

Κεφάλαιο 2

ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ ΔΟΚΙΜΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

Εφοδιασμένος με τις πέντε αισθήσεις του ο άνθρωπος εξερευνά το σύμπαν που τον περιβάλλει και ονομάζει αυτή την περιπέτεια επιστήμη.

Edwin P. Hubble

2.1 Σκοπός και βασικές αρχές της εργασίας

Σκοπός της παρούσης εργασίας είναι η διερεύνηση της μεταβατικής συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης. Παράγοντες που επιδρούν στο φαινόμενο αυτό είναι: η μορφή του συστήματος γείωσης, η ειδική αντίσταση του χώματος που το περιβάλλει, η ύπαρξη ή όχι ιονισμού στο έδαφος, το σημείο έγχυσης και η κυματομορφή του εγχυόμενου ρεύματος.

Στη μεταβατική κατάσταση λειτουργίας, η αντίσταση των συστημάτων γείωσης είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι στη μόνιμη κατάσταση [71, 79, 170]. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τη μεταβατική κατάσταση:

- Η αντίδραση (φανταστική αντίσταση) των αγωγών και των συνδέσεων γίνεται μεγαλύτερη λόγω της μικρής διάρκειας του φαινομένου. Δηλαδή, η μικρή διάρκεια του φαινομένου έχει σαν συνέπεια την ύπαρξη υψηλών συχνοτήτων και επομένως την αύξηση της σύνθετης αντίστασης της γείωσης.
- Η μείωση του χρόνου μετώπου της διέγερσης συντελεί στην μείωση του "ενεργού μήκους" (effective length) των μεγάλου μήκους αγωγών γείωσης.
- Το επιδερμικό φαινόμενο αυξάνει τη σύνθετη αντίσταση των αγωγών γείωσης, εξαιτίας της υψηλής συχνότητας κατά την έναρξη του φαινομένου.
- Η υψηλή τιμή του εγχυόμενου ρεύματος μπορεί να ξηράνει το έδαφος, με αποτέλεσμα την αύξηση της ειδικής αντίστασής του.

Η αύξηση της αντίστασης του συστήματος γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, δεδομένου ότι μια μεγάλη τιμή της αντίστασης γείωσης

κατά το μεταβατικό στάδιο (π.χ. κεραυνικές εκκενώσεις) μπορεί να προκαλέσει βλάβη ή και καταστροφή στην υπό προστασία εγκατάσταση [170].

Για την ολοκληρωμένη μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων γείωσης πραγματοποιήθηκαν πειράματα σε υπό κλίμακα μοντέλα γειώσεων, σε πραγματικά συστήματα γείωσης, καθώς και πειράματα για τον ιονισμό του εδάφους.

2.2 Πειραματικές διατάξεις

2.2.1 Πειράματα υπό κλίμακα

Η πειραματική μελέτη [1-4] των συστημάτων γείωσης, που χρησιμοποιούνται ευρέως, δεν είναι εύκολη γιατί:

- είναι εξαιρετικά μεγάλα σε διαστάσεις και σε όγκο, για να επιτευχθεί η απαιτούμενη τιμή της αντίστασης γείωσης
- το κόστος υλοποίησης των πειραμάτων είναι υψηλό, γιατί απαιτείται η χρήση πανάκριβου, εξειδικευμένου εξοπλισμού
- δεν είναι πάντοτε εφικτή βελτίωση της συμπεριφοράς του συστήματος γείωσης μετά την εγκατάστασή του γιατί δεν είναι πάντα δυνατή η αύξηση του μήκους των αγωγών γείωσης και η μείωση της ειδικής αντίστασης του χώματος
- οι ατμοσφαιρικές συνθήκες μεταβάλλουν την συμπεριφορά του συστήματος γείωσης, καθώς αλλάζουν την τιμή της ειδικής αντίστασης του εδάφους και έτσι δεν είναι εφικτή η επαναληψιμότητα των πειραμάτων κάτω από ίδιες συνθήκες

Γι' αυτό προσομοιώνεται η λειτουργία ενός συστήματος γείωσης υπό κλίμακα και μελετάται η συμπεριφορά του κατά τη μεταβατική κατάσταση [175, 194-197]. Τα πλεονεκτήματα αυτού του τρόπου αντιμετώπισης του προβλήματος είναι:

- η ταχύτητα και η ευκολία στην πραγματοποίηση των πειραμάτων, αφού μειώνεται ο όγκος και οι διαστάσεις του συστήματος
- το χαμηλό οικονομικό κόστος (οικονομία λόγω κλίμακας σε εργασία και υλικά)
- η δυνατότητα ρύθμισης των μεταβλητών του πειράματος (αγωγιμότητα, βάθος τοποθέτησης του συστήματος γείωσης, μήκος αγωγών, συνθήκες περιβάλλοντος)

- η δυνατότητα επαλήθευσης των πειραματικών αποτελεσμάτων μέσω υπολογιστικών λύσεων (με τη βοήθεια του υπολογιστή).

Σ' αυτό το σημείο γεννάται ίσως το ερώτημα γιατί να ακολουθηθεί όλη αυτή η κουραστική διαδικασία του πειράματος υπό κλίμακα και να μη γίνει αριθμητική επίλυση βάσει των εξισώσεων, που ισχύουν για τέτοια συστήματα. Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα είναι πως κάτι τέτοιο πολλές φορές γίνεται, αλλά:

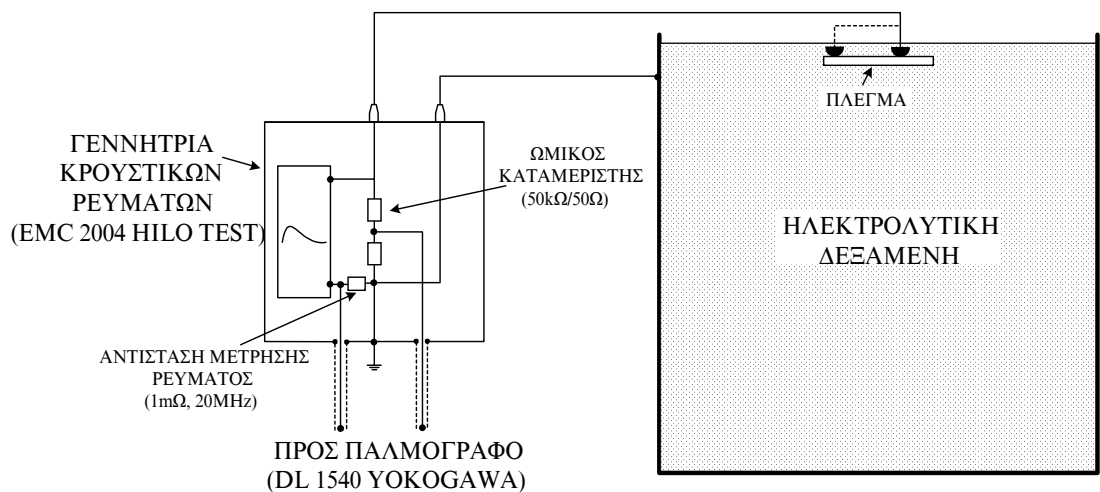
- Τα πειραματικά μοντέλα υπό κλίμακα προσφέρουν μια πρακτική και οικονομική εναλλακτική λύση, που επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.
- Η αριθμητική επίλυση είναι ένα πολύτιμο εργαλείο, ωστόσο χρειάζεται επιπλέον επαλήθευση μέσω πειραματικών αποτελεσμάτων.
- Η διαμόρφωση του γειωμένου πλέγματος είναι (σε ορισμένα σημεία) εξαιρετικά πολύπλοκη και απαιτούνται ορισμένες απλοποιήσεις κατά την υπολογιστική προσομοίωση, οι οποίες οδηγούν σε λανθασμένα αποτελέσματα και συνεπώς σε λανθασμένα συμπεράσματα.
- Το έδαφος συνήθως δεν είναι ομοιογενές με συνέπεια αυξημένες δυσκολίες κατά την μοντελοποίησή του και την επιπλέον απαίτηση πειραματικών δεδομένων για τον τρόπο μεταβολής της ειδικής αντίστασης.

Στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων προσομοιώθηκε η λειτουργία συστημάτων γείωσης κατά τη μεταβατική κατάσταση και μελετήθηκε η συμπεριφορά τους υπό κλίμακα. Η διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων έγινε σε υπό κλίμακα δοκίμια, τα οποία ήταν βυθισμένα μέσα σε μια ηλεκτρολυτική δεξαμενή, όπου σαν ηλεκτρολυτικό μέσο χρησιμοποιήθηκε το νερό της βρύσης με προσθήκη αλάτος. Το νερό της βρύσης έχει πολύ μικρή αγωγιμότητα, επομένως για να μειωθεί η ηλεκτρική αντίστασή του ώστε να αποκτήσει "κατάλληλη" τιμή αγωγιμότητας προστέθηκε αλάτι [84, 85].

Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [196], η πιο κατάλληλη μορφή δεξαμενής για τη διεξαγωγή των υπό κλίμακα εργαστηριακών πειραμάτων είναι η ημισφαιρική. Στην πράξη όμως, κατασκευή μιας ημισφαιρικής δεξαμενής είναι πρακτικά δύσκολη και έτσι προτιμάται η κατασκευή μια κυβικής δεξαμενής [175, 194-197].

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, που έγιναν στην ηλεκτρολυτική δεξαμενή, τοποθετήθηκαν διάφορα πλέγματα σε διαφορετικά βάθη [84, 85]. Μία καλή αναλογία μεταξύ του μοντέλου και των πραγματικών διαστάσεων της κατασκευής είναι 1:100 [196]. Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τετραγωνικά με διαστάσεις 20cm × 20cm, ενώ ήταν κατασκευασμένα από χάλκινο καλώδιο διατομής 4mm². Η δεξαμενή, για να μην αλλοιώνει το πεδίο, πρέπει να έχει μήκος πλευράς τουλάχιστον τρεις φορές μεγαλύτερο από την αντίστοιχη πλευρά του πλέγματος και βάθος τουλάχιστον το μισό της πλευράς της [196]. Λαμβάνοντας αυτό υπόψη, επιλέχθηκε η κατασκευή μιας δεξαμενής με πλάτος 1,5m, μήκος 1,5m και βάθος 1m, από λαμαρίνα πάχους 4mm.

Η συνδεσμολογία που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα υπό κλίμακα φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



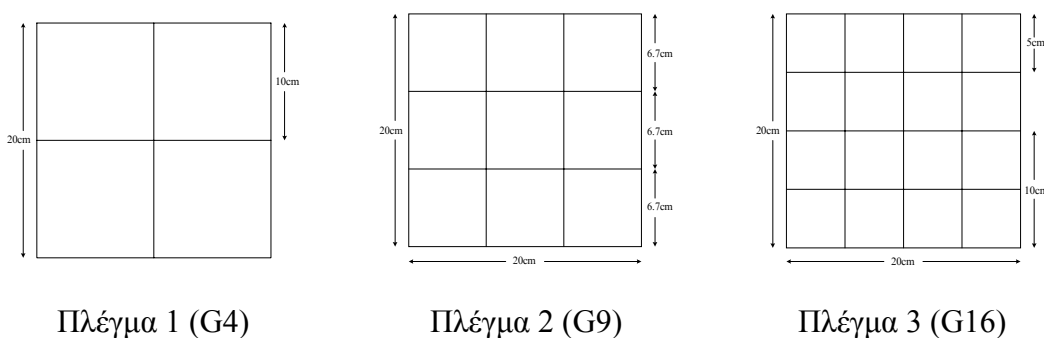
Σχήμα 2.1: Πειραματική διάταξη

Για τη δημιουργία του κρουστικού ρεύματος χρησιμοποιήθηκε η γεννήτρια EMC 2004 της HILO TEST με δυνατότητα η τιμή της κορυφής του ρεύματος να κυμαίνεται από 0,1 ως 25kA. Η έξοδος της γεννήτριας εφαρμόζεται στο δοκίμιο (πλέγμα) και η μεταβολή της τάσεως και του ρεύματος στο δοκίμιο αυτό παρατηρείται με τη βοήθεια ενός ψηφιακού παλμογράφου [199, 200]. Συγκεκριμένα, οι κυματομορφές της τάσης και του ρεύματος καταγράφηκαν με τη χρήση του ενσωματωμένου, στη γεννήτρια, ωμικού καταμεριστή (50kΩ/50Ω) για τον υποβιβασμό της τάσης, της αντίστασης μέτρησης του ρεύματος (Current shunt, 1 mΩ, 20 MHz) και του παλμογράφου DL 1540 της YOKOGAWA (συχνότητας 150 MHz, με ρυθμό δειγματοληψίας 200 MS/s). Ο σκανδαλισμός (trigger) του

παλμογράφου ήταν εξωτερικός και λαμβανόταν από αντίστοιχη μονάδα της γεννήτριας (Trigger OUT). Αναλυτική περιγραφή του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε υπάρχει στο παράρτημα Π1.

