



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

## Σχεδίαση και κατασκευή γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλας Θ. Τσιπότης

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Μάρτιος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΨΗΛΩΝ ΤΑΣΕΩΝ

## Σχεδίαση και κατασκευή γεννήτριας κρουστικών ρευμάτων

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλας Θ. Τσιπότης

Επιβλέπων: Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Ομότιμος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18<sup>η</sup> Μαρτίου 2024

.....  
Φραγκίσκος Β. Τοπαλής  
Ομότιμος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π

.....  
Ιωάννης Φ. Γκόνος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....  
Χρήστος Αθ.  
Χριστοδούλου  
Επίκουρος Καθηγητής  
Ε.Μ.Π

Αθήνα, Μάρτιος 2024

.....

Νικόλας Τσιπότης

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Νικόλας Τσιπότης

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Copying, saving and distributing this work, in whole or in part, for commercial purposes is prohibited. Reproduction, saving and distribution for a non-profit, educational or research purpose is permitted, provided that the source is acknowledged and this message is preserved. Questions regarding the commercial use of the work should be directed to the author.

The opinions and conclusions contained in this document are those of the author and should not be interpreted as representing the official positions of the National Technical University of Athens.



## Περίληψη

Τα δίκτυα μεταφοράς και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνουν εξοπλισμό υψηλής τάσης ο οποίος οφείλει, πριν τεθεί σε λειτουργία, να δοκιμαστεί μεταξύ άλλων δοκιμών και σε κρουστικά ρεύματα. Σκοπός της εργασίας είναι να κατασκευαστεί στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων μια γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων η οποία θα ελέγχει εξοπλισμό σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60060-1. Αρχικά περιγράφεται η ορολογία των γεννητριών κρουστικών ρευμάτων, οι διάφορες κυματομορφές αυτών και κυκλώματα παραγωγής τους. Επίσης τα εν ισχύ διεθνή πρότυπα που προδιαγράφουν τα κρουστικά ρεύματα και οι τελευταίες αλλαγές που έγιναν σε αυτά. Στην συνέχεια περιγράφεται αναλυτικά το κύκλωμα που επιθυμούμε κατασκευάσουμε, τα επιμέρους στοιχεία που απαιτούνται και γίνεται έλεγχος των υφιστάμενων στοιχείων που διαθέτει το εργαστήριο προς τα χαρακτηριστικά και την αξιοπιστία τους. Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά η μαθηματική επίλυση του κυκλώματος και εν συνεχεία περιγράφεται η ανάπτυξη της διάταξης. Στο έβδομο κεφάλαιο περιγράφεται αναλυτικά ο απαιτούμενος εξοπλισμός μέτρησης και καταγράφονται-αναλύονται τα αποτελέσματα των δοκιμών που εκτελέσαμε. Στο όγδοο κεφάλαιο κατασκευάζουμε και ελέγχουμε περαιτέρω μετρητικές διατάξεις κρουστικού ρεύματος. Τέλος γίνεται αναλυτική περιγραφή προτάσεων αναβάθμισης της διάταξης, των στοιχείων που θα απαιτηθούν και τον τρόπο που αυτά θα κατασκευαστούν.

## Λέξεις κλειδιά

Γεννήτρια κρουστικού ρεύματος, Εκφόρτιση, Ρεύμα κορυφής, Πηνίο Rogowski, Μετασχηματιστής ρεύματος, Απόσβεση, Ταλαντώσεις, Αντιστάθμιση

## Abstract

Power transmission and generation networks include high-voltage equipment which must, before being put into service, to be tested, inter alia, on impulse currents. The purpose of this work is to design and assemble in the High Voltage laboratory an impulse current generator, that will test equipment, according to the international standard IEC 60060-1. The terminology of the impulse current generators, their various waveforms and generating circuits are described in the beginning of the dissertation. Reference to the current international standards that specify impulse currents and their latest updates are also presented. Additionally, the circuit we wish to construct, the individual components required and the existing elements available in the laboratory are checked in detail for their characteristics and reliability. In the fifth chapter, the mathematical solution of the circuit is described together with the development of the generator. In the seventh chapter describes in detail the required measuring equipment and records and analyzes the results of the tests we performed. In the eighth chapter we assemble the generator and proceed to impulse current testing. Finally, there is a detailed description of proposals for upgrading the layout, the elements that will be required for this purpose, their design and manufacturing method.

## Keywords

Impulse current generator, Discharge, Peak Current, Rogowski Coil, Current Transformer, Damping, Oscillation, Compensation



## Ευχαριστίες

Για την ευκαιρία που μου έδωσαν και την εμπιστοσύνη που μου έδειξαν αναθέτοντάς μου θέμα διπλωματικής εργασίας, θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον Ομότιμο Καθηγητή κ. Φραγκίσκο Β. Τοπαλή, τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Φ. Γκόνο και τον αείμνηστο Καθηγητή Ιωάννη Αθ. Σταθόπουλο, της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών. Εκτός από τις γνώσεις τους και την επιστημονική αρωγή, είχα και την αμέριστη συμπαράστασή τους. Τα επιστημονικά οφέλη από την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας δεν θα ήταν ίδια χωρίς αυτούς.





## *Περιεχόμενα*

Περίληψη	5
Abstract	6
Ευχαριστίες	8
<b>Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή</b>	<b>15</b>
1.1 Βασικές έννοιες	15
1.2 Εφαρμογές γεννητριών κρουστικών ρευμάτων	22
1.3 Κατηγοριοποίηση κρουστικών ρευμάτων	25
1.3.1 Εκθετικά κρουστικά ρεύματα	25
1.3.2 Ορθογώνια κρουστικά ρεύματα	27
1.3.3 Εναλλασσόμενα κρουστικά ρεύματα	28
1.4 Διατάξεις παραγωγής κρουστικών ρευμάτων	30
1.4.1 Παραγωγή εκθετικών κρουστικών ρευμάτων	30
1.4.2 Παραγωγή ορθογώνιων κρουστικών ρευμάτων	39
1.4.3 Παραγωγή εναλλασσόμενων κρουστικών ρευμάτων	40
1.5 Διεθνή Πρότυπα	43
<b>Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφία</b>	<b>52</b>
<b>Κεφάλαιο 3: Αναλυτική περιγραφή γεννήτριας</b>	<b>54</b>
3.1 Εισαγωγή	54
3.2 Αρχή λειτουργίας	54
3.3 Περιγραφή επιμέρους διατάξεων	55
3.3.1 Ο πυκνωτής	55
3.3.2 Η αυτεπαγωγή	69
3.3.3 Η αντίσταση	70
3.3.4 Το κύκλωμα τροφοδοσίας/ανόρθωσης	70
3.3.5 Το μετρητικό σύστημα	83
3.3.5.1 Επέκταση αμπερομέτρου με χρήση αντίστασης	84
3.3.5.2 Αισθητήρας Hall	88

3.3.5.3 Πηνίο Rogowski	91
3.3.5.4 Μετασχηματιστής ρεύματος	92
3.3.5.5 Μέτρηση συνεχούς τάσης	97
3.3.6 Ο σπινθηριστής	103
3.3.7 Ο μεταγωγέας υψηλής τάσης	103
3.3.8 Το καταγραφικό σύστημα	105
3.3.9 Ηλεκτρονικό πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων	120
3.3.10 Ηλεκτρονική αποθήκευση αποτελεσμάτων/βάση δεδομένων	123
3.3.11 Αυτοματισμός ελέγχου διάταξης και δικλίδων ασφαλείας	123
3.3.12 Βάση διάταξης	124
<b>Κεφάλαιο 4: Πειραματικός έλεγχος των υφισταμένων στοιχείων</b>	<b>125</b>
4.1 Εισαγωγή	125
4.2 Έλεγχος μετρητικού συστήματος (shunt με Hilo)	125
4.3 Έλεγχος συστήματος τροφοδοσίας	127
4.4 Έλεγχος ενός πυκνωτή	130
4.5 Συμπεράσματα	130
<b>Κεφάλαιο 5: Θεωρητική προσέγγιση</b>	<b>131</b>
5.1 Εισαγωγή	131
5.2 Μαθηματικό μοντέλο και η επίλυσή του	131
5.3 Χρήση ηλεκτρονικού προγράμματος MATHCAD	139
<b>Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη διάταξης</b>	<b>142</b>
6.1 Εισαγωγή	142
6.2 Διαστασιολόγηση επιμέρους διατάξεων	142
6.2.1 Ο πυκνωτής	142
6.2.2 Το πηνίο	142
6.2.3 Η αντίσταση	143
6.2.4 Αγωγοί συνδέσεως	144
6.2.5 Μεταγωγέα υψηλής τάσης	148
6.3. Σταδιακή προσθήκη πυκνωτών/αντιστάσεων/πηνίων	151
6.4 Υπολογισμός/σχεδιασμός/κατασκευή βάσης/συναρμολόγηση	152



<b>Κεφάλαιο 7: Μετρήσεις</b>	<b>156</b>
7.1 Εισαγωγή	156
7.2 Μεθοδολογία μέτρησης κρουστικών ρευμάτων	157
7.3 Καταγραφή μετρήσεων/αποτελέσματα	159
7.4 Συμπεράσματα	161
<b>Κεφάλαιο 8:Κατασκευή μετρητικών οργάνων</b>	<b>162</b>
8.1 Κατασκευή πηνίων Rogowski	162
8.1.1 Κατασκευή	163
8.1.2 Δοκιμές/Καταγραφή μετρήσεων	164
8.1.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων/Περεταίρω πειράματα	166
8.2 Κατασκευή Μετασχηματιστή ρεύματος	166
8.2.1 Κατασκευή	166
8.2.2 Δοκιμές/Καταγραφή μετρήσεων	167
8.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων/Περεταίρω πειράματα	169
<b>Κεφάλαιο 9: Προτάσεις αναβάθμισης της διάταξης</b>	<b>170</b>
9.1 Κατασκευή Αντίστασης εκφόρτισης	170
9.2 Κατασκευή Αντιστάσεων/αυτεπαγωγών για κάθε τύπο εκθετικών κρουστικών παλμών ρεύματος	173
9.3 Μετατροπή διάταξης για παραγωγής τετραγωνικών παλμών εξομοίωσης κρουστικών ρευμάτων γραμμών μεταφοράς	174
<b>Κεφάλαιο 10: Επίλογος</b>	<b>176</b>



# Κεφάλαιο 1:

## Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται αναφορά στην ορολογία που χρησιμοποιείται στην ανάπτυξη της διπλωματικής εργασίας καθώς και με αυτή που περιγράφονται στα διεθνή πρότυπα που αφορούν τις διατάξεις παραγωγής κρουστικών ρευμάτων. Τα πρότυπα αυτά είναι τα,

1. IEC 60060-1:2010, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements" [17]
2. IEC 62475:2010, "High-current test techniques - Definitions and requirements for test currents and measuring systems" [18]
3. IEC 61083-2:2013, "Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests - Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents" [19]
4. IEEE Std 4-2013, "IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques" [20]

## 1.1 Βασικές έννοιες

### ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ IEC 60060-1

#### **Καταστροφική εκφόρτιση (disruptive discharge)**

Φαινόμενο που σχετίζεται με την αστοχία της μόνωσης υπό ηλεκτρική καταπόνηση, η οποία περιλαμβάνει κατάρρευση τάσης και διέλευση ρεύματος

#### **Σπινθήρας υπερπήδησης (sparkover)**

Εκκένωση σε αέριο ή υγρό μονωτικό υλικό

#### **Τάση υπερπήδησης (flashover)**

Ηλεκτρική βλάβη μεταξύ αγωγών σε αέριο ή υγρό ή σε κενό, τουλάχιστον εν μέρει κατά μήκος της επιφάνειας στερεάς μόνωσης

**Διάτρηση (puncture)**

Διασπαστική εκκένωση που συμβαίνει μέσω ενός στερεού μονωτικού υλικού, προκαλώντας μια αγώγιμη διαδρομή μόνιμης βλάβης

**καταστροφική τάση εκφόρτισης (disruptive discharge voltage value)**

Τιμή της τάσης δοκιμής που προκαλεί διαταραγμένη εκφόρτιση

**Μη καταστροφική εκφόρτιση (non-disruptive discharge)**

Εκφόρτιση μεταξύ ενδιάμεσων ηλεκτροδίων ή αγωγών όπου η τάση δοκιμής δεν μηδενίζεται

**Αναμενόμενα χαρακτηριστικά (prospective characteristics)**

Χαρακτηριστικά που θα είχαν επιτευχθεί εάν δεν είχε σημειωθεί καταστροφική διάσπαση και όταν και όταν αυτό έχει δηλωθεί

**Πραγματικά χαρακτηριστικά (actual characteristics)**

Τα χαρακτηριστικά που προκύπτουν κατά τη διάρκεια της δοκιμής στους ακροδέκτες του αντικειμένου δοκιμής

**Τιμή της τάσης δοκιμής (value of the test voltage)**

Όπως ορίζεται από τις απαιτήσεις της δοκιμής

**Τάση αντοχής (withstand voltage)**

Καθορισμένη προβλεπόμενη τιμή τάσης που χαρακτηρίζει τη μόνωση του αντικειμένου όσον αφορά τη δοκιμή αντοχής

**Εξασφαλισμένη διασπαστική τάση εκφόρτισης (assured disruptive discharge voltage)**

Καθορισμένη αναμενόμενη τιμή τάσης που χαρακτηρίζει την απόδοσή του σε σχέση με την τάση διάσπασης

**Βύθιση τάσης (voltage dip)**

Μια ξαφνική μείωση της τάσης σε ένα σημείο ενός ηλεκτρικού συστήματος ακολουθούμενη από ανάκτηση τάσης μετά από σύντομο χρονικό διάστημα

**Ανοχή (tolerance)**

Αποτελεί την επιτρεπόμενη διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής και της καθορισμένης τιμής

**Αβεβαιότητα μέτρησης (uncertainty of measurement)**

Παράμετρος που σχετίζεται με το αποτέλεσμα μιας μέτρησης, η οποία χαρακτηρίζει τη διασπορά των τιμών που θα μπορούσαν εύλογα να αποδοθούν στη μετρούμενη

**Πιθανότητα καταστροφικής τάσης,  $p$  (disruptive discharge probability  $p$ )**

Πιθανότητα ότι η εφαρμογή μιας συγκεκριμένης αναμενόμενης τιμής τάσης και δεδομένης κυματομορφής, θα προκαλέσει διασπαστική εκκένωση στο αντικείμενο δοκιμής

**Πιθανότητα αντοχής  $q$  (withstand probability  $q$ )**

Πιθανότητα η εφαρμογή μιας συγκεκριμένης αναμενόμενης τιμής τάσης και δεδομένης κυματομορφής, δεν θα προκαλέσει διασπαστική εκκένωση στο αντικείμενο δοκιμής

**Εξωτερική μόνωση (external insulation)**

Η εξωτερική αέρια μόνωση και η εξωτερική στερεά μόνωση του εξοπλισμού, οι οποίες υπόκεινται τόσο σε διηλεκτρικές καταπονήσεις όσο και στις άμεσες επιπτώσεις των ατμοσφαιρικών και άλλων περιβαλλοντικών συνθηκών

**Εσωτερική μόνωση (internal insulation)**

Εσωτερικά στερεά, υγρά ή αέρια στοιχεία της μόνωσης του εξοπλισμού που προστατεύονται από τις άμεσες επιπτώσεις εξωτερικών συνθηκών, όπως η ρύπανση και η υγρασία

**Μόνωση αυτό-ανακτώμενη (self-restoring insulation)**

Μόνωση η οποία ανακτά πλήρως τις μονωτικές της ιδιότητες μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα μετά από μια διασπαστική εκκένωση

**Μη αυτό-ανακτώμενη μόνωση (non-self-restoring insulation)**

Μόνωση που χάνει τις μονωτικές της ιδιότητες ή δεν τις ανακτά πλήρως, μετά από διασπαστική εκκένωση

## **ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ IEC 62475:2010**

### **Σύστημα μέτρησης (measuring system)**

Το πλήρες σύνολο διατάξεων κατάλληλων για την εκτέλεση μετρήσεων μιας προς μέτρηση ποσότητας (μετρούμενο μέγεθος). Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για τη λήψη ή τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων των μετρήσεων αποτελεί επίσης μέρος του συστήματος μέτρησης

### **Καταγραφή συμπεριφοράς (record of performance)**

Λεπτομερές αρχείο, που καταρτίζεται και τηρείται από τον χρήστη, το οποίο περιγράφει το σύστημα μέτρησης και περιέχει αποδεικτικά στοιχεία ότι πληρούνται οι απαιτήσεις του προτύπου. Τα στοιχεία αυτά περιλαμβάνουν τα αποτελέσματα των αρχικών αλλά και των επαναληπτικών δοκιμών

### **Εγκεκριμένο σύστημα μέτρησης (approved measuring system)**

Σύστημα μέτρησης που αποδεικνύεται ότι συμμορφώνεται με ένα ή περισσότερα από τα σύνολα απαιτήσεων που ορίζονται το πρότυπο

### **Σύστημα μέτρησης αναφοράς (reference measuring system)**

Σύστημα μέτρησης με ιχνηλάσιμη βαθμονόμηση σύμφωνα με τα σχετικά εθνικά ή/και διεθνή πρότυπα, με επαρκή ακρίβεια και επαναλαμβανόμενη διατήρηση αυτής για χρήση στην έγκριση άλλων συστημάτων, πραγματοποιώντας ταυτόχρονες συγκριτικές μετρήσεις με συγκεκριμένους τύπους κυματομορφών και περιοχές ρεύματος

### **Συσκευή μετατροπής (converting device)**

Διάταξη μετατροπής της μετρούμενης ποσότητας (μετρούμενο μέγεθος) σε ποσότητα συμβατή με το όργανο μετρήσεων

### **Ωμικός μετατροπέας ρεύματος (current-converting shunt)**

Μετρητική αντίσταση κατά μήκος της οποίας η τάση είναι ανάλογη με το ρεύμα που πρόκειται να μετρηθεί

**Μετασχηματιστής ρεύματος (current transformer)**

Μετασχηματιστής οργάνου στον οποίο το δευτερεύον ρεύμα, υπό κανονικές συνθήκες χρήσης, είναι ουσιαστικά ανάλογο προς το πρωτεύον ρεύμα και διαφέρει σε φάση από αυτό υπό σχεδόν μηδενική γωνία για κατάλληλη φορά συνδέσεων

**Πηνίο Rogowski (Rogowski coil)**

Επαγωγική συσκευή μετατροπής ρεύματος χωρίς πυρήνα. Τα συστήματα μέτρησης που βασίζονται σε πηνίο Rogowski περιλαμβάνουν ένα κύκλωμα ολοκλήρωσης (παθητικό, ενεργό ή αριθμητικό)

**Σύστημα μετάδοσης (transmission system)**

Το σύνολο διατάξεων που μεταφέρουν το σήμα εξόδου μιας διάταξης μετατροπής σε όργανο ή όργανα μετρήσεων

**Όργανο μέτρησης (measuring instrument)**

Διάταξη προοριζόμενη να πραγματοποιεί μετρήσεις, μόνη της ή σε συνδυασμό με συμπληρωματικές διατάξεις

**Συντελεστής κλίμακας συστήματος μέτρησης (scale factor of a measuring system)**

Ο συντελεστής πολλαπλασιασμού της τιμής της ένδειξης του οργάνου μέτρησης ώστε να ληφθεί η τιμή της ποσότητας εισόδου του πλήρους συστήματος μέτρησης

**Συντελεστής κλίμακας συσκευής μετατροπής (scale factor of a converting device)**

Ο συντελεστής εξόδου μιας συσκευής μετατροπής για να ληφθεί η είσοδος της

**Συντελεστής κλίμακας συστήματος μεταφοράς (scale factor of a transmission system)**

Συντελεστής επί τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η τιμή της ενός συστήματος μεταφοράς να ληφθεί η είσοδος του

**Συντελεστής κλίμακας οργάνου μετρήσεων (scale factor of a measuring instrument)**

συντελεστής επί τον οποίο πρέπει να πολλαπλασιαστεί η τιμή της ενός οργάνου μέτρησης ώστε να ληφθεί η είσοδος του

**Προσδιορισμένος συντελεστής κλίμακας F (assigned scale factor)**

Συντελεστής κλίμακας συστήματος μέτρησης προσδιοριζόμενος κατά την πλέον πρόσφατη δοκιμή απόδοσής του

**Συνθήκες λειτουργίας (operating conditions)**

Συνθήκες υπό τις οποίες ένα σύστημα μέτρησης θα λειτουργεί εντός των καθορισμένων ορίων αβεβαιότητας

**Ονομαστικό ρεύμα (rated current)**

ΜΗ μέγιστη στάθμη ρεύματος καθορισμένης συχνότητας ή κυματομορφής στην οποία έχει σχεδιαστεί να λειτουργεί το σύστημα μέτρησης

**Προκαθορισμένο εύρος μετρήσεων (assigned measurement range)**

Περιοχή ρεύματος καθορισμένης συχνότητας ή κυματομορφής στην οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σύστημα μέτρησης εντός των ορίων αβεβαιότητας που καθορίζονται στο πρότυπο, το οποίο χαρακτηρίζεται από έναν μόνο συντελεστή κλίμακας

**Προκαθορισμένος χρόνος λειτουργίας (assigned operating time)**

Το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα κατά το οποίο ένα σύστημα μέτρησης ρεύματος συνεχούς ή εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να λειτουργήσει στο ανώτερο όριο της καθορισμένης περιοχής μέτρησης, εντός των ορίων αβεβαιότητας που καθορίζονται στο πρότυπο

**Καθορισμένο ποσοστό εφαρμογής (assigned rate of application)**

Ο υψηλότερος ρυθμός καθορισμένων βραχυπρόθεσμων ρευμάτων ή κρουστικών ρευμάτων που μπορεί να εφαρμοστεί σε δεδομένο χρονικό διάστημα, στο οποίο το σύστημα μέτρησης μπορεί να λειτουργήσει στο ανώτατο όριο της καθορισμένης περιοχής μέτρησης και να παραμείνει εντός των ορίων αβεβαιότητας που καθορίζονται στο πρότυπο

**g ή G**

συντελεστής εξόδου, ως συνάρτηση του χρόνου ή της συχνότητας, όταν ένα καθορισμένο ρεύμα εφαρμόζεται στην είσοδο του συστήματος

**Απόκριση πλάτους-συχνότητας G(f) (amplitude-frequency response)**



Ο λόγος της εξόδου προς την είσοδο ενός συστήματος μέτρησης ως συνάρτηση της συχνότητας  $f$ , όταν η είσοδος είναι ημιτονοειδής

### **ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ IEC 61083-2:2013**

#### **Μετατόπιση (offset)**

Η τιμή εξόδου για μηδενική είσοδο

#### **Μη επεξεργασμένα δεδομένα(raw data)**

Η αρχική καταγραφή δειγματοληπτικών και κβαντισμένων πληροφοριών που λαμβάνονται όταν ένας ψηφιακός καταγραφέας μετατρέπει ένα αναλογικό σήμα σε ψηφιακή μορφή

#### **Επεξεργασμένα δεδομένα (processed data)**

Δεδομένα που λαμβάνονται από οποιαδήποτε επεξεργασία (εκτός από τη διόρθωση για αντιστάθμιση ή/και τον πολλαπλασιασμό με συντελεστή σταθερής κλίμακας) των μη επεξεργασμένων δεδομένων

#### **Κυματομορφή αναφοράς (reference waveform)**

Κυματομορφή που παρέχεται από τη γεννήτρια δεδομένων δοκιμής (TDG) στο λογισμικό δοκιμών

#### **Καθυστέρηση ενεργοποίησης (trigger delay)**

Χρόνος που έχει παρέλθει από την εμφάνιση ενός συμβάντος ενεργοποίησης έως τον χρόνο κατά τον οποίο καταγράφεται ένα καθορισμένο δείγμα δεδομένων

### **ΟΡΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑ IEEE Std 4-2013**

#### **Σφάλμα (error)**

Η διαφορά μεταξύ της μετρούμενης τιμής μιας ποσότητας και της πραγματικής αξίας αυτής της ποσότητας υπό καθορισμένες συνθήκες

#### **Ακρίβεια (accuracy)**

Ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ μιας μετρούμενης τιμής και της πραγματικής τιμής

**Αβεβαιότητα (uncertainty)**

εκτιμώμενο όριο βάσει αξιολόγησης των διαφόρων πηγών σφάλματος

- Μέτρηση της διασποράς των αποτελεσμάτων της μέτρησης, ή δίνει το εύρος εντός του οποίου το αποτέλεσμα της μέτρησης πιστεύεται με βεβαιότητα ότι βρίσκεται.
- Μέτρηση της ποιότητας μιας βαθμονόμησης
- Επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων με άλλα εργαστήρια

**Τυπική αβεβαιότητα (typical uncertainty)**

Αβεβαιότητα του αποτελέσματος μιας μέτρησης εκφραζόμενη ως τυπική απόκλιση

**Αβεβαιότητα τύπου A (type A uncertainty)**

Αξιολογείται με στατιστική ανάλυση σειρών μετρήσεων

**Αβεβαιότητα τύπου B (type B uncertainty)**

Αξιολογείται με άλλα μέσα εκτός της στατιστικής ανάλυσης σειρών μετρήσεων

**Συνδυασμένη τυπική αβεβαιότητα (combined typical uncertainty)**

Συνδυασμός των επιμέρους τυπικών αβεβαιοτήτων, είτε προκύπτουν από αξιολογήσεις τύπου A είτε τύπου B, χρησιμοποιώντας την τετραγωνική ρίζα του αθροίσματος των τετραγώνων κάθε συνεισφοράς

**Διευρυμένη αβεβαιότητα (expanded uncertainty)**

Ποσότητα που ορίζει ένα διάστημα σχετικά με το αποτέλεσμα ενός αποτελέσματος μέτρησης εντός του οποίου πιστεύεται με βεβαιότητα ότι βρίσκεται η τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Περιλαμβάνονται όλες οι συνεισφορές τύπου A και τύπου B στη μέτρηση.

**1.2 Εφαρμογές γεννητριών κρουστικών ρευμάτων**

Στα δίκτυα υψηλής τάσης μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, θα μπορούσαν να προκύψουν παροδικές υπερτάσεις με μέγιστες τιμές άνω του 1 MV, οι οποίες είναι πολύ υψηλότερες από τη μέγιστη ονομαστική τάση. Η προέλευση αυτών των υπερτάσεων έγκειται σε άμεσες ή έμμεσες αστραπές σε εναέριες γραμμές μεταφοράς ή

υποσταθμούς, σε βραχυκυκλώματα ή υπερτάσεις λόγω βλάβης της ηλεκτρικής μόνωσης, στους χειρισμούς ζεύξεων στους υποσταθμούς και στην λειτουργία των αλεξικέραυνων. Αυτές οι παροδικές τάσεις έχουν χρόνους μετώπου κυρίως στην περιοχή των μικρο δευτερολέπτων έως χιλιοστών του δευτερολέπτου. Κατά τη διάρκεια της υπέρτασης ή της βλάβης των συστημάτων μόνωσης και κατά τη λειτουργία των αλεξικέραυνων, η πτώση τάσης μπορεί να πραγματοποιηθεί πολύ γρήγορα σε λιγότερο από 1  $\mu\text{sec}$ . Οι χρόνοι πτώσης είναι μεταξύ 100 ns έως 1 ns. Επιπλέον μπορεί να εμφανιστούν παροδικές τάσεις άνω του 1 kV και σε δίκτυα χαμηλής τάσης, που μπορούν να επηρεάσουν τη λειτουργία του εγκατεστημένου ηλεκτρικού εξοπλισμού ή ακόμα και να τους καταστρέψουν [3].

Οι μεταβατικές υπερτάσεις έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη καταπόνηση της μόνωσης του εξοπλισμού στα δίκτυα τροφοδοσίας για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Επομένως, όλοι αυτοί οι εξοπλισμοί υποβάλλονται σε δοκιμές αποδοχής με κρουστικές πριν εγκατασταθούν στο σύστημα. Αυτές οι τάσεις δοκιμής ταιριάζουν κατάλληλα με τις υπερτάσεις που εμφανίζονται στο δίκτυο τροφοδοσίας. Το μέγεθος των διεθνώς τυποποιημένων τάσεων δοκιμής αντιστοιχεί στη τάση λειτουργίας του εξοπλισμού. Διαφοροποιούνται περαιτέρω με βάση τη χρονική συμπεριφορά τους.

Οι μεταβατικές υπερτάσεις είναι πολύ συχνά η αιτία των παροδικών κρουστικών ρευμάτων. Έτσι, ως άμεσο ή έμμεσο αποτέλεσμα των κεραυνών, μπορούν να εμφανιστούν γρήγορα μεταβαλλόμενα ρεύματα με μέγιστες τιμές στην περιοχή των 100 kA και χρόνους ανόδου 1  $\mu\text{s}$ . Εάν η αστραπή βάλλει μια εναέρια γραμμή μεταφοράς, οι παλμοί ρεύματος ταξιδεύουν προς κάθε πλευρά της γραμμής και προκαλούν υψηλές παροδικές τάσεις στον εξοπλισμό που είναι συνδεδεμένος με τους υποσταθμούς. Αυτές οι υπερτάσεις στη συνέχεια υπερτίθενται στην τάση του συστήματος εναλλασσόμενου ρεύματος του δικτύου τροφοδοσίας. Για τον λόγο, τοποθετούνται απαγωγείς υπέρτασης (αλεξικέραυνα) για την προστασία του συστήματος. Κατά την λειτουργία των αλεξικεραυνών ενδέχεται οι γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος επίσης να εκφορτιστούν. Οι απαγωγείς στη συνέχεια καταπονούνται από έναν ορθογώνιο παλμό ρεύματος διάρκειας στην περιοχή του 1 ms.

Ανάλογα με τις κρουστικές τάσεις δοκιμής, όλες οι συσκευές ισχύος υποβάλλονται σε δοκιμές αποδοχής παρτίδας με κρουστικά ρεύματα. Οι ηλεκτρικές, μηχανικές και θερμικές καταπονήσεις που ενδέχεται να προκύψουν κατά τη διάρκεια λειτουργίας προσομοιώνονται από αυτές στο εργαστήριο. Τα βραχεία ρεύματα που εμφανίζονται λόγω βραχυκυκλώματος στο σύστημα τροφοδοσίας και διαρκούν μόνο για λίγους κύκλους, δεν υπολογίζονται ως κρουστικά ρεύματα. Είναι σχετικά αργά μεταβατικά φαινόμενα τα οποία

ενδέχεται να έχουν μια φθίνουσα DC συνιστώσα και να επιτύχουν μέγιστες τιμές της τάξης των 300 kA ή περισσότερο.

Υψηλές κρουστικές τάσεις και κρουστικά ρεύματα με χρόνους μετώπου στην περιοχή των micro ή και nano sec συναντώνται και σε άλλους τομείς της φυσικής και της μηχανικής. Στη φυσική πλάσματος, δημιουργούνται εξαιρετικά υψηλά μαγνητικά πεδία για παγίδευση πλάσματος. Στην ηλεκτρική σημειακή συγκόλληση, τα κρουστικά ρεύματα επιτυγχάνουν μέγιστες τιμές 200 kA. Τα ηλεκτρονικά συστήματα ανάφλεξης στους κινητήρες εσωτερικής καύσης παράγουν κρουστικές τάσεις με μέγιστες τιμές της τάξεως των 30 kV. Στα ηλεκτρονικά ισχύος, π.χ. ηλιακούς συλλέκτες, απαιτούνται κρουστικές τάσεις και ρεύματα αρκετών δεκάδων kV και έως 10 kA, π.χ. οι μετρητές ηλεκτρικής ενέργειας ελέγχονται με κρουστικά ρεύματα που αποτελούνται από ημιτονοειδή ημι-κύματα ύψους αρκετών kA. Στην ιατρική τεχνολογία, με τη μετατροπή σε ακουστικά παλμικά κύματα, επιτυγχάνεται θραύση των λίθων στα νεφρά ή της χοληδόχου κύστης καθώς και των εναποθέσεων ασβεστίου στις αρθρώσεις. Η λειτουργία των όπλων τύπου ηλεκτρικού παλμού, βασίζεται σε παλμούς τάσης που παραλύουν το νευρικό σύστημα του στόχου για περιορισμένο χρονικό διάστημα. Τέλος, πρέπει να αναφερθούν οι διάφορες εφαρμογές κατά τις έρευνες σχετικά με την ηλεκτρομαγνητική συμβατότητα του ηλεκτρονικού εξοπλισμού έως πολύ πολύπλοκων συστημάτων, π.χ., όπως αυτά που τοποθετούνται στα αεροπλάνα.

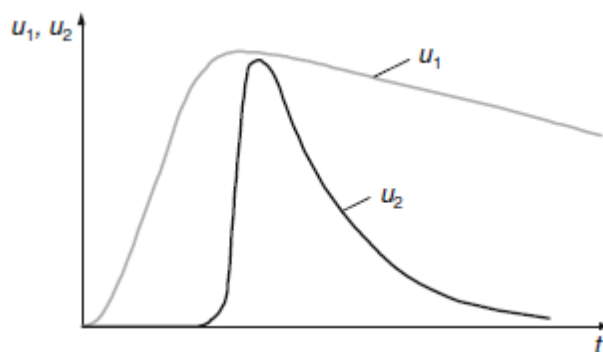
Μια καλά θεμελιωμένη τεχνική μέτρησης είναι απαραίτητη σε όλες τις εφαρμογές των κρουστικών τάσεων και ρευμάτων, ώστε να αποφευχθεί η καταπόνηση του εξοπλισμού. Ο εξοπλισμός μέτρησης που χρησιμοποιείται για τις δοκιμές πρέπει να επαληθεύεται ως προς την ακρίβεια των μετρήσεών του. Σε αυτό το πλαίσιο, έννοιες όπως ο ποιοτικός έλεγχος, η βαθμονόμηση, η αβεβαιότητα μέτρησης, οι διεθνείς προδιαγραφές δοκιμών, τα διαπιστευμένα εργαστήρια δοκιμών και βαθμονόμησης κ.λπ., παίζουν σημαντικό ρόλο.

Η μετάδοση και η κατανομή της ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει την εφαρμογή συσκευών υψηλής τάσης, όπως οι μετασχηματιστές ισχύος, οι διανομείς, οι αναλύσεις υπέρτασης, οι μονωτήρες, τα καλώδια ισχύος, οι μετασχηματιστές κλπ. Πριν από τη θέση σε λειτουργία, επομένως δοκιμάζονται για αξιοπιστία με τυπικές κρουστικές τάσεις και ρεύματα. Ανάλογα με τη συσκευή και τον τύπο της προτεινόμενης εφαρμογής τους, υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ διαφόρων τύπων των κρουστικών κυματομορφών. Αυτές οι κυματομορφές ορίζονται από διάφορες παραμέτρους με ανοχές κατά τη διάρκεια της παραγωγής τους και των αβεβαιοτήτων κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Η καταγραφή και αξιολόγηση των κυματομορφών γίνεται μέσω ψηφιακών καταγραφών και εφαρμόζονται

τυποποιημένες διαδικασίες αξιολόγησης. Έτσι, τα πειραματικά δεδομένα που λαμβάνονται από εκτεταμένες έρευνες σε σχέση με την αξιολόγηση των ταλαντώσεων κορυφής, οι οποίες επικαλύπτονται από μία κρουστική τάση, λαμβάνονται υπόψη ως συνάρτηση της συχνότητας ταλάντωσης.

### 1.3 Κατηγοριοποίηση κρουστικών ρευμάτων

Οι δοκιμές με υψηλά κρουστικά ρεύματα εκτελούνται προκειμένου να προσομοιωθούν η καταπόνηση της συσκευής ισχύος εγκατεστημένη στο δίκτυο που προκαλείται από κεραυνικά πλήγματα και βραχυκυκλώματα. Η κυματομορφή των κρουστικών ρευμάτων μπορεί να είναι πολύ διαφορετική ανάλογα με τον σκοπό δοκιμής. Βασικά διαφοροποιούνται μεταξύ κρουστικών ρευμάτων με εκθετική και με ορθογώνια κυματομορφή. Ακόμη και εναλλασσόμενα ρεύματα βραχυκύκλωσης ανήκουν στην κατηγορία των κρουστικών ρευμάτων. Έχουν περιορισμένο αριθμό περιόδων συχνότητας ισχύος και περιέχουν DC συνιστώσα. Τα κρουστικά ρεύματα χαρακτηρίζονται από την τιμή κορυφής τους και αρκετές παραμέτρους χρόνου. Σημαντικό είναι επίσης το φορτίο του παλμού καθώς και το ενεργειακό του περιεχόμενο.



Σχήμα 1.3.1 Απότομη κρουστική τάση  $U_2$  στην έξοδο του κύκλου κορυφής που συνδέεται με μια γεννήτρια κρουστικής τάσης με την τάση εξόδου  $U_1$  (βλ. Αναφ. [2] στο κεφάλαιο 1)

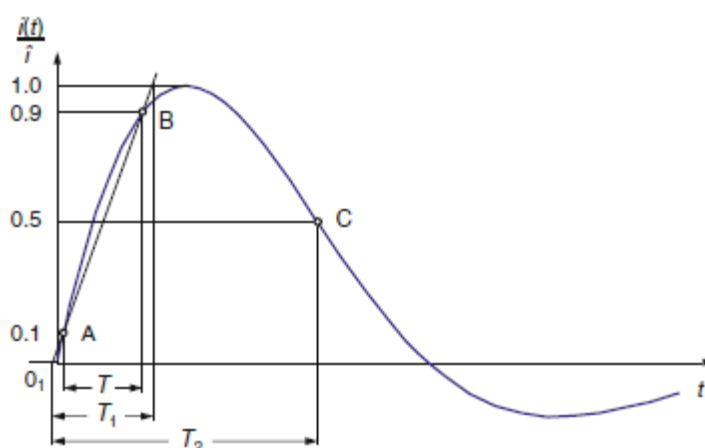
#### 1.3.1 Εκθετικά κρουστικά ρεύματα

Το εκθετικό κρουστικό ρεύμα έχει μια σχετικά απότομη, σχεδόν εκθετική άνοδο μέχρι την κορυφή, η οποία ακολουθείται από μια αργή πτώση στο μηδέν. Ανάλογα με το κύκλωμα της γεννήτριας και του αντικειμένου δοκιμής, η πτώση λαμβάνει χώρα είτε εκθετικά είτε με έντονη ημιτονοειδή απόσβεση. Στην τελευταία περίπτωση, πρέπει να

υπολογίσουμε με το κρουστικό ρεύμα ακόμη και αν τέμνει τη μηδενική γραμμή. Πέραν της τιμής κορυφής του εκθετικού κρουστικού ρεύματος, ενδιαφέρει ο χρόνος μετώπου  $t_f$  και ο χρόνος ημίσεως κύματος  $t_h$ . Και οι δύο παράμετροι του χρόνου αναφέρονται στην τομή της προέκτασης της ευθείας AB με τον οριζόντιο άξονα στο σημείο  $O_1$ . Σε αντίθεση με τις κρουστικές τάσεις, η ευθεία γραμμή διέρχεται από τα σημεία A στο 10% και B στο 90% της μέγιστης τιμής του ρεύματος.

$$T_f = 1.25 * T_{AB} \quad (1.3.1.1)$$

Ο χρόνος μετώπου  $t_f$  είναι ο χρόνος μεταξύ των δύο σημείων A και B. Ο χρόνος ημίσεως κύματος (ουράς)  $t_h$ , έχει καθιερωθεί ως ο χρόνος μεταξύ του εικονικού μηδέν  $O_1$  και της στιγμής που το κρουστικό ρεύμα έχει φτάσει στο 50 % της τιμής κορυφής του κατά την μείωσή του.



Σχήμα 1.3.1.1

Οι παραπάνω χρόνοι έχουν διάρκεια μικρο-δευτερολέπτων. Για παράδειγμα, το κρουστικό ρεύμα 8/20 έχει ένα χρόνο μετώπου  $t_f = 8\mu\text{S}$  και χρόνο ημίσεως κύματος  $t_h = 20\mu\text{S}$ . Τα όρια των χαρακτηριστικών των εκθετικών κρουστικών ρευμάτων είναι  $\pm 10\%$  για την τιμή κορυφής του ρεύματος και  $\pm 20\%$  για καθεμία από τις παραμέτρους του χρόνου.

Οι ανοχές που καθορίζονται για άλλες μορφές κρουστικής ενδέχεται να διαφέρουν. Οι περιοριστικές τιμές της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι 3 % για την τιμή κορυφής και 10 % για τις παραμέτρους του χρόνου. Η κορυφή του ρεύματος αρνητικής πολικότητας, όταν το ρεύμα διασχίσει τη μηδενική γραμμή, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 30 % της μέγιστης

τιμής. Διαφορετικά, υπάρχει ο κίνδυνος του αντικειμένου δοκιμής να καταστραφεί από το ρεύμα της αντίθετης πολικότητας. Ρεύμα αντίθετης πολικότητας συναντάται όταν  $T_2 > 20\mu\text{s}$ . Ωστόσο, η αντιστροφή πολικότητας πρέπει να περιορίζεται από μια κατάλληλη συσκευή διακοπής, αν χρειαστεί. Η φόρτιση ενός κρουστικού ρεύματος  $I(t)$  καθορίζεται από την ολοκλήρωση της απόλυτης τιμής της κυματομορφής :

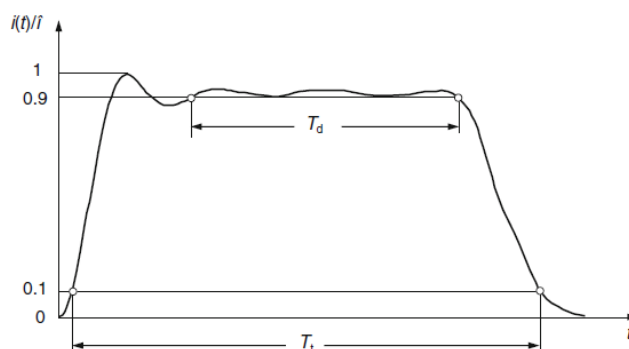
$$Q = \int_0^{\infty} |i(t)| dt \quad (1.2)$$

Το πάνω όριο ολοκλήρωσης επιλέγεται ώστε η υπολειπόμενη συνεισφορά του ολοκληρώματος να είναι αμελητέα. Μία περαιτέρω μετρούμενη ποσότητα είναι το ολοκλήρωμα Joule, ως το ολοκλήρωμα του τετραγώνου του κρουστικού ρεύματος:

$$W = \int_0^{\infty} i^2(t) dt \quad (1.3)$$

με την οποία υπολογίζεται η μέγιστη ενέργεια που επάγεται στο δοκίμιο ή την αντίσταση μέτρησης. Οι τιμές των  $Q$  και  $W$  σε μια δοκιμή δεν πρέπει να είναι μικρότερες από τις τιμές που καθορίζονται στο πρότυπο δοκιμής για τη συσκευή ισχύος, όπου το ελάχιστο όριο είναι μηδέν.

### 1.3.2 Ορθογώνια κρουστικά ρεύματα



Σχήμα 1.3.2.1

Το παραπάνω σχήμα 1.3.2.1 δείχνει την τυπική κυματομορφή ενός ορθογώνιου κρουστικού ρεύματος, γνωστό επίσης και ως το κρουστικό ρεύμα μακράς διάρκειας.

Χαρακτηρίζεται από την τιμή του ρεύματος δοκιμής,  $i$  και δύο παραμέτρων χρόνου, τη διάρκεια της κορυφής  $T_d$  και της συνολικής διάρκειας  $T_t$ . Η μέγιστη τιμή του ρεύματος, συμπεριλαμβανομένης της υπερτιθέμενης ταλάντωσης, είναι η τιμή του κρουστικού ρεύματος. Τα ορθογώνια κρουστικά ρεύματα έχουν μια απότομη πτώση. Η παράμετρος χρόνου  $T_d$  καθορίζεται ως ο χρόνος κατά τον οποίο το ρεύμα διατηρείται πάνω από το 90% του  $i$ . Ως εκ τούτου πρέπει να ληφθούν υπόψη οι ενδεχόμενες υπερτιθέμενες ταλαντώσεις, όταν αυτές προκαλέσουν πτώση κάτω του 90% του ρεύματος  $i$ . Οι ονομαστικές τιμές για  $T_d$  είναι 500, 1.000 και 2.000  $\mu\text{s}$  ή ακόμα και μεγαλύτερες φορές έως και 3.200  $\mu\text{s}$ . Λόγω της μεγάλης διάρκειας της κορυφής, η δοκιμή με ορθογώνια κρουστικά ρεύματα φέρει ισχυρή καταπόνηση στο δοκίμιο.

Μια πρόσθετη παράμετρος χρόνου είναι η συνολική διάρκεια  $T_t$ , κατά την οποία το ρεύμα διατηρείται μεγαλύτερο από το 10% του  $i$ , με την απαίτηση  $T_t \leq 1.5T_d$ . Με την απαίτηση αυτή επιβάλλεται έμμεσα μια συνθήκη για τον χρόνο μετώπου, για τον οποίο δεν υπάρχουν περαιτέρω απαιτήσεις. Για τον χαρακτηρισμό της κυματομορφής ενός ορθογώνιου κρουστικού ρεύματος, χρειάζονται οι τιμές των  $T_d$  και  $T_t$ .

Το πάνω όριο των χαρακτηριστικών των ορθογώνιων κρουστικών ρευμάτων είναι +20% για την τιμή κορυφής του ρεύματος τον χρόνο  $T_d$ , ενώ το κατώτερο όριο μηδέν. Στην πιθανή περίπτωση αντιστροφής της πολικότητας του ορθογώνιου κρουστικού ρεύματος, αυτή δεν επιτρέπεται να υπερβεί το 10 % του τιμή ρεύματος δοκιμής  $i$ . Για τη φόρτιση σύμφωνα με το ολοκλήρωμα Joule, το κατώτατο όριο ανοχής είναι και πάλι 0. Οι περιοριστικές τιμές της διευρυμένης αβεβαιότητας είναι 3 % για την τιμή κορυφής και 10 % για τις παραμέτρους του χρόνου

### 1.3.3 Εναλλασσόμενα κρουστικά ρεύματα

Τα υψηλά εναλλασσόμενα ρεύματα προκαλούνται από βραχυκυκλώματα στα δίκτυα τροφοδοσίας και συνήθως διαρκούν για μερικές περιόδους. Επομένως τα δοκίμια/συσκευές δοκιμάζονται σε εργαστήρια μεγάλης ισχύος χρησιμοποιώντας βραχυπρόθεσμα εναλλασσόμενα ρεύματα. Η γωνία έναυσης ή ενεργοποίησης  $\Psi$ , είναι η γωνία του ρεύματος τη στιγμή που το βραχυκύκλωμα αρχίζει, σε σχέση με την τάση όταν αυτή είναι μηδέν.

Καθορίζει κυρίως την κυματομορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυπρόθεσμου χρόνου. Γενικά, η μορφή είναι ασύμμετρη, η οποία χαρακτηρίζεται από ένα εναλλασσόμενο ρεύμα συχνότητας ισχύος στο οποίο υπερτίθεται ένα παροδικό ρεύμα



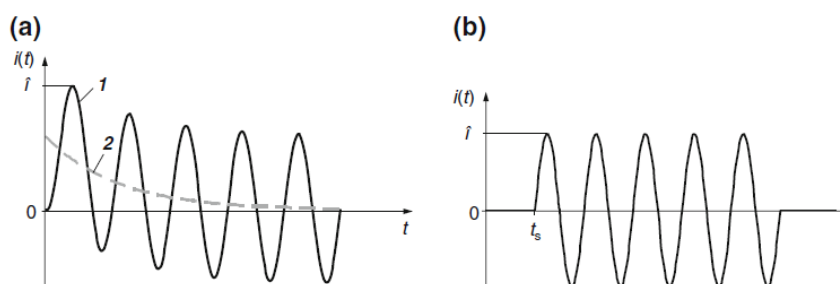
DC (Εικόνα 1.3.3.1α). Στην ακραία περίπτωση, η τιμή κορυφής του εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί να διπλασιαστεί λόγω του υπερτιθέμενης DC συνιστώσας. Επομένως, το μέγιστο εύρος ρεύματος μπορεί να είναι αρκετά 100kA. Μετά την εκθετική εξασθένιση της DC συνιστώσας, το ρεύμα βραχυκύκλωσης έπεται της τάσης κατά γωνία φάσης η οποία εξαρτάται από την αντίσταση και την επαγωγή του κυκλώματος βραχυκύκλωσης.

Για συγκεκριμένες συνθήκες έναυσης και γωνίας φάσης του εναλλασσόμενου βραχυκυκλώματος δύναται το βραχυκύκλωμα να είναι συμμετρικό δίχως DC συνιστώσας (Εικόνα 1.3.3.1b).

Στα πρότυπα δοκιμών, πέραν της μέσης τετραγωνικής τιμής του ρεύματος:

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1.3.3.1)$$

Καθορίζονται και περεταίρω τιμές R.M.S [18]. Η «συμμετρική» εναλλασσόμενη συνιστώσα (τιμή R.M.S.) δίνεται από τη διαφορά μεταξύ του άνω και των κάτω τμημάτων του βραχυπρόθεσμου ρεύματος διαιρούμενου με  $2\sqrt{2}$ . Ως «συμβατικό R.M.S» ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της μέγιστης τιμής ενός ημίσεως κύματος και της μέσης τιμής κορυφής δύο γειτονικών ημίσεων κυμάτων αντίθετης πολικότητας διαιρούμενο με  $2\sqrt{2}$  (μέθοδος των τριών κορυφών). Η διευρυμένη αβεβαιότητα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5 %.



Σχήμα 1.3.3.1 Παραδείγματα εναλλασσόμενων ρευμάτων βραχυκύκλωσης. (a) Συμμετρικό εναλλασσόμενο ρεύμα με μεταβατική DC συνιστώσα, (b) συμμετρικό εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης

## 1.4 Διατάξεις παραγωγής κρουστικών ρευμάτων

Η βασική αρχή των κυρίως χρησιμοποιούμενων κυκλωμάτων γεννήτριας για τη δημιουργία κρουστικών τάσεων και ρευμάτων αποτελείται από έναν πυκνωτή αποθήκευσης που φορτίζεται αργά και σε προκαθορισμένη τάση, ο οποίος εκφορτίζεται γρήγορα μέσω ενός διακόπτη υψηλής τάσης (σπινθηριστή) σε ένα κύκλωμα και το αντικείμενο δοκιμής. Η μορφή της κυματομορφής καθορίζεται από το κύκλωμα καθώς και από το συνδεδεμένο δοκίμιο. Επομένως, το σύστημα μέτρησης πρέπει να συνδεθεί απευθείας με το δοκίμιο και όχι στους ακροδέκτες εξόδου της γεννήτριας. Τα κατασκευαστικά στοιχεία των γεννητριών πρέπει να σχεδιαστούν με όσο το δυνατόν χαμηλότερη επαγωγή και για πολύ υψηλό φορτίο.

Εκτός από τα κυκλώματα της γεννήτριας με χωρητική αποθήκευση, επίσης λαμβάνονται υπόψη και άλλες δυνατότητες, π.χ. επαγωγική αποθήκευση και μετασχηματιστές για τη δημιουργία κρουστικών τάσεων.

### 1.4.1 Παραγωγή εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

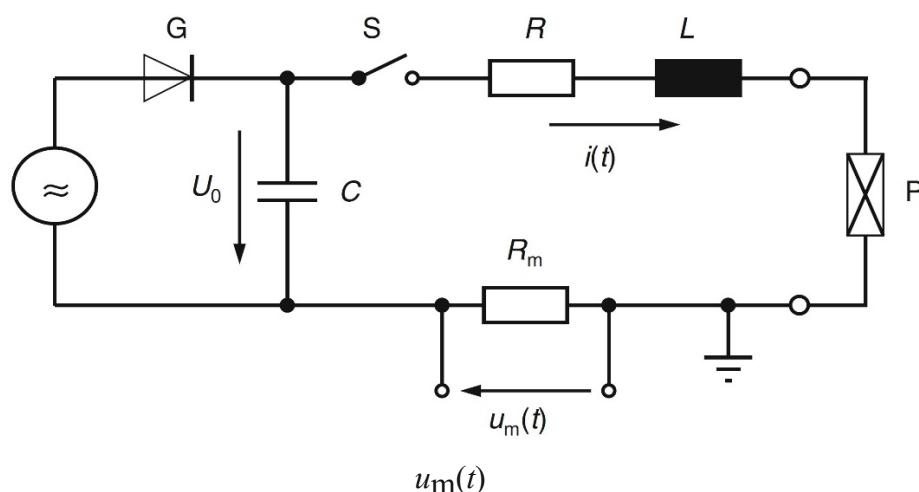
Για την παραγωγή εκθετικών κρουστικών ρευμάτων σε ένα εργαστήριο δοκιμής, κατά κανόνα, χρησιμοποιείται ένα κύκλωμα με χωρητική αποθήκευση ενέργειας. Ο πυκνωτής  $C$  φορτίζεται σε μια καθορισμένη τάση  $U_0$  και εκκενώνεται ακαριαία στο δοκίμιο  $P$  μέσω της αντίστασης  $R$  και της επαγωγής  $L$  μέσω ενός διακόπτη (σπινθηριστή), ο οποίος θα μπορούσε να είναι θυρίστορ ή ένα διάκενο σπινθήρων. Με την ενσωματωμένη αντίσταση μέτρησης  $R_m$ , μπορεί να μετρηθεί μια τάση  $U_m(t)$ , ανάλογη προς του ρεύματος  $I(t)$ . Η κυματομορφή του παραγόμενου κρουστικού ρεύματος εξαρτάται όχι μόνο από τα  $R$ ,  $L$  και  $C$  αλλά και από την  $R_M$  και την αντίσταση του δοκιμίου.

Τα πρότυπα δοκιμών παρέχουν μια πληθώρα διαφορετικών κυματομορφών. Ο υπολογισμός των επιθυμητών κυματομορφών και των στοιχείων πραγματοποιείται με τη βοήθεια διαφόρων μεθόδων. Διατίθενται λογισμικά με τα οποία τα στοιχεία κυκλώματος μιας κρουστικής γεννήτριας ρεύματος σε αρθρωτή κατασκευή μπορούν να υπολογιστούν για μια προβλεπόμενη κυματομορφή. Εάν τα χαρακτηριστικά δεδομένα δοκιμίου δεν είναι γνωστά, αυτά μπορούν επίσης να προσδιοριστούν με αυτή τη μέθοδο υπολογισμού. Έτσι, η κατά τα άλλα χρονοβόρα πειραματική προπαρασκευαστική εργασία που απαιτείται για την αντιστοίχιση των στοιχείων του κυκλώματος για την επιθυμητή κυματομορφή εξαλείφεται.

Χρησιμοποιούνται επιτραπέζια συστήματα με τιμές κορυφής μερικών δεκάδων kA ή επιδαπέδια για 200 kA και άνω. Η μέγιστη τάση φόρτισης  $U_0$  κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 200 kV. Οι κρουστικές γεννήτριες με υψηλά ρεύματα κορυφής κατασκευάζονται σε αρθρωτή μορφή με αρκετούς κρουστικούς πυκνωτές που συνδέονται παράλληλα και διατεταγμένες σε μερικώς κυκλική ή εντελώς κυκλική διάταξη (Σχήμα 1.4.1.1)

Για να αποφευχθούν επικίνδυνα υψηλές τάσεις ανοικτού κυκλώματος, οι ακροδέκτες εξόδου των κρουστικών γεννητριών ρεύματος πρέπει να είναι βραχυκυκλωμένες μέσω ενός δοκιμίου χαμηλής ωμικής ή, εάν η γεννήτρια δεν λειτουργεί, μέσω ενός συνδέσμου βραχυκύκλωσης.

Ως αρχή, οι γεννήτριες κρουστικής τάσης μπορούν να αναδιαμορφωθούν με τέτοιο τρόπο ώστε σε συνθήκες βραχυκυκλώματος να παράγουν κρουστικά ρεύματα. Μια γεννήτρια κρουστικής τάσης 2MV μπορεί να παράξει κρουστικά ρεύματα μορφής 8/20 της τάξεως των 40-70kA, ανάλογα των διασυνδεδεμένων πυκνωτών εκφόρτισης.



