεριστή τάσης εξαρτάται από την εξωτερική τάση υπερπήδησης. Ενδεικτικά ο ελεύθερος χώρος μεταξύ ηλεκτροδίου κορυφής και εδάφους πρέπει να είναι: 2,5 – 3m/MV για συνέχεις τάσεις, 2-2,5m/MV για κεραυνικές κρουστικές τάσεις και 5m/MV για εναλλασσόμενες τάσεις.

#### 6.4.1 Προβλήματα κατά τη μέτρηση με καταμεριστές

Ορισμένα από τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την μέτρηση με καταμεριστές είναι τα παρακάτω [31]:

- Μεταβολή της τιμής των αντιστάσεων με τη θερμοκρασία.
- Κατανάλωση ισχύος στις αντιστάσεις, η οποία είναι ανάλογη του τετραγώνου της εφαρμοζόμενης τάσης.
- Δημιουργούνται προβλήματα υπερπηδήσεων κατά την διάρκεια των μετρήσεων, και άρα κίνδυνος για το προσωπικό και τον εξοπλισμό.
- Εμφάνιση παράσιτων χωρητικότητων σε εναλλασσόμενες και κρουστικές τάσεις. Οι παράσιτες χωρητικότητες επηρεάζουν την κατανομή του πεδίου γύρω από τον καταμεριστή αλλά και τον λόγο καταμερισμού.
- Οι τιμές των υπό μέτρηση τάσεων ξεπερνούν κατά πολύ την κλίμακα μέτρησης των κοινών βολτομέτρων.
- Πολλές φορές πρέπει να ελεγχθεί η έκλυση θερμότητας μέσα στα κυκλώματα.

#### 6.4.2 Ατρωσία του εξοπλισμού μέτρησης

Κατά τη δημιουργία κρουστικών τάσεων η μεταβολή της τάσης είναι πολύ μεγάλη με συνέπεια να δημιουργούνται παράσιτες εντάσεις, που μπορούν μαθηματικά να περιγραφούν από τη σχέση [25]:

$$i(t) = C \frac{dU}{dt} \quad (7,1)$$

- Τα ρεύματα αυτά δημιουργούν επαγόμενες τάσεις (μέσω ισχυρών ηλεκτρομαγνητικών πεδίων) οι οποίες προστίθενται στην μετρούμενη κρουστική τάση.
- Τα όργανα μέτρησης πρέπει να είναι θωρακισμένα από ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές.
- Το ομοαξονικό καλώδιο για την μεταφορά του σήματος από τη χαμηλή τάση του μετασχηματιστή στον παλμογράφο/ψηφιακή κάρτα δειγματοληψίας, πρέπει να είναι θωρακισμένο.
- Όλος ο εξοπλισμός σε ένα εργαστήριο υψηλής τάσης πρέπει να βρίσκεται μέσα σε κλωβό Faraday. Όταν το κύκλωμα υψηλής τάσης περιβάλλεται εξ' ολοκλήρου από μεταλλική θωράκιση (από κλωβό Faraday), τότε τα ρεύματα γης θα κυκλοφορήσουν σε προκαθορισμένες διαδρομές, και κατ' αυτόν τον τρόπο, οι γειώσεις εκτός του κλωβού δεν θα διαρρέονται από ρεύμα. Αυτές οι γειώσεις μπορούν επομένως να μελετηθούν αποκλειστικά σύμφωνα με τις απαιτήσεις ενός ολοκληρωμένου συστήματος γειώσεως.

#### 6.4.3 Επίδραση του κλάδου υψηλής τάσης του καταμεριστή τάσης

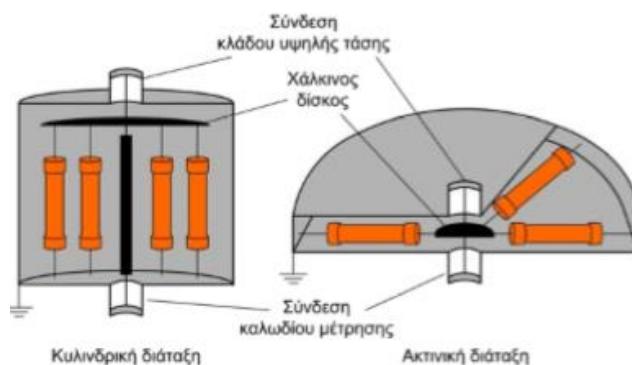
Κατά τις δοκιμές υψηλών τάσεων η χρήση των καταμεριστών τάσης στο σύστημα μέτρησης είναι απαραίτητη διότι πάντα απαιτείται ο έλεγχος της κυματομορφής της τάσης καταπόνησης του δοκιμίου. Για τον ίδιο λόγο είναι απαραίτητη και η χρήση ενός παλμογράφου ή ενός συστήματος μετρήσεων όπως η κάρτα που εξετάστηκε σε αυτή τη διπλωματική. Κάποιες συμβουλές για μετρήσεις που αφορούν τον κλάδο υψηλής τάσης είναι [27]:

- Οι μετρήσεις με ακρίβεια κρουστικών υψηλών τάσεων μικρής διάρκειας απαιτούν συστήματα μέτρησης με χρόνο απόκρισης μικρότερο των  $\sim 200$  ns.
- Για μέτρηση με ακρίβεια κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω ωμικού καταμεριστή τάσης, πρέπει να συνδυάζει όσο το δυνατόν μικρότερη τιμή αντίστασης υψηλής τάσης ή να παρουσιάζει όσο το δυνατόν μικρότερη παράσιτη χωρητικότητα, διότι ο χρόνος απόκρισης ενός ωμικού καταμεριστή τάσης είναι περίπου ανάλογος του γινομένου της τιμής της αντίστασης υψηλής τάσης επί την παράσιτη χωρητικότητα που αυτός παρουσιάζει.
- Γενικότερα, για μέτρηση εξωτερικών κρουστικών υψηλών τάσεων, κρουστικών υψηλών τάσεων μικρής διάρκειας, χρησιμοποιούνται ωμικοί καταμεριστές τάσης με τυπικές τιμές αντίστασης υψηλής τάσης 10-20 k $\Omega$ , περιορισμένου ωστόσο εύρους, της τάξης των 1-2 MV.

Ένα σύστημα μέτρησης που συμπεριλαμβάνει χωρητικό καταμεριστή τάσης παρουσιάζει «συμπεριφορά RLC». Ο χωρητικός καταμεριστής τάσης θεωρείται ιδανική διάταξη μέτρησης εσωτερικών κρουστικών τάσεων, ενώ για τη μέτρηση εξωτερικών κρουστικών τάσεων προτιμάται αντί αυτού ο μικτός καταμεριστής τάσης, ο οποίος στις υψηλές συχνότητες συμπεριφέρεται ως ωμικός καταμεριστής τάσης [27].

#### 6.4.4 Επίδραση του κλάδου χαμηλής τάσης και του καλωδίου μέτρησης

Κατά τη μέτρηση κρουστικών υψηλών τάσεων μέσω καταμεριστών τάσης τα χαρακτηριστικά του κλάδου χαμηλής τάσης καθώς και το καλώδιο μέτρησης, δηλαδή το ομοαξονικό καλώδιο που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του σήματος εξόδου του καταμεριστή στον παλμογράφο ή οποιοδήποτε άλλο όργανο μέτρησης, μπορεί να συνεισφέρουν σε σημαντικά σφάλματα στην απόκριση του συστήματος μέτρησης. Στους ωμικούς καταμεριστές τάσης η τιμή της αντίστασης χαμηλής τάσης καθορίζεται από τον επιθυμητό λόγο καταμερισμού του καταμεριστή με δεδομένη την τιμή της αντίστασης υψηλής τάσης. Επίσης το καλώδιο μέτρησης μπορεί να επιδράσει στο μεταφερόμενο σήμα από την έξοδο του καταμεριστή στην είσοδο του οργάνου καταγραφής, είτε μέσω ανακλάσεων είτε μέσω μείωσης εύρους του σήματος λόγω απωλειών. Όμως, για την αποφυγή της επίδρασης μαγνητικών πεδίων στον κλάδο της χαμηλής τάσης, πρέπει αυτός να παρουσιάζει πολύ μικρή τιμή αυτεπαγωγής [27].



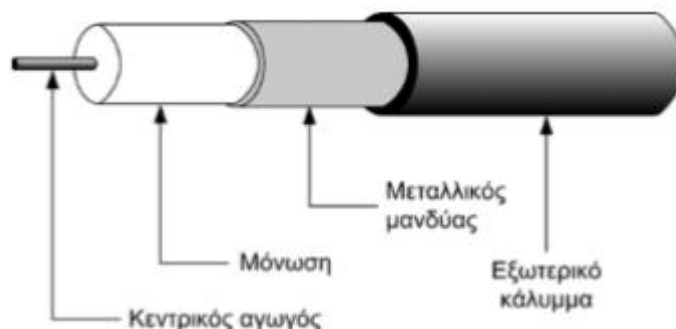
Εικόνα 6-1 Κλάδος χαμηλής τάσης ωμικού καταμεριστή [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

Αυτό επιτυγχάνεται εάν ο κλάδος χαμηλής τάσης του ωμικού καταμεριστή κατασκευαστεί μέσω ενός αριθμού αντιστάσεων μικρής αυτεπαγωγής, συνδεδεμένων παράλληλα, σε κυλινδρική ή ακτινική διάταξη, εσώκλειστες από ένα μεταλλικό περίβλημα το οποίο γειώνεται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 6-1 [27].

