



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Γεννήτρια Van de Graaff

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Ν. Κουλόπουλος

Καθηγητής : Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2024





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## Γεννήτρια Van de Graaff

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γεώργιος Ν. Κουλόπουλος

**Καθηγητής :** Χρήστος Αθ. Χριστοδούλου  
Επικ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

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

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

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

.....  
Βασιλική Θ. Κονταργύρη  
Επικουρη Καθηγήτρια ΠΑΔΑ

Αθήνα, Οκτώβριος 2024

.....  
Γεώργιος Ν. Κουλόπουλος

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

Copyright © Γεώργιος Ν. Κουλόπουλος, 2024

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.

*Αφιερωμένο*

*στην μνήμη του πατέρα μου, Νικόλαου Κουλόπουλου*

## Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρουσίαση όλων των απαραίτητων βημάτων για την κατασκευή και τη σωστή λειτουργία γεννήτριας Van De Graaff. Αρχικά κάναμε μία ιστορική αναδρομή στον ηλεκτροστατικό ηλεκτρισμό και στις πρώτες ηλεκτροστατικές γεννήτριες, ύστερα συνεχίσαμε με την βιογραφία του κατασκευαστή Robert Van de Graaff και κλείσαμε με λίγα λόγια για τις υψηλές τάσεις. Στη συνέχεια παρουσιάσαμε τις απαραίτητες αρχές λειτουργίας που συναντάμε στη γεννήτρια και υπολογίσαμε τις θεωρητικές τιμές της τάσης και του ρεύματος. Μετά παρουσιάσαμε τα κατασκευαστικά μέρη που απαρτίζουν την γεννήτρια και πως τα συναρμολογήσαμε για να δώσουμε μορφή στην δική μας κατασκευή. Ακολούθησαν οι δοκιμές που έγιναν με την γεννήτρια και το πως καταφέραμε να μετρήσουμε την παραγόμενη τάση και τέλος κλείσαμε με κάποια συμπεράσματα που αντλούνται από τα όσα μάθαμε στη διαδρομή για την κατασκευή.

**Λέξεις – κλειδιά:** ηλεκτροστατικός ηλεκτρισμός, ηλεκτροστατική γεννήτρια, Van de Graaff, κατασκευή, υψηλές τάσεις

## **Abstract**

The purpose of this thesis is to present all the necessary steps for the construction and proper operation of Van De Graaff generator. First, we made a historical review of electrostatic electricity and the first electrostatic generators, then we continued with the biography of the manufacturer Robert Van de Graaff and concluded with a few words about high voltages. Then we presented the necessary operating principles found in the generator and calculated the theoretical values of the voltage and the current. We then presented the components that make up the generator and how we assembled them to give form to our own construction. We followed up with the tests that were done with the generator and how we were able to measure the voltage produced, and finally we closed with some conclusions drawn from what we learned along the way about the construction.

**Keywords:** electrostatic electricity, electrostatic generator, Van de Graaff, construction, high voltage

## **Ευχαριστίες**

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον κ. Χρήστο Χριστοδούλου, επίκουρου καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π., για την ανάθεση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας και για την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκειά της.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Θεμιστοκλή Αθανασιάδη, Υποψήφιο Διδάκτωρ του Ε.Μ.Π. για την αμέριστη βοήθεια που μου προσέφερε στο κομμάτι της κατασκευής.

Τέλος να ευχαριστήσω του φίλους μου, την οικογένειά μου και ιδιαίτερα την μητέρα μου για τη βοήθεια και την υποστήριξη σε όλη την φοιτητική μου πορεία.

# Περιεχόμενα

## Περιεχόμενα

|                                                    |    |
|----------------------------------------------------|----|
| Πρόλογος.....                                      | 10 |
| Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή- Ιστορική Αναδρομή .....      | 11 |
| 1.1 Ηλεκτρισμός και Ηλεκτροστατικές Μηχανές.....   | 12 |
| 1.2 Βίος Robert Jemison Van de Graaff .....        | 28 |
| 1.3 Υψηλές Τάσεις.....                             | 31 |
| Κεφάλαιο 2: Αρχή λειτουργίας.....                  | 36 |
| 2.1 Τα βασικά μέρη .....                           | 36 |
| 2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση .....                   | 37 |
| 2.2 Μέγιστη θεωρητική τάση .....                   | 42 |
| 2.3 Τάση λειτουργίας .....                         | 44 |
| Κεφάλαιο 3- Κατασκευή: .....                       | 47 |
| 3.1 Βασικές αρχές ασφαλείας .....                  | 47 |
| 3.2 Παρουσίαση των υλικών της γεννήτριας .....     | 48 |
| 3.3 Συναρμολόγηση.....                             | 53 |
| Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις .....                        | 62 |
| 4.1 Μέτρηση με χρήση μετρητή υψηλών τάσεων .....   | 62 |
| 4.2 Μέτρηση με βάση το μήκος του σπινθήρα .....    | 63 |
| Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα .....                     | 66 |
| 5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα ..... | 66 |
| 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα .....          | 66 |
| Βιβλιογραφία.....                                  | 67 |
| Παράρτημα Α' - Η Πατέντα .....                     | 74 |

## Πρόλογος

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση της διαδικασίας κατασκευής γεννήτριας Van de Graaff. Ξεκινώντας επεξηγούμε τις αρχές που διέπουν την λειτουργία της και ύστερα αναλύουμε τα απαραίτητα μέρη για την κατασκευή της.

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια ιστορική αναδρομή σχετικά με τον ηλεκτρισμό και τις πρώτες ηλεκτροστατικές γεννήτριες που κατασκευάστηκαν πριν φτάσουμε στην γεννήτρια Van de Graaff. Συνέχεια έχει η βιογραφία του κατασκευαστή της γεννήτριας, Robert J. Van de Graaff, και τέλος κάνουμε μία αναφορά στις υψηλές τάσεις.

Στο δεύτερο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις αρχές λειτουργίας της γεννήτριας, παρουσιάζονται τα βασικά μέρη που την αποτελούν και γίνεται υπολογισμός των θεωρητικών μεγεθών.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα μέρη της κατασκευής και τον τρόπο με τον οποίο την ολοκληρώσαμε, μέσω φωτογραφικού υλικού και επεξήγησης.

Στο τέταρτο κεφάλαιο αποτελεί το πειραματικό μέρος, στο οποίο γίνονται οι μετρήσεις της διάταξης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις θεωρητικές τιμές και το πείραμα και αντλούνται συμπεράσματα σχετικά με την κατασκευή.

Τέλος στο παράρτημα παρατίθεται η πατέντα που κατέθεσε ο Robert J. Van de Graaff στο Αμερικανικό Γραφείο Πατεντών.

## Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή- Ιστορική Αναδρομή

Το ταξίδι μας για την κατασκευή της γεννήτριας Van De Graaff θα ξεκινήσει με μία ιστορική αναδρομή στην έννοια του ηλεκτρισμού, πως παρατηρήθηκε και ερμηνεύτηκε το φαινόμενο από τους αρχαίους πολιτισμούς, αλλά και ποιοι ήταν οι πρωτοπόροι που πειραματίστηκαν και έγραψαν για αυτό. Η αναδρομή θα συμπεριλάβει τους σημαντικότερους σταθμούς στην ιστορία και θα επικεντρωθεί κυρίως στους επιστήμονες που με το έργο τους ασχολήθηκαν με τις ηλεκτροστατικές μηχανές. Προχωρώντας θα μιλήσουμε για τον εφευρέτη της γεννήτριας, Robert Jemison Van De Graaff. Τέλος θα πούμε λίγα λόγια για τις υψηλές τάσεις αναφέροντας για ποιο λόγο παράγονται και ποιες είναι οι εφαρμογές τους.

Πριν όμως ξεκινήσουμε την ιστορική αναδρομή κρίνεται αναγκαίο να ορίσουμε τι εννοούμε με τον όρο ηλεκτροστατικές μηχανές. Μία ηλεκτροστατική μηχανή ή αλλιώς ηλεκτροστατική γεννήτρια είναι μία συσκευή η οποία παράγει στατικό ηλεκτρισμό, δηλαδή ηλεκτρισμό σε υψηλή τάση και χαμηλό συνεχές ρεύμα. Η συσσώρευση των ηλεκτρικών φορτίων γίνεται συνήθως σε ένα ακροδέκτη εξόδου, ο οποίος μπορεί να είναι μία σφαίρα, ένας κύλινδρος ή μία πλάκα που ουσιαστικά παίζουν τον ρόλο του πυκνωτή. Οι ηλεκτροστατικές γεννήτριες μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο φόρτισής τους, σε μηχανές τριβής (friction machines) που χρησιμοποιούν το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο (ηλεκτρισμός που παράγεται από επαφή ή τριβή) και σε μηχανές επαγωγής (induction or influence machines) που χρησιμοποιούν ηλεκτροστατική επαγωγή. [\[1\]](#)

Το πρώτο είδος ηλεκτροστατικής γεννήτριας, οι μηχανές τριβής, ήταν και αυτές που δημιουργήθηκαν πρώτα λόγω της απλότητας τους, με την πρώτη γεννήτρια τριβής να χρονολογείται τον 17<sup>ο</sup> αιώνα. Οι μηχανές επιρροής, από την άλλη, δημιουργήθηκαν μετά τον «ηλεκτροφόρο» που εφηύρε ο Alessandro Volta, μία διάταξη η οποία λειτουργεί με φορτίο εξ επαγωγής, δηλαδή χωρίς να υπάρχει επαφή. [\[2\]](#)

Οι μηχανές τριβής λειτουργούν με βάση το τριβοηλεκτρικό φαινόμενο, το οποίο παρουσιάζεται όταν δύο αντικείμενα έρθουν σε επαφή και μετά

απομακρυνθούν ή, ακόμα πιο αποδοτικά, όταν τριφτούν μεταξύ τους. Συνήθως οι μονωτές, δηλαδή οι ουσίες που δεν είναι αγωγίμες, όπως το γυαλί και το πλαστικό, είναι καλοί τόσο στην παραγωγή όσο και στην συγκράτηση φορτίου. Το φορτίο που παράγεται κατά την επαφή αποθηκεύεται στην επιφάνεια κάθε σώματος και γι' αυτό ονομάζεται επιφανειακό φορτίο. Το είδος του φορτίου, η ένταση και τα απελευθερωμένα φορτία είναι αποτέλεσμα πολλών φαινομένων πέρα του τριβοηλεκτρικού, όπως το φαινόμενο κορώνα, για αρκετά από τα οποία θα μιλήσουμε παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι δύο ή και περισσότερα φαινόμενα μπορούν να συνυπάρχουν. [2]

Οι μηχανές τριβής σταδιακά αντικαταστάθηκαν από το δεύτερο είδος ηλεκτροστατικών γεννητριών, τις μηχανές επαγωγής, που σαν κύριο μηχανισμό τους έχουν την ηλεκτροστατική επαγωγή και μετατρέπουν μηχανικό έργο σε ηλεκτροστατική ενέργεια με την βοήθεια ενός μικρού αρχικού φορτίου, το οποίο συνεχώς ανανεώνεται και ενισχύεται. Η ηλεκτροστατική ενέργεια που παράγεται αποθηκεύεται στον ακροδέκτη εξόδου. [2]

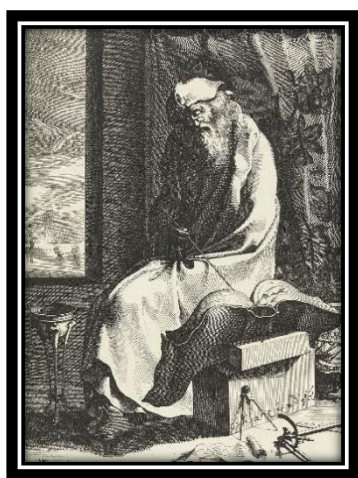
Η γεννήτρια Van De Graaff κάνει χρήση και των δύο φαινομένων, της τριβής και της επαγωγής, ωστόσο κατατάσσεται στις μηχανές επαγωγής, ενώ ταυτόχρονα εισάγει και νέες τεχνικές ηλεκτροστατικής φόρτισης. [1]

## 1.1 Ηλεκτρισμός και Ηλεκτροστατικές Μηχανές

Ο ηλεκτρισμός, μία θεμελιώδης μορφή ενέργειας που παρατηρείται σε θετικές και αρνητικές μορφές και εκφράζεται ως η κίνηση και η αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων, υπήρχε στο πλάνητή μας πριν εμφανιστεί οποιαδήποτε μορφή ζωής. Δισεκατομμύρια χρόνια πριν, ο ηλεκτρισμός, εμφανιζόταν με την μορφή των κεραυνών και αστραπών. Το μαγνητικό πεδίο της γης, απαραίτητο για την διατήρηση της ζωής καθώς μας προφυλάσσει από την ηλιακή ακτινοβολία, είναι αποτέλεσμα των ηλεκτρικών ρευμάτων που δημιουργούνται από την κίνηση του ρευστού πυρήνα σιδήρου της γης. Όταν δημιουργήθηκε ζωή ο ηλεκτρισμός εμφανίστηκε και σε αυτή. Στο ζωικό βασίλειο έχουμε παραδείγματα όπως αυτά των καρχαριών και αρκετών άλλων ψαριών που έχουν την ικανότητα να δημιουργούν ηλεκτρικό πεδίο ώστε να διακρίνουν αντικείμενα γύρω τους, ώστε να μπορούν να «βλέπουν» στο σκοτάδι,

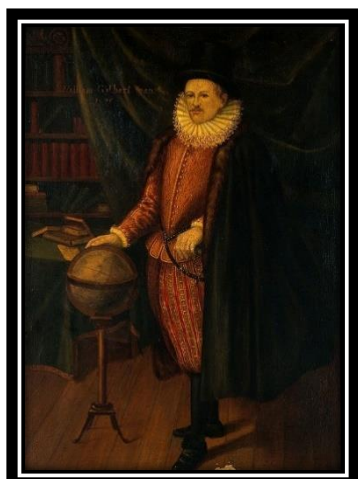
αλλά και το ποιο σύνθητες παράδειγμα του ηλεκτροφόρου χελιού, το οποίο χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για άμυνα κατά των θηρευτών. Στο ανθρώπινο σώμα ο ηλεκτρισμός είναι υπεύθυνος για την επικοινωνία του εγκεφάλου με το υπόλοιπο σώμα, στέλνοντας ηλεκτρικά σήματα μέσω των νεύρων ώστε να μπορεί να ελέγχει όλες τις λειτουργίες μας. Πώς όμως μία έννοια αν και τόσο δεδομένη και μελετημένη στις μέρες μας ερμηνεύτηκε από τους ανθρώπους στην αρχαιότητα; [3]

Χιλιάδες χρόνια πριν μελετηθεί και γίνει γνωστή η έννοια του ηλεκτρισμού στους ανθρώπους, υπήρξαν αναφορές σε αρχαία αιγυπτιακά κείμενα (2750 π.Χ.) για ηλεκτροφόρο ψάρι, το οποίο μάλιστα αποκαλούσαν «κεραυνό του Νείλου». Για



Σχήμα 1 Ο Θαλής ο Μιλήσιος (624-620 έως 548-545 π.Χ.) [5]

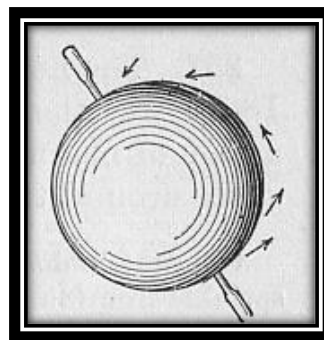
μερικές χιλιετίες τα ηλεκτροφόρα ψάρια μελετήθηκαν από τους αρχαίους Έλληνες, Ρωμαίους και Αιγύπτιους γιατρούς και φυσιδίφες, οι οποίοι προέτρεπαν ασθενείς που έπασχαν από ασθένειες, όπως πονοκεφάλους και επιληψίες, να ακουμπήσουν ηλεκτροφόρα χέλια η σαλάχια ως μία μορφή θεραπείας. Η πρώτη αναφορά στην έννοια του ηλεκτρισμού γίνεται από έναν πολύ γνωστό Έλληνα φιλόσοφο, μαθηματικό και αστρονόμο, τον Θαλή τον Μιλήσιο. Παρατήρησε ότι ελαφρά αντικείμενα, όπως πούπουλα ή τρίχες μιας γούνας ζώου, αν τριφτούν σε κεχριμπάρι έλκονται από αυτό. Ο Θαλής ο Μιλήσιος δεν το διατύπωσε ακριβώς σωστά, καθώς απέδωσε το φαινόμενο στον μαγνητισμό, αλλά είναι και πάλι η αρχαιότερη αναφορά στον ηλεκτρισμό που έχει καταγραφεί. [3], [4]



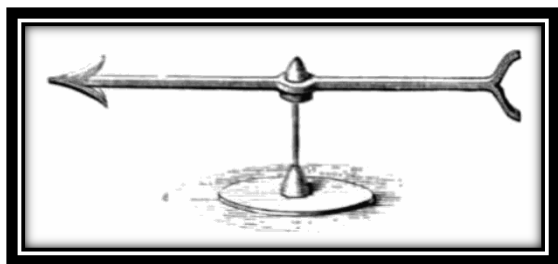
Σχήμα 2 Ο William Gilbert (1544-1603 μ.Χ.) [5]

Ελισάβετ της Α', William Gilbert περί το 1600 μ.Χ. ασχολείται με πειράματα γύρω από τον ηλεκτρισμό και

Για τους επόμενους αιώνες δεν θα υπάρξουν αναφορές σχετικά με την έννοια του ηλεκτρισμού, έως ότου ο Άγγλος επιστήμονας και γιατρός της βασίλισσας

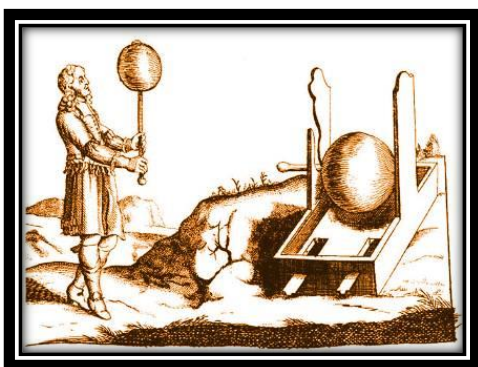


Σχήμα 3 Η terrella που κατασκεύασε ο Gilbert [6]

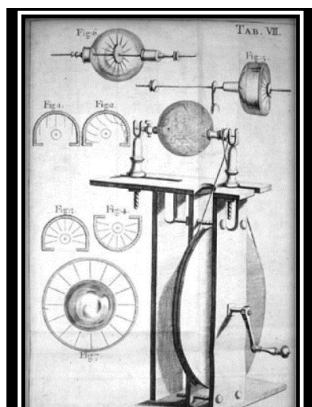


Σχήμα 4 Το versorium (λατινική λέξη για το γύρισμα) ήταν το πρώτο ηλεκτροσκόπιο που δημιούργησε ο Gilbert. [6]

μέταλλο και ότι ο λόγος που οι πυξίδες δείχνουν προς το βορρά ήταν επειδή η Γη είναι η ίδια ένας τεράστιος μαγνήτης. Δημιούργησε μάλιστα ένα μοντέλο της μαγνητικής Γης σε κλίμακα ή αλλιώς «terrella», μια σφαίρα φτιαγμένη από ορυκτό μαγνήτη, αποδεικνύοντας ότι επιδρά σε μία μαγνητική βελόνα όπως η Γη. Πιο συγκεκριμένα περνώντας μία πυξίδα πάνω από την terrella είδε ότι η πυξίδα έδειχνε προς το μαγνητικό πόλο της, ενώ μία βελόνα στον άξονά της την γωνία κλίσης. Ο



Σχήμα 5 Ο Otto van Guericke (1602-1686 μ.Χ.) με την πρώτη ηλεκτροστατική μηχανή. [7]



Σχήμα 6 Ηλεκτροστατική μηχανή του Francis Hauksbee (1660- 1713 μ.Χ.) [6]

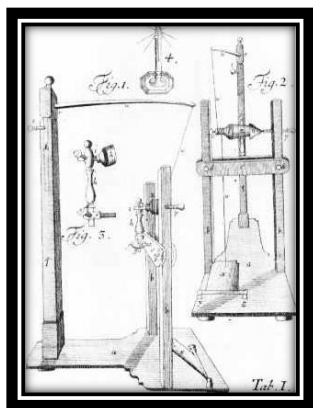
επινοεί τον όρο «ηλεκτρισμός». Να σημειώσουμε ότι η λέξη ηλεκτρισμός προέρχεται από το ήλεκτρο που σημαίνει κεχριμπάρι. Ο Gilbert ήταν ο πρώτος που στο βιβλίο του «On the Magnet» συσχέτισε τον ηλεκτρισμό με τον μαγνητισμό αλλά και ο πρώτος που πρότεινε ότι ο πυρήνας της Γης περιέχει

Gilbert εφηύρε ακόμα το ηλεκτροσκόπιο, συσκευή που χρησιμοποιείται στο να ελέγχουμε αν κάποιο σώμα είναι ηλεκτρισμένο, αλλά και τι είδος φορτίου φέρει, και τέλος διαχώρισε τα σώματα σε μονωτές και αγωγούς. [8], [9], [10]

Η πρώτη ηλεκτροστατική μηχανή κατασκευάζεται από τον Otto Van Guericke (Γερμανό φυσικό, μηχανικό και φιλόσοφο) το 1663, που δεν ήταν τίποτε άλλο από μία μεγάλη γυάλινη μπάλα γεμάτη θείο και τοποθετημένη σε έναν άξονα. Περιστρέφοντας την μπάλα και τρίβοντας σε αυτή ένα κομμάτι ύφασμα, παρατήρησε ότι παραγόταν σπινθήρας. [7]

Λίγο καιρό αργότερα, περί το 1706, ο Άγγλος επιστήμονας Francis Hauksbee δημιούργησε τη δική του εκδοχή της μηχανής του Otto Van Guericke. Η σημαντική διαφορά ήταν ότι ο Hauksbee χρησιμοποίησε κυλίνδρους, αλλά και τοποθέτησε ένα γειωμένο καλώδιο μέσα στην

γυάλινη μπάλα. Σε ένα από τα πειράματα τοποθέτησε υδράργυρο στο εσωτερικό της σφαίρας, αφαιρώντας τον αέρα από αυτή και τρίβοντάς τη δημιούργησε μία δυνατή λάμψη. Στη συνέχεια προχώρησε σε αρκετά ακόμα πειράματα τρίβοντας διάφορα υλικά μεταξύ τους. [11]

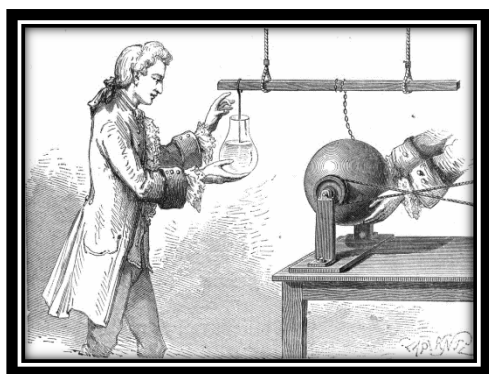


Σχήμα 7 Η μηχανή του Winkler (1703-1770 μ.Χ.) για την παραγωγή ηλεκτρισμού από ένα μπουκάλι μπίρας [6]

Η βελτίωση της μηχανής του Hauksbee έγινε από διάφορους επιστήμονες, ο πιο σημαντικός εκ των οποίων ήταν ο καθηγητής φυσικής του Leipzig, Johann Heinrich Winkler ο οποίος πρόσθεσε ένα μηχανισμό από πλεκτική μηχανή της εποχής, το λεγόμενο Tretmechanismus, ως μηχανισμό μετάδοσης αλλά και δερμάτινα κομμάτια για καλύτερη τριβή. Ο Winkler επίσης διενήργησε πειράματα για να διαπιστώσει πως ενεργεί ο ηλεκτρισμός στο ανθρώπινο σώμα. Σε ένα μάλιστα από τα πειράματα του ώθησε την γυναίκα του να ακουμπήσει ένα λαμπτήρα του

Layden (περισσότερα για αυτόν παρακάτω), με αυτό να έχει σαν αποτέλεσμα να μην μπορεί να κουνήσει τα πόδια της, διαπιστώνοντας ότι ο ηλεκτρισμός μπορούσε να επιφέρει από μυϊκό σπασμό μέχρι παράλυση και θάνατο. [12]

Το 1745 ο Γερμανός κληρικός, νομικός και φυσικός Ewald Georg von Kleist (1700-1748 μ.Χ.) έκανε μία μεγάλη ανακάλυψη πειραματιζόμενος με τον ηλεκτρισμό.