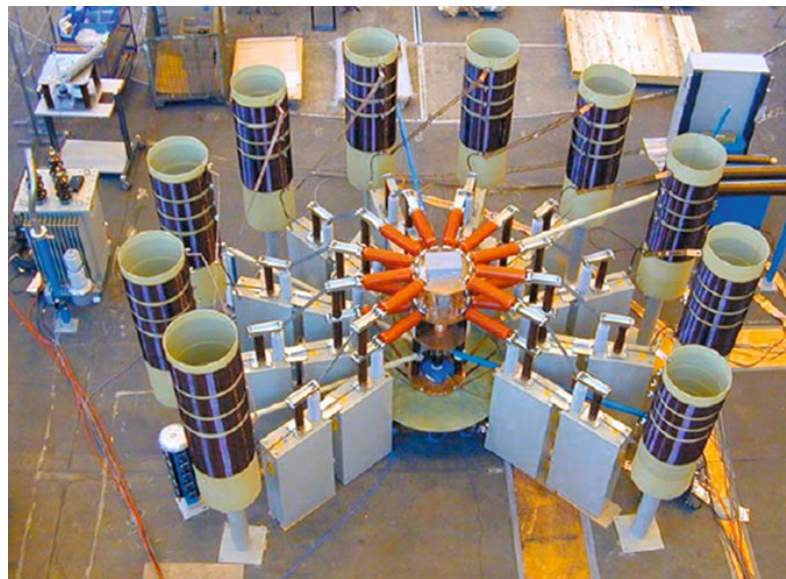
Σχήμα 1.4.1.1 Διάγραμμα μιας γεννήτριας με χωρητική αποθήκευση ενέργειας για την παραγωγή εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

Η κυματομορφή και ως εκ τούτου οι παράμετροι του εκθετικού κρουστικού ρεύματος προσδιορίζονται από τις αντιστάσεις ολόκληρου του κυκλώματος, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων του δοκιμίου, του συστήματος μέτρησης και των συνδέσεων. Το Σχήμα 1.4.1.3 δείχνει την επίδραση των παραμέτρων χρόνου  $T_f$  και  $T_h$  από μια ενισχυμένη αντίσταση  $R_p$  του αντικειμένου δοκιμής P στο κύκλωμα εκκένωσης μιας επιτραπέζιας γεννήτριας παλμικού ρεύματος τύπου 20 kA με τάση φόρτισης 10 kV στο κύκλωμα σύμφωνα με το σχήμα 1.4.1.1. Το ίδιο αποτέλεσμα προκαλείται επίσης από μια

ενισχυμένη αντίσταση μέτρησης  $R_m$ . Ενώ με ένα βραχυκύκλωμα μεταξύ των ακροδεκτών εξόδου της γεννήτριας, δηλαδή  $R_p=0$ , παράγεται ένα κρουστικό ρεύμα  $8/20$ , με μεγαλύτερης τιμής  $R_p$ , ο χρόνος μετώπου μειώνεται ενώ ο χρόνος ημίσεως κύματος αυξάνεται. Επιπλέον, με την αύξηση της αντίστασης, η πτώση της τάσης αυξάνεται και η γεννήτρια δεν μπορεί πλέον να παράγει το καθορισμένο μέγιστο ρεύμα κορυφής. Εάν οι τιμές των  $C$  και  $L$  στο ισοδύναμο κύκλωμα είναι γνωστές, η επίδραση της αντίστασης στους χρόνους  $T_f$  και  $T_h$  μπορεί επίσης να υπολογιστεί.

Η ουρά του κρουστικού ρεύματος που παράγεται από το κύκλωμα του Σχήματος 1.4.1.1 ενδέχεται να περιέχει ταλάντωση, η οποία θα μπορούσε να γίνει αρνητική (Σχήμα 1.3.1.1).

Για την δοκιμή  $8/20$  το αρνητικό πλάτος θα μπορούσε να είναι ίσο με το ένα τρίτο του ρεύματος κορυφής. Αυτό είναι ανεπιθύμητο κατά την μέτρηση αλεξικεραύνων ή άλλων διατάξεων ισχύος.



Σχήμα 1.4.1.2

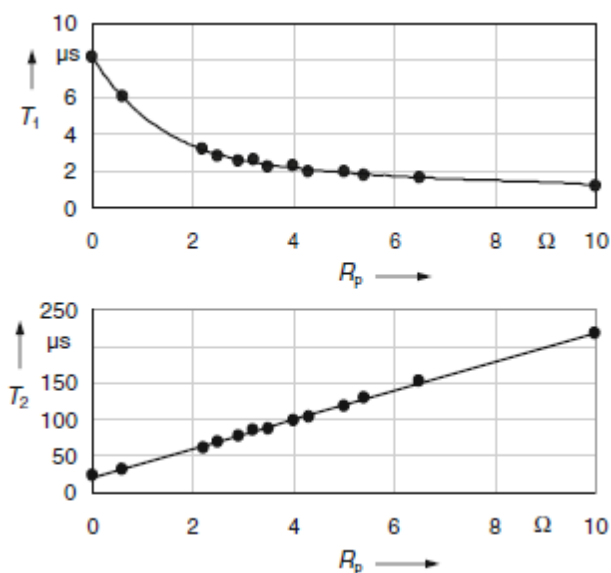
*Παράδειγμα γεννήτριας ρεύματος 200kA (100kV, 250 kJ) σε αρθρωτή κατασκευή  
(Highvolt Prüftechnik Dresden GmbH)*

Αυξάνοντας την τιμή της  $R$  στο Σχήμα 1.4.1.1 το παραπάνω φαινόμενο μειώνεται πλην όμως μειώνεται και το ρεύμα κορυφής.

Μια αποτελεσματική βελτίωση επιτυγχάνεται με την τεχνική “crowbar” (Σχήμα 1.4.1.4) με την οποία μπορούν να δημιουργηθούν υψηλοί παλμοί ρεύματος με εκθετική σβέση ουράς. Το πιο σημαντικό στοιχείο του κυκλώματος είναι ο σπινθηριστής CFS και η

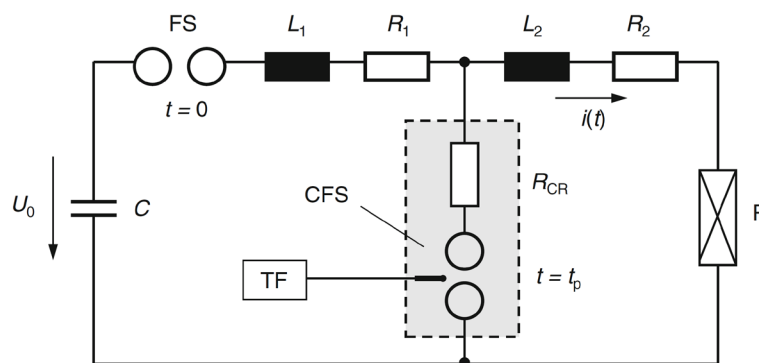
αντίσταση διακένου αυτού  $R_{CR}$ . Τα υποδεικνύόμενα στοιχεία κυκλώματος  $L_1$ ,  $R_1$  και  $L_2$ ,  $R_2$  αντιπροσωπεύουν τις αυτεπαγωγές και τις αντιστάσεις επαφών του κυκλώματος της γεννήτριας και του δοκιμίου. Το διάκενο του σπινθηριστή FS είναι αρχικά ανοιχτό, μετά το κλείσιμό του την χρονική στιγμή  $t=0$ , ο φορτισμένος σε τάση  $U_0$  πυκνωτής εκκενώνεται μέσω των στοιχείων κυκλώματος και του δοκιμίου  $P$  και το ρεύμα μέσω αυτού αυξάνεται (Σχήμα 1.4.1.4). Κατά τη στιγμή  $t=t_p$  όπου το ρεύμα πιάνει την τιμή κορυφής του, το κάθετο διάκενο CFS διασπάται με τη βοήθεια του σκανδαλιστή TF και το κύκλωμα με  $L_2$ ,  $R_2$  και το αντικείμενο δοκιμής  $P$  είναι πλέον βραχυκυκλωμένο μέσω της αντίστασης  $R_{CR}$ . Στην περίπτωση όπου  $L_2 \gg L_1$ , σχεδόν ολόκληρη η ενέργεια που αποθηκεύτηκε νωρίτερα στον πυκνωτή C εκκενώνεται στο δοκίμιο. Αμέσως μετά το κρουστικό ρεύμα μειώνεται εκθετικά με χρονική σταθερά  $L_2/(R_{CR}+R_2)$ . Στην περίπτωση αυτή δεν εμφανίζεται αρνητική πολικότητα του ρεύματος (καμπύλη (2) Σχήμα 1.4.1.4).

Τα εκθετικά κρουστικά ρεύματα μπορούν επίσης να δημιουργηθούν με συστήματα επαγωγικής αποθήκευσης ενέργειας. Στην περίπτωση αυτή, ένα πηνίο φορτίζεται με συνεχές ρεύμα μέσω ενός κυκλώματος φόρτισης και ενός παράλληλα συνδεδεμένου αρχικά κλειστού διακόπτη. Εν συνεχεία ανοίγοντας τον διακόπτη το πηνίο εκφορτίζεται στο δοκίμιο. Στην πράξη χρησιμοποιούνται ασφαλειο-αποζεύκτες σύρματος το οποίο διασπάται σε υψηλά ρεύματα.



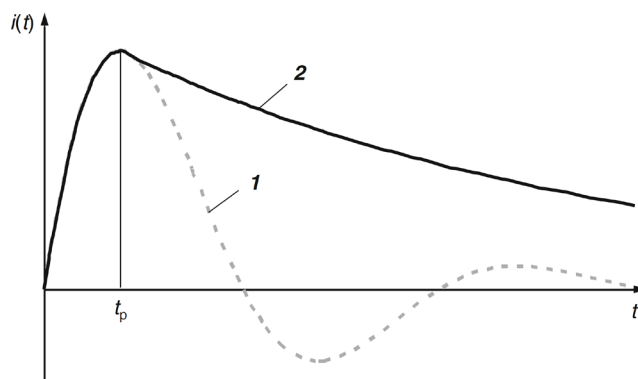
Σχήμα 1.4.1.3

Επίδραση των παραμέτρων χρόνου  $T_f$  και  $T_h$  των κρουστικών ρευμάτων από την αντίσταση φορτίου  $R_p$  στο κύκλωμα εκκένωσης της κρουστικής γεννήτριας του Σχήματος 2.16



Σχήμα 1.4.1.4

Γεννήτρια κρουστικού ρεύματος με κλάδο διακένου αποφυγής αρνητικών τιμών της ουράς της κυματομορφής



Σχήμα 1.4.1.5 Κρουστική (1) χωρίς και (2) με κλάδο διακένου

Θεωρώντας ότι τα στοιχεία  $RLC$  του κυκλώματος 2.16 είναι γραμμικά, έχουμε την κάτωθι εξίσωση τάσης

$$U_C = U_R + U_L \quad (1.4.1.1)$$

Και για το ρεύμα

$$U_0 - \frac{1}{C} \int i dt = L \frac{di}{dt} + Ri \quad (1.4.1.2)$$

Όπου  $U_0$  είναι η τάση του πυκνωτή την στιγμή της εκφόρτισης του  $t=0$ .  
Εφαρμόζοντας μετασχηματισμό Laplace έχουμε,

$$\frac{U_0}{s} - \frac{1}{Cs} = Lsi + Ri \quad (1.4.1.3)$$

Λύνοντας ως προς το ρεύμα έχουμε,

$$i(s) = \frac{U_0}{L} \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (1.4.1.4)$$

Εφαρμόζοντας αντίστροφο μετασχηματισμό Laplace προκύπτουν δύο λύσεις,

Μία για αποσβεσμένο παλμό

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega_d L} e^{-\delta t} \sin(\omega_d t) \quad (1.4.1.5a)$$

Και μία για απεριοδικό αποσβεσμένο παλμό

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega_d^* L} e^{-\delta t} \sin(\omega_d^* t) \quad (1.4.1.5b)$$

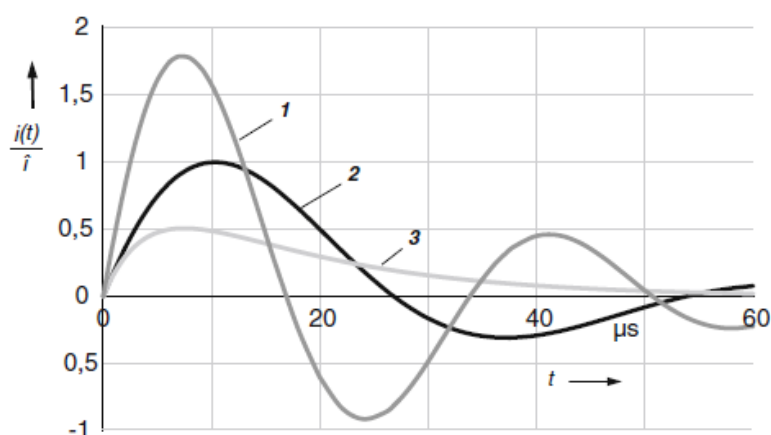
Όπου,

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (1.4.1.6)$$

$$\sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \quad (1.4.1.7)$$

$$\omega_d^* = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (1.4.1.8)$$

Οι υπολογισμένες κυματομορφές εκθετικών κρουστικών ρευμάτων και για διάφορες αντιστάσεις απόσβεσης  $R_1 < R_2 < R_3$  εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα 1.4.1.4. Η κυματομορφή (1) δείχνει έναν ασθενή αποσβεσμένο παλμό ο οποίος περιγράφεται από την εξίσωση (1.4.1.5a). Η κυματομορφή (2), τον παλμό 8/20 επίσης υπολογισμένο με την εξίσωση (1.4.1.5a). Τέλος η κυματομορφή (3) είναι ένας απεριοδικός αποσβεσμένος παλμός ρεύματος υπολογισμένος με την εξίσωση (1.4.1.5b). Για  $R=0$  παίρνουμε από την εξίσωση (1.4.1.5a) μια ιδιαίτερη περίπτωση μη αποσβεσμένου ημιτονοειδούς παλμού.



Σχήμα 1.4.1.4 Εκθετικό κρουστικό ρεύμα σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.4.1.5a) and (1.4.1.5b).  
(1) Ασθενώς αποσβεσμένη, (2) 8/20, (3) Απεριοδικά αποσβεσμένη

Θετικό και αρνητικό μέγιστο παίρνουμε θέτοντας την πρώτη παράγωγο της εξίσωσης (1.4.1.5a) ίση με μηδέν,

$$t_{max,k} = \frac{1}{\omega_d} \left[ \arctan \left( \frac{\omega_d}{\delta} \right) + k\pi \right], \text{ για } k=0,1,2,\dots \quad (1.4.1.9)$$

Ο χρόνος κορυφής  $t_p = t_{max,0}$  βρίσκεται για  $k=0$  ενώ ο χρόνος της πρώτης αρνητικής κορυφής  $t_p = t_{max,1}$  βρίσκεται για  $k=1$ . Από τους χρόνους αυτούς μπορούν να βρεθεί η πρώτη θετική και η πρώτη αρνητική κορυφή του ρεύματος εφαρμόζοντάς τους στην εξίσωση (1.4.1.5a). Για την αποφυγή καταστροφής του δοκιμίου ορίζονται όρια για την πρώτη αρνητική κορυφή ρεύματος.

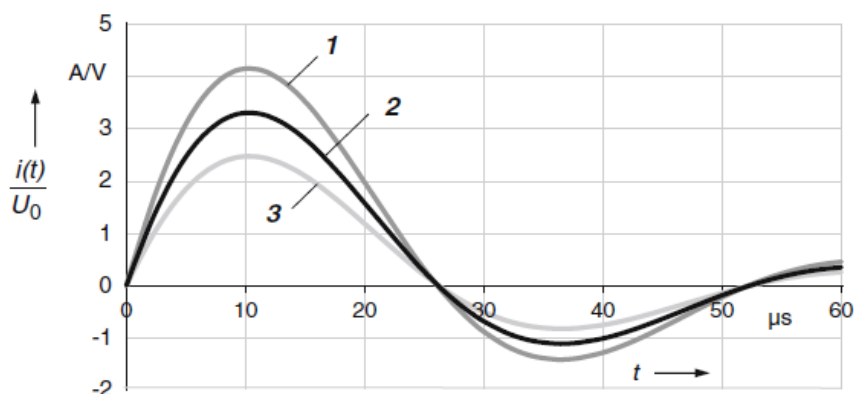
Πρέπει να σημειωθεί ότι τα κρουστικά ρεύματα που έχουν υπολογιστεί με τις εξισώσεις (1.4.1.5a) and (1.4.1.5b) αναφέρονται στο μαθηματική αρχή Ο. Η διαφορά μεταξύ του Ο και του τυποποιημένου Ο<sub>1</sub> λαμβάνεται από,



$$t_0 = O - O_1 = 0.125T_{AB} - t_{10}(10) \quad (1.4.1.10)$$

Όπου  $t_{10}(O)$  είναι ο χρόνος που αναφέρεται στο  $O$  για πλάτος παλμού  $0.1\hat{i}$  και  $T_{AB}$  ο χρόνος μεταξύ των πλατών  $0.1\hat{i}$  και  $0.9\hat{i}$ . Για την  $8/20$  το  $O1$  βρίσκεται κατά χρόνο  $t_0 \approx 0.28\mu\text{s}$  πριν το  $O$ . Κατά την εκτέλεση δοκιμών, λόγω της μεγάλης ανοχής για τον χρόνο  $T_2$  μπορεί να αγνοηθεί η διαφορά μεταξύ των  $O$  και  $O_1$ .

Στην περίπτωση όμως που απαιτείται μεγάλη ακρίβεια, ο υπολογισμός της (1.4.1.5) γίνεται μειώνοντας τον χρόνο  $T_h$  κατά  $t_0$ , συγκεκριμένα στην  $8/20$  το  $T_h$  λαμβάνεται  $T_h \approx 19.72\mu\text{s}$ .



Σχήμα 1.4.1.5 Παλμός  $8/20$  σύμφωνα με την εξίσωση (3.26α) για διάφορους πυκνωτές. 1.

$$C=50\mu\text{F} \quad 2.C=40\mu\text{F} \quad 3. C=30\mu\text{F}$$

Αρχή	C $\mu\text{F}$	R $\Omega$	L $\mu\text{H}$	$\hat{i}/U_0$ A/V
O1	50	0.102	1.235	
O1	40	0.128	1.547	3.31
O1	30	0.173	2.067	2.48
O	30	0.188	2.13	2.38

Πίνακας 1.4.1.1 Στοιχεία κυκλώματος για την  $8/20$  κρουστική ρεύματος σύμφωνα με την εξίσωση (1.4.1.5) αναφερόμενη στην αρχή  $O$  και  $O_1$

Εάν πρόκειται να παραχθεί μια καθορισμένη κρουστική κυματομορφή με τις χρονικές παραμέτρους  $T_f$  και  $T_h$ , τα απαιτούμενα στοιχεία κυκλώματος  $R$ ,  $L$  και  $C$  στο Σχήμα 1.4.1.1 μπορεί να ληφθούν από εξίσωση (1.4.1.5a) με επανάληψη με αριθμητικές μεθόδους υπολογισμού. Κατά κανόνα, η χωρητικότητα  $C$  του πυκνωτή φόρτισης, η οποία αποτελεί σημαντικό μέρος του κόστους μιας γεννήτριας κρουστικού ρεύματος, προδιαγράφεται και τα δύο άλλα στοιχεία κυκλώματος για την επιθυμητή κυματομορφή, προκύπτουν από τον υπολογισμό. Για παράδειγμα, το Σχήμα 1.4.1.5 δείχνει για το κρουστικό ρεύμα 8/20, τις κυματομορφές που προκύπτουν από έναν υπολογισμό με τα στοιχεία κυκλώματος σύμφωνα με την εξίσωση (1.4.1.5), για διάφορους πυκνωτές φόρτισης. Μπορεί να αναγνωριστεί ότι με την ίδια τάση φόρτισης  $U_0$  η μέγιστη τιμή  $i$  αυξάνεται με την  $C$ . Επιπλέον, οι κυματομορφές που υπολογίζονται για 50μF, 40μF και 30μF, αναφερόμενες στην αντίστοιχη μέγιστη τιμή  $i$ , είναι σύμφωνες μεταξύ τους. Το κρουστικό ρεύμα 8/20, που αναφέρεται στην τυποποιημένη αρχή  $O_1$ , φτάνει στην κορυφή του μετά από χρόνο  $t_p=10,6\mu s$ . Η μέγιστη αρνητική κορυφή με τιμή 33,5%  $i$  εμφανίζεται μετά από 36,8μS. Τα στοιχεία του κυκλώματος υπολογίζονται από την εξίσωση (1.4.1.5a) για το κρουστικό ρεύμα 8/20 με τους τρεις πυκνωτές φόρτισης και τα πηλίκα της μέγιστης τιμής τους και της τάσης φόρτισης συνοψίζονται στον πίνακα 1.4.1.1. Οι τιμές που δίνονται στις τρεις πρώτες σειρές του πίνακα αναφέρονται στην εικονική αρχή  $OI$ . Για λόγους σύγκρισης, οι τιμές που αναφέρονται στη μαθηματική αρχή  $O$  περιλαμβάνονται επίσης για  $C = 30\mu F$  στην τελευταία σειρά του πίνακα.

### Φασματική ανάλυση εκθετικών κρουστικών παλμών ρεύματος

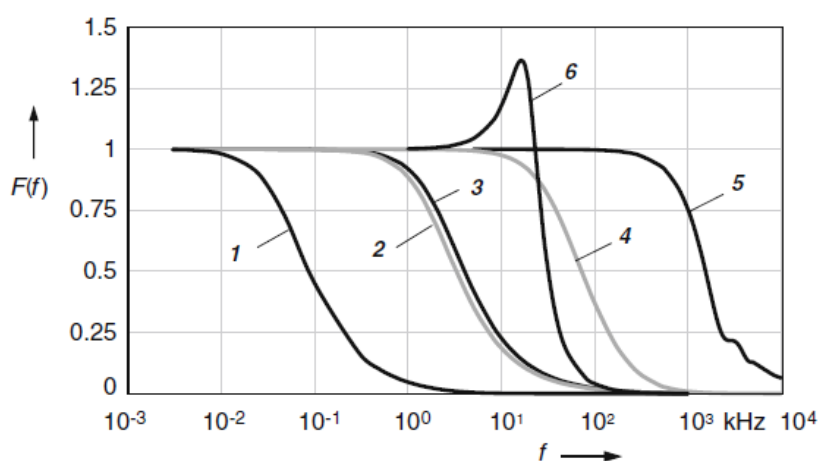
Το φάσμα του εκθετικού κρουστικού ρεύματος προκύπτει από τα αποτελέσματα της εξίσωσης (1.4.1.5a) με την χρήση του μετασχηματισμού Laplace,

$$I(s) = \hat{i} \frac{1}{s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC}} \quad (1.4.1.11)$$

Χωρίζοντας το πραγματικό από το φανταστικό μέρος και για  $s=j\omega$ , η κανονικοποιημένη πυκνότητα του πλάτους του παλμού είναι,

$$F(\omega) = \frac{|F(j\omega)|}{F(0)} = \frac{1}{\sqrt{(1-LC\omega^2)^2 + (RC\omega)^2}} \quad (1.4.1.12)$$

Ως παράδειγμα, η καμπύλη 6 στο Σχήμα 1.4.1.5 δείχνει την κανονικοποιημένη πυκνότητα πλάτους του κρουστικού ρεύματος 8/20 σε σύγκριση με διάφορες κρουστικές τάσεις. Σε συχνότητα 16,4 kHz που αντιστοιχεί στην αποσβεσμένη ταλάντωση της κυματομορφής (Σχήμα 1.4.1.5, καμπύλη 2), παρουσιάζει υπέρβαση 36 %. Η ανώτερη οριακή συχνότητα 3-dB βρίσκεται στα  $f_2 = 27$  kHz. Η μείωση της πυκνότητας πλάτους είναι πιο απότομη από εκείνη όλων των δοθέν παλμών τάσεων.



Σχήμα 1.4.1.5 Πυκνότητα πλάτους  $F(f)$  για διάφορες κρουστικές τάσεις και για μία κρουστική ρεύματος. (1) Κρουστική τάσεως 250/2500, (2) Κρουστική τάσεως 0.84/60, (3) Κρουστική τάσεως 1.2/50, (4) Κρουστική τάσεως 1.2/5, (5) Τριγωνικός μετασχηματισμός ( $t_c=0.5\mu s$ ), (6) Κρουστική ρεύματος 8/20

## 1.4.2 Παραγωγή ορθογώνιων κρουστικών ρευμάτων

Το αρχικό διάγραμμα μιας γεννήτριας για την παραγωγή ορθογώνιων κρουστικών ρευμάτων (μακράς διάρκειας) με διάρκεια μεγαλύτερη από 1  $\mu s$  για κεραυνικές δοκιμές παρουσιάζεται στο σχήμα 1.4.2.1. Η εν σειρά διασυνδεδεμένων στοιχείων  $LC$  σχηματίζουν ένα δίκτυο  $N$ -βαθμίδων. Οι χωρητικότητες  $C'$  που συνδέονται παράλληλα φορτίζονται με συνεχή τάση  $U_0$  μέσω ανόρθωσης και εκφορτίζονται στην τερματική αντίσταση  $R_1$  μέσω ενός σπινθηριστή/σκανδαλιστή. Για την αντίσταση τερματισμού, έχουμε:

$$R_1 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1.4.2.1)$$

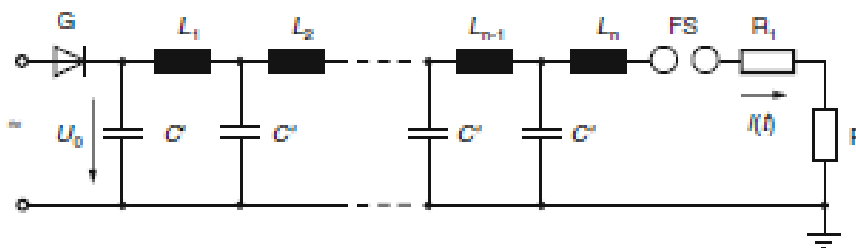
όπου  $L = nL_i$  και  $C = nC'$ . Όπου απαιτείται, λαμβάνεται υπόψη η τιμή της εσωτερικής αντίστασης του δοκιμίου στην εξίσωση (1.4.2.1).

$$T_d \approx 2 \frac{n-1}{n} \sqrt{LC} \quad (1.4.2.2)$$

Από τις εξουσίες, (1.4.2.1) και (1.4.2.27), επιλέγοντας τα  $L$  και  $C$  μπορούν να επιτευχθούν τετραγωνικοί παλμοί διάρκειας  $T_d$ .

Το δε μέγιστο ρεύμα δίνεται από την εξίσωση,

$$I_{peak} = \frac{U_0}{2 \cdot R_1} \quad (1.4.2.3)$$



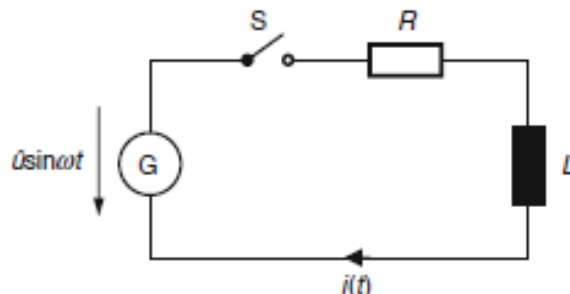
Σχήμα 1.4.2.1 Διάγραμμα κυκλώματος μιας γεννήτριας ορθογώνιων κρουστικών ρευμάτων

Οι αριθμητικοί υπολογισμοί για μια γεννήτρια με  $n=8$  στοιχεία δείχνουν ότι μια ασύμμετρη διάταξη του  $n$ -δικτύου είναι πιο επωφελής προκειμένου να επιτευχθεί, στο μέτρο του δυνατού, ένας ορθογώνιος παλμός ρεύματος χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις στην αρχή ή στο τέλος του παλμού. Οι τιμές των αυτεπαγωγών  $L_1 \dots L_n$  διαφέρουν σημαντικά ενώ οι χωρητικότητες  $C'$  των βαθμίδων είναι σταθερές.

### 1.4.3 Παραγωγή εναλλασσόμενων κρουστικών ρευμάτων

Τα εναλλασσόμενα ρεύματα βραχυκυκλώματος για τη δοκιμή εξοπλισμού στα δίκτυα ισχύος δημιουργούνται σε εργαστήρια μεγάλης ισχύος μέσω ισχυρών μηχανών και για τιμές ρεύματος αρκετών 100kA. Το ρεύμα βραχυκυκλώματος που απαιτείται για τη δοκιμή των ασφαλειο-διακοπών περιορίζεται σε μερικές περιόδους ή ημι-περιόδους, έτσι

ώστε η μέγιστη διάρκεια της δοκιμής να βρίσκεται στην περιοχή του 1s. Οι διαδικασίες μπορούν να περιγραφούν με τη βοήθεια του απλού ισοδύναμο κύκλωμα στο σχήμα 1.4.3.1.



Σχήμα 1.4.3.1 Ισοδύναμο κύκλωμα για την δημιουργία ρευμάτων βραχυκυκλώσεως

Το κύκλωμα αποτελείται από την αντίσταση  $R$ , την αυτεπαγωγή του δοκιμίου και τους συνδετικούς αγωγούς. Κατά τη στιγμή της ζεύξης  $t=t_0$ , η εναλλασσόμενη τάση με στιγμιαία τιμή  $u(t_0) = \hat{u} * \sin\Psi$  επάγεται στο κύκλωμα, όπου  $\Psi$  είναι η γωνία έναυσης. Υπό την προϋπόθεση ότι η εναλλασσόμενη τάση  $u(t_0) = \hat{u} * \sin(\omega t + \Psi)$  είναι ισχυρή και παραμένει αμετάβλητη στο δοκίμιο, ένα εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκυκλώσεως  $i(t)$  σύμφωνα με την εξίσωση (1.4.3.4) ρέει για μια καθορισμένη διάρκεια ή αριθμό περιόδων. Σε συνεχή λειτουργία, το ρεύμα βραχυκυκλώματος έπεται της τάσης με γωνία φάσης  $\phi$  λόγω του επαγωγικού φορτίου. Ανάλογα με τη γωνία έναυσης  $\Psi$ , μια σχετικά μεγάλη συνεχής συνιστώσα υπερτίθεται στο ρεύμα βραχυκύκλωσης, η οποία μειώνεται εκθετικά με τον χρόνο (Σχήμα 1.3.3.1). Το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκυκλώματος με την συνεχή συνιστώσα, λόγω της οποίας η τιμή του ρεύματος κορυφής σχεδόν διπλασιάζεται καταπονεί εξαιρετικά το δοκίμιο. Μικρότερων τιμών ρεύματα βραχυκυκλώσεως μπορούν επίσης να δημιουργηθούν με στατές γεννήτριες ελεγχόμενες μέσω D/A μοφροτροπέων.

Ξεκινώντας από το απλό ισοδύναμο κύκλωμα για το μεταβαλλόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης (βραχυχρόνιου) του Σχήματος 1.4.3.1, μπορεί να διατυπωθεί η ακόλουθη διαφορική εξίσωση μετά το κλείσιμο (ζεύξη) του διακόπτη  $S$ :

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \psi) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) \quad (1.4.3.1)$$

όπου  $\psi$  είναι η γωνία ζεύξης τη στιγμή του κλεισίματος του διακόπτη  $S$ . Το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης προκύπτει ως λύση της διαφορικής εξίσωσης:

$$i(t) = \hat{i}[\sin(\omega t + \psi - \varphi) - \sin(\psi - \varphi) \cdot e^{-t/\tau}] \quad (1.4.3.2)$$

με το πλάτος:

$$\hat{i} = \frac{\hat{u}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (1.4.3.3)$$

τη γωνία φάσης:

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (1.4.3.4)$$

και την χρονική σταθερά:

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (1.4.3.5)$$

Το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης σύμφωνα με την εξίσωση (1.4.3.2) αποτελείται από ένα σταθερό και ένα μεταβατικό τμήμα (Σχήμα 2.11α). Το σταθερό μέρος (πρώτος όρος εντός των αγκυλών) αποτελείται από μια ωμική και μια επαγωγική συνιστώσα, η οποία είναι είτε σε φάση είτε υστερεί σχεδόν 90° από την τάση οδήγησης. Η συνιστώσα που προκύπτει έχει γωνία φάσης  $\varphi$  που αντιστοιχεί στην εξίσωση (1.4.3.4). Το μεταβατικό τμήμα του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης (δεύτερος όρος εντός των αγκυλών) αντιπροσωπεύει ένα συνεχές ρεύμα που μειώνεται εκθετικά με τη σταθερά χρόνου  $s$ .

Η αρχική μορφή του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης εξαρτάται από το χρόνο  $t_s$  ή τη γωνία ζεύξης  $\psi$  κατά την οποία η εναλλασσόμενη τάση ενεργοποιείται στο κύκλωμα  $RL$ . Για δυσμενείς συνδυασμούς της γωνίας ζεύξης και της διάταξης φάσης, το μεταβατικό και το στάσιμο μέρος του ρεύματος μπορεί να υπερτίθενται σε τέτοιο βαθμό, ώστε η πρώτη τιμή κορυφής του εναλλασσόμενου ρεύματος βραχυκύκλωσης, για χαμηλές τιμές του  $R$ , να φτάνει σχεδόν στο διπλάσιο πλάτος του στάσιμου ρεύματος (Σχήμα 1.3.3.1 (a)). Αυτό σημαίνει φυσικά μια εξαιρετικά ενισχυμένη καταπόνηση του αντικειμένου δοκιμής. Εάν η ζεύξη πραγματοποιείται στο σημείο μηδενικής διασταύρωσης της εναλλασσόμενης τάσης και το  $t_s$  είναι πολύ μικρό, το τμήμα του συνεχούς ρεύματος πρακτικά εξαφανίζεται και το εναλλασσόμενο ρεύμα βραχυκύκλωσης συνεχίζεται σχεδόν ημιτονοειδές (Σχήμα 1.3.3.1 (b)).

## 1.5 Διεθνή Πρότυπα

Παρατίθενται οι κυριότερες αλλαγές των ορισμών και των απαιτήσεων που έγιναν στα πρότυπα με στόχο να δοθεί μια συνολική εικόνα των αναθεωρημένων και των νέων προτύπων, [17], [18], [19], [20]. Αυτά περιλαμβάνουν:

### Αλλαγές στα IEC 60060-1:2010

- Οι ορισμοί για τις βασικές παραμέτρους κρουστικών ρευμάτων,  $U_p$ ,  $T_f$  και  $T_h$ , δεν έχουν αλλάξει. Η συνάρτηση τάσης δοκιμής (μερικές φορές γνωστή ως παράγοντας  $k$ ), έχει εισαχθεί για να επιτρέψει τον ακριβέστερο και συνεπέστερο προσδιορισμό των παραμέτρων τάσης δοκιμής και χρόνου των παλμών αστραπής με υπερτιθέμενες ταλαντώσεις οποιουδήποτε περιεχομένου συχνότητας. Έχουν προστεθεί ορισμένοι νέοι ορισμοί σχετικά με αυτή τη νέα διαδικασία, π.χ. λειτουργία τάσης δοκιμής, ακραία τιμή, σχετική υπέρβαση και μέσος ρυθμός ανόδου.
- Η μέγιστη τιμή μιας εναλλασσόμενης τάσης ορίζεται τώρα ως το ήμισυ της τάσης αιχμής προς κορυφή. Ο προηγούμενος ορισμός, "μέγιστη τιμή", θα μπορούσε να οδηγήσει σε παρερμηνεία για περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρμονικές στη πηγή δοκιμής. Αυτή η αρμονική παραμόρφωση μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικές θετικές και αρνητικές μέγιστες τιμές. Επιτρέπεται μέγιστη τιμή 2 % για τη διαφορά μεταξύ θετικών και αρνητικών μέγιστων τιμών. Η τιμή τάσης δοκιμής είναι η μέγιστη τιμή διαιρούμενη διά  $\sqrt{2}$ .
- Δεν έχουν εισαχθεί αλλαγές στον ορισμό των παραμέτρων κρουστικής στο IEC 60060-1:2013 και διατηρήθηκε ο προηγούμενος ορισμός του χρόνου έως την κορυφή, δηλαδή «χρονικό διάστημα από την πραγματική αρχή έως το χρόνο μέγιστης τιμής».
- Τα IEEE Std 4 2013 και IEC 60060-1:2010 διαφέρουν ελαφρώς στην αξιολόγηση των παλμών ζεύξεων. Για την περίπτωση που η ώθηση είναι μια τυπική παλμών ζεύξεως, δηλαδή ο χρόνος μέχρι την κορυφή είναι  $250 \mu s \pm 50 \mu s$ , το IEC προσδιορίζει μια απλοποιημένη μέθοδο χρησιμοποιώντας έναν μαθηματικό τύπο που υιοθετήθηκε από το IEEE Std 4-1995. Αυτή η μέθοδος δίνεται επίσης από το IEEE Std 4 2013, αλλά αναφέρεται ως ορισμός.
- Για μη τυποποιημένες ωθήσεις μεταγωγής, η IEC δηλώνει σαφώς ότι πρέπει να χρησιμοποιούνται άλλες μέθοδοι αξιολόγησης, π.χ. "Για μη τυποποιημένες ωθήσεις, ο χρόνος μέχρι την κορυφή μπορεί να προσδιοριστεί με διάφορες μεθόδους ψηφιακής

προσαρμογής καμπύλης ανάλογα με το πραγματικό σχήμα". Άλλες αλλαγές περιεχομένου περιλαμβάνουν:

- Έχουν εισαχθεί τύποι για τις παραμέτρους του συντελεστή ατμοσφαιρικής διόρθωσης για να καταστεί εφικτός ο υπολογιστικός υπολογισμός του συντελεστή διόρθωσης.
- Εισάγεται η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού του συντελεστή ατμοσφαιρικής διόρθωσης μιας τάσης δοκιμής και προορίζεται για δοκιμές αντοχής. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί στη μείωση του σφάλματος του διορθωτικού συντελεστή λόγω του σφάλματος στην εκτιμώμενη τάση  $U50$  (50 %) που απαιτείται για τον υπολογισμό. Το σφάλμα γίνεται σημαντικό όταν η διόρθωση είναι σημαντική.
- Διατηρήθηκε μόνο μία διαδικασία υγρής δοκιμής.
- Έχουν εκπονηθεί διαδικασίες δοκιμής για συνδυασμένες και σύνθετες τάσεις.
- Οι αναφορές στη διαδικασία δοκιμής τεχνητής ρύπανσης AC και DC αφαιρούνται όπως περιγράφονται στο IEC 60507.
- Η εκτίμηση των κοινών συνιστωσών των αβεβαιοτήτων στις μετρήσεις υψηλής τάσης καθορίζεται πλέον λεπτομερώς
- Οι απαιτήσεις σχετικά με τις δοκιμές γραμμικότητας τάσης καθορίζονται σαφέστερα.
- Προστέθηκαν νέες απαιτήσεις σχετικά με τη δυναμική απόδοση, δηλαδή την απόκριση συχνότητας των συστημάτων μέτρησης τάσης εναλλασσόμενου ρεύματος συχνότητας ισχύος.
- Οι μέθοδοι αξιολόγησης παραμέτρων απόκρισης βημάτων για τον χαρακτηρισμό διαιρετών τάσης και διακλαδώσεων ρεύματος έχουν μεταφερθεί σε ενημερωτικό παράρτημα, ενώ έχουν αναθεωρηθεί ορισμένοι ορισμοί που σχετίζονται με τη μέτρηση της απόκρισης βημάτων.
- Προστέθηκε παράρτημα για την αξιολόγηση της δυναμικής απόδοσης του συστήματος μέτρησης παλμών με τη μέθοδο της συνέλιξης.
- Το Standard Sphere-Gap δεν είναι πλέον αποδεκτό ως συσκευή μέτρησης αναφοράς, αλλά μπορεί ακόμα να χρησιμοποιηθεί για ελέγχους απόδοσης.
- Αφαιρείται η διαδικασία βαθμονόμησης για συστήματα συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούν διάκενο ράβδου/ράβδου.
- Η μέτρηση των παλμικών ρευμάτων έχει μεταφερθεί σε ένα νέο πρότυπο IEC 62475: 2010, Τεχνικές δοκιμής υψηλού ρεύματος - Ορισμοί και απαιτήσεις για ρεύματα δοκιμής και συστήματα μέτρησης.



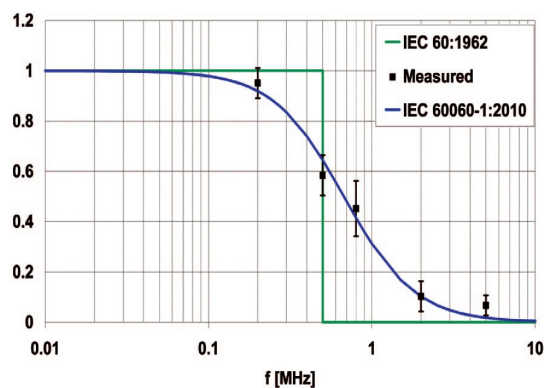
### **Αλλαγές στα IEC 62475:2010**

- Το τρέχον τμήμα μέτρησης αυτού του προτύπου καλύπτει περισσότερες εφαρμογές από το παρωχημένο 60060-2: 1994, το οποίο κάλυπτε μόνο τη μέτρηση του κρουστικού ρεύματος όπως χρησιμοποιείται στις δοκιμές συγκράτησης.
- Το νέο πρότυπο καλύπτει επίσης τις απαιτήσεις για δοκιμές με οποιοδήποτε τύπο υψηλού ρεύματος, καθώς και τις απαιτήσεις για ένα σύστημα μέτρησης υψηλού ρεύματος.
- Οι τύποι υψηλών ρευμάτων που έχουν προστεθεί τώρα περιλαμβάνουν: συνεχές ρεύμα σταθερής κατάστασης, εναλλασσόμενο ρεύμα σταθερής κατάστασης, βραχυπρόθεσμο συνεχές ρεύμα, βραχυπρόθεσμο εναλλασσόμενο ρεύμα και κρουστικά ρεύματα.
- Το πρότυπο καλύπτει επίσης τη μέτρηση ρεύματος σε διηλεκτρικές δοκιμές υψηλής τάσης.
- Το πρότυπο έχει υιοθετήσει παρόμοια δομή με εκείνη του IEC60060-2:2010.
- Η εκτίμηση των αβεβαιοτήτων μέτρησης καθορίζεται παρόμοια με το IEC 60060-2:2010.

### **Αλλαγές στα IEC 61083-2:2013**

- Το IEC 61083 μέρος 2 έχει ενημερωθεί με μια νέα γεννήτρια δεδομένων δοκιμής (TDG) για την αξιολόγηση μεθόδων αξιολόγησης λογισμικού συστήματος μέτρησης παλμών.
- Η νέα έκδοση έχει περισσότερες κυματομορφές κρουστικής τάσης και περιλαμβάνει κύματα με διαφορετικά πλάτη και συχνότητες υπέρβασης. Οι συχνότητες επιλέγονται για να αποδείξουν την απόδοση γύρω από τη συχνότητα μετάβασης των 500 kHz. Το νέο TDG μπορεί να βοηθήσει τους χρήστες να αποδείξουν ότι το λογισμικό τους κάνει σωστές αξιολογήσεις των βασικών παραμέτρων με συνεπή και συγκρίσιμο τρόπο.
- Οι τιμές αναφοράς των κυματομορφών αστραπής έχουν επίσης αναθεωρηθεί σύμφωνα με τον νέο ορισμό της κρουστικής τάσης δοκιμής στο IEC 60060-1: 2010
- Κυματομορφές παλμικών ρευμάτων προστίθενται στο TDG για να αντιπροσωπεύσουν μια σειρά από αυτές που χρησιμοποιούνται για δοκιμές ανακοπής που έχουν προστεθεί τα τελευταία χρόνια. Περιλαμβάνονται πλέον περισσότερες τρέχουσες κυματομορφές, συμπεριλαμβανομένων των παλμών ρεύματος αστραπής, προκειμένου να καλυφθεί το εύρος των κυματομορφών ρεύματος που χρησιμοποιούνται στο νέο πρότυπο IEC 62475:2010.

- Προστέθηκε παράρτημα για την εκτίμηση της συμβολής του λογισμικού στην αβεβαιότητα (υπολογισμός παραμέτρων κυματομορφής).



Σχήμα 1.5.1 Συντελεστής υπολογισμού πλάτους για εύρος συχνοτήτων ταλάντωσης υπερτιθέμενη σε μια ώθηση αστραπής, μαζί με την παλιά και τη νέα δοκιμή λειτουργίες τάσης.

#### Αλλαγές στα IEEE Std 4-2013

- Το πρότυπο IEEE Std 4-2013 συνεχίζει να καλύπτει τόσο τις απαιτήσεις για δοκιμές όσο και τις απαιτήσεις για συστήματα μέτρησης, οι οποίες καλύπτονται ξεχωριστά από τα IEC 60060-1:2010 και IEC 60060 2:2010.
- Έχουν καταβληθεί προσπάθειες για την εναρμόνιση του IEEE Std 4-2013 με τα δύο μέρη του IEC 60060, όσον αφορά τις αρχές και τις θεμελιώδεις απαιτήσεις. Μικρές διαφορές, ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν. Περίληψη των διαφορών περιλαμβάνεται στο φυλλάδιο.
- Η νέα έκδοση του IEEE Std 4 εξακολουθεί να περιέχει ένα σημαντικό ποσό πληροφοριών εκμάθησης για να δώσει πρακτικές προτάσεις στον μηχανικό δοκιμών.

#### Σημαντικοί ορισμοί και απαιτήσεις

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει σημαντικούς ορισμούς και απαιτήσεις που είτε έχουν υποστεί σημαντικές αλλαγές είτε χρήζουν ιδιαίτερης προσοχής από τους χρήστες για την ορθή ερμηνεία και την καλύτερη χρήση των προτύπων.

Μια συνάρτηση τάσης δοκιμής, που ορίζεται τώρα στο IEC 60060-1: 2010 και στο IEEE Std.4-2013, έχει την ακόλουθη μορφή:

$$k(f) = 1/(1 + 2.2f^2) \quad (1.5.1)$$

που φαίνεται από την μπλε γραμμή στο σχήμα 1.5.1. Αυτός ο τύπος χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πραγματικής τάσης αιχμής ως συνάρτηση της συχνότητας της ταλάντωσης όπου  $f$  είναι η συχνότητα σε MHz. Η εισαγωγή αυτής της συνάρτησης αφαιρεί τα προβλήματα που σχετίζονται με τη σταδιακή αλλαγή στα 0,5 MHz στην προηγούμενη έκδοση του προτύπου και κάνει μια ομαλή μετάβαση που έχει μαθηματικό ορισμό της συνάρτησης που φαίνεται παραπάνω. Αυτή η πρόσφατα καθορισμένη συνάρτηση και η διαδικασία ανάλυσης συσχετισμού επιτρέπει τον προσδιορισμό παραμέτρων της κρουστικής χωρίς υποκειμενικό προσδιορισμό της ύπαρξης ή των χαρακτηριστικών της υπέρβασης και της συχνότητάς της. Η νέα σχετική διαδικασία στα πρότυπα καθορίζεται επίσης με μεγαλύτερη ακρίβεια προκειμένου να εξαλειφθούν οι αποκλίσεις των παραμέτρων της κρουστικής που λαμβάνονται από διαφορετικά πακέτα λογισμικού.

Αναπόσπαστο μέρος των απαιτήσεων για δοκιμές κρουστικής τάσης στο IEC 60060-1: 2010 είναι οι απαιτήσεις για λογισμικό που καθορίζονται στο IEC 61083-2: 2013. Το Test Data Generator (TDG) του IEC 61083-2: 2013 είναι ένα πακέτο λογισμικού για την παραγωγή δεδομένων δοκιμών. Το TDG παράγει ψηφιακά αρχεία ενός αριθμού διαφορετικών κυματομορφών κρουστικής για τη δοκιμή ενός πακέτου λογισμικού μέτρησης παλμών. Το IEC 61083 2:2010 καθορίζει τις τιμές αναφοράς των παλμών δοκιμής που παράγονται από το TDG. Το IEC 61083-2: 2013 παρέχει επίσης όρια σφάλματος για την αποδοχή λογισμικού αξιολόγησης για τη μέτρηση διαφορετικών τύπων παλμών.

### **Ορισμοί των παλμών ζεύξεως**

Ο ορισμός του χρόνου έως την κορυφή για τον παλμό ζεύξης στο IEC 60060-1: 2010 είναι "χρονικό διάστημα από την πραγματική προέλευση έως το χρόνο μέγιστης τιμής μιας τάσης παλμού ζεύξεως". Έχει βρεθεί ότι είναι συχνά δύσκολο να προσδιοριστεί αυτός ο χρόνος κορυφής,  $T_p$ , ακόμη και από ψηφιακά αρχεία παλμών με χαμηλή αβεβαιότητα, λόγω του γεγονότος ότι οι ψηφιακά καταγεγραμμένες τιμές τάσης στην περιοχή αιχμής

κρουστικής μπορούν να είναι περίπου ίσες για μεγάλο χρονικό διάστημα και πολλά σημεία δεδομένων του ίδιου πλάτους θα βρεθούν γύρω από την πραγματική τιμή κορυφής.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα του υπολογισμού του  $T_p$  από ψηφιακά αρχεία των τυπικών παλμών ζεύξεως, ο εμπειρικός τύπος που εισήχθη σε προηγούμενη έκδοση του IEEE Std. 4 (διατηρήθηκε στο IEEE Std 4-2013), περιλαμβάνεται τώρα στο IEC 60060-1: 2010 για την αξιολόγηση των παλμών ζεύξεως που συμμορφώνονται με την τυπική κυματομορφή.

Ο τύπος έχει την ακόλουθη μορφή:

$$T_p = KT_{AB} \quad (1.5.2)$$

Όπου  $K$  είναι μια αδιάστατη σταθερά που δίνεται από

$$K = 2.42 - 2.08 \times 10^{-3}T_{AB} + 1.51 \times 10^{-4}T_2 \quad (1.5.3)$$

Όπου  $T_{AB}$  και  $T_2$  είναι σε μικροδευτερόλεπτα και  $T_{AB} = t_{90} - t_{30}$ , όπου  $t_{90}$  και  $t_{30}$  είναι οι στιγμές που αντιστοιχούν σε επίπεδα τάσης 90 % και 30 % της τάσης αιχμής αντίστοιχα, και οι αριθμητικές σταθερές 2,08 και 1,51 έχουν διάσταση  $S^{-1}$ .

### Τάση δοκιμής AC

Η μέγιστη τάση εναλλασσόμενου ρεύματος ορίζεται τώρα στο IEC 60060-1:2010 ως ο "μέσος όρος των μεγεθών των θετικών και αρνητικών μέγιστων τιμών, σε αντίθεση με τη "μέγιστη τιμή" στην έκδοση του 1989. Ο ορισμός της τάσης αιχμής στο IEEE Std 4-2013, παραμένει ο ίδιος όπως και στην προηγούμενη έκδοσή του, IEEE Std 4-1995, ο οποίος είναι ουσιαστικά πανομοιότυπος με τον αντίστοιχο ορισμό στο IEC 60060-1: 1989. Ο πρακτικός αντίκτυπος της διαφοράς μεταξύ IEC 60060-1: 2010 και IEEE Std 4-2013 είναι ασήμαντος στη συντριπτική πλειοψηφία των δοκιμών AC, όπου οι κυματομορφές τάσης AC είναι συμμετρικές στο επίπεδο μηδενικής τάσης.

Η απαίτηση για τον συντελεστή κορυφής, ο οποίος ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης τάσης προς την τιμή rms, παραμένει η ίδια για τις νέες εκδόσεις τόσο του IEC 60060-1 όσο και του IEEE Std 4. Ο λόγος μεταξύ αιχμής και rms πρέπει να είναι εντός του 5% του  $\sqrt{2}$ .

## **Συντελεστής ατμοσφαιρικής διόρθωσης**

Ένας αριθμός τύπων έχουν εισαχθεί για να αντικαταστήσουν τα γραφήματα για την εύκολη εφαρμογή του υπολογισμού μέσω υπολογιστή των τιμών του συντελεστή ατμοσφαιρικής διόρθωσης. Έγιναν επίσης αλλαγές σε ορισμένους τύπους. Αυτές οι χρεώσεις έγιναν τόσο στο IEC 60060-1 όσο και στο IEEE Std.4. Μια άλλη σημαντική αλλαγή είναι η εισαγωγή της επαναληπτικής διαδικασίας για τον προσδιορισμό του συντελεστή ατμοσφαιρικής διόρθωσης για δοκιμές αντοχής σε υψηλή τάση, όπου πρέπει να εκτιμάται η τάση βλάβης πιθανότητας 50 %, U50. Η χρήση αυτής της διαδικασίας μειώνει το σφάλμα στον υπολογισμένο διορθωτικό συντελεστή που προκαλείται από την ανακρίβεια του U50 που εκτιμήθηκε με τη μέθοδο στην προηγούμενη έκδοση του προτύπου. Αυτή η αλλαγή επηρεάζει μόνο τις τιμές του διορθωτικού συντελεστή που αποκλίνουν σημαντικά από την ενότητα. Για παράδειγμα, διορθωτικοί συντελεστές για δοκιμές που εκτελούνται σε μεγάλα υψόμετρα, π.χ. 1000 μέτρα πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.

## **Απαιτήσεις για τα συστήματα μέτρησης**

Οι απαιτήσεις για τα συστήματα μέτρησης καθορίζονται στο IEC 60060-2:2010. Η κύρια δομή του IEC 60060 2:2010 είναι παρόμοια με εκείνη της προηγούμενης έκδοσης IEC 60060 2:1994, αν και υπήρξαν σημαντικές προσθήκες περιεχομένου σε ορισμένες ρήτρες, για παράδειγμα, οι πρόσθετες απαιτήσεις της ρήτρας 5 σχετικά με την εκτίμηση των αβεβαιοτήτων μέτρησης. Το IEC 60060-2: 2010 εξακολουθεί να διατηρεί την προσέγγιση βαθμονόμησης ενός συστήματος μέτρησης με βαθμονομήσεις των εξαρτημάτων του. Η προσέγγιση αυτή παρέχεται ως εναλλακτική μέθοδος στη μέθοδο σύγκρισης του πλήρους συστήματος μέτρησης με ένα σύστημα μέτρησης αναφοράς, το οποίο καθορίζεται ως προτιμώμενη μέθοδος. Κατά τον προγραμματισμό των βαθμονομήσεων και τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων για ολόκληρο το σύστημα, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των κατασκευαστικών στοιχείων και η επίδραση του συστήματος μεταφοράς (καλώδια μέτρησης) για την επίτευξη των σωστών τιμών.

## Αβεβαιότητα μέτρησης

Ο υπολογισμός της αβεβαιότητας έχει αναθεωρηθεί σημαντικά στην τελευταία έκδοση του IEC 60060 2:2010. Οι λόγοι αυτής της σημαντικής αναθεώρησης είναι κυρίως δύο. Πρώτον, η αναθεώρηση είναι να παράσχει στο προσωπικό δοκιμών μια απλή και πρακτική μέθοδο εκτίμησης των αβεβαιοτήτων μέτρησης που είναι σύμφωνη με το ISO 98-3, Οδηγός για την αβεβαιότητα μέτρησης (ISO GUM). Η μέθοδος προορίζεται να καλύψει τις συνηθέστερες περιπτώσεις δοκιμών υψηλής τάσης. Δεύτερον, η προσέγγιση που περιγράφεται στην προηγούμενη έκδοση του IEC 60060-2 (προσάρτημα Η στο IEC 60060 2:1994) δεν θεωρείται πλέον συνεπής με την τρέχουσα έκδοση του ISO GUM. Στην έκδοση του IEC 60060-2 του 1994, δόθηκαν καθορισμένα σταθερά όρια για μεμονωμένες συνιστώσες αβεβαιότητας, για παράδειγμα, καθορίστηκε όριο 1 % για τη μη γραμμικότητα των συστημάτων μέτρησης τάσης. Καθορίστηκαν επίσης σταθεροί αριθμοί επαναλαμβανόμενων μετρήσεων. Ένα παράδειγμα αυτού είναι ότι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων εφαρμοζόμενων παλμών κατά τη διάρκεια μιας βαθμονόμησης τάσης παλμού καθορίστηκε να είναι τουλάχιστον 10. Με την υιοθέτηση της προσέγγισης ISO GUM στην έκδοση του 2010, τα όρια αυτά δεν καθορίζονται πλέον εφόσον η συνολική διευρυμένη αβεβαιότητα (διευρυμένη αβεβαιότητα είναι ένας καθορισμένος όρος) βρίσκεται εντός του απαιτούμενου ορίου. Η κατάργηση αυτών των ορίων καθίσταται δυνατή λόγω της υιοθέτησης της στατιστικά αυστηρότερης προσέγγισης του ISO GUM. Η έκδοση 2010 του IEC 60060-2 υιοθετεί επίσης μια προσέγγιση που αποσκοπεί στην παροχή πρακτικής βοήθειας στους χρήστες του προτύπου για καλύτερη προσαρμογή στη νέα μέθοδο εκτίμησης των αβεβαιοτήτων μέτρησης. Απαριθμεί τυπικές πηγές συμβολής της αβεβαιότητας στα συστήματα μέτρησης. Προστέθηκαν επίσης δύο εντελώς νέα παραρτήματα, το παράρτημα Α και το παράρτημα Β, αφιερωμένα στο θέμα της αβεβαιότητας των μετρήσεων, παρέχοντας μια εύκολα κατανοητή εξήγηση του ISO GUM, καθώς και παραδείγματα υπολογισμού της αβεβαιότητας. Η τελευταία έκδοση του προτύπου IEEE 4 παρέχει επίσης λεπτομερή εξήγηση και παραδείγματα για το πώς καθορίζονται και χρησιμοποιούνται οι βαθμοί ελευθερίας και οι συντελεστές ευαισθησίας.