Κατά κανόνα στις μετρήσεις χρησιμοποιούνται ομοαξονικά καλώδια τυποποιημένης τιμής κυματικής αντίστασης 50 ή 75 Ω και με ελάχιστες απώλειες για μήκη μερικών δεκάδων μέτρων [27].

Τα ομοαξονικά καλώδια αποτελούνται γενικότερα από τέσσερα τμήματα που διακρίνονται στην Εικόνα 6-2, και είναι [27]:

- Ο κεντρικός αγωγός, συνήθως χάλκινος, που φέρει το σήμα,
- Το περίβλημα της μόνωσης συνήθως πολυαιθυλενίου ή νάιλον
- Ο μεταλλικός μανδύας, ο οποίος συνήθως είναι χάλκινο πλέγμα, και θωρακίζει τον κεντρικό αγωγό από εξωτερικά ηλεκτρομαγνητικά πεδία.
- Το εξωτερικό κάλυμμα που είναι από υλικό PVC (πολυβινυλοχλωρίδιο) και προστατεύει το καλώδιο έναντι μηχανικών καταπονήσεων.



Εικόνα 6-2 Ομοαξονικό καλώδιο μέτρησης [27] © Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών/Παντελής Ν. Μικρόπουλος

## Βιβλιογραφία – Αναφορές - Διαδικτυακές Πηγές

[1] Λαγουμιντζής Γεώργιος Βλαχόπουλος Γεώργιος Κουτσογιάννης Κωνσταντίνος , «Μεθοδολογία της Έρευνας στις Επιστήμες Υγείας», Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών ,Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015

[2][https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02\\_chapter\\_02.pdf](https://repository.kallipos.gr/bitstream/11419/2039/1/02_chapter_02.pdf)

[3] Σεραφείμ Καραμπογιάς, «Σήματα και Συστήματα », Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, Εκδόσεις Κάλλιπος, 2015

[4] Μιχάλης Παρασκευάς, «Σήματα και Συστήματα με MATLAB Συνεχούς και Διακριτού Χρόνου», 2<sup>η</sup> έκδοση, Τζιόλα, 2018

[5][https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE\\_%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7%CF%83%CE%B7](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%9A%CF%81%CE%BF%CF%85%CF%83%CF%84%CE%B9%CE%BA%CE%AE_%CF%83%CF%85%CE%BD%CE%AC%CF%81%CF%84%CE%B7%CF%83%CE%B7)

[6] Τσιάτουρας Κωνσταντίνος, «Μελέτη Μετατροπών Ψηφιακού Σήματος σε Αναλογικό με τη Τεχνική Σίγμα Δέλτα», Διπλωματική Εργασία, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών,2007

[7] Κ. Ψυχαλίνος, «Εισαγωγή στα Ηλεκτρονικά Φίλτρα», Πανεπιστήμιο Πατρών Τμήμα Φυσικής, Εργαστήριο Ηλεκτρονικής, 2005

[8] Β.Βεσκούκης, Δ.Παραδείσης, Δ.Αργιαλάς, Δ.Δεληκαράογλου, Β.Καραθανάση, Β.Μασσίνας, «Στοιχεία επεξεργασίας σημάτων» Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο - Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, 2004

[9] Γιάννης Λιαπέρδος, «Εισαγωγή στην ηλεκτρονική», Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών, 2015

[10][http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH\\_kef6-energa%20filtra.pdf](http://users.sch.gr/jabatzo/files/yliko/pdf%20g%20lykeiou/AH_kef6-energa%20filtra.pdf)

[11] Τσελές Ι. Δημήτριος, «Συλλογή και Επεξεργασία Δεδομένων» Σύγχρονη Εκδοτική, 2002

[12] Δρίβας Παναγιώτης, «Υλοποίηση τράπεζας φίλτρων για την ανάλυση ηχητικών σημάτων σε προγραμματιστικό περιβάλλον Matlab», Πτυχιακή Εργασία, Τμήμα μηχανικών πληροφορικής Τ.Ε.Ι Δυτικής Ελλάδας, 2015

[13]<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/anti-aliasing-filter>

[14] Γεώργιος Β. Μουστακίδης, «Βασικές Τεχνικές Ψηφιακής Επεξεργασίας Σημάτων», Πανεπιστήμιο Πατρών

[15] Γιώργος Π. Καφεντζής, «Εφαρμοσμένα Μαθηματικά για Μηχανικούς», ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΡΗΤΗΣ Τμήμα Επιστήμης Υπολογιστών , Εαρινό Εξάμηνο 2015/16

- [16] [http://195.134.76.37/applets/AppletNyquist/Appl\\_Nyquist1.html](http://195.134.76.37/applets/AppletNyquist/Appl_Nyquist1.html)
- [17] <http://www.ssp.ece.upatras.gr/courses/dsp/demos/demo1.html>
- [18] [https://www.avmentor.gr/tech/upsamplers\\_1.htm](https://www.avmentor.gr/tech/upsamplers_1.htm)
- [19] <http://eclass.teiion.gr/modules/document/file.php/TPT146/ADC%20%20CE%94%CE%B9%CE%AC%CE%BB%CE%B5%CE%BE%CE%B7%2010.pdf>
- [20] [www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/exc1.htm](http://www.ee.teihal.gr/labs/electronics/web/exc1.htm)
- [21] Ε. Χατζηκρυνιώτης, Κ. Χρυσάφης, Ανασύνθεση: Δ. Ευαγγελινός, Ο. Βαλασιάδης, «Παλμογράφος Διπλής Δέσμης - Μελέτη & Ανάπτυξη», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τμήμα Φυσικής, 2012
- [22] Αθανάσιος Δ. Παναγόπουλος, Εργαστήριο Κινητών Ραδιοεπικοινωνιών, «Σημειώσεις - Εισαγωγή στις Τηλεπικοινωνίες», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, 2012
- [23] [https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product\\_id=395](https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product_id=395)
- [24] Γεωργούλιας Βασίλης, Μπατζάκης Έκτορας, «Μετατροπή Υπολογιστή Σε Παλμογράφο», Πτυχιακή Εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής, 2018
- [25] Κωνσταντίνος Ψωμόπουλος «Σημειώσεις - Διατάξεις Παραγωγής Υψηλών Τάσεων & Μέτρηση τους», Μάιος 2009
- [26] Βασίλειος Π. Ανδροβιτσάνεας, Νικολέτα Χ. Ηλία, «Σημειώσεις Εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων», Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Οκτώβριος 2017
- [27] Παντελής Ν. Μικρόπουλος, «Εργαστηριακές Ασκήσεις στην Τεχνολογία των Υψηλών Τάσεων», Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Πολυτεχνική Σχολή, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2008
- [28] Παπαναστασίου Γεώργιος, Πασχάλης Γεώργιος, «Παρουσίαση και Ταξινόμηση Μεταβατικών Φαινομένων στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας», Πτυχιακή εργασία, Τ.Ε.Ι. καβάλας, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2015
- [29] Π. Κούκος, «Τεχνολογία Υψηλών Τάσεων», Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Χαλκίδας, 2003-2004
- [30] Σταμούλιας Π. Γεώργιος, «Μελέτη και Σχεδίαση Καταμεριστών και Δοκιμίων για το Νέο Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων», Πτυχιακή Εργασία , Α.Τ.Ε.Ι Πειραιά, Τμήμα Ηλεκτρολογίας, 2012
- [31] <https://slideplayer.gr/slide/6193101/>



*Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.*

[32] Αθανάσιος Ν. Σκόδρας, Γεώργιος Α. Βασκαντήρας, «Σήματα και Συστήματα στο Πεδίο της Συχνότητας», Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών .Ανοιχτά ακαδημαϊκά μαθήματα, Πανεπιστήμιο Πατρών, 2014

[33] <http://www.pemuk.com/products/cwt-current-probe/cwt.aspx>

[34] [https://www.youtube.com/watch?v=GslrrG9l2Ls&ab\\_channel=TheAudiopedia](https://www.youtube.com/watch?v=GslrrG9l2Ls&ab_channel=TheAudiopedia)