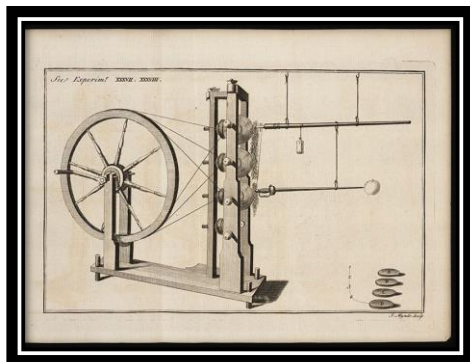


Σχήμα 8 Η ανακάλυψη της φιάλης του Layden από τον Pieter van Musschenbroek (1692-1761 μ.Χ.) στο εργαστήριό του [5]

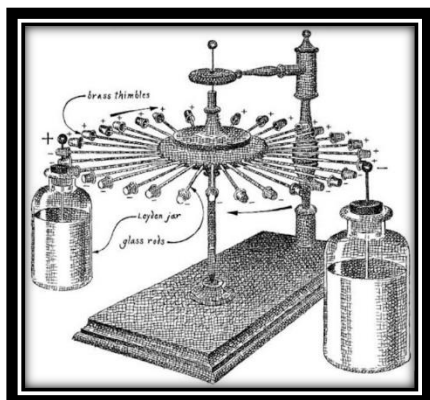
Ανακάλυψε ότι μπορούσε να αποθηκεύσει τον ηλεκτρισμό σε ένα βάζο το οποίο είχε επικαλύψει εσωτερικά και εξωτερικά με μεταλλικά φύλλα. Αυτή του η ανακάλυψη ονομάστηκε φιάλη του Kleisten, η οποία, λίγο αργότερα, το 1746, μελετήθηκε από το πανεπιστήμιο του Leyden και συγκεκριμένα από τον Pieter van Musschenbroek και οδήγησε στην πιο γνωστή μορφή της, την φιάλη του Layden , η οποία είναι μία

ηλεκτρική συσκευή που χρησιμοποιούταν για την αποθήκευση φορτίων υψηλών τάσεων. Συνήθως αποτελούταν από ένα γυάλινο βάζο με επικάλυψη από κάποιο μέταλλο, εσωτερικά και εξωτερικά, και ένα μεταλλικό ακροδέκτη που προεξείχε κάθετα μέσα από το καπάκι του βάζου, για να έρθει σε επαφή με το εσωτερικό φύλλο

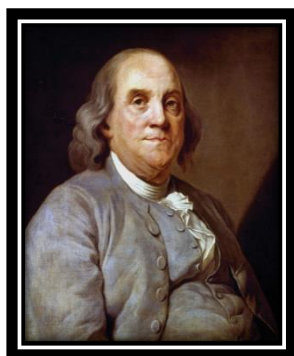
μετάλλου. Ουσιαστικά ανακάλυψε τον πρώτο πυκνωτή και βοήθησε σε πολύ μεγάλο βαθμό στην εξέλιξη των ηλεκτροστατικών γεννητριών. [13], [14], [15]



Σχήμα 9 Η ηλεκτροστατική μηχανή του William Watson (1715-1787 μ.Χ.) διακρίνονται οι 4 σφαίρες, η κάνη και το σπαθί [16]



Σχήμα 10 Ηλεκτρικός στρόβιλος (είδος ηλεκτρικής μηχανής) που δημιούργησε ο Andrew Gordon (1712-1751 μ.Χ.) στην οποία πραγματοποιείται κίνηση του στρόβιλου μέσω συσσώρευσης ηλεκτρικού φορτίου στα άκρα κάθε ακτίνας. Το ηλεκτρικό φορτίο ιονίζει τα μόρια του αέρα δημιουργώντας ένα δεύτερο ηλεκτρικό φορτίο που απωθείται από το φορτίο στις ακτίνες. [6]



Σχήμα 11 Ο Benjamin Franklin (1706-1790 μ.Χ.) [5]

Το ίδιο έτος (1746) ο Βρετανός επιστήμονας, ιατρός και βοτανολόγος, William Watson, δημιουργεί την δική του ηλεκτροστατική μηχανή αποτελούμενη από ένα μεγάλο τροχό, ο οποίος γύριζε 4 γυάλινες σφαίρες. Οι κύριοι αγωγοί ήταν μία κάννη όπλου και ένα σπαθί που κρέμονταν από μεταξωτά κορδόνια. Ο Watson ήταν επίσης ο πρώτος που κατάλαβε ότι ο ηλεκτρισμός μεταφέρεται μόνο μέσω ενός ολοκληρωμένου συστήματος και ότι η Γη μπορεί να αποτελεί μέρος αυτού. [16]

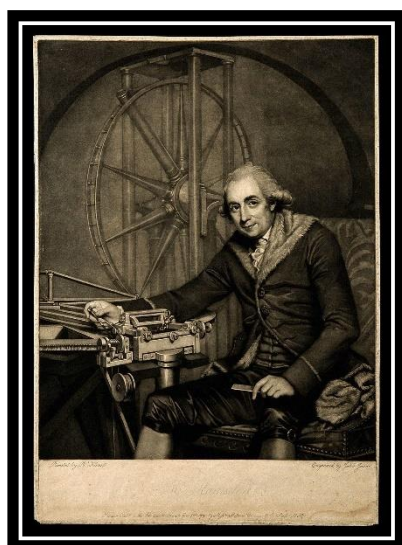
Την ίδια δεκαετία είχαμε και την εφεύρεση της πρώτης ηλεκτρικής μηχανής, όπως μπορούμε να την χαρακτηρίσουμε, από τον Σκοτσέζο μοναχό και αργότερα καθηγητή φιλοσοφίας Andrew Gordon. Οι κύριες διαφορές της ηλεκτρικής μηχανής με την ηλεκτροστατική μηχανή εντοπίζονται στο ότι η ηλεκτροστατική μηχανή παράγει ηλεκτρισμό μέσω της συσσώρευσης και διαχείρισης ηλεκτρικών φορτίων χρησιμοποιώντας μηχανισμούς όπως η τριβή ή η ηλεκτροστατική επαγωγή. Η ηλεκτρική μηχανή αντίθετα, είναι συσκευή, η οποία μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική και αντίστροφα, όπως για παράδειγμα οι ηλεκτρικοί κινητήρες και οι γεννήτριες, κάνοντας χρήση ηλεκτρομαγνητικών αρχών. [17]

Περί το 1752 ένα από τα διασημότερα ονόματα του 18<sup>ου</sup> αιώνα, τόσο της πολιτικής αλλά και του χώρου της επιστήμης, αποδεικνύει ότι ο ηλεκτρισμός είναι ένα είδος

«ρευστού» με θετικά και αρνητικά φορτία και όχι δύο είδη «ρευστών» όπως θεωρούσαν μέχρι εκείνη την εποχή. Φυσικά μιλάμε για τον Benhamin Franklin ο οποίος δεν έμεινε μόνο εκεί αλλά απέδειξε ότι οι καταστάσεις του ηλεκτρισμού, δηλαδή τα θετικά και τα αρνητικά φορτία, έπρεπε να εμφανίζονται σε ίσες ποσότητες. Επίσης διέκρινε τα σώματα σε μονωτές και αγωγούς. Ο Franklin βέβαια έμεινε στην ιστορία για το ριψοκίνδυνο πείραμα με τον χαρταετό, κατά το οποίο πέταξε ένα χαρταετό μέσα σε ηλεκτρική καταιγίδα. Το πείραμα αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να εξηγηθεί για πρώτη φορά η σύνδεση του ηλεκτρισμού και των κεραυνών και να δημιουργηθεί το πρώτο αλεξικέραυνο. [\[18\]](#), [\[2\]](#) , [\[19\]](#)



Σχήμα 12 Ο Henry Cavendish (1731-1810 μ.Χ.) και η υπογραφή του [\[6\]](#)

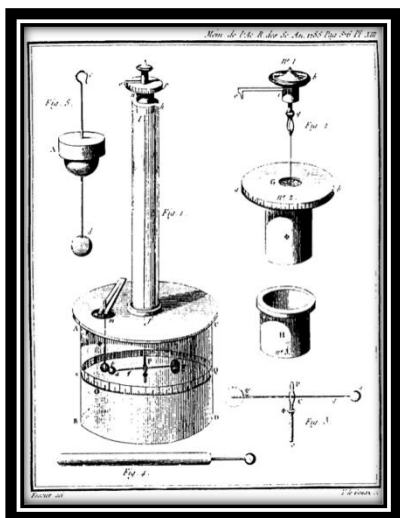


Σχήμα 13 Jesse Ramsden(1735-1800 μ.Χ.) [\[6\]](#)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθούμε στον Άγγλο επιστήμονα και φιλόσοφο Henry Cavendish ο οποίος, αν και δεν δημοσίευσε τις εργασίες του, είναι υπεύθυνος για πολύ σημαντικές έννοιες του ηλεκτρισμού. Μεταξύ των ανακαλύψεων του ήταν, η έννοια του ηλεκτρικού δυναμικού (ή όπως το ονόμασε «βαθμό ηλεκτρισμού»), η έννοια της διηλεκτρικής σταθεράς ενός υλικού, η σχέση μεταξύ ηλεκτρικού δυναμικού και ρεύματος (ο σημερινός νόμος του Ohm), νόμοι για την κατανομή του ρεύματος σε παράλληλα κυκλώματα (που σήμερα αποδίδονται στον Charles Wheatstone), αλλά και ο νόμος του αντιστρόφου τετραγώνου της μεταβολής της ηλεκτρικής δύναμης με την απόσταση (που σήμερα ονομάζεται νόμος του Coulomb). Τα έργα του Cavendish, που χρονολογούνται γύρω στο 1760, συλλέχτηκαν και δημοσιεύθηκαν από τον James Clerk Maxwell ένα αιώνα αργότερα, το 1879, και αφού οι ανακαλύψεις αυτές είχαν πιστωθεί σε άλλους επιστήμονες. [\[18\]](#)

Το 1768 ο Βρετανός μαθηματικός, αστρονόμος και κατασκευαστής επιστημονικών

οργάνων, ονόματι Jesse Ramsden δημιούργησε την δική του ηλεκτροστατική γεννήτρια, χρησιμοποιώντας αντί για τη συνηθισμένη γυάλινη σφαίρα, γυάλινη πλάκα, η οποία τρίβεται πάνω σε δερμάτινα μαξιλαράκια και δημιουργεί ηλεκτρικό φορτίο. Το ηλεκτρικό φορτίο αποθηκεύεται σε ορειχάλκινο πλαίσιο και μετριέται με ηλεκτρόμετρο. [2]



Σχήμα 14 Ο ζυγός στρέψης του Charles Augustin De Coulomb (1703-1806 μ.Χ.) [20]

Την δεκαετία του 1780 ο μεγάλος Γάλλος φυσικός, Charles Augustin De Coulomb, μέτρησε τις ηλεκτρικές δυνάμεις με ένα ευαίσθητο δυναμόμετρο, το «ζυγό στρέψης», και αυτό τον οδήγησε να διατυπώσει τον ομώνυμο νόμο σύμφωνα με τον οποίο: «Η δύναμη ανάμεσα σε δύο ηλεκτρικά φορτισμένα σώματα είναι ανάλογη του φορτίου τους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής τους». Βέβαια δεν ήταν το μοναδικό από τα επιτεύγματά του καθώς δημοσίευσε περισσότερα από 25 έργα πάνω στον ηλεκτρισμό και τον μαγνητισμό, όπως το νόμο της τριβής. [18], [20]



Σχήμα 15 Η μεγάλη ηλεκτροστατική μηχανή του Martinus van Marum (1750-1837 μ.Χ.) σε συνεργασία με τον John Cuthbertson (1743-1821 μ.Χ.) όπως εκθέτεται στο μουσείο Teylers στην Ολλανδία [6]

Ακολουθώντας τα σχέδια του Ramsden, το 1784, ο Δανός επιστήμονας Martinus van Marum σε συνεργασία με τον Άγγλο κατασκευαστή επιστημονικών οργάνων John Cuthbertson, κατασκεύασε την ισχυρότερη ηλεκτροστατική μηχανή που είχε υπάρξει. Τα πειράματα μέχρι τότε γίνονταν με μηχανές που παρήγαγαν τάσεις της τάξεως των 50.000 volt, ενώ η μηχανή του Marum παρήγαγε

τάση που έφτανε από 300.000 μέχρι και 700.000 volt και απελευθέρωνε 30.000 joules ενέργεια με σπινθήρες που έφταναν τα δύο πόδια (0,6 meters). Η ηλεκτροστατική μηχανή αυτή εκτίθεται στο μουσείο Teylers στην Ολλανδία. [21]

Ένα χρόνο αργότερα, το 1785, ο Γάλλος φυσικός N. Rouland κατασκεύασε μία διαφορετικού τύπου ηλεκτροστατική γεννήτρια αποτελούμενη από μία μεταξωτή ζώνη η οποία γυρνούσε γύρω από δύο γειωμένους σωλήνες καλυμμένους με γούνα λαγού. Η τριβή του μεταξιού με την γούνα παρήγαγε φορτίο το οποίο αποθηκευόταν σε ένα μεταλλικό κυλινδρικό συλλέκτη. Αυτή η γεννήτρια θα μπορούσαμε να την χαρακτηρίσουμε ως μία πρόιμη γεννήτρια Van De Graaff. [2]



Σχήμα 16 Ο Edward Nairne(1726-1806 μ.Χ.) με την ηλεκτροστατική μηχανή από γυάλινο κύλινδρο [6]

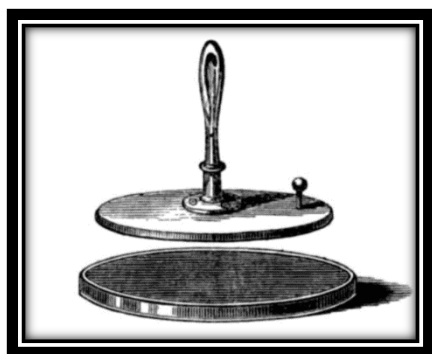
Λίγα χρόνια αργότερα, το 1787, ο Άγγλος κατασκευαστής επιστημονικών οργάνων Edward Nairne κατασκεύασε ηλεκτροστατική γεννήτρια από γυάλινο κύλινδρο η οποία μπορούσε να παράγει υψηλό φορτίο, είτε θετικό είτε αρνητικό. Το θετικό φορτίο συλλέγεται από τον κύριο συλλέκτη ενώ το αρνητικό από τον συλλέκτη που είναι συνδεδεμένος με την περιοχή της τριβής. Η γεννήτρια του

χρησιμοποιήθηκε στην ιατρική και συγκεκριμένα σε νευρικές διαταραχές, μώλωπες, εγκαύματα, πονόδοντο κ.α. [2], [22]



Σχήμα 17 Ηλεκτροστατική μηχανή του Carl Winter, διακρίνουμε τα δακτυλίδια επαγωγής [23]

Η πιο αποδοτική ηλεκτροστατική μηχανή που λειτουργεί με τριβή αποδίδεται στον Αυστριακό κατασκευαστή επιστημονικών οργάνων Carl Winter. Η μηχανή Winter αποτελείτο από γυάλινο δίσκο, ο οποίος τρίβεται και από τις δύο πλευρές του και από ένα ζευγάρι συλλεκτών φορτίου αντιδιαμετρικά τοποθετημένο, που της επέτρεπαν να συλλέγει και τα δύο είδη φορτίων. Σε ορισμένες κατασκευές ένα μεγάλο ξύλινο δακτυλίδι με μεταλλικό πυρήνα συνδεόταν στους συλλέκτες ώστε να αυξηθεί η χωρητικότητά τους. [23]



Σχήμα 18 Ο ηλεκτροφόρος που δημιούργησε ο Alessandro Volta (1745-1827 μ.Χ.) [6]

Παρατηρούμε ότι μέχρι εκείνη την εποχή οι ηλεκτροστατικές μηχανές χρησιμοποιούσαν την τριβή ως μηχανισμό φόρτισης. Αυτό έρχεται να αλλάξει με το έργο του Alessandro Volta. Το 1775 κατασκεύασε τον «ηλεκτροφόρο», ένα πυκνωτή μονής πλάκας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή

ανισορροπιών του ηλεκτρικού φορτίου

μέσω της διαδικασίας της ηλεκτροστατικής επαγωγής. Αποτελείται από ένα λείο μεταλλικό δίσκο με μονωτική λαβή και από μία διηλεκτρική πλάκα. Τρίβοντας την πλάκα με μία γούνα ή δέρμα παράγεται ηλεκτρικό φορτίο, συνήθως αρνητικό. Στη συνέχεια τοποθετώντας το μεταλλικό δίσκο πάνω στην φορτισμένη πλάκα παρατηρείται ότι δεν μεταφέρεται σημαντικό μέρος του



Σχήμα 19 Η βολταϊκή στήλη του Alessandro Volta [6]

επιφανειακού φορτίου στον δίσκο, διότι η επαφή είναι μικρή, αλλά το ηλεκτροστατικό πεδίο προκαλεί διαχωρισμό των φορτίων. Έτσι η πλάκα φορτίζεται θετικά, ενώ ο μεταλλικός δίσκος αρνητικά, αφήνοντας την διάταξη ουδέτερα φορτισμένη στο σύνολο. Στη συνέχεια ακουμπώντας με το χέρι τον μεταλλικό δίσκο (γειώνοντάς τον) η πλάκα παραμένει θετικά φορτισμένη και μάλιστα για αρκετά μεγάλο διάστημα. Το όνομα του Alessandro Volta έχει συνδεθεί περισσότερο με την ανακάλυψη που πραγματοποίησε λίγα χρόνια αργότερα, το 1800, αποδεικνύοντας ότι

ο ηλεκτρισμός μπορεί να παραχθεί από την επαφή δύο μετάλλων και κατασκευάζοντας την «βολταϊκή στήλη» ή αλλιώς την πρώτη μπαταρία. Τέλος εισήγαγε τις έννοιες της ηλεκτρικής χωρητικότητας και του δυναμικού, στην τιμή μέτρησης του οποίου δόθηκε το όνομά του. [2], [18]



Σχήμα 20 Ο «διπλασιαστής φορτίου» του Abraham Bennet (1749-1799 μ.Χ.) [6]

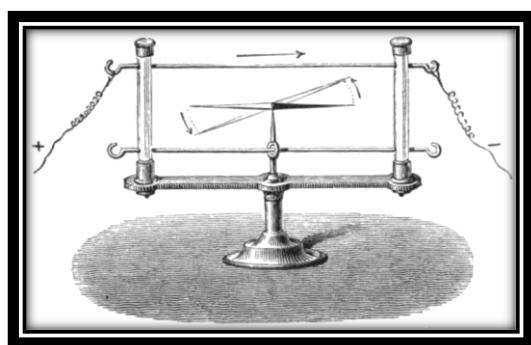
Πάνω στην αρχή λειτουργίας της επαγωγής στηρίχθηκε ο Abraham Bennet και το 1787 κατασκεύασε τον «διπλασιαστή φορτίου», μία συσκευή παρόμοια του ηλεκτροφόρου, που ωστόσο μπορούσε να

ενισχύσει ένα μικρό φορτίο μέσω επαναλαμβανόμενων χειροκίνητων χειρισμών με τρεις μονωμένες πλάκες, ούτως ώστε να είναι παρατηρήσιμο στο ηλεκτροσκόπιο. [2]



Σχήμα 21 Ο «διπλασιαστής φορτίου» του William Nicholson (1753-1815 μ.Χ.) [24]