Η αγωγιμότητα του νερού της δεξαμενής μετριοταν με το αγωγιμόμετρο HI 8733 της εταιρείας HANNA Instruments πριν από κάθε έγχυση του κεραυνικού ρεύματος. Με κατάλληλη προσθήκη νερού ή άλατος η τιμή της αγωγιμότητας παρέμενε σταθερή σε όλη τη διάρκεια του πειράματος (για δεδομένη αγωγιμότητα). Πριν από την έναρξη των μετρήσεων στην δεξαμενή για την επαλήθευση του αγωγιμομέτρου εφαρμοζόταν η διαδικασία που περιγράφεται στο τεχνικό εγχειρίδιο του κατασκευαστή και στο παράρτημα Π1. Δηλαδή, με τη χρήση του αγωγιμομέτρου μετριοταν η αγωγιμότητα του πρότυπου υγρού, το οποίο συνόδευε το όργανο και του οποίου η αγωγιμότητα σε δεδομένη θερμοκρασία είναι γνωστή. Στη συνέχεια λαμβανόταν μέτρηση της θερμοκρασίας περιβάλλοντος και με γνώμονα την τιμή της αγωγιμότητας, που προσδιοριζόταν από τη διαδικασία επαλήθευσης του οργάνου για την συγκεκριμένη θερμοκρασία, ρυθμιζόταν η ένδειξη του οργάνου, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το σφάλμα της μέτρησης.

Τα πλέγματα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πειραματική διαδικασία στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων απεικονίζονται στο σχήμα 2.2.



Σχήμα 2.2: Πλέγματα πειραματικών μετρήσεων

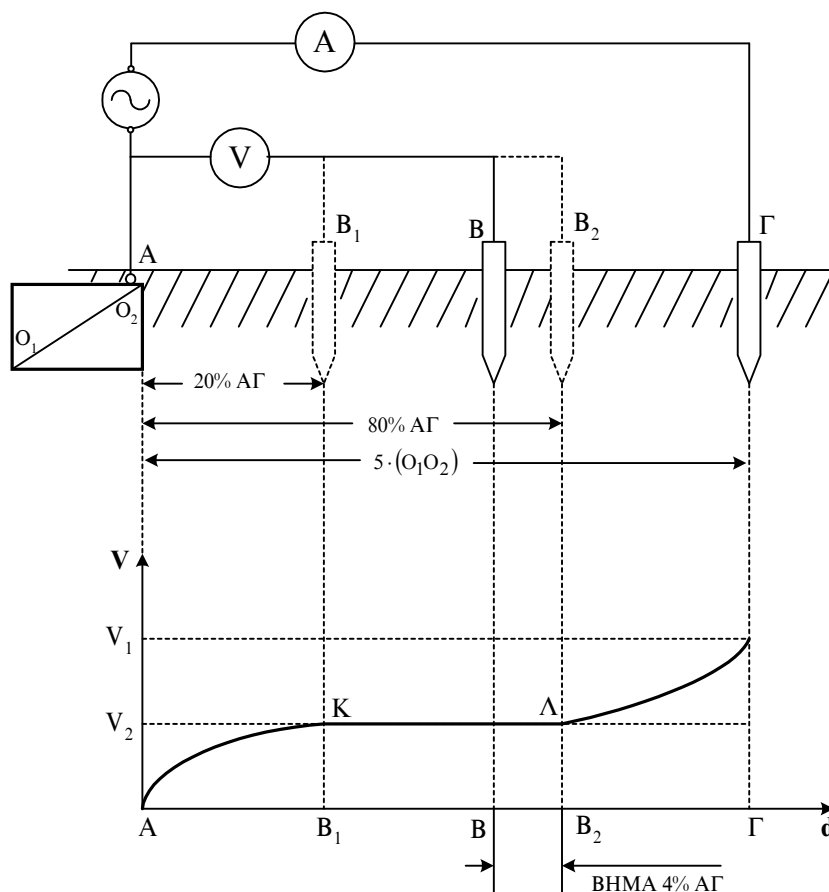
Τα όργανα, που χρησιμοποιήθηκαν σε όλες τις μετρήσεις της παρούσης διατριβής και παρουσιάζονται στα Παραρτήματα Π1, Π2 και Π3, ανήκουν στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του ΕΜΠ. Αποτελούν μέρος του εξοπλισμού και διακριβώνονται από εξωτερικά διαπιστευμένα εργαστήρια στα πλαίσια του συστήματος ISO 9001: 2000 που διαθέτει το εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.

2.2.2 Πειράματα σε πραγματικά συστήματα γείωσης

2.2.2.1 Μέτρηση αντίστασης γείωσης μονίμου καταστάσεως

Η μέτρηση της αντίστασης γείωσης συνίσταται στη μέτρηση της αντίστασης του όγκου του εδάφους που περιέχει το ηλεκτρόδιο γείωσης. Το ένα από τα δύο άκρα μεταξύ των οποίων μετριέται η αντίσταση γείωσης είναι γνωστό, καθώς αυτό είναι το ένα άκρο του συστήματος γείωσης. Το άλλο άκρο όμως, δεν είναι σαφώς καθορισμένο και χρειάζεται να διευκρινίζεται ανάλογα με την περίπτωση. Ανάλογα με την έκταση που καταλαμβάνουν, τα συστήματα γείωσης μπορούν να χωριστούν σε σημειακά (π.χ. κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ή τρίγωνο γείωσης) και σε εκτεταμένα (π.χ. πλέγμα). Συνήθως, αρκεί μια πεπερασμένη απόσταση πολλαπλάσια του μήκους του ηλεκτροδίου, έτσι ώστε το 98% της αντίστασης γείωσης να βρίσκεται εντός της καθορισμένης περιοχής. Η σύνθετη αντίδραση του εδάφους μπορεί χωρίς σημαντικό σφάλμα να αγνοηθεί, εκτός αν η αντίστασή του είναι εξαιρετικά χαμηλή. Η μέτρηση γίνεται με εναλλασσόμενο ρεύμα ώστε να αποφεύγεται η πόλωση του εδάφους. Η συχνότητα του ρεύματος έγχυσης επιλέγεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μη ταιριάζει με καμία από τις χρησιμοποιούμενες συχνότητες (16,67Hz, 50Hz, 60Hz, 400Hz και τα πολλαπλάσια τους) [3-9].