[35] <http://porlidas.gr/Papers/MaxPowTr.pdf>

[36] Octopus 82XX CompuScope Description Manual, GaGe

## 7. Παράρτημα Α :Κάρτα μετρήσεων Octopus CompuScope 8229

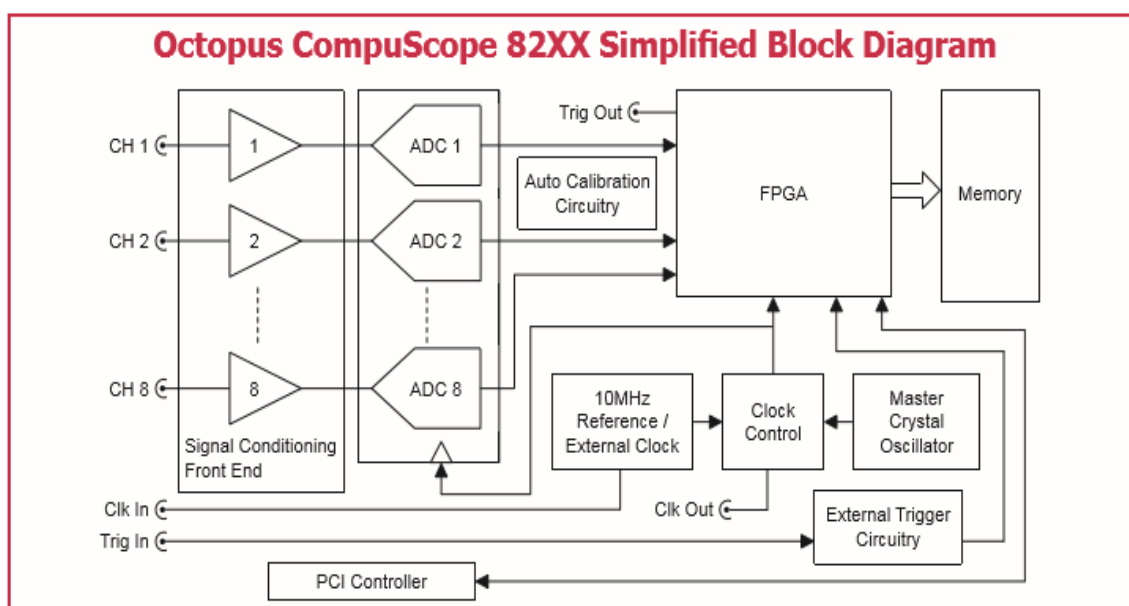
### Χαρακτηριστικά κάρτας

Στις Εικόνα 7-1, Εικόνα 7-2 και Εικόνα 7-3 περιγράφονται τα χαρακτηριστικά των καρτών της οικογένειας Octopus 82xx, το block διάγραμμα, αλλά και κάποια επιπλέον στοιχεία/χαρακτηριστικά [36].

#### FEATURES

- 2, 4, or 8 digitizing channels
- 10, 25, 50, 65, 100, or 125 MS/s sampling per channel
- 12 bits vertical resolution
- 128 MS to 2 GS on-board acquisition memory
- More than 100 MHz bandwidth
- Full-size, single-slot PCI card
- Full-featured front-end, with software control over input ranges, coupling and impedances
- 32 bits, 66 MHz PCI standard for 200 MB/s transfer to PC memory
- Ease of integration with External or Reference Clock In and Clock Out, External Trigger In and Trigger Event Out
- Programming-free operation with GageScope® oscilloscope software
- Software Development Kits available for LabVIEW, MATLAB, C/C#

Εικόνα 7-1 Χαρακτηριστικά των καρτών της οικογένειας Octopus 82xx [36] © <https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>



Εικόνα 7-2 Το απλοποιημένο block διάγραμμα της οικογένειας Octopus CompuScope 82XX [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

#### A/D SAMPLING

Number of Inputs:	2, 4 or 8
Resolution:	12 bits
ENOB (see Note 1):	10.0 bits
SNR (see Note 1):	62 dB
SFDR (see Note 1):	71 dB
SINAD (see Note 1):	61.5 dB
Maximum Sampling Rate Per Channel (product-dependent):	10, 25, 50, 65, 100 or 125 MS/s
Sampling Rates:	125 MS/s, 105 MS/s, 100 MS/s, 80 MS/s, 65 MS/s, 50 MS/s, 40 MS/s, 25 MS/s, 20 MS/s, 10 MS/s, 5 MS/s, 2 MS/s, 1 MS/s, 500 kS/s, 200 kS/s, 100 kS/s, 50 kS/s, 20 kS/s, 10 kS/s, 5 kS/s, 2 kS/s, 1 kS/s
Connector:	SMB
Impedance:	1 M $\Omega$ or 50 $\Omega$ ; (software-selectable)
Coupling:	AC or DC; (software-selectable)
AC Coupled Bandwidth:	10 Hz to >100 MHz (see Note 2)
DC Coupled Bandwidth:	DC to >200 MHz (50 $\Omega$ only, see Note 5)
Flatness (see Note 3):	Within $\pm 0.5$ dB of ideal response to 40 MHz
DC Accuracy (see Note 4):	$\pm 0.5$ %
Input Voltage Ranges:	$\pm 100$ mV, $\pm 200$ mV, $\pm 500$ mV, $\pm 1$ V, $\pm 2$ V, $\pm 5$ V ( $\pm 5$ V is only available in 50 $\Omega$ )
Protection:	
with 1 M $\Omega$ impedance:	Diode-clamped
with 50 $\Omega$ impedance:	Protection with 50 $\Omega$ source impedance
Absolute Maximum Amplitude	
with 1 M $\Omega$ impedance:	$\pm 15$ V (continuous)
with 50 $\Omega$ impedance:	$\pm 5$ V (continuous)

#### LOW-PASS FILTER

Type:	3-pole Bessel, 1 per channel
Cut-off Frequency:	20 MHz
Operation:	Individually software-selectable

#### TRIGGER OUT

Impedance:	50 $\Omega$ compatible
Amplitude:	0-2.5 V
Connector:	SMB

#### INTERNAL CLOCK

Accuracy:	$\pm 1$ ppm (0 to 50°C ambient)
-----------	---------------------------------

#### EXTERNAL CLOCK

Maximum Frequency:	Maximum product sample rate
Minimum Frequency:	2 MHz
Signal Level:	Minimum 1 V RMS Maximum 2 V RMS
Termination Impedance:	50 $\Omega$
Sampling Edge:	Rising
Duty Cycle:	50% $\pm 5$ %
Connector:	SMB
Coupling:	AC

#### ACQUISITION MEMORY

Active Channels	Total On-board Memory				
	128 M	256 M	512 M	1 G	2 G
1	128 M	256 M	512 M	1 G	2 G
2	64 M	128 M	256 M	512 M	1 G
4	32 M	64 M	128 M	256 M	512 M
8	16 M	32 M	64 M	128 M	256 M

#### TRIGGERING

Trigger Engines:	2 per channel, 1 for external trigger
Source:	CH 1 to 8, EXT or Software
Input Combination:	All combinations of sources logically OR'ed
Trigger Level Accuracy:	Less than $\pm 2$ % of Full Scale for channel triggering
Slope:	Positive or Negative; software-selectable
Sensitivity:	$\pm 2$ % of Full Scale This implies that signal amplitude must be at least 4% of full scale to cause a trigger to occur. Smaller signals are rejected as noise.
Post-Trigger Data:	128 points minimum. Can be defined with a 64 point resolution.
Maximum Record Length:	Maximum memory depth

#### EXTERNAL TRIGGER

Impedance:	2 k $\Omega$
Amplitude:	Absolute maximum $\pm 15$ V
Voltage Range:	$\pm 1$ V, $\pm 5$ V (software-selectable)
Bandwidth:	>100 MHz
Coupling:	AC or DC
Connector:	SMB

#### †POWER (IN WATTS, PER CARD)

25.0 W (typical)

†Measured on a typical 4-channel Octopus card.

#### PCI BUS INTERFACE

Plug-&-Play:	Fully supported
Bus Mastering:	Fully supported
Scatter-Gather:	Fully supported
Bus Width:	32 bits
Bus Speed:	66 MHz or 33 MHz
Bus Throughput:	200 MB/s to PC memory (66 MHz PCI; dependent on motherboard and number of PCI-PCI bridges)
Compatibility:	PCI-compliant, v.2.2 Also v.2.1 systems that supply 3.3 V to PCI slot

#### MULTI-CARD SYSTEMS

Supported by all Octopus CompuScope models, GageScope, and SDKs.

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

#### EXTERNAL REFERENCE

The External Reference timebase is used to synchronize the Internal Sampling Clock

Frequency: 10 MHz  $\pm$ 1000 ppm; (software-selectable)

Signal Level: Minimum 1 V RMS  
Maximum 2 V RMS

Impedance: 50  $\Omega$

Sampling Edge: Rising

Duty Cycle: 50%  $\pm$ 5%

Connector: SMB

#### CLOCK OUT

Maximum Frequency: Maximum product sample rate

Minimum Frequency: 2 MHz (from External Clock)  
1 kHz (from Internal Clock)

Signal Level: 0-2.5 V

Impedance: 50  $\Omega$  compatible

Duty Cycle: 50%  $\pm$ 10%

Connector: SMB

#### MULTIPLE RECORD

Pre-trigger Data: Up to virtually full record length

Record Length: 128 points minimum.  
Can be defined with a 64 points resolution.

#### TIMESTAMPING

Resolution: One sampling interval

Counter turnover: >24 hours continuous

#### CARD SIZE

Single-slot, full-length PCI

#### SYSTEM REQUIREMENTS

PCI-based computer, minimum Pentium II 500 MHz, with at least one free full-length PCI slot, 128 MB RAM, 100 MB hard disk.