Ένα χρόνο αργότερα, το 1788, ο Άγγλος χημικός William Nicholson πρότεινε τον δικό του διπλασιαστή φορτίου, ο οποίος μπορεί να θεωρηθεί ως η πρώτη περιστρεφόμενη μηχανή επαγωγής, καθώς είχαμε την προσθήκη περιστρεφόμενου μηχανισμού. Περιεγράφηκε ως «ένα όργανο, το οποίο περιστρέφοντας ένα βαρούλκο, παράγει τις δύο καταστάσεις ηλεκτρικής ενέργειας χωρίς τριβή ή επικοινωνία με τη γη». Πολλοί επιστήμονες πειραματίστηκαν και κατασκεύασαν δικές τους εκδοχές του διπλασιαστή, όπως ο Tiberius Cavallo (1749-1809 μ.Χ.) και ο Charles Bernard Desormes (1777-1862 μ.Χ.). [2]



Σχήμα 22 Ο ηλεκτρομαγνήτης που ανακάλυψε ο Hans Christian Oersted (1777-1851 μ.Χ.) [6]

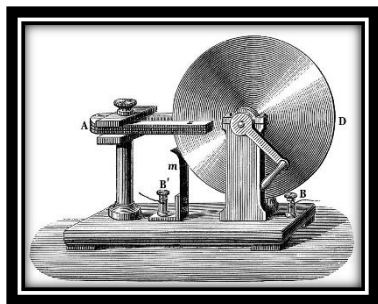
Το 1820 ο Δανός φυσικός Hans Christian Oersted παρατήρησε ότι το ηλεκτρικό ρεύμα επηρεάζει την συμπεριφορά της πυξίδας και γνωρίζοντας ήδη ότι ο μαγνητισμός επηρεάζει και αυτός την πυξίδα, έβγαλε το συμπέρασμα ότι ο μαγνητισμός και ο ηλεκτρισμός είτε είναι ίδια δύναμη είτε στενά συνδεδεμένες δυνάμεις. Η ανακάλυψη του είχε σαν αποτέλεσμα την εφεύρεση του ηλεκτρομαγνήτη, ενός σύρματος που συμπεριφέρεται σαν μαγνήτης όταν το διαρρέει ηλεκτρικό ρεύμα. [18]



Σχήμα 23 Georg Simon Ohm (1789-1854 μ.Χ.) [6]

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1825, ο πολύ γνωστός Γερμανός φυσικός Georg Simon Ohm δημοσίευσε την πρώτη του εργασία, κατά την οποία απέδειξε ότι όλα τα υλικά εμφανίζουν αντίσταση στον ηλεκτρισμό και εξέτασε την μείωση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης που παράγεται από ένα σύρμα όταν αυξάνεται το μήκος του. Το 1827 δημοσίευσε το διάσημο βιβλίο του «Die

galvanische Kette, mathematisch bearbeiter», το οποίο περιείχε τον ομώνυμο νόμο του Ohm και ορίζει ότι το ρεύμα που διαρρέει ένα αγωγό είναι ανάλογο της διαφοράς δυναμικού και αντιστρόφως ανάλογο της αντίστασης. Αξίζει να σημειώσουμε ότι ο νόμος του Ohm ήταν η αρχή για την μαθηματοποίηση της φυσικής και αποτελεί θεμέλιο για την μελέτη της επιστήμης του ηλεκτρισμού. Επίσης το 1830 ο Ohm



Σχήμα 24 Ηλεκτρική γεννήτρια του Michael Faraday (1791-1867 μ.Χ.), αποτελούμενη από μόνιμο μαγνήτη, δίσκο περιστροφής, ακροδέκτες φορτίου και ψήκτρα [6]

κατασκεύασε μία μηχανή τριβής παρόμοια με την γεννήτρια του Van Marum. [25]

Το 1831 ο Άγγλος φυσικός και χημικός Michael Faraday πραγματοποίησε ένα πείραμα κατά το οποίο κίνησε ένα μαγνήτη μέσα και έξω από ένα κυκλικό πηνίο από σύρμα και έτσι παρήγαγε ρεύμα. Παρατήρησε όμως ότι αυτό ίσχυε μόνο αν ο μαγνήτης συνέχιζε να κινείται ώστε η ισχύς του μαγνητικού πεδίου κοντά στο σύρμα να μεταβάλλεται συνεχώς. Το

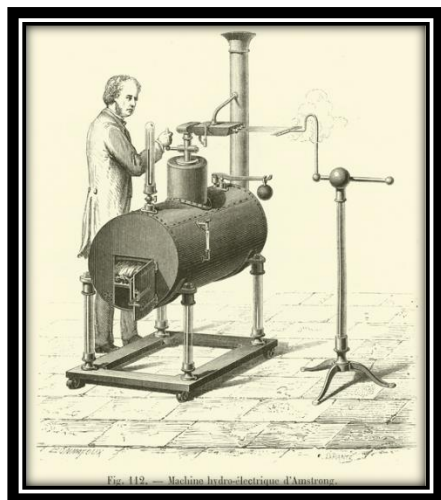
φαινόμενο αυτό ονομάστηκε «ηλεκτρομαγνητική επαγωγή» και έδειξε ότι μηχανική ενέργεια μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια. Δεν έμεινε μόνο εκεί όμως, εισήγαγε την έννοια των δυναμικών γραμμών ως μέσο περιγραφής ενός πεδίου, απέδειξε την αρχή διατήρησης του φορτίου και κατασκεύασε τον «κλωβό Faraday», ο οποίος είναι ένα αγωγίμο περίβλημα που χρησιμοποιείται για να μπλοκάρει τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τέλος κατασκεύασε την πρώτη πρακτική ηλεκτρική γεννήτρια, αφού η ηλεκτρική μηχανή του Andrew Gordon, που είδαμε προηγουμένως, δεν είχε κάποια χρήση. [18]



Σχήμα 25 Ο «διπλασιαστής» του Giuseppe Belli (1791-1860 μ.Χ.), μαζί με ηλεκτρόμετρο και Leyden jar [26]

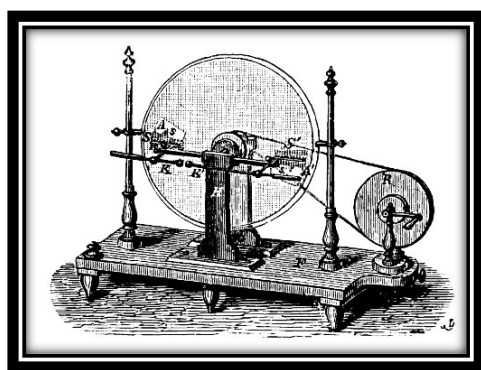
Την ίδια χρονιά, το 1831, ο Ιταλός φυσικός Giuseppe Belli δημιούργησε την δικιά του ηλεκτροστατική γεννήτρια που λειτουργούσε με επαγωγή ή αλλιώς «διπλασιαστή». Η διαφορά με τις υπόλοιπες γεννήτριες επαγωγής που είχαν κατασκευαστεί μέχρι τότε ήταν ότι είχε συμμετρία στους ακροδέκτες εξόδου και παρήγαγαν ταυτόχρονα ετερόσημη τάση.

Αποτελείτο από δύο καμπυλωτές μεταλλικές πλάκες και μεταξύ τους περιστρεφόταν ένα ζεύγος πλακών που έφεραν επίστρωση από μονωτικό υλικό. [2]



Σχήμα 26 Υδροηλεκτρική μηχανή του William George Armstrong (1810- 1900 μ.Χ.) [27]

Ο ατμός υψηλής πίεσης, που παράγεται σε ένα μονωμένο βραστήρα, διοχετεύεται μέσω σωλήνων που τις διαρρέει κρύο νερό σε μια σειρά από ξύλινα φυσίγγια. Ο στατικός ηλεκτρισμός αναπτύσσεται ανάμεσα στα θετικά φορτισμένα φυσίγγια και στον αρνητικά φορτισμένο ατμό και συλλέγεται από συλλέκτη φορτίου με ανάποδη φορά από τα φυσίγγια. Η δημιουργία της υδροηλεκτρικής μηχανής ώθησε τον Armstrong να ασχοληθεί περισσότερο με το κομμάτι της μηχανικής και ανάμεσα στα επιτεύγματα του που ακολούθησαν τα επόμενα χρόνια είναι η κατασκευή της κρεμαστής γέφυρας του ποταμού Tyne στο Newcastle και ο υδραυλικός μηχανισμός της γέφυρας του Λονδίνου. [27]



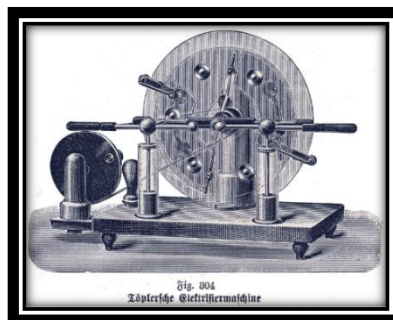
Σχήμα 27 Ηλεκτροστατική μηχανή του Wilhelm Holtz (1836-1913 μ.Χ.) [6]

κατεύθυνση. Στον πρώτο δίσκο παράγεται φορτίο μέσω τριβής και στον δεύτερο μέσω επαγωγής. Η

Το 1840 ο Άγγλος μηχανικός και επιχειρηματίας William George Armstrong, καθώς παρατηρούσε στατικό ηλεκτρισμό να εκπέμπεται από ένα λέβητα στο ανθρακωρυχείο του Northumberland, εμπνεύστηκε ένα διαφορετικό είδος ηλεκτροστατικής φόρτισης με χρήση ατμού υψηλής πίεσης. Έτσι κατασκεύασε ένα νέο είδος μηχανών, των υδροηλεκτρικών. Ο τρόπος λειτουργίας της γεννήτριας είναι ο εξής.

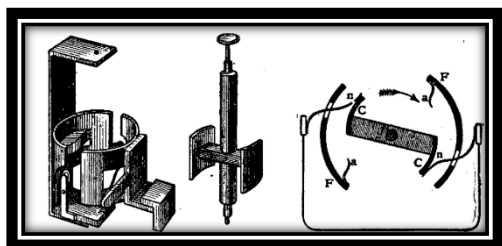
Ο ατμός υψηλής πίεσης, που παράγεται σε ένα μονωμένο βραστήρα, διοχετεύεται μέσω

Το 1865 ο Γερμανός χημικός και φυσικός August Joseph Ignaz Toepler κατασκεύασε την δικιά του μηχανή επαγωγής η οποία αποτελούταν από δύο δίσκους που γυρνούσαν στην ίδια



Σχήμα 28 Ηλεκτροστατική μηχανή του August Joseph Ignaz Toepler (1836-1912 μ.Χ.) [6]

μηχανή αυτή χρησιμοποιήθηκε αργότερα στα πρώτα ιατρικά μηχανήματα ακτίνων Χ. Την ίδια περίοδο όμως έχουμε ένα άλλο Γερμανό φυσικό, τον Wilhelm Holtz, που κατασκευάζει παρόμοια επαγωγική μηχανή με τον Toeppler. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι δύο επιστήμονες, παρότι οι μηχανές είχαν ελάχιστες διαφορές, δεν συνεργάστηκαν. Για το λόγο αυτό τείνουμε να αναφέρουμε αυτό το είδος της μηχανής «Toeppler-Holtz», ως φόρο τιμής και στους δύο. [28], [29]



Σχήμα 29 Ο «ανατροφοδότης» του Lord Kelvin (1824-1907 μ.Χ.) [6]

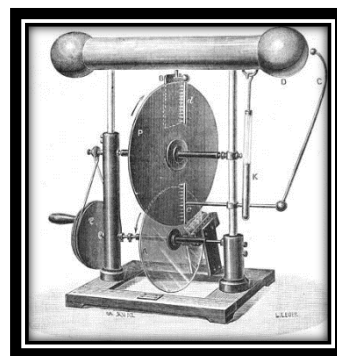
Την ίδια περίπου περίοδο, γύρω στο 1867, ο Ιρλανδός μαθηματικός, φυσικός και μηχανικός William Thomson, 1<sup>st</sup> Baron Kelvin σχεδιάζει και κατασκευάζει διάφορες ηλεκτροστατικές γεννήτριες επαγωγής στην προσπάθειά του να λύσει διάφορα τεχνικά προβλήματα στον χώρο της μηχανικής αλλά και να εξελίξει τα επιστημονικά όργανα της εποχής. Μία από αυτές, και ίσως η σημαντικότερη, είναι ο «ανατροφοδότης», ο οποίος αποτελείται από δύο κυρτά, μονωμένα κομμάτια μετάλλου και από μία μονωμένη στήλη στο κέντρο η οποία με την σειρά της έφερε στα άκρα μεταλλικές πλάκες. Η εξ επαγωγής φόρτιση γινόταν μέσω τις περιστροφής της στήλης και τις τριβής μεταξύ των μονωμένων επιφανειών. Σχεδιάστηκε για να εξουδετερώνει τις αναπόφευκτες απώλειες λόγω διαρροής ή ατελούς μόνωσης και χρησιμοποιήθηκε κυρίως ως υποβοήθηση της λειτουργίας τηλεγραφικών συστημάτων, όπως και του πρώτου υποθαλάσσιου καλωδίου του οποίου την κατασκευή έπαιξε σημαντικό ρόλο. Ακόμα εφύρε μια υδροηλεκτρική μηχανή που λειτουργούσε με τον ίδιο τρόπο με την μηχανή του Toeppler απλά αντί για περιστρεφόμενους δίσκους χρησιμοποιούσε σταγονίδια νερού. Βέβαια ο λόρδος Kelvin έμεινε στην ιστορία κυρίως για την συνεισφορά του στην θερμοδυναμική. [30]



Σχήμα 30 Μηχανή August Kundt (1839-1894 μ.Χ.) [31]

Το 1868 είχαμε την δημιουργία διαφόρων μηχανών που λειτουργούσαν συνδυάζοντας τριβή και επαγωγή. Οι πιο διάσημες από αυτές ήταν του

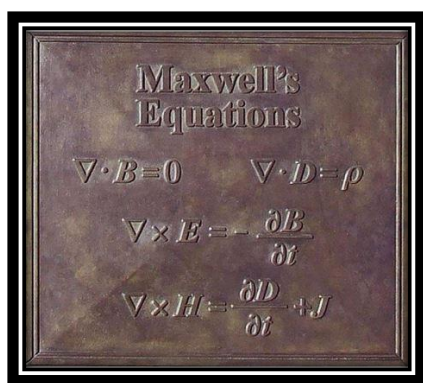
Γερμανού φυσικού August



Σχήμα 31 Μηχανή του Ferdinand Philippe Edouard Carré (1824-1900 μ.Χ.) [32]

Adolf Eduard Eberhard Kundt και του Γάλλου εφευρέτη Ferdinand Philippe Edouard Carré. Η πρώτη περιείχε ένα γυάλινο δίσκο που περιστρεφόταν με ένα σύστημα από τροχαλίες και ιμάντες. Η μία πλευρά του δίσκου τριβόταν από δέρμα φορτίζοντας το γυαλί λόγω τριβής και η άλλη πλευρά είχε δύο μεταλλικές «χτένες» που συνέλεγαν την φόρτιση. Η μηχανή του Carré αποτελούταν από δύο γυάλινους δίσκους κοντά τοποθετημένους ο ένας στον άλλο, που περιστρέφονταν αντίθετα, επάγοντας αντίθετη φόρτιση στην κάθε επιφάνεια. Μεταλλικές χτένες κοντά στους δίσκους συνέλεγαν την φόρτιση. Θεωρείται και ένας πρόγονος της γεννήτριας Van de Graaff, αντικαθιστώντας τον δίσκο με ιμάντα και βάζοντας ένα πιο αποτελεσματικό συλλέκτη φορτίου. Και οι δύο μηχανές ενώ ήταν αρκετά αποδοτικές, ήταν παράλληλα δαπανηρές και περίπλοκες και αντικαταστάθηκαν γρήγορα από την μηχανή Wimshurst που θα δούμε παρακάτω. [2]

Ακόμα ένας πρόγονος της γεννήτριας Van de Graaff ήταν η μηχανή επαγωγής που σχεδίασε ο Ιταλός φυσικός Augusto Righi (1850-1920 μ.Χ.) το 1872 σε μικρή μάλιστα ηλικία κατά την διάρκεια της διατριβής του. Η γεννήτρια του Righi ήταν ένας μικρός τύπος ηλεκτροστατικής γεννήτριας που σκοπός της ήταν να μετράει μικρές διαφορές δυναμικού και για αυτό το λόγο το ονόμασε «ηλεκτρόμετρο». Αποτελούταν από ένα λαστιχένιο ιμάντα, ορειχάλκινους τροχούς, που περιστρέφουν τον ιμάντα μεταφέροντας το φορτίο και μία σφαίρα ως συλλέκτη του φορτίου. Τα μέρη αυτά του ηλεκτρομέτρου του Righi, όπως και τον βασικό τρόπο φόρτισης, τα συναντάμε όπως θα δούμε αργότερα στην γεννήτρια Van de Graaff. [33], [2]



Σχήμα 32 Οι εξισώσεις του James Clerk Maxwell (1824-1907 μ.Χ.), οι οποίες βρίσκονται χαραγμένες στο κάτω μέρος του αγάλματός του στο Εδιμβούργο [6]

Λίγα χρόνια αργότερα, το 1873, ο Σκοτσέζος φυσικός και μαθηματικός James Clerk Maxwell πραγματοποίησε μία μεγάλη συνεισφορά στην κατανόηση του ηλεκτρομαγνητισμού. Βασίστηκε στην θεωρία του Faraday περί δυναμικών γραμμών των πεδίων και την εξέφρασε μαθηματικά σε μόλις τέσσερις εξισώσεις, που δείχνουν πως συμπεριφέρονται τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία σε όλες τις συνθήκες. Οι εξισώσεις του Maxwell εφαρμόζονται εξίσου στα ηλεκτρικά όσο και τα μαγνητικά πεδία και με αυτό τον τρόπο αποδείχθηκε μία και καλή η σχέση των δύο πεδίων. Ένα ακόμα σημαντικό εύρημα που προέκυψε από το

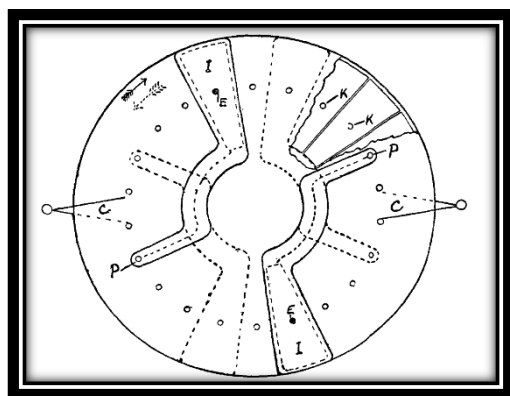
έργο του Maxwell, ήταν ότι τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία ταξίδευαν με την ταχύτητα του φωτός, η οποία είχε πρόσφατα μετρηθεί με σχετική ακρίβεια από τον Armand Fizeau (1819-1890 μ.Χ.) και τον Leon Foucault (1819- 1868 μ.Χ.), και ότι το φως είναι μία μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. [18]



Σχήμα 33 Μηχανή Wimshurts(1832-1903 μ.Χ.), η οποία έχει στα πλάγια δύο Leyden jars [6]

Το 1883, και μετά από τρία χρόνια ερευνών, ο Άγγλος εφευρέτης και μηχανικός James Wimshurts δημιούργησε μία από τις πιο διαδεδομένες και αποδοτικές μηχανές επαγωγής του 19<sup>ου</sup> αιώνα, η οποία ήταν ταυτοχρόνως εύκολη στην κατασκευή. Αποτελείται από δύο μονωμένους δίσκους,

γυάλινους στην αρχική κατασκευή και πλαστικούς σε μεταγενέστερες κατασκευές, οι οποίοι είναι τοποθετημένοι παράλληλα σε ενιαίο άξονα και περιστρέφονται με αντίθετες φορές. Αγώγιμα φύλλα είναι κολλημένα στους δίσκους και κατά την περιστροφή των δίσκων έρχονται σε επαφή με τις μεταλλικές «βούρτσες» που βρίσκονται στον οριζόντιο άξονα δημιουργώντας φορτίο, το οποίο διοχετεύεται σε δύο φιάλες Leyden. Η συσσώρευση του φορτίου φτάνει σε ένα κρίσιμο σημείο και δημιουργεί σπινθήρα ανάμεσα στους δύο ακροδέκτες, στους οποίους η τάση μπορεί να φτάσει και 1.000.000 Volts και η διαδικασία αρχίζει ξανά. Ο Wimshurts εμπνεύστηκε τον σχεδιασμό από τη γεννήτρια του Holtz και γι' αυτό το λόγω συχνά αναφέρεται ως «Holtz-Wimshurst». Χρησιμοποιήθηκε σε πειράματα φυσικής αλλά και για την τροφοδότηση μηχανημάτων ακτίνων X. [34], [2]



Σχήμα 34 Ο δίσκος από την επαγωγική μηχανή του W. R. Pidgeon, όπως τον είχε σχεδιάσει στην πατέντα που είχε καταθέσει [35]

Μία δεκαετία αργότερα, το 1893, ο W. R. Pidgeon παρουσίασε μία ηλεκτροστατική μηχανή επαγωγής παίρνοντας τα καλύτερα κομμάτια των μηχανών Whimshurst και Voss. Η μηχανή αποτελείται από ένα ή περισσότερα ζευγάρια γυάλινων δίσκων τοποθετημένα σε κοινό άξονα και περιστρέφονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι δίσκοι

καλύπτονται από ένα μείγμα κεριού και ρητίνης, που τους προσδίδει πολύ καλή μόνωση, αλλά και όλα τα εκτεθειμένα μέρη της γεννήτρια μονώνονται λεπτομερώς. Η μηχανή διαθέτει σταθερές επαγωγές τοποθετημένες με τέτοιο τρόπο ώστε να διπλασιάζει το φαινόμενο της ηλεκτρικής επαγωγής και έτσι διπλασιάζει το παραγόμενο ρεύμα. Αυτό που πετυχαίνει η γεννήτρια του Pidgeon είναι η μείωση των ρευμάτων διαρροής και του αρχικού φορτίου έναρξης. Το μόνο μειονέκτημά της ήταν το ακριβό κόστος κατασκευής. [35]

Με την αλλαγή του αιώνα έχουμε την ανάπτυξη πολλών ακόμα επαγωγικών μηχανών με διπλούς ή και τριπλούς δίσκους τις οποίες δεν θα αναλύσουμε διεξοδικά παρά μόνο θα αναφέρουμε επιγραμματικά, γιατί, όπως βλέπουμε από τις γεννήτριες των Holtz και Toepler και μετά, η μορφή τους δεν αλλάζει σημαντικά. Το 1900 ο F. Tudsbury ανακάλυψε ότι αν περικλείσουμε μία γεννήτρια με μεταλλικό θάλαμο, ο οποίος περιέχει διοξείδιο του άνθρακα ή συμπιεσμένο αέρα, μειώνονταν δραστικά οι διαρροές, επιτρέποντας έως και τρεις φορές μεγαλύτερη τάση εξόδου. Το 1903 ο Alfred Wehrsen εισήγαγε τον πρώτο δίσκο περιστροφής από εβονίτη. Το 1907 ο Heinrich Wommelsdorf κατασκεύασε μία δικιά του εκδοχή τις μηχανής του Holtz που χρησιμοποιούσε δίσκο και πηνία ενσωματωμένα σε πλάκες κελουλοΐτη (μείγμα nitrocellulose και camphor). Ο ίδιος ανέπτυξε αρκετές ακόμα αρκετές υψηλής απόδοσης ηλεκτροστατικές μηχανές, με την πιο γνωστή να είναι η «μηχανή πυκνωτών» του. [2]

Περνώντας στον 20<sup>ο</sup> αιώνα η επιστήμη της φυσικής βρισκόταν σε κρίσιμο σημείο. Η κλασική μηχανική, η οποία κυριαρχούσε για αιώνες δεν μπορούσε πλέον να εξηγήσει τα φαινόμενα που συνέβαιναν στο μικρόκοσμο. Έτσι δημιουργήθηκε ένας νέος κλάδος της μηχανικής, που θα ασχολούταν με τον κόσμο σε ατομικό και υποατομικό επίπεδο, η κβαντική μηχανική. Φυσικοί όπως ο Albert Einstein και ο Max Plank άρχισαν να εξερευνούν το νέο αυτό κομμάτι της φυσικής, όμως χρειάζονταν και τα κατάλληλα εργαλεία για να το επιτύχουν. Εδώ έρχεται να παίξει πολύ σημαντικό ρόλο η γεννήτρια Van de Graaff. Οι υπερυψηλή τάση που δημιουργούσε η γεννήτρια, επέτρεπε στους φυσικούς να επιταχύνουν τα σωματίδια σε πολύ μεγάλες ταχύτητες και να μελετήσουν τη συμπεριφορά τους με πρωτοφανή ακρίβεια. Η γεννήτρια Van de Graaff άνοιξε τον δρόμο για πολλές από τις μεγαλύτερες ανακαλύψεις του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Χωρίς αυτήν η κατανόησή μας για τον κόσμο θα ήταν πολύ διαφορετική.