Μια πρακτική και αξιόπιστη μέθοδος μέτρησης της αντίστασης μιας γείωσης είναι αυτή της “πτώσης δυναμικού” [1-3]. Ουσιαστικά βασίζεται στη μέτρηση της πτώσης δυναμικού κατά μήκος του εδάφους που προκαλείται από ένα ρεύμα που εγχύεται στο έδαφος σε κάποιο άλλο σημείο. Για τη μέτρηση των γειώσεων χρησιμοποιούνται δυο βοηθητικά ηλεκτρόδια του γειωσομέτρου και πραγματοποιείται η συνδεσμολογία του σχήματος 2.3, όπου Α είναι το προς μέτρηση σύστημα γείωσης, Β και Γ τα βοηθητικά ηλεκτρόδια. Έτσι, ένα ρεύμα I περνά από το έδαφος μέσω της γείωσης και επιστρέφει από ένα βοηθητικό ηλεκτρόδιο τοποθετημένο σε κάποιο σημείο Γ . Καθώς το ρεύμα περνά από τον όγκο του εδάφους προκαλεί μια πτώση του δυναμικού. Η πτώση αυτή του δυναμικού μετράται με ένα δεύτερο βοηθητικό ηλεκτρόδιο, το οποίο τοποθετείται ανάμεσα στο σύστημα γείωσης και το βοηθητικό ηλεκτρόδιο του ρεύματος στη θέση Β.



Σχήμα 2.3. Μέτρηση αντίστασης γείωσης

Για τη μέτρηση των σημειακών γειώσεων, το ηλεκτρόδιο Γ τοποθετείται σε απόσταση 30 ως 50m από το σημείο A , ενώ το B σε απόσταση $AG/2$. Με αυτήν τη διάταξη λαμβάνεται η πρώτη μέτρηση με τις συγκεκριμένες αποστάσεις και κατόπιν λαμβάνονται 2 έως 6 μετρήσεις μετακινώντας το B πάνω στην ευθεία AG . Αν η διαφορά των μετρήσεων είναι πολύ μικρή, γίνεται δεκτή σαν αντίσταση του γειωτή A , ο μέσος όρος των πραγματοποιηθεισών μετρήσεων. Σε αντίθετη περίπτωση, μεγαλώνει η απόσταση AG και επαναλαμβάνονται οι μετρήσεις όπως πριν. Οι μετρήσεις θεωρούνται ικανοποιητικές όταν οι τιμές τους διαφέρουν μεταξύ τους μέσα σε αποδεκτά όρια. Στη γραφική παράσταση του σχήματος 2.3 απεικονίζεται η μεταβολή του δυναμικού εντός του εδάφους μεταξύ του γειωτή A και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ . Στην περιοχή όπου αυτό λαμβάνει μια σταθερή τιμή V_2 , τα ηλεκτρικά πεδία του γειωτή A και του βοηθητικού ηλεκτροδίου Γ δεν αλληλοεπηρεάζονται. Η μετρούμενη λοιπόν τιμή αντίστασης γείωσης στο τμήμα $K\Lambda$ είναι και η πραγματική.

Στις εκτεταμένες γειώσεις, η αλληλεπίδραση των τμημάτων του γειωτή κάνει πιο δύσκολη την εύρεση της περιοχής KI . Η απόσταση AG πρέπει να είναι μερικές εκατοντάδες μέτρα και οι μετρήσεις πρέπει να γίνονται από το 80% της AG προς το 20% της AG , με βήμα το 4% της AG περίπου. Στην πράξη έχει εκτιμηθεί ότι παίρνοντας σαν απόσταση AG περίπου 3 έως 5 φορές το μήκος της διαγωνίου του σχηματιζόμενου νοητού πολυγώνου που δημιουργεί ο εκτεταμένος γειωτής O_1O_2 , είναι επιτυχής η πραγματοποιούμενη μέτρηση [201]. Βέβαια, όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση AG , τόσο πιο εύκολα προσδιορίζεται η περιοχή KI , ενώ η απόκλιση της μετρούμενης τιμής της αντίστασης του γειωτή και της πραγματικής μηδενίζεται.

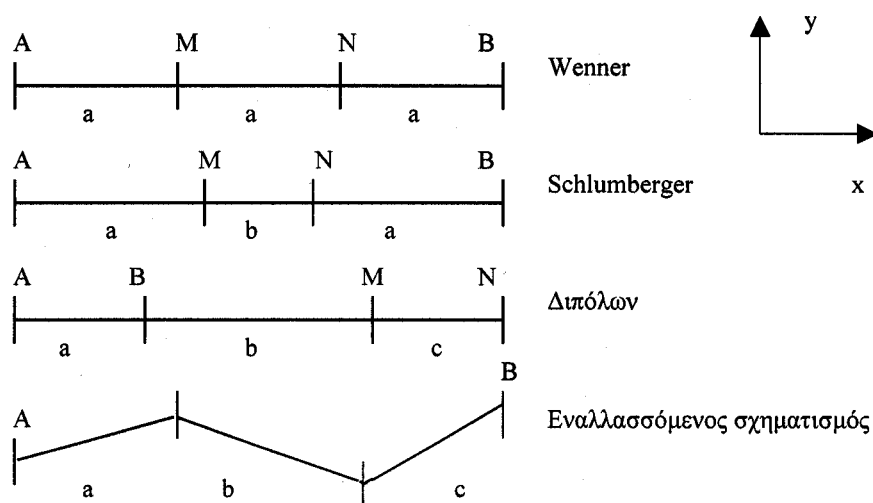
Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η διεξαγωγή μετρήσεων σε τόσο μεγάλο χώρο, λαμβάνεται ως αφετηρία μια απόσταση AG π.χ. 60m και ενεργώντας όπως προαναφέρθηκε, σημειώνονται οι μετρούμενες τιμές. Επαναλαμβάνοντας για AG 50 και 40m, δημιουργείται ένας πίνακας με τις τιμές που προκύπτουν. Παίρνοντας το 62% της τιμής της αντίστασης για κάθε απόσταση AG , δημιουργείται ένα πεδίο τιμών στο οποίο κυμαίνεται η τιμή της αντίστασης του γειωτή.

Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τη μέτρηση της αντίστασης μονίμου καταστάσεως διαφόρων συστημάτων γείωσης χρησιμοποιήθηκαν δύο γειωσόμετρα (είτε το Pantec MIT 904, είτε το LEM GEO-X). Τα χαρακτηριστικά των οργάνων αυτών φαίνονται στο παράρτημα Π2. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν χαλύβδινα ηλεκτρόδια μήκους 50cm ή 100cm. Η απόσταση ανάμεσα στα ηλεκτρόδια ήταν τέτοια ώστε να ελαχιστοποιεί την κλίση του τμήματος KI της καμπύλης μεταβολής του δυναμικού. Ο αγωγός που συνέδεε τα ηλεκτρόδια με το γειωσόμετρο είχε διατομή 4mm^2 .