#### OPERATING SYSTEMS

Windows XP: All Versions

Windows 2000: SP1 or higher

#### APPLICATION SOFTWARE

GageScope: Windows-based software for programming-free operation

LITE Edition: Included with purchase, provides basic functionality

Standard Edition: Provides limited functionality of advanced analysis tools, except for Extended Math

Professional Edition: Provides full functionality of all advanced analysis tools

#### SOFTWARE DEVELOPMENT KITS (SDK)

CompuScope SDK for C/C# for Windows\*

CompuScope SDK for MATLAB for Windows

CompuScope SDK for LabVIEW for Windows

\*C/C# SDK is compatible with LabWindows/CVI 7.0+ compiler. Visual Basic.NET support available with purchase of C/C# SDK.

Contact your GaGe Sales Agent for information on Linux support.

#### WARRANTY

One year parts and labor

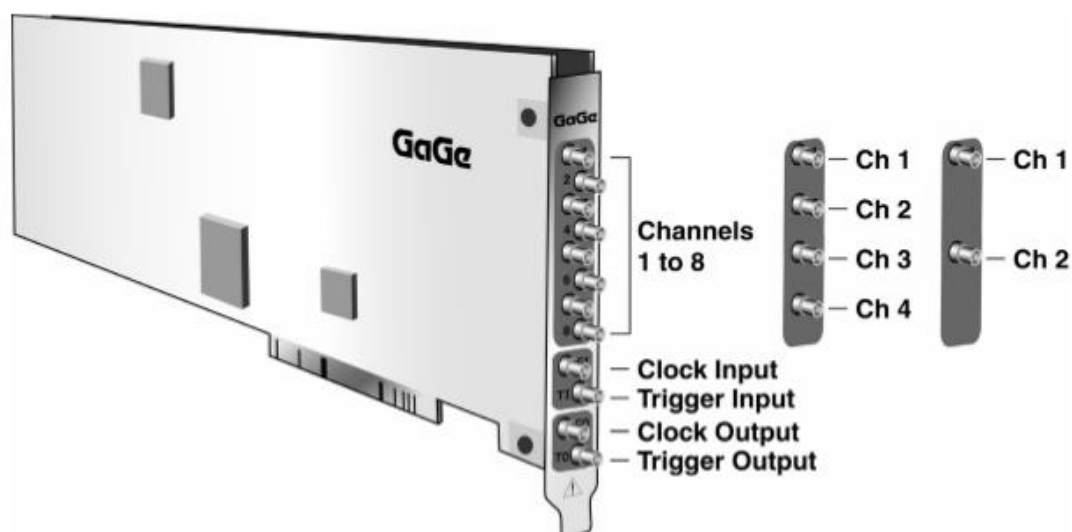
Certificate of NIST Traceable Calibration is included.

All specifications subject to change without notice.

Εικόνα 7-3 Επιπλέον στοιχεία για τις κάρτες της οικογένειας Octopus CompuScope 82XX [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compu-scope-octopus-82xx.htm>

## Περιγραφή και στοιχεία της κάρτας

Οι υποδοχές των ψηφιακών καρτών Octopus 8 καναλιών, 4 καναλιών και 2 καναλιών παρουσιάζονται στην Εικόνα 7-4 [36].



Εικόνα 7-4: Connectors on the Octopus family cards [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compu-scope-octopus-82xx.htm>

- Η υποδοχή του καναλιού 1 είναι η είσοδος του σήματος για το κανάλι 1.
- Η υποδοχή του καναλιού 2 είναι η είσοδος του σήματος για το κανάλι 2.
- Ομοίως και για τα κανάλια 3,4,5,6,7,8.

- Η υποδοχή του Clock Input χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ενός σήματος που θα χρησιμοποιηθεί ως ρολόι δειγματοληψίας. Αυτό το σήμα αναφέρεται ως εξωτερικό σήμα ρολογιού.
- Η υποδοχή του Clock Output χρησιμοποιείται για την παροχή του σήματος ρολογιού, είτε από τον εσωτερικό ταλαντωτή είτε από την εξωτερική είσοδο του ρολογιού, σε άλλη μονάδα του συστήματος δοκιμής ή πειραματική ρύθμιση.
- Η υποδοχή του Trigger Input χρησιμοποιείται για την εισαγωγή ενός σήματος που χρησιμοποιείται ως εξωτερικό Trigger (σκανδάλη). Το εξωτερικό Trigger ορίζεται ακριβώς όπως σε έναν παλμογράφο. Αυτό το σήμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ενεργοποίηση του συστήματος, αλλά δεν μπορεί να προβληθεί ή να ψηφιοποιηθεί.
- Η υποδοχή του Trigger Output χρησιμοποιείται για την παροχή ενός trigger σήματος που παράγεται από την κάρτα, σε άλλη μονάδα του συστήματος δοκιμής.

### **Απόκριση συχνότητας και φίλτρο περιορισμού εύρους ζώνης (frequency response and bandwidth-limiting filter)**

Μπορεί επιπλέον να γίνει εγκατάσταση του λογισμικό Bessel με χαμηλής διέλευσης φίλτρο, και με συχνότητα 3 dB roll-off 20 MHz εντός του κυκλώματος ρύθμισης σήματος εισόδου Octopus. Η εγκατάσταση αυτού του φίλτρου παρέχει βελτιωμένη απόδοση θορύβου αφαιρώντας τα στοιχεία θορύβου υψηλής συχνότητας από σήματα εισόδου χαμηλής συχνότητας [36] .

Με το φίλτρο Bessel δημιουργείται μια εξαιρετικά ομαλή καμπύλη απόκρισης σε όλες τις συχνότητες. Τα φίλτρα Bessel είναι επίσης ιδανικά για την απόκριση επίπεδης ζώνης διέλευσης, και τον περιορισμό της ζώνης παραμόρφωσης [36].

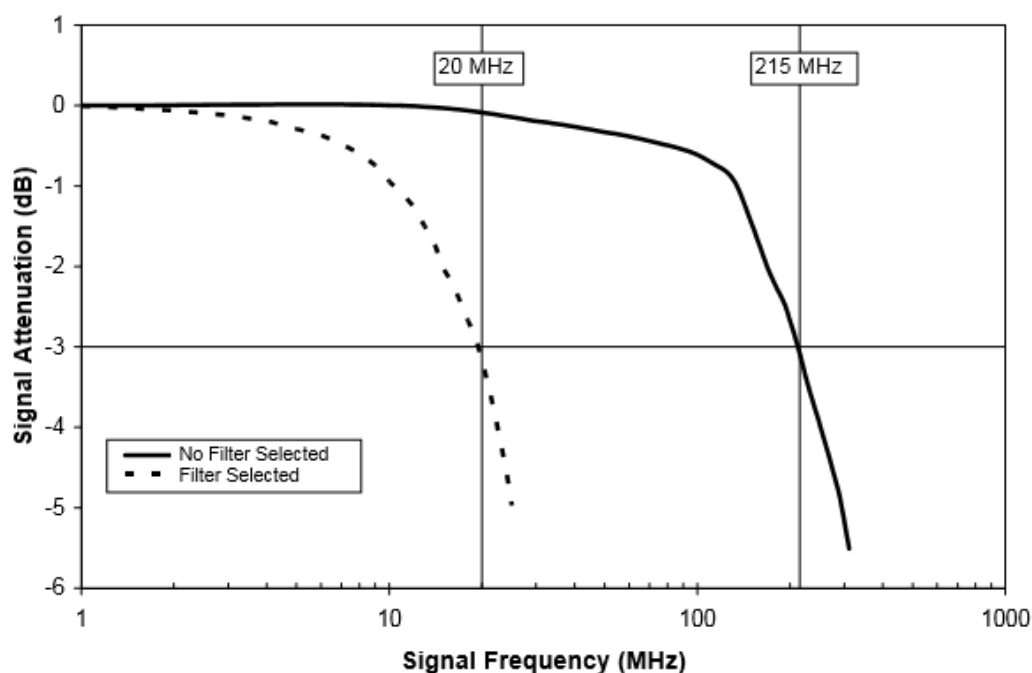
Στην Εικόνα 7-5 φαίνεται το γράφημα της απόκρισης συχνότητας του καναλιού εισόδου, σε συνάρτηση με το φίλτρο που εφαρμόστηκε [36].

Σχεδιασμένο για να ικανοποιεί ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, είναι κρίσιμο το γεγονός ότι η οικογένεια Octopus παρέχει μετρήσεις συχνότητας όσο το δυνατόν πιο ακριβείς και αξιόπιστες σε σχέση με το αναλογικό εύρος ζώνης της κάρτας. Η οικογένεια Octopus έχει μια πολύ επίπεδη απόκριση συχνότητας, ελαχιστοποιώντας την εξασθένηση ή την ενίσχυση των συνιστωσών συχνότητας, έτσι ώστε τα σήματα από κάθε κανάλι εισόδου να είναι όσο το δυνατόν πιο πανομοιότυπα από τις συνδέσεις των θυρών εισόδου με τους ADC. Οι διαδρομές των σημάτων χρονισμού στους ADC είναι επίσης όσο το δυνατόν ομοιόμορφες μεταξύ τους [36].