## 1.2 Βίος Robert Jemison Van de Graaff

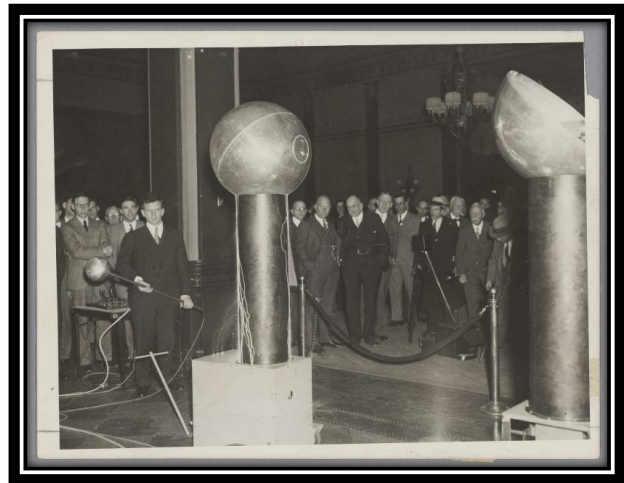
Ο Robert Jemison Van de Graaff γεννήθηκε στις 20 Δεκεμβρίου του 1901 στην Τασκαλούζα της Αλαμπάμα. Ήταν γιος του Adrian Sebastian Van de Graaff και της Minnie Cherokee Hargrove. Κατά την παιδική του ηλικία φοίτησε σε δημόσια σχολεία της Τασκαλούζα και στην συνέχεια εισήχθη στο Πανεπιστήμιο της Αλαμπάμα. Εκεί έλαβε το πτυχίο Bachelor το 1922 και το πτυχίο Masters ένα χρόνο αργότερα, το 1923, και τα δύο στην επιστήμη του μηχανολόγου μηχανικού. Μετά την αποφοίτηση, δούλεψε για ένα χρόνο για την Alabama Power Company ως βοηθός ερευνητή. Στη συνέχεια σπούδασε στο Πανεπιστήμιο της Σορβόνης στο Παρίσι κατά τα έτη 1924-1925, όπου και παρακολούθησε διαλέξεις της Marie Curie για την ακτινοβολία. Το 1925 πήγε στο πανεπιστήμιο της Οξφόρδης στην Αγγλία μέσω ενός διεθνούς προγράμματος υποτροφιών. Εκεί παρέλαβε το πτυχίο Bachelor, το 1926, και Ph.D., το 1928, στην φυσική. [36]



Σχήμα 35 Ο Robert Jemison Van de Graaff σε νεαρή ηλικία[38]

Κατά την διάρκεια των σπουδών του στην Οξφόρδη ο Van de Graaff έδειξε ενδιαφέρον για τα πειράματα πυρηνικής φυσικής και ενστερνίστηκε την ιδέα των επιστημόνων της εποχής ότι μία μέρα τα σωματίδια θα μπορούσαν να επιταχυνθούν τόσο πολύ ώστε να διασπάσουν τον πυρήνα και τότε θα γίνουν γνωστά πολλά πράγματα για την φύση των μεμονωμένων ατόμων. Συγκεκριμένα παρακολούθησε μία διάλεξη του Sir Ernest Rutherford (1871-1937 μ.Χ.), ο οποίος είχε ανακαλύψει την ύπαρξη του ατόμου, στην οποία τόνισε ότι υπάρχει μεγάλη ανάγκη ελεγχόμενης ενέργειας στη μελέτη της πυρηνικής φυσικής για την επιτάχυνση σωματιδίων και προέτρεψε το κοινό να ασχοληθεί με το αντικείμενο. Ο νεαρός φοιτητής Van de Graaff πήρε τα λεγόμενα του Rutherford πολύ σοβαρά και έβαλε σκοπό να φτιάξει μία συσκευή που θα επέτρεπε στα σωματίδια να επιταχύνονται. [36]

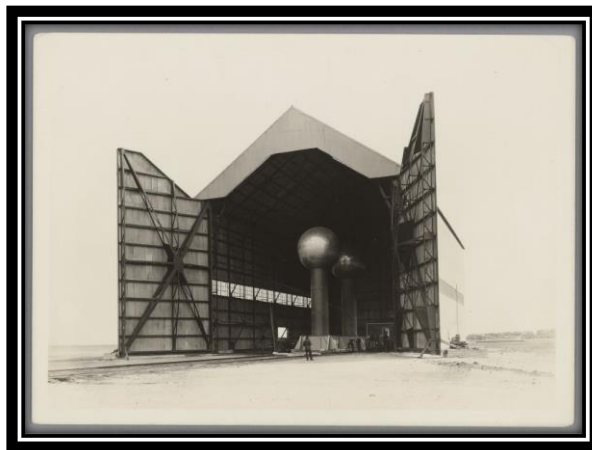
Το 1929 επιστρέφει στις Η.Π.Α. και εντάσσεται στο εργαστήριο του Palmer του πανεπιστημίου του Princeton ως National Research Fellow. Εκείνη την περίοδο οι φυσικοί εξερευνούσαν τρόπους ώστε να παράγουν υψηλή τάση μέσω της μετακίνησης ηλεκτρομαγνητικών φορτίων. Ο Van de Graaff βρήκε λύση στο πρόβλημα,



Σχήμα 36 Η γεννήτρια 1MV που παρουσίασε το 1933 [38]

χρησιμοποιώντας έναν ιμάντα που τρέχει μεταξύ τροχαλιών σε διαφορετικά δυναμικά και τοποθετώντας τον μέσα σε σφαιρικό αγωγό, κατάφερε να μεταφέρει τα φορτία από τον ιμάντα στη σφαίρα με αποδοτικό τρόπο, εκμεταλλευόμενος την φυσική τάση των φορτίων να μετακινούνται στην εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας. Εν συνεχεία κατασκευάζει το πρώτο μοντέλο ηλεκτροστατικού επιταχυντή όπου μπορούσε να παράξει τάση 89kV. Στη συνέχεια βελτίωσε το αρχικό του σχέδιο και το Νοέμβριο του 1933 παρουσίασε στο Αμερικανικό Ινστιτούτο Φυσικής τη νέα του γεννήτρια που

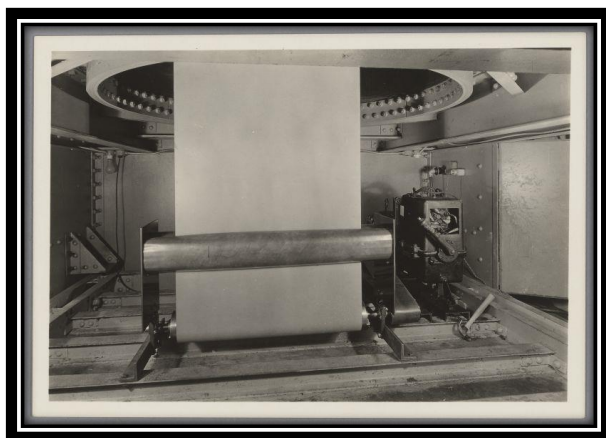
μπορούσε να παράξει τάση 1MV, ενώ το μέγεθός της ήταν μόλις λίγα μέτρα. [36]



Σχήμα 37 Η μεγάλη γεννήτρια που κατασκεύασε μέσα στο υπόστεγο αεροσκαφών [38]

Ο τότε πρόεδρος του MIT Karl Compton, όταν έμαθε για τα κατορθώματα του Van de Graaff στο Princeton, τον προσκάλεσε να γυρίσει πίσω στο πανεπιστήμιο στη θέση του επιστημονικού συνεργάτη. Αποδέχτηκε την πρόταση και εκεί έφτιαξε την πρώτη του μεγάλη γεννήτρια μέσα σε ένα υπόστεγο

στέγασης αεροσκαφών. Η μηχανή χρησιμοποιούσε δύο γυαλισμένες σφαίρες από αλουμίνιο διαμέτρου 4,57 μέτρων, τοποθετημένες πάνω σε μονωμένες κολώνες ύψους 7,62 μέτρα και 1,83 μέτρα διαμέτρου. Οι κολώνες τοποθετήθηκαν πάνω σε



*Σχήμα 38 Στο εσωτερικό της μεγάλης γεννήτριας 7MV, διακρίνονται ο ιμάντας και ο κύλινδρος περιστροφής [38]*

ράγες τραίνου και ανυψώθηκαν 13,1 μέτρα πάνω από το έδαφος. Η κάθε σφαίρα είχε τη δική της γεννήτρια φορτίζοντας τη μία θετικά και την άλλη αρνητικά, ώστε η τάση μεταξύ των δύο να είναι διπλάσια από της γεννήτριας μόνης της. Η μηχανή εμφανίστηκε για πρώτη φορά στις 28 Νοεμβρίου του 1933 και την επόμενη ημέρα έφτασε στις σελίδες

της New York Times με τίτλο «Man Hurls Bolt of 7.000.000 Volts», καθώς τα Volts που μπορούσε να παράγει ήταν εξωπραγματικά για την εποχή. Το 1937 η γεννήτρια αυτή μεταφέρθηκε σε θάλαμο πίεσης στο MIT, όπου χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή υψηλής ενέργειας ακτινοβολίας. [36]

Το 1935 έλαβε το δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τις Η.Π.Α. No. 1.991.236 για την εφευρέσή του και τον επόμενο χρόνο, το 1936, παντρεύτηκε με την Catherine Boyden. Μαζί απέκτησαν δύο γιούς, τον William και τον John. Ο Van de Graaff στη συνέχεια συνεργάστηκε με τον John G. Trump (θείος του πρώην προέδρου των Η.Π.Α.), καθηγητή του τμήματος ηλεκτρολόγων μηχανικών του MIT και με τον William W. Buechner καθηγητή φυσικής του MIT. Κατασκεύασαν μαζί μία γεννήτρια Van de Graaff για ιατρική χρήση, πιο συγκεκριμένα για να παράγει ακτίνες X για την θεραπεία καρκινικών όγκων με ακριβής διεισδυτική ακτινοβολία. Το πρώτο μοντέλο χρησιμοποιήθηκε από την ιατρική σχολή του Harvard το 1937. [36]

Κατά την διάρκεια του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου διεύθυνε το Ραδιογραφικό Πρόγραμμα Υψηλών Τάσεων, το οποίο χρηματοδοτούταν από το ομοσπονδιακό Γραφείο Επιστημονικής Έρευνας και Ανάπτυξης των Η.Π.Α.. Κατά την θητεία του σε αυτή τη θέση τροποποίησε τη γεννήτρια ώστε να μπορεί να εξετάζει με ακτίνες X τυχόν ρωγμές σε πυρομαχικά του Πολεμικού Ναυτικού. Την δεκαετία του 50' εφηύρε τον μετασχηματιστή μονωτικού πυρήνα, ο οποίος παρήγαγε συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης με τη χρήση μαγνητικής ροής αντί για ηλεκτροστατικής φόρτισης. [37]

Μετά την λήξη του πολέμου συνεργάστηκε με τον Trump και έναν Άγγλο καθηγητή ηλεκτρολόγων μηχανικών ονόματι Denis M. Robinson και δημιούργησαν την Εταιρεία Μηχανικών Υψηλών Τάσεων (High Voltage Engineering Corporation ή αλλιώς HVEC) στο Burlington της Μασαχουσέτης, όπου και διετέλεσε επικεφαλής



Σχήμα 39 Ο Robert Jemison Van de Graaff στην εγκατάσταση δοκιμής επιταχυντή tandem Emperor [38]

φυσικός και επιστήμονας. Η εταιρία, τον επόμενο κιόλας χρόνο, ξεκίνησε να κατασκευάζει και να πουλάει ηλεκτροστατικές γεννήτριες για χρήση στην ιατρική, ως αντικαρκινική θεραπεία και ακτινογραφία, αλλά και ως επιταχυντές σωματιδίων σε διάφορα πειράματα πυρηνικής φυσικής, επιτυγχάνοντας μέσα σε λίγα χρόνια να γίνει ο βασικός προμηθευτής τους.

Το 1947 παρέλαβε το μετάλλιο Duddel Memorial από την Ένωση Φυσικών της Μεγάλης Βρετανίας. [37]

Παρέμεινε στο MIT μέχρι και το 1960, όπου και παραιτήθηκε με σκοπό την πλήρη ενασχόλησή του με την HVEC. Το 1966 παρέλαβε το βραβείο Tom W. Bonner από την Αμερικανική Ένωση Φυσικών για την συνεισφορά του στην ανάπτυξη των ηλεκτροστατικών γεννητριών. Ο Robert J. Van de Graaff πέθανε το πρωινό της 16<sup>ης</sup> Ιανουαρίου του 1967 στην Βοστώνη σε ηλικία 65 ετών. Κατά τη διάρκεια της ζωής του δημοσίευσε πολυάριθμες επιστημονικές εργασίες και κατοχύρωσε επτά διπλώματα ευρεσιτεχνίας. Την στιγμή του θανάτου του περισσότερες από 500 επιταχυντές σωματιδίων Van de Graff λειτουργούσαν σε περισσότερες από τριάντα χώρες, ενώ τα σχέδια της γεννήτριας ενέπνευσαν πολλές μεταγενέστερες μηχανές, οι οποίες λειτουργούν έως και σήμερα. [36], [37]

### 1.3 Υψηλές Τάσεις

Στο σημείο αυτό, πριν προχωρήσουμε στο κύριο μέρος της εργασίας, στην γεννήτρια Van de Graaff, θα μιλήσουμε εν συντομία για τις υψηλές τάσεις. Ας αρχίσουμε με τον ορισμό των υψηλών τάσεων, κατά τον οποίο μία τάση για να θεωρείται υψηλή πρέπει να είναι άνω των 1000 Volt για εναλλασσόμενο ρεύμα και

άνω των 1500 Volt για συνεχές, σύμφωνα με τη Διεθνή Ηλεκτροτεχνική Επιτροπή (IEC). [39]

Ο βασικός λόγος χρήσης των υψηλών τάσεων είναι για την μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις με οικονομικό τρόπο. Ωστόσο παρατηρούμε και αλλού την χρήση τους, όπως στα ηλεκτροστατικά φίλτρα στις καμινάδες διαφόρων εργοστασίων για τον περιορισμό της ατμοσφαιρικής μόλυνσης, στην παραγωγή ακτινών Χ στα ιατρικά μηχανήματα, στο σύστημα ανάφλεξης των βενζινοκινητήρων, τις ηλεκτροστατικές βαφές, σε επιταχυντές σωματιδίων κλπ. [39]

Όπως αναφέραμε προηγουμένως υψηλές τάσεις συναντιούνται και στο εναλλασσόμενο και στο συνεχές ρεύμα, ας αναλύσουμε το πρώτο είδος αρχικά και πιο συγκεκριμένα τις γραμμές μεταφοράς. Θεωρώντας  $U_\phi$  την φασική τιμή της τάσης,  $I$  το ρεύμα ανά φάση,  $\phi$  την φασική γωνία,  $R$  την ωμική αντίσταση ανά φάση σε μία τριφασική γραμμή μεταφοράς και  $P$  τη μεταφερόμενη ενεργό ισχύ, παίρνουμε τον τύπο:  $P = 3U_\phi I \cos\phi$ . Οι απώλειες λόγω του φαινομένου Joule είναι:  $P_\theta = 3I^2 R$ . Άρα προκύπτει η σχέση:  $P_\theta = P^2 \frac{R}{3U_\phi^2 (\cos\phi)^2}$  από την οποία παρατηρούμε ότι για δεδομένη μεταφερόμενη ισχύ  $P$  και ωμική αντίσταση ανά φάση  $R$ , οι θερμικές απώλειες είναι μικρότερες όσο υψηλότερη είναι η τάση της γραμμής μεταφοράς. Αυτό σημαίνει ότι όσο μεγαλύτερη η τάση τόσο μικρότερο το κόστος μεταφοράς. [39]

Η πρώτη γραμμή μεταφοράς υψηλής τάσης κατασκευάστηκε το 1891 στη Γερμανία με ονομαστική τάση 15 kV και ένωνε τις πόλεις Λόφεν και Φρανκφούρτη, ενώ η πρώτη γραμμή 400 kV στην Ευρώπη δημιουργήθηκε στην Σουηδία το 1952. Σήμερα η τάση λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται ανά τον πλανήτη δεν ξεπερνά τα 765 kV, ενώ στην Ελλάδα υπάρχουν γραμμές 150 kV και 400 kV. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι υπάρχει ένα ανώτατο όριο στο πόσο υψηλή μπορεί να είναι η μεταφερόμενη τάση, καθώς από ένα σημείο και μετά ό,τι εξοικονόμηση γίνεται από τις απώλειες λειτουργίας, χάνεται από τις διηλεκτρικές απώλειες στον περιβάλλοντα αέρα, εξαιτίας ιονισμού του από το υψηλό ηλεκτρικό πεδίο, αλλά και από το πολύ μεγαλύτερο κόστος κατασκευής. [39]

Περνάμε τώρα στην δεύτερη κατηγορία υψηλών τάσεων, αυτές των συνεχών τάσεων. Χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά σε εξαιρετικά μεγάλες αποστάσεις, διότι

είναι οικονομικότερες και παρουσιάζουν μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες. Η πρώτη γραμμή υψηλούς συνεχούς τάσης κατασκευάστηκε στην Σουηδία για την σύνδεση του νησιού Gotland το 1954. [39]

Η υψηλή συνεχόμενη τάση πλεονεκτεί έναντι της εναλλασσόμενης σε μία σειρά εφαρμογών. Η πρώτη περίπτωση είναι η υποθαλάσσια διασύνδεση συστημάτων, όπου οι υψηλές χωρητικότητες προκαλούν επιπλέον απώλειες εάν χρησιμοποιηθούν εναλλασσόμενες τάσεις. Ένα τέτοιο παράδειγμα παρατηρείται στην διασύνδεση του ελληνικού με το ιταλικό σύστημα μεταφοράς, όπου έχουν χρησιμοποιηθεί 160 km υποβρύχιου καλωδίου 400 kV συνεχούς ρεύματος. Μία δεύτερη εφαρμογή τους είναι η αύξηση της ισχύος ενός υπάρχοντος δικτύου σε περιπτώσεις όπου επιπλέον γραμμές μεταφοράς είναι δύσκολο να τοποθετηθούν. Μία ακόμα περίπτωση χρήσης υψηλούς συνεχούς τάσης είναι η μεταφορά ισχύος και σταθεροποίηση της τάσης μεταξύ συστημάτων εναλλασσόμενης τάσης, τα οποία είναι μη συγχρονισμένα, όπως παρόμοια χρησιμοποιούνται και στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τον συγχρονισμό της εναλλασσόμενης τάσης τους. Τέλος προτιμώνται για μείωση κόστος, καθώς η χρήση τους απαιτεί λιγότερους αγωγούς (αφού δεν υπάρχουν τρεις φάσεις) και επιπλέον οι αγωγοί είναι λεπτότεροι, αφού δεν υπάρχει το επιδερμικό φαινόμενο της εναλλασσόμενης τάσης. [39]

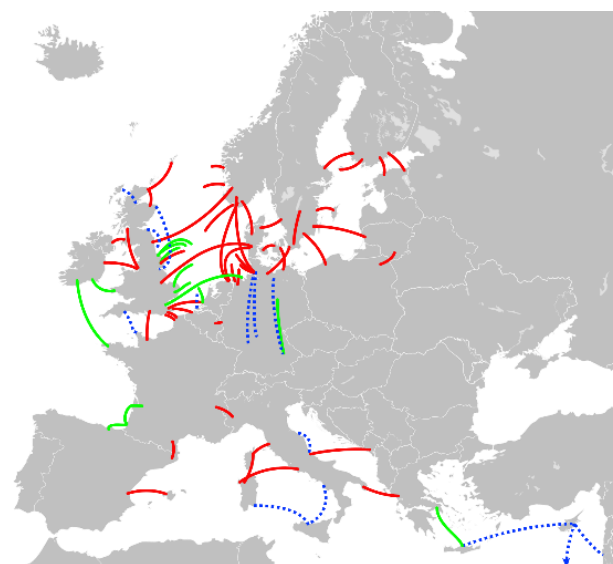
Ωστόσο οι συνεχείς υψηλές τάσεις έχουν και αυτές μειονεκτήματα, τα οποία εντοπίζονται κυρίως στην μετατροπή, τα διακοπτικά μέσα και τον έλεγχο. Οι μετατροπείς AC/DC υψηλής τάσης και το αντίστροφο έχουν όριο υπερφόρτισης. Σε μικρές αποστάσεις οι μετατροπείς αυτοί έχουν περισσότερες απώλειες από τις γραμμές εναλλασσόμενης τάσης. Επίσης οι διακόπτες ισχύος σε υψηλές τάσεις είναι δύσκολο να κατασκευαστούν, καθώς τα τόξα που δημιουργούνται είναι εξαιρετικά μεγάλα. Τέλος, ο έλεγχος της ροής φορτίου απαιτεί καλή επικοινωνία μεταξύ όλων των τερματικών σημείων με τη ροή φορτίου να πρέπει να είναι ελεγχόμενη με εξαιρετική ακρίβεια. [39]

Ένα πολύ σημαντικό πρόβλημα που συναντάμε τόσο στις εναλλασσόμενες όσο και στις συνεχείς υψηλές τάσεις είναι το πρόβλημα των υπερτάσεων. Οι υπερτάσεις μπορεί να οφείλονται σε χειρισμούς όπως η διακοπή χωρητικού ρεύματος ή σε ενεργοποίηση και απανάζευξη μιας γραμμής μεταφοράς με ανοικτό άκρο ή σε διακοπή μικρών επαγωγικών ρευμάτων ή διακοπή ρευμάτων βραχυκύκλωσης.