2.2.2.2 Μέτρηση της ειδικής αντίστασης του εδάφους

Η συνεισφορά της ειδικής αντίστασης του εδάφους στη διαμόρφωση της τελικής τιμής της αντίστασης γείωσης είναι σημαντικότερη [202]. Για τον υπολογισμό της ειδικής αντίστασης του εδάφους έχουν αναπτυχθεί πολλές τεχνικές [1-9]. Οι κυριότερες από αυτές είναι [4, 115] α) η μέθοδος Wenner, β) η μέθοδος Schlumberger, γ) η μέθοδος των διπόλων, δ) ο εναλλασσόμενος σχηματισμός και ε) η μέθοδος της μέτρησης της αντίστασης γείωσης. Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται τα βοηθητικά ηλεκτρόδια σε κάθε περίπτωση φαίνεται στο σχήμα 2.4. Στην

περίπτωση της μέτρησης με χρήση τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων, η έγχυση του ρεύματος γίνεται στα ηλεκτρόδια A και B , ενώ η τάση μετράται ανάμεσα στα ηλεκτρόδια M και N . Στη μέθοδο της αντίστασης γείωσης γίνεται μέτρηση της αντίστασης γείωσης μιας κατακόρυφης ράβδου, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο (§2.2.2.1) και στην συνέχεια από την σχέση που συνδέει την ειδική αντίσταση του εδάφους με την αντίσταση γείωσης υπολογίζεται η ειδική αντίσταση [111]. Είναι προφανές ότι η μέτρηση αυτή μπορεί να έχει μεγάλο σφάλμα [105], ειδικά στην περίπτωση του ανομοιογενούς εδάφους.



Σχήμα 2.4. Συνδεσμολογίες για την μέτρηση της ειδικής αντίστασης

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Wenner, χρησιμοποιούνται τέσσερα βοηθητικά ηλεκτρόδια, τοποθετημένα σε μια ευθεία γραμμή και ισαπέχοντα το ένα από το άλλο απόσταση a . Τα τέσσερα αυτά ηλεκτρόδια εμφυτεύονται με το κάτω άκρο τους μερικώς στο έδαφος, ενώ το άνω άκρο τους συνδέεται σε ένα μετρητικό όργανο, το γεωσόμετρο. Το ρεύμα κυκλοφορεί μεταξύ των δύο ακραίων ηλεκτροδίων και μετράται η διαφορά δυναμικού ανάμεσα στα δύο μεσαία ηλεκτρόδια. Ο λόγος της διαφοράς δυναμικού προς το ρεύμα ορίζεται ως φαινόμενη αντίσταση και εξαρτάται από τη γεωμετρία του ηλεκτροδίου και την ειδική αντίσταση του εδάφους. Η φαινόμενη ειδική αντίσταση του εδάφους ρ υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση [3, 4]:

$$\rho = \frac{4 \cdot \pi \cdot a \cdot R}{1 + \frac{2 \cdot a}{\sqrt{a^2 + 4 \cdot b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (2.1)$$

όπου R είναι η φαινόμενη αντίσταση (η ένδειξη του οργάνου), a η απόσταση μεταξύ των βοηθητικών ηλεκτροδίων και b το βάθος στο οποίο βρίσκονται τα ηλεκτρόδια. Όταν $a \gg b$ τότε η παραπάνω εξίσωση καταλήγει στην ακόλουθη:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot a \quad (2.2)$$

Μια άλλη μέθοδος μέτρησης της ειδικής αντίστασης του εδάφους –όπως προαναφέρθηκε- είναι η μέθοδος Schlumberger. Η μέθοδος αυτή απαιτεί τη χρήση ενός ευαίσθητου οργάνου και τεσσάρων βοηθητικών ηλεκτροδίων. Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο, η μέση αντίσταση του εδάφους δίνεται από τη σχέση:

$$\rho = R \cdot \pi \cdot \frac{d^2 - a^2}{2 \cdot a} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (2.3)$$

όπου d είναι το μισό της απόστασης των ακραίων βοηθητικών ηλεκτροδίων ($d = AB/2$), ενώ a είναι το μισό της απόστασης των δύο μεσαίων βοηθητικών ηλεκτροδίων ($a = MN/2$).

Από τους Ma και Dawalibi [201] γίνεται σύγκριση των δύο δημοφιλέστερων μεθόδων μέτρησης της ειδικής αντίστασης, της μεθόδου Wenner και της μεθόδου Schlumberger. Από το σχήμα 2.4 είναι προφανές ότι αλλάζει η απόσταση που έχουν μεταξύ τους τα βοηθητικά ηλεκτρόδια M και N . Η μέθοδος Schlumberger διαφέρει από τη μέθοδο Wenner κατά το γεγονός ότι μόνο τα ακραία ηλεκτρόδια μετακινούνται, άρα απαιτείται λιγότερη χειρωνακτική εργασία για την υλοποίηση των μετρήσεων. Όμως η μέθοδος με την οποία έχουν γίνει τα περισσότερα πειράματα που είναι διαθέσιμα στη βιβλιογραφία είναι η μέθοδος Wenner, γιατί επηρεάζεται λιγότερο από φαινόμενα αλλοίωσης του σήματος (π.χ. θόρυβος) [201].

Για το λόγο αυτό, στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Wenner. Χρησιμοποιήθηκαν τα γειωσόμετρα που αναφέρονται στην §2.2.2.1, δηλαδή το Pantec MIT 904 και το LEM GEO-X. Τα βοηθητικά ηλεκτρόδια ήταν χαλύβδινα και είχαν μήκος 50cm και οι αγωγοί που συνέδεαν τα βοηθητικά ηλεκτρόδια με το γειωσόμετρο είχαν διατομή 4mm². Η ειδική αντίσταση του εδάφους καταγράφηκε για διάφορες αποστάσεις μεταξύ των ηλεκτροδίων, για τον προσδιορισμό της ομοιομορφίας ή της ανομοιομορφίας του

εδάφους. Οι μετρήσεις επαναλήφθηκαν σε τακτά χρονικά διαστήματα, έτσι ώστε να ελεγχθεί η επίδραση των καιρικών φαινομένων.

2.2.2.3 Μεταβατική κατάσταση συστημάτων γείωσης

Εάν σε ένα σύστημα γείωσης εγχύσουμε ένα ρεύμα σε κάποιο σημείο του, τότε ο λόγος της χρονικής μεταβολής του δυναμικού του σημείου έγχυσης ως προς την άπειρη γη δια του εγχυόμενου ρεύματος μας δίνει την κρουστική (μεταβατική) σύνθετη αντίσταση του συστήματος γείωσης. Η μεταβατική αντίσταση μπορεί και παίρνει τιμές πολύ μεγαλύτερες από τις τιμές της αντίστασης γείωσης της μονίμου καταστάσεως (αντίσταση βιομηχανικής συχνότητας).