Η Εικόνα 7-5 απεικονίζει την πραγματική απόκριση συχνότητας της οικογένειας Octopus, έχοντας κάνει χρήση των ακόλουθων παραμέτρων:

- Ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι 125 MS / s.
- Το εύρος εισόδου είναι  $\pm 500\text{mV}$  με DC σύνδεση στην είσοδο και αντίσταση εισόδου τερματισμού 50 Ω.

- Η εξασθένιση του σήματος εμφανίζεται ως συνάρτηση της συχνότητας του σήματος εισόδου με και χωρίς το εφαρμοζόμενο φίλτρο Bessel χαμηλής διέλευσης 20 MHz.



Εικόνα 7-5 : Απεικόνιση της απόκρισης συχνότητας [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuSCOPE-octopus-82xx.htm>

## Οδηγίες ρύθμισης της κάρτας μετρήσεων octopus 8229 128m και χρήση λογισμικών

Αφού γίνει σωστά η εγκατάσταση της κάρτας και των υπόλοιπων τμημάτων του υλικού (hardware) στον ηλεκτρονικό υπολογιστή και αφού προηγηθούν κάποιες απαραίτητες ενέργειες για την εγκατάσταση και χρήση του λογισμικού της κάρτας, τότε το σύστημα είναι σε θέση προς μέτρηση. Η χρήση των λογισμικών της κάρτας για τις όποιες μετρήσεις περιγράφεται στη συνέχεια [36].

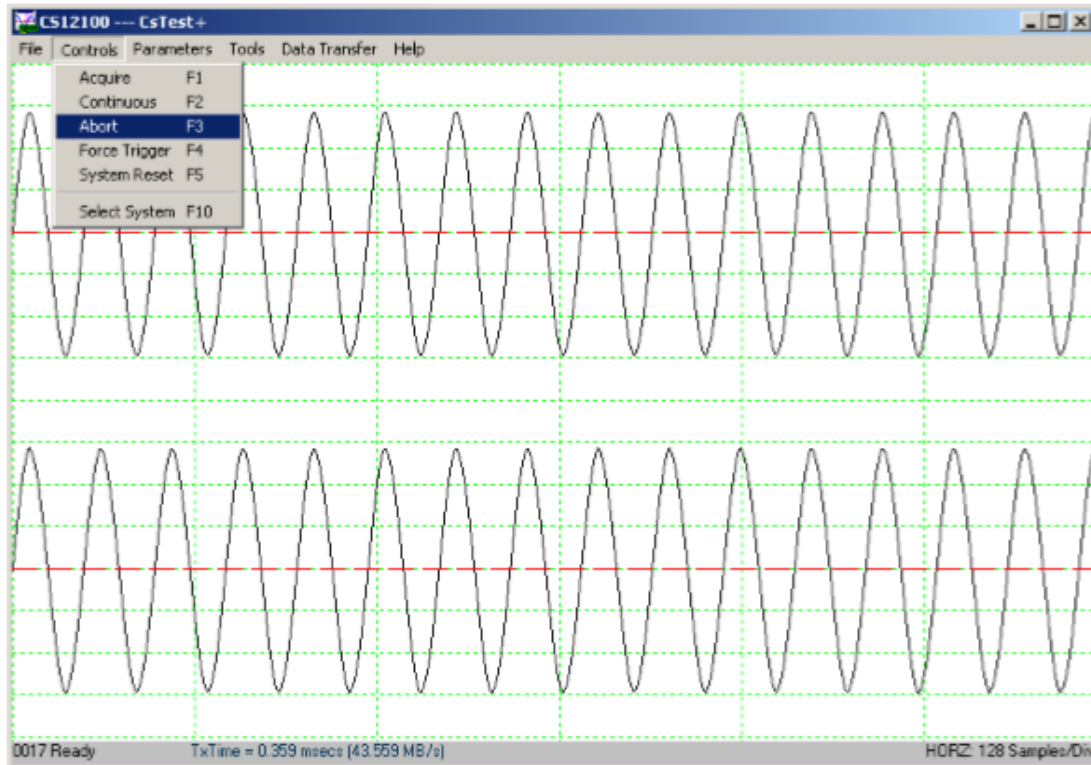
Αρχικά γίνεται η σύνδεση της γεννήτριας με ένα από τα δύο ή και τα δύο κανάλια της κάρτας. Στη συνέχεια για να επιβεβαιωθεί ότι το πρόγραμμα διάβασε το σήμα που δόθηκε από τη γεννήτρια, επιλέγεται η εντολή «**acquier**» μέσω της καρτέλας «**Controls**». Υπάρχει η δυνατότητα να εμφανίζεται συνεχόμενα το σήμα με την πάροδο του χρόνου, σε πραγματικό δηλαδή χρόνο, μέσω της επιλογής «**Controls**→**continuous**» [36].

Στην Εικόνα 7-6 φαίνεται ένα σήμα που μετρήθηκε μέσω του λογισμικού «**CSTest**» το οποίο είναι ημίτονο. Ο αριθμός στην κάτω αριστερή γωνία του παραθύρου του **CSTest** είναι ένας μετρητής. Κάθε φορά που το πρόγραμμα αποκτά δεδομένα, ο μετρητής αυξάνεται κατά 1. Επίσης, ανάλογα με την κάρτα **CompuScope** και την έκδοση του προγράμματος οδήγησης που έχει εγκατασταθεί, το παράθυρο διαλόγου μπορεί να φαίνεται ελαφρώς διαφορετικό. Στη δεξιά πλευρά του μετρητή βρίσκεται η κατάσταση απόκτησης. Η κατάσταση απόκτησης μπορεί να πάρει μία από τις ακόλουθες τιμές [36]:

- **Ready** : Έτοιμο για άλλη απόκτηση δεδομένων.

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

- **Waiting For Trigger:** Η διαδικασία λήψης δεδομένων είναι σε εξέλιξη, η συνθήκη ενεργοποίησης δεν έχει εκπληρωθεί.
- **Triggered :** Η διαδικασία λήψης δεδομένων βρίσκεται σε εξέλιξη
- **Data Transfer:** Η μεταφορά δεδομένων από την ενσωματωμένη μνήμη στη μνήμη του PC βρίσκεται σε εξέλιξη.



Εικόνα 7-6. Απεικόνιση του προγράμματος GageScope 2 καναλιών μαζί με το μενού επιλογών [36]  
©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

Με την επιλογή του «Abort» από την καρτέλα «Controls» η κάρτα θα σταματήσει οποιαδήποτε περαιτέρω απόκτηση [36].

#### Λοιπές λειτουργίες του λογισμικού CStest +

Στη συνέχεια δίνονται κάποιες επιπλέον λειτουργίες που παρέχει το λειτουργικό της κάρτας δειγματοληψίας [36].

#### ❖ File → Save Channels

Μέσω της επιλογής «Save →Channels» μπορεί να γίνει αποθήκευση των δεδομένων που έχουν ληφθεί από διαφορετικά κανάλια σε διαφορετικά αρχεία, σε μορφή αρχείου Gages SIG. Το αρχείο Gage SIG μπορεί να διαβαστεί από εφαρμογές που υποστηρίζουν το αρχείο Gages SIG, όπως το GageScope.

#### ❖ Controls → Force Trigger

Μέσω της επιλογής «Force Trigger» προκαλείται η άμεση ενεργοποίηση του συστήματος απόκτησης δεδομένων.

#### ❖ Controls → System Reset

Εγκατάσταση, ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Μέσω της επιλογής «System Reset» το σύστημα απόκτησης επανέρχεται στην προεπιλεγμένη κατάσταση. Η τρέχουσα απόκτηση δεδομένων θα διακοπεί και όλες οι παράμετροι διαμόρφωσης θα επανέλθουν στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις.

#### ❖ Controls → Select System

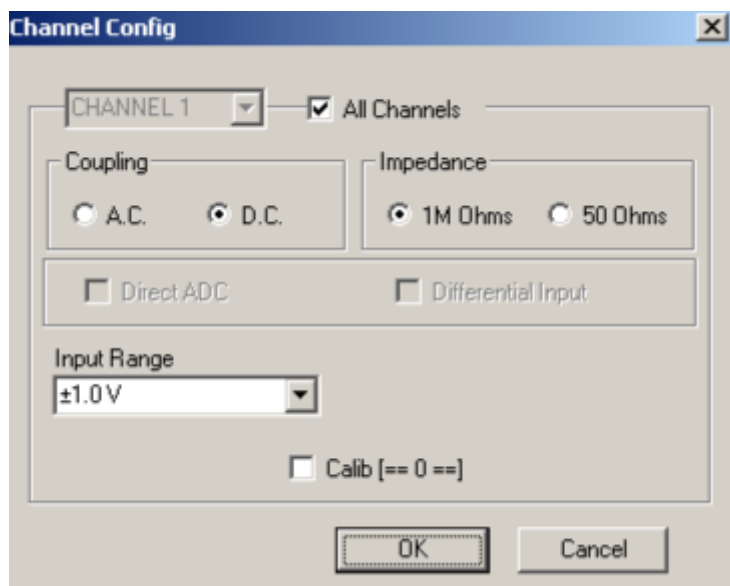
Εάν υπάρχουν περισσότερα από ένα συστήματα δειγματοληψίας εγκατεστημένα στον ίδιο υπολογιστή, η επιλογή «Select System» επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει ένα άλλο σύστημα δειγματοληψίας, και να το καταστήσει ως το ενεργό σύστημα στο CsTest+ .