## **Συμπέρασμα**

Σημαντικές βελτιώσεις έχουν γίνει στα πρόσφατα αναθεωρημένα πρότυπα IEC και IEEE για δοκιμές και μετρήσεις υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος. Αυτές οι βελτιώσεις αντικατοπτρίζουν την αλλαγή των αναγκών της βιομηχανίας, όπως οι δοκιμές στην γκάμα UUV, καθώς και την πρόοδο των τεχνολογιών, όπως οι τεχνικές ψηφιακής μέτρησης. Ένας πολύ υψηλότερος βαθμός εναρμόνισης έχει επίσης επιτευχθεί μεταξύ των αντίστοιχων προτύπων IEC και IEEE, γεγονός που αναμφίβολα θα αποφέρει οφέλη στη βιομηχανία ενέργειας. Η αναθεώρηση των προτύπων είναι μια συνεχής διαδικασία. Στο παρόν έγγραφο προσδιορίζονται επίσης ορισμένοι τομείς που θα πρέπει να εξετάσει η μελλοντική αναθεώρηση των προτύπων.

## Κεφάλαιο 2: Βιβλιογραφία

1. I.F. Gonos, N. Leontides, F.V. Topalis I.A., Stathopoulos, "Analysis and design of an impulse current generator"
2. Wolfgang Hauschild, Eberhard Lemke, (2013) "High-Voltage Test and Measuring Techniques"
3. Klaus Schon (2013), "High Impulse Voltage and Current Measurement-Techniques Fundamentals Measuring Instruments Measuring Methods", Springer
4. "Adiabatic Short Circuit Temperature Rise - Open Electrical", Retrieved from [http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Adiabatic\\_Short\\_Circuit\\_Temperature\\_Rise](http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=Adiabatic_Short_Circuit_Temperature_Rise)
5. Arnold Roth (1959), "Hochspannungstechnik"
6. W.H.Wolfle, W.G.Hurley (2013), "Transformers and inductors for power electronics theory-design and applications"
7. M. Mordusan (1978), "Long duration impulse current generator for arrester tests to IEC recommendations", Haefely
8. Michael Rock (2012), "Prüfgeneratoren zur Simulation von Blitzimpulsströmen im Labor und ihre Wechselwirkung mit den Prüfobjekten", Universitätsverlag Ilmenau
9. Ioannis F. Gonos, C.A. Christodoulou, Ioannis A. Stathopoulos (2008), "Simulation of Metal Oxide Surge Arresters Behavior"
10. Jonathan Woodworth (2008), "Understanding Arrester Discharge Voltage"
11. P. Unahalekhaka, S. Phonkaphon (2007), "Simulation of Surge Protective Devices for Low-Voltage Systems Connected to Digital Subscriber Line Access Multiplexer"
12. Chris Hewson, William F. Ray, "The effect of electrostatic screening of Rogowski coils designed for wide-bandwidth current measurement in power electronic applications"
13. Jan Hlavacek, Radek Prochazka, Karel Draxler, Vladislav Kvasnicka (2008), "The Rogowski Coil Design Software"
14. Hallstahammar (2003), "Kanthal Handbook-Heating alloys for electric Household Appliances"
15. Somchai Yimvuthikul (1998), "Präzise Messung hoher Stossspannungen, Systeme und Verfahren"



16. Frank Jenau, "Lehrstuhl für Hochspannungstechnik", Technische Universität Dortmund,
17. IEC 60060-1:2010, "High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements"
18. IEC 62475:2010, "High-current test techniques - Definitions and requirements for test currents and measuring systems"
19. IEC 61083-2:2013, "Instruments and software used for measurement in high-voltage and high-current tests - Part 2: Requirements for software for tests with impulse voltages and currents"
20. IEEE Std 4-2013, "IEEE Standard for High-Voltage Testing Techniques"
21. IEC 61869-2, "Instrument transformers - Part 2: Additional requirements for current transformers"
22. YOGOGAWA 1540 User manual
23. HILO EMC 2004 Flyer
24. Γρ. Φουρνιάρκου ΣΙΔΗΡΕΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΕΣ
25. DIN 1026-2, "Hot-rolled steel channels with parallel flanges - Part 2: Dimensions, masses and static parameters"

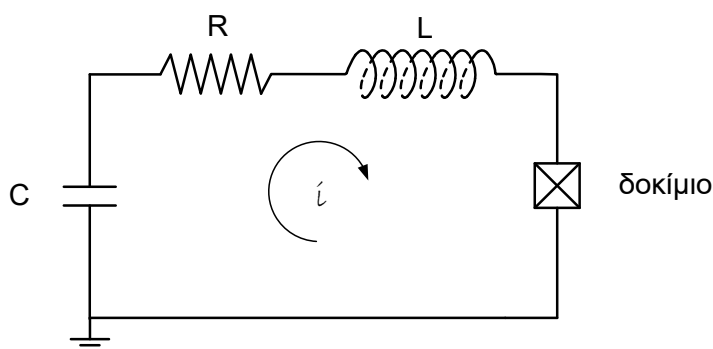
## Κεφάλαιο 3: Αναλυτική περιγραφή γεννήτριας

### 3.1 Εισαγωγή

Το εργαστήριο υψηλών τάσεων, είχε προμηθευτεί από τον Ελβετικό οίκο HEAFFELY 16 πυκνωτές 2,5  $\mu\text{F}$  ο καθένας και διηλεκτρικής αντοχής 50kV με σκοπό να κατασκευάσει μια διάταξη παραγωγής κρουστικών ρευμάτων. Έκτοτε αγοράστηκε και ένας σπινθηριστής σφαιρών 50 kA από τον αυστριακό οίκο Hilo. Σκοπός της εργασίας είναι η συνδεσμολογία των πυκνωτών, του σπινθηριστή και άλλων στοιχείων που είτε διαθέτει το εργαστήριο είτε θα κατασκευαστούν στα πλαίσια της εργασίας ώστε να αποκτήσει το εργαστήριο γεννήτρια κρουστικών ρευμάτων. Στόχος είναι η διάταξη που θα κατασκευαστεί να έχει την δυνατότητα να ελέγχει εξοπλισμό σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο IEC 60060-1, για τις διάφορες κυματομορφές που αυτό περιγράφει. Επιπλέον απαιτείται η διάταξη αυτή να είναι φέρει ασφάλεια προς τους χειριστές της, να είναι κινητή, αξιοποιεί στο μέγιστο τα χαρακτηριστικά των στοιχείων της και να δύναται να αναβαθμιστεί ανάλογα με τις μελλοντικές εν λόγω ανάγκες του εργαστηρίου.

### 3.2 Αρχή λειτουργίας

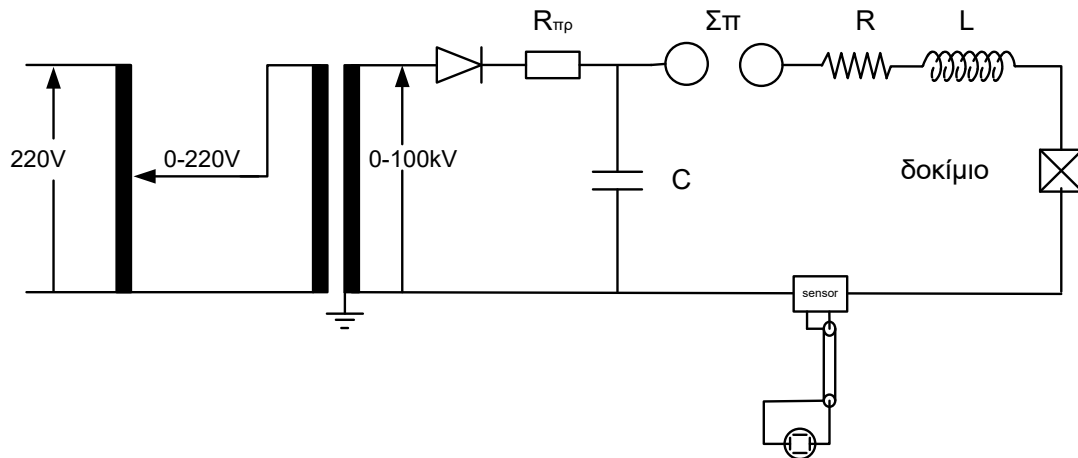
Φορτίζουμε πυκνωτή και μέσω μίας αντίστασης και αυτεπαγωγής τον εκ φορτίζουμε πάνω σε μία αντίσταση/δοκίμιο. Λόγω του ότι το κύκλωμα είναι  $R, L, C$  αναμένουμε το ρεύμα εκφόρτισης, το κρουστικό ρεύμα, να έχει διπλό-εκθετική μορφή. Στο παρακάτω σχήμα 3.2.1 φαίνεται το κύκλωμα της διάταξης .



Σχήμα 3.2.1

Βασικό κύκλωμα εκφόρτισης RLC

Το αναλυτικό κύκλωμα στο οποίο φαίνονται η διάταξη φόρτισης, εκφόρτισης, στοιχεία του κυκλώματος και μέτρησης, είναι το παρακάτω



Σχήμα 3.2.2

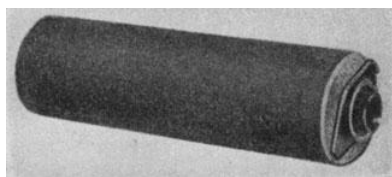
Αναλυτικό κύκλωμα παραγωγής εκθετικών κρουστικών ρευμάτων

### 3.3 Περιγραφή επιμέρους διατάξεων

#### 3.3.1 Ο πυκνωτής

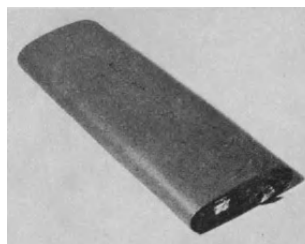
Πυκνωτές μεγάλης χωρητικότητας κατασκευάζονται συνήθως από περιελιγμένες συστοιχίες των οποίων το διηλεκτρικό αποτελείται κυρίως από χαρτί εμβαπτισμένο σε μονωτικό υλικό. Ως ηλεκτρόδια χρησιμοποιούνται συνήθως λεπτά μεταλλικά φύλλα αλουμινίου [5].

Ως μέσο εμποτισμού και πλήρωσης χρησιμοποιούνται κυρίως ορυκτά λάδια διαφόρων εταιρειών, τα οποία από τις κατόπιν ειδικής επεξεργασίας και προσμίξεων καθίστανται ανθεκτικά στην γήρανση, π.χ.  $C_{12}H_4Cl_6O$ .



*Σχήμα 3.3.1.1*

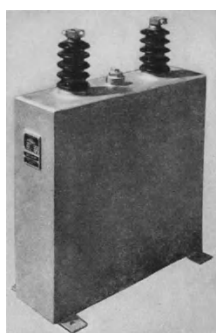
*Κυλινδρικό τύλιγμα πυκνωτή*



*Σχήμα 3.3.1.2*

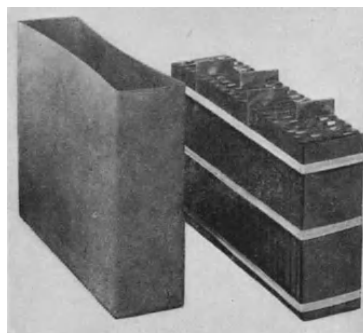
*Πεπλατισμένο τύλιγμα πυκνωτή*

Τα στοιχεία φόρτισης των τυλιγμάτων συνίστανται από περιελιγμένους πυκνωτές ελάσματος. Είναι σύνηθες τόσο στρογγυλά όσον και πεπλατυσμένα τυλίγματα. Στην πρώτη περίπτωση χαρτί και λεπτό μεταλλικό φύλλο τυλίγονται κυλινδρικά, ενώ τα στην περίπτωση των πεπλατυσμένων η διατομή τους είναι ορθογώνια με στρογγυλεμένες άκρες.



*Σχήμα 3.3.1.3a*

*Πυκνωτής ελαίου*



*Σχήμα 3.3.1.3b*

*Εσωτερικό πυκνωτή ελαίου*

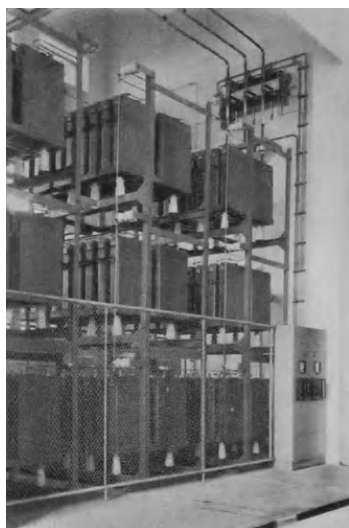
Οι δύο επιστρώσεις του πυκνωτή μπορούν να είναι τοποθετημένες αξονικά αντίθετα μεταξύ τους ή να αντικατοπτρίζονται. Η πρώτη περίπτωση επιλέγεται όταν η επαφή σύνδεσης βρίσκεται στις προτεταμένες στρώσεις όπως στο Σχήμα 3.3.1.1. Πιο σύνηθες είναι όταν η σύνδεση της έντασης γίνεται στους αξονικά τοποθετημένους μεταλλικούς ακροδέκτες.

Περιελιγμένα στοιχεία για μεγάλες κρουστικές εντάσεις, όπως π.χ. πυκνωτές κρουστικής, συμπεριλαμβάνουν διατάξεις εκκένωσης που περικλείουν υπό πίεση όλα τα φύλλα του πυκνωτή.

Ανάλογα το σύστημα, η χωρητική ισχύς των στοιχείων για 50Hz, είναι συνήθως μεταξύ 0,2...1,5 kVar και για τάσεις 220 V και άνω.

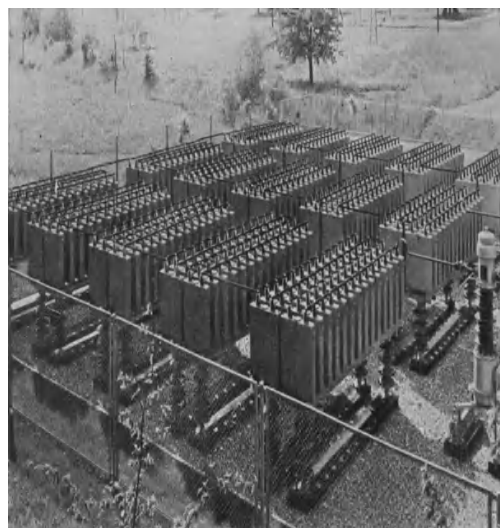
### Πυκνωτές αντιστάθμισης.

Οι πυκνωτές αντιστάθμισης είναι συστοιχίες πυκνωτών τοποθετημένοι είτε σε κριώματα είτε σε πλαίσια αναρτόμενα σε μονωτήρες. Τούτο καθορίζεται από τον τρόπο κατασκευής. Τα τυλίγματα των πυκνωτών τοποθετούνται πρώτα στο κέλυφος τους, εμποτίζονται πλήρως και σφραγίζονται ερμητικά. Για την αντιμετώπιση της διαστολής του μονωτικού υλικού, είναι τα κελύφη είναι διαμορφωμένα ώστε να εξασφαλίζουν ελαστικότητα ή τοποθετούνται ειδικές διατάξεις διαστολής. Οι επαφές τους είναι πλήρως στεγανοποιημένες και επικασσιτερωμένες. Η μέθοδος σφράγισής τους αποτρέπει την εισροή αέρα στο διηλεκτρικό υλικό [5].



Σχήμα 3.3.1.4

Συστοιχία Πυκνωτών 4.500 kVar



Σχήμα 3.3.1.5

Συστοιχία Πυκνωτών εξωτερικού χώρου 10.500 kVar

Η εσωτερική διάταξη του πυκνωτή καθορίζεται από το είδος του τυλίγματος. Στρογγυλά τυλίγματα τοποθετούνται με οριζόντια αξονικά το ένα πάνω στο άλλο και μονώνονται μεταξύ τους μετωπικά με τετραγωνικής διατομής μονωτικό φύλλο (π.χ. από πρεσπών) συμπληρώνουν την κατασκευή.

Εναλλακτικά, πεπλατυσμένα πακέτα τυλιγμάτων πρεσάρονται το ένα επάνω στο άλλο, όπως φαίνεται εικόνα Σχήμα 3.3.1.3. Η διάταξη αυτή εξοικονομεί μεν χώρο αλλά απαιτείται να προβλεφθεί ικανοποιητική ψύξη.

Ανάλογα της της συνολικής εφαρμοσμένης τάσης, μεμονωμένα τυλιγμένα στοιχεία, συνδέονται παράλληλα ή ομαδικά παράλληλα και εν σειρά συνήθως μέσω ενός μικρού αγωγίμου σύρματος ή φύλλου, ώστε σε περίπτωση διάτρησης ενός στοιχείου να μην διακοπή η λειτουργία του πυκνωτή.

Επιπλέον, ανάλογα της εφαρμοζόμενης τάσης και της συνολικής ισχύος, επιμέρους πυκνωτές συνδέονται παράλληλα ή εν σειρά, δημιουργώντας συστοιχιών πυκνωτών. Η εν σειρά συνδεσμολογία των συστοιχιών υψηλής τάσης απαιτεί μονωμένη τοποθέτηση των πυκνωτών, όπως αυτή παρουσιάζεται στις εικόνες Σχήμα 3.3.1.4 και Σχήμα 3.3.1.5.

Η κατασκευή συστοιχιών πυκνωτών παρουσιάζει πλεονεκτήματα έναντι των προγενεστέρων Μεγάλων Πυκνωτών. Η σύνδεση και αποσύνδεση άεργου ισχύος για την αντιστάθμιση του  $\cos\phi$ , γίνεται εύκολα. Παρέχουν ρύθμιση έναντι της αυξομείωσης του άεργου ρεύματος σε τμήματα του δικτύου διανομής απομονώνοντας τα σφάλματα.

### **Πυκνωτές σύζευξης**

Οι πυκνωτές αυτοί επιτρέπουν την σύζευξη τηλεφωνικών εγκαταστάσεων υψηλής συχνότητας με αγωγούς υψηλής τάσης. Η χωρητικότητα τους στα 150 kV/50Hz είναι της τάξεως των 1000-2000pF και η ένταση ανέρχεται από 50mA έως 100mA. Κατασκευάζονται ως πυκνωτές τύπου μονωτήρα. Επειδή σχεδόν χωρίς εξαίρεση χρησιμοποιούνται σε υπαίθριες εγκαταστάσεις τοποθετούνται εντός πορσελάνινου μανδύα, εικόνα Σχήμα 3.3.1.6. Το ελάχιστο μήκος του μονωτήρα καθορίζεται από το μήκος ερπυσμού. Ο πυκνωτής αυτός κάθε αυτός κατασκευάζεται από πολυάριθμα στοιχεία, συνδεδεμένα σε σειρά σχηματίζοντας μια στήλη.

### **Πυκνωτές για προστασία από υπέρταση**

Αυτοί είναι πυκνωτές σύζευξης με μεγάλη χωρητικότητα και κατασκευάζονται συνήθως σε στήλες με γειωμένο το ένα άκρο σαν συστοιχία ή ως πυκνωτές τύπου μονωτήρα.

### **Πυκνωτές εξομάλυνσης**

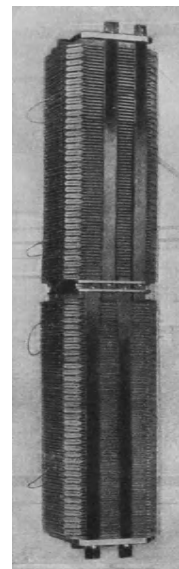
Είναι πυκνωτές συνεχούς τάσης οι οποίοι λόγω της έλλειψης αρμονικών δεν έχουν ιδιαίτερες διηλεκτρικές απώλειες. Πολλά στοιχεία συνδέονται εν σειρά ώστε να εξομαλύνουν την τάση. Η κατανομή της τάσης δεν γίνεται ανάλογα των διηλεκτρικών αντιστάσεων των πυκνωτών αλλά σύμφωνα με την αντίσταση της μόνωσης των επιμέρους

στοιχείων αυτών και για τον λόγο αυτό πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην ομοιότητά τους κατά την κατασκευή.



*Σχήμα 3.3.1.1*

*Πυκνωτής σύζευξης 150kV, 7000 pF*



*Σχήμα 3.3.1.2*

*Συστοιχία τυλιγμάτων  
Πυκνωτή Συνεχούς τάσης*

Εφόσον η συχνότητα συντονισμού παραμένει σταθερή, οι πυκνωτές αυτοί έχουν μικρή μεταβολή στην θερμοκρασία τους. Τοποθετούνται είτε σε μεταλλικά δοχεία είτε σε μονωτικό μανδύα (μονωτήρα). Για την επίτευξη μεγάλων χωρητικοτήτων και για λόγους ασφαλείας, συνδέονται συνήθως μεταξύ τους παράλληλα. Στο Σχήμα 3.3.1.7 φαίνονται τα πακέτα τυλιγμάτων ενός πυκνωτή για 1500 kV συνεχή τάση [5].

### **Κρουστικοί πυκνωτές για εγκαταστάσεις δοκιμών κρουστικής**

Κατασκευάζονται ως τύπου μονωτήρα και τοποθετούνται ο ένας επάνω στον άλλον δημιουργώντας έναν πύργο. Αυτού του τύπου πυκνωτές έχουν κατασκευαστεί για τάση κορυφής 1000 kV, παρέχοντας ενδιάμεσες λήψεις δια μέσου του κελύφους των. Η κύρια απαίτηση για τους κρουστικούς πυκνωτές είναι οι επαφές λήψης των στοιχείων να αντέχουν τις υψηλές κρουστικές εντάσεις.

## Υπολογισμός πυκνωτή

Ο υπολογισμός περιλαμβάνει την ηλεκτρική αντοχή, την σωστή χωρητικότητα και για πυκνωτές εναλλασσόμενης τάσης την θέρμανσή τους και θερμική τους σταθερότητα.

Αυτά που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι η εφαρμοσμένη τάση δοκιμής (τάση βραχείας διάρκειας, συνεχής τάση και εναλλασσόμενη τάση) καθώς επίσης και η τάση λειτουργίας (Τάση συνεχούς λειτουργίας) [5].

Σε δοκιμές συνεχούς τάσης η τάση δοκιμής δεν πρέπει να υπερβαίνει το 40...60 % της τάσης διάσπασης.

Σε δοκιμές εναλλασσόμενης τάσης και για πυκνωτές μόνωσης ελαίου, η τάση δοκιμής δεν πρέπει να υπερβαίνει την τάση δημιουργίας ατμού (εξίσωση 109/2) όπου για πυκνωτές χλωρίου διφενυλίου είναι η αντίστοιχες τάσεις ιονισμού κατά τις οποίες επέρχεται μια καταστροφή της διηλεκτρικής μόνωσης. Η εφαρμοσμένη τάση θα είναι το 20...30% των τιμών αυτών.

Η συνεχής καταπόνηση λειτουργίας επηρεάζεται εις το τετράγωνο της επιλεγμένης έντασης του επιβαλλόμενου ηλεκτρικού πεδίου. Η επιλεγμένη ένταση διαφοροποιείται ανά κατασκευαστή. Γενικά ισχύουν τα ακόλουθα:

A) Για πυκνωτές εναλλασσόμενης τάσης ανάλογα το επιλεγμένο διηλεκτρικό υλικό και την συνεχή τάση/ στρώση, η ενεργή τιμή έντασης πεδίου επιλέγεται από 9 έως 15 V/μm (=90 έως 165 kV/cm)

B) Για πυκνωτές συνεχούς τάσης, όπως κρουστικούς πυκνωτές και επιλεγμένη τάση/στρώση της τάξεως των μερικών kV, η μέγιστη πεδιακή ένταση επιλέγεται από 40 έως 60 V/μm (= 400 έως 600 kV/cm)

Το πλάτος των μονωτικών άκρων επιλέγεται ανάλογα με το ύψος της τάσης δοκιμής ανά περιτύλιγμα και είναι συνήθως 5. . . 15mm. Ο υπολογισμός της χωρητικότητας γίνεται σύμφωνα με την εξίσωση για πυκνωτές πλακών

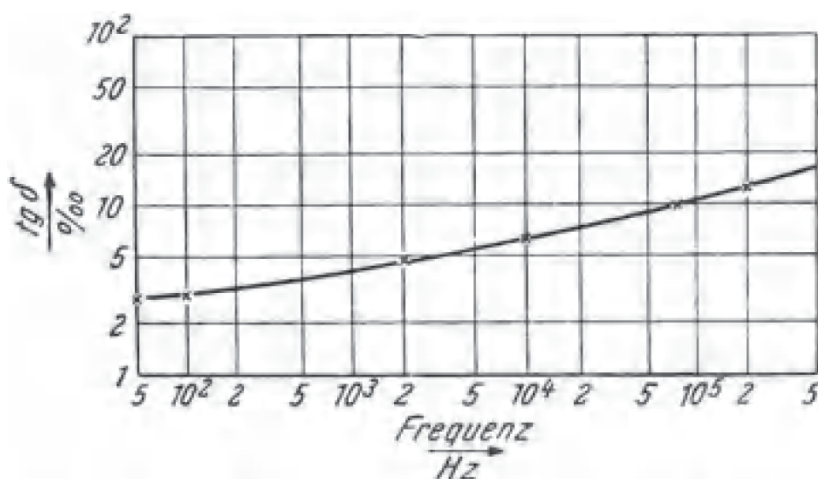
Η περιοχή θερμοκρασίας λειτουργίας του διηλεκτρικού συνήθως από -25 °C τον χειμώνα και εκτός λειτουργίας πυκνωτή, έως +65 ... 75°C το καλοκαίρι και πλήρως φορτισμένο πυκνωτή.



### Ηλεκτρική συμπεριφορά του χαρτιού εμποτισμένου με ορυκτέλαιο

Η διηλεκτρική σταθερά του εμποτισμένου με λάδι χαρτιού ανέρχεται στο 3,3 έως 4,4 στους 20 °C και αυξάνει κατά 4 έως 7% εάν ανυψωθεί η θερμοκρασία στους 100 °C, ανάλογα της στιλπνότητας του χαρτιού. Για σταθερή θερμοκρασία και συχνότητα λειτουργίας μεταξύ 0 και 107 Hz, παραμένει σταθερή.

Ο δε συντελεστής απωλειών  $tg\delta$ , αναλόγως τον βαθμό στιλπνότητας του χαρτιού, κυμαίνεται μεταξύ 2 έως 3 ‰ στους 20 °C. Η τιμή του συντελεστή απώλειών καθορίζεται για μια περιοχή θερμοκρασίας από -20 °C έως + 90 °C, σχεδόν αποκλειστικά από τις διηλεκτρικές απώλειες του χαρτιού [5].



Σχήμα 3.3.1.8 Εξάρτηση του συντελεστή απωλειών από την συχνότητα

Ο συντελεστής απώλειας  $tg\delta$ , μεταξύ 50 και  $10^5$  Hz αυξάνει από 2 ... 3‰ στο 10‰, αρχικά ομαλά και μετά απότομα. Εικόνα Σχήμα 3.3.1.8.

Η αντοχή σε διάτρηση υπό συνεχή τάση, είναι ανάλογη της μείωσης του πάχους του διηλεκτρικού μέσου, δηλαδή ισούται με την διαφορά του ολικού πάχους μείον του μέγιστου πάχους της στρώσης χαρτιού. Αναγόμενη στην μείωση του πάχους αυτή κυμαίνεται μεταξύ 200 έως 250 V/μm (2200-2500 kV/cm) για χαρτί σατινέ και είναι ανεξάρτητη από την διάρκεια της καταπόνησης. Η διάτρηση επέρχεται κατά κανόνα όχι στα άκρα των στρώσεων αλλά στα ασθενέστερα σημεία του χαρτιού. Δεν παρατηρείτε το φαινόμενο στις άκρες των τυλιγμάτων.

### Η διηλεκτρική αντοχή σε εναλλασσόμενη τάση.

Ήδη πριν από την εμφάνιση της τάσης διάσπασης παρουσιάζονται φαινόμενα που αλλοιώνουν τον πυκνωτή. Από μια συγκεκριμένη τάση, δημιουργούνται αέρια εξαιτίας διάσπασης των μορίων του λαδιού υπό την επίδραση ενός ισχυρού ηλεκτρικού πεδίου στα άκρα (όρια) των αγώγιμων στρώσεων. Αν δημιουργηθούν ατμοί κάποια στιγμή σε μια τάση, τότε την επόμενη φορά θα δημιουργηθούν σε χαμηλότερη, με αποτέλεσμα μετά την παρέλευση ενός χρονικού διαστήματος να υπάρξει διάτρηση. Είναι λοιπόν σημαντικό να μπορούμε να υπολογίζουμε με ασφάλεια την τάση δημιουργίας αερίων [5].

Ένας ιονισμός με ορατή εξέλιξη αερίων επιτυγχάνεται με εναλλασσόμενη τάση των 50 Hz σε μια πραγματική ένταση πεδίου παρουσίας αερίων.

$$E_{eff\_Gas} = \frac{K}{d^{0,5}} \quad Volt/\mu m \quad (3.3.1.1)$$

π.χ. για ενεργή τιμή τάση

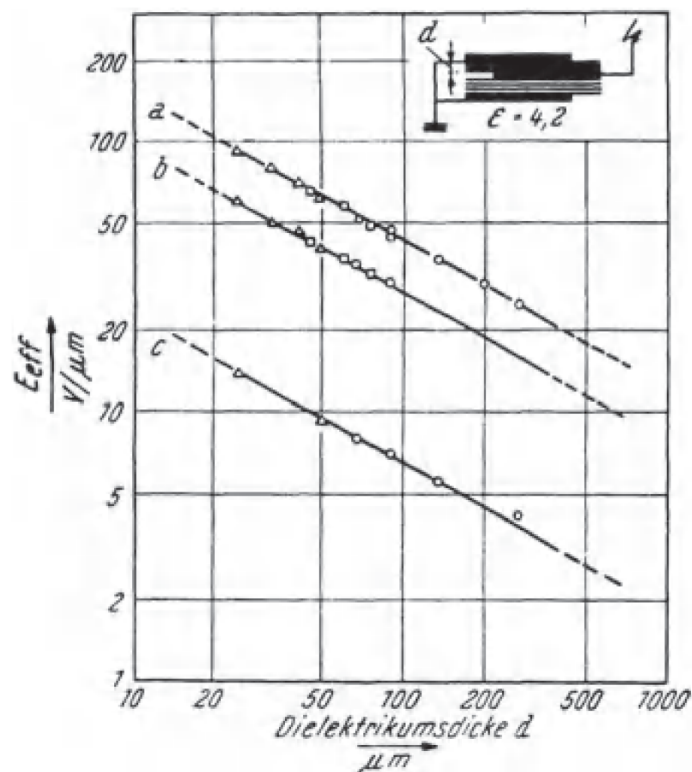
$$U_{eff\_Gas} = K \cdot d^{0,45} \quad Volt^3 \quad (3.3.1.2)$$

Όπου,

$d$ : το πάχος του διηλεκτρικού σε  $\mu m$ . (Ο αριθμός των στρώσεων χαρτιού δεν επηρεάζει το  $E_{eff\_Gas}$  ή το  $U_{eff\_Gas}$ ·

$K$ : 500...550 για λάδι απολυμασμένο από αέρα  
330...350 για λάδι με υπολείμματα αέρα

Οι μικρότερες τιμές του  $K$  ισχύουν για τα υψηλής διύλισης παραφινέλαια και είναι μεγαλύτερες για τα έλαια νάφθας (εικόνα Σχήμα 3.3.1.9)

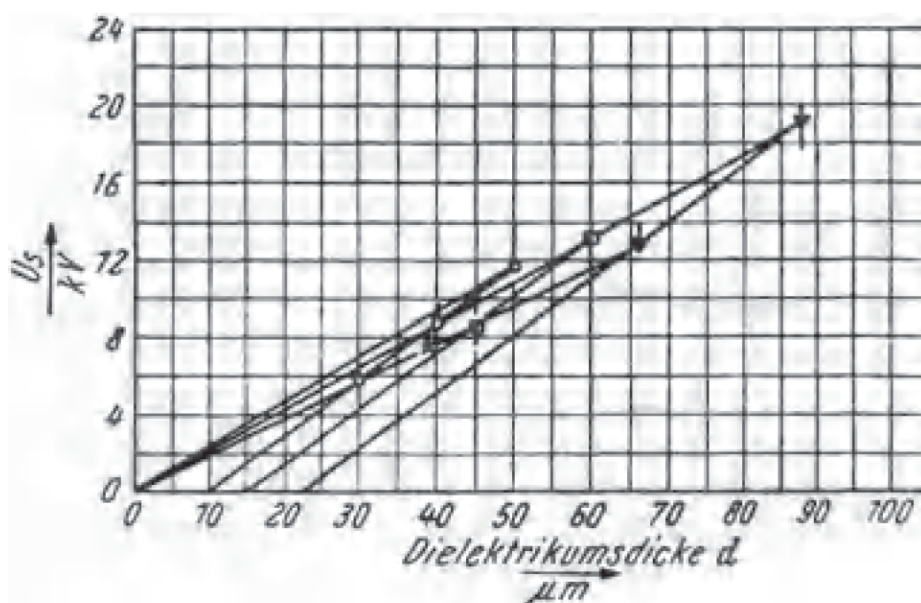


Σχήμα 3.3.1.9

Ένταση πεδίου ενεργού αερίου για τυλίγματα πυκνωτών βυθισμένων σε ορυκτέλαιο σε συνάρτηση από του πάχος του διηλεκτρικού. α) για ορυκτέλαιο απαλλαγμένο αερίων β) για ορυκτέλαια κορεσμένου αερίου γ) η χαμηλότερη ένταση πεδίου, κατά την οποία η εξέλιξη αερίων σε τυλίγματα βυθισμένα σε ορυκτέλαιο παραμένουν να υφίστανται.

$\Delta$  8,3  $\mu m$  πάχος,  $\square$  15  $\mu m$ ,  $O$  22,5  $\mu m$

Μετά την έναρξη της ανάπτυξης των αερίων, αυτή συνεχίζει να εμφανίζεται σε μειωμένες τάσεις μέχρι τη χαμηλότερη οριακή τιμή  $K=82$ . Το ίδιο ισχύει και για μη εμποτισμένα τυλίγματα.



Σχήμα 3.3.1.10

Κρουστική τάση διάσπασης σε τύλιγματα πυκνωτών εμποτισμένα σε παραφινέλαιο, εξαρτώμενη από το πάχος του διηλεκτρικού. Ο 10  $\mu\text{m}$ ; x 13  $\mu\text{m}$ , □ 10  $\mu\text{m}$ , Δ 22  $\mu\text{m}$  πάχος.

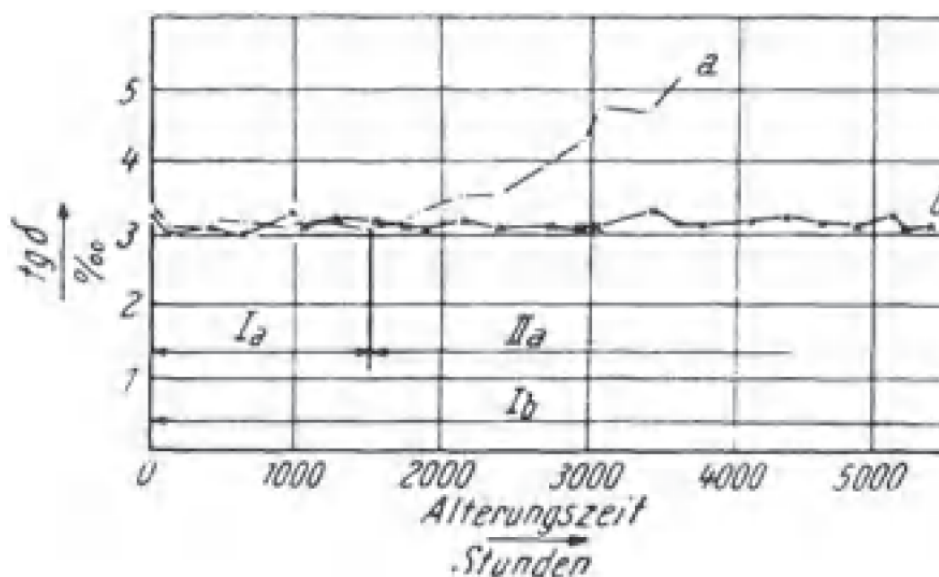
Για 1/500  $\mu\text{s}$  κρουστικό παλμό

$$U_{i\_Luft} = 82 \cdot d^{0,45} \text{ Volt } (d \text{ σε } \mu\text{m}) \quad (3.3.1.3)$$

Σε ένα σύνηθες τύλιγμα πυκνωτή όπου η διάταξη είναι σε στρώσεις, η πεδιακή ένταση εμφάνισης αερίων άρα και τάση έναρξης αερίων, εξαρτάται αποκλειστικά από το πάχος του διηλεκτρικού, καθώς είναι ανεξάρτητη από τον βαθμό εμποτισμού του διηλεκτρικού στον φορέα.

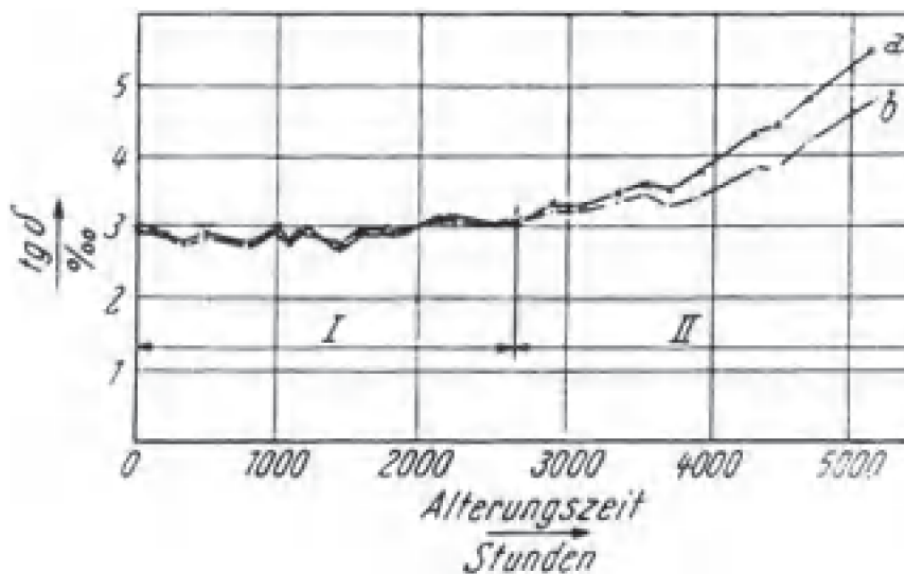
#### Διηλεκτρική αντοχή σε συνεχή τάση με υπέρθεση εναλλασσόμενης τάσης.

Ακόμα και αν η συνιστώσα της εναλλασσόμενης τάσης είναι μικρότερη από την τάση εμφάνισης αερίων, τότε σύμφωνα με την εξίσωση Σχήμα 3.3.1.2 πάλι προκαλείται διάσπαση στην αθροισμένη τάση κορυφής και στο ασθενέστερο σημείο του διηλεκτρικού. Στην περίπτωση που η αθροισμένη τάση είναι μικρότερη εκείνης της συνεχούς τάσης διάσπασης, πάλι θα εμφανιστούν αέρια στα άκρα των στρώσεων σύμφωνα με την εξίσωση Σχήμα 3.3.1.2, σαν να μην υπήρχε η συνιστώσα συνεχούς ρεύματος.



Σχήμα 3.3.1.11

Καμπύλες γήρανσης εμποτισμένων τυλιγμάτων χαρτιού  $75^{\circ}\text{C}$  (καμπύλη *a*) και (καμπύλη *b*) για  $55^{\circ}\text{C}$  σε συνήθους ποιότητας ορυκτελαίου. Τάση  $32 V_{\text{eff}}/\mu\text{m}$ . Πάχος διηλεκτρικού  $41,5 \mu\text{m}$ . Μπάνιο λαδιού στον αέρα, I: πρώτη περίοδος γήρανσης, II: δεύτερη περίοδος γήρανσης (Liechti)



Σχήμα 3.3.1.12

Καμπύλες γήρανσης εμποτισμένων τυλιγμάτων χαρτιού,  $55^{\circ}\text{C}$  υπό τάση  $40,2 V_{\text{eff}}/\mu\text{m}$  (καμπύλη *a*) και (καμπύλη *b*) για  $36,5 V_{\text{eff}}/\mu\text{m}$  σε μέτριας ποιότητας ορυκτελαίου. Τάση  $3 V_{\text{eff}}/\mu\text{m}$ . Πάχος διηλεκτρικού  $41,5 \mu\text{m}$ . Δοχείου λαδιού στον αέρα, I: πρώτη περίοδος γήρανσης, II: δεύτερη περίοδος γήρανσης (Liechti)

### Διηλεκτρική αντοχή της εναλλασσόμενης τάσης με υπέρθεση κρουστικής.

Εάν σε ένα διηλεκτρικό εμποτισμένο με καθαρό, άνευ αερίων λάδι, του οποίου η τάση έναρξης αερίων  $U_{eff\_Gas}$  δίνεται με την εξίσωση Σχήμα 3.3.1.2, φορτισμένο με μια εναλλασσόμενη τάση  $U$  (πραγματική τιμή), επιβληθεί κρουστικός παλμός (1/500  $\mu$ s), πλάτους θα προκληθεί εμφάνιση αερίων.

Αυτή η εξέλιξη αερίου συνεχίζεται όσον η τάση  $U_{eff\_Gas}$  είναι μεγαλύτερη από την τάση της εξίσωσης Σχήμα 3.3.1.3.

Εμφάνιση αερίων επίσης θα προκληθεί όταν το διηλεκτρικό δεχτεί μια κρουστική τάση πλάτους,

$$U_s = 2,7 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{eff\_Gas} \quad (3.3.1.4)$$

και αμέσως υποβληθεί σε εναλλασσόμενη τάση τιμής μεγαλύτερη εκείνης που περιγράφεται στη εξίσωση Σχήμα 3.3.1.3.

Η κρουστική τάση διάσπασης είναι αντιστρόφως ανάλογη του πάχους του διηλεκτρικού (Σχήμα 3.3.1.10), της οποίας η πολικότητα  $\tau$  δεν παίζει ρόλο.

### Γήρανση του χαρτιού του εμποτισμένου σε ορυκτέλαιο.

Η έκθεση του ορυκτελαίου στον αέρα προκαλεί γήρανση, αφενός λόγω της θερμοκρασίας, αφετέρου λόγω του ηλεκτρικού πεδίου [5].

Αυτή η διαδικασία γήρανσης χωρίζεται κατά την καμπύλη της  $tg\delta$  σε δύο περιόδους γήρανσης. Στην περίοδο επαγωγής, όπου η  $tg\delta$  παραμένει σταθερή και περίοδο γήρανσης, όπου η  $tg\delta$  αυξάνει, εικόνα Σχήμα 3.3.1.11.

Η περίοδος επιμηκώνεται με την μείωση της θερμοκρασίας. Υπάρχει διπλασιασμός της εάν μειωθεί η θερμοκρασία των 45-80 °C κατά 8 ... 10° C.

Στην δεύτερη περίοδο αυξάνει η  $tg\delta$  όσο αυξάνει η θερμοκρασία και η ένταση πεδίου του ηλεκτρικού πεδίου. Η επίδραση της έντασης πεδίου μπορεί από ένα συγκεκριμένο σημείο και μετά να γίνει πολύ σημαντική, εικόνα Σχήμα 3.3.1.12. Σε αυτήν δημιουργούνται αέρια και καταστρέφεται το υλικό.

Τα φαινόμενα αυτά των δύο περιόδων γήρανσης μπορούν να χαρακτηρισθούν ως εξής. Καταρχήν οι απώλειες προέρχονται μόνον από το χαρτί καθότι οι απώλειες από το λάδι είναι πολύ μικρές. Μετά την θέση σύνδεση του πυκνωτή, δημιουργούνται σιγά σιγά στο λάδι στοιχεία με πολωμένα μόρια. Στο τέλος της πρώτης περιόδου, γίνεται πλέον αισθητή η επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου των 50 Hz αφού έχουν δημιουργηθεί μεγάλες ποσότητες πολωμένων στοιχείων. Η αρχική θερμική ενεργοποίηση των χημικών διεργασιών συνοδεύεται πλέον από ισχυρή ηλεκτρική ενεργοποίηση.

Τα πρώτα προϊόντα οξείδωσης του λαδιού περιέχουν κυρίως οργανικά οξέα μικρού μοριακού βάρους και χαμηλού σημείου ζέσης (βρασμού), νερό και μικρές ποσότητες υπεροξειδίων, μικρές ποσότητες αλκοόλης, κετόνες και αλδεΐδες και αργότερα εμφανίζονται εστέρες και προϊόντα πολυμερισμού και συμπύκνωσης. Τα παραπροϊόντα διαφεύγουν ως φυσαλίδες αερίου και οδηγούν έτσι σε εκκενώσεις. Για να συμβεί αυτό πρέπει η γήρανση να είναι προχωρημένη.

Η απουσία του αέρα επιβραδύνει σημαντικά την γήρανση. Σε περίπτωση που η πλήρωση του πυκνωτή με λάδι γίνει σε υψηλό κενό, χωρίς να περιέχει αέρα και ξένα σωματίδια, η πρώτη περίοδος γηράνσεως καθώς και ο χρόνος ζωής του πυκνωτή μπορούν να επιμηκυνθούν απεριόριστα.

### **Πυκνωτές σκληρού χαρτιού**

Πυκνωτές σκληρού χαρτιού χρησιμοποιούνται όπου απαιτούνται μικροί πυκνωτές της τάξεως μερικών εκατοντάδων pF, όπως στην τεχνολογία μετρήσεων, τηλεφωνικές εγκαταστάσεις υψηλής συχνότητας ζεύξης, πυκνωτές κρουστικής, ελέγχου. Χωρητικοί μονωτήρες διέλευσης χρησιμοποιούνται πολλές φορές ως χωρητικοί καταμεριστές λόγω του ότι το ρεύμα που διαρρέει τον πυκνωτή είναι ανάλογο της τάσης της γραμμής που συνδέονται. Κατά τα λοιπά το χαρτί εμποτισμένο σε λάδι, έχει εκτοπίσει αρκετά το σκληρό χαρτί στους πυκνωτές ζεύξης.

### **Πυκνωτές ζεύξης από σκληρό χαρτί (πρεσπών)**

Κατασκευάζονται για μονάδες των περίπου 800 pF για αλληλένδετη ονομαστική τάση των 130 kV. Με την εξέλιξη αγωγίμων λεπτών φύλλων μπορεί να συνδέσει κανείς εν σειρά έναν μεγάλο αριθμό πυκνωτών του ίδιου άξονα.

## **Κεραμικοί πυκνωτές υψηλής τάσης**

Η εφαρμογή των κεραμικών πυκνωτών υψηλής τάσης περιορίζεται σε εκείνες τις περιοχές όπου χρειάζονται πυκνωτές μικρής χωρητικότητας: Μετρήσεις, σύζευξη τηλεφωνικών εγκαταστάσεων υψηλής συχνότητας με αγωγούς, πομπούς υψηλής συχνότητας συμπεριλαμβανομένων και των ιατρικών συσκευών. Η αντοχή σε διάσπαση των κεραμικών στοιχείων δεν πλησιάζει αυτήν των χαρτιών των εμποτισμένων σε ορυκτέλαιο, ενώ η κατασκευή λεπτών στρώσεων κεραμικών πυκνωτών δεν είναι -δυνατή. Πλεονεκτούν στο ότι έχουν υψηλές διηλεκτρικές σταθερές σε υψηλές θερμοκρασίες, μικρές απώλειες σε υψηλές συχνότητες, σταθερή χωρητικότητα, δεν επηρεάζονται από την υγρασία και ελευθερία στον σχεδιασμό.

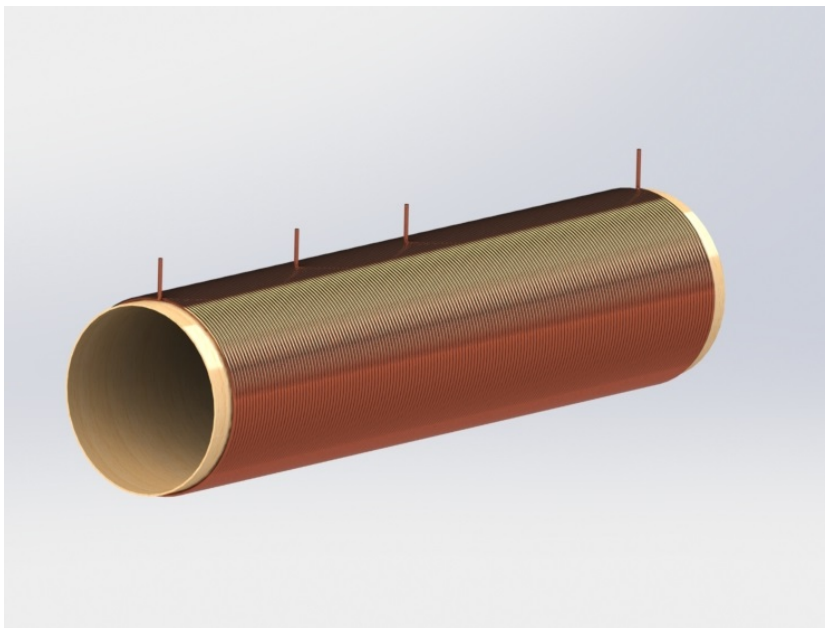
### **Οι πυκνωτές υψηλής συχνότητας,**

Περιέχουν κράματα τιτανίου (Capastea, Condensa C, Calit, Condensa N και παρόμοια υλικά) και έχουν υψηλή διηλεκτρική σταθερά, από 20 έως 100. Λόγω αυτού κατασκευάζονται υψηλές χωρητικότητες σε μικρές διαστάσεις. Λόγω του μεγάλου  $\epsilon$  που έχουν, εμφανίζονται διασπάσεις στο χείλος τους και για τον λόγο αυτό πρέπει να έχουν περιμετρικά ενισχυμένη μόνωση. Αυτού του τύπου χρησιμοποιούνται για τάσεις δοκιμών 10 kV, συχνότητας 50 Hz και χωρητικότητες έως 7000 pF. Σε μορφή δίσκου με για τάσεις έως 20 kV και χωρητικότητες έως 2700 pF, ενώ σε μορφή κώδωνος για 24kV και χωρητικότητες από 500 έως μερικές χιλιάδες pF. Για μικρότερες χωρητικότητες αλλά πολύ υψηλές συχνότητες κατασκευάζονται από άλλα υλικά, όπως Rastea, Calit [5].



### 3.3.2 Η αυτεπαγωγή

Η αυτεπαγωγή που χρησιμοποιείται στις διατάξεις κρουστικών ρευμάτων, λόγω της μικρής τους τιμής είναι πηνία άνευ πυρήνα. Σύρμα κατάλληλης διατομής περιελίσσεται γύρω από μονωτικό σωλήνα και κατόπιν εμποτίζεται με μονωτικό βερνίκι ή ρητίνη. Μπορεί να είναι τυλιγμένο σε μία ή περισσότερες στρώσεις και να φέρει ενδιάμεσες λήψεις.



Σχήμα 3.3.2.1

Σωληνωτό πηνίο αέρος με ενδιάμεσες λήψεις

Η αυτεπαγωγή τους υπολογίζεται ως εξής [6],

$$L = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot N^2 \cdot A}{l} \quad (3.3.2.1)$$

Όπου,

$l$  είναι το μήκος του πηνίου σε m,

$A$  το εμβαδό του σωλήνα σε  $m^2$

$N$  ο αριθμός των σπειρών

$L$  η αυτεπαγωγή σε Henry

Επιπλέον το εργαστήριο διαθέτει μεταβαλλόμενη αυτεπαγωγή αέρος, έως 100  $\mu H$ .

### 3.3.3 Η αντίσταση

Όμοια η αντίσταση όπως και η αυτεπαγωγή έχει χαμηλή τιμή. Κατασκευάζονται συνήθως από σύρμα χρωμονικελίνης κατάλληλης διατομής. Περιελίσσονται συνήθως πάνω σε μονωτικές βέργες, για να ελαττωθεί κατά το δυνατόν η αυτεπαγωγή τους.

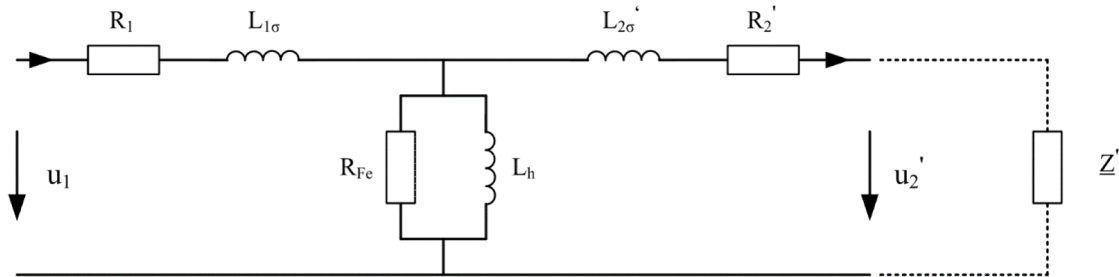
### 3.3.4 Το κύκλωμα τροφοδοσίας/ανόρθωσης

Το σύστημα τροφοδοσίας αποτελείται κυρίως από έναν μετασχηματιστή υψηλής τάσης ο οποίος τροφοδοτείται μέσω ενός μεταβλητού αυτομετασχηματιστή. Ο ρόλος του μετασχηματιστή υψηλής είναι μόνο για να φορτίσει την διάταξη των πυκνωτών. Για την προστασία του τοποθετούμε στην έξοδο του αντίσταση υψηλής τάσης, κατάλληλης τιμής, ώστε να περιορίσουμε το ρεύμα φόρτισης.

Η τάση στην έξοδο του μετασχηματιστή εν συνεχεία ανορθώνεται μέσω μιας διόδου υψηλής τάσης. Αυτή αποτελείται από διόδους χαμηλής τάσης συνδεδεμένες παράλληλα σε ομάδες και αυτές μεταξύ τους εν σειρά. Τοποθετούνται εντός στεγανού μονωτικού σωλήνα γεμισμένου με μονωτικό λάδι.

Η μεταφορά ενέργειας μέσω μετασχηματιστή εκμεταλλεύεται τη μαγνητική σύζευξη δύο πηνίων. Εάν, για παράδειγμα, εφαρμοστεί μια χρονικά μεταβαλλόμενη τάση στην περιέλιξη χαμηλής τάσης ενός μετασχηματιστή, αυτό οδηγεί σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη ροή ρεύματος και κατ' επέκταση σε μια χρονικά μεταβαλλόμενη μαγνητική ροή  $\varphi(t)$ . Αυτή η ροή διαπερνά επίσης την περιέλιξη υψηλής τάσης και σύμφωνα με τον νόμο της επαγωγής θα επαχθεί τάση και θα διαρρεύσει ρεύμα το τύλιγμα υψηλής τάσης. Λόγω των αυτεπαγωγών των πηνίων και άλλων γεωμετρικών παραμέτρων μέρος της μαγνητικής ροής που δημιουργείται από το τύλιγμα της χαμηλής θα επαχθεί στην υψηλή. Οι παράμετροι αυτοί περιγράφονται στο ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3.4.1. Σε αυτό το ως αναφορά λαμβάνουμε το τύλιγμα της χαμηλής. Οι επαγωγές σκέδασης που περιγράφονται παραπάνω χαρακτηρίζονται συνεπώς ως  $L_{\sigma 1}$  και  $L_{\sigma 2}$ , η κύρια επαγωγή ως  $L_h$  και οι αντιστάσεις των περιελίξεων ως  $R_1$  και  $R_2$ . Προκειμένου να ληφθούν υπόψη οι απώλειες σιδήρου (απώλειες δινορρευμάτων και υστέρησης) στο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλώματος, η αντίσταση  $L_{Fe}$

συνδέεται παράλληλα με τον κύριο επαγωγέα. Εισάγεται επίσης η σύνθετη αντίσταση του φορτίου  $Z'$ .



Σχήμα 3.3.4.1 – Ισοδύναμο κύκλωμα τροφοδοτικού μετασχηματιστή ανηγμένο στο τύλιγμα χαμηλής

Η αναγωγή των μεγεθών στην κάτω πλευρά της χαμηλής τάσης ( $U1$ ) είναι δυνατή μέσω των ακόλουθων μαθηματικών σχέσεων:

$$u_{us} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{N_1}{N_2} A = \pi r^2 \quad (3.3.4.1)$$

$$u_2' = u_2 \cdot u_{us} \quad (3.3.4.2)$$

$$i_2' = \frac{i_1}{u_{us}} A = \pi r^2 \quad (3.3.4.3)$$

$$R_2' = R_2 \cdot u_{us}^2 \quad (3.3.4.3)$$

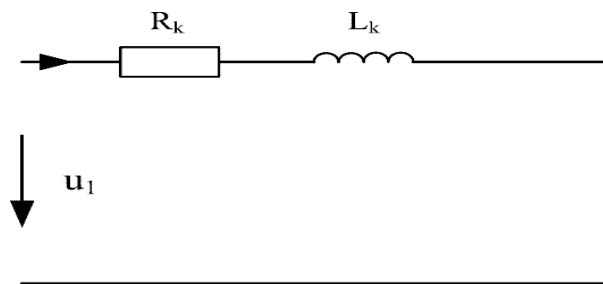
$$L_{\sigma 2}' = L_{s2} \cdot u_{us}^2 \quad (3.3.4.5)$$

$$\underline{Z}' = \underline{Z} \cdot u_{us}^2 \quad (3.3.4.6)$$

Τα μεγέθη που εμφανίζονται στο σχήμα του ισοδύναμου κυκλώματος μπορούν να προσδιοριστούν στις δοκιμές βραχυκύκλωσης και εν κενό.