Για την πραγματοποίηση πειραμάτων, στα οποία απαιτείται καταγραφή της μεταβατικής αντίστασης, είναι απαραίτητη η χρήση φορητών κρουστικών γεννητριών ρεύματος, κατάλληλοι καταμεριστές για τον υποβιβασμό της υψηλής τάσης, ωμικές αντιστάσεις πολύ χαμηλής τιμής και απηλλαγμένες αυτεπαγωγής για την καταγραφή του ρεύματος, καθώς και ψηφιακό σύστημα καταγραφής και αποθήκευσης των κυματομορφών (ή πολυκάναλος παλμογράφος) [203-205].

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων για την παραγωγή των κρουστικών ρευμάτων χρησιμοποιήθηκαν δύο κρουστικές γεννήτριες ρεύματος: η γεννήτρια EMC 2004 της HILO TEST, που παρουσιάστηκε και στην παράγραφο 2.2.1 και η γεννήτρια PC 6-288 της ASEA HAEFELY.

Η γεννήτρια EMC 2004 έχει δύο ακροδέκτες εξόδου. Ο ένας (ακροδέκτης υψηλής) συνδέεται στο δοκίμιο (κατακόρυφο ηλεκτρόδιο ή ηλεκτρόδια), ενώ ο άλλος ακροδέκτης συνδέεται στην άπειρη γη που βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 40m. Η μεταβολή της τάσεως του συστήματος γείωσης ως προς την άπειρη γη και του εγχυόμενου στο δοκίμιο ρεύματος παρατηρούνται με τη βοήθεια ενός ψηφιακού παλμογράφου. Με τη χρήση του ενσωματωμένου, στη γεννήτρια, ωμικού καταμεριστή (50kΩ/50Ω) υποβιβάζεται η τάση και οδηγείται στο κανάλι 1 του παλμογράφου DL 1540 της YOKOGAWA. Παράλληλα με τη χρήση της ενσωματωμένης αντίστασης μέτρησης του ρεύματος (Current shunt, 1mΩ, 20MHz) μετατρέπεται το εγχυόμενο ρεύμα σε τάση για να μεταφερθεί στο κανάλι 2 του παλμογράφου και να πραγματοποιηθεί η καταγραφή του ρεύματος.

Η γεννήτρια PC 6-288 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανάλογα με την συνδεσμολογία του δοκιμίου, είτε σαν γεννήτρια παραγωγής κρουστικών τάσεων, είτε σαν γεννήτρια παραγωγής κρουστικών ρευμάτων. Όταν λειτουργεί σαν γεννήτρια παραγωγής ρεύματος δύναται να τροφοδοτεί με ρεύμα που η κορυφή του μπορεί να κυμαίνεται από 0.25 έως 3kA, ενώ η κυματομορφή του κρουστικού ρεύματος κατά το βραχυκύκλωμα είναι η $8/20\mu s \pm 30\%$. Ο ένας ακροδέκτης της γεννήτριας συνδέεται στο σύστημα γείωσης και ο άλλος στο βοηθητικό ηλεκτρόδιο που προσομοιώνει την άπειρη γη. Η τάση του συστήματος γείωσης υποβιβάζεται με χρήση δύο ωμικών καταμεριστών. Ο πρώτος ωμικός καταμεριστής είναι ενσωματωμένος στη γεννήτρια με λόγο καταμερισμού 730:1, ενώ ο δεύτερος είναι ένα probe (TEKTRONIX) με λόγο 1:100. Η υποβιβασμένη τάση (73000:1) εισάγεται προς μέτρηση στο σύστημα AID-1 δια μέσου ενός θωρακισμένου ομοαξονικού καλωδίου.

Τα σήματα που καταγράφονται είναι η τάση ανάμεσα στο άνω άκρο του ηλεκτροδίου γείωσης και της άπειρης γης, καθώς και το εγχυόμενο ρεύμα. Με την χρήση των προαναφερθέντων καταμεριστών η τάση υποβιβάζεται και κατόπιν εισάγεται προς μέτρηση στο σύστημα AID-1 δια μέσου ενός θωρακισμένου ομοαξονικού καλωδίου. Το εγχυόμενο ρεύμα καταγράφεται με την βοήθεια του ενσωματωμένου clamp meter της γεννήτριας. Το σύστημα καταγραφής μέτρησης (βιομηχανικός ελεγκτής) είναι ένα σύστημα συλλογής πληροφοριών (Data Acquisition System), το οποίο επεξεργάζεται τις πληροφορίες που λαμβάνει στις εισόδους του και δίνει κατάλληλες εξόδους. Ο προγραμματισμός του ηλεκτρονικού υπολογιστή, που αναλαμβάνει την επικοινωνία, γίνεται συνήθως με χρήση γλώσσων ανωτέρου επιπέδου, αλλά σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται χρήση της γλώσσας Assembly. Ο βιομηχανικός ελεγκτής που χρησιμοποιείται είναι ο AID-1, της εταιρείας μ-Analysis, ο οποίος επικοινωνεί με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω της σειριακής θύρας (com1), με το πρωτόκολλο επικοινωνίας RS-232C. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν C++ και Assembly.

2.2.3 Πειράματα για τον ιονισμό του εδάφους

Όταν η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου ξεπεράσει μια ορισμένη τιμή τότε το χώμα παύει να συμπεριφέρεται σαν μονωτικό και συμπεριφέρεται σαν αγωγίμο. Αυτό έχει