#### ❖ Parameters → Acquisition Config

Η επιλογή «Acquisition Config» επιτρέπει στους χρήστες να τροποποιούν διαφορετικές παραμέτρους δειγματοληψίας, όπως τα Pre-Trigger και Post-Trigger εύρη, την πολλαπλή καταγραφή (Multiple Recording), το ρυθμό δειγματοληψίας (Sample Rate), και το χρόνο λήξης του σκανδαλιστή (Trigger Timeout).

#### ❖ Parameters → Channel Config

Η επιλογή «Channel Config» επιτρέπει στους χρήστες να τροποποιούν διαφορετικές παραμέτρους όπως ο τρόπος ζεύξης του σήματος (Coupling), η σύνθετη αντίσταση (Impedance) και το κέρδος (Gain). Η επιλογή «Calib [==0==]» θα αναγκάσει την επαναβαθμονόμηση του υλικού (hardware), λαμβάνοντας τη μέση τιμή της τρέχουσας εισόδου ως νέα αναφορά για το μηδενικό επίπεδο. Στην Εικόνα 7-7 φαίνεται το παράθυρο με του λογισμικού που επιτρέπει τη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων.



Εικόνα 7-7 Παράμετροι του πεδίου channel config [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

#### ❖ Parameters → Trigger Config

Η επιλογή «Trigger Config» επιτρέπει στους χρήστες να τροποποιούν διαφορετικές παραμέτρους ενεργοποίησης όπως η πηγή σκανδαλισμού (trigger source).

#### ❖ Tools → Performance



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Η επιλογή «Performance tests (PRF)» μπορεί να δώσει την απόδοση του συστήματος με βάση τις παραμέτρους που έχουν επιλεγεί.

#### ❖ Help → Display Controls

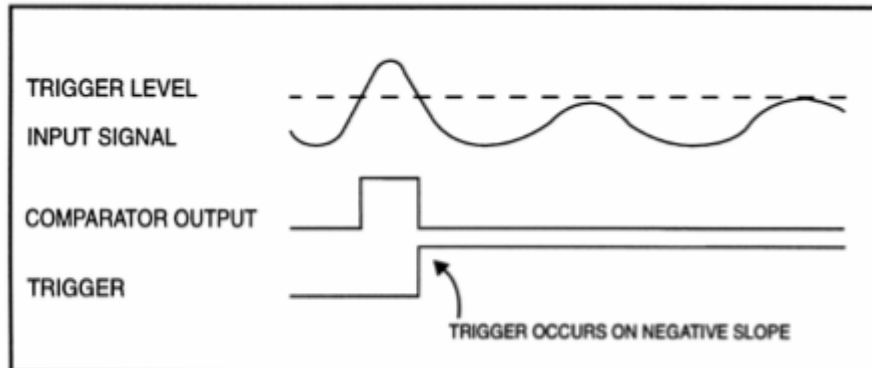
Η επιλογή «Display Controls» εμφανίζει διάφορες λειτουργίες και συντομεύσεις πληκτρολογίου.

#### Σκανδαλισμός της κάρτας δειγματοληψίας

Αυτή η ενότητα περιγράφει την αρχιτεκτονική και τη λογική οργάνωση της λειτουργικότητας του τρόπου σκανδαλισμού (triggering) που αφορά το λογισμικό της κάρτας GaGe CompuScope. Η περιγραφή ισχύει για όλα τα περιβάλλοντα λογισμικού, όπως το GageScope, το CsTest+.

#### Απλή διαδικασία σκανδαλισμού

Οι ψηφιοποιητές CompuScope προσφέρουν μια μεγάλη ποικιλία πολύπλοκων δυνατοτήτων triggering, οι οποίες ποικίλουν ανάλογα με το μοντέλο. Η κατανόηση και η εφαρμογή των διαφόρων σύνθετων τρόπων triggering δεν είναι απλή. Ως απλή διαδικασία σκανδαλισμού (Simple Triggering) ορίζεται μια μοναδική πηγή σκανδαλισμού (trigger) (π.χ. από τα κανάλια 1 και 2 ή εξωτερικά) σε μία ανεξάρτητη κάρτα.



Εικόνα 7-8 : Δημιουργία ενός σήματος σκανδαλισμού με ενεργοποίηση στην κάθοδο [36]  
©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compu-scope-octopus-82xx.htm>

Το κύκλωμα σκανδαλισμού της κάρτας CompuScope έχει σχεδιαστεί για να παρέχει παρόμοια λειτουργία triggering με αυτή ενός παλμογράφου, έτσι ώστε ένας χρήστης να μπορεί εύκολα να αντικαταστήσει έναν ψηφιακό παλμογράφο σε μια δοκιμαστική διάταξη, με μια κάρτα CompuScope. Όπως και με τον παλμογράφο, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την πηγή σκανδαλισμού, το επίπεδο σκανδαλισμού και την κλίση σκανδαλισμού χρησιμοποιώντας κάποιες επιλογές μέσα από το λογισμικό. Κάθε φορά που το σήμα trigger πλησιάζει το επίπεδο σκανδαλισμού, το on-board κύκλωμα σκανδαλισμού παρακολουθεί για την κλίση που έχει ορίσει ο χρήστης (σήμα ανόδου, ή σήμα καθόδου). Όταν εντοπιστεί η κατάλληλη κλίση, παράγεται ένα ψηφιακό σήμα από την ίδια την κάρτα CompuScope. Η Εικόνα 7-8 δείχνει ένα σήμα εισόδου το οποίο συνοδεύεται από ένα επίπεδο σκανδαλισμού (διακεκομμένη οριζόντια γραμμή). Η

έξοδος του κυκλώματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 7-8, μαζί με το τελικό εσωτερικό ψηφιακό σήμα το οποίο ενεργοποιείται μόνο αν η κλίση του σήματος εισόδου είναι αρνητική καθώς διασχίζει το επίπεδο σκανδαλισμού [36].

Η λειτουργία απλού σκανδαλισμού πραγματοποιείται απλά ορίζοντας την απαιτούμενη πηγή σκανδαλισμού (source trigger) από το λογισμικό. Για παράδειγμα, εάν το κανάλι 2 έχει ρυθμιστεί για την περιοχή εισόδου  $\pm 2$  Volt και έχει επιλεγεί ως κανάλι σκανδαλισμού, τότε ένα επίπεδο σκανδαλισμού μεγέθους +25% αντιστοιχεί σε ένα trigger level 0,5 Volt. Εναλλακτικά, αν επιλεγεί εξωτερική πηγή, τότε το ποσοστό είναι σε σχέση με το εύρος εισόδου του εξωτερικού σκανδαλιστή [36].

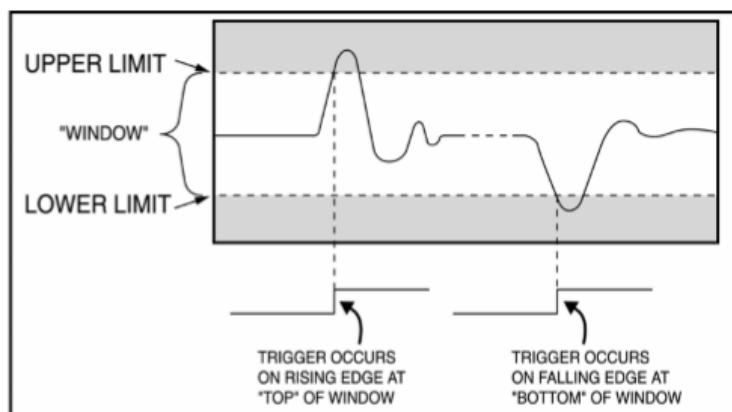
Ένα σύνθημα πρόβλημα σκανδαλισμού με την κάρτα CompuScope είναι όταν οι χρήστες επιθυμούν να χρησιμοποιήσουν ως σήμα σκανδαλισμού ένα μονοπολικό σήμα. Συνήθως χρησιμοποιώντας ένα ψηφιακό σήμα 0 έως 5 Volt ως εξωτερική πηγή σκανδαλισμού, οι χρήστες ορίζουν κατά λάθος το επίπεδο σκανδαλισμού στο 0%, το οποίο αντιστοιχεί σε ένα επίπεδο 0 Volt. Δεδομένου όμως ότι το ψηφιακό σήμα μπορεί να μην πέσει ποτέ στα 0V, το επίπεδο σκανδαλισμού πρακτικά δεν επιτυγχάνεται ποτέ με αποτέλεσμα τελικά το κύκλωμα σκανδαλισμού να μη λειτουργεί. Η απλή ανύψωση του επιπέδου σκανδαλισμού σε 1 ή 2 Volts μπορεί να επιλύσει αυτό το πρόβλημα [36].