Στην **δοκιμή βραχυκύκλωσης** βραχυκυκλώνεται η έξοδος, τύλιγμα υψηλής ενώ τροφοδοτείται η είσοδος, τύλιγμα χαμηλής. Αυξάνεται η τάση εισόδου έως να διαρρεύσει το ονομαστικό ρεύμα το τύλιγμα της υψηλής. Η τάση που απαιτείται ορίζεται ως  $U_k$ , Σχήμα 3.3.4.2. Για τα στοιχεία του κυκλώματος ισχύει,

$$R_k = R_1 + R_2' \text{ και } L_k = L_{\sigma 1} + L_{\sigma 2} \quad (3.3.4.7)$$



Σχήμα 3.3.4.2 – Δοκιμή βραχυκυκλώσεως

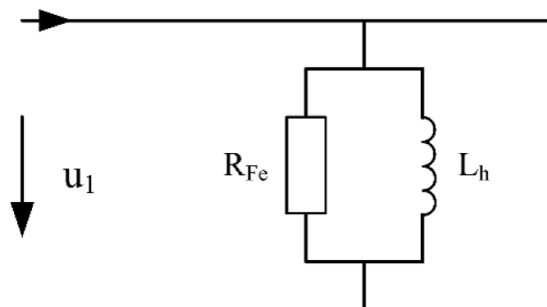
Εάν ο μετασχηματιστής λειτουργεί στην περιοχή του κορεσμού σιδήρου τότε θα πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο εγκάρσιος κλάδος.

Υπό την υπόθεση  $R_k \ll L_k$  προκύπτει ότι η σχετική τάση βραχυκύκλωσης ισούται με

$$u_k = \frac{U_k}{U_N} = \frac{I_N \cdot \omega \cdot L_k}{U_N} \quad (3.3.4.8)$$

Στην δοκιμή **εν κενό** διαρρέεται η είσοδος, τύλιγμα χαμηλής, με την ονομαστική τάση έχοντας ανοικτοκυκλωμένο το τύλιγμα υψηλής και μετρείται το ρεύμα μαγνήτισης  $I_0$ . Το σχετικό ρεύμα μαγνήτισης ισούται με,

$$i_0 = \frac{I_0}{I_N} = \frac{U_N}{I_N \cdot \omega \cdot L_h} \quad (3.3.4.9)$$



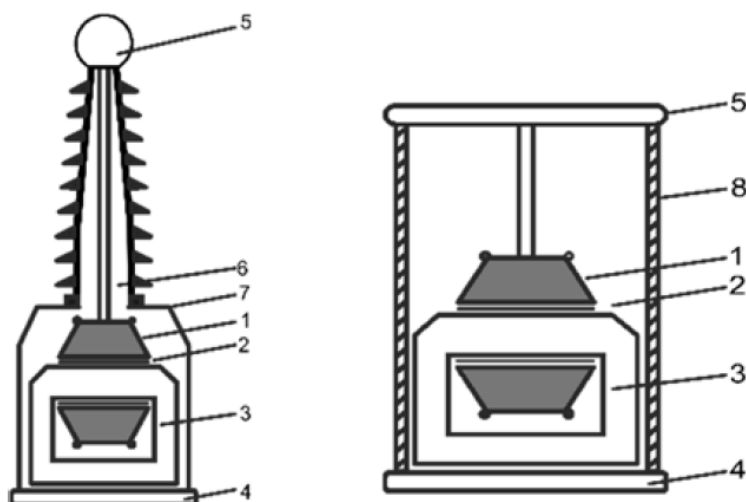
Σχήμα 3.3.4.3 – Δοκιμή εν κενό

Για να δημιουργηθεί η τάση δοκιμής στα εργαστήρια υψηλής τάσης χρησιμοποιούνται οι μετασχηματιστές δοκιμών, οι οποίοι σε αντίθεση με τους μετασχηματιστές που τοποθετούνται στα δίκτυα είναι μονοφασικοί, χαμηλής ισχύος, με υψηλές ονομαστικές τάσεις και μεγάλους λόγους μετασχηματισμού. Η τάση εξόδου τους θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν καθαρό ημίτονο. Ο λόγος της τάσης κορυφής προς  $\sqrt{2}$ , προς την μέση τετραγωνική τιμή (RMS) θα πρέπει να είναι μικρότερος από 5%,  $\left\| \frac{\hat{u}}{u_{RMS} \cdot \sqrt{2}} \right\| < 5\%$ . Για το λόγο αυτό, οι μετασχηματιστές δοκιμών δεν λειτουργούν στην περιοχή του κορεσμού, αλλά στην γραμμική περιοχή της καμπύλης μαγνήτισης του πυρήνα. Σε αυτή την περίπτωση λειτουργίας, το ρεύμα μαγνήτισης μπορεί να παραβλεφθεί στο ισοδύναμο κύκλωμα.

Το διηλεκτρικό μονωτικό μέσο των μετασχηματιστών δοκιμών είναι συνήθως ορυκτό έλαιο. Τα ενεργά μέρη, τυλίγματα /πυρήνας εγκλωβίζονται μέσα είτε σε μεταλλικό δοχείο είτε σε μονωτικό κύλινδρο.

Στην πρώτη περίπτωση το δοχείο γειώνεται και το άκρο υψηλής ενώνεται με το ηλεκτρόδιο υψηλής διαπερνώντας μέσω ενός μονωτήρα.

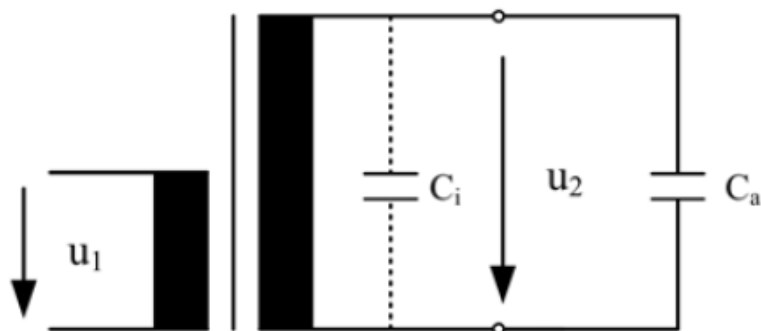
Στην δεύτερη περίπτωση τα ενεργά μέρη εγκλωβίζονται μέσα σε έναν μονωτικό σωλήνα. Το μεταλλικό κάτω καπάκι του σωλήνα γειώνεται ενώ το πάνω, ηλεκτρόδιο υψηλής, ενώνεται απευθείας με το τύλιγμα της υψηλής.



Σχήμα 3.3.4.4

1. Τύλιγμα υψηλής 2. Τύλιγμα χαμηλής 3. Πυρήνας 4. Βάση 5. Ηλεκτρόδιο υψηλής 6. Μονωτήρας 7. Μεταλλικό δοχείο 8. Μονωτικός κύλινδρος

Η συμπεριφορά των μετασχηματιστών δοκιμών είναι δύσκολο να περιγραφεί από το ισοδύναμο κύκλωμα καθώς υπεισέρχεται η χωρητικότητα των περιελίξεων υψηλής τάσης  $C_i$  και το συνδεδεμένο φορτίο/μετρητικός καταμεριστής  $Z_p'$ , το οποίο ως επί το πλείστον είναι χωρητικό,  $\mu$  χωρητικότητα  $C_a$ .



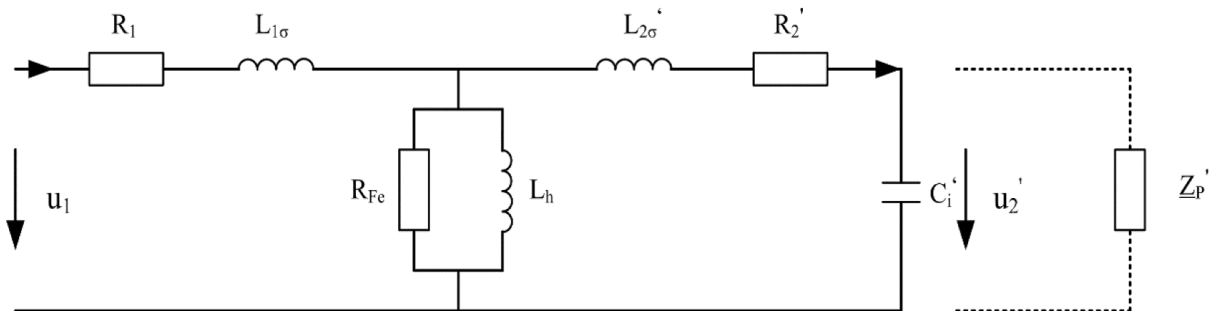
Σχήμα 3.3.4.5

Χωρητικό ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή υψηλής τάσης

Οι χωρητικότητες των σύνηθες δοκιμίων-φορτίων συνδεδεμένων στην έξοδο των μετασχηματιστών παραγωγής υψηλής τάσης είναι,

- Μονωτήρες ανάρτησης, διέλευσης κλπ. με χωρητικότητα μεταξύ 20...60 pF
- Μετασχηματιστές μέτρησης 100....250 pF
- Μετασχηματιστές ισχύος (μεταξύ των τυλιγμάτων τους υψηλής τάσης και γειωμένα μέρη) 500....20.000 pF
- Καλώδια προς δοκιμή 200....300 pF/m

Για τον λόγο αυτόν το ισοδύναμο κύκλωμα του Σχήματος 3.3.4.1 συμπληρώνεται ως,



Σχήμα 3.3.4.6 – Ισοδύναμο κύκλωμα συμπεριλαμβανομένου των χωρητικοτήτων του τυλίγματος υψηλής και του δοκιμίου

Γενικά δεν ενδιαφέρει ως προς ποιο τύλιγμα χαμηλής/υψηλής θα γίνει η αναγωγή στο ισοδύναμο κύκλωμα. Προς διευκόλυνση στην συγκεκριμένη περίπτωση η τα μεγέθη θα αναχθούν στο τύλιγμα της υψηλής.

$$\ddot{u}'_{os} = \frac{U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (3.3.4.10)$$

$$u'_1 = u_1 \cdot \ddot{u}'_{os}, \quad (3.3.4.11)$$

$$i'_1 = \frac{i_2}{\ddot{u}'_{os}}, \quad (3.3.4.12)$$

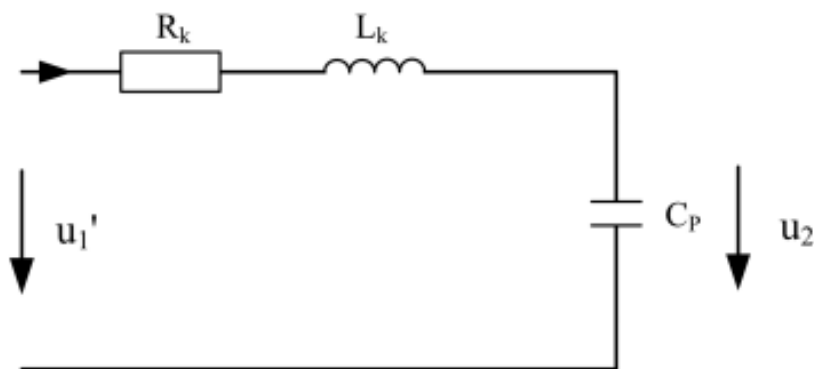
$$R'_1 = R \cdot \ddot{u}'_{os}{}^2, \quad (3.3.4.13)$$

$$L'_{\sigma 1} = L_{\sigma 1} \cdot \ddot{u}_{os}^2 \quad (3.3.4.14)$$

Το απλοποιημένο διάγραμμα φαίνεται στο σχήμα 7. Εδώ, λαμβάνονται υπόψη μόνο η σύνθετη αντίσταση βραχυκυκλώματος  $R_k + i\omega L_k$  και ολόκληρη η χωρητικότητα  $C_p = C_i + C_a$  στην πλευρά της υψηλής τάσης. Με  $u_1'$  συμβολίζεται στην πλευρά της υψηλής τάσης που σχετίζεται με την πλευρά της χαμηλής τάσης ( $u_1' = u_1 \cdot \ddot{u}_{os}$ ), το ίδιο ισχύει για τις ενεργές τιμές. Το ίδιο ισοδύναμο διάγραμμα κυκλώματος για λόγους απλότητας ισχύει επίσης για μετασχηματιστές δοκιμής σε σύνδεση βαθμίδων, cascade.

Καθώς  $R_k \ll \omega L_k$ , γενικά ισχύει:

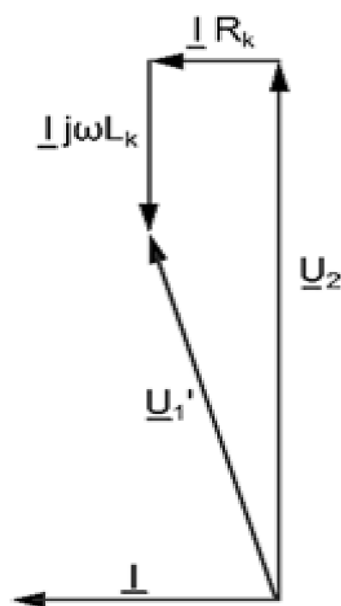
$$U_2 \approx U_1' \cdot \frac{1}{1 - \omega^2 L_k C}, \text{ (καταμεριστής τάσεως)} \quad (3.3.4.15)$$



Σχήμα 3.3.4.7 – Απλοποιημένο ισοδύναμο κύκλωμα μετασχηματιστή δοκιμής, ανηγμένο στην πλευρά της υψηλής

Καθώς  $\frac{1}{1 - \omega^2 L_k C} > 1$ , υπάρχει μια χωρητική αύξηση της τάσης στην πλευρά της υψηλής



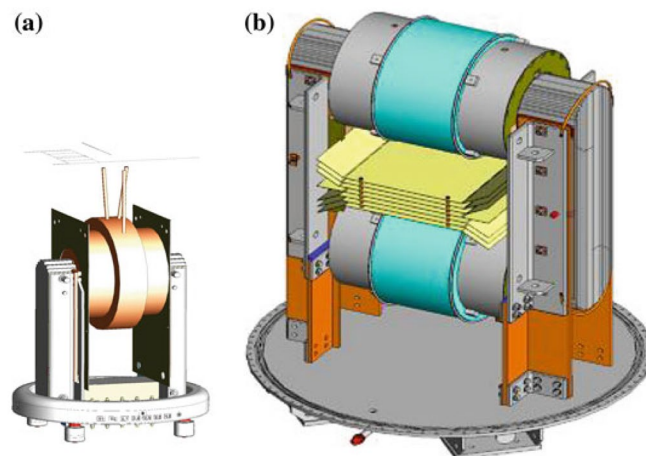


Σχήμα 3.3.4.8 – Διανυσματικό διάγραμμα ενεργών τιμών

Αυτή η χωρητική αύξηση της τάσης παρατηρείται ειδικά στους μετασχηματιστές που έχουν μεγάλη τάση βραχυκυκλώσεως ή μεγάλης ικανότητας ισχύος δοκιμής. Σε αυτή την περίπτωση δεν είναι σταθερός ο λόγος μετασχηματισμού μεταξύ χαμηλής και υψηλής και για τον λόγο αυτό δεν είναι δυνατή η μέτρηση της υψηλής τάσης από την χαμηλή του μετασχηματιστή. Θα οδηγούσε σε λανθασμένες μετρούμενες τιμές και κατ' επέκταση θα έθετε σε κίνδυνο τόσο το δοκίμιο όσο και τον ίδιο τον μετασχηματιστή δοκιμής.

Στην πράξη το ακριβές ισοδύναμο κύκλωμα λαμβάνεται από τις δοκιμές εν κενό και βραχυκυκλώσεως. Η χωρητικότητα του τυλίγματος υπολογίζεται από μέτρηση της ιδιοσυχνότητας του κυκλώματος. Η ωμική αντίσταση των τυλιγμάτων μετρείται ή με συνεχές ρεύμα ή προκύπτουν από τις μετρήσεις απωλειών κατά την δοκιμή βραχυκύκλωσης.

Κατά την **Δοκιμή βραχυκύκλωσης**, βραχυκυκλώνεται το τύλιγμα υψηλής, ως εκ τούτου βραχυκυκλώνεται και η χωρητικότητα του τυλίγματος. Αυξάνεται η τάση έως να διαρρέυσει ρεύμα ίσο με το ονομαστικό από το τύλιγμα της υψηλής. Η τάση αυτή καλείται τάση βραχυκύκλωσης  $U_k$ . Για τον καθορισμό των ωμικών αντιστάσεων των τυλιγμάτων προτιμάται η μέτρηση με όργανο συνεχούς ρεύματος του κάθε τυλίγματος ξεχωριστά. Στην περίπτωση που χρησιμοποιηθούν οι μετρήσεις απωλειών της μεθόδου βραχυκύκλωσης τότε οι προκύπτουσα ωμική αντίσταση διαιρείται δια δύο,  $\frac{1}{2}$  για κάθε τύλιγμα. Όταν μετρούνται οι αυτεπαγωγές/σκεδάσεις των τυλιγμάτων, μόνο η δεύτερη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός και αν χρησιμοποιηθούν υπολογιστικές μέθοδοι [16].



Σχήμα 3.3.4.9 Βασικός σχεδιασμός μετασχηματιστών δοκιμής κυλινδρικού τύπου *a.* ένα ενιαίο τύλιγμα και πυρήνας στο δυναμικό εδάφους. *b.* Διαιρεμένες περιελίξεις και πυρήνας με μισό δυναμικό

#### Μετρούμενες μεταβλητές:

- Συχνότητα:  $f$
- Τάση βραχυκύκλωσης:  $u_{k,us}$
- Ονομαστικό ρεύμα:  $I_{N,us}$
- Απώλειες  $P_k$  ή αντιστάσεις  $R_k$
- 

#### Εξισώσεις υπολογισμού:

- Υπολογισμός της συνολικής εμπέδησης βραχυκύκλωσης:

$$\left| Z_k \right| = \frac{U_{k,us}}{I_{N,us}} \quad (3.3.4.15)$$

- Υπολογισμός της συνολικής αντίστασης με χρήση των απωλειών:

$$R_k = \frac{P_k}{I_{N,us}^2} \quad (3.3.4.16)$$

- Υπολογισμός της συνολικής αυτεπαγωγής:

$$X_k = \sqrt{\left| Z_k \right|^2 - R_k^2} \Rightarrow L_k = \frac{X_k}{2\pi f} \quad (3.3.4.17)$$

- Υπολογισμός των επιμέρους αντιστάσεων και σκεδάσεων:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}, L_{1\sigma} = L_{1\sigma}' = \frac{L_k}{2} \quad (3.3.4.18)$$

Κατά την **δοκιμή εν κενό**, με ανοικτοκυκλωμένο το τύλιγμα της υψηλής τροφοδοτείται το τύλιγμα της χαμηλής στην ονομαστική του τάση, ενώ διαρρέεται από το ρεύμα μαγνήτισης  $I_0$ . Η χωρητικότητα του τυλίγματος υψηλής πρέπει να προσδιοριστεί βάση της συχνότητας συντονισμού του κυκλώματος. Η μέτρηση επιτρέπει να υπολογιστεί επίσης η αντίσταση του πυρήνα.

### Μετρούμενες μεταβλητές:

- Συχνότητα:  $f$
- Χωρητικότητα τυλίγματος:  $C_i$  (χωριστή μέτρηση)
- Ονομαστική τάση (στην πλευρά της χαμηλής):  $U_{N,us}$
- Τάση εν κενό (στην πλευρά της υψηλής):  $U_{L,os}$
- Ρεύμα εν κενό (στην πλευρά της χαμηλής):  $I_{0,us}$
- Απώλειες εν κενό:  $P_L$

### Εξισώσεις υπολογισμού:

- Λαμβάνονται όλα τα μεγέθη ανηγμένα στην χαμηλή ( $C_i, U_{L,os}$ )
- Υπολογισμός της  $R_{Fe}$  με την βοήθεια των εν κενό απωλειών:

$$R_{FE} = \frac{U_{N,us}^2}{P_L} \quad (3.3.4.19)$$

- Υπολογισμός της πραγματικής τιμής του ρεύματος μαγνήτισης

$$I_{RFE} = \frac{U_{N,us}}{R_{Fe}} \quad (3.3.4.20)$$

- Υπολογισμός της φανταστικής τιμής του ρεύματος μαγνήτισης: στους τροφοδοτικούς μετασχηματιστές δοκιμής είναι χωρητικό λόγο της χωρητικότητας του τυλίγματος της υψηλής ενώ στους μετασχηματιστές ισχύος είναι επαγωγικό.

$$I_B = \sqrt{I_{0,us}^2 - I_{RFe}^2} \quad (3.3.4.21)$$

- Υπολογισμός του χωρητικού ρεύματος:

$$I_{C_i}' = U_{N,us} \cdot 2\pi f \cdot C_i' \quad (3.3.4.22)$$

- Υπολογισμός του ρεύματος μαγνήτισης:

$$I_\mu = I_{C_i}' - I_B \quad (3.3.4.23)$$

- Υπολογισμός της επαγωγής:

-

$$X_h = \frac{U_{N,us}}{I_\mu} \Rightarrow L_h = \frac{X_h}{2\pi f} \quad (3.3.4.24)$$

Οι μετασχηματιστές δοκιμών λόγω των παραπάνω, συνήθως δουλεύουν με **χωρητικό φορτίο**. Για την αποφυγή της υπερφόρτισής τους πρέπει πριν την δοκιμή να υπολογιστεί η συμπεριφορά του. Υπολογίζουμε την αναμενόμενη ισχύ και ρεύμα.

- Εκτίμηση της φαινόμενης απαίτησης ισχύος της δοκιμής:

$$S = U^2 \cdot \omega \cdot C \quad (3.3.4.25)$$

- Εκτίμηση της απαίτησης ρεύματος της δοκιμής:

$$I = U \cdot \omega \cdot C \quad (3.3.4.26)$$

- Ικανότητα του ρεύματος συνεχής λειτουργίας του μετασχηματιστή:

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} \quad (3.3.4.27)$$

### Παράδειγμα:

Χαρακτηριστικά του μετασχηματιστή δοκιμής:

$S_N=100$  kVA (περιορισμένου χρόνου λειτουργίας)  $50$  kVA (Συνεχής λειτουργίας)

$U=0,4/200$  kV

$U_k=11$  %

Το δοκίμιο θα δοκιμαστεί στα  $30$  kV και έχει χωρητικότητα  $30$  nF (π.χ. καλώδιο υψηλής).

Εκτίμηση της φαινόμενης απαίτησης ισχύος της δοκιμής  $S = U^2 \cdot \omega \cdot C = 8,5$  kVA

Εκτίμηση της απαίτησης ρεύματος της δοκιμής:  $I = U \cdot \omega \cdot C=283$  mA

Ικανότητα του ρεύματος συνεχής λειτουργίας:  $I_N = \frac{S_N}{U_N} = \frac{50}{200} = 250$  mA

### Κύκλωμα ανόρθωσης

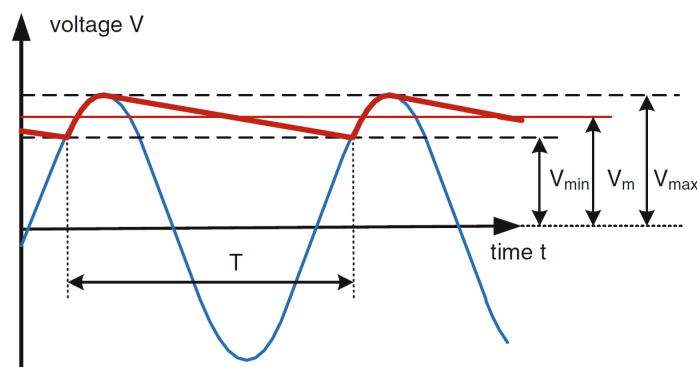
Η απαιτούμενη τάση εξόδου του μετασχηματιστή τροφοδοσίας εξαρτάται από το κύκλωμα ανόρθωσης της διάταξης. Στην συγκεκριμένη διάταξη αρκεί η χρήση μίας διόδου σε συνδεσμολογία απλής ανόρθωσης ημίσεως κύματος. Η απαιτούμενη τάση εξόδου του

μετασχηματιστή στην περίπτωση αυτή είναι ίση με την επιθυμητή συνεχή τάση φόρτισης δια  $\sqrt{2}$ .

Η τιμή της συνεχούς τάσης δοκιμής HVDC δεν είναι όπως και για τις άλλες τάσεις δοκιμών η μέγιστη τιμή ( $V_{max}$ ), αλλά η αριθμητική μέση τιμή κατά τη διάρκεια μιας περιόδου  $T$  της φόρτισης

$$V_m = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} v(t) dt \quad (3.3.4.28)$$

Η ανοχή της τιμής τάσης δοκιμής είναι 1 % για διάρκεια δοκιμής έως 1 λεπτό, ενώ για μεγαλύτερες διάρκειες είναι 3%. Ο ορισμός της μέσης τιμής προκύπτει κυρίως από τη μέτρηση της τάσης με συμβατικά βολτόμετρα (μετρητές κινούμενου πηνίου) που μετρούν τη μέση τιμή, ενώ η τάση κορυφής χρησιμοποιείται στα φαινόμενα διάσπασης και έχει εφαρμογή στις εργαστηριακές δοκιμές.



Σχήμα 3.3.4.10 – Διανυσματικό διάγραμμα ενεργών τιμών

Με την τάση κυματισμού  $\delta V$  προκύπτει ο αδιάστατος συντελεστής κυματισμού  $\delta$  ως,

$$\delta = \frac{V_{max} - V_{min}}{2V_m} \cdot 100 \leq 3\% \quad (3.3.4.29)$$

Η απαίτηση  $\delta < 3\%$  επιτρέπει μια σημαντική διαφορά μεταξύ της τάσης κορυφής (η οποία καθορίζει τα φαινόμενα εκφόρτισης στη μόνωση) και της τιμής τάσης δοκιμής. Ένας υψηλός κυματισμός μειώνει επίσης την τάση έναρξης των μερικών εκκενώσεων. Επομένως,

είναι χρήσιμο να υπάρχει ένας ο συντελεστής κυματισμού  $\delta$  να είναι όσο το δυνατόν χαμηλότερος.

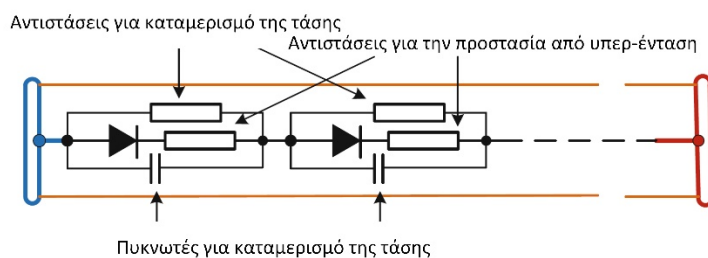
Έντονες προ-εκφορτίσεις, ειδικά κατά τη διάρκεια των δοκιμών εν-υγρό και ρύπανσης, προκαλούν σημαντικούς παλμούς ρεύματος, οι οποίοι μπορούν να μειώσουν την τιμή της τάσης δοκιμής  $V_m$  χαμηλότερα από την τιμή  $V_{m\_min}$ . Το σύστημα δοκιμής HVDC θα πρέπει να είναι σε θέση να τροφοδοτεί αυτούς τους παλμούς εκφόρτισης για μερικά δευτερόλεπτα χωρίς σημαντικές βυθίσεις τάσης,  $d_v$ ,

$$d_v = \frac{V_m - V_{m\_min}}{V_m} \leq 10\% \quad (3.3.4.30)$$

Δυστυχώς, το IEC 60060-1: 2010 δεν καθορίζει την τιμή και τη διάρκειά π.χ. ενός ενδεχόμενου ορθογώνιου παλμού ρεύματος. Η τιμή αναφοράς των παραμέτρων  $\delta$  και  $d_v$  είναι πάντοτε η μετρούμενη τιμή τάσης δοκιμής  $V_m$ . Επομένως, η μείωση τάσης  $\Delta V$  δεν αποτελεί παράμετρο της τάσης δοκιμής, αλλά του συστήματος δοκιμής HVDC. Χαρακτηρίζει τον συντελεστή χρήσης του χρησιμοποιούμενου συστήματος δοκιμών και πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όταν απαιτείται νέο σύστημα δοκιμών.

Επιπλέον, μια γεννήτρια HVDC πρέπει να αντέχει σε μεταβατικές καταπονήσεις, π.χ. σε περιπτώσεις αστοχίας του αντικειμένου δοκιμής ή γρήγορης αντιστροφής πολικότητας. Εάν δεν ληφθούν μέτρα, οι επαγωγές και χωρητικότητες σκέδασης θα επηρεάσουν την κατανομή των τάσεων μέσα στη γεννήτρια [2].

Η ταχεία διάσπαση του αντικειμένου δοκιμής μπορεί να προκαλέσει ταλαντώσεις στο κύκλωμα δοκιμής υψηλής τάσης που αποτελείται από τις χωρητικότητες της γεννήτριας ή/και τις αναπόφευκτες χωρητικότητες και επαγωγές σκέδασης. Οι δίοδοι και ο μετασχηματιστής τροφοδοσίας δεν είναι ιδανικά στοιχεία αλλά σύνθετες αντιστάσεις. Ο μόνος τρόπος για να αποφευχθεί η καταστροφή των επιμέρους εξαρτημάτων είναι να ληφθούν μέτρα προστασίας της γεννήτριας. Αρχικά τοποθετείται με μια εξωτερική αντίσταση απόσβεσης μεταξύ της γεννήτριας και του διαιρέτη τάσης ή του αντικειμένου δοκιμής. Όλες τις χωρητικότητες θα πρέπει να έχουν εσωτερική αντίσταση απόσβεσης. Οι ανορθωτές πρέπει να φέρουν πυκνωτές για την γραμμική κατανομή της τάσης σε μεταβατικές τάσεις και εσωτερικές αντιστάσεις απόσβεσης, τόσο για την προστασία από υπερένταση όσο και για περιορισμό της τάσης.



Σχήμα 3.3.4.11 – Διάγραμμα διόδου ανόρθωσης υψηλής τάσης

Το σύστημα προστασίας επιπλέον περιλαμβάνει σπινθηριστές προστασίας ή αλεξικέραυνα προστασίας υπερτάσεων σε κομβικά σημεία της γεννήτριας, όπως ανορθωτές ή την έξοδο του μετασχηματιστή τροφοδοσίας HVAC. Το σύστημα προστασίας λειτουργεί μόνο στην περίπτωση αστοχίας του δοκιμίου το οποίο είναι συνδεδεμένο μέσω της εξωτερικής αντίστασης απόσβεσης. Διάσπαση μεταξύ οποιουδήποτε σημείου της γεννήτριας και οποιουδήποτε γειωμένου ή υπό τάση αντικειμένου, λόγω π.χ. λανθασμένης συνδεσμολογία της διάταξης στην αίθουσα δοκιμών υψηλής τάσης, μεταβάλλει την συμπεριφορά των στοιχείων προστασίας κατά τέτοιο τρόπο ώστε να κινδυνεύουν οι ανορθωτές ή/και οι πυκνωτές της γεννήτριας.

### 3.3.5 Το μετρητικό σύστημα

Κατά τη διεξαγωγή δοκιμών τάσεων, τα ρεύματα μπορεί να εμφανίζονται όχι μόνο ως συνέπεια της διάσπασης του δοκιμίου αλλά και στην περίπτωση δοκιμής αντοχής [2]. Αυτό συμβαίνει επειδή το ρεύμα συσχετίζεται με το περιεχόμενο συχνότητας των κρουστικών τάσεων και τη χωρητικότητα του δοκιμίου. Συνεπώς, το μέγεθος και το σχήμα των κρούσεων μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ένδειξη της κατάστασης μόνωσης του δοκιμίου. Για το λόγο αυτό, η μέτρηση του κρουστικού ρεύματος είναι υποχρεωτική για τις δοκιμές αντοχής σε κρουστικές των μετασχηματιστών ισχύος όπου εφαρμόζεται πρώτα κρούση στο 50–70 % και έπειτα στο 100% της καθορισμένης τάσης δοκιμής. Για να αξιολογηθούν οι κυματομορφές τάσης και ρεύματος, αυτές υποβιβάζονται και καταγράφονται. Εν συνεχεία συγκρίνονται με τις προκαθορισμένες κατά τα διεθνή πρότυπα (IEC 60076-3:2013).

Αναλόγως των διατάξεων μέτρησης κρουστικών παλμών, τα επιμέρους μετρητικά κυκλώματα καταγραφής κρουστικών ρευμάτων είναι,

- Η συσκευή μετατροπής (υποβιβασμού) για τη μετατροπή του υψηλού ρεύματος σε μετρήσιμη τάση,
- Σύστημα μετάδοσης, συνήθως γραμμή οπτικών ινών ή καλώδιο μέτρησης,
- Συσκευή καταγραφής, συνήθως ψηφιακή συσκευή εγγραφής.

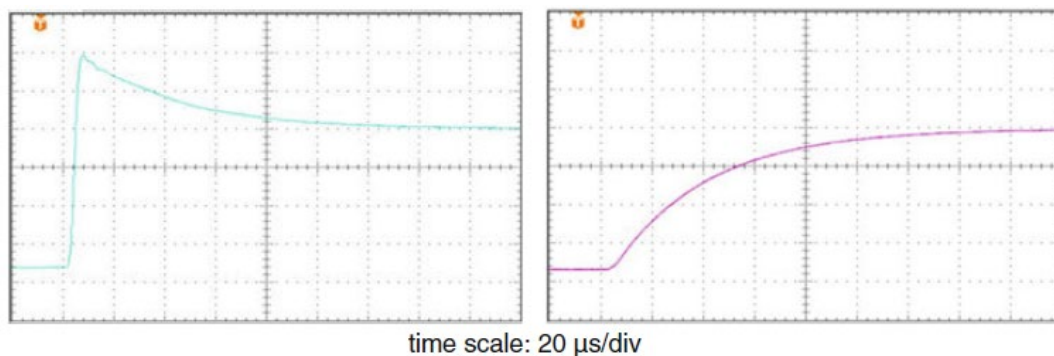
Παρακάτω, παρουσιάζονται μόνο οι διατάξεις καταγραφής που απαιτούνται για μετρήσεις κρουστικού ρεύματος. Κλασική εφαρμογή μέτρησης κρουστικού ρεύματος είναι η δοκιμή αλεξικέραυνων και άλλων διατάξεων προστασίας, όπου πρέπει να μετρούνται τιμές κορυφής έως 200 ΚΑ. Για να υποβιβαστεί το πλάτος των παλμών υψηλής έντασης σε ένα πρακτικό μετρήσιμο επίπεδο, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι συσκευών μετατροπής, όπως αντιστάσεις (Shunts), πηνία Rogowski, μετασχηματιστές ρεύματος, αισθητήρες Hall και αισθητήρες μαγνητικής οπτικής ίνας.

### 3.3.5.1 Επέκταση αμπερομέτρου με χρήση αντίστασης

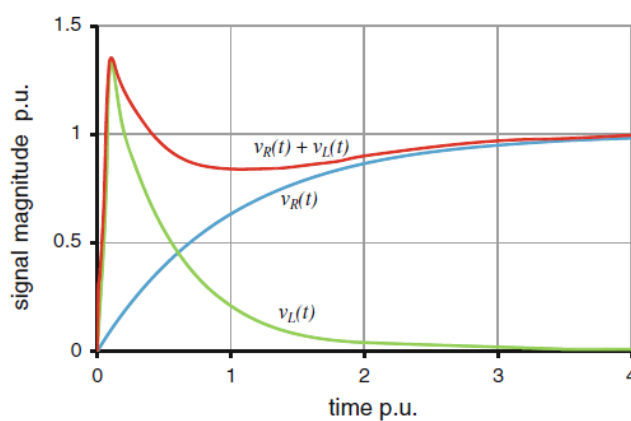
Ακόμη και αν το φυσικό υπόβαθρο των μετρήσεων ρεύματος βασίζονται στον νόμο του Ohm, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι για τη μέτρηση υψηλών παλμών ρεύματος, η αντίσταση μετατροπής (Shunt) πρέπει να είναι εξαιρετικά χαμηλή, συνήθως στην περιοχή mΩ. Ωστόσο, υπό αυτές τις συνθήκες, η προκύπτουσα σύνθετη αντίσταση μπορεί να επηρεαστεί σημαντικά από την αυτεπαγωγή του κυκλώματος μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.1.1. Εδώ, η αριστερή κυματομορφή καταγράφηκε μέσω μιας αντίστασης η οποία γειώθηκε μέσω καλωδίου, ενώ η δεξιά καταγράφηκε μέσω μιας αντίστασης η οποία γειώθηκε μέσω ενός πλέγματος χαλκού, εξαιρετικά χαμηλής αυτεπαγωγής. Στην αριστερή κυματομορφή υφίσταται εμφανής ενίσχυση σήματος, η οποία οφείλεται στην υπέρθεση του επαγωγικού μέρους της αντίστασης μέτρησης  $v_L(t)$  με το ωμικό της μέρος  $v_R(t)$ , όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.1.2. Συνεπώς, το μετρούμενο σήμα τάσης  $v_m(t)$  που προκαλείται από το άμεσα χρονικά εξαρτώμενο σήμα μπορεί να εκφραστεί ως [2]:

$$v_m(t) = v_R(t) + v_L(t) = R_m \cdot i_m(t) + L_m \cdot \frac{di_m(t)}{dt} \quad (3.3.5.1.1)$$

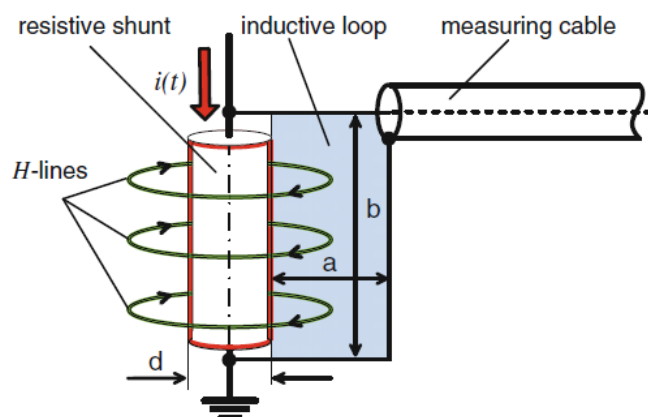




Σχήμα 3.3.5.1.1 Η απόκριση ενός συστήματος μέτρησης ρεύματος σε ένα εκθετικό σήμα κρουστικού ρεύματος όπου ο μορφοτροπέας είναι γειωμένος μέσω ενός καλωδίου (αριστερά) και ενός πλέγματος χαλκού (δεξιά)



Σχήμα 3.3.5.1.2 ολική τάση  $v_m(t) = v_R(t) + v_L(t)$  που εμφανίζεται στα άκρα μιας αντίστασης σε γρήγορα αυξανόμενο κρουστικό ρεύμα, λόγω της υπέρθεσης της ωμικής και επαγωγικής της τάσης



Σχήμα 3.3.5.1.3 ισοδύναμο κύκλωμα για τον προσδιορισμό της επαγόμενης τάσης  $v_m(t) = v_R(t) + v_L(t)$  λόγω του επαγωγικού βρόχου που επάγεται από τα καλώδια σύνδεσης μεταξύ του καλωδίου μέτρησης και της μετρητικής αντίστασης

Η επαγωγή  $L_C$  που δημιουργείται μεταξύ των ακροδεκτών του καλωδίου σύνδεσης και της μετρητικής αντιστάσεων (σκιαγραφημένη περιοχή του σχήματος 3.3.5.1.3) μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά (κατά τον Korfmuller 1990) ως:

$$L_C = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{2a}{d} + 1 \right) \quad (3.3.5.1.2)$$

Επιπλέον, πρέπει να ληφθεί υπόψη η αυτεπαγωγή της μετρητικής αντίστασης. Για αντίσταση διαμέτρου  $d$  και μήκους  $b$ , μπορεί να υιοθετηθεί η ακόλουθη προσέγγιση (Korfmuller 1990):

$$L_C = \frac{\mu_0 \cdot b}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{b}{a} - \frac{3}{4} \right) \quad (3.3.5.1.3)$$

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (3.3.5.1.2) και (3.3.5.1.3) και εισάγοντας την παραδοχή ότι  $d \ll a$  και  $d \ll b$  προκύπτει:

$$L_m \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{2a \cdot b}{d^2} \right) = \frac{0.4\pi \text{ nH/mm}}{2\pi} \cdot \ln \left( \frac{2a \cdot b}{d^2} \right) \quad (3.3.5.1.4)$$

Για να εκτιμηθεί η παράσιτη επαγωγική τάση, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ακόλουθη προσέγγιση:

$$v_L(t) = (0.2 \text{ H/mm}) \cdot b \cdot \ln \left( \frac{2a \cdot b}{d^2} \right) \cdot \frac{di_m(t)}{dt} \quad (3.3.5.1.5)$$

Παράδειγμα,

Μετρητική αντίσταση:  $R_s = 10 \text{ m}\Omega$

Διάμετρος αντίστασης:  $d = 10 \text{ mm}$

Βρόγχος σύνδεσης:  $a = b = 50 \text{ mm}$

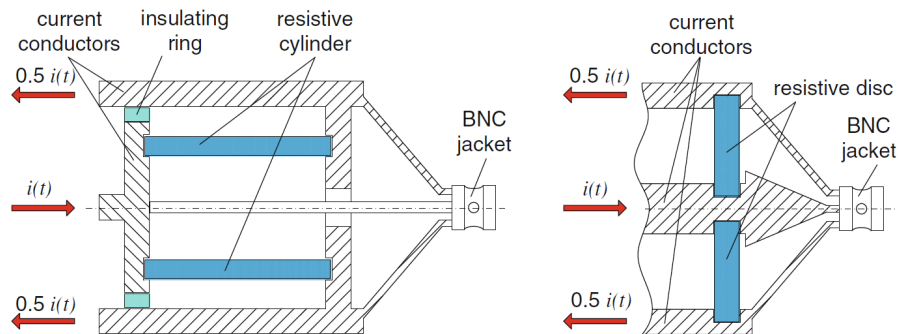
Θεωρώντας έναν εκθετικό κρουστικό παλμό ρεύματος με χρονική σταθερά  $\tau_c = 2 \mu s$  και τιμή κορυφής  $1 kA$ , τότε η αναπτυσσόμενη τάση στα άκρα μιας «ιδανικής» μετρητικής αντίστασης θα είναι,

$$v_R(t) = (100V) \cdot [1 - \exp(-t/\tau_c)]$$

Η επαγωγή θα είναι κατά προσέγγιση,

$$L_m = (0.2 \text{ H/mm}) \cdot b \cdot \ln\left(\frac{2a \cdot b}{d^2}\right) \approx 40 \text{ nH}$$

Λόγω τούτου υπάρχει υπέρθεση επαγωγικής τάσης στην ωμική. Την χρονική στιγμή μηδέν, όπου η κλίση της καμπύλης του ρεύματος είναι  $1 \text{ kA}/2 \mu s$ , η τιμή κορυφής της επαγωγικής τάσης γίνεται  $(40 \text{ nH}) \cdot (0.5 \text{ kA}/\mu s) = 20 \text{ V}$ . Αυτή, μετά από χρόνο  $t \approx 3\tau_c = 6 \mu s$ , είναι περίπου 200% της τιμής κορυφής της μετρούμενης τάσης στα άκρα της «ιδανικής» μετρητικής αντίστασης, όπου  $(1 \text{ kA}) \cdot (10 \text{ m}\Omega) = 10 \text{ V}$ .



Σχήμα 3.3.5.1.4 Αρχή Σχεδιασμού των χαμηλής επαγωγής μετρητικών αντιστάσεων



Σχήμα 3.3.5.1.5

Μετρητικές αντιστάσεις Εμπορίου



Σχήμα 3.3.5.1.6

Μετρητικές αντιστάσεις Εργαστηρίου Υ.Τ.

Για να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα μέτρησης λόγω της επαγωγικής τάσης, η επιφάνεια του βρόχου μέτρησης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη.

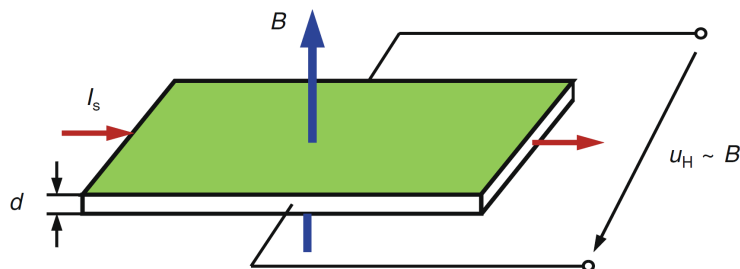
### 3.3.5.2 Αισθητήρας Hall

Οι αισθητήρες ρεύματος αυτού του τύπου χρησιμοποιούν το φαινόμενο Hall, το οποίο προκαλείται από την κίνηση ηλεκτρονίων σε μαγνητικό πεδίο λόγω της δύναμης Lorentz. Εάν μια αγώγιμη ή ημιαγώγιμη πλάκα πάχους  $d$  βρίσκεται σε μαγνητικό πεδίο επαγωγής  $B$  κάθετο προς αυτήν και ρέει ρεύμα μέσω αυτής, τα ηλεκτρόνια εκτρέπονται κάθετα προς την αρχική κατεύθυνση ρεύματος και κάθετα προς το μαγνητικό πεδίο (Σχήμα 3.3.5.2.1). Συνεπεία της μετατόπισης του φορτίου, η τάση Hall  $u_H$  επάγεται στα εξωτερικά άκρα της πλάκας [3]:

$$u_H = R_H \cdot \frac{I_s \cdot B}{d} \quad (3.3.5.2.1)$$

Ο συντελεστής Hall  $R_H$  είναι αντιστρόφως ανάλογος προς τη συγκέντρωση φορέα φορτίου  $ne$  του υλικού της πλάκας και του στοιχειώδους φορτίου  $e_0$ . Για μεταλλικούς αγωγούς με υψηλή συγκέντρωση φορτίων, η  $R_H$  και επομένως η  $u_H$  είναι σχετικά χαμηλές. Μόνο η εισαγωγή ημιαγωγών με αρκετές τάξεις χαμηλότερες συγκεντρώσεις φορέων

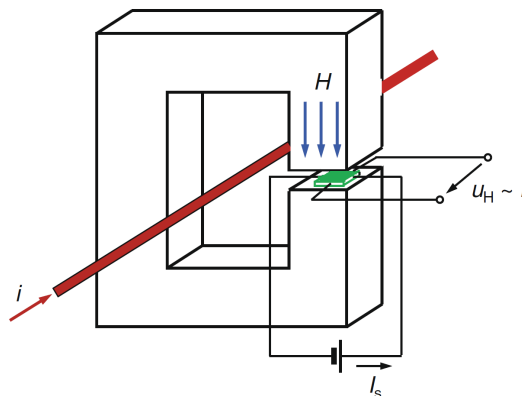
φορτίου και ως εκ τούτου υψηλότερες τιμές  $R_H$  έχει οδηγήσει σε ευρύτερη εφαρμογή του φαινομένου Hall. Το πάχος της πλάκας  $d$  διατηρείται μικρό με εναπόθεση λεπτών μεμβρανών ημιαγωγών σε υπόστρωμα. Το φαινόμενο Hall εμφανίζεται τόσο σε πεδία DC όσο και AC.



Σχήμα 3.3.5.2.1

Αρχή λειτουργίας του φαινομένου Hall

Η βασική αρχή ενός αισθητήρα ρεύματος που βασίζεται στο φαινόμενο Hall θα εξηγηθεί με τη βοήθεια του σχήματος 3.3.5.2.2



Σχήμα 3.3.5.2.2

Αισθητήρας Hall

Ο αγωγός ρεύματος οδηγείται μέσω του ανοίγματος του πυρήνα του δακτυλίου και δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο με την επαγωγή  $B_{Fe}$  στον πυρήνα. Ο πυρήνας φέρει διάκενο αέρα  $d$ , στο οποίο βρίσκεται η πλάκα Hall και μέσω του οποίου τρέχουν οι γραμμές μαγνητικού πεδίου  $H_{air}$ . Λόγω της συνέχειας της επαγωγής στον μαγνητικό πυρήνα και στο κενό αέρα, έχουμε:

$$B_{Fe} = \mu_0 \mu_r H_{Fe} = B_{air} = \mu_0 H_{air} \quad (3.3.5.2.2)$$

Η σχέση μεταξύ του ρεύματος  $i$  και της έντασης του μαγνητικού πεδίου  $H$  δίνεται από το νόμο της μαγνητικής ροής σύμφωνα με  $\oint H ds = \theta = I$ . Το επικαμπύλιο ολοκλήρωμα της έντασης του μαγνητικού πεδίου που εκτείνεται πάνω από τον μαγνητικό πυρήνα μήκους  $l_{Fe}$  και του διάκενο αέρα μήκους  $l_{air} = d$ , σε απλοποιημένη έκδοση είναι:

$$i = \oint H ds = H_{Fe} l_{Fe} + H_{air} d \quad (3.3.5.2.3)$$

Από τις εξισώσεις (3.3.5.2.2) και (3.3.5.2.3), και για μαγνητικό πυρήνα υψηλής διαπερατότητας, παίρνουμε για την επαγωγή στο κενό αέρα:

$$B_d = B_{air} = \frac{\mu_0 i}{\frac{l_{Fe} + d}{\mu_r}} \approx \frac{\mu_0}{d} i \quad (3.3.5.2.4)$$

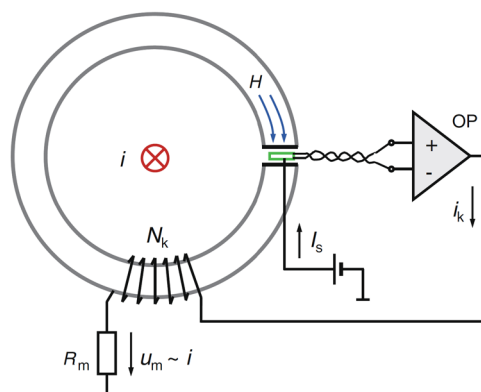
Βάζοντας την (3.3.5.2.4) στην (3.3.5.2.1) παίρνουμε την τάση Hall,

$$u_H = R_H \frac{I_s \mu_0}{d} i \approx K_H i \quad (3.3.5.2.5)$$

Σύμφωνα με τις αναφερόμενες προϋποθέσεις, η τάση Hall  $u_H$  που αξιοποιείται χωρίς ανάδραση είναι ανάλογη με την επαγωγή  $B$  και επομένως με το ρεύμα  $i$  που πρόκειται να μετρηθεί. Τα ρεύματα DC, AC και κρουστικό ρεύμα με μεγέθη έως 20 kA μπορούν να μετρηθούν με αισθητήρες ρεύματος Hall. Ανάλογα με το υλικό του πυρήνα και τα ονομαστικά μεγέθη ρεύματος, μπορεί να επιτευχθεί εύρος ζώνης συχνότητας μέτρησης έως 25 kHz. Οι αβεβαιότητες μέτρησης που μπορούν να επιτευχθούν με μια τέτοια ρύθμιση βρίσκονται γύρω στο 1%.

Υψηλότερες απαιτήσεις σχετικά με την αβεβαιότητα μέτρησης δεν μπορούν να καλυφθούν από το βασικό κύκλωμα του σχήματος 3.5.2.2. Μέχρι τώρα, υποθέταμε ότι η διαπερατότητα  $\mu_r$  του μαγνητικού πυρήνα είναι σταθερή. Αυτή η υπόθεση συνήθως δεν δικαιολογείται, αφού με την αύξηση του ρεύματος ο μαγνητικός πυρήνας μπαίνει σε κορεσμό και η γραμμικότητα μεταξύ  $B$  και  $H$  παύει να ισχύει. Μια λύση δίνεται μέσω τυλίγματος αντιστάθμισης στον μαγνητικό πυρήνα, το οποίο αντισταθμίζει επαγωγή στον

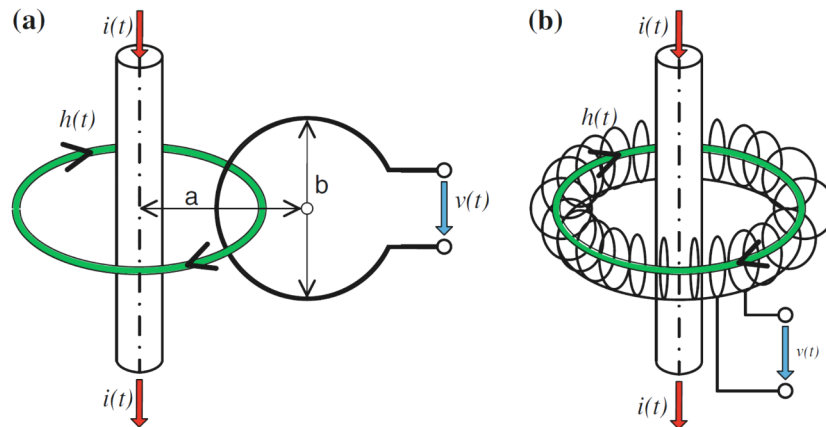
πυρήνα (αρχή μηδενικής ροής). Το ρεύμα αντιστάθμισης  $i_k$  προέρχεται από την τάση Hall και αποστέλλεται μέσω της περιέλιξης αντιστάθμισης  $N_k$  μέσω και του τελεστικού ενισχυτή OP (Σχήμα 3.3.5.2.3). Σε αυτό το κύκλωμα, το στοιχείο Hall λειτουργεί σαν «μηδενικός» αισθητήρας για τη μαγνητική ροή στον πυρήνα. Η επαγόμενη τάση  $u_m$  στα άκρα της αντίστασης μέτρησης  $R_m$  είναι ανάλογη του ρεύματος αντιστάθμισης και, ως εκ τούτου, και του μετρούμενου ρεύματος. Λόγω της αρχής της «μηδενικής ροής» (zero-flux), επιτυγχάνεται αβεβαιότητα μέτρησης μικρότερη από 1%. Ο αισθητήρας Hall με περιέλιξη αντιστάθμισης μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλότερες συχνότητες και ως συμβατικός μετασχηματιστής ρεύματος, όπου επιτυγχάνεται εύρος ζώνης μέτρησης στην περιοχή των 200 kHz.



Σχήμα 3.3.5.2.3

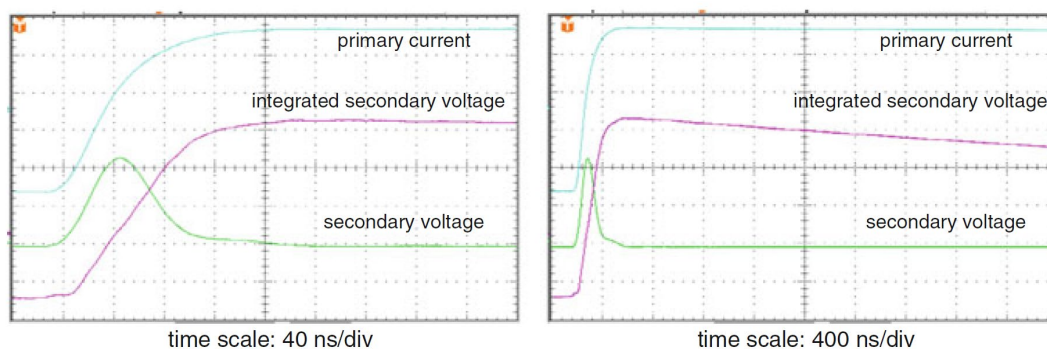
Αισθητήρας Hall με πηνίο αντιστάθμισης

### 3.3.5.3 Πηνίο Rogowski



Σχήμα 3.3.5.3.1 Σχεδιαστική αρχή πηνίου Rogowski

Ο απλούστερος τρόπος για την εξάλειψη της επαγωγικής τάσης που προκαλείται στο βρόχο μέτρησης είναι η εφαρμογή ενός αμιγώς επαγωγικού μορφοτροπέα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.3.1, αυτή μπορεί να αποτελείται είτε από μία μόνο στροφή είτε ακόμη και από πολλές στροφές γνωστές ως πηνίο Rogowski (Rogowski 1913). Βάσει του νόμου της επαγωγής, η τάση που ανιχνεύεται στην έξοδο του πηνίου χωρίς φορτίο (δηλ. ανοικτός κύκλος λειτουργίας) μπορεί να υπολογιστεί κατά προσέγγιση με [2]:



Σχήμα 3.3.5.3.2

Χαρακτηριστικά μέτρησης κρουστικών ρευμάτων χρησιμοποιώντας ένα πηνίο Rogowski

$$v_l(t) = M \cdot \frac{di}{dt} = \left[ \frac{\mu_0 \cdot n \cdot b}{8} \cdot \ln \left( \frac{2a+b}{2a-b} \right) \right] \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.3.5.3.1)$$



Όπου,

$M$  αλληλεπαγωγή

$\mu_0$  μαγνητική διαπερατότητα κενού

$n$  αριθμός σπειρών

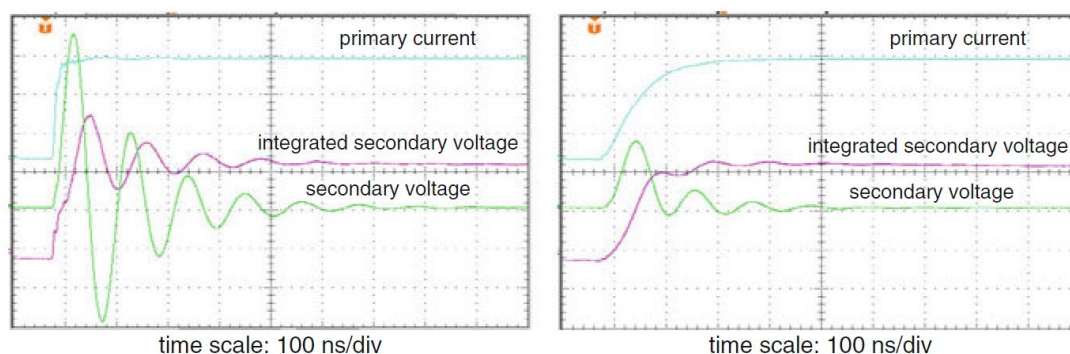
$a$  απόσταση μεταξύ του αγωγού και του πηνίου Rogowski

$b$  διάμετρος σπείρας

Καθώς η τάση  $v(t)$  που επάγεται στο πηνίο Rogowski είναι ανάλογη του ρεύματος, ήτοι  $di(t)/dt$ , ένα σήμα εμφανίζεται στην έξοδό του κατά την μεταβολή της έντασης. Αυτή η τάση πρέπει να ολοκληρωθεί ώστε να ληφθεί ένα σήμα το οποίο είναι άμεσα ανάλογο με το ρεύμα που πρόκειται να μετρηθεί, βλ. Σχήμα 3.3.5.3.2.