Υπερτάσεις μπορεί να συμβούν επίσης λόγω κεραυνών απευθείας πάνω στις γραμμές μεταφοράς και εμφανίζονται με τη μορφή οδευόντων κυμάτων αλλά και σε υπερπηδήσεις. Οι τελευταίες οφείλονται σε διάσπαση της μόνωσης ανάμεσα σε δύο κυκλώματα διαφορετικής τάσης, οπότε το κύκλωμα με τη μικρότερη τάση βρίσκεται ξαφνικά υπό μεγαλύτερη τάση από την τάση λειτουργίας του. [39]

Για να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα αυτά και να εξασφαλιστεί η ασφαλής και εύρυθμη λειτουργία του συστήματος θα πρέπει οι μηχανικοί να γνωρίζουν τις τάσεις που επικρατούν κατά μήκος του δικτύου, τόσο στην μόνιμη αλλά και στη μεταβατική κατάσταση, δηλαδή σε περίπτωση που εμφανιστούν υπερτάσεις. Επίσης θα πρέπει να είναι γνωστή η θέση του ηλεκτρικού πεδίου εντός των διαφόρων συσκευών και η θέση, που υπάρχει μεγαλύτερος κίνδυνος καταστροφής τους. Τέλος πρέπει να είναι γνωστή η αντοχή των μονωτικών υλικών στις καταπονήσεις τις οποίες υφίστανται. Όλα τα παραπάνω προϋποθέτουν τόσο θεωρητική μελέτη επί των φαινομένων των προεκκενώσεων και της ηλεκτρικής διάσπασης των εν λόγω υλικών όσο και διεξαγωγή μετρήσεων πάνω σε συγκεκριμένες διατάξεις. [39]

Έτσι ολοκληρώσαμε την εισαγωγή μας και είμαστε έτοιμοι να προχωρήσουμε στο κύριο μέρος της εργασίας, που είναι η γεννήτρια Van de Graaff. Πρώτα όμως, για να κλείσουμε το κομμάτι των υψηλών τάσεων, παραθέτουμε ένα σύντομο φωτογραφικό υλικό.



Σχήμα 40 Διασυνδέσεις με υψηλή συνεχή τάση στην Ευρώπη, με κόκκινο οι υπάρχουσες, πράσινο οι υποκατασκευή και μπλέ οι υπό πρόταση [6]



Σχήμα 41 Μετασχηματιστής Ισχύος [39]

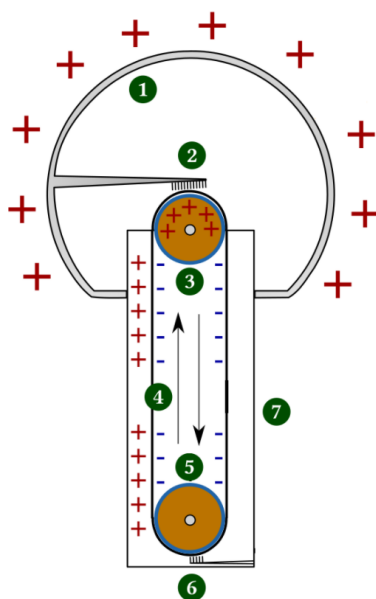


Σχήμα 42 Μετασχηματιστής σταθμού μετατροπής (converter transformer) εναλλασσόμενου / συνεχούς ρεύματος (E.P. / Σ. Ρ.) 800 kV, σε αίθουσα δοκιμών [39]

## Κεφάλαιο 2: Αρχή λειτουργίας

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τον τρόπο λειτουργίας της γεννήτριας Van de Graaff και τα διάφορα φαινόμενα που παρατηρούνται. Στην αρχή θα κάνουμε μια συνοπτική παρουσίαση των βασικών μερών της γεννήτριας. Εν συνεχεία θα μιλήσουμε για τον τρόπο με τον οποίο παράγεται ο στατικός ηλεκτρισμός στη γεννήτρια και στη συνέχεια θα αναφερθούμε στο σφαιρικό πυκνωτή, στον οποίο αποθηκεύεται. Τέλος θα δούμε από ποιους παράγοντες επηρεάζεται η μέγιστη τάση που μπορεί να παράγει η γεννήτρια αλλά και ποιο είναι το θεωρητικό μέγιστο.

### 2.1 Τα βασικά μέρη



Σχήμα 43 Σχεδιάγραμμα της γεννήτριας Van de Graaff

Στο παραπάνω σχήμα βλέπουμε τα βασικά μέρη μιας γεννήτριας Van de Graaff. Στο νούμερο 1 είναι η μεταλλική σφαίρα. Σκοπός της είναι να συγκεντρώνει τα φορτία που παράγονται με την ηλεκτροστατική φόρτιση. Ουσιαστικά είναι ένας πυκνωτής. Το υλικό κατασκευής της είναι συνήθως κάποιο ανοξείδωτο μέταλλο και πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο λεία γίνεται ώστε να αποφύγουμε την ανομοιογένεια πεδίου.

Στο νούμερο 2 βρίσκεται η άνω ακίδα ή αλλιώς ηλεκτρόδιο. Είναι τοποθετημένο κοντά στον ιμάντα, χωρίς όμως να τον ακουμπάει, και το άλλο του άκρο είναι συνδεδεμένο με τη μεταλλική σφαίρα. Σκοπός του είναι να μεταφέρει το φορτίο από τον ιμάντα στην μεταλλική σφαίρα και είναι φτιαγμένο από κάποιο αγώγιμο μέταλλο, όπως ο χαλκός. Προτιμάται επίσης να διαθέτει μυτερά άκρα.

Στο νούμερο 3 και 5 βλέπουμε τις τροχαλίες ή αλλιώς κυλίνδρους. Σκοπός τους είναι προφανώς να βοηθήσουν στην κίνηση του ιμάντα, αλλά επίσης μέσω της ηλεκτροστατικής τριβής με αυτόν, προσδίδουν ή λαμβάνουν ηλεκτρόνια. Συνήθως ο άνω κύλινδρος είναι κατασκευασμένος από κάποιο ουδέτερο μέταλλο, ενώ ο κάτω από κάποιο ηλεκτραρνητικό υλικό. Επίσης ο κάτω κύλινδρος συνδέεται με το μοτέρ.

Στο νούμερο 4 έχουμε την ταινία ή ιμάντα από μονωτικό υλικό. Ο κύριος ρόλος της είναι η μεταφορά του φορτίου από την παραγωγή, που γίνεται στο κάτω μέρος της γεννήτριας και να το μεταφέρει στη μεταλλική σφαίρα. Συνήθως το υλικό κατασκευής του είναι καουτσούκ ή στην δικιά μας περίπτωση ακατέργαστο δέρμα ζώου, το οποίο ηλεκτρίζεται πολύ εύκολα.

Στο νούμερο 6 βρίσκεται η κάτω ακίδα, ή αλλιώς το κάτω ηλεκτρόνιο. Είναι γειωμένο και σκοπός του είναι να προσδίδει ή να αφαιρεί ηλεκτρόνια από τον ιμάντα. Όπως και το άνω ηλεκτρόνιο είναι φτιαγμένο από κάποιο αγώγιμο μέταλλο και τα άκρα του προτιμάται να είναι μυτερά, ενώ ούτε αυτό ακουμπάει τον ιμάντα, παρότι βρίσκεται πολύ κοντά του.

Στο νούμερο 7 έχουμε τον κύλινδρο από μονωτικό υλικό. Η δουλειά του είναι να στηρίζει την σφαίρα και να παρέχει μόνωση στην κατασκευή ώστε να μην υπάρχουν πρόωρες εκκενώσεις. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν αρκετά υλικά, τα οποία κατασκευάζονται σε μορφή κυλίνδρου, όπως plexiglass, pvc, ακόμα και κεραμικά.

## 2.2 Ηλεκτροστατική φόρτιση

Στο προηγούμενο κεφάλαιο παρουσιάσαμε τα δύο είδη ηλεκτροστατικών γεννητριών, τις μηχανές τριβής και τις μηχανές επαγωγής, όμως πριν προχωρήσουμε είναι αναγκαίο να μιλήσουμε για το τι ακριβώς εννοούμε με τον όρο ηλεκτροστατικός ηλεκτρισμός. Σίγουρα οι περισσότεροι έχουμε πειραματιστεί με τον στατικό ηλεκτρισμό, έχοντας τρίψει ένα μπαλόνι σε μάλλινη μπλούζα και το έχουμε δει να

«κολλάει» σε αυτή. Τι συμβαίνει όμως και ξαφνικά προσδίδεται αυτή η ικανότητα στο μπαλόνι;

Για να το απαντήσουμε αυτό πρέπει να μιλήσουμε για τα άτομα, από τα οποία αποτελούνται τα πάντα γύρω μας. Τα άτομα αποτελούνται στον πυρήνα τους από νετρόνια και πρωτόνια, ενώ γύρω από τον πυρήνα περιστρέφονται τα ηλεκτρόνια τους. Τα πρωτόνια είναι θετικά φορτισμένα, τα ηλεκτρόνια αρνητικά, ενώ τα νετρόνια δεν φέρουν φορτίο. Γενικά η ύλη είναι ουδέτερα φορτισμένη, σημαίνοντας ότι τα άτομα, τα οποία την αποτελούν, έχουν ίσο αριθμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων. Αν ένα άτομο έχει μεγαλύτερο αριθμό πρωτονίων από ηλεκτρονίων, τότε είναι θετικά φορτισμένο, ενώ αν έχει περισσότερα ηλεκτρόνια είναι αρνητικά φορτισμένο. Τα πρωτόνια στον πυρήνα του ατόμου δεν μπορούν να μεταβληθούν, το μόνο που μπορεί να αλλάξει ώστε ένα άτομο να αποκτήσει θετική ή αρνητική φόρτιση είναι να χάσει ή να λάβει ηλεκτρόνια. [\[41\]](#)

Σε κάποια υλικά, τα άτομά τους, έχουν την ιδιότητα να λαμβάνουν ηλεκτρόνια ευκολότερα από το να δίνουν, ενώ κάποια άλλα τους είναι ευκολότερο να δίνουν, όταν έρχονται σε επαφή με κάποιο άλλο υλικό. Με βάση αυτή την ιδιότητα των υλικών έχουμε κατασκευάσει την τριβοηλεκτρική σειρά, κατά την οποία ένα υλικό το οποίο δίνει πιο εύκολα ηλεκτρόνια απ' ότι λαμβάνει τοποθετείται στα θετικά, ενώ ένα άλλο το οποίο λαμβάνει πιο εύκολα απ' ότι δίνει βρίσκεται στα αρνητικά. [\[41\]](#)

|                    |                              |                                     |
|--------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Tribopositive<br>↑ | Aniline formaldehyde resin   | Wood                                |
|                    | Polyformaldehyde 1.3-1.4     | Amber                               |
|                    | Polyurethane foam            | Sealing wax                         |
|                    | Ethylcellulose               | Poly (methyl methacrylate)          |
|                    | Sorbothane                   | Nickel, Copper                      |
|                    | Polyamide 11                 | Sulphur                             |
|                    | Polyamide 6,6                | Brass, Silver                       |
|                    | Melamine formaldehyde        | Gold                                |
|                    | Hair                         | Poly urethane flexible sponge       |
|                    | Oily skin                    | Poly (ethylene terephthalate) (PET) |
|                    | Dry skin                     | Epoxy resin                         |
|                    | Glass                        | Hard rubber                         |
|                    | Acrylic, Lucite              | Poly vinyl butyral                  |
|                    | Leather                      | Poly chloro butadiene               |
|                    | Rabbits fur                  | Natural rubber                      |
|                    | Asbestos                     | Polyacrylonitrile (PAN)             |
|                    | Quartz                       | Acrylonitrile vinyl chloride        |
|                    | Mica                         | Poly (bisphenol A carbonate)        |
|                    | Lead                         | Poly(vinylidene chloride)           |
|                    | Rock salt (NaCl)             | Polyolefin                          |
|                    | Wool                         | Poly chloroether                    |
|                    | Cat's fur                    | Polyvinylidene fluoride (PVDF)      |
|                    | Silk, woven                  | Polystyrene (PS)                    |
|                    | Aluminium                    | Orlon                               |
|                    | Poly vinyl alcohol           | Polyethylene (PE)                   |
|                    | Poly vinyl acetate           | Polypropylene (PP)                  |
|                    | Paper                        | Silicone                            |
|                    | Cellulose                    | Polyimide (Kapton)                  |
|                    | Cellulose acetate            | Polyvinyl chloride (PVC)            |
|                    | Polyethylene glycol adipate  | FEP                                 |
|                    | Polydiallyl phthalate        | Polydimethyl siloxane (PDMS)        |
|                    | Cellulose regenerated sponge | Polytetrafluoroethylene (PTFE)      |
|                    | Cotton                       | Silicone rubber                     |
|                    | Steel                        | Ebonite                             |
|                    | (contd.)                     |                                     |
|                    |                              | Tribonegative<br>↓                  |

Σχήμα 44 Πίνακας τριβοηλεκτρικής σειράς υλικών [45]

Από τη θέση τους στην τριβοηλεκτρική σειρά μπορούμε να καταλάβουμε τι θα συμβεί αν φέρουμε σε επαφή δύο μη αγώγιμα υλικά, ποιο θα χάσει ηλεκτρόνια και έτσι θα φορτιστεί θετικά, και ποιο θα λάβει ηλεκτρόνια και θα φορτιστεί αρνητικά. Όσο πιο μεγάλη απόσταση έχουν μεταξύ τους στην σειρά τόσο πιο μεγάλη θα είναι η μεταφορά ηλεκτρονίων. Κάποιοι ακόμα σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν το μέγεθος ή τη διάρκεια του φαινομένου της ηλεκτροστατικής φόρτισης είναι η υγρασία, οι ρύποι στην ατμόσφαιρα και το πόσο λείες είναι οι επιφάνειες. Στην περίπτωση που η ατμόσφαιρα είναι πολύ υγρή, τότε η υγρασία καλύπτει την επιφάνεια των υλικών και παρέχει μία διέξοδο χαμηλής αντίστασης για τη ροή του φορτίου. Αυτή η διαδρομή επιτρέπει στα φορτία να επανασυνδεθούν και έτσι να εξουδετερώσουν την ανισορροπία φορτίου. Επίσης οι ρύποι στην ατμόσφαιρα έχουν

την ίδια επίδραση που έχει η υγρασία. Τέλος η ομαλότητα των υλικών έχει και αυτή επίδραση στην φόρτιση, όσο πιο λείες οι επιφάνειες των υλικών που έρχονται σε επαφή τόσο πιο καλή θα είναι η ηλεκτροστατική φόρτιση. [41]

Σε αυτό το σημείο καλό είναι να ξεκαθαρίσουμε ότι η ηλεκτροστατική φόρτιση ενός υλικού δεν σχετίζεται άμεσα με την τριβή. Με την τριβή ουσιαστικά αυτό που πετυχαίνουμε είναι να φέρουμε περισσότερη επιφάνεια των υλικών σε επαφή και να ενισχύσουμε την ηλεκτροστατική φόρτιση, χωρίς να έχει κάποια σχέση η ίδια η τριβή με το φαινόμενο. [41]

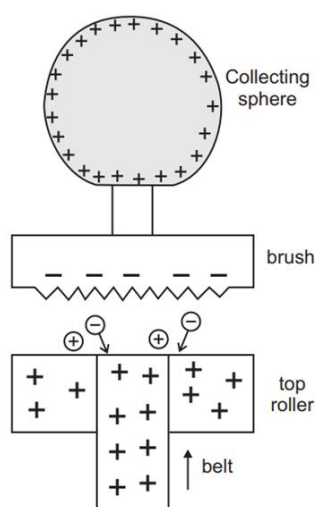
Αφού αναλύσαμε το τι είναι η ηλεκτροστατική φόρτιση και πότε επιτυγχάνεται και πότε ενισχύεται, πάμε να περάσουμε στην ηλεκτροστατική φόρτιση του ιμάντα στην γεννήτρια Van de Graaff. Ο κάτω κύλινδρος, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με το ηλεκτρικό μοτέρ και είναι τυλιγμένος με ταινία teflon, αρχίζει να κινεί τον ιμάντα. Ο ιμάντας, ο οποίος στην δική μας περίπτωση είναι φτιαγμένος από ακατέργαστο δέρμα (αλλά θα μπορούσε να είναι και από λάστιχο ή καουτσούκ) αρχίζει να φορτίζεται θετικά, ενώ ο κύλινδρος αρνητικά. Αυτό εξηγείται εύκολα από αυτά που αναφέραμε προηγουμένως για την ηλεκτροστατική φόρτιση, καθώς βλέπουμε ότι το teflon βρίσκεται πολύ χαμηλά στην τριβοηλεκτρική σειρά, στα αρνητικά, ενώ το δέρμα είναι ψηλά, στα θετικά. Φυσικά το φορτίο του ιμάντα μπορεί να είναι αρνητικό και του κυλίνδρου θετικό αναλόγως τα υλικά που επιλέγουμε για κύλινδρο και ιμάντα. Και οι δύο περιπτώσεις φόρτισης ιμάντα- κάτω κυλίνδρου φαίνονται στις παρακάτω φωτογραφίες. [41], [42], [43], [44]



Σχήμα 45 Οι δύο περιπτώσεις φόρτισης του ιμάντα, αριστερά αρνητική και δεξιά θετική φόρτιση. [44]

Στη συνέχεια ένα γειωμένο μεταλλικό ηλεκτροδίο είναι τοποθετημένο κοντά στον κάτω κύλινδρο, χωρίς όμως να ακουμπάει τον ιμάντα. Επειδή το αρνητικό ηλεκτρικό πεδίο του κυλίνδρου είναι πιο δυνατό από αυτό του ιμάντα, καθώς το φορτίο στον κύλινδρο είναι πιο συγκεντρωμένο, έχει σαν αποτέλεσμα να απωθεί τα αρνητικά φορτία (ηλεκτρόνια) από τα άκρα του ηλεκτροδίου και να αφήνει τα θετικά. Επίσης όσο πιο «μυτερά» είναι τα άκρα του ηλεκτροδίου τόσο πιο έντονα συμβαίνει το φαινόμενο και για αυτό το λόγο εμείς έχουμε χρησιμοποιήσει πολύκλωνο καλώδιο για το ρόλο του ηλεκτροδίου. Ένα ακόμα αποτέλεσμα του έντονου ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται μεταξύ του κυλίνδρου και του ηλεκτροδίου είναι ότι αφαιρεί από τα μόρια του αέρα τα ηλεκτρόνια, μετατρέποντάς τα σε πλάσμα, την τέταρτη κατάσταση της ύλης. Έτσι έχουμε από τη μία τα ηλεκτρόνια, που διασπάστηκαν από τον αέρα, να προσελκύονται από τα άκρα του ηλεκτροδίου, που έχει θετικό φορτίο, και από την άλλη τα θετικά φορτισμένα μόρια (το πλάσμα) να έλκονται από τον αρνητικά φορτισμένο κύλινδρο και να κινούνται προς αυτόν. Στην διαδρομή, ωστόσο, για τον κύλινδρο συναντάνε τον ιμάντα και προσκολλάνε σε αυτόν. Να σημειωθεί ότι πρέπει να υπάρχουν αρκετά σωματίδια αέρα ώστε να λειτουργήσει η γεννήτρια και για το λόγο αυτό δεν μπορεί να λειτουργήσει στο κενό. [41], [42], [43]

Ο ιμάντας, λοιπόν, έχοντας θετικό φορτίο κατευθύνεται προς τον επάνω κύλινδρο και το επάνω ηλεκτροδίο, το οποίο είναι συνδεδεμένο με τη μεταλλική