Η σωστή χρήση της λειτουργίας του κυκλώματος σκανδαλισμού των καρτών CompuScope απαιτεί την κατανόηση της έννοιας του χρόνου λήξης του σκανδαλισμού. Αυτή η τιμή καθορίζει το χρονικό διάστημα που το υλικό της κάρτας CompuScope θα περιμένει μέχρι να συμβεί ένα συμβάν σκανδαλισμού (trigger event), πριν η ίδια η κάρτα αναγκάσει να συμβεί ένας σκανδαλισμός, και εφόσον έχει λήξει ο συγκεκριμένος χρόνος [36].

Οι χρήστες θα πρέπει να επιλέξουν μια τιμή χρόνου λήξης σκανδαλισμού που να υπερβαίνει το μέγιστο χρονικό διάστημα κατά το οποίο αναμένεται ένα συμβάν σκανδαλισμού [36].

Εκτός από τη λειτουργία απλού σκανδαλισμού, είναι δυνατές διάφορες σύνθετες επιλογές σκανδαλισμού μέσω του υλικού της κάρτας CompuScope. Αυτές οι επιλογές κάνουν χρήση πολλαπλών πηγών σκανδαλισμού που διατίθενται σε μία κάρτα CompuScope, καθώς και διασυνδέσεις σήματος σκανδαλισμού μεταξύ καρτών CompuScope μέσα σε ένα σύστημα CompuScope τύπου Αφέντη/Σκλάβου (Master / Slave) [36].

### Σκανδαλισμός σε παράθυρο



Εικόνα 7-9: Χρήση παραθύρου σκανδαλισμού [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compu-scope-octopus-82xx.htm>

Η λειτουργία σκανδαλισμού με χρήση παραθύρου που φαίνεται στην Εικόνα 7-9 υλοποιείται επιλέγοντας το ίδιο κανάλι εισόδου με την πηγή σκανδαλισμού, αλλά για δύο συμβάντα σκανδαλισμού. Επιλέγονται στη συνέχεια τα επίπεδα για τα δύο συμβάντα ως ανώτερο και κατώτερο όριο με θετικές και αρνητικές κλίσεις, αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο, αν η τάση σήματος ανεβαίνει πάνω από το ανώτερο όριο, ενεργοποιείται ο πρώτος σκανδαλιστής, και αν η τάση του σήματος πέσει κάτω από το κατώτατο όριο, ενεργοποιείται ο δεύτερος σκανδαλιστής. [36].

## Χρήση των δυνατοτήτων του λογισμικού Gagescope

### Το παράθυρο πληροφοριών - Info View

Χρησιμοποιώντας τα προηγμένα εργαλεία ανάλυσης, το GageScope μπορεί να αναλύσει τα δεδομένα σήματος και να εμφανίσει τα αποτελέσματα στο παράθυρο InfoView, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-10 [36].

Αριστερά του μενού του λογισμικού GageScope φαίνεται το πλαίσιο InfoView στο οποίο δίνονται οι πληροφορίες του σήματος που καταγράφεται κάθε φορά [36].

Name	Value
Ch 1	
Mean	-24.37 mV
RMS	711.90 mV
Amplit...	1.99 V
Peak...	1.99 V
Aver...	1.99 V
Devi...	0.00 V
Period	6.31 uS
Frequ...	158.49 KHz
FallTi...	1.85 uS
RiseT...	1.86 uS
PosW...	3.11 uS
Neg...	3.20 uS
PosD...	49
NegD...	51
PosD...	0.00 V

Εικόνα 7-10: Παράθυρο InfoView [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

### Εργαλεία προηγμένης ανάλυσης

Τα εργαλεία προηγμένης ανάλυσης αποτελούν μέρος του λογισμικού GageScope και παρέχουν πρόσθετες λειτουργίες, όπως μέτρηση και εμφάνιση παραμέτρων των μετρούμενων κυματομορφών [36].

Τα διαθέσιμα εργαλεία ανάλυσης είναι [36]:

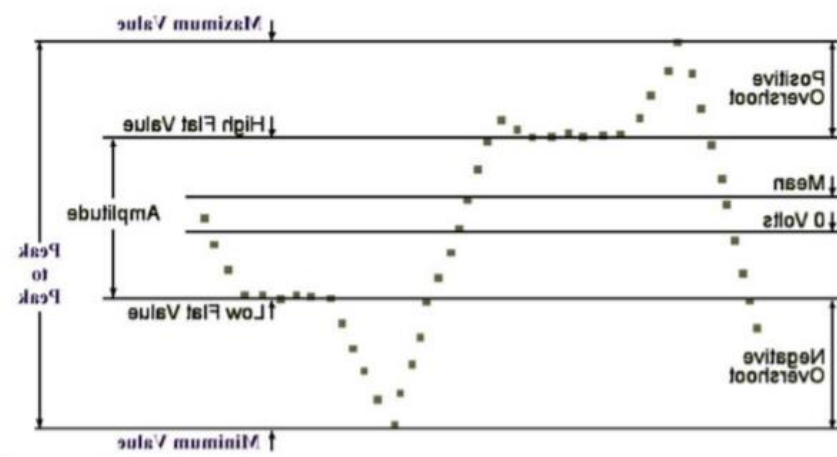
- AutoSave
- Averaging
- Waveform Parameters
- FFT Analysis
- Extended Math [36]

Το **AutoSave** (αυτόματη αποθήκευση) είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την απόκτηση δεδομένων μεταβατικών σημάτων. Επιτρέπει τη συλλογή δεδομένων με ακριβή καταγραφή του χρόνου και της ημερομηνίας κατά την πραγματοποίηση του σκανδαλισμού ενός συμβάντος [36].

### Σχετικά με τις παραμέτρους

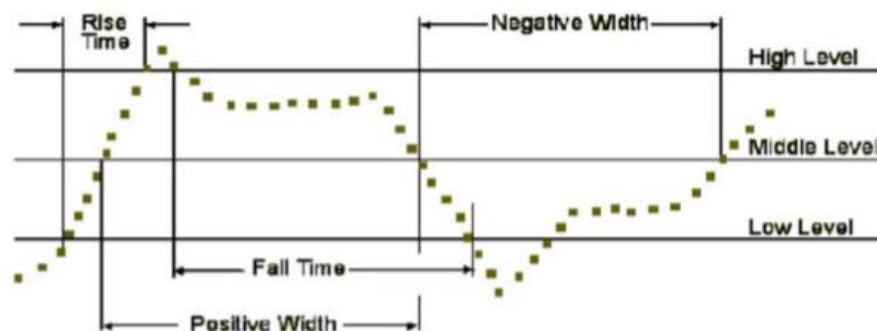
Οι εικόνες Εικόνα 7-11 και Εικόνα 7-12 δείχνουν σχηματικά κάποιες βασικές παραμέτρους των σημάτων που συνήθως μετρούνται. Οι παράμετροι αυτές είναι [36]:

- **Mean** είναι ο μέσος όρος όλων των σημείων του σήματος.
- **Fall Time** είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την πτώση του άκρου ενός σήματος ώστε να μεταβεί από το «υψηλό επίπεδο» σήματος σε «χαμηλό επίπεδο».
- **Rise** είναι το χρονικό διάστημα για την άνοδο του άκρου ενός σήματος από το χαμηλό επίπεδο στο υψηλό επίπεδο.
- **Positive Width** είναι το χρονικό διάστημα μεταξύ της ανόδου και της καθόδου έως την άκρη του τμήματος του σήματος πάνω από το μεσαίο επίπεδο. Ομοίως και για το **Negative Width**.
- **PosDuty** = (Positive Width ÷ Period) x 100
- **NegDuty** = (Negative Width ÷ Period) x 100
- **PosOvershoot** = Maximum Value - High Flat Value
- **NegOvershoot** = Minimum Value - Low Flat Value



Εικόνα 7-11 Παράμετροι τάσης [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

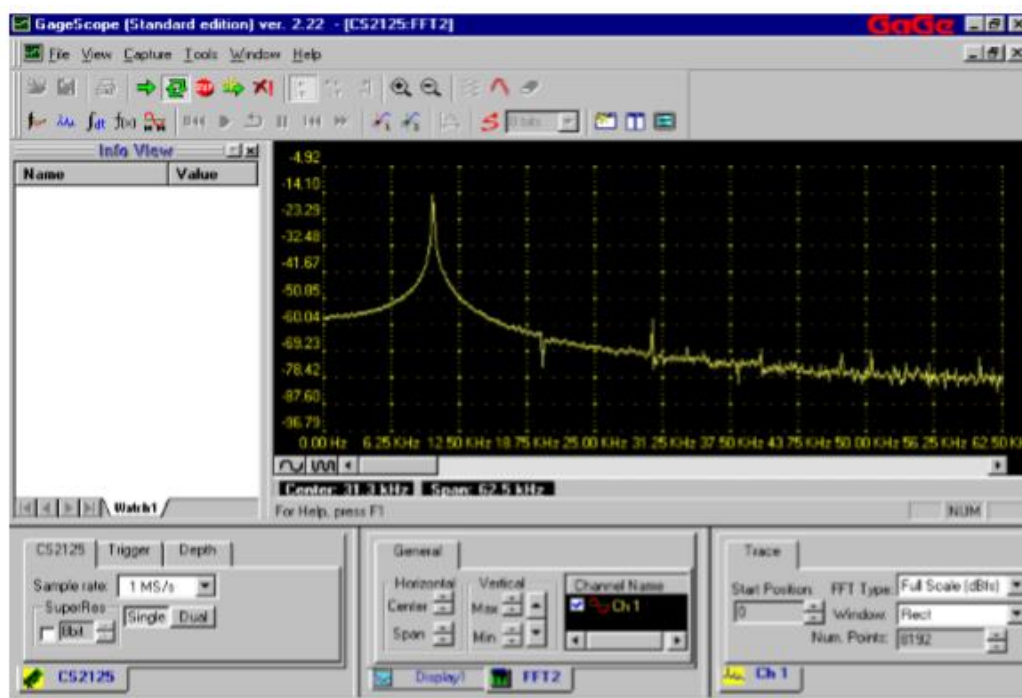
Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.