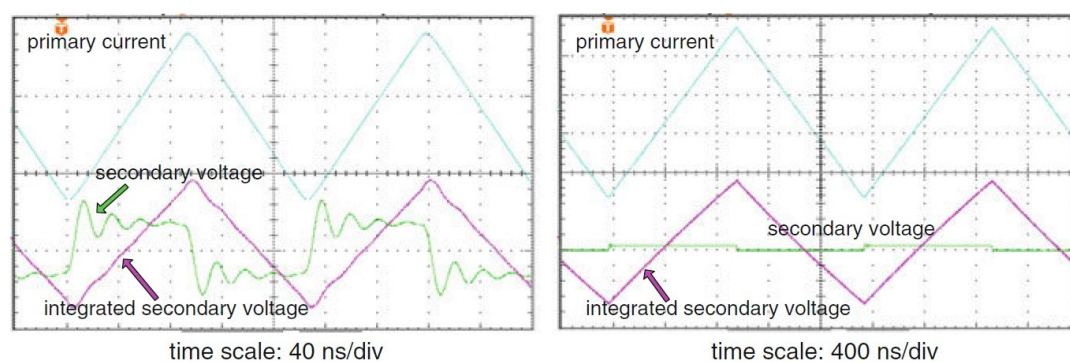
Η συμπεριφορά ενός επαγωγικού μετατροπέα είναι ανάλογη με εκείνη ενός υπερπαρατού φίλτρου και άρα ένα συνεχούς ρεύματος σήμα δεν μπορεί να μετρηθεί. Αυτό συνεπάγεται ότι το εγγενές σφάλμα μέτρησης αυξάνεται καθώς αυξάνεται με τη διάρκεια του παλμού όπως σε χαμηλές συχνότητες, βλ. Σχήμα 3.3.5.3.2. Για να μειωθεί κάτω όριο της μετρήσιμης συχνότητας, η αμοιβαία επαγωγή πρέπει να ενισχυθεί ανάλογα. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί αποτελεσματικά εάν το κλασικό πηνίο Rogowski αντικατασταθεί από μετασχηματιστή έντασης όπου οι σπείρες του πηνίου του έχουν τυλιχθεί πάνω σε έναν υψηλής διαπερατότητας τορροειδή πυρήνα. Γενικά, τα πηνία Rogowski χρησιμοποιούνται μόνο για τη μέτρηση των εξαιρετικά υψηλών και γρήγορων παλμών ρεύματος που χαρακτηρίζονται από μια κλίση αρκετών 100 kA/μs, ενώ οι μετασχηματιστές ρεύματος χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση κρουστικών ρευμάτων κλίσης πολύ μικρότερης των 100 kA/μs, όπου η διάρκεια του παλμού μπορεί να υπερβαίνει κατά πολύ τα 100μs.

Όπως ήδη αναφέρθηκε παραπάνω, η τάση εξόδου των επαγωγικών μετατροπέων, άνευ φορτίου, είναι ανάλογη προς την παράγωγο του μετρούμενου ρεύματος. Όπως προκύπτει, η μέτρηση της βηματικής απόκρισης δεν αρκεί για να αναλυθεί η δυναμική συμπεριφορά του επαγωγικού μετατροπέα. Αυτό οφείλεται στο ότι μπορούν να υπερφορτιστούν τα συνδεδεμένα ηλεκτρονικά κυκλώματα, π.χ. ο ολοκληρωτής.



Σχήμα 3.3.5.3.3

Δυναμική συμπεριφορά ενός μετασχηματιστή έντασης που υποβλήθηκε σε παλμούς πρωτεύοντος ρεύματος διάρκειας 10 ns (αριστερά) και 50 ns (δεξιά).



Σχήμα 3.3.5.3.4

Δυναμική συμπεριφορά ενός μετασχηματιστή έντασης που υποβλήθηκε σε γραμμική αυξομείωση ρεύματος με ρυθμό επανάληψης 5,4 MHz (αριστερά) και 0,54 MHz (δεξιά)

Επιπλέον, ανεπιθύμητες ταλαντώσεις θα μπορούσαν να επαχθούν προκαλώντας εγγενή σφάλματα μέτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.3.3. Συνεπώς, για τη μέτρηση των παραμέτρων απόκρισης, ο χρόνος μετώπου πρέπει να επιλέγεται σύμφωνα με τους μικρότερο χρόνο που αναμένεται στις πραγματικές συνθήκες μέτρησης. Μια άλλη επιλογή είναι η μέτρηση σημάτων ρεύματος με γραμμική κλίση μετώπου και ουράς, όπου η συχνότητα των επαναλαμβανόμενων παλμών αλλάζει σύμφωνα με τις χρονικές παραμέτρους που ενδιαφέρουν, όπως καταγράφονται στο Σχήμα 3.3.5.3.4.

### 3.3.5.4 Μετασχηματιστής ρεύματος

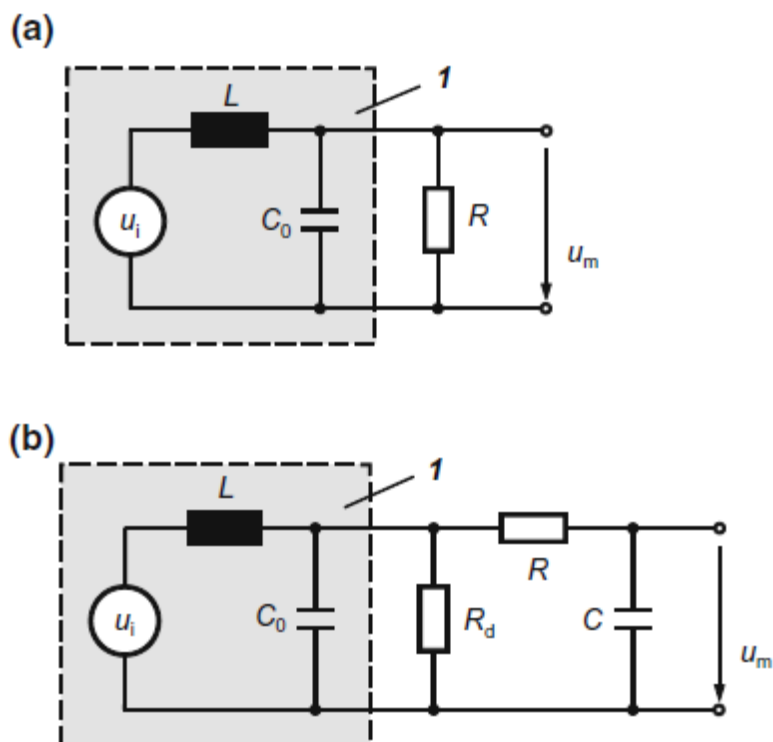


Σχήμα 3.3.5.4.

*Ευρυζωνικό πηνίο μέτρησης με μαγνητικό πυρήνα και εσωτερικό ολοκληρωτή διαιρούμενου τύπου*

Η πρόοδος στην ανάπτυξη μαγνητικών υλικών με εξαιρετικά καλή συμπεριφορά της διαπερατότητας στην συχνότητα και με χαμηλές απώλειες δινορρευμάτων έχουν ήδη επιτρέψει την κατασκευή ευρυζωνικών πηνίων μέτρησης ρεύματος με πυρήνες σιδήρου ή φερρίτη εδώ και μερικές δεκαετίες. Λόγω της υψηλής διαπερατότητας του μαγνητικού υλικού, η αμοιβαία επαγωγή  $M$  και επομένως η επαγόμενη τάση  $v_l(t)$  σύμφωνα με την Εξ. (3.3.5.3.1) είναι αισθητά υψηλότερη από ό,τι στο πηνίο Rogowski.

Η ολοκλήρωση του  $v_l(t)$  γίνεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.3.5.4.1 κατά προτίμηση μέσω της εσωτερικής αυτεπαγωγής και αντίστασης του πηνίου και της αντίστασης  $Z=50\Omega$  του συνδεδεμένου ομοαξονικού καλωδίου. Λόγω του ότι το στοιχείο ολοκλήρωσης βρίσκεται μέσα στο πηνίο, μπορεί να δημιουργηθεί η εσφαλμένη εντύπωση ότι το πηνίο λειτουργεί χωρίς τη μονάδα ολοκλήρωσης.

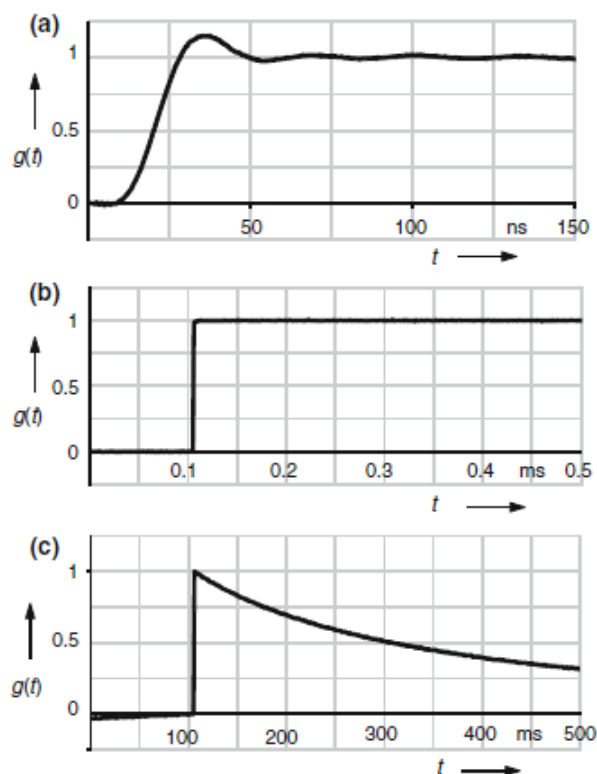


Σχήμα 3.3.5.4.2 Ισοδύναμο κύκλωμα πηνίου μέτρησης  $I$  με παθητικό ολοκληρωτή **a.** ολοκλήρωση με την αυτεπαγωγή  $L$  και αντίσταση  $R$  του πηνίου, **b.** Ολοκλήρωση με τον πυκνωτή  $C$  και την αντίσταση  $R$ .

Η τάση εξόδου του πηνίου είναι ανάλογη του μετρούμενου ρεύματος και συνδέεται απευθείας μέσω καλωδίου μέτρησης με τον εξασθενητή της ψηφιακής συσκευής καταγραφής.

Ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής, η ονομαστική τιμή ρεύματος των πηνίων μέτρησης με μαγνητικό πυρήνα μπορεί να φτάσει τα 500 kA για παλμικά ρεύματα. Εκτός από την τιμή κορυφής, ο κατασκευαστής καθορίζει οριακές τιμές και για το γινόμενο του ρεύματος αιχμής και της διάρκειας ενός ορθογώνιου παλμού ρεύματος. Με την αύξηση της διάρκειας του κρουστικού παλμού, η επιτρεπόμενη τιμή κορυφής μειώνεται. Η μέγιστη μόνιμη φόρτιση σε συχνότητα δικτύου είναι συνήθως μόνο μερικά εκατοστά του ρεύματος κορυφής ενός κρουστικού παλμού [3].

Η υψηλή διαπερατότητα του μαγνητικού πυρήνα επιτρέπει αφενός να μετρούνται συχνότητες μικρότερες από 1Hz, αφετέρου περιορίζει τις μεγάλες μετρούμενες συχνότητες στα 100 MHz



Σχήμα 3.3.5.4.3 Απόκριση ενός ευρύ-περατού 5kA πηνίου μέτρησης για διάφορους χρόνους καταγραφής **a.** έως 150ns **b.** έως 0,5ms και **c.** έως 500ms

Το Σχήμα 3.3.5.4.3 δείχνει την βηματική απόκριση  $g(t)$  ενός ευρύ-περατού πηνίου μέτρησης 5kA με μαγνητικό πυρήνα και εσωτερικό στοιχείο ολοκλήρωσης σε τρεις χρονικές περιοχές. Η αξιολόγηση της βηματικής απόκρισης έως 150 ns παρέχει χρόνο απόκρισης 8 ns και χρόνο σταθεροποίησης 30ns (Σχήμα 3.3.5.4.3a). Στη συνέχεια, η βηματική απόκριση παραμένει σταθερή έως 0,5ms με μικρή διακύμανση  $\pm 1$  % (Σχήμα 3.3.5.4.3b) και μειώνεται μετά από 91 ms στο 70 % της αρχικής τιμής (Σχήμα 3.3.5.4.3c). Το άνω φράγμα της συχνότητας λαμβάνεται από τον χρόνο ανόδου στα 25MHz, ενώ το κάτω φράγμα στο 1Hz. Τα μειονεκτήματα της χρήσης μαγνητικού πυρήνα είναι η έλλειψη γραμμικότητας, η πολικότητα, ο παραμένων μαγνητισμός λόγω συνεχών DC ρευμάτων κτλ. Αναλόγως τις απαιτήσεις της εφαρμογής και την επιθυμητή εκατοστιαία, αυτά μπορούν να αγνοηθούν ή να διορθωθούν με αντιστάθμιση [3].

Με κατάλληλο σχεδιασμό, μπορούν να μετρηθούν παλμικά ρεύματα με συνιστώσες συχνότητας έως του 1GHz και με χρόνους ανόδου μικρότερους του 1 ns. Τα πηνία μέτρησης είναι, όπως και το πηνίο Rogowski, θωρακισμένα με εξωτερικό αγωγίμο κέλυφος έναντι της

επίδρασης εξωτερικών ηλεκτρικών πεδίων, έχοντας μία περιμετρική σχισμή ώστε το πηνίο να μην βραχυκυκλωθεί. Στην περίπτωση αυτή, μια αντίσταση διαρροής συνδέεται μεταξύ του εξωτερικού κελύφους και του πηνίου ώστε να αποσβεσθούν υψίσυχα κύματα.

### 3.3.5.5 Μέτρηση συνεχούς τάσης

Για τη μέτρηση υψηλών DC τάσεων, αρχικά χρησιμοποιήθηκαν σφαιρικά διάκενα τα οποία μπορούν να μετρήσουν και την τάση κορυφής άλλων μορφών υψηλής τάσης δοκιμής, όπως εναλλασσόμενες, κρουστικές. Με βάση πειραματικά καθορισμένων καμπύλες διάσπασης υπό εργαστηριακές συνθήκες (Schumann 1923), μια αβεβαιότητα μέτρησης περίπου 3 % φάνηκε να είναι εφικτή για τα επίπεδα τάσης δοκιμής που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 2.000 kV

Η τάση διάσπασης συνεχούς ρεύματος των σφαιρικών διακένων εξαρτάται από τα γειωμένα αντικείμενα που βρίσκονται τοποθετημένα σε κοντινή απόσταση (Kuffel 1961), από την τραχύτητα/καθαρότητα της επιφάνειας των ηλεκτροδίων καθώς και από την υγρασία και την πυκνότητα του αέρα του περιβάλλοντος. Συνεπώς, δεν είναι δυνατή η χρήση σφαιρικών διακένων για μέτρηση συνεχούς τάσης άνω των 200 kV. Η αναθεωρημένη έκδοση του προτύπου IEC 60052:2002 περιγράφει πως υψηλές τάσεις δοκιμής συνεχούς τάσης μπορούν επίσης να μετρηθούν με ικανοποιητική αβεβαιότητα μέσω ράβδων κενού (Peschke 1968, Feser και Hughes 1988). Λαμβάνοντας υπόψη τους συντελεστές διόρθωσης για την υγρασία και την πυκνότητα του αέρα, φαίνεται ότι μπορεί να επιτευχθεί αβεβαιότητα μέτρησης 2 % για τάσεις που κυμαίνονται μεταξύ 20 και 1,300 kV περίπου. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα των σφαιρικών διακένων αέρα είναι η διακοπτόμενη διαδικασία μέτρησης, η οποία είναι εξαιρετικά χρονοβόρα. Για αυτό τα διάκενα σπινθηρισμού έχουν αντικατασταθεί ηλεκτροστατικά βολτόμετρα από τη δεκαετία του 1920 (Starke). Συστήματα μέτρησης υψηλής αντίστασης έχουν εισαχθεί από την δεκαετία του 1930 (Kuhlman και Mecklenburg 1935), όπου η υψηλή τάση μετρούνται είτε από μετρητές ρεύματος είτε από μετρητές τάσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.5.1. Σήμερα, αυτοί οι μετατροπείς είναι συνήθως ωμικοί καταμεριστές οι οποίοι πολλές φορές συνδέονται παράλληλα με χωρητικούς ώστε να μπορούν να καταγράφουν χρονικά μεταβαλλόμενες τάσεις, όπως την κυμάτωση συνεχούς τάσης και τάσεις με αντίθετη πολικότητα.

Μια σημαντική παράμετρος σχεδιασμού των ωμικών καταμεριστών μέτρησης συνεχούς τάσης, είναι ότι το ρεύμα που τους διαρρέει δεν πρέπει να είναι μικρότερο του 0.5

mA, σύμφωνα με το πρότυπο IEC 60060-2:2010. Αυτό γίνεται για να ελαχιστοποιηθεί η αβεβαιότητα μέτρησης που προκαλείται από τα παράσιτα ρεύματα διαρροής που μπορεί να προκληθούν από σκόνη ή ρύπανση που εναποτίθεται στην επιφάνεια του σώματος του καταμεριστή, επηρεάζοντας τον ονομαστικό λόγο καταμερισμού, ιδιαίτερα όταν ο περιβάλλοντας αέρας έχει υψηλή υγρασία. Στο πλαίσιο αυτό, πρέπει να σημειωθεί ότι τα φορτισμένα σωματίδια σκόνης έλκονται πάντοτε προς την διεύθυνση της αυξανόμενης έντασης του ηλεκτρικού πεδίου, η οποία αναγκάζει την εναπόθεση σκόνης στην επιφάνεια του καταμεριστή. Για να μειωθούν οι επιπτώσεις της σκόνης και της ρύπανσης, η αντίσταση του βραχίονα υψηλής τάσης θα πρέπει να είναι κατά το δυνατόν μικρότερη.

Ωστόσο, αυτό περιορίζεται τόσο από την ισχύ της διάταξης τροφοδοσίας υψηλής τάσης λόγω του πρόσθετου φορτίου, όσο και από επιτρεπόμενη θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία αυξάνεται με την ισχύ που διαχέεται στον καταμεριστή [2].

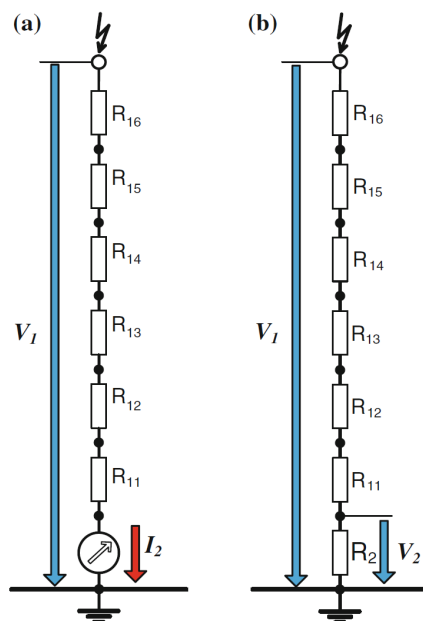
Παράδειγμα: Διαιρέτη τάσης 100 kV έχει συνολική αντίσταση 10 MΩ, αποτελούμενη από 100 αντιστάσεις χαμηλής τάσης (1kV) και 100kΩ. Εφαρμόζοντας την ονομαστική τάση των 100 kV, το ρεύμα που διαρρέει τον διαιρέτη είναι 10 mA ώστε κάθε αντίσταση να φορτίζεται με 10 W και ολόκληρη η στήλη του διαιρέτη με 1.000 W. Η παραπάνω κατάσταση θα προκαλούσε μια πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας που δεν μπορεί ποτέ να γίνει αποδεκτή. Για τον λόγο αυτό το διερχόμενο ρεύμα περιορίζεται στα 1 mA χωρίς η τάση της κάθε αντίστασης να υπερβεί το 1 kV. Αυτό ισοδυναμεί με 1MΩ/kV.

Για την αποφυγή υψηλών ακτινικών και επαπτόμενων πεδίων, η αντίσταση της υψηλής τάσης τυλίγεται συνήθως σε μορφή έλικας γύρω από έναν μονωτικό σωλήνα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.3.5.5.2. Στο εν λόγω σχήμα φαίνεται ένας διαιρέτης συνεχούς τάσης 300 kV ο οποίος σχεδιάστηκε από τους Peier και Greatsch το 1979. Ο βραχίονας της υψηλής τάσης αποτελείται από 300 αντιστάσεις χαμηλής τάσης 2MΩ, συνδεδεμένες εν σειρά.

Η αντίσταση του βραχίονα χαμηλής τάσης είναι 2MΩ, έτσι ώστε ο λόγος καταμερισμού να είναι 1: 300. Το βήμα της έλικας αλλάζει και κατανέμεται με τρόπο ώστε να συμπίπτει με την κατανομή του ηλεκτροστατικού πεδίου που προκαλείται από το ηλεκτρόδιο της υψηλής.

Η αντίσταση είναι διατεταγμένη μέσα σε έναν μονωτικό κύλινδρο γεμάτο με μονωτικό λάδι ώστε να απαχθεί η επαγόμενη ισχύς, η οποία είναι μόλις 150 W υπό ονομαστική τάση. Επιπλέον, αυτός ο σχεδιασμός μειώνει την επίδραση της σκόνης και της ρύπανσης στο ρεύμα του διαιρέτη. Χρησιμοποιώντας αντιστάσεις σύρματος, οι οποίοι έχουν

τεχνητά γηρανθεί με θερμική κατεργασία, επιτεύχθηκε αβεβαιότητα μέτρησης περίπου  $3 \times 10^{-5}$ .

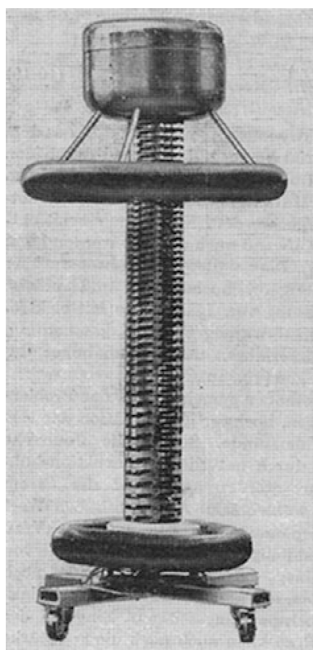


Σχήμα 3.3.5.5.1 Βασική αρχή σχεδιασμού καταμεριστή μέτρησης υψηλής συνεχούς τάσης. (α) Με αμπερόμετρο συνδεδεμένο σε σειρά με την αντίσταση της υψηλής. (β) Με βολτόμετρο συνδεδεμένο παράλληλα με την αντίσταση χαμηλής τάσης (αρχή ενός διαιρέτη τάσης)

Η αντίσταση είναι διατεταγμένη μέσα σε έναν μονωτικό κύλινδρο γεμάτο με μονωτικό λάδι ώστε να απαχθεί η επαγόμενη ισχύς, η οποία είναι μόλις 150 W υπό ονομαστική τάση. Επιπλέον, αυτός ο σχεδιασμός μειώνει την επίδραση της σκόνης και της ρύπανσης στο ρεύμα του διαιρέτη. Χρησιμοποιώντας αντιστάσεις σύρματος, οι οποίοι έχουν τεχνητά γηρανθεί με θερμική κατεργασία, επιτεύχθηκε αβεβαιότητα μέτρησης περίπου  $3 \times 10^{-5}$ .

Ακόμη και αν τα χαρακτηριστικά του διαιρέτη είναι υψηλά και πιστοποιηθούν από το Γερμανικό Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας (PTB), αυτός δεν έχει εφαρμογή στην βιομηχανία αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως πρότυπος σε εργαστήρια. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε περίπτωση διηλεκτρικής διάσπασης του μετρούμενου δοκιμίου, οι γρήγορες υπερτάσεις μπορεί να προκαλέσουν υπερφόρτωση των αντιστάσεων σύρματος, λόγω της μεγάλης αυτεπαγωγής της περιέλιξης των αντιστάσεων.





*Σχήμα 3.3.5.5.2 Καταμεριστής υψηλής συνεχούς τάσης, ονομαστικής τάσης 300 kV, αντίστασης υψηλής 600 MΩ, συνολικού ύψους 2,1 m.*

Για να αποφευχθεί το παραπάνω, χρησιμοποιούνται αντιστάσεις φύλλου οξειδίων μετάλλου ή αντιστάσεις άνθρακα. Μειονέκτημα τέτοιων αντιστάσεων είναι ότι επειδή έχουν συγκριτικά μεγάλο συντελεστή θερμοκρασίας, αυξάνεται η αβεβαιότητα μέτρησης κατά τη διάρκεια της δοκιμής. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με θερμική προ γήρανση των αντιστάσεων, αλλά η μέθοδος αυτή είναι εξαιρετικά χρονοβόρα και για αυτό εφαρμόζεται μόνο σε πολύ συγκεκριμένες περιπτώσεις.

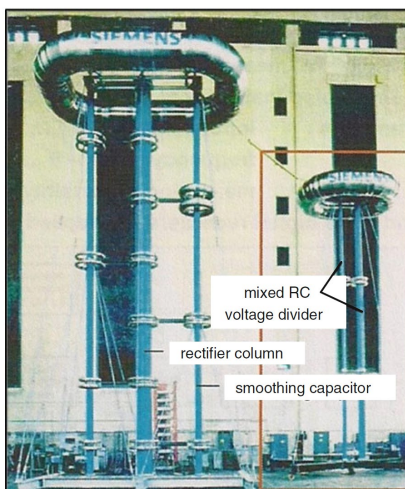
Η καλύτερη λύση για την αποφυγή πιθανής βλάβης των καταμεριστών αντίστασης σε περίπτωση διασπάσεων δοκιμίου, είναι η χρήση σύνθετων ωμικών-χωρητικών καταμεριστών. Βελτίωση επιτυγχάνεται συνδέοντας πυκνωτές σε συγκεκριμένα σημεία της στήλης του καταμεριστή. Κατά κανόνα, η χωρητικότητα ενός τέτοιου διαιρέτη θα πρέπει να είναι της τάξης των 200 pF. Επιπλέον, θα πρέπει να τοποθετούνται ηλεκτρόδια θωράκισης, σχετικά μεγάλης επιφάνειας για να αποφευχθεί έναυση μερικών εκκενώσεων που θα μπορούσαν επίσης να επηρεάσουν τον ονομαστικό λόγο καταμερισμού.

Για τη μέτρηση των τάσεων δοκιμής συνεχούς τάσης, αναλογικά όργανα με ένδειξη μέσης τιμής θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν. Η καλύτερη προσέγγιση, ωστόσο, είναι η χρήση ενός παλμογράφου ή ψηφιακού καταγραφέα, ο οποίος μπορεί να καταγράψει εκτός του πλάτους της συνεχούς τάσης, δυναμικές τάσεις, τη κυμάτωσή τους, την πτώση τάσης

καθώς και τις παράμετροι που χαρακτηρίζουν την αναστροφή της πολικότητας. Οι απαιτήσεις για εγκεκριμένα συστήματα μέτρησης τάσης DC καθορίζονται στο πρότυπο IEC 60060-2: 2010. Η αριθμητική μέση τιμή πρέπει να μετρείται με αβεβαιότητα  $UM < 3 \%$ , η οποία αντιστοιχεί σε πιθανότητα 95 %. Για τον προσδιορισμό της δυναμικής συμπεριφοράς, το σύστημα μέτρησης υποβάλλεται σε ημιτονοειδή τάση στην είσοδό του. Αυξομειώνοντας την συχνότητα μεταξύ 0,5 και 7 φορές της θεμελιώδους συχνότητας κυμάτωσης  $f_r$ , η διαφορά του μετρούμενου μεγέθους τάσης εξόδου πρέπει να είναι εντός 3 dB.

Τα προαναφερθέντα όρια αβεβαιότητας δεν πρέπει να υπερβαίνουν αυτών που καθορίζονται στο πρότυπο IEC 60060-1, όταν υπάρχει και κυματισμός. Το πλάτος της κυμάτωσης πρέπει να μετρείται με αβεβαιότητα  $< 1 \%$  της αριθμητικής μέσης τιμής της τάσης δοκιμής συνεχούς τάσης, με  $< 10 \%$  του πλάτους της κυμάτωσης ή όποιο εκ των δύο είναι μεγαλύτερο. Για την μέτρηση της μέσης τιμής της συνεχούς τάσης και του πλάτους της κυμάτωσης, είτε ξεχωριστά μετρητικά συστήματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε τα ίδια τα οποία έχουν χωριστές καταστάσεις μέτρησης.

Ο συντελεστής κλίμακας (scale factor) του συστήματος μέτρησης κυμάτωσης πρέπει να οριστεί στην θεμελιώδη συχνότητα κυμάτωσης  $f_r$  με διευρυμένη αβεβαιότητα  $< 3 \%$ . Αυτός ο συντελεστής κλίμακας μπορεί επίσης να προσδιοριστεί ως παράγωγο των συντελεστών κλίμακας των εξαρτημάτων. Όταν μετρείται η απόκριση πλάτους τάσης/συχνότητας του συστήματος κυμάτωσης, σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 0,5 και 5  $f_r$ , το πλάτος δεν θα πρέπει να είναι μικρότερο από 80% της τιμής του πλάτους στην θεμελιώδη συχνότητα κυμάτωσης  $f_r$ .

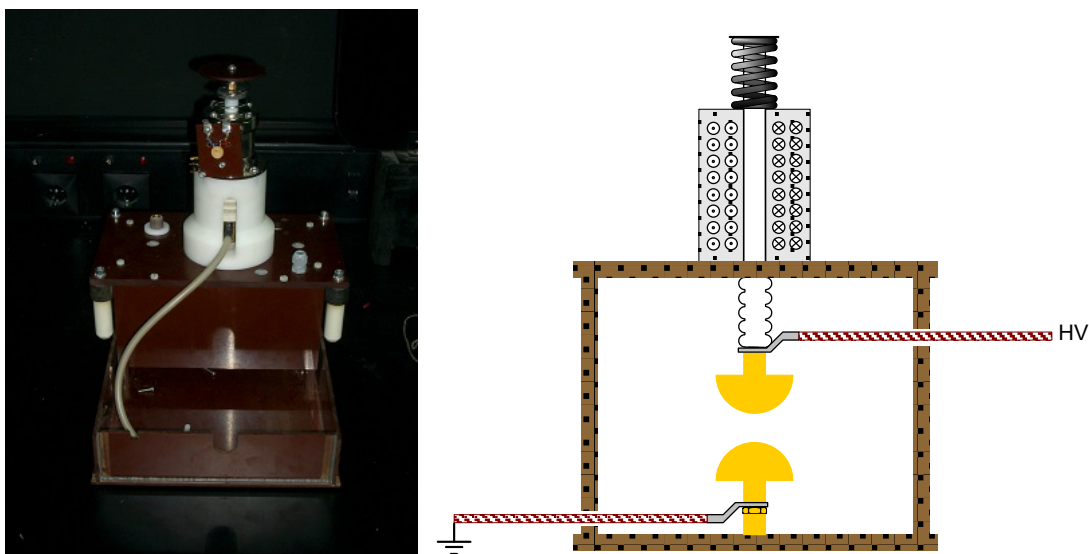


*Εικ. 6.24 Γεννήτρια συνεχούς ρεύματος και ένας ωμικός/χωρητικός διαιρέτης τάσεως (2 MV, 1 mA) σχεδιασμένο για τη μέτρηση στατικών και δυναμικών τάσεων.*

Για να μετρηθεί η άνοδος και η πτώση των τάσεων δοκιμής τάσης καθώς και η κυμάτωση και το σχήμα της τάσης στην αντιστροφή της πολικότητας, η χαρακτηριστική χρονική σταθερά του συστήματος μέτρησης συνεχούς τάσης πρέπει να είναι  $<0.25$  s. Σε περίπτωση δοκιμών ρύπανσης, η χρονική σταθερά πρέπει να είναι από  $<1/3$  του χρόνου ανόδου. Τα αποτελέσματα των δοκιμών τύπου και ρουτίνας των συστημάτων μέτρησης υψηλής συνεχούς τάσης μπορούν να ληφθούν από το πρωτόκολλο δοκιμής του κατασκευαστή, όπου πρέπει να πραγματοποιείται δοκιμή ρουτίνας σε κάθε τμήμα του συστήματος μέτρησης. Δοκιμές απόδοσης του πλήρους συστήματος μέτρησης να εκτελούνται υπό την ευθύνη του ίδιου του χρήστη ή από εργαστήριο βαθμονόμησης. Η δοκιμή απόδοσης περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του συντελεστή κλίμακας (scale factor) καθώς και τη δυναμική συμπεριφορά την κυμάτωση και θα πρέπει να εκτελείται ετησίως ή τουλάχιστον κάθε 5 χρόνια. Επανελέγχοι των ελέγχων απόδοσης πρέπει να εκτελούνται τουλάχιστον ετησίως ή σύμφωνα με τη σταθερότητα του συστήματος μέτρησης.

### **3.3.6 Ο σπινθηριστής**

Το εργαστήριο προμηθεύτηκε τον παρακάτω σπινθηριστή, όπως φαίνεται στην φωτογραφία:

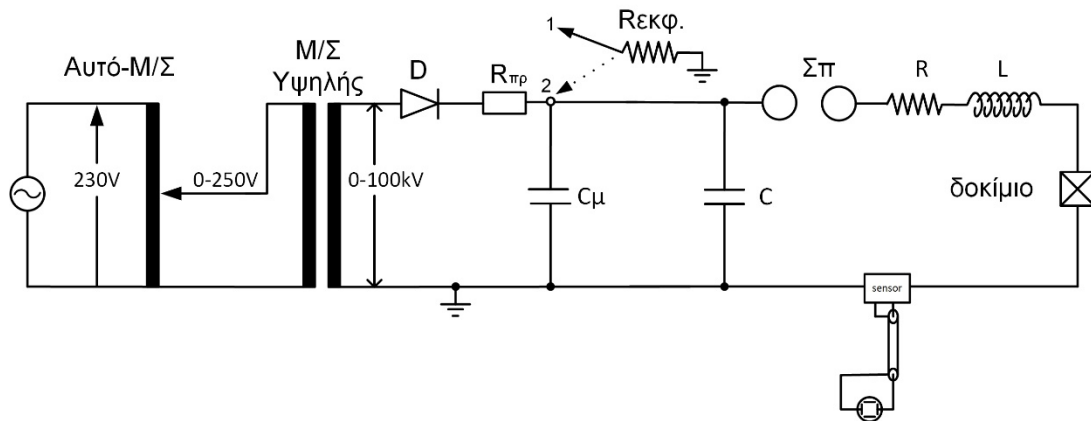


Σχήμα 3.3.6.1  
Διαθέσιμος σπινθηριστής

Ο σπινθηριστής αποτελείται από δύο ημισφαιρικά επιμεταλλωμένα ορειχάλκινα ηλεκτρόδια ημισφαιρικής γεωμετρίας. Το ένα ηλεκτρόδιο συνδέεται στην μεριά της υψηλής τάσης του πυκνωτή ενώ το άλλο μέσω του πηνίου, αντίστασης και δοκιμίου συνδέεται με τη γη. Το πάνω ηλεκτρόδιο περιβάλλεται από σιδηροπρηήνα πάνω στο οποίο έχει περιελιχθεί το πηνίο του ηλεκτρομαγνήτη. Σε κατάσταση ηρεμίας τα ηλεκτρόδια βρίσκονται σε απόσταση μερικών εκατοστών του μέτρου, ενώ όταν το πηνίο τροφοδοτηθεί μέσω διπλής ανόρθωσης με τάση 230V, το πάνω ηλεκτρόδιο ακαριαία πλησιάζει το κάτω σε απόσταση 2 χιλιοστών, αρκετή για να διασπαστεί το διάκενο.

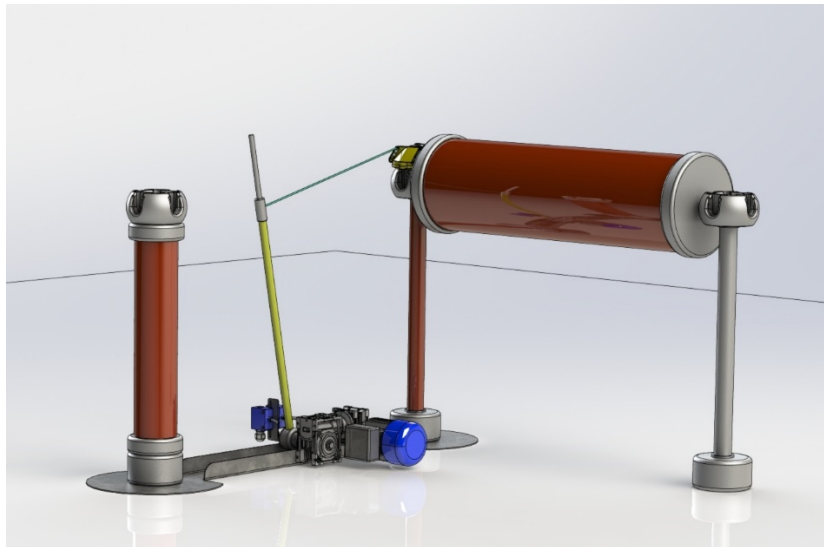
### 3.3.7 Ο Μεταγωγέας υψηλής τάσης

Ο μεταγωγέας υψηλής τάσης είναι το πλέον απαραίτητο σύστημα ασφάλειας της διάταξης, καθώς μέσω αυτού επιτυγχάνεται επιλεκτικά η εκφόρτιση της συστοιχίας των πυκνωτών, στην περίπτωση που αποτύχει η εκφόρτιση μέσω του δοκιμίου ή εάν απαιτηθεί να ακυρώσουμε την δοκιμή. Ο μεταγωγέας κατ' ουσία γειώνει το ηλεκτρόδιο υψηλής τάσης των πυκνωτών μέσω μιας αντίστασης υψηλής τάσης, ωμικής αντίστασης και ισχύος. Στο παρακάτω σχήμα 3.3.7.1 οι πυκνωτές συμβολίζονται με C και οι αντίσταση εκφόρτισης με *Reκφ*.



Σχήμα 3.3.7.1

Κύκλωμα παραγωγής εκθετικών κρουστικών ρευμάτων με μεταγωγέα εκφόρτισης πυκνωτών μέσω αντίστασης



Σχήμα 3.3.7.2

Μεταγωγέας εκφόρτισης πυκνωτών μέσω αντιστάσεως εκφόρτισης

### 3.3.8 Το καταγραφικό σύστημα

Στα περισσότερα εργαστήρια δοκιμών και βαθμονόμησης, χρησιμοποιούνται ψηφιακές συσκευές για την καταγραφή των κυματομορφών των κρουστικών παλμών τάσεων και ρευμάτων.

Οι συσκευές για την καταγραφή των κρουστικών ρευμάτων είναι όμοιες με αυτές για την καταγραφή των κρουστικών τάσεων, καθώς το υποβιβασμένο σήμα ρεύματος που εισέρχεται στην είσοδο του οργάνου έχει πρώτα μετατραπεί σε σήμα τάσης, μέσω π.χ. μιας αντίστασης.

Άλλες ονομασίες για τέτοια όργανα είναι ο ψηφιακός παλμογράφος, ο καταγραφέας μεταβατικών παλμών και «digitiser», με τους οποίους συνδέονται ακόμη και ορισμένες κατασκευαστικές και λειτουργικές αρχές. Οι αναλογικοί παλμογράφοι με οθόνες αποθήκευσης ή φωτογραφική καταγραφή έχουν πλέον καταργηθεί. Μια κυματομορφή που καταγράφεται με παλμογράφο, μπορεί να ψηφιοποιηθεί, π.χ. με τη βοήθεια ειδικού καθοδικού σωλήνα με μνήμη φωτοευαίσθητης μήτρας διόδων ή μέσω κάμερας με μετατροπή αναλογικής σε ψηφιακή εικόνας. Ωστόσο, τα σφάλματα κατά την εγγραφή του σήματος και κατά τη διάρκεια της τελικής μετατροπής είναι αισθητά μεγαλύτερα σε σύγκριση με τις συνεχώς βελτιωμένες ψηφιακές συσκευές εγγραφής. Η τάση δοκιμής (μέγιστη τιμή) μετράται με παλμικά βολτόμετρα, όπου ακόμη και εδώ οι ψηφιακές τεχνικές έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα αναλογικά κυκλώματα. Για τον έλεγχο και βαθμονόμηση των οργάνων μέτρησης, χρησιμοποιούνται παλμικοί βαθμονομητές οι οποίοι παράγουν κυματομορφές συγκρίσιμες με εκείνες των παλμών κρουστικής τάσης και ρεύματος. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα των ψηφιακών συσκευών εγγραφής έγκειται στην υπολογιστική αξιολόγηση ψηφιοποιημένων κυματομορφών μέσω ειδικού λογισμικού. Ο τυποποιημένος προσδιορισμός των παραμέτρων των κρουστικών παλμών είναι μερικές φορές αρκετά περίπλοκος - ειδικά εκείνες όταν αυτοί περιέχουν υπερτιθέμενες ταλαντώσεις. Το λογισμικό για την αξιολόγηση των μετρούμενων δεδομένων ενός καταγραφέας υποβάλλεται σε ειδική δοκιμή με τα υπολογισμένα δεδομένα των παλμών δοκιμής τα οποία, στην ποικιλομορφία τους, αντιστοιχούν στις κρουστικές τάσης και ρεύματος που συνήθως συναντώνται στις εργαστηριακές δοκιμές. Οι παράμετροι των κρουστικών παλμών οι οποίες υπολογίζονται από το λογισμικό αξιολόγησης πρέπει να συμφωνούν με τις τιμές αναφοράς. Τα όργανα καταγραφής κρουστικών παλμών είναι, λόγω της κατασκευής τους και του θωρακισμένου περιβλήματός τους, θωρακισμένα σε μεγάλο βαθμό έναντι της επίδρασης των ηλεκτρομαγνητικών πεδίων. Σε περίπτωση που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν όργανα μετρήσεων χαμηλής τάσης, πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα για την εξασφάλιση της

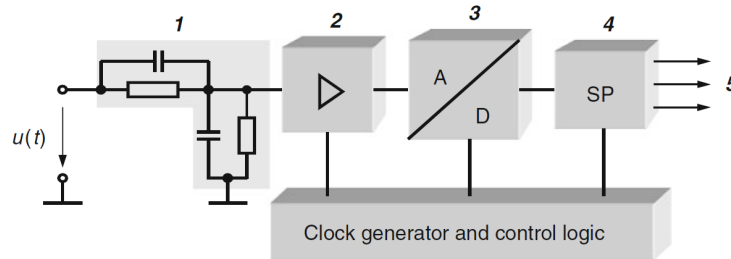
προστασίας από ηλεκτρομαγνητικά συζευγμένες παρεμβολές. Στην περίπτωση αυτή απαιτείται θωράκιση μέσω κλωβού Faraday και τροφοδοσία μέσω φίλτρου. Διαταραχές προκαλούνται επίσης μέσω γραμμών δεδομένων που οδηγούν από το όργανο μέτρησης σε περιφερειακές συσκευές έξω από τον κλωβό Faraday. Επομένως, η μετάδοση δεδομένων σε εξωτερικό υπολογιστή ή άλλο εξοπλισμό πραγματοποιείται, κατά κανόνα, μέσω οπτοζεύκτη με καλώδια οπτικών ινών.

### **Κατασκευή και ιδιότητες των Ψηφιακών καταγραφέων**

Το απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα ενός ψηφιακού καταγραφέα φαίνεται στο Σχήμα 3.3.8.1. Το σήμα εισόδου  $u(t)$  φθάνει, μέσω ενός εξασθενητή 1 και ενός προενισχυτή 2, στον μετατροπέα αναλογικού σε ψηφιακό (AD) 3 και αποθηκεύεται προσωρινά ως σύνολο ψηφιακών δεδομένων στη μνήμη ημιαγωγών 4. Από εδώ, το σύνολο των δεδομένων μπορεί να σταλεί σε εσωτερική ή εξωτερική μνήμη αποθήκευση δεδομένων 5 για περαιτέρω επεξεργασία ή να αναπαραστεί σε μια οθόνη ως αναλογική κυματομορφή με τη βοήθεια ενός ψηφιακού σε αναλογικό μετατροπέα. Εάν εκτελεστεί νέος παλμός, το περιεχόμενο της προσωρινής αποθήκευσης δεδομένων 4 μπορεί να αντικατασταθεί από ένα νέο σήμα εισόδου, έτσι ώστε να υπάρχουν πάντα τα πιο πρόσφατα καταγεγραμμένα δεδομένα στη μνήμη [3].

Το πιο σημαντικό στοιχείο του ψηφιακού καταγραφέα είναι ο μετατροπέας AD 3, ο οποίος λαμβάνει δείγματα του αναλογικού σήματος σε ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα και τα κανονικοποιεί σύμφωνα με την ανάλυση πλάτους αυτών. Από την αρχή κιάλας της τεχνικής ψηφιακής εγγραφής, υπήρξε μια σειρά από βασικά διαφορετικές αρχές λειτουργίας για τη μετατροπή ενός ταχέως μεταβαλλόμενου αναλογικού σήματος σε ένα ψηφιακό σύνολο δεδομένων. Ευρέως αποδεκτός είναι ο ηλεκτρονικός μετατροπέας AD με ακαριαίο μετατροπέα που επιτρέπει τους υψηλούς ρυθμούς δειγματοληψίας που απαιτούνται για την εγγραφή του σήματος σε ανάλυση πλάτους  $N$  μεταξύ 8 και 14 bit. Το κύκλωμα εισόδου ενός ακαριαίου μετατροπέα αποτελείται από έναν πολυβάθμιο διαιρέτη τάσης 1, ο οποίος, με τη βοήθεια μιας τάσης αναφοράς  $U_0$ , ρυθμίζεται στο αντίστοιχο επίπεδο τάσης που αντιστοιχεί στην ανάλυση πλάτους (Σχήμα 3.3.8.2). Παράλληλα με αυτό συνδέονται είναι μια αλυσίδα  $2^N-1$  συγκριτών 2. Τη στιγμή δειγματοληψίας, το αναλογικό σήμα εισόδου  $U(T)$  συγκρίνεται ταυτόχρονα με τις τάσεις αναφοράς του διαιρέτη τάσης από όλους τους συγκριτές μαζί. Ως αποτέλεσμα, ένα "0" ή "1" υποδεικνύεται στους ακροδέκτες εξόδου του συγκριτή. Στο

ακόλουθο κύκλωμα κωδικοποίησης 3, τα σήματα σύγκρισης  $2^N$  μετατρέπονται σε δυαδικό κώδικα με ανάλυση  $N$  bit.



Σχήμα 3.3.8.1

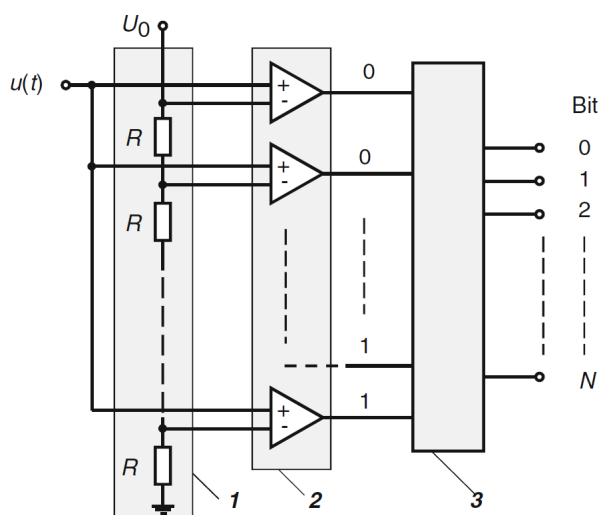
Μπλοκ διάγραμμα ψηφιακού καταγραφέα. **1.** εξασθενητής εισόδου **2.** ενισχυτής **3.** αναλογικός σε ψηφιακό μετατροπέας **4.** Αποθηκευτής δεδομένων **5.** έξοδος δεδομένων

Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα μετατροπής AD εξαρτάται κυρίως από τους χρόνους ζεύξης των συγκριτών και την καθυστέρηση του κυκλώματος κωδικοποίησης. Στον ακαριαίο μετατροπέα, αποφεύγεται ένα πρόσθετο κύκλωμα δείγματος και συγκράτησης που θα προκαλούσε πρόσθετη χρονική καθυστέρηση, εις βάρος μιας ακριβέστερης δειγματοληψίας.

Η ασταθής απόδοση ενός ακαριαίου μετατροπέα κατά τη διάρκεια γρήγορης δειγματοληψίας είναι ο λόγος για τον θόρυβο που υπερτίθεται στο καταγεγραμμένο σήμα. Ενίσχυση του ρυθμού δειγματοληψίας μπορεί να επιτευχθεί συνδυάζοντας δύο ή περισσότερους μετατροπείς AD από τους οποίους λαμβάνονται τα μετρούμενα δείγματα εναλλάξ και χρονικά μετατοπισμένα.

Ο ψηφιακός καταγραφέας δεν είναι ένα γραμμικό σύστημα μέτρησης όπως ο αναλογικός παλμογράφος, αφού λόγω της ψηφιοποίησης, οι πληροφορίες σχετικά με το μετρούμενο σήμα χάνονται μεταξύ γειτονικών σημείων δειγματοληψίας. Το αναλογικό μετρούμενο σήμα αντικαθίσταται από το άθροισμα των τιμών δειγματοληψίας σε διακριτούς χρόνους  $k\Delta t$  (Σχήμα 3.3.8.4). Ωστόσο, ορίζοντας επαρκείς ελάχιστες τιμές του ρυθμού δειγματοληψίας και της ανάλυσης πλάτους, ο ψηφιακός καταγραφέας μπορεί να θεωρηθεί γραμμικός για τη μέτρηση κρουστικών παλμών. Αυτό ισχύει και στην περίπτωση που υπάρχουν υπερτιθέμενες ταλαντώσεις στο κύκλωμα.





Σχήμα 3.3.8.2

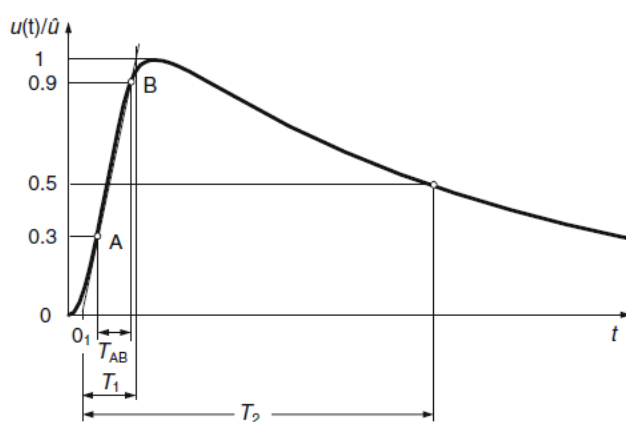
Απλοποιημένο μπλοκ διάγραμμα ενός αναλογικού σε ψηφιακό μετατροπέα με ακαριαίο μετατροπέα. **1.** καταμεριστής τάσης για τάση αναφοράς  $U_0$  **2.** συγκριτές **3.** κύκλωμα κωδικοποίησης.

Χαρακτηριστικά μιας ψηφιακής συσκευής καταγραφής είναι η ανάλυση πλάτους, ο μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας, το αναλογικό εύρος ζώνης ή ο χρόνος ανόδου και η χωρητικότητα αποθήκευσης.

Η ανάλυση πλάτους περιγράφει τον αριθμό των κβαντικών βημάτων στην πλήρη κλίμακα του μετατροπέα AD και εκφράζεται ως 2 στη δύναμη του  $N$  σε bit. Οι συσκευές καταγραφής που είναι ειδικά κατασκευασμένες για τη μέτρηση παλμών υψηλής τάσης και υψηλού ρεύματος έχουν ανάλυση 8-14 bit. Η χαμηλότερη ανάλυση  $N = 8$  bit αντιστοιχεί σε  $2^8=256$  κβαντισμένα βήματα με ύψος βήματος περίπου 0,4% της πλήρους κλίμακας. Οι ψηφιακοί καταγραφείς με συνεχώς μεταβαλλόμενη ενίσχυση εισόδου επιτρέπουν τη ρύθμιση του πλάτους του σήματος σε πλήρη κλίμακα, έτσι ώστε η ανάλυση πλάτους να διατηρείται πάντα στο βέλτιστο εύρος από τον μετατροπέα AD. Σε καταγραφείς που δεν διαθέτουν αυτή τη δυνατότητα, η ανάλυση θα χειροτερεύει πάντα με τη μείωση του πλάτους του σήματος. Ως εκ τούτου, ορίζεται ως ελάχιστη τιμή το  $4/N$  για το πλάτος του σήματος. Αυτό σημαίνει ότι το πλάτος ενός σήματος που καταγράφεται από καταγραφέα με  $N = 8$  bit πρέπει να είναι τουλάχιστον το 50% της πλήρους κλίμακας στην επιλεγμένη περιοχή εισόδου. Η ανάλυση πλάτους μπορεί να ενισχυθεί εάν το μετρούμενο σήμα συλλέγεται με ρυθμό δειγματοληψίας αισθητά υψηλότερο από τον απαιτούμενο ρυθμό (υπερβολική δειγματοληψία). Με αυτόν τον τρόπο, λαμβάνονται μαζί πολλά γειτονικά δείγματα για να

καταλήξουν σε μια μέση τιμή, η οποία, κατά κανόνα, βρίσκεται μεταξύ δύο βημάτων κβαντισμού. Το μετρούμενο σήμα αντιπροσωπεύεται στη συνέχεια από το σύνολο των μέσων τιμών, έτσι ώστε να δημιουργείται η ως επί το πλείστον υψηλότερη ανάλυση.

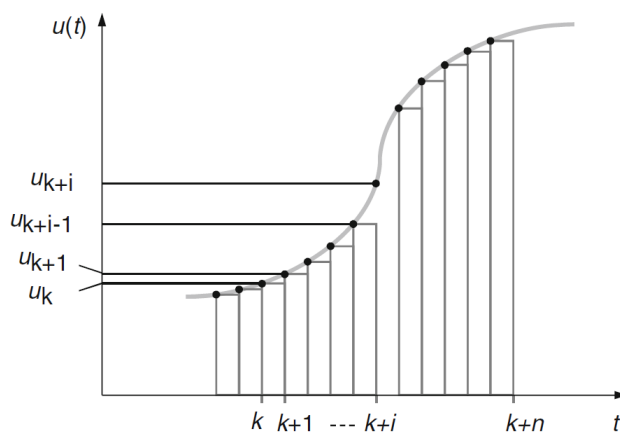
Ο ρυθμός δειγματοληψίας δίνει τον αριθμό των δειγμάτων ανά δευτερόλεπτο και εκφράζεται σε MS/s ή GS/s (mega ή giga δείγματα ανά δευτερόλεπτο). Ο απαιτούμενος ρυθμός δειγματοληψίας για μια δοκιμή σύμφωνα με τα πρότυπα καθορίζεται από την χρονική διάρκεια  $T_{AB}$  της του κρουστικού παλμού (βλ. Σχήμα 3.3.8.3) και δεν πρέπει να είναι μικρότερη από  $30/T_{AB}$ .