Σχήμα 46 Η φόρτιση της μεταλλικής σφαίρας με θετικό φορτίο

σφαίρα. Ο κύλινδρος αυτός σε αντίθεση με τον κάτω είναι κατασκευασμένος συνήθως από κάποιο ουδέτερο μέταλλο, στην δικιά μας περίπτωση αλουμίνιο, και θα λάβει την ίδια φόρτιση που έχει ο ιμάντας, οπότε θετική. Έτσι θα παρατηρήσουμε ένα αντίστοιχο φαινόμενο με αυτό που είδαμε στον κάτω κύλινδρο, αλλά αντίστροφα, δηλαδή ο άνω κύλινδρος, θετικά φορτισμένος, όπως είπαμε, απωθεί τα θετικά φορτισμένα άτομα που βρίσκονται στην επιφάνεια του ιμάντα. Τα άκρα του άνω ηλεκτροδίου, παράλληλα, έχουν φορτιστεί αρνητικά από την

επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου του άνω κυλίνδρου, και συνεπώς έλκουν τα θετικά φορτισμένα άτομα που φεύγουν από τον ιμάντα. Επίσης, όπως είδαμε και προηγουμένως, έχουμε πάλι μία αλληλεπίδραση με τα μόρια του αέρα, τα οποία γίνονται πλάσμα, και έχουμε τα θετικά άτομα αέρα να έλκονται από το ηλεκτρόδιο και τα αρνητικά να γυρνούν πίσω στον ιμάντα. Το θετικά φορτισμένο φορτίο που έχει μαζευτεί στο ηλεκτρόδιο εν τέλει φτάνει στην μεταλλική σφαίρα μέσω καλωδίου που συνδέει αυτά τα δύο, όπου και απλώνεται ομοιόμορφα σε όλη την επιφάνειά της. Στην εικόνα παρατηρούμε τα φορτία στον άνω κύλινδρο (top roller), ηλεκτρόδιο (brush), στην μεταλλική σφαίρα (collecting sphere) και τον ιμάντα (belt). [\[41\]](#), [\[42\]](#), [\[43\]](#), [\[44\]](#)

Μία τελευταία παρατήρηση είναι ότι αν θέλαμε να αυξήσουμε, ή και να διπλασιάσουμε, το ρεύμα που παράγει η γεννήτριά μας τότε θα μπορούσαμε να αντικαταστήσουμε τον άνω κύλινδρο, ο οποίος όπως είπαμε είναι κατασκευασμένος από ουδέτερο μέταλλο, με κύλινδρο από κάποιο υλικό το οποίο βρίσκεται στα θετικά στην τριβοηλεκτρική σειρά, όπως για παράδειγμα nylon. Έτσι θα είχε σαν αποτέλεσμα να απωθεί περισσότερο τα θετικά φορτία από τον ιμάντα προς στο άνω ηλεκτρόδιο και εν τέλει να αυξήσει το ρεύμα. [\[41\]](#)

## 2.2 Μέγιστη θεωρητική τάση

Αφού είδαμε πως λειτουργεί το εσωτερικό της γεννήτριας Van de Graaff ήρθε η ώρα να εξετάσουμε τι συμβαίνει κατά την λειτουργία της. Όπως είπαμε με τη διαδικασία της ηλεκτροστατικής φόρτισης το φορτίο μέσω του άνω ηλεκτροδίου φτάνει στην σφαίρα όπου διαχέεται σε όλο το εμβαδό της. Η τάση στην εξωτερική επιφάνεια της σφαίρας συνεχίζει να αυξάνεται όσο λειτουργεί το μοτέρ έως ότου ξαφνικά παραχθεί μία σπίθα, σαν μικρή αστραπή, και μέρος της φόρτισης αποφορτιστεί στον αέρα. Η γεννήτρια θα παράξει σπίθα αν κάποιος ή κάτι αγωγίμο πλησιάσει κοντά της ώστε να λάβει αυτός ή αυτό μέρος της φόρτισης. Η διαδικασία αυτή θα συνεχίζει να συμβαίνει όσο ο κινητήρας δουλεύει. [\[43\]](#)

Η μέγιστη θεωρητική τάση που μπορεί να φτάσει ο σφαιρικός πυκνωτής, όπως δείχνει και το όνομά της είναι η τάση που θα μπορούσε να «κρατήσει» η σφαίρα πριν επέλθει διάσπαση σε ένα ιδανικό, μη πραγματικό, σενάριο. Η μέγιστη θεωρητική τάση, λοιπόν, είναι συνάρτηση της μέγιστης πεδιακής έντασης διάσπασης του μονωτικού μέσου  $E_0$  και της διηλεκτρικής σταθεράς του μέσου, που στην περίπτωσή

μας είναι ο αέρας και άρα την θεωρούμε ίση με αυτή του κενού, άρα  $\epsilon_0 = 10^{-9}/36\pi$  F/m. Για κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας η μέγιστη πεδιακή ένταση διάσπασης μπορεί να θεωρηθεί ότι ισούται περίπου με 3 MV/m. Άρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη μέγιστη τιμή ως εξής:

Το ηλεκτρικό πεδίο  $E$  σφαίρας ακτίνας  $r$  δίνεται από τον τύπο:

$$E = Q/(4\pi\epsilon_0 r^2) \quad (2.1)$$

Η χωρητικότητα μίας μονωμένης σφαίρας ακτίνας  $r$  δίνεται από τον τύπο:

$$C = 4\pi\epsilon_0 r \quad (2.2)$$

ο οποίος για  $r = 0,1$  m γίνεται:  $C \approx 11$  pF

Για σφαίρα ακτίνας  $r = 0,1$  m χρησιμοποιώντας τον τύπο (2.1) και τον τύπο  $Q = CV$  για το φορτίο, το ηλεκτρικό πεδίο γίνεται:

$$E = \frac{CV}{4\pi\epsilon_0 r^2} = V/r \quad (2.3)$$

Άρα συνεπάγεται:

$$V = Er \quad (2.4)$$

και άρα η μέγιστη ένταση είναι  $V_{max} = (3 \times 10^6 * 0,1) = 300.000$  Volts

Παρατηρούμε ότι η μέγιστη τάση εξαρτάται μόνο από την ακτίνα του σφαιρικού πυκνωτή.

Με αυτή την τιμή σαν γνώμονα μπορούμε να υπολογίσουμε και τις εξής τιμές:

Μέγιστο φορτίο:

$$Q_{max} = CV_{max} = 3,3 \mu C \quad (2.5)$$

Μέγιστο ρεύμα:

$$I = \epsilon_0 E_{max} b v \quad (2.6)$$

όπου  $b$  = το πλάτος του ιμάντα = 3 cm = 0,03 m

$v$  = η ταχύτητα του ιμάντα

$$v = (n/60) * \pi * d \quad (2.7)$$

όπου  $d$  η διάμετρος του κυλίνδρου = 0,026m και  $n$  οι στροφές του κινητήρα = 2800 rpm

$$\text{άρα } v = \left(\frac{2800}{60}\right) \pi * 0,026 \approx 3,81 \text{ m/s}$$

$$\text{και συνεπώς } I = \varepsilon_0 E_{max} b v \approx 3,03 \mu\text{A}$$

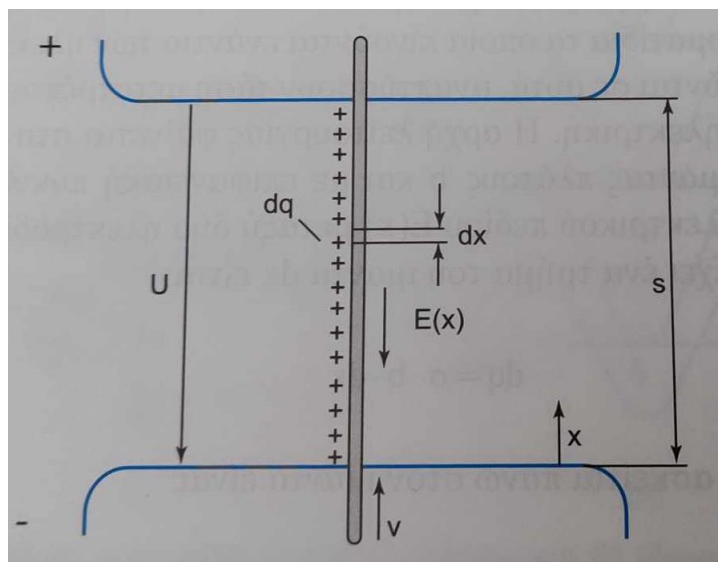
Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να παράξει η γεννήτρια Van de Graaff μέσω της αποφόρτισης δίνεται από τον τύπο:

$$E = 0.5 C V^2 \quad (2.8)$$

Τη χωρητικότητα  $C$  και την μέγιστη τάση  $V_{max}$  τα έχουμε υπολογίσει, άρα:  $E = 0,5 \text{ J}$

## 2.3 Τάση λειτουργίας

Για να βρούμε την τάση λειτουργίας της γεννήτριας Van de Graaff θα ξεκινήσουμε από τον ιμάντα. Θεωρούμε μονωμένο ιμάντα πλάτους  $b$  με επιφανειακή πυκνότητα φορτίου  $\sigma$ , ο οποίος βρίσκεται μέσα με ηλεκτρικό πεδίο  $E(x)$  μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με απόσταση  $s$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 46 Ο μονωμένος ιμάντας πλάτους  $b$  με επιφανειακή πυκνότητα φορτίου  $\sigma$ , ο οποίος βρίσκεται μέσα με ηλεκτρικό πεδίο  $E(x)$  μεταξύ δύο ηλεκτροδίων με απόσταση  $s$

[39]

Το φορτίο που έχει ένα τμήμα του ιμάντα  $dx$  είναι:

$$dq = \sigma * b * dx \quad (2.9)$$

Η δύναμη που ασκείται πάνω στον ιμάντα είναι:

$$F = \int_0^x dF = \int_0^x E(x) dq = \sigma * b \int_0^x E(x) dx \quad (2.10)$$

Αν ο ιμάντας κινείται με σταθερή ταχύτητα  $v=dx/dt$  ενάντια αυτής της δύναμης τότε η απαραίτητη μηχανική δύναμη είναι:

$$P = F * v = \sigma * b * v \int_0^x E(x) dx \quad (2.11)$$

Εφ' όσον:

$$I = \frac{dq}{dt} = \sigma * b * v \quad (2.12)$$

και

$$V = \int_0^S E(x) dx \quad (2.13)$$

Προκύπτει ότι η μηχανική ισχύς για την κίνηση του ιμάντα είναι ίση με την ηλεκτρική ισχύ εξόδου VI.

Επειδή η τάση στα άκρα του ιμάντα δεν αυξάνει απεριόριστα, αλλά υπάρχει διαρροή ως προς τη γη που ακολουθεί τον νόμο του Ohm (αντίσταση ιμάντα R) και όπως περιεγράφηκε από τη σχέση (2.12), προκύπτει ότι η τάση στα άκρα της γεννήτριας θα είναι:

$$V = I * R = \sigma * b * v * R \quad (2.14)$$

όπου  $\sigma$  = η επιφανειακή πυκνότητα φορτίου στον ιμάντα

$v$  = η ταχύτητα του ιμάντα

$b$  = το πλάτος του ιμάντα

$R$  = αντίσταση διαρροής

[\[39\]](#)

Ας υπολογίσουμε τώρα ένα ένα τους όρους του γινομένου. Ξεκινάμε από τον πιο εύκολο όρο, ο οποίος είναι το πλάτος του ιμάντα και το γνωρίζουμε εξ σχεδιασμού:

$$b = 0,03 \text{ m}$$

Η αντίσταση διαρροής  $R$  μπορεί να υπολογιστεί με τον εξής τρόπο. Αρχικά έχουμε ότι η ειδική αγωγιμότητα  $\rho$  του plexiglass ή Poly Methyl Methacrylate (PMMA) κυμαίνεται από  $10^{13}$  έως  $10^{15}$ , έτσι μπορούμε να πάρουμε μία μέση τιμή στα  $10^{14} \Omega m$ , η οποία καθιστά το plexiglass πολύ καλό μονωτή. Η εξωτερική ακτίνα του κυλίνδρου είναι 7 cm, το πάχος του 0,3 cm και το μήκος του 50 cm. Η αντίσταση δίνεται από τον τύπο:

$$R = \rho \frac{l}{A} = 10^{14} * \frac{0,5}{\pi(0,07^2 - 0,064^2)} = 1,98 * 10^{16} \Omega$$

όπου  $l$  το μήκος του κυλίνδρου και  $A$  η επιφάνεια που διαρρέουν τα ρεύματα διαρροής. Το ρεύμα DC διαρρέει όλη την επιφάνεια του κυλίνδρου σε αντίθεση με το AC, στο οποίο ισχύει το επιδερμικό φαινόμενο.

Η ταχύτητα του ιμάντα όπως την έχουμε υπολογίσει στην (2.7) είναι  $v = 3,81$  m/s .

Όσο αφορά την επιφανειακή πυκνότητα στον ιμάντα, δεν μπορούμε να την υπολογίσουμε ακριβώς. Μπορούμε ωστόσο να πάρουμε μία τιμή της τάξεως του  $5 * 10^{-11} C/m^2$  η οποία είναι ανάμεσα στο  $10^{-10}$  και  $10^{-11}$  και ανταποκρίνεται στα υλικά τα οποία έρχονται σε επαφή, δηλαδή το ακατέργαστο δέρμα και το Teflon. Με αυτή την τιμή μπορούμε να υπολογίσουμε την τάση από την (2,14): [\[50\]](#) , [\[51\]](#)

$$V = 0,03m * 1,98 * 10^{16} \Omega * 3,81m/s * 5 * 10^{-11} C/m^2 = 113157V$$

## Κεφάλαιο 3- Κατασκευή:

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε λεπτομερώς με την κατασκευή της γεννήτριας Van de Graaff. Αρχικά θα παρουσιάσουμε το καθένα από τα κύρια μέρη της γεννήτριας και στην συνέχεια θα προχωρήσουμε στην συναρμολόγησή της. Η κατασκευή ενέχει κάποια σημεία στα οποία ο επίδοξος κατασκευαστής πρέπει να δώσει ιδιαίτερη προσοχή ώστε να διασφαλίσει την σωστή λειτουργία της. Τα σημεία στα οποία πρέπει να προσέξουμε θα αναλυθούν στην συνέχεια. Βέβαια εκτός από τα βασικά μέρη χρησιμοποιήσαμε και μία πληθώρα από μικρά υλικά όπως βίδες, παξιμάδια, κλπ. Πριν προχωρήσουμε όμως στην κατασκευή θα γίνει αναφορά στις βασικές αρχές ασφαλείας.

### 3.1 Βασικές αρχές ασφαλείας

Ενώ, όπως έχουμε αναφέρει, η γεννήτρια Van de Graaff παράγει λίγο ηλεκτρικό ρεύμα, αυτό που πρέπει να εννοηθεί είναι πως δεν πρόκειται για ένα παιχνίδι. Αρχικά να ξεκινήσουμε λέγοντας ότι τη γεννήτρια θα πρέπει να την χειρίζεται μόνο εξειδικευμένο προσωπικό με χρήση προστατευτικού εξοπλισμού όπως γάντια και γυαλιά. Παρακάτω παραθέτουμε μερικούς κανόνες ασφαλείας που πρέπει να τηρούνται από όλους:

- Άτομα με καρδιακά προβλήματα και άτομα με βηματοδότη ή άλλα ηλεκτρονικά ιατρικά εξαρτήματα απαγορεύεται να χειρίζονται την γεννήτρια ή να την πλησιάσουν.
- Όσοι επιθυμούν να παρακολουθήσουν την φόρτιση της γεννήτριας θα πρέπει να κρατούν απόσταση ασφαλείας περίπου 1,5 μέτρα από αυτή. Όσοι πλησιάσουν ή έρθουν σε επαφή με την γεννήτρια πρέπει να βεβαιωθούν ότι έχουν αφαιρέσει οτιδήποτε μεταλλικό από επάνω τους. Επίσης προτιμάται να αγγίζουμε τη σφαίρα με το δεξί χέρι, ώστε το ρεύμα εκφόρτισης να περνάει όσο το δυνατόν πιο μακριά από την καρδιά.
- Η χρήση της γεννήτριας δεν πρέπει να γίνεται σε υγρό περιβάλλον ή κοντά σε νερό καθώς μπορεί να προκληθούν ακούσιες εκφορτίσεις.

- Απομακρύνουμε οτιδήποτε ηλεκτρονικό κοντά από την γεννήτρια, όπως υπολογιστές, ρολόγια, κινητά καθώς τα υψηλά volt κατά τις εκκενώσεις μπορεί να τα καταστρέψουν.
- Διαθέτουμε πάντα κοντά στην γεννήτρια ένα γειωμένο καλώδιο το οποίο χρησιμοποιούμε για να αποφορτίσουμε την γεννήτρια πριν την ακουμπήσουμε.
- Αν κάποιος θέλει να ακουμπήσει την γεννήτρια πρέπει να πατάει σε μονωμένη πλατφόρμα, όπως ένα πλαστικό σκαμπό, και η εκφόρτισή του πρέπει να γίνει με αργό και ελεγχόμενο τρόπο. Έχοντας κλείσει την γεννήτρια ακουμπάμε το «φορτισμένο» άτομο με ένα μακρύ ξύλο για 15-30 δευτερόλεπτα ως ότου εκφορτιστεί. Δεν χρησιμοποιούμε το γειωμένο καλώδιο καθώς η αποφόρτιση θα γίνει στιγμιαία και θα νιώσει έντονα το σοκ.

[42] , [46]

### 3.2 Παρουσίαση των υλικών της γεννήτριας

Σε αυτό το σημείο θα παρουσιάσουμε όλα τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήσαμε για την κατασκευή της γεννήτριας Van de Graaff μαζί με το αντίστοιχο φωτογραφικό υλικό. Πριν ξεκινήσουμε θα ήθελα να αναφέρω ότι όλη η κατασκευή βασίστηκε γύρω από τη μεταλλική σφαίρα και την διάμετρο της οπής, καθώς είναι το πιο δύσκολο κομμάτι ως προς την εύρεση. Επομένως αν κάποιος θελήσει να κατασκευάσει την δικιά του γεννήτρια και βρει σφαίρα με μεγαλύτερη οπή, αυτό συστήνεται.



Σχήμα 47 Η μεταλλική σφαίρα

Μεταλλικός πυκνωτής: Χρησιμοποιήσαμε ένα σφαιρικό ανοξείδωτο μεταλλικό πυκνωτή, τον οποίο παραγγείλαμε από site του εξωτερικού, διαμέτρου 20cm ο οποίος φέρει οπή διαμέτρου 7,2cm κομμένη με λείζερ.



Σχήμα 48 Η στήλη plexiglass



Σχήμα 49 Το δαχτυλίδι από plexiglass που κολλήσαμε για να στερεώνεται η σφαίρα

Μονωμένη στήλη  
στήριξης: Επιλέξαμε στήλη στήριξης από plexiglass ύψους 50cm η οποία ενώ παράλληλα προσφέρει μόνωση, επιτρέπει στο να βλέπουμε το μηχανισμό κίνησης. Το πάχος της είναι 0,3cm και η εξωτερική διάμετρός της 7cm. Στο επάνω μέρος της προσαρμόσαμε ένα «δαχτυλίδι» από plexiglass ώστε να εφαρμόζει η οπή της σφαίρας. Αγοράστηκε και επεξεργάστηκε από τοπικό εργαστήριο επεξεργασίας plexiglass.

Ιμάντας: Επιλέξαμε ζώνη από ακατέργαστο δέρμα ζώου, την οποία αγοράσαμε από κατάστημα δερμάτων, καθώς όπως δείξαμε στον πίνακα ηλεκτρارνητικότητας, φορτίζεται πολύ εύκολα. Κολλήσαμε τα δύο άκρα της ζώνης με βενζινόκολλα ώστε να γίνει ένας κλειστός ιμάντας και λειάναμε με γυαλόχαρτο το σημείο της ένωσης.



Σχήμα 50 Η δερμάτινη ζώνη πριν την κολλήσουμε



Σχήμα 51 Ο κύλινδρος που έχουμε τυλίξει με teflon

Κύλινδροι: Για την κατασκευή των κυλίνδρων κόψαμε κομμάτια από συμπαγή κύλινδρο αλουμινίου, τα οποία στάλθηκαν σε τοπικό μηχανουργείο, το οποίο διέθετε τόρνο, ώστε να πάρουν την μορφή καρουλιού που ζητούσαμε. Οι δύο κύλινδροι διαθέτουν τις ίδιες διαστάσεις, 4,5

cm μήκος (4,1 cm ο κύριος κύλινδρος χωρίς τα πλαϊνά στηρίγματα) και 3cm διάμετρο (2,6 cm ο κύριος κύλινδρος χωρίς τα πλαϊνά στηρίγματα), ενώ έχουν άξονα 8mm διαμέτρου. Ο κάτω κύλινδρος είναι τυλιγμένος με ταινία Teflon (έχουμε σημαδέψει την φορά με την οποία το τυλίξαμε, ώστε η περιστροφή του ιμάντα να γίνεται από την ανάποδη και να μην το ξετυλίγεται).

Βάσεις στήριξης: Για την στήριξη της όλης κατασκευής χρησιμοποιήσαμε δύο βάσεις. Η πρώτη είναι ξύλινη βαμμένη με λάκα, ώστε να προσφέρεται η κατάλληλη μόνωση, και είναι η κεντρική βάση πάνω στην οποία θα στηριχθεί όλος ο μηχανισμός. Η



Σχήμα 53 Η κύρια (κάτω) βάση στήριξης

δεύτερη είναι και αυτή ξύλινη αλλά αυτή τη φορά βαμμένη με ριπολίνη

και είναι η υποστηρικτική βάση, η οποία στηρίζει τη στήλη στήριξης και της επιτρέπει να ανεβοκατεβαίνει, ούτως ώστε να ρυθμίζεται το ύψος.