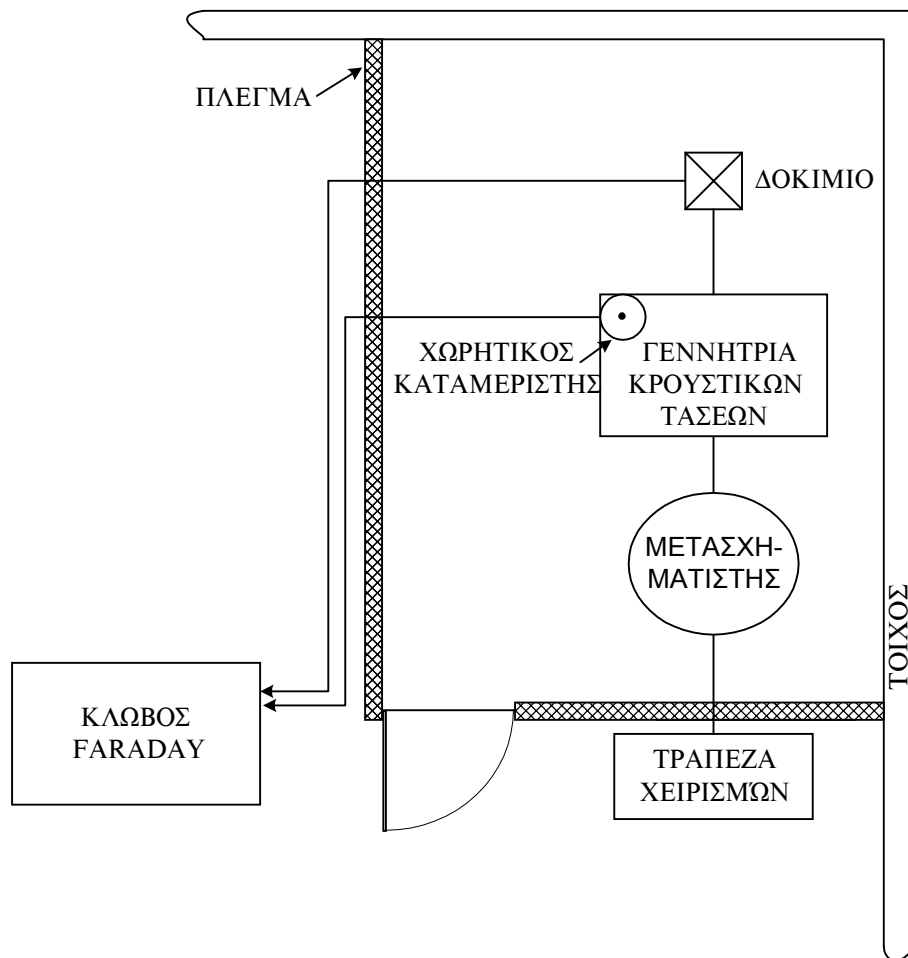
σαν αποτέλεσμα τη μείωση της ειδικής αντίστασης του εδάφους αλλά και της αντίστασης του συστήματος γείωσης. Για να μελετηθεί αυτή η κατάσταση γίνεται προσομοίωση της κατάστασης που βρίσκεται το χώμα σε συνθήκες κεραυνοπληξίας.

| Κύλινδροι | Διάμετρος Κυλίνδρου | | Εσωτερικό Ηλεκτρόδιο | |
|-----------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| | Εσωτερική D_{in} | Εξωτερική D_{out} | Μήκος l_{η} | Διάμετρος D_{η} |
| A | 14,8 cm | 15,5 cm | 81 cm | 6 mm |
| B | 24,6 cm | 25,0 cm | 81 cm | 6 mm |
| Γ | 6,3 cm | 7,5 cm | 79 cm | 3 mm |
| Δ | 10,5 cm | 11,4 cm | 84 cm | 3 mm |

Πίνακας 2.1: Διαστάσεις κυλίνδρων και ηλεκτροδίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη διεξαγωγή των μετρήσεων

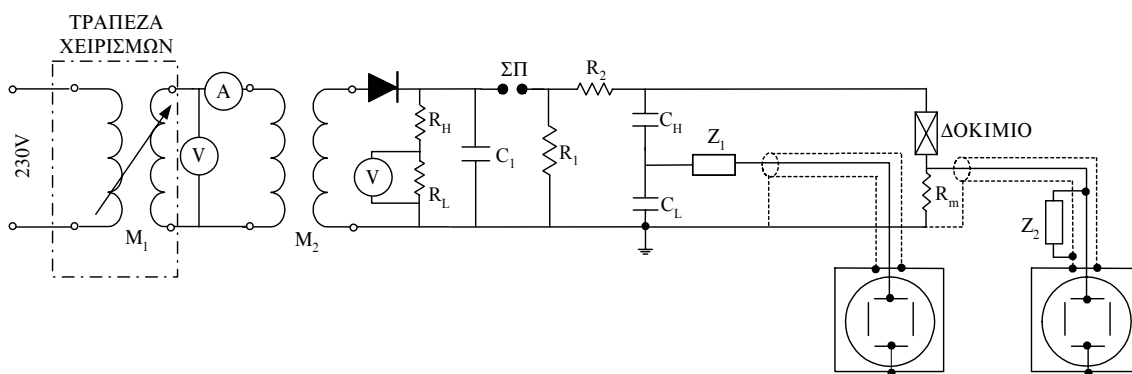
Τα δοκίμια, που χρησιμοποιήθηκαν γέμισαν με χώμα, ήταν κυλινδρικοί αγωγοί διαφορετικών διαμέτρων, των οποίων οι βάσεις ήταν ξύλινες, ενώ τα τοιχώματά τους μεταλλικά. Οι κύλινδροι είχαν μήκος 60cm. Στο κέντρο των κυλίνδρων τοποθετήθηκε ηλεκτρόδιο, που έφτανε μέχρι την κάτω βάση του κυλίνδρου, προεξείχε από την πάνω βάση και ήταν σταθερής διαμέτρου. Οι κύλινδροι γέμισαν όλοι με χώμα, του οποίου η ειδική αντίσταση μετρήθηκε για κάθε έναν χωριστά. Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των δοκιμίων φαίνονται στον πίνακα 2.1.

Για την παραγωγή κρουστικής τάσης χρησιμοποιήθηκε λυόμενη διάταξη κατασκευής Messwandler-Bau GmbH Bamberg, που διαμορφώθηκε σε μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια, η οποία παρήγαγε κρουστική τάση θετικής πολικότητας. Ο μετασχηματιστής υψηλής τάσης, η μονοβάθμια κρουστική γεννήτρια και το κυλινδρικό δοχείο χώματος, τοποθετήθηκαν εντός του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων και περικλείονταν από μεταλλικό πλέγμα (σχήμα 2.5). Ο παλμογράφος κρουστικών τάσεων (Yokogawa, DL1540) βρισκόταν εντός του κλωβού Faraday, κατασκευής Siemens. Η τράπεζα χειρισμών και ο σταθεροποιητής τάσεως βρισκόταν εκτός του μεταλλικού πλέγματος και κοντά στον προαναφερθέντα κλωβό. Στο σχήμα 2.5 παρουσιάζεται σε κάτοψη η διαμόρφωση του χώρου που διεξήχθη το πείραμα.



Σχήμα 2.5: Κάτοψη πειραματικής διάταξης

Στο σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η συνδεσμολογία της διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων.