Εικόνα 7-12 Παράμετροι χρόνου [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

### Ανάλυση Fourier στο λογισμικό GageScope.


Το εργαλείο ανάλυσης FFT που παρέχεται από το λογισμικό GageScope παρέχει φασματική ανάλυση πολλαπλών καναλιών με ταυτόχρονη προβολή των δεδομένων στο πεδίο του χρόνου και της συχνότητας. Ένα παράδειγμα παραθύρου με την ανάλυση Fourier ενός σήματος φαίνεται στην Εικόνα 7-13 [36].

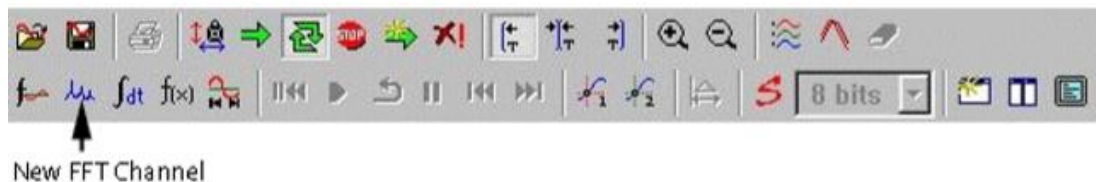


Εικόνα 7-13 Παράδειγμα ανάλυσης Fourier [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

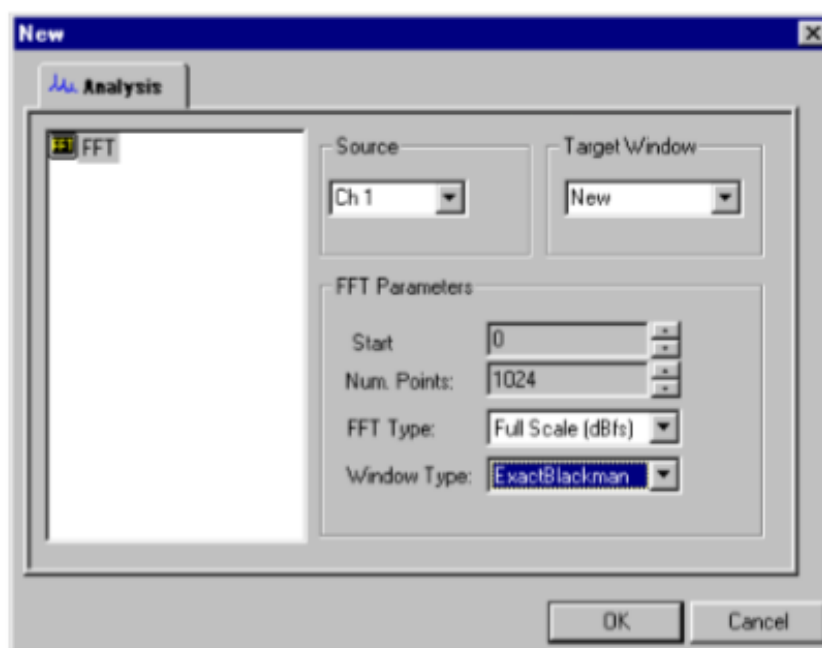
Μια σημαντική παρατήρηση αφορά τη ρύθμιση της οθόνης σε 256 χρώματα (κατ' ελάχιστο) για να χρησιμοποιηθεί το εργαλείο ανάλυσης FFT, διαφορετικά μπορεί να αλλοιωθεί η εμφάνιση στην οθόνη [36].

Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

Για να ξεκινήσει μια ανάλυση ενός σήματος, από το βασικό μενού εργαλείων του παραθύρου ανάλυσης επιλέγεται το κουμπί , όπως φαίνεται στην Εικόνα 7-14 [36].



Εικόνα 7-14 Η γραμμή εργαλείων του λογισμικού GageScope [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>



Εικόνα 7-15 Παράθυρο ρυθμίσεων της ανάλυσης φουριερ [36] ©<https://www.gage-applied.com/digitizers/12-bit/pci/compuscope-octopus-82xx.htm>

Οι διαθέσιμες επιλογές στο παράθυρο ρυθμίσεων του γρήγορου μετασχηματισμού Φουριερ (FFT) που είναι διαθέσιμες από το λογισμικό και φαίνονται στην Εικόνα 7-15 είναι [36]:

**Start:** Το αρχικό σημείο δειγματοληψίας για την ανάλυση. Το 0 σημαίνει το σημείο στο οποίο συμβαίνει ο σκανδαλισμός και ξεκινά η σύλληψη του σήματος.

**Num. Points:** Ο αριθμός των σημείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση Fourier. Ο μέγιστος αριθμός σημείων που υποστηρίζονται στην έκδοση Professional του GageScope είναι 4 εκατομμύρια.

**FFT Type:** Η επιλογή του τύπου FFT περιλαμβάνει πλήρη κλίμακα (dBfs), 1 milwatt (dBm) και 1 volt (dBV).

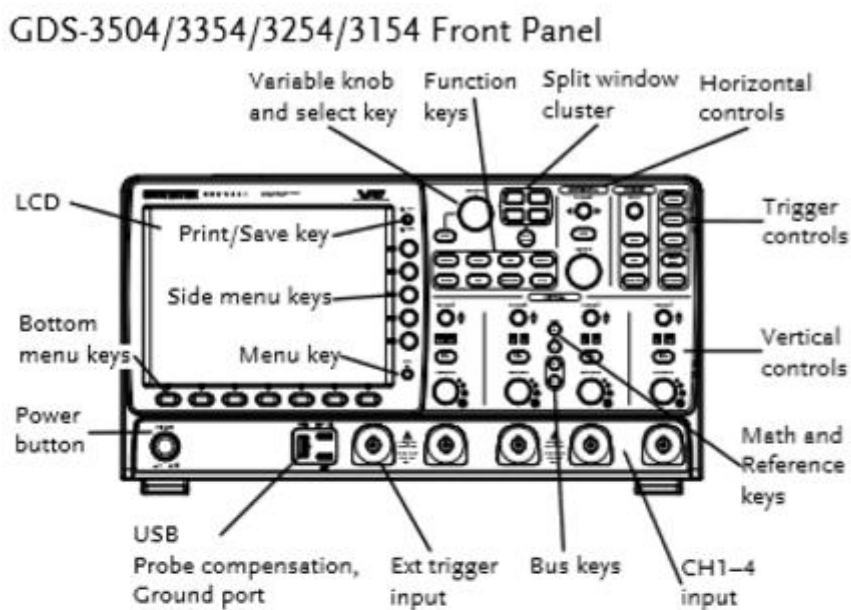
**Window Type:** η επιλογή αυτή περιλαμβάνει τα παράθυρα Rect, Parzen, Hanning, Welch, Hamming, ExactBlackman και BlackmanHarris. Αφού δημιουργηθεί το παράθυρο FFT, αλλάζουν τα στοιχεία ελέγχου οθόνης και καναλιού για να προσφέρουν νέες επιλογές.



Εγκατάσταση ,ρύθμιση και θέση σε λειτουργία Αναλογικού σε Ψηφιακού Συστήματος μετρήσεων Η/Υ υψηλής ταχύτητας δειγματοληψίας, για μετρήσεις κρουστικών φαινομένων σε συστήματα Υψηλής Τάσης.

## 8. Παραρτημα Β : Ο ψηφιακός παλμογράφος GDS – 3254

Στο παράρτημα β γίνεται η παρουσίαση και η ανάλυση του ψηφιακού παλμογράφου GDS-3254 με τον οποίο έγινε η επαλήθευση για την σωστή λειτουργία της γεννήτριας συχνοτήτων αλλά και της κάρτας δειγματοληψίας στο εργαστήριο υψηλών τάσεων. Ο παλμογράφος είναι αυτός που παρουσιάζεται στην Εικόνα 8-1 μαζί με τις δυνατότητες των πλήκτρων του .



Εικόνα 8-1 Ο ψηφιακός παλμογράφος GDS – 3254 όπου (α) Η επεξήγηση των πλήκτρων του παλμογράφου και (β) Η εμπρός όψη του παλμογράφου [23] ©[https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product\\_id=395](https://priniotakiselectronics.gr/index.php?route=product/product&product_id=395)