Σχήμα 52 Η επάνω βάση στήριξης

Κινητήρας: Χρησιμοποιήσαμε ένα κινητήρα από τον ανεμιστήρα ψύξης αυτοκινήτου. Λειτουργεί με μπαταρία 12V και αποδίδει 2800 rpm. Συνίσταται η επιλογή ενός μοτέρ άνω των 1000 rpm ώστε να έχει την ροπή να εκκινήσει την κατασκευή. Τέλος συνδέσαμε ένα διακόπτη ON/OFF μεταξύ της μπαταρίας και του μοτέρ ώστε να το ανοιγοκλείνουμε από εκεί πιο εύκολα, χωρίς να χρειάζεται να αποσυνδέουμε κάθε φορά την μπαταρία.



Σχήμα 54 Ο κινητήρας με το διακόπτη



Σχήμα 55 Ο επάνω άξονας από πλαστικό

Άξονες: Οι άξονες που χρησιμοποιήσαμε είναι σπειρωτοί με διάμετρο 8mm. Ο επάνω άξονας έχει μήκος 13cm και ο κάτω άξονας 34cm. Επιλέξαμε να χρησιμοποιήσουμε πλαστικό επάνω άξονα, καθώς βρίσκεται

σε κοντινή απόσταση από τη σφαίρα και θέλαμε να είμαστε σίγουροι ότι δεν θα υπάρχουν υπερπηδήσεις.



Σχήμα 56 Ο κάτω άξονας

Ρουλεμάν: Συνδέσαμε 3 ρουλεμάν στον κάτω άξονα, ο οποίος φέρει τον κάτω κύλινδρο και είναι συνδεδεμένος στο μοτέρ. Τα ρουλεμάν είναι τύπου pillow block με άξονα 8mm και εξωτερική διάμετρο 28,5mm.



Σχήμα 57 Τα ρουλεμάν τύπου pillow block

Ηλεκτρόδια: Για ηλεκτρόδια επιλέξαμε χάλκινα λεπτά σύρματα από πολύκλωνο καλώδιο, στα οποία δώσαμε το σχήμα της χτένας. Έχουν ύψος 3cm το επάνω και 2cm το κάτω, ενώ το πλάτος τους είναι 2cm.



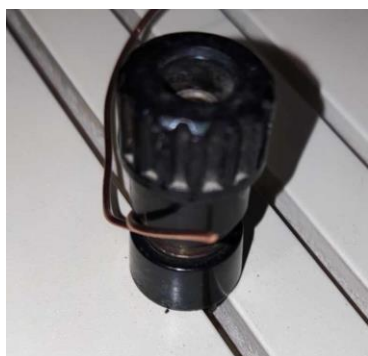
Σχήμα 58 Τα ηλεκτρόδια από μικρά καλώδια, που τους έχουμε δώσει το σχήμα της χτένας

Χρησιμοποιήσαμε λεπτά σύρματα καθώς η ανομοιογένεια του πεδίου στις άκρες τους είναι μεγάλη και έτσι το φαινόμενο Corona εμφανίζεται σε μεγαλύτερο βαθμό.

Αντάπτορας: Χρησιμοποιήσαμε ένα αντάπτορα για να συνδέσουμε το μοτέρ με τον κάτω άξονα. Ο αντάπτορας αυτός συνδέει 6mm, που είναι η διάμετρος του άξονα που φέρει το μοτέρ, με 8mm που είναι ο κεντρικός μας άξονας.



Σχήμα 59 Ο αντάπτορας που συνδέει το μοτέρ με τον κάτω άξονα



Σχήμα 60 Μπόρνα στην οποία συνδέεται το καλώδιο γείωσης

Μπόρνα: Για την σύνδεση του κάτω ηλεκτροδίου με την γείωση προσθέσαμε στην κατασκευή μία μπόρνα . Στην υποδοχή της συνδέεται το καλώδιο της γείωσης.

Σφικτήρες: Επιλέξαμε δύο σφικτήρες ώστε να συγκρατούν τη στήλη σταθερή πάνω στη βάση κατά την λειτουργία της γεννήτριας. Οι συγκεκριμένοι σφικτήρες χρησιμοποιούνται στην στήριξη σωλήνων φυσικού αερίου και



Σχήμα 61 Η σφικτήρες που συγκρατούν τη στήλη

διαθέτουν στο εσωτερικό επένδυση από καουτσούκ, και έτσι δεν ακουμπάει το μεταλλικό μέρος στη στήλη plexiglass.

Τα υπόλοιπα μικρά υλικά: Εφόσον αναλύσαμε τα βασικά μέρη της κατασκευής σε αυτό το σημείο παραθέτουμε μερικά από τα διάφορα υλικά που χρησιμοποιήσαμε, όπως διαφόρων ειδών βίδες, παξιμάδια (κανονικά, μισά και ασφαλείας), γωνιές, ταινία teflon, καλώδια για την συνδεσμολογία του μοτέρ με την μπαταρία, allen, τσέρκι, ροδέλες μεταλλικές, όπως και δύο ροδέλες από καουτσούκ. Γενικά προσπαθήσαμε τα περισσότερα από τα υλικά όπως τα παξιμάδια, τις βίδες και τους άξονες, να τα πάρουμε διαμέτρου 8mm, ώστε να μας είναι πιο εύκολη η συλλογή και συναρμολόγηση.

### 3.3 Συναρμολόγηση

Στο σημείο αυτό φτάσαμε στη συναρμολόγηση της γεννήτριας Van de Graaff. Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να καλύψουμε, μέσω φωτογραφιών και κατάλληλης επεξήγησης, όλα τα βήματα που εκτελέσαμε ώστε να φτιάξουμε μία γεννήτρια που λειτουργεί απροβλημάτιστα και παράγει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη τάση.

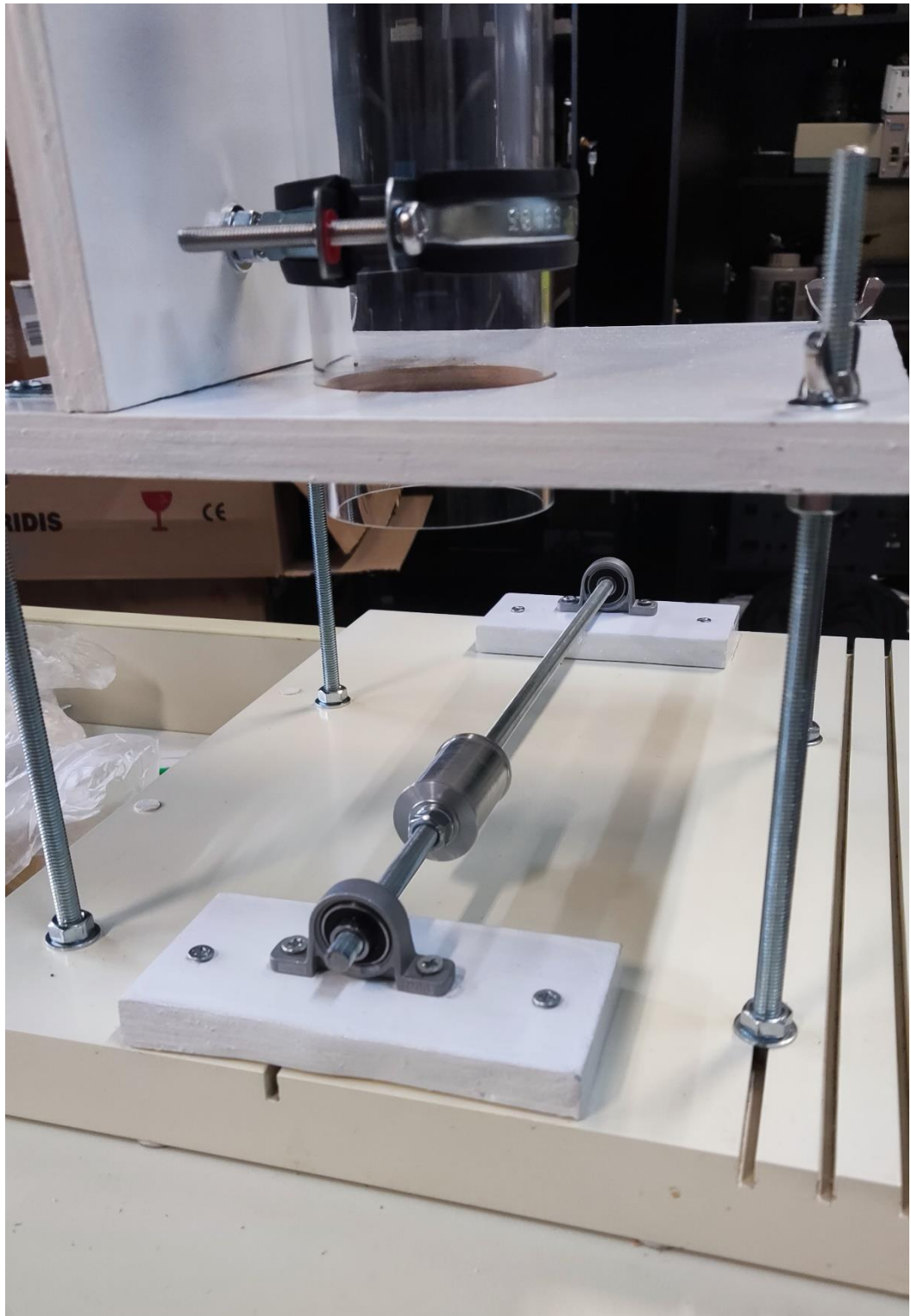
#### 1<sup>ο</sup> μέρος: Η βάση

Ξεκινάμε από τις βάσεις της κατασκευής. Τρυπήσαμε την κάτω βάση στα σημεία που θα βιδώνονταν τα κομμάτια της ντίζας, που χρησιμεύουν στην στήριξη και ρύθμιση του ύψους της άνω βάσης, χρησιμοποιώντας τρυπάνι. Το ίδιο επαναλάβαμε στην άνω βάση. Στην συνέχεια ανοίξαμε τρύπα μεγέθους 7cm, με χρήση ποτηροτρύπανου, στην πάνω βάση, όσο δηλαδή είναι η διάμετρος του σωλήνα plexiglass. Τέλος προσθέσαμε ένα ακόμα ξύλο κάθετο στην επάνω βάση, στο οποίο βίδωσαν οι σφικτήρες που συγκρατούν την στήλη plexiglass και το στερεώσαμε με γωνιές.



*Σχήμα 62 Η άνω βάση με την στήλη plexiglass και τους σφυκτήρες να την συγκρατούν*

Για την ένωση της κάτω με την πάνω βάση χρησιμοποιήσαμε, όπως αναφέραμε, κομμάτια μιας ντίζας γαλβανιζέ από ατσάλι. Κόψαμε λοιπόν την ντίζα του 1m σε τέσσερα ίσα μέρη, παίρνοντας κομμάτια των 25cm. Τα κομμάτια αυτά στην συνέχεια τα τοποθετήσαμε στις τρύπες που είχαμε ανοίξει στις βάσεις. Χρησιμοποιήσαμε παξιμάδια ασφαλείας στο κάτω μέρος ώστε να είμαστε σίγουροι ότι δεν θα ξεβιδώσει, ενώ στο επάνω μέρος βάλαμε παξιμάδια τύπου πεταλούδας, ώστε να είναι πιο εύκολη η περιστροφή τους όταν χρειάζεται να προσαρμόσουμε το ύψος της βάσης.



*Σχήμα 63 Η σύνδεση της άνω με την κάτω βάση με τη χρήση των μεταλλικών ντιζών*

## 2<sup>ο</sup> μέρος: Η στήλη στήριξης

Τρυπήσαμε τη στήλη plexiglass στο επάνω μέρος της κάνοντάς της τρύπες διαμέτρου 8mm, από τις οποίες θα περνάει ο επάνω άξονας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι χρησιμοποιήθηκε τρυπάνι ειδικό για plexiglass, καθώς ένα

οποιοδήποτε τρυπάνι μπορεί να ραγίσει το υλικό. Στη συνέχεια κόψαμε ένα μικρό κομμάτι από άλλο σωλήνα plexiglass εσωτερικής διαμέτρου 7cm ο οποίος εφαρμόζει στο εξωτερικό της στήλης μας και τον κολλήσαμε με εποξική ρητίνη. Πάνω σε αυτό το κομμάτι εφαρμόζει η οπή της μεταλλικής σφαίρας. Ολοκληρώνοντας τις εργασίες στη στήλη την «περάσαμε» μέσα από την τρύπα της άνω βάσης και στη συνέχεια την στερεώσαμε με τη χρήση των σφικτήρων, τους οποίους βιδώσαμε στο κάθετο ξύλο.



*Σχήμα 64 Η στήλη στήριξης με την τρύπα που έχουμε κάνει στον άνω άξονα και το δαχτυλίδι που έχουμε προσαρμόσει για την στήριξη της σφαίρας*

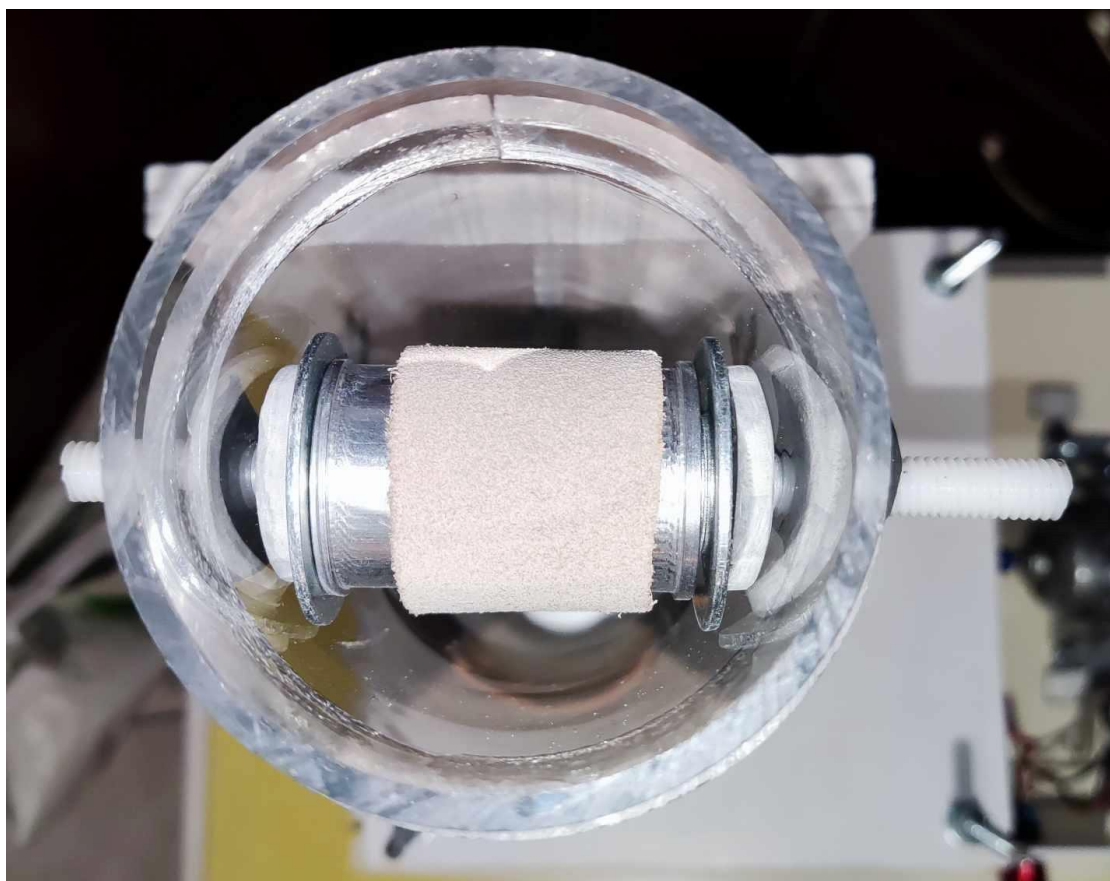
### 3<sup>ο</sup> μέρος: Ο ιμάντας

Μετρήσαμε και κόψαμε τον δερμάτινο ιμάντα στο μήκος που θέλαμε (108cm). Στην αρχή ενώσαμε τα άκρα ράβοντάς τα, όμως διαπιστώσαμε πως η μεγάλη ανομοιομορφία στο ύψος της ζώνης που δημιουργήθηκε στο σημείο είχε σαν αποτέλεσμα ο ιμάντας μετά από λίγη ώρα περιστροφής να βγαίνει από τον κύλινδρο. Έτσι αυτό που κάναμε και συνιστούμε και σε όποιον επίδοξο κατασκευαστή να ακολουθήσει είναι να κολλήσει την ζώνη με βενζινόκολλα. Ένα ακόμα βήμα ήταν να ξύσουμε τα άκρα της ζώνης που θα κολλάγαμε μεταξύ τους με ένα γυαλόχαρτο, ούτως ώστε να μειωθεί κι άλλο η διαφορά ύψους στο σημείο της ένωσης.

### 4<sup>ο</sup> μέρος: Οι άξονες

Συναρμολογήσαμε πρώτα τον άνω άξονα. Πέρασαμε για αρχή τον άξονα μέσα από την μία τρύπα της στήλης plexiglass και ύστερα του βάλαμε με τη σειρά μία ροδέλα καουτσούκ (ώστε να μην ακουμπάει ο κύλινδρος στο plexiglass), μία ροδέλα

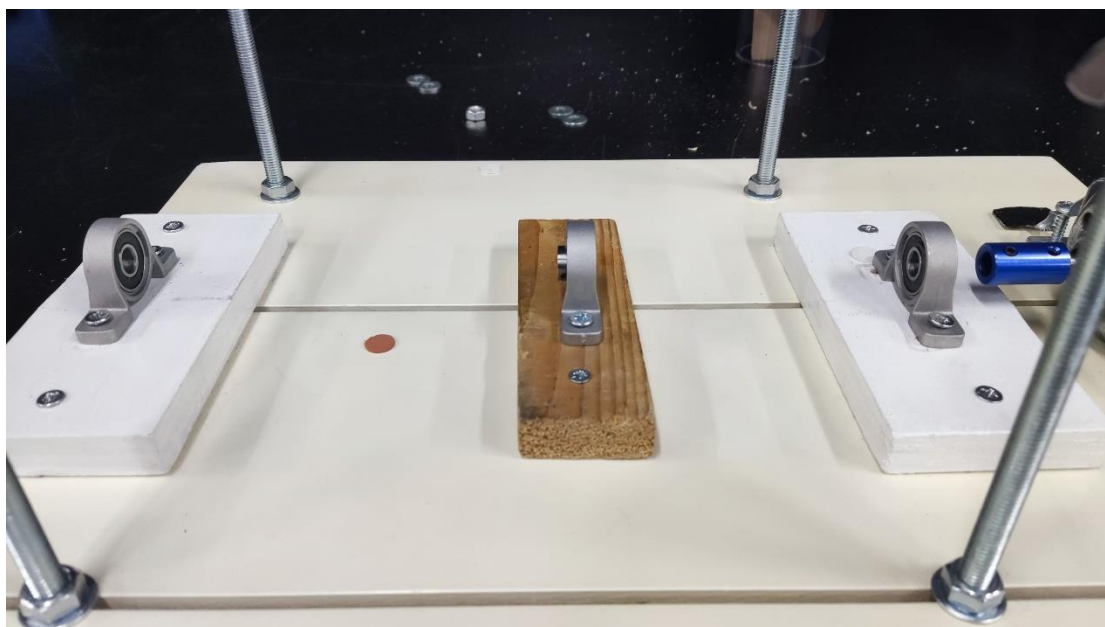
μεταλλική και στη συνέχεια τον κύλινδρο. Στο σημείο αυτό περάσαμε και τον ιμάντα και τελειώσαμε με μία ροδέλα μεταλλική και την άλλη ροδέλα καουτσούκ. Ο κύλινδρός μας θέλουμε να περιστρέφεται ελεύθερα και γι' αυτό το λόγο βάλαμε μόνο ροδέλες και όχι παξιμάδια. Έτσι ολοκληρώσαμε τα υλικά που μπαίνουν στον πάνω άξονα και έμενε μόνο να κόψουμε δύο κομμάτια καουτσούκ και αυτά μαζί με δύο πλαστικά παξιμάδια να τα βιδώσουμε στο εξωτερικό του άξονα.



*Σχήμα 65 Ο άνω άξονας μαζί με τον κύλινδρο και τον ιμάντα περασμένο*

Σε αυτό το κομμάτι φτάσαμε στην συναρμολόγηση του κάτω άξονα, όμως πριν από αυτήν είναι πολύ σημαντικό να είμαστε σίγουροι ότι οι δύο άξονες είναι στην ίδια ευθεία, ώστε να περιστρέφεται σωστά ο ιμάντας και να μην βγαίνει από τους κυλίνδρους. Όταν σιγουρευτήκαμε για την θέση του κάτω άξονα, την σημειώσαμε με ένα μολύβι και πάνω στην ευθεία αυτή βιδώσαμε τις ξύλινες βάσεις με τα ρουλεμάν. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι στην αρχή είχαμε τοποθετήσει δύο ρουλεμάν στον άξονα, ένα στην αρχή και ένα κοντά στον κινητήρα, όμως, επειδή ο άξονάς μας είναι αρκετά μεγάλος, διαπιστώσαμε κατά την λειτουργία ότι

ταλαντευόταν σε μεγάλο βαθμό με αποτέλεσμα να βγάζει μετά από λίγη ώρα τον ιμάντα από τους κύλινδρους και για το λόγο αυτό προσθέσαμε ένα τρίτο ρουλεμάν στην μέση του. Στην συνέχεια λοιπόν περάσαμε τον άξονα μέσα από το πρώτο ρουλεμάν και βιδώσαμε σε αυτόν με σειρά ένα παξιμάδι, μία ροδέλα και ένα γκρόβερ και ύστερα τον κύλινδρο, τον οποίο προηγουμένως τον είχαμε τυλίξει με ταινία Teflon, και μετά πάλι αντίστοιχα γκρόβερ, ροδέλα και παξιμάδι. Τα δύο παξιμάδια τα σφίξαμε καλά με τη χρήση γαλλικών κλειδιών καθώς ο κύλινδρος αυτός θέλουμε να περιστρέφεται μαζί με τον άξονα και να μην είναι ελεύθερος όπως ο επάνω. Τέλος περάσαμε τον ιμάντα στον κύλινδρο και όλα μαζί μετά μέσα από τα άλλα δύο ρουλεμάν.