Σχήμα 3.3.8.3

Κρουστικός παλμός

Για κρουστικούς παλμούς όπου ο ελάχιστος χρόνος μετώπου είναι  $T_f = 0,84\mu\text{s}$ , ο ελάχιστος ρυθμός δειγματοληψίας ανέρχεται στα 60 MS/s. Αυτός ο υψηλός ρυθμός δειγματοληψίας είναι απαραίτητος κυρίως για την αξιολόγηση του χρόνου μετώπου με πιθανή υπερτιθέμενη ταλάντωση. Σε ορισμένες συσκευές εγγραφής, ο ρυθμός δειγματοληψίας μπορεί να αλλάξει μετά από έναν προκαθορισμένο. Είναι δυνατή η καταγραφή κρουστικού παλμού με υψηλό ρυθμό δειγματοληψίας στο τμήμα ανόδου και χαμηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας στην ουρά. Το πλεονέκτημα είναι ότι, λόγω του μειωμένου αριθμού δειγμάτων στην ουρά, θα απαιτηθεί μικρότερος χώρος μνήμης.



Σχήμα 3.3.8.4

*Παράδειγμα δειγματοληψίας τάσης με υψηλή ανάλυση*

Ο χρόνος ανόδου του καταγραφέα δεν πρέπει να υπερβαίνει το 3% του  $T_{AB}$ , το οποίο αντιστοιχεί στο χαμηλότερο εύρος ζώνης περίπου 25 MHz για κρουστικούς παλμούς με χρόνο μετώπου  $T_l = 0,84 \mu\text{s}$ . Οι καταγραφείς για τη μέτρηση κρουστικών παλμών έχουν εύρος ζώνης μεταξύ 40 και 60 MHz και ρυθμούς δειγματοληψίας έως 200 MS/s. Υψηλότερο εύρος ζώνης για τάσεις εισόδου έως 2 kV είναι δύσκολο να επιτευχθεί λόγω του εσωτερικού εξασθενητή. Οι καταγραφείς που έχουν αναπτυχθεί για το εύρος χαμηλής τάσης με τάσεις εισόδου έως 100 V έχουν υψηλότερους ρυθμούς δειγματοληψίας και εύρος ζώνης, τα οποία, με ανάλυση 8bit, βρίσκονται στην περιοχή 1 GS/s ή 400 MHz. Είναι κατάλληλοι για την καταγραφή της βηματικής απόκρισης ταχέων κρουστικών παλμών.

Η χώρος αποθήκευσης προσωρινά δεδομένων, όπου διαρκώς αποθηκεύονται δεδομένα, έχει περιορισμένη χωρητικότητα. Εάν η αποθήκευση δεδομένων είναι πλήρης, ανάλογα με τον επιλεγμένο τρόπο εγγραφής, διακόπτεται η περαιτέρω εγγραφή ή το περιεχόμενο του εισερχόμενου σήματος αντικαθίσταται. Η εγγραφή ενός σήματος με υψηλότερο ρυθμό δειγματοληψίας απαιτεί αντίστοιχα μεγαλύτερο χώρο αποθήκευσης δεδομένων.

Για βέλτιστη εγγραφή σήματος, υπάρχουν δύο ρυθμίσεις έναυσης/σκανδαλισμού (trigger). Η μία είναι η τιμή trigger, ενώ η άλλη ο καταμερισμός των θέσεων μνήμης σε πριν και μετά του trigger. Η ακριβής δειγματοληψία συνεχούς σήματος ή ο χρόνος πριν από την έναυση ενός κρουστικού παλμού μπορεί εύκολα να ρυθμιστεί από αυτό. Σε αντίθεση με τον αναλογικό παλμογράφο στον οποίο η εγγραφή ξεκινά από έναν παλμό σκανδάλης, σταματάει την εγγραφή στην ψηφιακή συσκευή. Επομένως, το σήμα που βρίσκεται στο

χρονικό διάστημα πριν από το trigger συλλαμβάνεται κατά την αποθήκευση δεδομένων. Λόγω αυτής της λειτουργίας, που περιγράφεται ως προ-ενεργοποίηση, τα προβλήματα trigger που είναι γνωστά στη χρήση αναλογικών παλμογράφων δεν προκύπτουν σε ψηφιακές συσκευές εγγραφής.

Οι περισσότεροι ψηφιακοί καταγραφείς επιτρέπουν την επαναλαμβανόμενη καταγραφή μιας σειράς πανομοιότυπων παλμών και την αξιολόγηση της μέσης κρουστικής μορφής. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται ένα αποτέλεσμα εξομάλυνσης, καθώς τα κανονικά κατανεμημένα σφάλματα ψηφιοποίησης που συμβαίνουν κατά τη δειγματοληψία ενός κρουστικού παλμού, αντισταθμίζονται σε μεγάλο βαθμό. Επιπλέον, υπάρχουν ψηφιακοί καταγραφείς οι οποίοι, με τη βοήθεια μιας μεθόδου δειγματοληψίας γνωστής από την αναλογική τεχνική, λαμβάνουν δείγματα από μια σειρά διαδοχικών παλμών με κάποια χρονική μετατόπιση και μπορούν στη συνέχεια να συνδυάσουν τις δειγματοληπτικές τιμές μαζί στις κατάλληλες χρονικές στιγμές. Με τον τρόπο αυτό, ο αποτελεσματικός ρυθμός δειγματοληψίας ενισχύεται σημαντικά, γεγονός που είναι, μεταξύ άλλων, επωφελές κατά τη μέτρηση των βαθμιδωτών αποκρίσεων. Πάρα ταύτα, το εύρος ζώνης της ψηφιακής συσκευής εγγραφής παραμένει αμετάβλητο.

Προσφέρονται πολλές δυνατότητες για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων που αποθηκεύονται προσωρινά στη συσκευή εγγραφής. Τα δεδομένα μπορούν να διαβαστούν επανειλημμένα με σχετικά αργή συχνότητα επανάληψης 1 kHz από την αποθήκευση δεδομένων του καταγραφέα και να αναπαραχθούν σε εσωτερική ή εξωτερική οθόνη ως αναλογικό σήμα με τη βοήθεια ψηφιακού σε αναλογικό μετατροπέα. Λόγω της βραδύτητας του ανθρώπινου ματιού, δημιουργείται η εντύπωση μιας σταθερής καμπύλης. Επιπλέον, τα καταγεγραμμένα δεδομένα μπορούν να μεταφερθούν σε άλλη εσωτερική μόνιμη αποθήκευση του καταγραφέα ή σε ενσωματωμένη μονάδα δισκέτας ή μονάδα CD-ROM, έτσι ώστε να παραμείνουν διαθέσιμα για μεταγενέστερη αξιολόγηση ή για σύγκριση με άλλες εγγραφές.

Ένας ψηφιακός καταγραφέας για μετρήσεις κρουστικών παλμών έχει, κατά κανόνα, τουλάχιστον δύο κανάλια μέτρησης με τα ίδια χαρακτηριστικά λειτουργίας. Αυτό επιτρέπει την ταυτόχρονη καταγραφή των κρουστικών δοκιμών ή τη διεξαγωγή συγκριτικών μετρήσεων μεταξύ του συστήματος μέτρησης και του συστήματος αναφοράς. Ακόμη και η δοκιμή παρεμβολών, στην οποία ενδιαφέρει η εισαγωγή της τάσης παρεμβολής στον μετρούμενο κρουστικό παλμό, γίνεται ευκολότερη. Με την προσεκτική θωράκιση των επιμέρους συγκροτημάτων μεταξύ τους και την τοποθέτησή τους σε ένα θωρακισμένο

περίβλημα που λειτουργεί ως κλουβί Faraday, η επίδραση των ηλεκτρομαγνητικών παρεμβολών, όπως εμφανίζονται κατά τη διάρκεια κρουστικών παλμών, μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

Ο μετατροπέας AD του ψηφιακού καταγραφέα απαιτεί στην πλήρη κλίμακα, τάση εισόδου μερικών βολτ. Το σήμα που πρόκειται να μετρηθεί προσαρμόζεται σε αυτήν την τιμή χρησιμοποιώντας έναν εσωτερικό ή εξωτερικό εξασθενητή εισόδου και έναν προενισχυτή. Οι εξασθενητές κατασκευάζονται ως αντισταθμισμένοι διαχωριστές  $RC$ . Οι ψηφιακοί καταγραφείς που κατασκευάζονται ειδικά για μετρήσεις παλμών υψηλής τάσης, διαθέτουν εσωτερικούς εξασθενητές για κρουστικούς παλμούς έως 1.000 ή ακόμα και 2.000 V, που είναι συνήθως η μέγιστη τιμή της τάσης που συναντώνται στην έξοδο των κρουστικών γεννητριών. Οι ψηφιακές συσκευές εγγραφής που χρησιμοποιούνται στην περιοχή χαμηλής τάσης, επεξεργάζονται τάσεις εισόδου όχι μεγαλύτερες από 100 V και επομένως απαιτούν εξωτερικό διαχωριστή τάσης για μετρήσεις παλμών υψηλής τάσης. Οι υψηλές τάσεις εισόδου είναι επωφελείς για την καταστολή των τάσεων παρεμβολής που προκύπτουν από την επίδραση ηλεκτρομαγνητικών πεδίων στο καλώδιο μέτρησης. Παρ'όλο που εξασθενεί το σήμα που μετράται στην είσοδο του καταγραφέα, οι τάσεις παρεμβολής μειώνονται σε μεγάλο βαθμό.

Η σύνθετη αντίσταση εισόδου του καταγραφέα πρέπει να είναι τουλάχιστον  $1M\Omega$  με παράλληλη χωρητικότητα που δεν υπερβαίνει τα 50 pF. Με τον τρόπο αυτό μειώνεται η παραμόρφωση που εμφανίζεται στην ουρά των κρουστικών παλμών. Επιπλέον, οι καταγραφείς που λειτουργούν με ευρυζωνικούς καταμεριστές ή αντιστάσεις μέτρησης (shunts), έχουν αντίσταση εισόδου ίση με αυτήν του καλωδίου μέτρησης (50, 60 ή 75 $\Omega$ ) προκειμένου να αποτρέπεται η μέτρηση των ανακλάσεων του σήματος. Εάν ένας καταγραφέας που δεν έχει σχεδιαστεί ειδικά για μετρήσεις κρουστικών παλμών και λειτουργεί με χαμηλή ωμική αντίσταση εισόδου, πρέπει να δοθεί προσοχή στο επιτρεπόμενο φορτίο του. Με υψηλότερη τάση εισόδου και μεγαλύτερη διάρκεια παλμού, υπάρχει ο κίνδυνος η αντίσταση εισόδου χαμηλής ωμικής να αλλάξει την τιμή της ή ακόμη και να καταστραφεί. Για την προστασία αυτού του κυκλώματος εισόδου, συνιστάται επομένως να πραγματοποιηθεί ο χαμηλός ωμικός τερματισμός κατά προτίμηση από μια εξωτερική αντίσταση με επαρκώς υψηλό φορτίο παλμού.

Οι ψηφιακές συσκευές εγγραφής κατασκευάζονται σε διάφορους τύπους. Εκτός από μεμονωμένες συσκευές με εσωτερικό ή ξεχωριστό υπολογιστή για έλεγχο και επεξεργασία δεδομένων, υπάρχουν ψηφιακές συσκευές εγγραφής σε πολύπλοκα κινητά συστήματα. Το

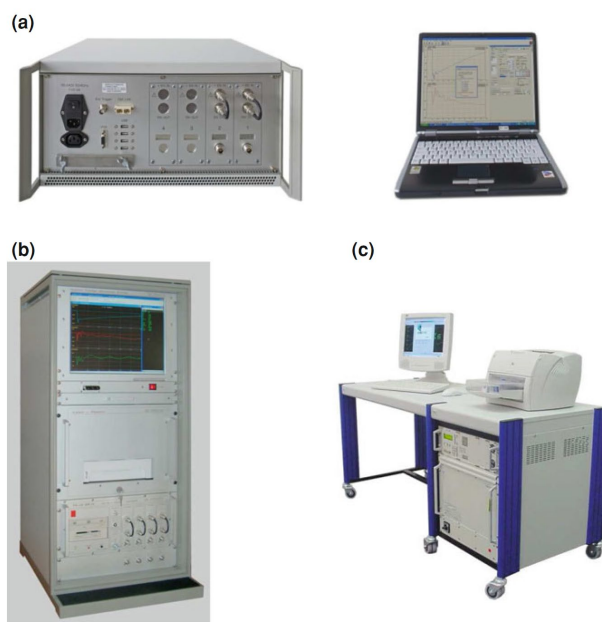
Σχήμα 3.3.8.5 δείχνει τρεις τύπους ψηφιακών συσκευών εγγραφής που προσφέρονται με διαφορετική ανάλυση πλάτους, συχνότητα δειγματοληψίας και παρελκόμενα από τους κατασκευαστές.

Οι ψηφιακές συσκευές εγγραφής για μετρήσεις κρουστικών παλμών είναι εξοπλισμένες με λογισμικό για αντικειμενική και συμβατή με το πρότυπο αξιολόγηση των καταγεγραμμένων τάσεων. Οι εσωτερικές βοηθητικές λειτουργίες επιτρέπουν τον προσδιορισμό άλλων παραμέτρων, όπως τις μέγιστες και ελάχιστες τιμές, τον χρόνο αύξησης και τη χρονική διάρκεια μεταξύ ορισμένων τιμών του παλμού. Ακόμη και το φιλτράρισμα των καταγεγραμμένων δεδομένων για την εξομάλυνση της κυματομορφής, ο προσδιορισμός των μέσων τιμών από μια σειρά υπολογισμών, η αριθμητική ολοκλήρωση του αποθηκευμένου σήματος και ο υπολογισμός του φάσματος με τη βοήθεια του FFT είναι δυνατά με εσωτερικούς ή εξωτερικούς υπολογιστές. Η εκτύπωση των αποθηκευμένων δεδομένων σε χαρτί επιτρέπει την αξιολόγηση της κυματομορφής παρόμοια με εκείνη σε έναν αναλογικό παλμογράφο. Σε περίπτωση αμφιβολίας, η ορθότητα του λογισμικού αξιολόγησης, για τις παραμέτρους των μετρούμενων κυματομορφών, μπορεί να επαληθευτεί.

Στις προδιαγραφές δοκιμών έχουν καθοριστεί ενιαίες απαιτήσεις για ψηφιακούς καταγραφείς, αναλογικούς παλμογράφους και βολτόμετρα κρουστικών παλμών. Οι μέγιστες επιτρεπόμενες αβεβαιότητες μέτρησης ανέρχονται σε 2% για την ανώτατη τιμή των κρουστικών τάσεων και ρευμάτων (3% για τις τάσεις παλμούς εξομοίωσης αστραπής που κόβονται στο μπροστινό μέρος) και 4% για τις χρονικές παραμέτρους. Πέρα από αυτό, μια σειρά επιμέρους απαιτήσεων ισχύει για τους τρεις τύπους οργάνων μέτρησης.

Για τους ψηφιακούς καταγραφείς σε συστήματα μέτρησης αναφοράς, καθορίζονται χαμηλότερες αβεβαιότητες 0,7 % για την ανώτατη τιμή των κρουστικών τάσεων και ρευμάτων (2 % για τις τάσεις παλμών αστραπής που κόβονται στο μπροστινό μέρος) και 3 % για τις χρονικές παραμέτρους.

Από την εισαγωγή του ψηφιακού καταγραφέα για μετρήσεις κρουστικών υψηλής τάσης και ρεύματος στις αρχές του 1970, έχει επιτευχθεί αξιοσημείωτη πρόοδος όσον αφορά το πλάτος και τη χρονική ανάλυση των μετατροπέων AD. Ακόμη και το αναλογικό κύκλωμα εισόδου των καταγραφέων - η ακρίβεια του εξασθενητή εισόδου και ειδικότερα η ισορροπία συχνοτήτων του - βελτιώνεται συνεχώς, αν και όχι στον ίδιο βαθμό με το ψηφιακό μέρος.



Σχήμα 3.3.8.5

*Διάφοροι τύποι καταγραφών κρουστικών παλμών*

Περαιτέρω πρόοδος στη μείωση των σφαλμάτων μέτρησης είναι η βελτιωμένη τεχνική βαθμονόμησης, πάνω από όλα, η εισαγωγή ακριβών βαθμονομητών παλμών. Συνοπτικά, μπορεί να σημειωθεί ότι η συνιστώσα αβεβαιότητας που εισάγεται από τον ψηφιακό καταγραφέα κατά τη διάρκεια μετρήσεων κρουστικών υψηλής τάσης και ρεύματος θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά.

### **Πηγές σφαλμάτων κατά την εγγραφή σήματος**

Για τη μέτρηση των κρουστικών υψηλής τάσης και ρεύματος, χρησιμοποιούνται ψηφιακοί καταγραφείς και βολτόμετρα κρουστικών παλμών των οποίων τα αναλογικά και ψηφιακά εξαρτήματα προκαλούν χαρακτηριστικά σφάλματα μέτρησης. Ακόμη και η ιδανική ψηφιοποίηση ενός σήματος συνδέεται με σφάλματα λόγω του περιορισμένου πλάτους και της χρονικής ανάλυσης. Περιγράφονται ως σφάλματα κβαντισμού ή σφάλματα δειγματοληψίας, των οποίων οι μέγιστες τιμές μπορούν θεωρητικά να εκτιμηθούν σχετικά εύκολα. Η ψηφιοποίηση στον καταγραφέα επιτυγχάνεται με τον μετατροπέα . Ο πραγματικός μετατροπέας AD, με τα αναλογικά κυκλώματά του (συγκριτές, διαιρέτες τάσης) σύμφωνα με το Σχήμα 3.3.8.2 προκαλεί, λόγω της τεχνικής του ατέλειας, πρόσθετα

σφάλματα που μπορούν να προσδιοριστούν μόνο εν μέρει με εκτεταμένες μετρήσεις. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί κανείς να υποδιαιρέσει τα αποτελέσματα των σφαλμάτων σε αυτά που υπάρχουν ήδη κατά τη δειγματοληψία μιας τάσης DC και σε εκείνα που προκύπτουν επιπλέον με σήματα υψηλής συχνότητας. Οι εξασθενητές εισόδου και οι ενισχυτές αντιπροσωπεύουν άλλες πηγές σφάλματος του καταγραφέα, οι οποίες βασικά είναι ήδη γνωστές ενώ χρησιμοποιούσαν αναλογικούς παλμογράφους ωρύτερα. Αυτό ισχύει επίσης για την επίδραση παρεμβολών που προκαλούνται από υψηλά ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία κατά τη δημιουργία κρουστικών παλμών τάσεων ή ρευμάτων.

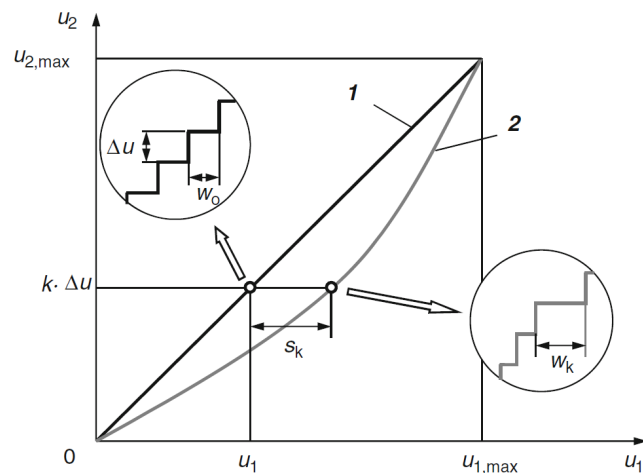
### Ιδανική ψηφιοποίηση

Κατά την κβαντοποίηση ενός σήματος με  $N$  bit σε πλήρη κλίμακα του μετατροπέα AD, υπάρχουν διαθέσιμα βήματα τάσης  $2^N$ . Έτσι, με  $N=10\text{bit}$ , επιτυγχάνεται ανάλυση πλάτους περίπου 0,1%. Η βασική απόδοση ενός μετατροπέα AD χαρακτηρίζεται από το χαρακτηριστικό κβαντισμού του για την τάση DC. Δείχνει την τιμή ψηφιακής εξόδου του μετατροπέα AD ως συνάρτηση της τάσης εισόδου  $u_1$ . Η τιμή εξόδου στα ακόλουθα δίνεται ως τάση εξόδου  $u_2$ . Εάν εφαρμόζεται τάση συνεχούς ρεύματος στους ακροδέκτες εισόδου ενός ιδανικού μετατροπέα AD και αυξάνεται με μικρά βήματα, η τάση εξόδου  $u_2$  παραμένει αρχικά αμετάβλητη στη βαθμιδωτή τιμή  $k\Delta u$ , όπου  $\Delta u = u_{2,\max}/2^N$  είναι το ύψος βήματος της τάσης εξόδου που αντιστοιχεί στην διακριτική ικανότητα πλάτους  $N$  και στη μέγιστη τιμή  $u_{2,\max}$  (Σχήμα 3.3.8.6, καμπύλη 1).

Μόνο αφού το  $u_1$  αυξηθεί στην τιμή κατωφλίου για το επόμενο βήμα, το  $u_2$  μεταβαίνει στο βήμα κβαντισμού  $(k+1)\Delta u$ . Συνολικά, κατά τη διάρκεια της ιδανικής κβαντοποίησης, προκύπτει ένα χαρακτηριστικό που μοιάζει με βήμα με ίσο πλάτος βήματος  $w_0$  και ύψος βήματος  $\Delta u$ . Η Καμπύλη 2 στο Σχήμα 3.3.8.6 είναι ένα παράδειγμα του χαρακτηριστικού κβαντισμού ενός πραγματικού, δηλαδή ελαττωματικού μετατροπέα AD με άνισο πλάτος βήματος  $w_k$ .

Κατά τη διάρκεια της ιδανικής δειγματοληψίας ενός αυθαίρετου σήματος, η τιμή σήματος κατά το χρόνο δειγματοληψίας  $k\Delta t$  βρίσκεται, κατά κανόνα, μεταξύ δύο σταδίων κβαντισμού και αντικαθίσταται από την τιμή του πλησιέστερου βήματος κβαντισμού και αποθηκεύεται.





Σχήμα 3.3.8.6 Χαρακτηριστικά κβαντισμού AD μετατροπών DC τάσεων 1. ιδανική AD μετατροπή με ίσα βήματα φάρδους  $w_0$  και ύψους  $\Delta u$  2. Λανθάνουσα μετατροπή AD με άνισα βήματα φάρδους  $w_0$

Επομένως, η τιμή κβαντισμένου σήματος διαφέρει από την ακριβή τιμή σήματος από το σφάλμα κβαντισμού  $\delta_{i,k}$ . Το μέγιστο σφάλμα κβαντισμού  $\delta_{i,max}$  που μπορεί να εμφανιστεί για ένα αυθαίρετο σήμα δίνεται από το ήμισυ της διαφοράς μεταξύ δύο γειτονικών βημάτων κβαντισμού ως:

$$\delta_{i,max} = 0.5LSB \quad (5.1)$$

όπου το LSB (Last Significant Bit) είναι το μικρότερο βήμα ψηφιοποίησης. Για  $N = 8$  bit, έχουμε το μέγιστο σφάλμα κβαντισμού  $\delta_{i,max} = 0,2\%$ , κανονικοποιημένο σε πλήρη κλίμακα. Για χαμηλότερα επίπεδα σήματος, το σχετικό σφάλμα κβαντισμού είναι αντίστοιχα υψηλότερο. Τα διακριτά σφάλματα κβαντισμού κατά την ιδανική δειγματοληψία ενός σήματος μπορούν να χαρακτηριστούν, χωρίς λεπτομερή γνώση της κυματομορφής, από μια ορθογώνια κατανομή με τις οριακές τιμές  $\pm\delta_{i,max}$ . Για συνολικά  $m$  μεμονωμένες τιμές, η τυπική απόκλιση  $\sigma_i$  λειτουργεί γενικά σε:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m \delta_{i,k}^2} \quad (5.2)$$

και υποθέτοντας ορθογώνια κατανομή με Εξ. (5.1):

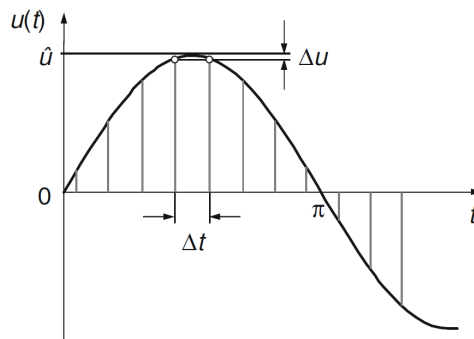
$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{3}} |\delta_{i,max}| = \frac{1}{\sqrt{12}} LSB = 0.289 LSB \approx 0.3 LSB \quad (5.3)$$

Η τυπική απόκλιση  $\sigma_i$  σύμφωνα με την Εξ. (5.3) είναι η τυπική αβεβαιότητα της ιδανικής κβαντοποίησης ενός αυθαίρετου σήματος.

Κατά τη δειγματοληψία ενός σήματος, το χρονικό σημείο της μέγιστης τιμής γενικά δεν καταγράφεται με ακρίβεια. Το πλάτος ή η τιμή κορυφής προσδιορίζεται στη συνέχεια πολύ χαμηλή και οδηγεί σε (αρνητικό) σφάλμα δειγματοληψίας. Χωρίς να ληφθούν υπόψη τα βήματα κβαντοποίησης, εμφανίζεται στη συνέχεια η πιο δυσμενής περίπτωση και των δύο τιμών του δείγματος που συνορεύουν με τη μέγιστη τιμή που βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο. Για μια ημιτονοειδή τάση με πλάτος  $\hat{u}$  και συχνότητα  $f$ , το σφάλμα αρνητικού πλάτους στην πιο δυσμενή περίπτωση ανέρχεται σε:

$$\Delta u = -\hat{u}[1 - \cos(\pi \Delta t f)] \quad (5.4)$$

όπου  $\Delta t$  είναι το διάστημα δειγματοληψίας, δηλ. το αντίστροφο της συχνότητας δειγματοληψίας (Σχήμα 3.3.8.7).



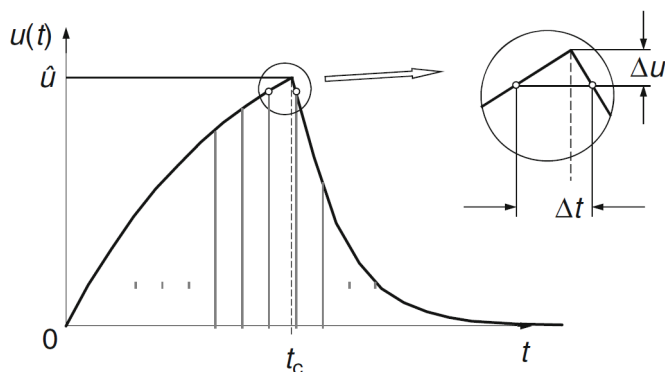
Σχήμα 3.3.8.7

Μέγιστο σφάλμα πλάτους  $\Delta u$

Για μια ημιτονοειδή τάση με  $f = 4,5\text{MHz}$  που δειγματοληπτείται στα  $100\text{MS/s}$  (διάστημα δειγματοληψίας  $\Delta t = 10\text{ns}$ ), πρέπει επομένως να υπολογιστεί με σφάλμα αρνητικού πλάτους έως  $-1\%$ .

Για πλήρες κρουστικό παλμό, το σφάλμα δειγματοληψίας στην κορυφή είναι αμελητέο για συχνότητα δειγματοληψίας  $100\text{MS/s}$ . Για κρουστικούς παλμούς κομμένες στο

μπροστινό μέρος με  $T_c = 0,5\mu\text{s}$ , το σφάλμα δειγματοληψίας στα  $100\text{MS/s}$  μπορεί θεωρητικά να ανέλθει έως και  $-1\%$  (Σχήμα 3.3.8.8).



Σχήμα 3.3.8.8

Μέγιστο σφάλμα πλάτους  $\Delta u$

Στην πράξη ωστόσο, η καταγεγραμμένη καμπύλη στρογγυλοποιείται στην κορυφή και το σφάλμα απόλυτης τιμής κορυφής είναι επομένως μικρότερο.

### Λογισμικό για την αξιολόγηση δεδομένων

Η αξιολόγηση των καταγεγραμμένων δεδομένων παλμικών τάσεων και παλμικών ρευμάτων γίνεται με λογισμικό που παρέχεται από τον κατασκευαστή του ψηφιακού καταγραφέα ή αναπτύσσεται μεμονωμένα από τον χρήστη.

Στην πρώτη γραμμή της αξιολόγησης δεδομένων με τη βοήθεια υπολογιστή είναι ο προσδιορισμός της τιμής της τάσης δοκιμής και των παραμέτρων χρόνου σύμφωνα με τα πρότυπα από τα αποθηκευμένα δεδομένα. Ο βαθμονομητής στέλνει έναν παλμό, υπερτιθέμενη ταλάντωση στην μονάδα εγγραφής. Το λογισμικό αξιολόγησης θα πρέπει να αναγνωρίσει την ταλάντωση που υπερτίθεται στην κορυφή και να υπολογίσει την τιμή της τάσης δοκιμής που ισχύει για τη μόνωση.

Σε δοκιμές παλμικού ρεύματος θα πρέπει να προσδιοριστεί η και η υποχώρηση του παλμικού ρεύματος στην αντίθετη πολικότητα. Σε κάθε περίπτωση, τα καταγεγραμμένα δεδομένα πρέπει να διατηρούνται για λόγους επαλήθευσης της αξιολόγησης των δεδομένων. Εκτός από το φιλτράρισμα με τη συνάρτηση τάσης δοκιμής  $k(f)$ , οι προδιαγραφές δοκιμής

δεν παρέχουν άμεσες εισόδους ή συστάσεις σχετικά με τη χρήση συγκεκριμένων μεθόδων ή αλγορίθμων για την επεξεργασία δεδομένων.



Σχήμα 3.3.8.9 Βαθμονομητής

Αντί για μια περισσότερο ή λιγότερο χρονοβόρα ατομική αξιολόγηση του εφαρμοζόμενου λογισμικού αξιολόγησης, η ορθότητά του επαληθεύεται με σύνολα δεδομένων επιλεγμένων μορφών παρορμήσεων. Μια ενδιαφέρουσα περαιτέρω εξέλιξη αντιπροσωπεύεται από το Test Data Generator (TDG), το οποίο αποτελεί μέρος των προδιαγραφών δοκιμής. Ορίζεται με αυτό το λογισμικό, με το οποίο μπορούν να δημιουργηθούν σύνολα δεδομένων διαφόρων παλμών σύμφωνα με τις προδιαγραφές του χρήστη. Τόσο οι αναλυτικά υπολογίσιμες όσο και οι πειραματικά ληφθείσες παλμικές μορφές περιλαμβάνονται σε αυτό. Οι τελευταίες δημιουργούνται από τη γεννήτρια δεδομένων δοκιμής μία προς μία ως αναλυτικές συναρτήσεις με βάση πολυώνυμα τρίτης τάξης που προσαρμόζονται στα καταγεγραμμένα δεδομένα. Οι παλμοί δοκιμής TDG αντιπροσωπεύουν πλήρεις και αποκεκομμένες τάσεις κρουστικού παλμού, παλμών τάσεων ζεύξης και κρουστικά ρεύματα. Μεταξύ αυτών είναι επίσης παραδείγματα κρουστικών τάσεων κατά τη δοκιμή μετασχηματιστών. Οι παλμοί δοκιμής υπερτίθενται εν μέρει με θόρυβο, ταλαντώσεις στο μπροστινό μέρος και στην κορυφή. Ειδικότερα, το λογισμικό αξιολόγησης μπορεί να επαληθευτεί με τέτοιους παλμούς δοκιμής όσον αφορά τον σωστό υπολογισμό των τιμών τάσης δοκιμής των τάσεων παλμού με υπερτιθέμενη ταλάντωση κορυφής σε περίπτωση που έχει εφαρμοστεί η συνάρτηση τάσης δοκιμής  $k(f)$ . Κατά την επιλογή των παλμών TDG, ο χρήστης μπορεί να ορίσει την ονομαστική ανάλυση, τον ρυθμό δειγματοληψίας, τον υπερτιθέμενο θόρυβο και άλλες παραμέτρους που αντιστοιχούν στις

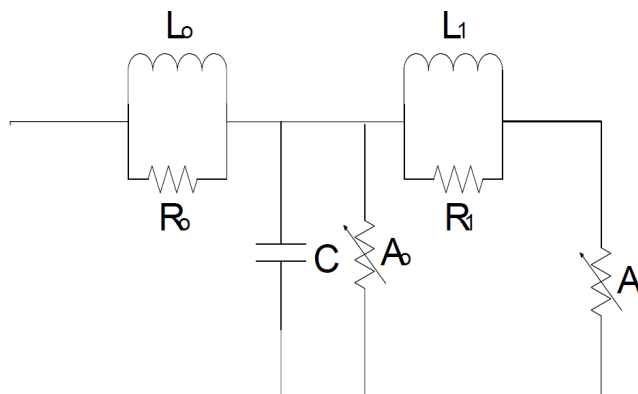
ιδιότητες της ψηφιακής συσκευής εγγραφής που χρησιμοποιείται. Έτσι, η μορφή των δεδομένων που παράγονται από το TDG θα ταιριάζει σε μεγάλο βαθμό με τη μορφή δεδομένων του ψηφιακού καταγραφέα. Για την τιμή της τάσης δοκιμής και τις χρονικές παραμέτρους των παλμών δοκιμής TDG, η μέση τιμή καθώς και οι ελάχιστες και μέγιστες οριακές τιμές καθορίζονται για καθεμία. Αυτές βασίζονται είτε στις υπολογισμένες τιμές των αναλυτικά προδιαγεγραμμένων κρούσεων είτε σε τιμές που προκύπτουν από διεθνείς συγκριτικές μετρήσεις. Εάν οι τιμές τάσης δοκιμής και οι παράμετροι χρόνου που λαμβάνονται από το λογισμικό αξιολόγησης συμφωνούν με τις προδιαγεγραμμένες τιμές εντός ορισμένων ορίων, η δοκιμή λογισμικού για τους παλμούς δοκιμής που διερευνήθηκαν θεωρείται επιτυχής. Από τις προβλεπόμενες οριακές τιμές της τάσης δοκιμής και τις χρονικές παραμέτρους, η τυπική αβεβαιότητα του λογισμικού υπολογίζεται και λαμβάνεται υπόψη στην αβεβαιότητα ολόκληρου του συστήματος μέτρησης.

### **3.3.9 Ηλεκτρονικό πρόγραμμα επεξεργασίας αποτελεσμάτων.**

Αφού καταχωρήσουμε τις κυματομορφές μας δίνεται η δυνατότητα να κάνουμε περαιτέρω ανάλυση και αξιολόγηση των δεδομένων. Για παράδειγμα σε περίπτωση που εκτελέσουμε δοκιμές κρουστικής ρεύματος σε αλεξικέραυνα οξειδίου μετάλλου, από τις ληφθείσες κυματομορφές τάσης-ρεύματος μπορούμε να υπολογίσουμε τα χαρακτηριστικά του αλεξικεραύνου και να εξομοιώσουμε την απόσταση προστασίας του, την μέγιστη παραμένουσα τάση για άλλο κρουστικό ρεύμα, κλπ. [9], [10], [11].

#### **Παράδειγμα Υπολογισμού ισοδύναμου κυκλώματος αλεξικεραύνου.**

Μία καλή προσέγγιση έχει δοθεί από την IEEE σύμφωνα με το παρακάτω ισοδύναμο κύκλωμα, εξαρτώμενο από την συχνότητα [9].



Σχήμα 3.3.9.1

Ισοδύναμο κύκλωμα αλεξικεραάνου

Εάν  $d$  είναι το ύψος του αλεξικεραάνου και  $n$  ο αριθμός των βαθμίδων του τότε με τις παρακάτω εξισώσεις υπολογίζουμε τα [10],

$$L_1 = 15d/n \text{ (}\mu\text{H)} \quad (3.3.9.1)$$

$$R_1 = 65d/n \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3.3.9.2)$$

$$L_0 = 0,2d/n \text{ (}\mu\text{H)} \quad (3.3.9.3)$$

$$R_0 = 100d/n \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3.3.9.4)$$

$$C = 100n/d \text{ (pF)} \quad (3.3.9.5)$$

kA	V-I characteristics of A0	V-I characteristics of A1
	V(p.u.) <sup>a</sup>	V (p.u.) <sup>a</sup>
0.01	1.40	—
0.1	1.54	1.23
1	1.68	1.36
2	1.74	1.43
4	1.80	1.48
6	1.82	1.50
8	1.87	1.53
10	1.90	1.55
12	1.93	1.56
14	1.97	1.58
16	2.00	1.59
18	2.05	1.60
20	2.10	1.61

Πίνακας 3.3.9.1

Οι μεταβλητές αντιστάσεις  $A_0$  και  $A_1$  του ισοδύναμου κυκλώματος του αλεξικεραάνου εξαρτώμενες του ρεύματος κορυφής.

ενώ από τις ληφθείσες κυματομορφές τάσης και ρεύματος υπολογίζουμε τις μεταβλητές αντιστάσεις  $A_I$  και  $A_\theta$ . Παράδειγμα των τιμών που θα υπολογίσουμε φαίνονται στον παραπάνω πίνακα 3.3.9.1 για διάφορες τιμές κορυφής κρουστικού ρεύματος.

### Παράδειγμα Υπολογισμού της μέγιστης παραμένουσας τάσης ( $U_{res}$ , residual voltage) αλεξικεραύνου.

Η εξάρτηση της μέγιστης παραμένουσας τάσης ενός αλεξικεραύνου οξειδίου του μετάλλου από την τιμή κορυφής του κρουστικού ρεύματος δίνεται από την παρακάτω σχέση 3.3.9.6 [10],

$$E = \kappa \cdot I^a \quad (3.3.9.6)$$

Όπου,

$E$ : είναι η μέγιστη παραμένουσα τάση

$\kappa$ : σταθερά

$a$ : μη γραμμικός εκθέτης

$I$ : ρεύμα εκφόρτισης

Εάν δύο εξαρτήσεις τάσεις ρεύματος ενός αλεξικεραύνου είναι γνωστές, τότε οι σταθερές  $a, \kappa$  υπολογίζονται ως,

$$a = \frac{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)}{\ln\left(\frac{I_1}{I_2}\right)} \quad (3.3.9.7)$$

$$\kappa = \frac{E_1}{I_1^a} \quad (3.3.9.8)$$

### 3.3.10 Ηλεκτρονική αποθήκευση αποτελεσμάτων/βάση δεδομένων

Η διαδικασία χρήσης της διάταξης είναι η εξής, αφού επιλέξουμε και συνδέσουμε τα απαιτούμενα στοιχεία του κυκλώματος  $R$ ,  $L$ ,  $C$ , παρελκόμενα (αγωγούς, μετρητικές διατάξεις κλπ.) πρώτα θα εκτελέσουμε κρούσεις εν κενό, άνευ συνδεδεμένου δοκιμίου. Εν συνεχεία, θα επαληθεύσουμε ότι οι χρονικές σταθερές είναι σύμφωνες με τα διεθνή πρότυπα και το ρεύμα κορυφής το επιθυμητό. Τελικά, θα συνδέουμε το δοκίμιο και θα επαναλάβουμε την δοκιμή. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, κατόπιν υπολογισμού και δοκιμών, θα καταγράψουμε για κάθε τύπο κυματομορφής (10/350, 8/20 κλπ.), τα στοιχεία του κυκλώματος που χρησιμοποιήσαμε για να πετύχουμε τις εν λόγω κυματομορφές. Το δε ρεύμα κορυφής είναι ανεξάρτητο από τα στοιχεία του κυκλώματος και εξαρτάται από την τάση φόρτισης. Τα στοιχεία αυτά θα είναι αποθηκευμένα σε αρχείο excel και ο χρήστης θα μπορεί αλλάζοντας τα στοιχεία του κυκλώματος να πετύχει την επιθυμητή κυματομορφή και ρεύμα κορυφής.

Τα αποτελέσματα των δοκιμών θα αποθηκεύονται στον ψηφιακό καταγραφέα. Αυτά μπορούν περαιτέρω να καταχωρηθούν σε βάση δεδομένων (π.χ. Microsoft Access), ανάλογα με τις μελλοντικές ανάγκες του εργαστηρίου.

### 3.3.11 Αυτοματισμός ελέγχου διάταξης και δικλείδων ασφαλείας

Λόγω του μεγέθους των διαθέσιμων πυκνωτών και της τάσης λειτουργίας αυτών (50 kV), η αυτόματη προσθαφαίρεση των στοιχείων με χρήση ηλεκτρονόμων καθίσταται αδύνατη. Αυτή μπορεί να επιτευχθεί μηχανικά από το χρήστη.

Ο αυτοματισμός μπορεί να περιοριστεί μόνο στην ανύψωση της τάσης φόρτισης, σκανδαλισμού του σπινθηριστή και αυτόματης λειτουργίας του μεταγωγέα υψηλής τάσης για την εκφόρτιση των πυκνωτών. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση προγραμματιζόμενου ηλεκτρονόμου PLC, με επαρκή αριθμό επαφών εισόδου και εξόδων για την παραπάνω εφαρμογή.

Για την προστασία των χρηστών, η διάταξη θα πρέπει να τοποθετηθεί σε χώρο ο οποίος να είναι περιφραγμένος με γειωμένα αγωγίμα πλαίσια, να διαθέτει πόρτα αγωγίμη με ηλεκτρομαγνητική κλειδαριά η οποία να διακόπτει την τροφοδοσία της διάταξης κατά το άνοιγμά της. Η εντολή αφοπλισμού της παραπάνω κλειδαριάς και θα γίνεται μέσω εντολής



των τερματικών διακοπών του μεταγωγέα υψηλής τάσης, ο οποίος θα περιγραφεί αναλυτικά παρακάτω.

### **3.3.12 Βάση διάταξης**

Οι 16 διαθέσιμοι πυκνωτές βρίσκονται αποθηκευμένοι σε παράπλευρο χώρο του εργαστηρίου. Οι ίδιοι δεν διαθέτουν βάση έδρασης και είναι αδύνατο μόνοι τους να σταθούν ή και να μετακινηθούν. Ως εκ τούτου απαιτείται να κατασκευαστεί βάση, κατά προτίμηση μία και για τους 16, ικανή να δεχθεί το συνολικό τους φορτίο και εάν είναι δυνατό, τροχήλατη. Ο πλήρης υπολογισμός της βάσης, περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 6.4

## Κεφάλαιο 4: Πειραματικός έλεγχος των υφισταμένων στοιχείων

### 4.1 Εισαγωγή

Στην διάθεσή μας για την συναρμολόγηση της διάταξης κρουστικής ρεύματος, πέραν των 16 πυκνωτών, ονομαστικής τάσης 50kV και χωρητικότητας 2,5μF, το εργαστήριο διαθέτει διάφορους μετασχηματιστές τροφοδοσίας υψηλής τάσης, καταμεριστές μέτρησης, παλμογράφους, στοιχεία υψηλής τάσης (αντιστάσεις, διόδους), αντιστάσεις μέτρησης ρεύματος (shunts), αυτομετασχηματιστές και μια διάταξη κρουστικού ρεύματος Hilo, ικανότητας 25kA για την 8/20 κυματομορφή.

### 4.2 Έλεγχος μετρητικού συστήματος (shunt με Hilo)

Για την εφαρμογή επιλέξαμε την μικρότερη διαθέσιμη μετρητική αντίσταση shunt, τιμής 0,028Ω.

Με την διάταξη Hilo [23] ελέγξαμε τόσο ότι η αντίσταση μαζί με τον παλμογράφο μας έδινε την επιθυμητή κυματομορφή. Χρησιμοποιήσαμε δηλαδή την διάταξη Hilo ως βαθμονομητή όπως περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.1.



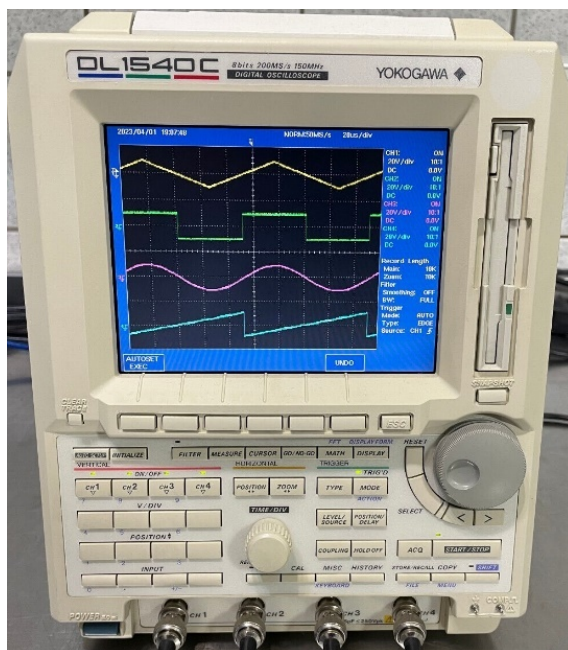
Σχήμα 4.2.1 Γεννήτρια κρουστικού ρεύματος Hilo

Ο παλμογράφος που χρησιμοποιήσαμε είναι ο τύπος DL1540 της εταιρίας Yokogawa 150MHz, [22]. Ο συγκεκριμένος υπερκαλύπτει την μέγιστη επιθυμητή συχνότητα της κυματομορφής 1/20 η οποία -έχει συχνότητα

$$f = \frac{1}{4 \cdot 10^{-6}} = 250 \text{ kHz}$$

Τα χαρακτηριστικά του παλμογράφου είναι τα κάτωθι,

- Κανάλια εισόδου: 4
- Μέγιστος ρυθμός δειγματοληψίας: 200MS/s
- Μέγιστο μμήκος αρχείου: 120Kwords (με 2 κανάλια) ή 56Kwords (με 3 ή 4 κανάλια)
- Εύρος ζώνης συχνοτήτων: 150MHz
- Κατακόρυφη ανάλυση: 8bits (κανονικά) ή 9bits (εξομαλυσμένα)
- Επίπεδο τάσης εξωτερικής εισόδου trigger: 1,5V
- Εύρος συχνότητας εξωτερικής εισόδου trigger: από DC ως 15MHz
- Ταχύτητα ανανέωσης οθόνης: μέγιστο 60screens/s
- Ευαισθησία: από 1mV/div έως 5V/div
- Ακρίβεια: DC 100mV/div
- Απόκλιση: 1,5% από 8div + LSB
- Ακρίβεια εκτύπωσης τάσης: από 1mV έως 50mV/div
- Απόκλιση: 2,5% της καθορισμένης τιμής + 0,2mV
- Μέγιστη τάση εισόδου: 250V (είτε DC είτε AC) με μέγιστο 1kHz
- Εμπέδηση εισόδου: 1MΩ (με απόκλιση 1,5%), περίπου 25pF
- Απομόνωση καναλιού: -40dB



Σχήμα 4.2.2

### Παλμογράφος Yokogawa DL1540

Λόγω του περιορισμού τάσης εισόδου του παλμογράφου στα 250V, θα προσέξουμε να μην επιτρέψουμε το ρεύμα κορυφής της κρουστικής να είναι άνω των  $250V/0,0028=89kA$ .

Ο παλμογράφος μας δίνει την δυνατότητα με να υπολογίσουμε το  $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ,  $t_f$  και  $t_h$ . Οι δυνατότητα αυτή μας εξυπηρετεί ώστε να αφενός συγκρίνουμε τις μετρούμενες τιμές με τις θεωρητικές και αφετέρου να ελέγξουμε απευθείας αν οι μετρούμενες τιμές ικανοποιούν τα όρια των διεθνών προδιαγραφών.

### 4.3 Έλεγχος συστήματος τροφοδοσίας

Η απαιτούμενη τάση φόρτισης των πυκνωτών οφείλει να είναι συνεχής και η μέγιστη τιμή της έως 50kV, δηλαδή ίση με την ονομαστική τάση φόρτισης των διαθέσιμων πυκνωτών, ώστε να εκμεταλλευτούμε την ικανότητα φόρτισής τους στο μέγιστο. Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.4 η απαιτούμενη εναλλασσόμενη τάση εξόδου του μετασχηματιστή τροφοδοσίας οφείλει να είναι  $50kV/1,41=36kV$ . Οι διαθέσιμοι μετασχηματιστές τροφοδοσίας του εργαστηρίου έχουν όλοι τάση εξόδου ίση ή άνω των 100kV, άρα υπερκαλύπτουν την απαίτηση των 36kV.

Η ονομαστική ισχύς αυτών καθώς και το ονομαστικό ρεύμα των διαθέσιμων διόδων ανόρθωσης, καθορίζουν τον χρόνο φόρτισης. Μπορούμε για να περιορίσουμε το ρεύμα φόρτισης και να μειώσουμε την ονομαστική ικανότητα του μετασχηματιστή τροφοδοσίας συνδέοντας μια αντίσταση προστασίας φόρτισης  $R_{\pi\rho}$ . (Σχήμα 3.3.7.1).

Βάση των παραπάνω, επιλέξαμε μετασχηματιστή τροφοδοσίας 100 kV και 10 kVA (20 kVA για 1 ώρα), αντίσταση προστασίας 500 kOhm και δίοδο ανόρθωσης 5 A. Άρα το ονομαστικό ρεύμα του μετασχηματιστή είναι  $10.000/100.000=0,1$  A (0,2 A για 1 ώρα). Για τις παραπάνω τιμές και με την χρήση του MATHCAD, υπολογίζουμε το ρεύμα και χρόνο φόρτισης,

$$C = 40 \cdot 10^{-6} F$$

$$R_{\pi\rho} = 500 k\Omega$$

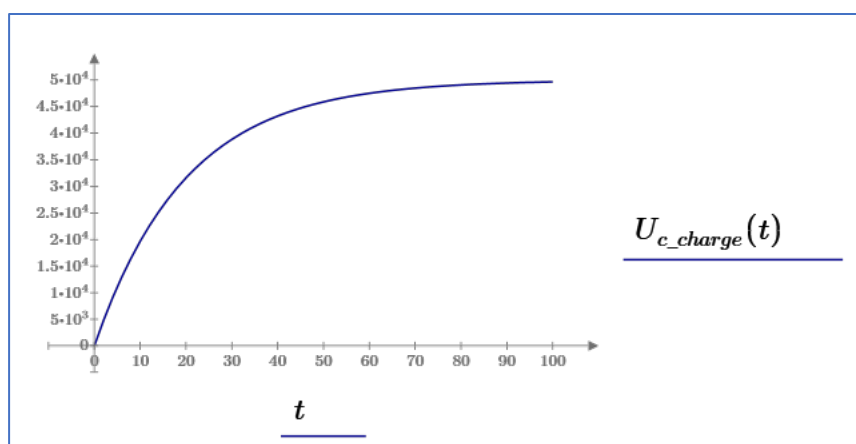
$$U_0 = 50 kV$$

$$\tau = R_{\pi\rho} \cdot C = 20$$

$$U_{C_{charge}}(t) = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

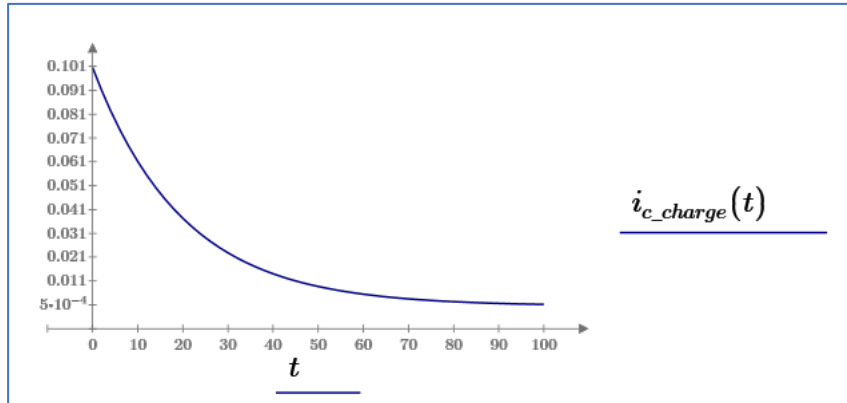
$$i_{C_{charge}}(t) = \frac{(U_0 - U_{C_{charge}}(t))}{R_{\pi\rho}}$$

Ο χρόνος φόρτισης είναι  $6\tau=120sec$



Σχήμα 4.3.1

Τάση φόρτισης πυκνωτή



Σχήμα 4.3.2

Ρεύμα φόρτισης πυκνωτή

Και το μέσο ρεύμα εκφόρτισης  $i_{av} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{c\_charge}(t))^2 \cdot dt} = 0.032A$



Σχήμα 4.3.1

Διάταξη παραγωγής υψηλής τάσης εργαστηρίου

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η ικανότητα το μετασχηματιστή των 10 kVA υπερκαλύπτει το ρεύμα φόρτισης, ενώ ο χρόνος φόρτισης ανέρχεται στα 100 sec.

#### 4.4 Έλεγχος ενός πυκνωτή

Οι πυκνωτές μέσης τάσης προδιαγράφονται σύμφωνα με το πρότυπο IEC60871. Οι δοκιμές ελέγχου είναι,

- α) Θερμική ευστάθεια (παράγραφος 13)
- β) Μέτρηση απωλειών μονώσεως  $\tan\delta$  σε ανύψωση θερμοκρασίας (παράγραφος 14)
- γ) Έλεγχος επαγόμενης εναλλασσόμενης τάσης μεταξύ ακροδεκτών και δοχείου λαδιού (παράγραφος 15)
- δ) Δοκιμή κρουστικής τάσης μεταξύ ακροδεκτών και δοχείου λαδιού (παράγραφος 16)
- ε) Δοκιμή βραχυκυκλώματος (παράγραφος 16)

Οι διαθέσιμοι πυκνωτές ελέγχθηκαν στο εργαστήριο υψηλών τάσεων

- α) ως προς την χωρητικότητά τους με αναλυτή ισχύος
- β) Ως προς τις απώλειές τους με την διαθέσιμη γέφυρα Schering του εργαστηρίου
- γ) Σε επαγόμενη τάση μεταξύ ακροδεκτών και δοχείου λαδιού
- δ) και σε κρουστική τάση μεταξύ ακροδεκτών και δοχείου λαδιού.

#### 4.5 Συμπεράσματα

Πριν προβούμε στην συνδεσμολογία του κυκλώματος παραγωγής κρουστικών ρευμάτων, οφείλαμε να επιβεβαιώσουμε ότι ο διαθέσιμος εξοπλισμός ήταν κατάλληλος αλλά και ασφαλής για τους χρήστες. Δεδομένο ότι ο μετασχηματιστής υψηλής τάσης, τα στοιχεία αντίστασης, καταμεριστής μέτρησης συνεχούς τάσης, παλμογράφος, αντίσταση μέτρησης shunt και ανόρθωση λειτουργούν τακτικά στις δοκιμές του εργαστηρίου, ιδιαίτερη προσοχή δώσαμε στους πυκνωτές, οι οποίοι θα χρησιμοποιηθούν για πρώτη φορά και ήταν αποθηκευμένοι για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Κατόπιν δοκιμών, επιβεβαιώσαμε πως το σύνολο του διαθέσιμου εξοπλισμού πως ήταν κατάλληλος για την χρήση του στα πλαίσια της εργασίας αλλά και για τις μελλοντικές ανάγκες του εργαστηρίου.

## Κεφάλαιο 5: Θεωρητική προσέγγιση

### 5.1 Εισαγωγή

Για το υπολογιστικό μέρος των κυματομορφών της γεννήτριας θα χρησιμοποιήσουμε το πρόγραμμα MATHCAD. Με αυτό και για τις διαθέσιμες αντιστάσεις, πυκνωτές, επαγωγή, θα λύσουμε την διαφορική εξίσωση του ισοδύναμου κυκλώματος και θα ελέγξουμε σε κάθε περίπτωση αν η κυματομορφή που λήφθηκε είναι σύμφωνα με τα όρια που ορίζουν οι κανονισμοί. Ο έλεγχος αυτός θα πραγματοποιηθεί χρησιμοποιώντας το διαθέσιμο προγραμματιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε από το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων [1]. Εν συνεχεία θα προχωρήσουμε στην εκτέλεση των δοκιμών και τα αποτελέσματα αυτών θα συγκριθούν με υπολογισμένα.

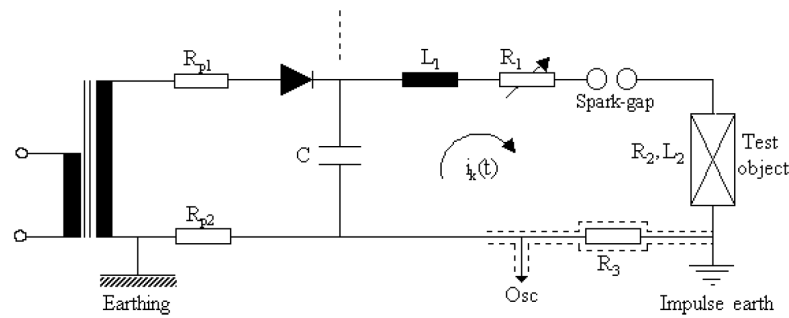
Θα περιοριστούμε στην μελέτη και εκτέλεση και εκτέλεση εκθετικών κρουστικών, καθώς αυτά έχουν ενδιαφέρον για το εργαστήριο.