Σχήμα 2.6: Πειραματική διάταξη

Συνοπτικά η περιγραφή της λειτουργίας της διάταξης έχει ως εξής: διατηρώντας το διάκενο του σπινθηριστή (ΣΠ) της γεννήτριας σταθερό, αυξάνεται η τάση μέσω του μετασχηματιστή M_2 , οπότε η γεννήτρια φορτίζεται. Η ρύθμιση του διακένου του

σπινθηριστή, καθώς και η αύξηση της τάσης τροφοδοσίας του ενσωματωμένου στην τράπεζα χειρισμών μετασχηματιστή MI , γίνεται μέσω της τράπεζας χειρισμών, που είναι κατασκευής Messwandler-Bau GmbH Bamberg. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η εκφόρτισή της και μέρος της κρουστικής τάσης, σύμφωνα με το λόγο καταμερισμού του χωρητικού καταμεριστή, καθώς και η πτώση τάσης που δημιουργείται στην αντίσταση R_m , οδηγούνται στον παλμογράφο 4 καναλιών DL1540, ο οποίος βρίσκεται εντός του κλωβού Faraday. Μετράται επίσης η συνεχής τάση φόρτισης του πυκνωτή C_1 της γεννήτριας κρουστικής τάσης με τη χρήση του ωμικού καταμεριστή (R_H-R_L) και του πολυμέτρου Wavetek, DM27XT. Ο ωμικός καταμεριστής που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της τάσης φόρτισης του πυκνωτή C_1 έχει λόγο καταμερισμού $\kappa=36270$ ($\kappa = \frac{R_H + R_L}{R_L} = \frac{140.000 + 3,86}{3,86}$).

Επισημαίνεται, τέλος, ότι η τροφοδοσία της τράπεζας χειρισμών και κατά συνέπεια και της κρουστικής γεννήτριας δεν γίνεται κατευθείαν από το δίκτυο της ΔΕΗ, αλλά χρησιμοποιείται ο σταθεροποιητής τάσεως 3kW της Wandel u. Goltermann.

Οι τιμές των παθητικών στοιχείων με τα οποία κατασκευάστηκε η γεννήτρια κρουστικών τάσεων, αλλά και οι απαραίτητες διατάξεις μέτρησης είναι: $R_1=R_2=500\text{k}\Omega$, $R_H=140\text{M}\Omega$, $R_L=3,86\text{k}\Omega$, $C_1=6000\text{pF}$, $R_I=9,5 \text{ k}\Omega$, $R_2=416\Omega$, $C_H=1200\text{pF}$, $C_L=485\text{nF}$, $R=75\Omega$.

Η κρουστική τάση που παράγεται είναι της μορφής $1,2/50\mu\text{s}$, ενώ οι διάρκειες μετώπου και ημίσεος εύρους για τη συγκεκριμένη διάταξη μπορούν να μεταβληθούν με επιλογή άλλων κατάλληλων μεγεθών των αντιστάσεων R_1 και R_2 [205-208]. Η μορφή της κρουστικής τάσης ελέγχεται με παλμογραφήματα και είναι σύμφωνη με όσα ορίζονται στην IEC 60-1 [203, 204].

Ένα πρόβλημα, γνωστό εκ των προτέρων, είναι η ύπαρξη παράσιτων σημάτων, που εμφανίζονται ως παράσιτες ταλαντώσεις στην οθόνη του παλμογράφου. Πάντα, στις εγκαταστάσεις υψηλών τάσεων, υπάρχει κίνδυνος εσφαλμένων μετρήσεων, εάν δε ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό των παρασιτικών τάσεων. Έγιναν διάφορες δοκιμές προκειμένου να περιοριστούν οι παρασιτικές τάσεις στην οθόνη του παλμογράφου. Αρχικά έγινε έλεγχος των γειώσεων και των βρόχων που σχημάτιζαν τα καλώδια έναυσης και μέτρησης. Για πλήρη γείωση το δάπεδο ήταν επιστρωμένο

με χάλκινο τετραγωνικό πλέγμα μέσα στο δάπεδο $80 \times 15 \text{ mm}^2$, βάθος 60 cm άνοιγμα $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$. Χρησιμοποιήθηκε μόνο ένας κόμβος γείωσης (κρουστική γη) για την αποφυγή δημιουργίας βρόχων, μέσα στους οποίους θα ήταν δυνατό να αναπτυχθούν σημαντικά υψίσυχνες τάσεις εξ επαγωγής, οι οποίες θα υπερτίθονταν στην καμπύλη της κρουστικής τάσης. Το τύλιγμα υψηλής τάσης του M2 γειώθηκε στην κρουστική γη.

Σημαντική μείωση των παρασιτικών τάσεων επιτεύχθηκε με την, όσο το δυνατό, ελάττωση του μήκους των διαφόρων καλωδίων, καθώς και με την τοποθέτηση αυτών, που μετέφεραν τα σήματα στον παλμογράφο, μέσα σε εύκαμπτους μεταλλικούς σωλήνες [205-208].

Επίσης, χρειάστηκε να γίνει προσαρμογή αντιστάσεων στα άκρα αυτών των καλωδίων, των οποίων η κατάλληλη τιμή βρέθηκε κατόπιν δοκιμών. Έτσι, συνδέθηκε ο πυκνωτής χαμηλής τάσης του χωρητικού καταμεριστή, μέσω αντίστασης προσαρμογής $Z_1=75\Omega$ (ZAN 75 της MWB), με το ομοαξονικό καλώδιο κυματικής αντίστασης 75Ω , στο κανάλι 2 του παλμογράφου, μέσω το probe model 700998 (150MHz, $10\text{M}\Omega \times 10$) της Yokagawa με λόγο υποβιβασμού 1:10. Με αυτό τον τρόπο, ο λόγος υποβιβασμού που επιτεύχθηκε με την χρήση του χωρητικού καταμεριστή ήταν:
$$\kappa = \frac{C_L + C_H}{C_H} = \frac{1.2 + 485}{1.2} = 405$$
. Επομένως, μετά τη χρήση του probe η τάση έχει υποβιβαστεί 4050 φορές.

Η πρότυπη ομοαξονική ωμική αντίσταση κατασκευής R_m συνδέθηκε μέσω ομοαξονικού καλωδίου κυματικής αντίστασης 75Ω με το κανάλι 1 του παλμογράφου. Ως αντιστάσεις μέτρησης χρησιμοποιήθηκαν οι πρότυπες ομοαξονικές αντιστάσεις του εργαστηρίου υψηλών τάσεων με κωδικούς 1117, 1118, 1119, 1120 και τιμές 0.25, 0.9917, 0.5028, 0.04971Ω , αντίστοιχα. Πριν συνδεθεί το ομοαξονικό καλώδιο με τον παλμογράφο μεσολάβησε μια αντίσταση προσαρμογής κατασκευής TEKTRONIX (011-055) τιμής $Z_2=75\Omega$, για να μην υπάρχουν ανακλώμενα κύματα στη διάταξη μέτρησης [205-208].