### 5.2 Μαθηματικό μοντέλο και η επίλυσή του (λύσεις διαφορικών)

Με το πρόγραμμα του Εργαστηρίου υψηλών τάσεων υπολογίζονται οι παράμετροι του ρεύματος κρουστικής και τα στοιχεία της γεννήτριας και εξάγονται αρκετά σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με τη διαμόρφωση του συστήματος. Ο σχεδιαστής καθορίζει τα στοιχεία κυκλώματος και αξιολογείται η κυματομορφή κρουστικού ρεύματος, καθώς και οι χρονικές παράμετροι αυτής. Τα όρια που καθορίζονται από τα διεθνή πρότυπα και οι επιτρεπόμενες ανοχές λαμβάνονται υπόψη μέσω των υπολογισμών, γεγονός που καθιστά τη μέθοδο πολύ ακριβή. Εξάγονται επίσης συμπεράσματα, δοκιμάζοντας την αναπτυγμένη μέθοδο και χρησιμοποιώντας διάφορες τιμές στοιχείων [1].

Στο παρακάτω κύκλωμα γεννήτριας κρουστικού ρεύματος πυκνωτής ή μια σειρά πυκνωτών, φορτίζεται σε υψηλή τάση DC ίση με  $U_0$ . Η συνολική χωρητικότητα  $C$  του κυκλώματος περιλαμβάνει επίσης την χωρητικότητα του δοκιμίου. Η επαγωγή  $L$  περιλαμβάνει ένα επαγωγικό πηνίο αέρα-πυρήνα  $L_1$  που προστίθεται στο κύκλωμα για τη ρύθμιση της αποσβεσμένης ταλάντωσης, την επαγωγή  $L_2$  του δοκιμίου και της σκέδασης των αγωγών του κυκλώματος.





Σχήμα 5.2.1

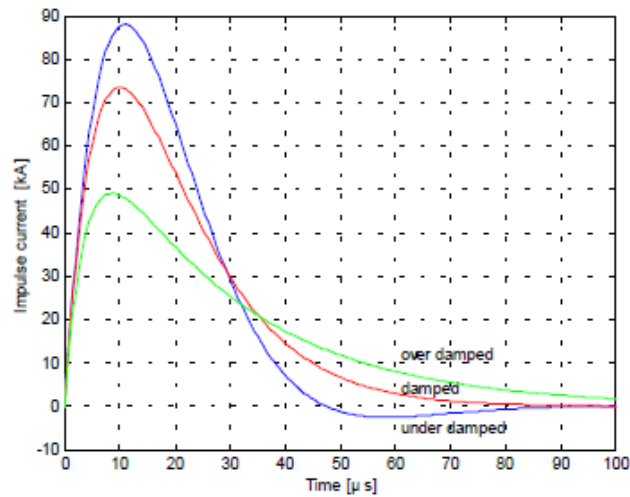
Κύκλωμα παραγωγής κρουστικών εκθετικών ρευμάτων ( $C$ : πυκνωτής,  $L1$ : επαγωγή,  $L2$ : επαγωγή δοκιμίου,  $R1$ : αντίσταση απόσβεσης,  $R2$ : εσωτερική αντίσταση δοκιμίου,  $R3$ : αντίσταση μέτρησης,  $R_{p1}$ ,  $R_{p2}$ : αντιστάσεις φόρτισης,  $Osc$ : παλμογράφος).

Η συνολική αντίσταση  $R$  του βρόχου είναι γενικά πολύ χαμηλή και περιλαμβάνει την αντίσταση μέτρησης  $R_3$ , την αντίσταση  $R_2$  του δοκιμίου, τους αγωγούς κυκλώματος καθώς και οποιαδήποτε άλλη αντίσταση  $R_1$  που προστίθεται στο κύκλωμα για την εξασθένηση των ταλαντώσεων. Οι αντιστάσεις φόρτισης  $R_{p1}$  και  $R_{p2}$  του κυκλώματος δεν συμβάλλουν στην αντίσταση του βρόχου εκφόρτισης.

Το ρεύμα εκφόρτισης  $i_k(t)$  μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση του συστήματος τη στιγμή σκανδαλισμού του σπινθηριστή:

$$U_0 = Ri_k(t) + L \frac{di_k(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i_k(t) dt \quad (5.2.1)$$

Αυτή η εξίσωση έχει τρεις λύσεις, οι οποίες αντιστοιχούν σε τρεις ξεχωριστές συνθήκες εκφόρτισης του κρουστικού ρεύματος. Ο τύπος εκφόρτισης καθορίζεται από την τιμή του όρου  $R^2 - 4L/C$ . Εάν η αντίσταση  $R$  ρυθμιστεί ακριβώς για να μηδενίσει τον όρο, τότε η ταλάντωση αποσβένεται. Με μικρότερη αντίσταση, ο όρος παίρνει αρνητικές τιμές και η ταλάντωση του ρεύματος είναι υπό-αποσβεσμένη. Για μεγαλύτερη τιμή αντίστασης, ο όρος γίνεται θετικός και η ταλάντωση είναι υπέρ-αποσβεσμένη, όπως φαίνεται στο σχήμα 5.1.2..



Σχήμα 5.2.2

Περιπτώσεις απόσβεσης εκθετικών κρουστικών ρευμάτων (*overdamped*: υπεραποσβεσμένη, *damped*: αποσβεσμένη, *underdamped*: υπο-αποσβεσμένη).

Η αντίσταση  $R$  είναι το μεταβαλλόμενο στοιχείο της γεννήτριας, ενώ η χωρητικότητα  $C$  και η επαγωγή  $L$  θεωρούνται σταθερές.

Λύνοντας την (1), όπου

$$Z = \sqrt{|R^2 - 4L/C|} \quad (5.2.2)$$

Παίρνουμε τρεις λύσεις, μία για κάθε τύπο εκφόρτισης. Για  $R^2 = 4L/C$  και αποσβεσμένης

$$i_k(t) = \frac{U_0}{L} t e^{-\frac{R}{2L}t} \quad (5.2.3)$$

Και ο χρόνος που διαρκεί το ρεύμα να γίνει από μηδέν μέγιστο είναι

$$T = \frac{2L}{R} \quad (5.2.4)$$

Ενώ το μέγιστο ρεύμα είναι,

$$I_{max} = \frac{2U_0}{eL} \quad (5.2.5)$$

Εναλλακτικά, εφόσον  $R^2 > 4L/C$  η κυματομορφή είναι υπέρ-αποσβεσμένη και το ρεύμα είναι ίσο με

$$i_k(t) = \frac{U_0}{Z} (e^{-\frac{R-Z}{2L}t} - e^{-\frac{R+Z}{2L}t}) \quad (5.2.6)$$

Ο δε χρόνος που διαρκεί το ρεύμα να γίνει από μηδέν μέγιστο είναι

$$T = \frac{L}{Z} \ln\left(\frac{R+Z}{R-Z}\right) \quad (5.2.7)$$

Στην περίπτωση αυτή το μέγιστο ρεύμα ισούται με

$$I_{max} = \frac{U_0}{Z} (e^{-\frac{R-Z}{2L}T} - e^{-\frac{R+Z}{2L}T}) \quad (5.2.8)$$

Τέλος εάν  $R^2 < 4L/C$  η κυματομορφή είναι υπό-αποσβεσμένη και το ρεύμα είναι ίσο με

$$i_k(t) = \frac{2U_0}{Z} e^{-\frac{R}{2L}t} \sin(\omega t) \quad (5.2.9)$$

όπου,

$$\omega = \frac{Z}{2L} \quad (5.2.10)$$

εδώ ο χρόνος που απαιτείται ώστε το ρεύμα να φτάσει στην πρώτη κορυφή είναι,

$$T = \frac{2}{\omega} \arctan \frac{\sqrt{R^2 + (2\omega L)^2 - R^2}}{2\omega L} \quad (5.2.11)$$

Το δε μέγιστο ρεύμα ισούται με,

$$I_{max} = \frac{2U_0}{Z} e^{-\frac{R}{2L}T} \sin(\omega T) \quad (5.2.12)$$

και ο χρόνος  $T'$  μέχρι το ρεύμα να φτάσει στην πρώτη του αρνητική μέγιστη τιμή είναι,

$$T' = T + \frac{\pi}{\omega} \quad (5.2.13)$$

Η εξίσωση (9) για  $t=T'$  γίνεται,

$$I_{min} = -I_{max} \cdot e^{-\frac{R}{Z}} \quad (5.2.14)$$

Το πρότυπο 60060-1 καθορίζει τον χρόνο μετάπου  $t_f$  ως 1,25 φορές το χρονικό διάστημα μεταξύ των στιγμών που το ρεύμα θα φτάσει το 10% και 90% της μέγιστης τιμής του. Ο χρόνος αυτός μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας την αυτεπαγωγή του κυκλώματος.

Ο χρόνος ημίσεως κύματος  $t_h$  ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται ώστε το ρεύμα αφού έχει γίνει μέγιστο και καθώς μειώνεται πιάσει το ήμισυ της μέγιστης τιμής από την «εικονική» χρονική στιγμή μηδέν, . Ο χρόνος αυτός μπορεί να ελεγχθεί μεταβάλλοντας ταυτόχρονα την αντίσταση και την αυτεπαγωγή του κυκλώματος.

Ο λόγος  $t_f/t_h$  έχει τυποποιηθεί για τα εκθετικά κρουστικά ρεύματα σε τιμές 1/20  $\mu$ s, 4/10  $\mu$ s, 8/20  $\mu$ s και 30/80  $\mu$ s με ανοχή +/- 10%.

Επιλύοντας την εξίσωση (3) στην περίπτωση εκθετικά αποσβεσμένης ταλάντωσης (όπου  $R^2 = 4L/C$ ) η οποία πρωτίστως μας ενδιαφέρει προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις,

$$t_f = 1,43 \frac{L}{R} \quad (5.2.15)$$

$$t_h = 5,42 \frac{L}{R} \quad (5.2.16)$$

Ο λόγος των

$$\frac{t_f}{t_h} = 0.26 \quad (5.2.17)$$

είναι ανεξάρτητος των  $R$ ,  $L$ ,  $C$ . Στον παρακάτω πίνακα 1 φαίνονται οι τιμές του  $\frac{t_f}{t_h}$  για τις σύνθετες κυματομορφές με όρια +/-10 % σύμφωνα με το πρότυπο IEC60060-1.

Impulse	1/20s	4/10s	8/20s	30/80s
$t_f/t_h$	0.04-0.06	0.33-0.49	0.33-0.49	0.31-0.46

Πίνακας 5.2.1

*Όρια χρονικών σταθερών τυποποιημένων εκθετικών κρουστικών ρευμάτων*

Από τον παραπάνω πίνακα προκύπτει ότι είναι αδύνατο να παραχθεί αποσβεσμένη ταλάντωση παρά υπέρ ή υπό- αποσβεσμένη. Μειονέκτημα της υπέρ- αποσβεσμένης είναι ότι μειώνεται το μέγιστο πλάτος του ρεύματος και μαζί ο συντελεστής χρησιμοποίησης  $I_{max}/U_0$ . Η δε υπό- αποσβεσμένη μεγιστοποιεί τον συντελεστή χρησιμοποίησης αλλά απαιτείται προσοχή στο μέτωπο του πρώτου αρνητικού παλμού καθώς δεν πρέπει να παραβιαστεί το όριο του προτύπου το οποίο ορίζει ως,

$$\left| \frac{I_{min}}{I_{max}} \right| \leq 0,2 \quad (5.2.18)$$

Αντικαθιστώντας στην (18) τις τιμές των  $I_{max}$  και  $I_{min}$  των εξισώσεων (12) και (14) παίρνουμε,

$$Z \leq \frac{\pi}{\ln 0,2} R \quad (5.2.19)$$

Αντικαθιστώντας το  $Z$  στην εξίσωση (2) παίρνουμε την ελάχιστη τιμή της χρησιμοποιούμενης αντίστασης του βρόγχου εκφόρτισης

$$R \geq 1,1\sqrt{L/C} \quad (5.2.20)$$

Δεδομένου ότι οι τιμές των πυκνωτών και διαθέσιμων αντιστάσεων είναι περιορισμένες, για διάφορους συνδυασμούς αυτών και με την χρήση των παραπάνω εξισώσεων θα ελέγξουμε αν οι προσδοκώμενη κυματομορφή είναι εντός των προδιαγραφών. Προς διευκόλυνση θα λύσουμε τις παραπάνω εξισώσεις με την χρήση του PTC Mathcad Prime όπως φαίνεται παρακάτω,

$$U_0 \equiv 35 \cdot 10^3$$

$$C := 20 \cdot 10^{-6}$$

$$L := 4.468 \cdot 10^{-6}$$

$$R := 0.58$$

$$Z := \sqrt{\left| R^2 - 4 \cdot \frac{L}{C} \right|} = 0.746$$

$$\omega := \frac{Z}{2 \cdot L} = 8.353 \cdot 10^4$$

$$T := \begin{cases} \text{if } Z = 0 \\ \quad \left\| 2 \cdot \frac{L}{R} \right\| \\ \text{else} \\ \quad \text{if } R^2 > 4 \cdot \frac{L}{C} \\ \quad \quad \left\| \frac{L}{Z} \cdot \ln \left( \frac{R+Z}{R-Z} \right) \right\| \\ \quad \text{else} \\ \quad \quad \left\| \frac{2}{\omega} \cdot \text{atan} \left( \frac{\left( \sqrt{R^2 + (2 \cdot \omega \cdot L)^2} - R \right)}{2 \cdot \omega \cdot L} \right) \right\| \end{cases}$$

$$T := \begin{cases} \text{if } Z = 0 \\ \quad \left\| 2 \cdot \frac{L}{R} \right\| \\ \text{else} \\ \quad \text{if } R^2 > 4 \cdot \frac{L}{C} \\ \quad \quad \left\| \frac{L}{Z} \cdot \ln \left( \frac{R+Z}{R-Z} \right) \right\| \\ \quad \text{else} \\ \quad \quad \left\| \frac{2}{\omega} \cdot \text{atan} \left( \frac{\left( \sqrt{R^2 + (2 \cdot \omega \cdot L)^2} - R \right)}{2 \cdot \omega \cdot L} \right) \right\| \end{cases}$$

$$T := \begin{cases} \text{if } Z = 0 \\ \quad \left\| 2 \cdot \frac{L}{R} \right\| \\ \text{else} \\ \quad \text{if } R^2 > 4 \cdot \frac{L}{C} \\ \quad \quad \left\| \frac{L}{Z} \cdot \ln \left( \frac{R+Z}{R-Z} \right) \right\| \\ \quad \text{else} \\ \quad \quad \left\| \frac{2}{\omega} \cdot \text{atan} \left( \frac{\left( \sqrt{R^2 + (2 \cdot \omega \cdot L)^2} - R \right)}{2 \cdot \omega \cdot L} \right) \right\| \end{cases}$$

$$T := \begin{cases} \text{if } Z = 0 \\ \left| \left| \frac{2 \cdot L}{R} \right. \right. \\ \text{else} \\ \left| \left| \text{if } R^2 > 4 \cdot \frac{L}{C} \right. \right. \\ \left| \left| \left| \frac{L}{Z} \cdot \ln \left( \frac{R+Z}{R-Z} \right) \right. \right. \\ \text{else} \\ \left| \left| \frac{2}{\omega} \cdot \text{atan} \left( \frac{(\sqrt{R^2 + (2 \cdot \omega \cdot L)^2} - R)}{2 \cdot \omega \cdot L} \right) \right. \right. \end{cases}$$

$$i_k(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 901.854 \\ 1.79 \cdot 10^3 \\ 2.665 \cdot 10^3 \\ 3.526 \cdot 10^3 \\ 4.374 \cdot 10^3 \\ 5.208 \cdot 10^3 \\ \vdots \end{bmatrix}$$

$$I_{min} = -3.179 \cdot 10^3$$

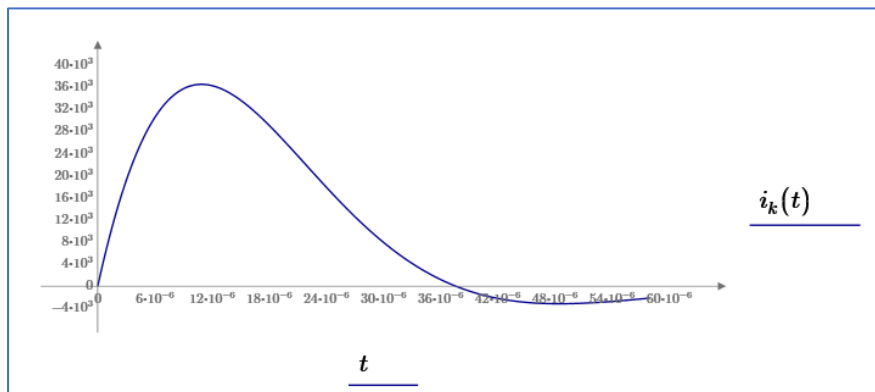
$$I_{max} = 37 \cdot 10^3$$

$$\left| \frac{I_{min}}{I_{max}} \right| = 0.087$$

$$t_f := 1.43 \cdot \frac{L}{R} = 1.102 \cdot 10^{-5}$$

$$t_h := 5.42 \cdot \frac{L}{R} = 4.175 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{t_f}{t_h} = 0.264$$



Σχήμα 5.2.3

Υπολογιζόμενο κρουστικό ρεύμα με την χρήση του προγράμματος του εργαστηρίου υψηλών τάσεων και του MATHCAD

Στην συνέχεια θα προβούμε στις αντίστοιχες συνδεσμολογίες, θα μετρήσουμε εκ νέου τις τιμές των στοιχείων του κυκλώματος με τον διαθέσιμο εργαστηριακό εξοπλισμό και θα εκτελέσουμε τα πειράματα. Από τον παλμογράφο θα λάβουμε τις χρονικές παραμέτρους των κυματομορφών. Στην περίπτωση που οι ληφθείσες τιμές είναι εκτός των ορίων και λαμβάνοντας τις παραπάνω παραδοχές, θα αυξομειώσουμε τις τιμές των αντιστάσεων/αυτεπαγωγών ώστε να επιτύχουμε πειραματικές τιμές εντός προδιαγραφών. Τις τιμές αυτές θα τις αξιολογήσουμε εκ νέου με τις παραπάνω εξισώσεις καθώς και με την παρακάτω με την χρήση του PTC Mathcad Prime.

### 5.3 Χρήση ηλεκτρονικού προγράμματος MATHCAD

Με το μαθηματικό πρόγραμμα PTC Mathcad Prime θα λύσουμε την διαφορική εξίσωση της κρουστικής ρεύματος για τις διάφορες τιμές των στοιχείων του κυκλώματος και με χρήση του μετασχηματισμού Laplace. Η επίλυση είναι η παρακάτω,

$$U_0 \equiv 35 \cdot 10^3$$

$$C := 20 \cdot 10^{-6}$$

$$L := 4.468 \cdot 10^{-6}$$

$$R := 0.58$$

$$i_k''(t) \cdot R + L \cdot i_k'(t) + \frac{1}{C} \cdot i_k(t) = 0$$

$$i_k(t) := \frac{\frac{U_0}{L}}{s^2 + \frac{R}{L} \cdot s + \frac{1}{L \cdot C}} \xrightarrow[\text{invlaplace, s}]{\text{float, 10} \atop \text{expand, s}} 93776.16888 \cdot e^{-64905.99821 \cdot t} \cdot \sin(83533.82993 \cdot t)$$

$$I_{max} := i_k(\text{maximize}(i_k, t_{max})) = 3.651 \cdot 10^4$$

$$I_{min} := i_k(\text{minimize}(i_k, t_{min\_guess})) = -3.174 \cdot 10^3$$

$$\left| \frac{I_{min}}{I_{max}} \right| = 0.087$$

$$t_{10} := \text{root}\left(h(t), t, 0, \frac{t_{max}}{10}\right) = 4.809 \cdot 10^{-7}$$

$$t_{50} := \text{root}(k(t), t, t_{max}, 5 \cdot R \cdot C) = 2.382 \cdot 10^{-5}$$



$$t_{90} := \text{root}(g(t), t, 0, t_{max}) = 6.997 \cdot 10^{-6}$$

$$t_0 := \frac{-\beta}{a} = -3.335 \cdot 10^{-7}$$

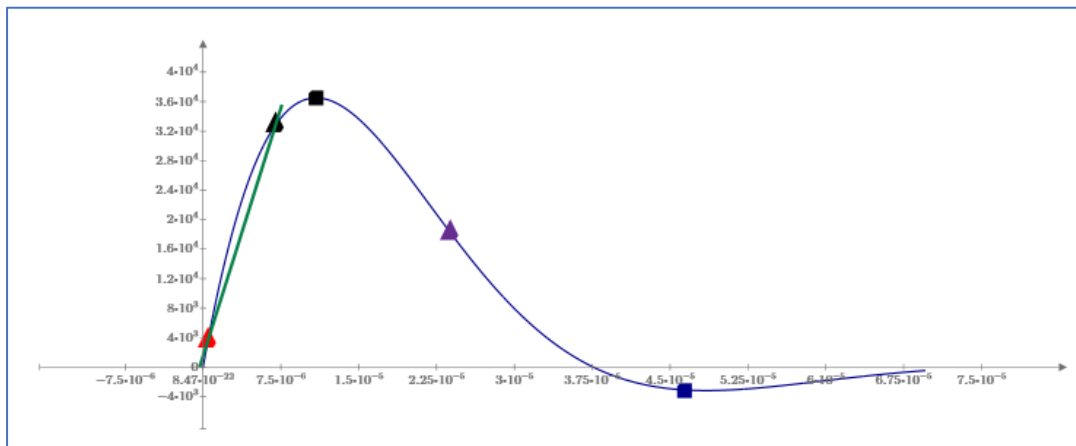
$$t_f := \begin{cases} \text{if } t_0 < 0 \\ \quad \left\| \left\| t'' + |t_0| \right\| \right. \\ \quad \text{else} \\ \quad \left\| \left\| t'' - |t_0| \right\| \right. \end{cases}$$

$$t_f = 8.14 \cdot 10^{-6}$$

$$t_h := \begin{cases} \text{if } t_0 < 0 \\ \quad \left\| \left\| t_{50} + |t_0| \right\| \right. \\ \quad \text{else} \\ \quad \left\| \left\| t_{50} - |t_0| \right\| \right. \end{cases}$$

$$t_h = 2.42 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{t_f}{t_h} = 0.3372$$



Σχήμα 5.3.1

Υπολογιζόμενο κρουστικό ρεύμα  $i_k(t)$  με την χρήση επίλυσης διαφορικών εξισώσεων κατά Laplace στο MATHCAD

Στον παραπάνω υπολογισμό ορίζουμε την τάση φόρτισης των πυκνωτών  $U_0$ , την χωρητικότητα  $C$  αυτών, την αυτεπαγωγή του κυκλώματος  $L$  και την συνολική αντίσταση του κυκλώματος  $R$ .

Υπολογίζονται οι χρονικές σταθερές  $t_f$  μετώπου,  $t_h$  ημίσεως κύματος, οι συντελεστές  $\frac{t_f}{t_h} = 0.26$  και  $\left| \frac{I_{min}}{I_{max}} \right|$  καθώς και μέγιστο θετικό και πρώτο μέγιστο αρνητικό ρεύμα  $I_{max}$  και  $I_{min}$ .

Από τις παραπάνω τιμές εκτιμούμε αν η εκάστοτε κρουστική που εκτελέσαμε είναι εντός ή εκτός των προδιαγραφών.

## Κεφάλαιο 6: Ανάπτυξη διάταξης

### 6.1 Εισαγωγή

Με γνώμονα το παρακάτω κύκλωμα και τον διαθέσιμο εξοπλισμό, θα ελέγξουμε με την χρήση μαθηματικών εργαλείων, τις δυνατές κυματομορφές, βάση κανονισμών, που θα μπορούσαμε να πετύχουμε. Εν συνεχεία θα διαστασιολογήσουμε και ελέγξουμε την αξιοπιστία του εξοπλισμού. Τέλος θα προβούμε στην συνδεσμολογία του κυκλώματος και σταδιακά και ακολουθώντας του υπολογισμούς μας θα προβούμε στις δοκιμές.

### 6.2 Διαστασιολόγηση των επιμέρους διατάξεων

#### 6.2.1 Ο πυκνωτής

Στην διάθεσή μας έχουμε 16 τεμάχια πυκνωτών μέσης τάσης του οίκου Heafely, χωρητικότητας 2,5 μF ο καθένας και τάσης φόρτισης 50 kV. Οι πυκνωτές θα τοποθετηθούν σε μεταλλική τροχήλατη βάση και θα συνδεθούν με μπάρες χαλκού. Θα προβλεφθεί να παραλληλίζονται έως και οι 16.

#### 6.2.2 Το πηνίο

Από δοκιμές με το πρόγραμμα υπολογισμού Mathcad, και δια διάφορες τιμές αντιστάσεων, προκύπτει ότι η αυτεπαγωγή του πηνίου δεν θα ξεπεράσει την τιμή των 100μHenry. Για τιμή τόσο χαμηλή κατασκευάσαμε πηνίο αέρος, άνευ σιδηρού πυρήνα, με ενδιάμεσες λήψεις. Σύρμα 2,2 mm τυλίχτηκε σε σωλήνα βακελίτη, ακτίνας 49 mm. Οι συνολικές σπείρες ήταν 155, με ενδιάμεσες λήψεις στις 87 και 52 σπείρες. Για τον λόγο αυτό κατασκευάσαμε πηνίο χρησιμοποιώντας, χρησιμοποιώντας τον τύπο (3.3.2.1) της παραγράφου 3.2.2.

$$L = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot N^2 \cdot A}{l}$$

Όπου,

$l=0,395m$  είναι το μήκος του πηνίου σε m,

$A= \pi*(0,049)^2= 0,007543$  το εμβαδό του σωλήνα σε  $m^2$

$N=155$  ο αριθμός των σπειρών

$L$  η αυτεπαγωγή σε Henry

Οι θεωρητικές και μετρούμενες τιμές όλων των δυνατών συνδυασμών σπειρών, είναι οι παρακάτω,

N	L θεωρητικό (μH)	L μετρημένο (μH)
23	12.7	13
48	55.3	56
71	121.0	122
84	169.3	171
107	274.7	278
155	576.5	583

Πίνακας 6.2.2.1

*Θεωρητικές και μετρούμενες τιμές της αυτεπαγωγής που κατασκευάσαμε*

### 6.2.3 Η αντίσταση

Το εργαστήριο διαθέτει διαφόρων τιμών αντιστάσεων, είτε shunt, είτε μεταβαλλόμενες εργαστηριακές χρωμονικελίνης, μαγγανίνης ή constantane. Από δοκιμές με το πρόγραμμα υπολογισμού Mathcad, και δια διάφορες τιμές αυτεπαγωγών, προκύπτει ότι η απαιτούμενες αντιστάσεις δεν θα ξεπεράσουν την τιμή των 15 Ω.



Σχήμα 6.2.3.1

*Διαθέσιμα στοιχεία του εργαστηρίου για την υλοποίηση του κυκλώματος*

### 6.2.4 Αγωγοί συνδέσεως

Οι αγωγοί σύνδεσης των στοιχείων μέσης τάσης της διάταξης θα γίνει τους διαθέσιμους συνδέσμους του εργαστηρίου, κατασκευής MWB. Αγωγούς μη διαθέσιμους, θα επιλέξουμε για τον παραλληλισμό των πυκνωτών, την σύνδεση αυτών με τον σπινθηριστή, του σπινθηριστή με τα  $R$ ,  $L$  και μεταξύ των  $R$  και  $L$ . Για την επιλογή των αγωγών, τρεις παραμέτρους πρέπει να λάβουμε υπόψη,

- Η μόνωσή τους
- Το θερμικό ρεύμα εκφόρτισης των πυκνωτών
- Το επιδερμικό φαινόμενο

#### Μόνωση

Στα πλαίσια των αρχικών δοκιμών όλοι οι αγωγοί σύνδεσης μη μονωμένοι. Οι αποστάσεις του αγωγού με γειωμένα σώματα είναι μεγάλες.

#### Θερμικό ρεύμα εκφόρτισης

Ο υπολογισμός της αύξησης της θερμοκρασίας ενός αγωγού λόγω βραχυκυκλώματος βασίζεται στην εφαρμογή της ειδικής θερμοχωρητικότητας. Η ειδική θερμική ικανότητα ενός σώματος (για παράδειγμα ο στερεός αγωγός σε ένα καλώδιο) είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται για την αλλαγή της θερμοκρασίας του σώματος και δίνεται από τον ακόλουθο βασικό τύπο [4]:

$$c_p = \frac{E}{m \cdot \Delta T} \quad (6.2.4.1)$$

όπου  $E$  είναι η ενέργεια που διαχέεται από το σώμα (σε Joules),  $m$  είναι η μάζα του σώματος (σε γραμμάρια) και  $\Delta T$  είναι η αλλαγή της θερμοκρασίας (σε Kelvins).

Η ενέργεια από ένα ρεύμα που ρέει μέσω ενός καλωδίου βασίζεται στον ορισμό του SI για την ηλεκτρική ενέργεια:

$$E = Q \cdot V = i^2 \cdot R \cdot t \quad (6.2.4.2)$$

Όπου είναι  $i$  το ρεύμα (σε Amps),  $R$  είναι η αντίσταση του σώματος μέσω του οποίου ρέει το ρεύμα (σε  $\Omega$ ) και  $t$  είναι η διάρκεια της ροής (σε δευτερόλεπτα). Η μάζα και η αντίσταση ενός αυθαίρετου αγωγίμου σώματος είναι ανάλογη με τις διαστάσεις του σώματος και μπορεί να περιγραφεί σε γενικές γραμμές με το ακόλουθο ζεύγος εξισώσεων:

$$m = \rho_d \cdot A \cdot l \quad (6.2.4.3)$$

$$R = \frac{\rho_r \cdot l}{A} \quad (6.2.4.4)$$

Όπου  $\rho_d$  είναι η πυκνότητα του σώματος (σε  $\text{gmm}^{-3}$ ),  $R$  είναι η αντίσταση του σώματος (σε  $\Omega\text{mm}$ ),  $A$  είναι η διατομή του σώματος (σε  $\text{mm}^2$ ) και  $l$  είναι το μήκος του σώματος (σε  $\text{mm}$ ). Βάζοντας όλες αυτές τις εξισώσεις μαζί και αναδιατάσσοντάς τις, παίρνουμε την τελική εξίσωση για την αδιαβατική αύξηση της θερμοκρασίας βραχυκυκλώματος:

$$\Delta T = \frac{i^2 \cdot t \cdot \rho_r}{A^2 \cdot c_p \cdot \rho_d} \quad (6.2.4.5)$$

Εναλλακτικά από την παραπάνω και για συγκεκριμένο βραχυκύκλωμα, η απαιτούμενη διατομή του αγωγού υπολογίζεται ως,

$$A = \frac{\sqrt{i^2 \cdot t}}{k} \quad (6.2.4.6)$$

όπου,

$$k = \sqrt{\frac{c_p \cdot \rho_d \cdot \Delta T}{\rho_r}} \quad (6.2.4.7)$$

και

$A$ , είναι η ελάχιστη επιφάνεια διατομής του αγωγού καλωδίου ( $\text{mm}^2$ )

$i^2 \cdot t$ , είναι η ενέργεια του βραχυκυκλώματος ( $\text{A}^2\text{s}$ )

$c_p$ , είναι η ειδική θερμική χωρητικότητα του αγωγού καλωδίου ( $\text{Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )

$\rho_d$ , είναι η πυκνότητα του υλικού αγωγού καλωδίου ( $\text{gmm}^{-3}$ )

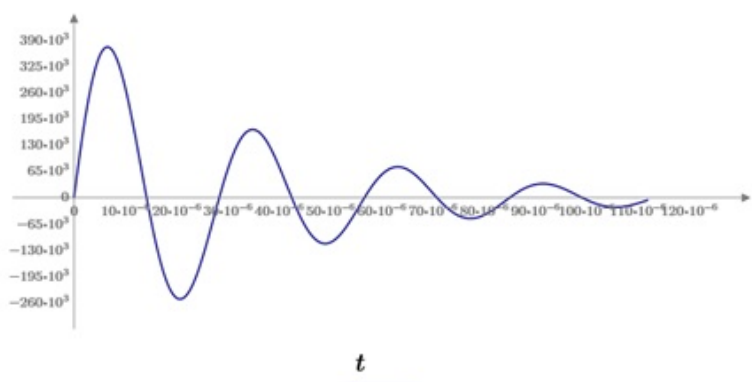
$\rho_r$ , είναι η ειδική αντίσταση του υλικού αγωγού καλωδίου ( $\Omega\text{mm}$ )

$\Delta T$  είναι η μέγιστη επιτρεπόμενη αύξηση θερμοκρασίας ( $^{\circ}\text{K}$ )

Ο αγωγός που θα χρησιμοποιήσουμε είναι χαλκός, για τον οποίο η ειδική θερμική χωρητικότητα είναι  $c_p = 0,385 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$  στους  $25^{\circ}\text{K}$ , η πυκνότητα  $\rho_d$  είναι  $0,00894 \text{ gmm}^{-3}$  και η ειδική αντίσταση  $\rho_r$  είναι  $0,0000202 \text{ }\Omega\text{mm}$ . Η δε επιτρεπτή στιγμιαία αύξηση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  είναι  $85^{\circ}\text{K}$ . Ως εκ τούτου η σταθερά  $k$  ισούται με  $119,74$

Για τον υπολογισμό του  $i^2 \cdot t$  θα χρησιμοποιήσουμε το MATHCAD, ολοκληρώνοντας το τετράγωνο του ρεύματος εκφόρτισης στον χρόνο. Σαν ρεύμα εκφόρτισης θα πάρουμε μια δυσμενής περίπτωση στην οποία θα είναι συνδεδεμένοι και οι 16 πυκνωτές, η τάση φόρτισης θα είναι  $50 \text{ kV}$ , η ελάχιστη αντίσταση ίση με της μετρητικής αντίστασης shunt ( $0,0028 \text{ }\Omega$ ) και με μικρή αυτεπαγωγή  $0,5 \text{ }\mu\text{H}$ .

Στην περίπτωση αυτή το ρεύμα εκφόρτισης είναι το παρακάτω σχήμα 6.2.4.1,



Σχήμα 6.2.4.1

Μέγιστο κρουστικό ρεύμα εκφόρτισης άνευ δοκιμίου

Με μέγιστο ρεύμα κορυφής τα  $373 \text{ kA}$  και  $\int_0^{50 \cdot R \cdot C} |i^2(t)| dt = 1,711 \cdot 10^6$

Άρα η απαιτούμενη διατομή χαλκού είναι  $A = \frac{\sqrt{1,711 \cdot 10^6}}{119,74} = 10,9 \text{ mm}^2$

## Επιδερμικό φαινόμενο

Η αντίσταση  $R$  ενός αγωγού έχει θερμικές απώλειες ίσες με  $i^2$ , όταν διέρχεται από αυτόν ρεύμα  $i$  συνεχές ή εναλλασσόμενο. Στις υψηλές συχνότητες, οι απώλειες χαλκού αυξάνονται λόγω του «επιδερμικού φαινομένου». Το ρεύμα συσσωρεύεται στην επιφάνεια του αγωγού, λόγω του μαγνητικού πεδίου που δημιουργείται. Αυτό είναι άμεσο αποτέλεσμα του νόμου του Faraday, σύμφωνα με τον οποίο το ρεύμα θα ρέει μέσα σε έναν αγωγό για να αντισταχθεί στη ροή εναλλασσόμενου ρεύματος, με τη μορφή δινορρευμάτων. Αυτό αυξάνει την αντίσταση του αγωγού, μειώνοντας την καθαρή περιοχή που είναι διαθέσιμη για την ροή ρεύματος. Το επιδερμικό βάθος  $d$  μπορεί να θεωρηθεί ως το πάχος ενός κοίλου αγωγού που έχει την ίδια αντίσταση με έναν στερεό αγωγό με επιδερμικό φαινόμενο. Το επιδερμικό βάθος δίνεται από την σχέση [6]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}} \quad (6.2.4.8)$$

όπου  $f$  είναι η συχνότητα,  $\sigma$  είναι η αγωγιμότητα του υλικού αγωγού  $7,045 \cdot 10^{-5}$  και  $\mu$  η διαπερατότητα του υλικού (1 για τον χαλκό).

Για χαλκό στα 50 Hz,  $\delta=9.5\text{mm}$  και στα 10 kHz,  $\delta=0.56\text{ mm}$ . Το μεγαλύτερο μέρος του ρεύματος συγκεντρώνεται στο εξωτερικό φλοιό, έτσι ώστε η αγωγιμη περιοχή να μειώνεται καθώς αυξάνεται η συχνότητα.

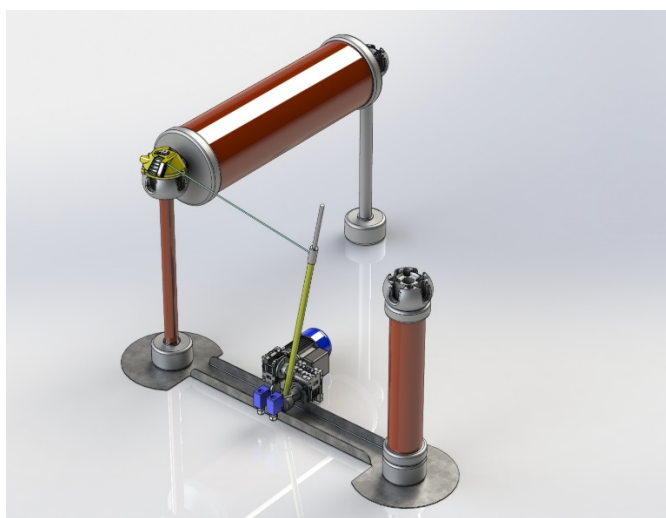
Το επιδερμικό φαινόμενο μπορεί να μειωθεί με τη χρήση πολύκλωνου σύρματος, με κάθε κλώνο μονωμένο και συστραμμένο. Με αυτόν τον τρόπο, όλοι οι κλώνοι σκέλη υποβάλλονται όμοια στο μαγνητικό πεδίο. Η συστροφή των κλώνων διασφαλίζει ότι κάθε κλώνος έχει ίση αυτεπαγωγή κατά το μήκος του σύρματος. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθεί λεπτό φύλλο χαλκού.

Στην συγκεκριμένη εφαρμογή, όπως είδαμε στην παράγραφο 4.2, η μέγιστη συχνότητα είναι αυτή των 250 kHz. Στην συχνότητα αυτή, το επιδερμικό βάθος προκύπτει από την παραπάνω εξίσωση πως είναι 0,134 mm.



Άρα λαμβάνοντας υπόψη τα απαιτούμενα  $10,9 \text{ mm}^2$  διατομής λόγω του θερμικού ρεύματος και το  $0,134 \text{ mm}$  επιδερμικό βάθος, επιλέγουμε φύλλο αλουμινίου φάρδους  $40 \text{ mm}$  και πάχους  $0,5 \text{ mm}$  για τους αγωγούς συνδέσεως.

## 6.2.5 Μεταγωγέας υψηλής τάσης



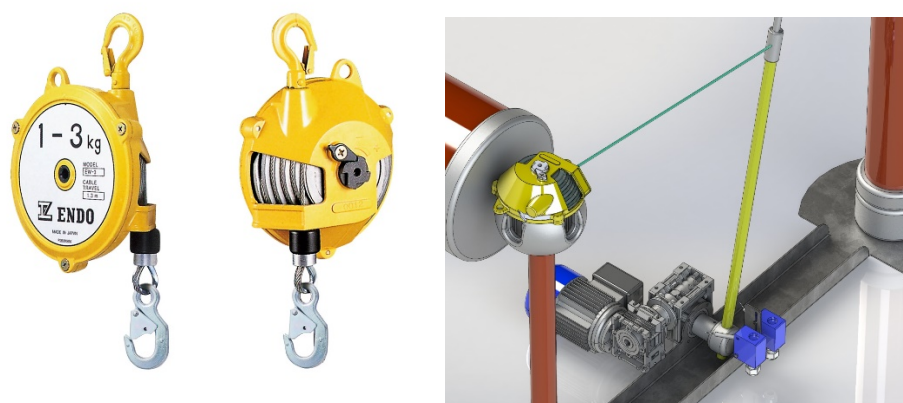
Σχήμα 6.2.5.1

*Μεταγωγέας υψηλής τάσης για την εκφόρτιση των πυκνωτών μέσω αντίστασης*

Ο μεταγωγέας υψηλής τάσης, όπως περιεγράφηκε στην παράγραφο 3.3.7, θα πρέπει να έχει τα εξής χαρακτηριστικά,

- Να έχει στιβαρή κατασκευή και να μην ανατρέπεται κατά την λειτουργία του
- Να μπορεί εύκολα να συνδέεται να τα υπάρχοντα στοιχεία/εξαρτήματα του εξοπλισμού υψηλής τάσης του οίκου MWB
- Να λειτουργεί αυτόνομα με δυνατότητα απομακρυσμένου χειρισμού και να έχει δυνατότητα σύνδεσης με μελλοντικό αυτοματισμό
- Να διατηρεί τις διηλεκτρικές αποστάσεις
- Να φέρει κινητό μπράτσο από μονωτικό υλικό, άκαμπτο και καλής μηχανικής αντοχής
- Στο άκρο του μπράτσου θα υπάρχει ελατήριο το οποίο θα ακουμπάει στο πάνω άκρο του μετρητικού πυκνωτή  $C_m$  ώστε να μην τον ανατρέψει.

- Η ασκούμενη πίεση του ελατηρίου στον ακροδέκτη του πυκνωτή θα είναι 10 NT ώστε να εξασφαλιστεί καλή ηλεκτρική επαφή.
- Το πάνω άκρο του μπράτσου θα είναι συνδεδεμένο συρματόσχοινο. Το συρματόσχοινο από την άλλη μεριά θα περιελίσσεται σε ελατηριωτό μηχανισμό. Ο ελατηριωτός μηχανισμός θα βρίσκεται μόνιμα τοποθετημένος στο μη γειωμένο άκρο της αντίστασης εκφόρτισης. Ο μηχανισμός θα εξασφαλίζει την περιέλιξη (μάζεμα) του συρματόσχοινου κατά την κίνηση του μπράτσου από την θέση 2 στην θέση 1, ενώ θα επιτρέπει την εκτύλιξη του συρματόσχοινου κατά την κίνηση του μπράτσου από την θέση 1 στην θέση 2, διατηρώντας μία προ-ένταση ίση με 10 Nt.
- Η κίνηση του μπράτσου θα περιορίζεται από τερματικούς διακόπτες, η θέση των οποίων θα μπορεί να ρυθμίζεται.
- Η κίνησή του μπράτσου θα έχει διάρκεια 5 sec.



Σχήμα 6.2.5.2

*Ελατηριωτός μηχανισμός περιέλιξης αγωγού γειώσεως*

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις σχεδιάστηκε ο μεταγωγέας υψηλής τάσης, όπως φαίνεται στην παραπάνω φωτογραφία. Η βάση του θα έχει πάχος 4 mm, θα κοπεί σε παντογράφο λέιζερ και θα διαμορφωθεί. Στο μέσο της βάσης θα βρίσκεται ο μηχανισμός κίνησης, ενώ στα άκρα της θα υπάρχουν άξονες 35mm πάνω στους οποίους θα εισέρχονται τα στοιχεία της MWB. Με τον τρόπο αυτό η σύνδεση είναι εύκολη, χωρίς την δυνατότητα ανατροπής των στοιχείων MWB.

Το μπράτσο θα είναι ράβδος εμποτισμένων ινών υάλου με ρητίνη (fiberglass) διαμέτρου 20 mm. Λόγω τούτου θα έχει πολύ υψηλή μηχανική και διηλεκτρική αντοχή.

Για τον μηχανισμό κίνησης του μπράτσου, επιλέγουμε ηλεκτρικό κινητήρα συνδεδεμένο σε γωνιακό κιβώτιο μείωσης, τύπου κορώνα-κοχλία.

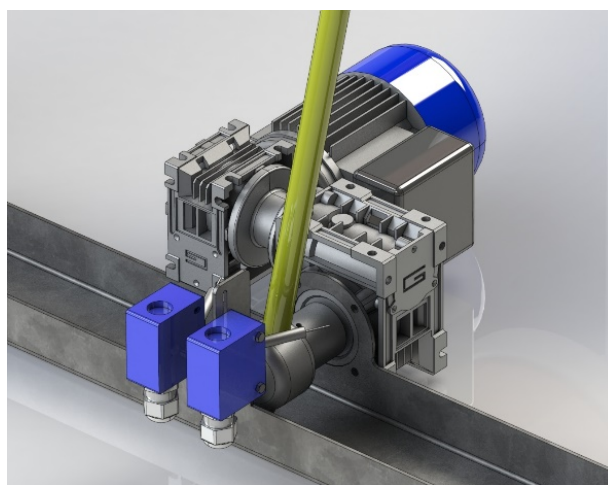
Λόγο της πολύ μικρής ταχύτητας περιστροφής του μπράτσου, 70 μοίρες σε 5 sec, δηλαδή περίπου 2,3 στροφές/λεπτό, θα χρησιμοποιήσουμε 2-βάθμιο γωνιακό μειωτήρα. Επιλέγουμε κινητήρα 4 πόλων (1380 στροφών), πρώτο μειωτήρα με σχέση μετάδοσης 1/80 και δεύτερο μειωτήρα με σχέση μετάδοσης 1/7,5.

Η ισχύς του κινητήρα θα είναι 60 Watt και η ονομαστική ροπή εξόδου του υπολογίζεται σε  $9550 \cdot 0,06 / 1380 = 0,415 \text{ Nt}$ .

Η έξοδος του συστήματος των μειωτήρων και για βαθμό απόδοσης 60% κάθε βαθμίδας, θα είναι  $0,415 \cdot 0,6 \cdot 80 \cdot 0,6 \cdot 7,5 = 89,64 \text{ Nt}$ .

Για μήκος του μπράτσου 0,9 m, αντίσταση ελατηρίου 10 Nt και αντίσταση συρματόσχοινο 10 Nt, η απαιτούμενη ροπή της εξόδου του συστήματος μειωτήρων είναι  $20 \cdot 0,9 = 18 \text{ Nt}$ . Άρα η επιλογή του κινητήρα-μειωτήρων υπερκαλύπτει την απαίτηση.

Το σύστημα συρματόσχοινο με επαναφορά θα είναι του εμπορίου.



Σχήμα 6.2.5.3

*Διβάθμιος μειωτήρας κίνησης του μπράτσου γειώσεως του μεταγωγέα*

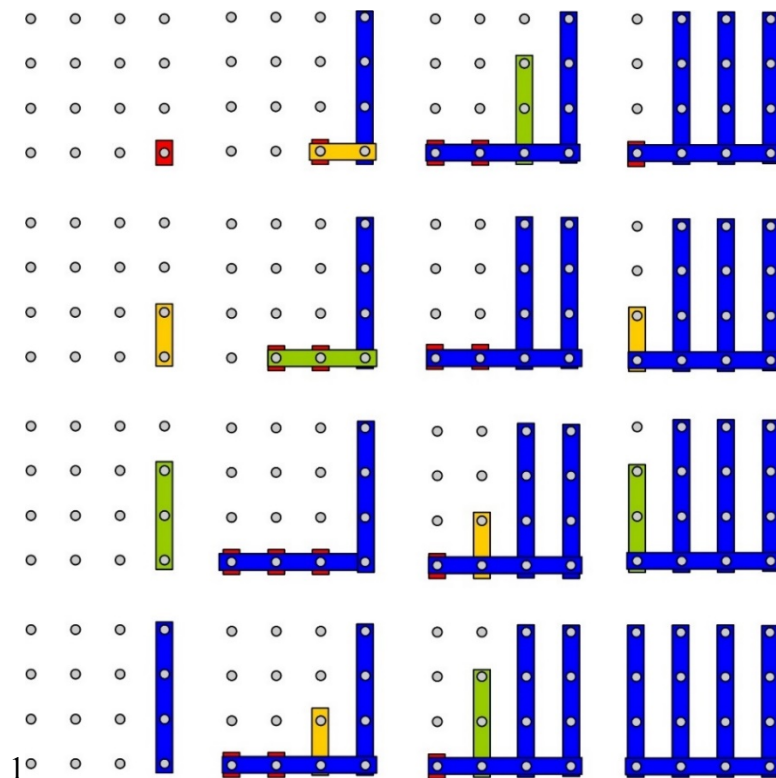
### **Απομακρυσμένος χειρισμός**

Ο επιλεγμένος κινητήρας είναι μονοφασικός. Μέσω ελατηριωτού μεταγωγικού διακόπτη τριών θέσεων 1-0-2, θα ελέγχουμε τον κινητήρα προς τις δύο κατευθύνσεις. Ο

κάθε ένας εκ των δύο τερματικών διακοπών θα διακόπτει την αριστερόστροφη και αντίστοιχα την δεξιόστροφη φορά περιστροφής του κινητήρα. Σε περίπτωση χρήσης ηλεκτρονόμων ή προγραμματιζόμενου ηλεκτρονόμου, ο έλεγχος μπορεί να γίνεται αυτόματα, πχ. με αυτόματη εντολή γείωσης των πυκνωτών μετά από 0,5 δευτερόλεπτο σκανδαλισμού της κρούσης, μη δυνατότητα τροφοδοσίας της διάταξης εάν ο μεταγωγέας δεν βρίσκεται στην θέση 1 ή αν η πόρτα ασφαλείας δεν είναι κλειστή κλπ.

### 6.3 Σταδιακή προσθήκη πυκνωτών/αντιστάσεων/πηγών

Οι πυκνωτές θα συνδεθούν μεταξύ τους με χάλκινους αγωγούς ορθογώνιας διατομής. Για την σταδιακή προσθήκη θα γίνεται με σύνδεση διαφόρων μηκών αγωγών. Για μηχανική αντοχή επιλέχθηκε διατομή χαλκού 50x5 χιλιοστών. Οι αγωγοί κοπήκανε στα επιθυμητά μήκη και διατηρηθήκανε στο μηχανουργείο του εργαστηρίου. Παρακάτω φαίνεται η σταδιακή προσθήκη των πυκνωτών,



Σχήμα 6.3.1

Συνδυασμοί προσθήκης των πυκνωτών εκφόρτισης

## 6.4 Υπολογισμός/σχεδιασμός/κατασκευή βάσης/συναρμολόγηση

Έκαστος πυκνωτής ζυγίζει 100 κιλά. Θα τοποθετηθούν σε απόσταση 32 εκατοστών μεταξύ τους, σε διάταξη 4X4 [24]. Κάθε πυκνωτής φέρει στην βάση του 4 συγκολλημένα παξιμάδια σε τετράγωνη διάταξη.

Επιλέγουμε κάθε τετράδα πυκνωτών να τοποθετηθούν πάνω σε δύο χαλύβδινους δοκούς τοι οποίοι θα φέρουν διαμπερείς οπές μέσω των οποίων με την χρήση κοχλιών θα πακτωθούν οι πυκνωτές. Άρα το βάρος των 4 πυκνωτών θα κατανεμηθεί σε δύο δοκούς, μήκους 1,3 μέτρων. Οι δοκοί θα συγκολληθούν σε τετράγωνο περιμετρικό πλαίσιο, διάστασης 1,3X1,3 μέτρα. Το πλαίσιο θα αποτελείται από 4 δοκούς, τα δύο εκ των οποίων θα φέρει το βάρος των 16 πυκνωτών και των 8 εσωτερικών δοκών. Επιλέγουμε για χαλύβδινους St37 δοκούς μορφής ΠΙ.

Οι εξωτερικοί θα είναι μεγαλύτερης διάστασης τόσο λόγου του μεγαλύτερου φορτίου που θα φέρουν, όσο και γιατί θα εγκλωβίσουν τους εσωτερικούς.



Σχήμα 6.4.1

Βάση των πυκνωτών

**Επιλογή εσωτερικών δοκών.**

$$\text{Φορτίο } Q = \frac{4 \text{ πυκνωτές}}{2 \text{ δοκούς}} = \frac{4 \cdot 100}{2} = 200 \text{ κιλά} = 0,2 \text{ τόνοι}$$

Θεωρούμε ότι το φορτίο είναι διανεμημένο. Από την εξίσωση μέγιστης ροπής φόρτισης,

$$M = \frac{Q \cdot l}{8} A \quad (6.4.1)$$

Υπολογίζουμε την μέγιστη ροπή,

$$M = \frac{Q \cdot l}{8} A = \frac{0,2 \cdot 1,3}{8} = 0,0325 \text{ tn/m}$$

Για ελάχιστο βέλος κάμψης  $\frac{l}{500}$ , από την εξίσωση,

$$I_x = 248 \cdot Ml \quad (6.4.2)$$

Υπολογίζουμε την αναπτυσσόμενη ροπή αδράνειας,

$$I_x = 248 \cdot Ml = 248 \cdot 0,0325 \cdot 1,3 = 10,478 \text{ cm}^4$$

Από τον πίνακα 6.4.1 επιλέγουμε δοκό μορφής Π60 DIN 1026-2 με ροπή αδράνειας  $I_x = 31,6 \text{ cm}^4$

**Επιλογή εξωτερικών δοκών.**

Φορτίο  $Q = \frac{16 \text{ πυκνωτές}}{2 \text{ δοκοίς}} + \text{βάρους 8 εσωτερικών δοκών}$

$$\text{Άρα } Q = \frac{16 \cdot 100}{2} + \frac{1,3 \text{ μέτρα} \cdot 8 \text{ τεμάχια} \cdot 5,07 \text{ κιλά/μέτρο}}{2} = 826,5 \text{ κιλά} = 0,8265 \text{ τόνοι}$$

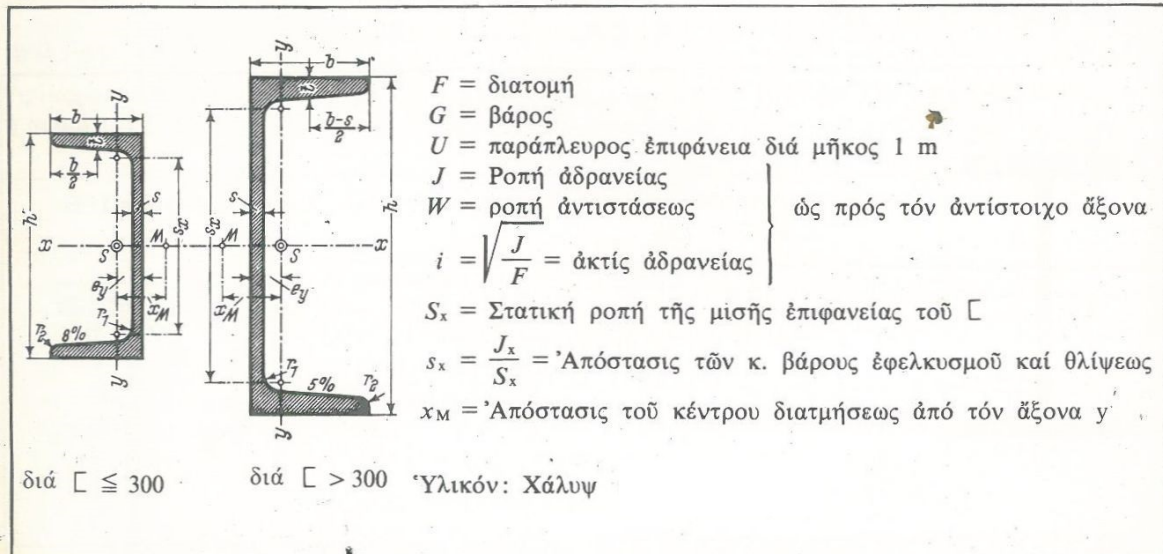
Θεωρούμε ότι το φορτίο είναι διανεμημένο

.

$$\text{Άρα έχουμε μέγιστη ροπή φόρτισης } M = \frac{Q \cdot l}{8} A = \frac{0,8265 \cdot 1,3}{8} = 0,134 \text{ tn/m}$$

Για ελάχιστο βέλος κάμψης  $\frac{l}{500}$  έχουμε,





Συμβολισμός C	Διαστάσεις εἰς mm διά					F cm <sup>2</sup>	G kg/m	U m <sup>2</sup> /m	ὡς πρὸς ἄξονα						S <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>	s <sub>x</sub> cm	ἀπόστασις τοῦ ἄξονος y-y' e <sub>y</sub> cm	x <sub>M</sub> cm
	h	b	s	t = r <sub>1</sub> r <sub>2</sub>					x-x'			y-y'						
				J <sub>x</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>x</sub> cm <sup>3</sup>				i <sub>x</sub> cm	J <sub>y</sub> cm <sup>4</sup>	W <sub>y</sub> cm <sup>3</sup>	i <sub>y</sub> cm						
30 × 15	30	15	4	4,5	2	2,21	1,74	0,103	2,53	1,69	1,07	0,38	0,39	0,42	—	—	0,52	0,74
30	30	33	5	7	3,5	5,44	4,27	0,174	6,39	4,26	1,08	5,33	2,68	0,99	—	—	1,31	2,22
40 × 20	40	20	5	5,5	2,5	3,66	2,87	0,142	7,58	3,79	1,44	1,14	0,86	0,56	—	—	0,67	1,01
40	40	35	5	7	3,5	6,21	4,87	0,199	14,1	7,05	1,50	6,68	3,08	1,04	—	—	1,33	2,32
50 × 25	50	25	5	6	3	4,92	3,86	0,181	16,8	6,73	1,85	2,49	1,48	0,71	—	—	0,81	1,34
50	50	38	5	7	3,5	7,12	5,59	0,232	26,4	10,6	1,92	9,12	3,75	1,13	—	—	1,37	2,47
60	60	30	6	6	3	6,46	5,07	0,215	31,6	10,5	2,21	4,51	2,16	0,84	—	—	0,91	1,50
65	65	42	5,5	7,5	4	9,03	7,09	0,273	57,5	17,7	2,52	14,1	5,07	1,25	—	—	1,42	2,60
80	80	45	6	8	4	11,0	8,64	0,312	106	26,5	3,10	19,4	6,36	1,33	15,9	6,65	1,45	2,67
100	100	50	6	8,5	4,5	13,5	10,6	0,372	206	41,2	3,91	29,3	8,49	1,47	24,5	8,42	1,55	2,93
120	120	55	7	9	4,5	17,0	13,4	0,434	364	60,7	4,62	43,2	11,1	1,59	36,3	10,0	1,60	3,03
140	140	60	7	10	5	20,4	16,0	0,489	605	86,4	5,45	62,7	14,8	1,75	51,4	11,8	1,75	3,37
160	160	65	7,5	10,5	5,5	24,0	18,8	0,546	925	116	6,21	85,3	18,3	1,89	68,8	13,3	1,84	3,56
180	180	70	8	11	5,5	28,0	22,0	0,611	1350	150	6,95	114	22,4	2,02	89,6	15,1	1,92	3,75
200	200	75	8,5	11,5	6	32,2	25,3	0,661	1910	191	7,70	148	27,0	2,14	114	16,8	2,01	3,94
220	220	80	9	12,5	6,5	37,4	29,4	0,718	2690	245	8,48	197	33,6	2,30	146	18,5	2,14	4,20
240	240	85	9,5	13	6,5	42,3	33,2	0,775	3600	300	9,22	248	39,6	2,42	179	20,1	2,23	4,39
260	260	90	10	14	7	48,3	37,9	0,834	4820	371	9,99	317	47,7	2,56	221	21,8	2,36	4,66
280	280	95	10	15	7,5	53,3	41,8	0,890	6280	448	10,9	399	57,2	2,74	266	23,6	2,53	5,02
300	300	100	10	16	8	58,8	46,2	0,950	8030	535	11,7	495	67,8	2,90	316	25,4	2,70	5,41
320	320	100	14	17,5	8,75	75,8	59,5	0,982	10870	679	12,1	597	80,6	2,81	413	26,3	2,60	4,82
350	350	100	14	16	8	77,3	60,6	1,047	12840	734	12,9	570	75,0	2,72	459	28,6	2,40	4,45
380	380	102	13,5	16	8	80,4	63,1	1,110	15760	829	14,0	615	78,7	2,77	507	31,1	2,38	4,58
400	400	110	14	18	9	91,5	71,8	1,182	20350	1020	14,9	846	102	3,04	618	32,9	2,65	5,11

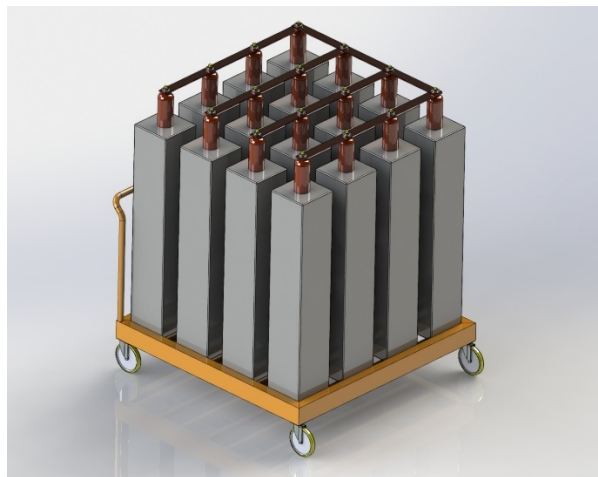
Πίνακας 6.4.1

Ροπές αδράνειας δοκών Π κατά DIN 1062-2

Αναπτυσσόμενη ροπή αδράνειας  $I_x = 248 \cdot Ml = 248 \cdot 0,134 \cdot 1,3 = 43,2 \text{ cm}^4$

Από τον πίνακα 6.4.1 επιλέγουμε δοκό μορφής Π100 DIN 1026 με ροπή αδράνειας  $I_x = 206 \text{ cm}^4$

Βάρος εξωτερικών δοκών  $Q = 1,3\text{μέτρα} \cdot 4\text{τεμάχια} \cdot 10,6\frac{\text{κιλά}}{\text{μέτρο}} = 55,12\text{κιλά}$



Σχήμα 6.4.2

*Βάση με τοποθετημένους τους πυκνωτές*

Οι δοκοί κοπήκαν, διατρήθηκαν και ηλεκτρο-συγκολλήθηκαν στο μηχανουργείο του εργαστηρίου.

Για την μεταφορά των πυκνωτών τοποθετήθηκαν τροχοί ένσφαιροι με επίστρωση πολυουρεθάνης, διαμέτρου 200 χιλιοστών και ικανότητα φόρτισης 500 κιλών.



Σχήμα 6.4.3

*Βάση με τοποθετημένους τους πυκνωτές*



## Κεφάλαιο 7: Μετρήσεις

### 7.1 Εισαγωγή

Αφού κατασκευάσαμε την βάση και τοποθετήσαμε τους πυκνωτές, προβήκαμε στην συνδεσμολογία του κυκλώματος. Λόγω του ότι μεταγωγέα υψηλής τάσης δεν κατασκευάσαμε, χρησιμοποιήσαμε ράβδο για την εκφόρτιση των πυκνωτών. Για την μέτρηση της συνεχούς υψηλής τάσης φόρτισης των πυκνωτών χρησιμοποιήσαμε ωμικό καταμεριστή τάσης..

Οι μεταβαλλόμενες αντιστάσεις (ρεοστάτες) που διαθέτει το εργαστήριο είναι τύπου σύρματος, τυλιγμένου σε μονωτικό σωλήνα και διαθέτουν ενδιάμεση, κινητή λήψη. Λόγω τούτου, οι αντιστάσεις έχουν και αυτεπαγωγή, η οποία αυξομειώνεται καθώς μεταβάλλουμε την τιμή της αντίστασης. Τις τιμές των στοιχείων αντιστάσεων και αυτεπαγωγών, τις επιβεβαιώσαμε σε κάθε στάδιο, με φορητό όργανο μέτρησης  $RLC$  τύπου 885 της BK Instruments. Η κάθε μέτρηση της  $R$ , εμπεριείχε την αντίσταση μέτρησης shunt,  $0,0028 \Omega$ .



Model 885

Σχήμα 7.1.1

Όργανο μέτρησης στοιχείων  $RLC$

Για κάθε τύπο κυματομορφής, λαμβάνοντας υπόψη τις μετρημένες αντιστάσεις και αυτεπαγωγές, υπολογίσαμε θεωρητικά τις απαιτούμενες τιμές αυτών και των πυκνωτών για κάθε μορφή κυματομορφής, 1/20, 4/10, 8/20, 30/80, 10/350.

## 7.2 Μεθοδολογία μέτρησης κρουστικών ρευμάτων

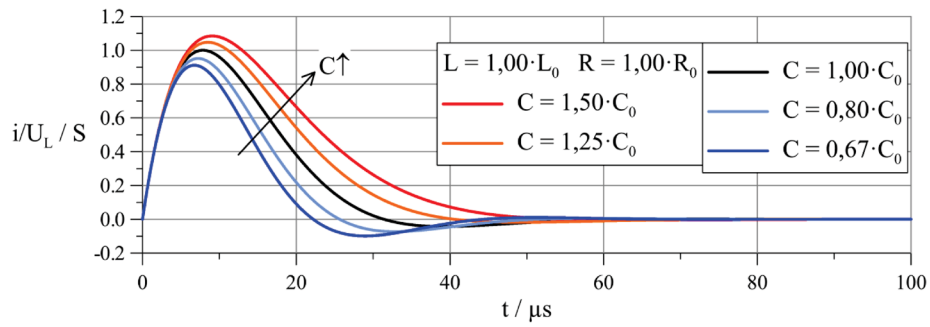
Η τιμή της τάσεως φορτίσεως δεν μας ενδιέφερε ιδιαίτερα, καθώς οι χρόνοι των κυματομορφών είναι ανεξάρτητοι από αυτή. Ξεκινήσαμε να πετύχουμε την 8/20 και εν συνεχεία τις υπόλοιπες. Γνώμονας για την διόρθωση των ληφθέντων κυματομορφών με τα χρησιμοποιούμενα στοιχεία ήταν ο παρακάτω.

ΣΤΟΙΧΕΙΟ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΜΕΤΩΠΟΥ	ΧΡΟΝΟΣ ΗΜΙΣΕΩΣ ΚΥΜΑΤΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ ΜΕΓΙΣΤΟΥ	ΜΕΓΙΣΤΗ ΤΙΜΗ ΡΕΥΜΑΤΟΣ
C↑	↑↑	↑↑↑	↑↑	↑
R↑	↑↑	↑↑	↑↑	↓
L↑	↓	↑	↓	↓↓↓

Πίνακας 7.2.1

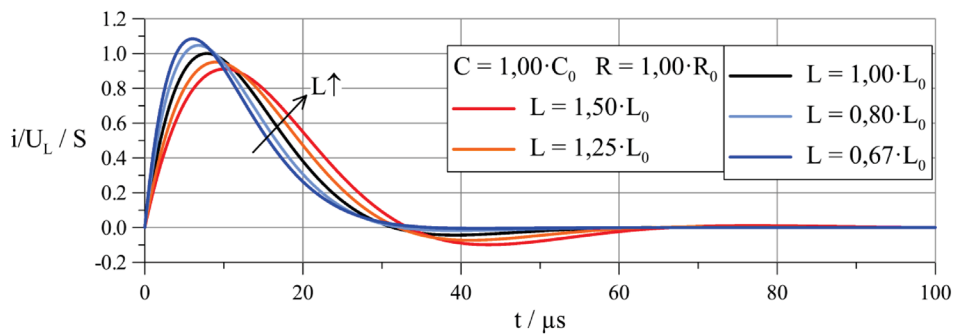
*Εξάρτηση των χρονικών σταθερών του κρουστικού ρεύματος από την μεταβολή της τιμής της χωρητικότητας C των πυκνωτών εκφόρτισης, της αυτεπαγωγής L και της αντίστασης R*

- Αύξηση της R επιφέρει μείωση της ταλάντωσης χωρίς επίπτωση στον χρόνο μετώπου και με κόστος της μείωσης του ρεύματος κορυφής.
- Αύξηση της επαγωγής επιφέρει αύξηση του χρόνου μετώπου και ουράς με κόστος την μείωση του ρεύματος κορυφής.
- Τέλος, αύξηση της C επιφέρει αύξηση του χρόνου ουράς και αύξηση του ρεύματος κορυφής.



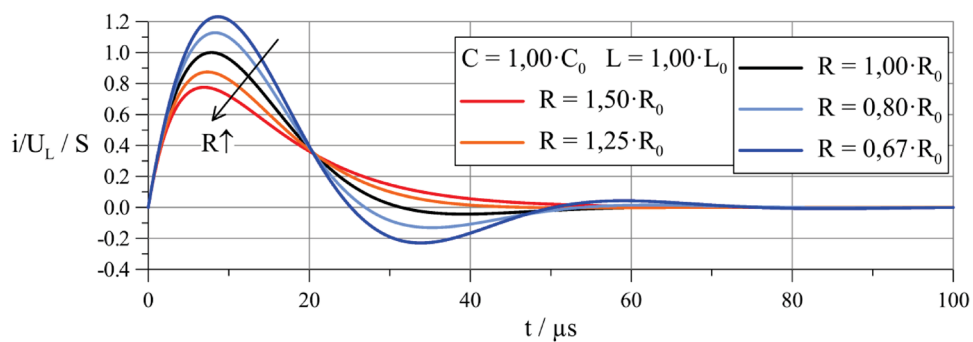
Σχήμα 7.2.1

Εξάρτηση της μορφής του κρουστικού ρεύματος από την μεταβολή της τιμής της χωρητικότητας  $C$  των πυκνωτών εκφόρτισης



Σχήμα 7.2.2

Εξάρτηση της μορφής του κρουστικού ρεύματος από την μεταβολή της τιμής της αυτεπαγωγής  $L$



Σχήμα 7.2.3

Εξάρτηση της μορφής του κρουστικού ρεύματος από την μεταβολή της τιμής της αντίστασης  $R$

Αφού πετύχουμε τους χρόνους των κυματομορφών, θα προσθέσουμε προοδευτικά πυκνωτές ώστε να πάρουμε το μέγιστο κρουστικό ρεύμα για κάθε τύπο κυματομορφής [8].

### 7.3 Καταγραφή μετρήσεων/αποτελέσματα

Στον παρακάτω πίνακα καταγράψαμε τις μετρήσεις των δοκιμών.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
8/20	(1)	35	10	8,00	0,99	19,29	-2,66	8,08	22,20	0,14	-2,22	0,55	20,35	-2,52	7,96	22,10
	(2)	33	20	4,47	0,58	34,50	-2,98	8,32	22,40	0,09	-0,56	1,05	34,42	-2,99	8,14	23,50
	(3)	22	22,5	3,20	0,30	34,50	-9,23	8,23	21,76	0,27	-0,48	1,57	35,25	-9,03	8,26	20,90
	(4)	35	27,5	2,60	0,30	59,00	-11,57	7,28	19,98	0,20	-0,29	1,69	62,91	-10,85	7,81	20,90
	(5)	33	30	2,60	0,27	63,34	-12,66	7,69	21,22	0,20	-0,27	1,92	63,73	-12,58	8,30	21,80
	(6)	33	37,5	1,90	0,24	76,89	-10,84	8,04	21,59	0,14	-0,15	2,33	77,65	-10,73	7,60	20,90
	(7)	33	37,5	1,80	0,30	68,40	-8,53	7,32	20,04	0,12	-0,10	2,07	75,08	-7,77	7,29	20,60
	(8)	33	40	1,85	0,26	75,50	-7,09	8,10	21,15	0,09	-0,12	2,29	76,25	-7,02	7,45	21,40
10/350	(9)	33	37,5	70,00	12,00	2,65	0	14,19	335,57	<0,2	136,53	0,08	3,19	0,00	14,00	338,80
	(10)	33	35	49,50	12,60	2,55	0	9,29	387,30	<0,2	153,10	0,08	2,53	-0,01	9,70	325,50
	(11)	33	37,5	70,00	10,00	3,14	0	17,13	356,21	<0,2	92,53	0,10	3,12	0,00	16,20	290,00
	(12)	33	40	35,00	10,00	3,22	0	8,23	350,00	<0,2	96,50	0,10	3,20	-0,01	8,70	294,70
	(13)	33	37,5	46,00	11,50	2,61	0	9,16	381,00	<0,2	127,34	0,08	2,77	0,00	9,90	318,60
	(14)	50	40	42,00	10,70	6,01	0	9,26	379,00	<0,2	110,29	0,12	4,51	-0,01	9,70	316,00
	(15)	33	40	30,00	0,92	20,33	-3	28,67	82,70	0,14	-2,15	0,62	20,22	-2,82	31,22	85,60
	(16)	33	40	25,00	0,70	24,22	-5,08	27,47	78,00	0,21	-2,01	0,73	24,10	-5,11	29,98	77,90
30/80	(17)	33	40	25,00	1,40	16,73	0	27,01	86,43	<0,2	-0,54	0,51	16,62	0,00	23,76	81,60
	(18)	33	40	34,95	1,00	18,83	0	30,33	87,36	<0,2	-2,50	0,57	18,71	0,00	33,68	92,40
	(19)	32	40	0,63	0,54	53,92	0	1,99	18,33	<0,2	0,23	1,69	54,14	0,00	2,30	18,90
	(20)	33	30	0,50	1,00	31,29	0	1,10	20,94	<0,2	0,93	0,95	31,26	0,00	1,20	23,00
	(21)	35	30	0,70	0,20	101,23	-7,73	3,64	11,98	0,08	-0,05	2,89	109,08	-7,17	3,86	11,40
	(22)	32	40	0,60	0,12	144,78	-24,48	4,39	11,70	0,17	-0,05	4,52	144,11	-24,59	4,52	12,10
	(23)	32	30	0,60	0,10	144,00	-42,23	4,40	10,10	0,29	-0,07	4,50	143,25	-42,45	4,24	10,50
	(23)	32	30	0,60	0,10	144,00	-42,23	4,40	10,10	0,29	-0,07	4,50	143,25	-42,45	4,24	10,50

Πίνακας 7.3.1

Αποτελέσματα μετρήσεων

Επεξήγηση του πίνακα,

- Στην πρώτη στήλη αναφέρονται οι τύποι κυματομορφών
- Στην δεύτερη, ο αύξων αριθμός των μετρήσεών μας
- Στις στήλες 3 έως 5, φαίνεται η επιβαλλόμενη συνεχής τάση φόρτισης των πυκνωτών, η χωρητικότητά τους, η χρησιμοποιούμενη αυτεπαγωγή και αντίσταση που χρησιμοποιήσαμε
- Στις στήλες 7 έως 10 βρίσκονται οι μετρούμενες τιμές του μέγιστου και ελαχίστου ρεύματος καθώς και οι χρόνοι μετώπου και ημίσεως κύματος, όπως αυτές καταγραφήκανε από τον παλμογράφο. Συγκεκριμένα προς διευκόλυνση, στα μπλε κελιά στων στηλών 9 και 10 φαίνονται τα όρια των παραπάνω χρόνων, για κάθε τύπο κυματομορφής, βάση των κανονισμών.
- Στις στήλη 11, υπολογίζουμε τον λόγο  $I_{min}/I_{max}$ , στις περιπτώσεις μη αποσβεσμένων κυματομορφών, ο οποίος βάση κανονισμών οφείλει να είναι μικρότερος του 0,2, όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 5.2
- Στην στήλη 12 ελέγχουμε αν η κυματομορφή είναι κυματομορφή είναι υπό-αποσβεσμένη (αρνητική τιμή κελιού), αποσβεσμένη (τιμή μηδενική) ή υπέρ-αποσβεσμένη (θετική τιμή κελιού).
- Στην στήλη 13 υπολογίζουμε τον συντελεστή χρησιμοποίησης της διάταξης. Αυτός ισούται με τον λόγο του ρεύματος κορυφής προς της τάσης φόρτισης.
- Τέλος, στις στήλες 14 έως 17 βρίσκονται τα υπολογισμένα ρεύματα  $I_{min}$  και  $I_{max}$  καθώς και οι υπολογισμένοι χρόνοι ανόδου και ουράς με την χρήση του προγράμματος MATHCAD.
- Προϋπόθεση για μια δοκιμή να είναι σύμφωνη με τους κανονισμούς, είναι οι τιμές των στηλών 8,9 και 10 **να είναι ταυτόχρονα** εντός των προδιαγεγραμμένων ορίων. Οι τιμές των κελιών των στηλών αυτών που διακρίνονται με πράσινη γραμματοσειρά είναι εντός ορίων. Ως εκ τούτου, οι δοκιμές 4 έως 8 για την 8/20, 13 και 14 για την 10/350, 15 έως 18 για την 30/80, 20 και για την 1/20 είναι εντός προδιαγραφών

## 7.4 Συμπεράσματα

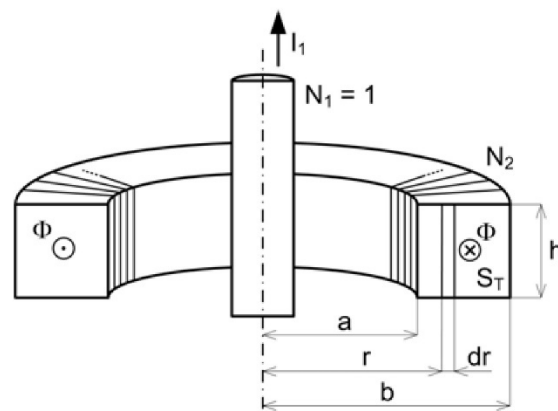
1. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 7.3.1, πέραν της κυματομορφής 4/10, πετύχαμε να πάρουμε κυματομορφές για όλους τους υπόλοιπους τύπους, εντός προδιαγραφών.
2. Ο επί τοις εκατό μέσος όρος σφάλματος μεταξύ των μετρημένων και θεωρητικών τιμών υπολογίστηκε από τον πίνακα σε 0,7% για το  $I_{max}$ , 2% για το  $I_{min}$ , 2,16% για το  $t_f$  και 3,24% για το  $t_h$ . Το γεγονός αυτό καθιστά την μέθοδο ελέγχου/ρύθμισης της διάταξης εξαιρετικά αξιόπιστο. Ο τρόπος μέτρησης των στοιχείων του κυκλώματος και ο μαθηματικός μας υπολογισμός υπερκαλύπτει τις απαιτήσεις ανάπτυξης του συστήματος.
3. Παρόλη την μικρή διαφορά μεταξύ των θεωρητικών με των μετρούμενων τιμών, σε περιπτώσεις που οι θεωρητικές έβγαζαν τις κυματομορφές εκτός κανονισμών, οι μετρήσεις τις έβαζαν εντός. Εν ολίγης, το μαθηματικό πρόγραμμα υπολογισμού είναι χρήσιμο εργαλείο και με μικρές αποκλίσεις από τις μετρήσιμες τιμές, πάρα ταύτα, σε κάθε περίπτωση οι δοκιμές είναι αναγκαίες.
4. Η μεθοδολογία διόρθωσης/ρύθμισης του συστήματος, όπως αυτός περιγράφεται στην παράγραφο 7.2, προκύπτει από τα αποτελέσματα των δοκιμών.  
 Άρα π.χ. στις δοκιμές 16 και 17 φαίνεται πως αύξηση της  $R$  δεν μεταβάλλει τον χρόνο μετώπου, μειώνει δραματικά την ταλάντωση και κατά πολύ το ρεύμα κορυφής.  
 Μεταξύ των δοκιμών 6,7,8 και 15 έως 18 στις οποίες οι τιμές των  $R$  και  $C$  είναι παραπλήσιες, ενώ οι τιμές της  $L$  κατά πολύ μεγαλύτερη, υπάρχει μεγάλη αύξηση του χρόνου μετώπου και μείωση του ρεύματος κορυφής.  
 Τέλος είναι εμφανής η αύξηση του ρεύματος κορυφής με την αύξηση της χωρητικότητας των πυκνωτών.

## Κεφάλαιο 8: Κατασκευή μετρητικών οργάνων

Στα πλαίσια της εργασίας, υπολογίσαμε και κατασκευάσαμε επιπλέον δύο αισθητήρες κρουστικού ρεύματος. Αυτοί είναι επαγωγικοί, ο ένας πηνίο Rogowski, ενώ ο άλλος μετασχηματιστής ρεύματος, όπως περιγράφονται στις παραγράφους 3.3.5.3 και 3.3.5.4 αντίστοιχα. ένας άνευ μαγνητικού πυρήνα, ενώ ο άλλος με πυρήνα νικελίου 80%.

### 8.1 Κατασκευή πηνίων Rogowski

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.3.5.3, το πηνίο Rogowski είναι επαγωγικός αισθητήρας, άνευ πυρήνα. Λόγω του ότι ο πυρήνας αέρος έχει σταθερή διαπερατότητα, καθιστά τον αισθητήρα γραμμικό και κατάλληλο για μέτρηση ρευμάτων μεγάλης συχνότητας. Μειονέκτημά του είναι ότι λόγω της εξαιρετικά χαμηλής διαπερατότητας το σήμα εξόδου είναι ασθενές [2], [12],[13].



Σχήμα 8.1.1

Όπως προαναφέρθηκε, η τάση εξόδου του δίνεται από την σχέση (3.3.5.3.1)

$$v_l(t) = M \cdot \frac{di}{dt} = \left[ \frac{\mu_0 \cdot n \cdot b}{8} \cdot \ln \left( \frac{2a+b}{2a-b} \right) \right] \cdot \frac{di}{dt}$$

$$\text{όπου } M = \frac{\mu_0 \cdot n \cdot b}{8} \cdot \ln \left( \frac{2a+b}{2a-b} \right) \quad (8.1.1)$$

Από το παραπάνω ολοκλήρωμα προκύπτει ότι το σήμα εξόδου τάσης διαφέρει από το σήμα ρεύματος της εισόδου κατά 90 μοίρες. Ως εκ τούτου πρέπει να το ολοκληρώσουμε ώστε το μετρούμενο σήμα να είναι συμφασικό με το κρουστικό ρεύμα. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήσαμε παθητικό ολοκληρωτή  $RC$ , οπότε η τάση εξόδου γίνεται,

$$\frac{v_i(t)}{i(t)} = \frac{M}{\tau}, \text{ όπου } \tau = R \cdot C \quad (8.1.2)$$

Άρα, για το πηνίο που θα κατασκευάσουμε θα πρέπει να επιλέξουμε τα  $R$  και  $C$  έτσι ώστε να ικανοποιείται η παραπάνω συνθήκη.

### 8.1.1 Κατασκευή

Για την κατασκευή του πηνίου, περιελίξαμε 220 σπείρες χάλκινου σύρματος, διατομής 0,7 mm πάνω σε κούλο τορροειδή συνθετικό κέλυφος, διαστάσεων  $a=4,25$  cm,  $b=6,3$  cm και  $h=2,7$  cm.

Η αμοιβαία επαγωγή του πηνίου υπολογίζεται από την εξίσωση (8.1.1) ως,

$$M = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot N_2 \cdot h \cdot \ln\left(\frac{b}{a}\right) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot 220 \cdot 0,027 \cdot \ln\left(\frac{0,0425}{0,0630}\right) = 0,467 \cdot 10^{-6}$$



Σχήμα 8.1.1

Πηνίο Rogowski που κατασκευάσαμε

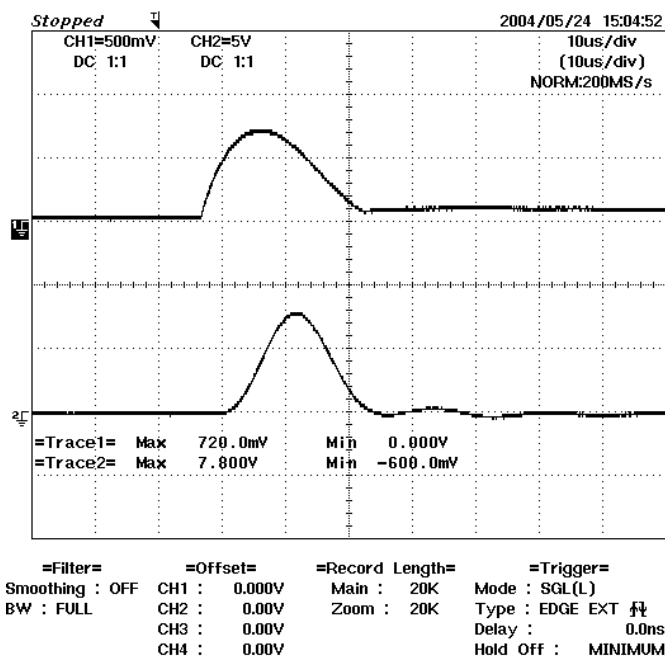


Από τις διαθέσιμες αντιστάσεις χαμηλής τάσης και ισχύος που διαθέτετε το εργαστήριο, επιλέξαμε για  $R=600 \Omega$  και  $C=0,15 \mu\text{F}$ . Για τις τιμές αυτές το  $\tau$  προκύπτει ίσο με  $\tau = 90 \cdot 10^{-6}$ . Για την τιμή αυτή η τάση εξόδου που αναμέναμε για 1 kA είναι

$$\frac{1000\text{A} \cdot 0,467 \cdot 10^{-6}}{90 \cdot 10^{-6}} = 5,18 \text{ V/kA}$$

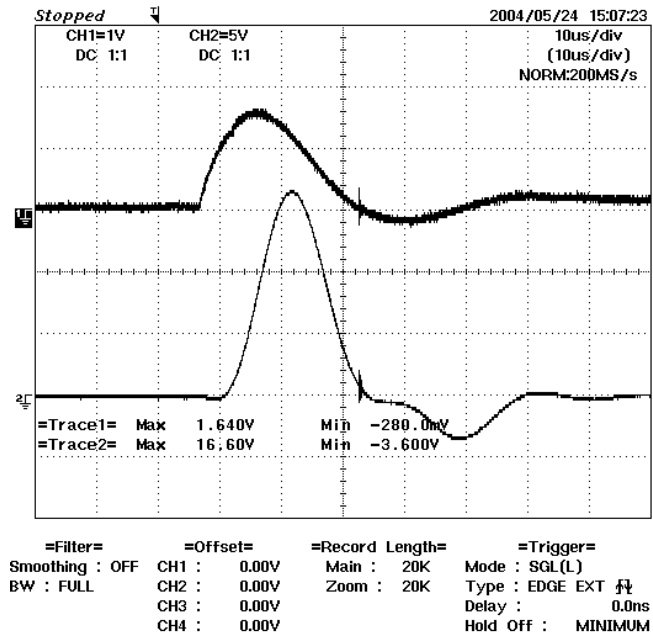
### 8.1.2 Δοκιμές/Καταγραφή μετρήσεων

Για την μέτρηση του πηνίου χρησιμοποιήσαμε την διαθέσιμη κρουστικής γεννήτριας ρεύματος Hilo, 25 kA, κυματομορφής 8/20 και τον διαθέσιμο παλμογράφο. Η γεννήτρια διαθέτει εσωτερική αντίσταση μέτρησης shunt 0,0005  $\Omega$ , ώστε για κάθε kA, η τάσης στα άκρα της να είναι 500 mV. Το σήμα τάσης στα άκρα της αντίστασης μέτρησης καθώς και το σήμα τάσης εξόδου στα άκρα της  $C$  του ολοκληρωτή του πηνίου που κατασκευάσαμε, απεικονίζονται πάνω και κάτω αντίστοιχα στις παρακάτω κυματομορφές.



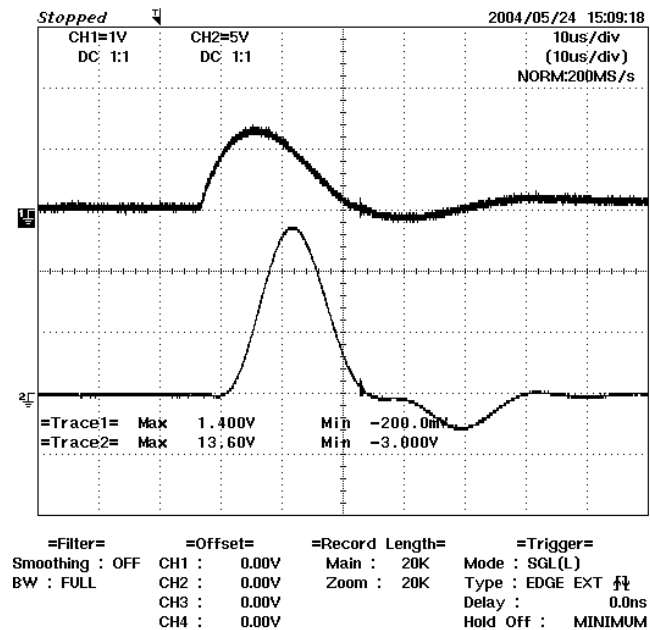
Σχήμα 8.1.2.1

(α) Μέτρηση κρουστικού ρεύματος 1,44 kA με το πηνίο Rogowski που κατασκευάσαμε και εσωτερική αντίσταση μέτρησης της διάταξης κρουστικών ρευμάτων Hilo



Σχήμα 8.1.2.2

(β) Μέτρηση κρουστικού ρεύματος 3,28 kA με το πηνίο Rogowski που κατασκευάσαμε και εσωτερική αντίσταση μέτρησης της διάταξης κρουστικών ρευμάτων Hilo



(γ)

Σχήμα 8.1.2.3

(γ) Μέτρηση κρουστικού ρεύματος 2,28 kA με το πηνίο Rogowski που κατασκευάσαμε και εσωτερική αντίσταση μέτρησης της διάταξης κρουστικών ρευμάτων Hilo

### 8.1.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων/Περεταίρω πειράματα

Από τις ληφθείσες κυματομορφές προκύπτει πως το πηνίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως όργανο μέτρησης κορυφής, ενώ υπάρχει σχετική παραμόρφωση στην μορφή της. Η ακρίβεια μέτρησης ως όργανο κορυφής υπολογίζεται ως,

	CH 1 - SHUNT		CH 2 - ΠΗΝΙΟ		ακρίβεια
a/a	mV	A	mV	A	%
(α)	720	1440	7800	1506	4.57
(β)	1640	3280	16600	3205	2.30
(γ)	1400	2800	13600	2625	6.23

Πίνακας 8.1.3.1

*Σύγκριση μετρήσεων κρουστικού ρεύματος με το πηνίο Rogowski που κατασκευάσαμε και την εσωτερική αντίσταση μέτρησης της διάταξης κρουστικών ρευμάτων Hilo*

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη απόκλιση που έχουν οι τιμές του πηνίου από την διάταξη Hilo είναι 6,23 %. Πλην όμως, ο κατασκευαστής δηλώνει πως η ακρίβεια μέτρησης ρεύματος της μετρητικής αντίστασης είναι 5 %.

Για την αποφυγή της παραμόρφωσης, περαιτέρω δοκιμές απαιτούνται με αλλαγή των τιμών των στοιχείων για τα  $R$ ,  $C$ , ηλεκτροστατική θωράκιση για την μείωση της χωρητικότητας των σπειρών καθώς και ηλεκτρομαγνητική θωράκιση του πηνίου [12].

## 8.2 Κατασκευή Μετασχηματιστή ρεύματος

### 8.2.1 Κατασκευή

Για την κατασκευή του πηνίου ρεύματος, περιελίξαμε 5000 σπείρες χάλκινου σύρματος, διατομής 0,7 mm πάνω σε τορροειδή πυρήνα 80% νικελίου, διαστάσεων  $a=5$  cm,  $b=7$  cm και  $h=2,5$  cm. Επιθυμούμε με λόγο 1/5000 να πάρουμε στην έξοδο του μετασχηματιστή 0,2 A ανά kA στην είσοδο [2], [12], [13].

Το δευτερεύον τύλιγμα το θωρακίσαμε με φύλλο χαλκού 0,5 mm.



*Σχήμα 8.2.1.1*

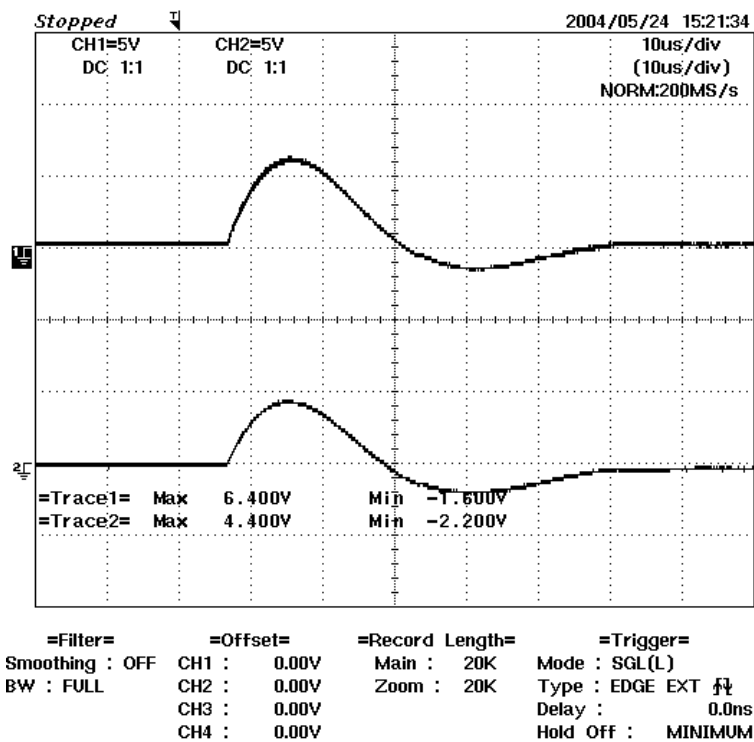
*Ο μετασχηματιστής ρεύματος που κατασκευάσαμε*

Στην περίπτωση του μετασχηματιστή ρεύματος η έξοδος του θα βραχυκυκλωθεί με αντίσταση βαττική, ώστε η επαγόμενη τάση στα άκρα της να συνδεθούν με τον παλμογράφο, ενώ ολοκλήρωση του σήματος εξόδου δεν απαιτείται καθώς αυτό είναι σε φάση με το ρεύμα εισόδου. Η τιμή της αντίστασης οφείλει να είναι μικρής τιμής, ώστε η επαγόμενη τάση σε αυτήν, να μην κορέσει τον πυρήνα. Επιλέγουμε αντίσταση 10 Ω.

Βάση των κανονισμών IEC 61869-2 για μετασχηματιστές εντάσεως, σε περίπτωση βραχυκυκλώματος για 1 sec, η ελάχιστη επιτρεπόμενη πυκνότητα ρεύματος για σύρμα χαλκού είναι 180 A/mm<sup>2</sup>. Το σύρμα 0,7 mm έχει τομή 0,385 mm<sup>2</sup> ως εκ τούτου το επιτρεπόμενο ρεύμα που μπορεί να περάσει από το δευτερεύον τύλιγμα, διάρκειας 1 sec. είναι 69,3 A. Φυσικά η χρονική διάρκεια 1 sec. είναι κατά πολλές φορές μεγαλύτερη από αυτή των κρουστικών ρευμάτων. Άρα εκ του ασφαλούς μπορούμε να δεχτούμε ότι ο μετασχηματιστής μπορεί να μετρήσει κρουστικούς παλμούς των  $0,0693 \cdot 5000 = 365$  kA [21].

## 8.2.2 Δοκιμές/Καταγραφή μετρήσεων

Για την μέτρηση του μετασχηματιστή ρεύματος χρησιμοποιήσαμε την διαθέσιμη κρουστικής γεννήτριας ρεύματος Hilo, 25 kA, κυματομορφής 8/20 και τον διαθέσιμο παλμογράφο. Στην περίπτωση αυτή συγκρίναμε την τάση εξόδου της μετρητικής αντίστασης 0,0028 Ω με την τάση που επάχθηκε στην αντίσταση τιμής 10 Ω, με την οποία βραχυκυκλώσαμε το δευτερεύον τύλιγμα του μετασχηματιστή ρεύματος. Στο παρακάτω παλμογράφημα, εικονίζεται στο πάνω κανάλι η έξοδος της μετρητικής αντίστασης, ενώ στο κάτω η έξοδος του μετασχηματιστή μέτρησης.



Σχήμα 8.2.2.1

*Μέτρηση κρουστικού ρεύματος 2,286 kA με τον μετασχηματιστή ρεύματος που κατασκευάσαμε και εσωτερική αντίσταση μέτρησης της διάταξης κρουστικών ρευμάτων Hilo*

### 8.2.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων / Περαιτέρω πειράματα

Όπως παρατηρούμε, το παλμογράφημα του μετασχηματιστή ρεύματος είναι είδωλο της αντίστασης μέτρησης.

Το ρεύμα κορυφής της αντίστασης είναι  $\frac{6,4V}{0,0028A} = 2,286 \text{ kA}$  ενώ το μετρούμενο ρεύμα του μετασχηματιστή είναι  $\frac{4,4V}{10\Omega} \cdot 5000 \text{ σπείρες} = 2,2 \text{ kA}$ . Το σφάλμα μέτρησης ρεύματος κορυφής ανέρχεται στο 3,76 %. Αυτό μπορούμε να το αντισταθμίσουμε μειώνοντας την αντίσταση στα 9,62 Ω.

## Κεφάλαιο 9

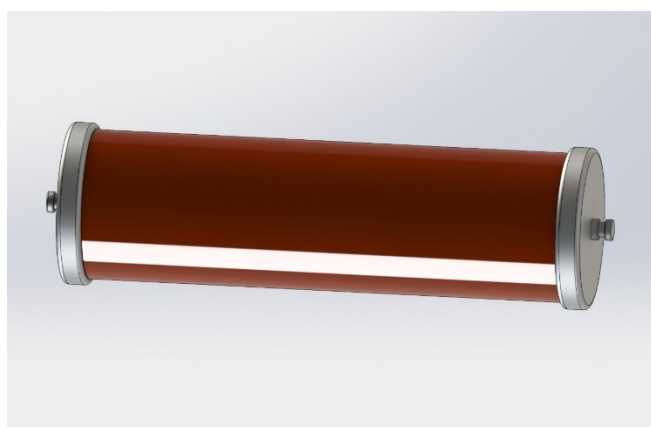
### Προτάσεις αναβάθμισης της διάταξης

Για την ολοκλήρωση και αναβάθμιση της διάταξης απαιτούνται να κατασκευαστούν τα κάτωθι,

- Αντίσταση εκφόρτισης
- Αντιστάσεις/αυτεπαγωγές αντισταθμισμένες για κάθε τύπο εκθετικής κυματομορφής
- Αυτεπαγωγές για μετατροπή της διάταξης για παραγωγή τετραγωνικών παλμών εξομοίωσης κρουστικών ρευμάτων γραμμών μεταφοράς

#### 9.1 Κατασκευή Αντίστασης εκφόρτισης

Όπως προαναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3.7 η αντίσταση εκφόρτισης θα χρειαστεί στην περίπτωση που αποτύχει η εκφόρτιση μέσω του δοκιμίου ή εάν απαιτηθεί να ακυρώσουμε την δοκιμή. Την ολοκλήρωση εκφόρτισης θα την παρακολουθούμε μέσω του οργάνου ένδειξη υψηλής τάσης [4], [14], [15].



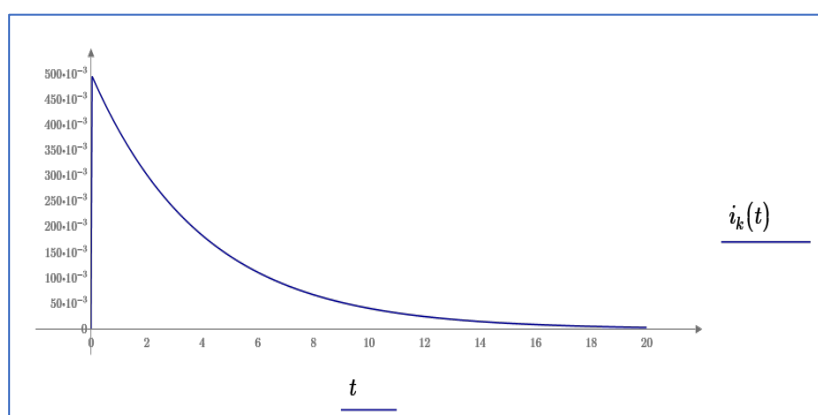
Σχήμα 9.1.1

*Αντίσταση εκφόρτισης πυκνωτών με χρήση μεταγωγέα υψηλής τάσης*

Η αντίσταση εκφόρτισης θα κατασκευαστεί από σύρμα χρωμονικελίνης, τύπου KANTHAL A-1 λόγω της μεγάλης ειδικής ωμικής της αντίστασης, τυλιγμένο σε μονωτικό σωλήνα βακελίτη ή εμποτισμένου με ρητίνη υαλό-υφάσματος. Το σύρμα θα είναι ορθογώνιας διατομής. Στον μονωτικό σωλήνα θα σκαφτεί λούκι στον τόρνο προς διευκόλυνση της περιέλιξης. Στα άκρα της θα φέρει ακροδέκτες αλουμινίου, μορφής κατάλληλης ώστε να εδράζεται στις διαθέσιμες κολώνες του οίκου MWB, εκ των οποίων η μία θα είναι μονωτική και η άλλη αγωγική, απευθείας συνδεδεμένη στην γη.

Για την κατασκευή της αντιστάσεως εκφόρτισης θα ακολουθήσουμε την μεθοδολογία της παραγράφου 6.2.4.

Θεωρώντας την δυσμενέστερη περίπτωση όπου και οι 16 πυκνωτές φόρτισης είναι φορτισμένοι σε τάση 50 kV και ο αποδεκτός χρόνος εκφόρτισης είναι τα 20 sec, και αντίσταση εκφόρτισης 100 kΩ, με την χρήση του MATHCAD βρίσκουμε



Σχήμα 9.1.2

*Αναμενόμενο ρεύμα εκφόρτισης του συνόλου των πυκνωτών μέσω αντίστασης εκφόρτισης και του μεταγωγέα υψηλής τάσης*

Με μέγιστο ρεύμα κορυφής τα 0,5 A και μέσο ρεύμα υπολογιζόμενο από τη εξίσωση (1.3.2.1) της παραγράφου 1.3.2

$$\int_0^{5 \cdot R \cdot C} |i^2(t)| dt = 0,025 \text{ A}$$

Η απαιτούμενη διατομή του αγωγού υπολογίζεται από τις εξισώσεις (6.2.4.6) και (6.2.4.7) της παραγράφου 6.2.4 ως,



$$A = \frac{\sqrt{i^2 \cdot t}}{k} 0.010541 \text{ mm}^2$$

$$\text{όπου, } k = \sqrt{\frac{c_p \cdot \rho_a \cdot \Delta T}{\rho_r}} = 15$$

Για τον αγωγό που θα χρησιμοποιήσουμε η ειδική θερμική χωρητικότητα είναι  $c_p = 0,46 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$  στους  $25 \text{ }^\circ\text{K}$ , η πυκνότητα  $\rho_a$  είναι  $0,0071 \text{ gmm}^{-3}$  και η ειδική αντίσταση  $\rho_r$  είναι  $0,00145 \text{ }\Omega\text{mm}$ . Η δε επιτρεπτή στιγμιαία αύξηση της θερμοκρασίας  $\Delta T$  είναι  $100 \text{ }^\circ\text{K}$ . Ως εκ τούτου η σταθερά  $k$  ισούται με 15.

Το λεπτότερο διαθέσιμο σύρμα KANTHAL A-1 ορθογώνιας διατομής είναι αυτό με διαστάσεις  $0,3 \times 0,05 \text{ mm}$ , διατομή  $0,0138 \text{ mm}^2$  και αντίσταση ανά μέτρο  $101 \text{ }\Omega/\text{m}$ . Έστω ότι η διάμετρος του σωλήνα περιέλιξης είναι  $318 \text{ mm}$ , τότε το μήκος κάθε σπείρας θα είναι  $1 \text{ μέτρο}$ . Θα απαιτηθούν  $100.000/101=990$  σπείρες. Με βήμα περιέλιξης  $1,5 \text{ mm}$  και φάρδος σύρματος  $0,3 \text{ mm}$ , το συνολικό μήκος της αντίστασης θα είναι  $0,0015 \times 990=1,486 \text{ m}$ .

Θα εξετάσουμε κατά πόσο η αυτεπαγωγή της αντίστασης επηρεάζει την διαδικασία της εκφόρτισης. Προκύπτει από την εξίσωση (3.3.2.1) της παραγράφου 3.3.2, πως η αυτεπαγωγή της αντίστασης εκφόρτισης θα είναι

$$L = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot N^2 \cdot A}{l} = 0,829 \text{ H}$$

Όπου,

$l=1,485 \text{ m}$  είναι το μήκος του πηνίου σε m,

$A= \pi \cdot (0,318/2)^2 = 0,079423$  το εμβαδό του σωλήνα σε  $\text{m}^2$

$N=990$  ο αριθμός των σπειρών

Λύνοντας πάλι την διαφορική εξίσωση ρεύματος με το MATHCAD ορίζοντας  $L=0,829 \text{ H}$ , παρατηρούμε πως ούτε ο χρόνος εκφόρτισης αλλά ούτε το ρεύμα κορυφής μεταβάλλονται. Αυτό οφείλεται στην πολύ μεγάλη τιμή της αντιστάσεως εκφόρτισης. Η αυτεπαγωγή δηλαδή της αντίστασης, δεν επηρεάζει τη εκφόρτιση [6].

## 9.2 Κατασκευή Αντιστάσεων/αυτεπαγωγών για κάθε τύπο εκθετικών κρουστικών παλμών ρεύματος

Θα πρέπει να κατασκευαστούν μονάδες αντίστασης- αυτεπαγωγής για κάθε τύπο εκθετικής κυματομορφής. Αυτές μπορούν να βρίσκονται εντός ενός περιβλήματος και να φέρουν ακροδέκτες (μπόρες). Δεν επιτρέπεται η μεταγωγή τους να γίνεται μέσω μεταγωγικού διακόπτη διότι αυτός προσθέτει αντίσταση. Η κάθε μία αντίσταση-αυτεπαγωγή θα έχουν τιμές πλησίον αυτών που προέκυψαν από τις μετρήσεις μας. Θα κατασκευαστούν προσεγγιστικά και θα επαναβαθμονομηθούν με την χρήση της διάταξης. Αμέσως μετά θα προσαρμοστούν σε αυτές ακροδέκτες οι οποίοι θα κολληθούν με ασημοκόλληση, ώστε να μην αλλάξουν σε βάθος χρόνου οι τιμές τους.

Οι αντιστάσεις θα κατασκευαστούν από σύρμα αντιστάσεων, όπως στην προηγούμενη παράγραφο, ενώ οι αυτεπαγωγές από σύρμα χαλκού. Ενδεχομένως, λόγω της μικρής τιμής των αυτεπαγωγών, να μην απαιτηθεί περιέλιξη χαλκού, αλλά να διαμορφωθεί η απαιτούμενη αυτεπαγωγή με περιέλιξη του ίδιου του σύρματος των αντιστάσεων. Οι προσεγγιστικές απαιτούμενες τιμές των αντιστάσεων και αυτεπαγωγών είναι οι παρακάτω,

tf/th	L (μH)	R (Ω)
8/20	1,85-2,60	0,26-0,30
10/350	40-46	10,50-11,50
30/80	30-35	0,70-1,50
1/20	0,40-0,60	0,90-1,10
4/10	0,50-0,80	0,09-0,22

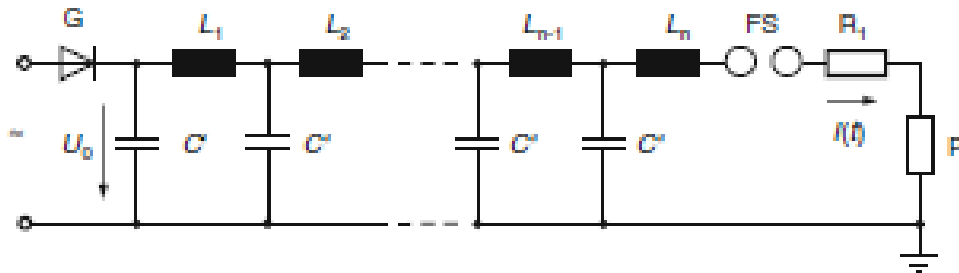
Πίνακας 9.2.1

*Προτεινόμενα όρια τιμών αντιστάσεων και αυτεπαγωγών προς κατασκευή*

Σε περίπτωση που απαιτηθεί να λάβουμε τις παραπάνω κυματομορφές για άλλα συγκεκριμένα ρεύματα κορυφής, η διαδικασία που ακολουθήσαμε πρέπει να επαναληφθεί.

### 9.3 Μετατροπή διάταξης για παραγωγής τετραγωνικών παλμών εξομοίωσης κρουστικών ρευμάτων γραμμών μεταφοράς

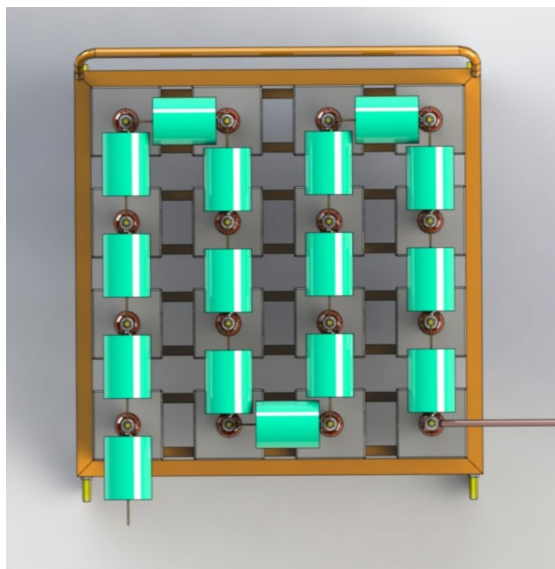
Για την παραγωγή των κρουστικών τετραγωνικών παλμών θα χρησιμοποιήσουμε το κύκλωμα της παραγράφου 1.3.2 [7]



Σχήμα 9.3.1

*Κύκλωμα παραγωγής τετραγωνικών παλμών*

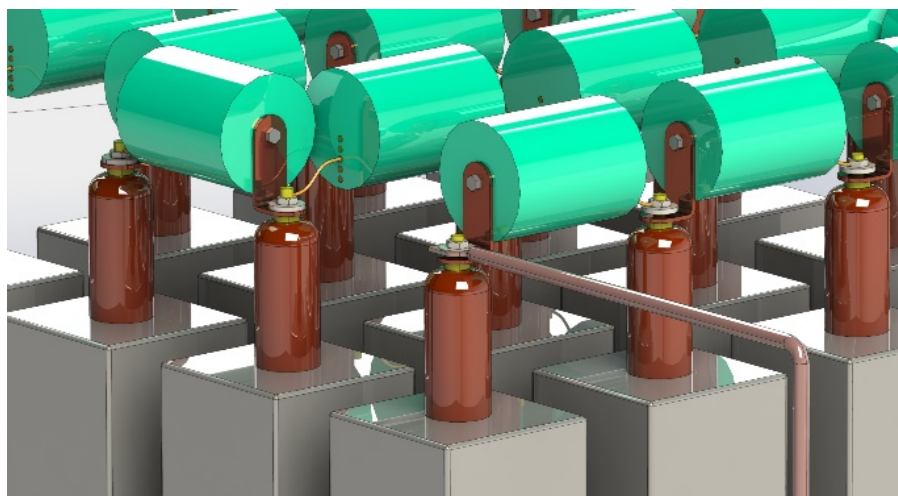
Οι πυκνωτές που θα χρησιμοποιήσουμε θα είναι φυσικά οι ίδιοι, τοποθετημένοι στην βάση που κατασκευάσουμε. Στην περίπτωση αυτή θα εξυπηρετούσε οι πυκνωτές να ήταν τοποθετημένοι ακτινικά και περιμετρικά του σπινθηριστή-αντιστάσεων-δοκιμίου, αλλά διαθέσιμος χώρος δεν υφίσταται στο εργαστήριο.



Σχήμα 9.3.2

*Κάτοψη υπάρχουσας συστοιχίας πυκνωτών για την παραγωγή τετραγωνικών παλμών*

Ως εκ τούτου οι απαιτούμενες αυτεπαγωγές και ίσες σε αριθμό 16, μπορεί η κάθε μία να τοποθετηθεί πάνω από κάθε πυκνωτή. Ο τρόπος κατασκευής θα είναι ολόιδιος με αυτόν που κατασκευάσαμε την αυτεπαγωγή στην παράγραφο 6.2.2, εκτός του ότι η περιέλιξη θα γίνει σε περισσότερες στρώσεις για να περιορίσουμε το μήκος των αυτεπαγωγών. Θα προβλεφθεί να έχει η κάθε μία, πολλές ενδιάμεσες λήψεις. Το ένα άκρο της αυτεπαγωγής θα συνδέεται απευθείας στον πυκνωτή, ενώ η άλλη λήψη της, με τον γειτονικό πυκνωτή.



*Σχήμα 9.3.*

*Προτεινόμενες αυτεπαγωγές για την παραγωγή τετραγωνικών παλμών*

Οι τιμές των αυτεπαγωγών δεν θα είναι μεταξύ τους ίσες. Για να πετύχουμε το δυνατό τετραγωνικό παλμό, αποφεύγοντας υπερεντάσεις αμέσως μετά το μέτωπο και πριν την ουρά της κυματομορφής, πρέπει η πρώτη καθώς και οι δύο τελευταίες αυτεπαγωγές της διάταξης, να έχουν διαφορετικές τιμές από τις ενδιάμεσες.

Η πρώτη οφείλει να είναι κατά 90% μεγαλύτερη από τις ενδιάμεσες, η προτελευταία κατά 23 % μικρότερη και η τελευταία κατά 40% μικρότερη.

Προς διευκόλυνση του υπολογισμού των τιμών των στοιχείων  $R$  και  $Li$ , προτείνεται η χρήση ηλεκτρονικών προγραμμάτων υπολογισμού, όπως του SPICE ή ATP-EMTP.

## Κεφάλαιο 10: Επίλογος

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας κατασκευάστηκε γεννήτρια κρουστικών εκθετικών ρευμάτων με μέγιστο ρεύμα 144 kA. Οι διάφοροι παλμοί που λάβαμε είναι εντός των ορίων των διεθνών κανονισμών. Η διάταξη μπορεί να ολοκληρωθεί κατασκευάζοντας κατάλληλα στοιχεία για την παραγωγή μεγάλης διάρκειας ορθογωνίων κρουστικών ρευμάτων. Επιπλέον με τον παραλληλισμό περισσότερων πυκνωτών, δίνεται η δυνατότητα να παραχθεί υψηλότερο ρεύμα κορυφής. Όλη η απαραίτητη διαδικασία για την υλοποίηση της αναβάθμιση της διάταξης, καθώς και λεπτομερής περιγραφή για την κατασκευή των αναγκαίων στοιχείων, περιγράφεται στην εργασία.