*Σχήμα 66 Τα ρουλεμάν βιδωμένα με τις βάσεις τους*



*Σχήμα 67 Ο κάτω άξονας μαζί με τον κύλινδρο και περασμένο τον ιμάντα*

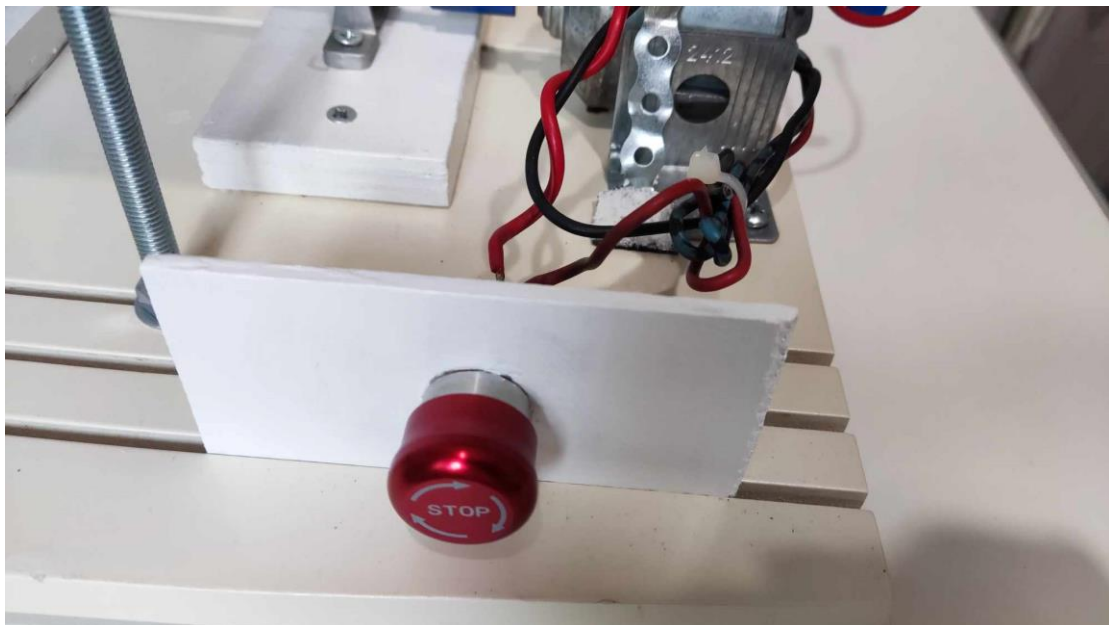
#### 5<sup>ο</sup> μέρος: Κινητήρας

Στερεώσαμε τον κινητήρα χρησιμοποιώντας 2 γωνιές, τις οποίες βιδώσαμε στην βάση. Για περαιτέρω στήριξη χρησιμοποιήσαμε ένα τσέρκι, το οποίο περάσαμε

πάνω από τον κινητήρα και βιδώσαμε με την σειρά του στην ξύλινη βάση. Για την ένωση του κινητήρα με τον άξονα του κάτω κυλίνδρου χρησιμοποιήσαμε ένα σύνδεσμο αξόνων, που ενώνει τα 6mm του άξονα του κινητήρα με τα 8mm του κύριου άξονα. Ο κινητήρας μας λειτουργεί με dc τάση 12V και έχει δύο ταχύτητες. Εμείς χρησιμοποιήσαμε την υψηλή ταχύτητα των 2800 rpm. Τέλος συνδέσαμε ένα κουμπί ON/OFF στον κινητήρα και προσαρμόσαμε δύο ακροδέκτες στα άκρα των καλωδίων του ώστε να είναι πιο εύκολη η σύνδεσή του στην μπαταρία.



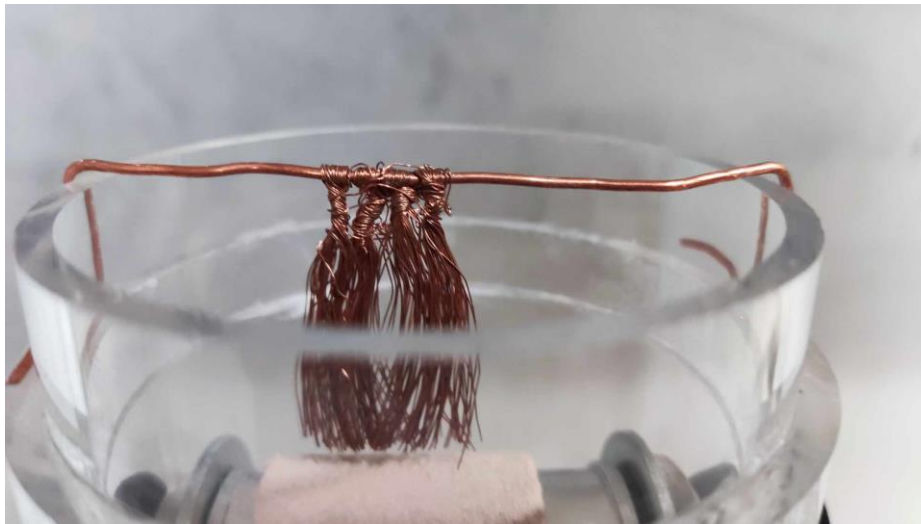
*Σχήμα 68 Ο κινητήρας στερεωμένος με το τσέρκι και τις γωνίες*



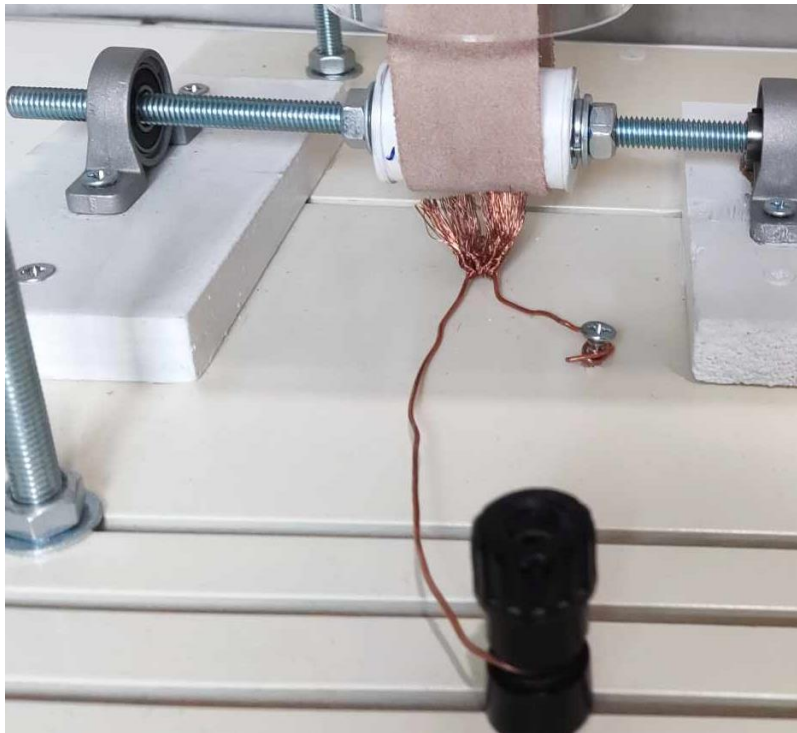
*Σχήμα 69 Το κουμπί ON/OFF του κινητήρα*

## 6<sup>ο</sup> μέρος: Ηλεκτρόδια

Κόψαμε δύο κομμάτια από πολύκλωνο καλώδιο χαλκού και τα τροποποιήσαμε κατάλληλα ώστε να πάρουν το σχήμα χτένας. Στη συνέχεια τα περάσαμε σε χοντρό χάλκινο σύρμα. Το κάτω ηλεκτρόδιο το συνδέσαμε με τη μπόρνα, την οποία στη συνέχεια γειώσαμε. Το πάνω ηλεκτρόδιο ακουμπάει το εσωτερικό της σφαίρας. Και τα δύο ηλεκτρόδια τα φέραμε κοντά στον ιμάντα, χωρίς όμως να ακουμπούν.

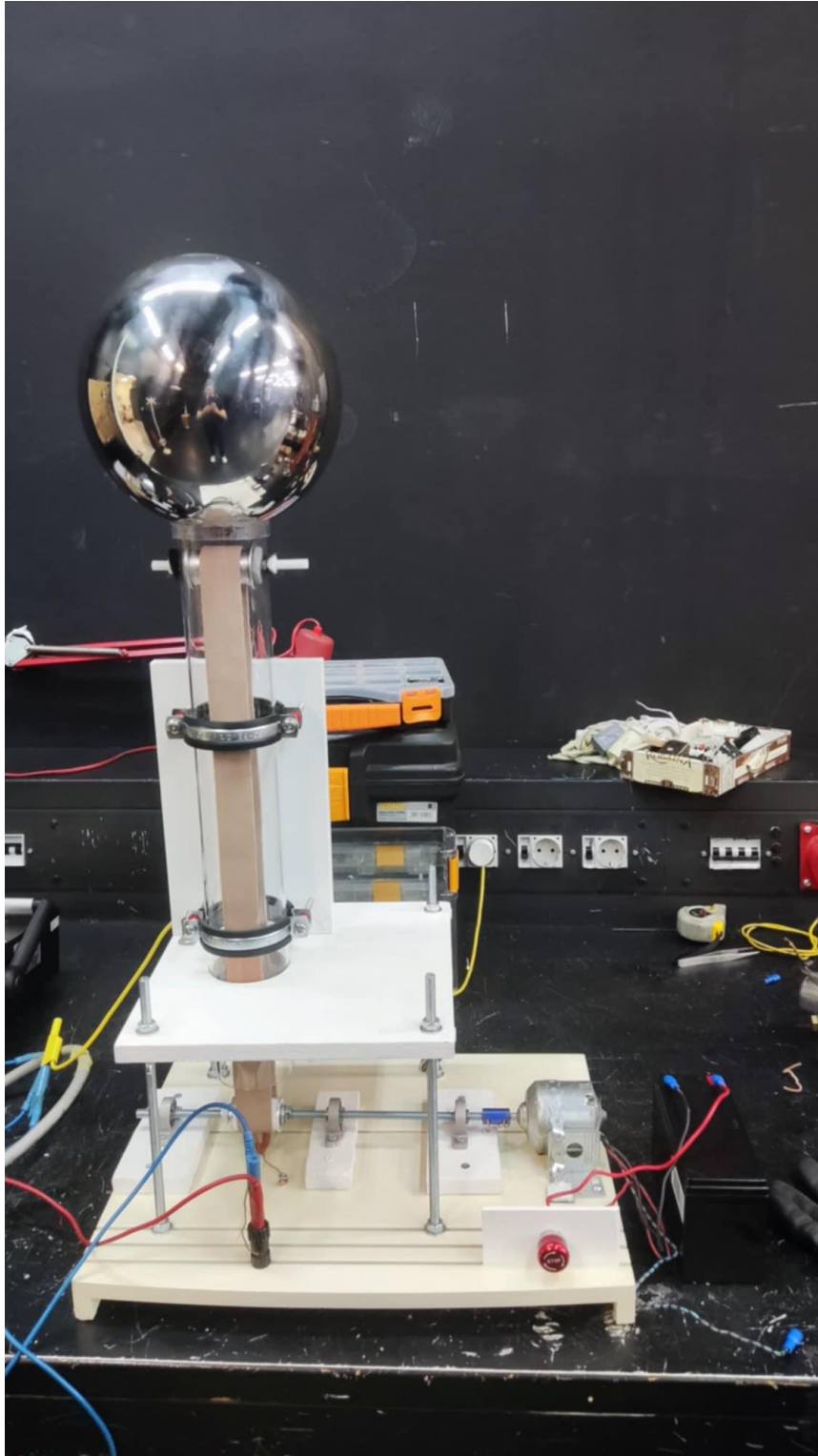


Σχήμα 70 Το άνω ηλεκτρόδιο



Σχήμα 71 Το κάτω ηλεκτρόδιο

Τέλος τοποθετήσαμε την σφαίρα και έτσι ολοκληρώσαμε την κατασκευή της γεννήτριας Van de Graaff.



Σχήμα 72 Η γεννήτρια Van de Graaff ολοκληρωμένη

## Κεφάλαιο 4: Μετρήσεις

### 4.1 Μέτρηση με χρήση μετρητή υψηλών τάσεων

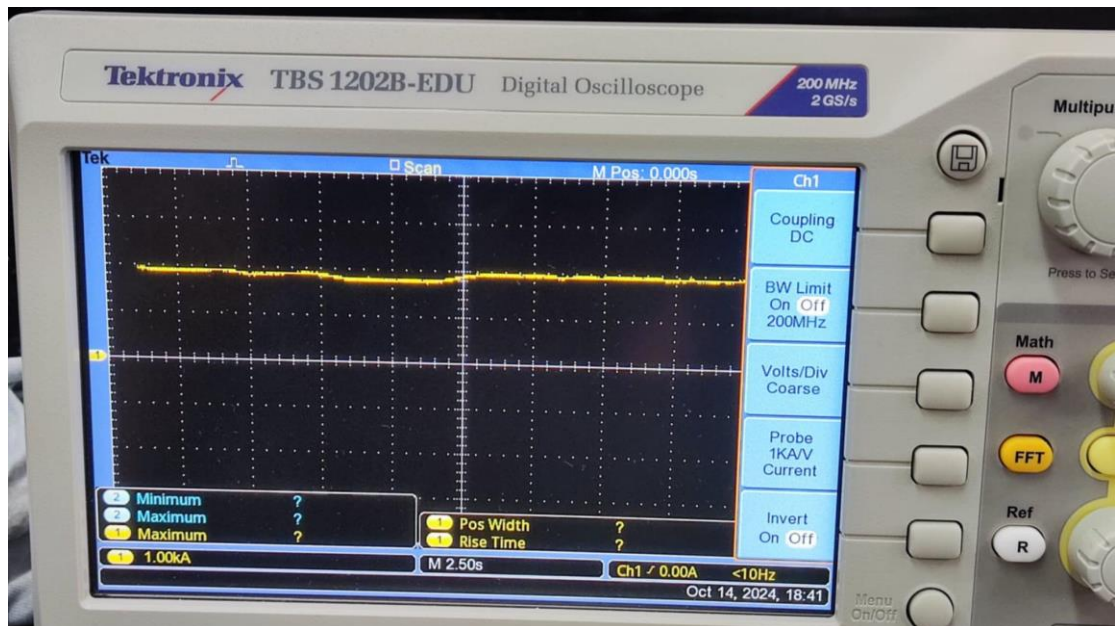
Μετρήσαμε την τάση της γεννήτριας Van de Graaff συνδέοντας σε σειρά ένα μετρητή υψηλών τάσεων της εταιρίας Brandenburg (Model 149-04), ο οποίος καταγράφει τάσεις μέχρι 20 kV. Είδαμε ότι μόλις σε λίγα δευτερόλεπτα η τάση ξεπέρασε το όριο των 20kV. Μάλιστα συνδέσαμε και ένα παλμογράφο, ο οποίος μας δείχνει την ευθεία γραμμή που διαγράφει το DC ρεύμα, οι μικρές αστάθειες στην ευθεία οφείλονται σε διακυμάνσεις στην ταχύτητα περιστροφής του ιμάντα.



Σχήμα 73 Η τάση στον μετρητή λίγο πριν ξεπεράσει τα 20kV



Σχήμα 74 Η ένδειξη όταν η τάση ξεπέρασε τα 20kV



Σχήμα 75 Η ένδειξη στον παλμογράφο

## 4.2 Μέτρηση με βάση το μήκος του σπινθήρα

Ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της τάσης της γεννήτριας είναι το sphere gap method, κατά το οποίο φέρνουμε κοντά της μία γειωμένη σφαίρα και υπολογίζουμε την τάση με βάση το μήκος του σπινθήρα που παράγεται. Ο ακόλουθος πίνακας μας δείχνει τις τιμές σε τάση και μήκος σπινθήρα ανάλογα με τη διάμετρο των σφαιρών, σε κανονικές συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας. [48]

| Maximum spark length [cm] between spherical electrodes in dry air at normal conditions. |               |      |      |      |        |                 |               |      |      |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|------|------|------|--------|-----------------|---------------|------|------|--|
| $U_{peak}$ [kV]                                                                         | diameter [cm] |      |      |      |        | $U_{peak}$ [kV] | diameter [cm] |      |      |  |
|                                                                                         | 2.5           | 5    | 10   | 25   | needle |                 | 50            | 75   | 100  |  |
| 5                                                                                       | 0.13          | 0.15 | 0.15 | 0.16 | 0.42   | 140             | 5.15          |      |      |  |
| 10                                                                                      | 0.27          | 0.29 | 0.30 | 0.32 | 0.85   | 160             | 5.95          |      |      |  |
| 15                                                                                      | 0.42          | 0.44 | 0.46 | 0.48 | 1.30   | 200             | 7.60          | 7.50 |      |  |
| 20                                                                                      | 0.58          | 0.60 | 0.62 | 0.64 | 1.75   | 240             | 9.20          | 9.10 |      |  |
| 25                                                                                      | 0.76          | 0.77 | 0.78 | 0.81 | 2.20   | 250             |               |      | 9.55 |  |
| 30                                                                                      | 0.95          | 0.94 | 0.95 | 0.98 | 2.69   | 260             | 10.0          | 9.95 |      |  |
| 35                                                                                      | 1.17          | 1.12 | 1.12 | 1.15 | 2.69   | 300             | 11.8          | 11.6 | 11.5 |  |
| 40                                                                                      | 1.41          | 1.30 | 1.29 | 1.32 | 3.81   | 340             | 13.7          | 13.2 |      |  |
| 45                                                                                      | 1.68          | 1.50 | 1.47 | 1.49 | 4.49   | 350             |               |      | 13.5 |  |
| 50                                                                                      | 2.00          | 1.71 | 1.65 | 1.66 | 5.20   | 360             | 14.7          | 14.1 |      |  |
| 60                                                                                      | 2.82          | 2.17 | 2.02 | 2.01 | 6.81   | 400             | 16.8          | 15.9 | 15.5 |  |
| 70                                                                                      | 4.05          | 2.68 | 2.42 | 2.37 | 8.81   | 440             | 19.2          | 17.9 |      |  |
| 80                                                                                      |               | 3.26 | 2.84 | 2.74 | 11.1   | 450             |               |      | 17.7 |  |
| 90                                                                                      |               | 3.94 | 3.28 | 3.11 | 13.3   | 460             | 20.6          | 18.9 |      |  |
| 100                                                                                     |               | 4.77 | 3.75 | 3.49 | 15.5   | 500             | 23.6          | 20.9 | 19.9 |  |
| 110                                                                                     |               | 5.79 | 4.25 | 3.88 | 17.7   | 540             | 26.8          | 23.1 |      |  |
| 120                                                                                     |               | 7.07 | 4.78 | 4.28 | 19.8   | 550             |               |      | 22.2 |  |
| 130                                                                                     |               |      | 5.35 | 4.69 | 22.0   | 560             | 28.5          | 24.2 |      |  |
| 140                                                                                     |               |      | 5.97 | 5.10 | 24.1   | 600             | 33.0          | 26.7 | 24.7 |  |
| 150                                                                                     |               |      | 6.64 | 5.52 | 26.1   | 640             |               | 29.3 |      |  |
| 160                                                                                     |               |      | 7.37 | 5.95 | 28.1   | 650             |               |      | 27.3 |  |
| 170                                                                                     |               |      | 8.16 | 6.39 | 30.1   | 660             |               | 30.5 |      |  |
| 180                                                                                     |               |      | 9.03 | 6.84 | 32.0   | 700             |               | 33.4 | 30.0 |  |
| 190                                                                                     |               |      | 10.0 | 7.30 | 33.9   | 740             |               | 36.8 |      |  |
| 200                                                                                     |               |      | 11.1 | 7.76 | 35.7   | 750             |               |      | 32.8 |  |
| 210                                                                                     |               |      | 12.3 | 8.24 | 37.6   | 760             |               | 38.5 |      |  |
| 220                                                                                     |               |      | 13.7 | 8.73 | 39.5   | 800             |               | 42.2 | 36.0 |  |
| 230                                                                                     |               |      | 15.3 | 9.24 | 41.4   | 840             |               | 46.5 |      |  |
| 240                                                                                     |               |      |      | 9.76 | 43.4   | 850             |               |      | 39.3 |  |
| 250                                                                                     |               |      |      | 10.3 | 45.2   | 860             |               | 49.0 |      |  |
| 300                                                                                     |               |      |      | 13.3 | 54.7   | 900             |               | 53.7 | 43.0 |  |

©Jochen Kronjäger www.kronjaeger.com

Σχήμα 76 Ο πίνακας του μέγιστου τόξου σε συνάρτηση με διάμετρο των σφαιρών

Μπορούμε να γίνουμε και πιο ακριβής χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$V = \frac{2 * d * E}{\frac{d}{r} + \sqrt{(\frac{d}{r})^2 + 4}}$$

Όπου:

d είναι το μήκος του σπινθήρα

r είναι η ακτίνα της σφαίρας

το E μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$E = 27,2 * \delta (1 + \frac{0,54}{\sqrt{\delta * r}})$$

ενώ το δ που ονομάζεται συντελεστής διόρθωσης, εξαρτάται από την θερμοκρασία και την πίεση και δίνεται από τον τύπο:

$$\delta = \frac{293\rho}{760(T + 273)}$$

[49]

Εμείς πραγματοποιήσαμε την μέτρηση για πίεση μία ατμόσφαιρα, οπότε έχουμε  $\rho = 1 \text{ atm} = 760 \text{ torr}$ .

Μετρήσαμε την θερμοκρασία στο εργαστήριο την ημέρα της μέτρησης και έχουμε  $T = 23^\circ\text{C}$ .

Στη συνέχεια λειτουργήσαμε την γεννήτρια ώστε να μετρήσουμε το μήκος του σπινθήρα και λάβαμε την τιμή των 3,5cm. Στη συνέχεια πραγματοποιήσαμε το πείραμα άλλες δύο φορές ώστε να βγάλουμε το μέσο όρο, ο οποίος είναι

Έτσι με τις τιμές του μήκους του σπινθήρα μπορούμε να υπολογίσουμε τον συντελεστή διόρθωσης δ:

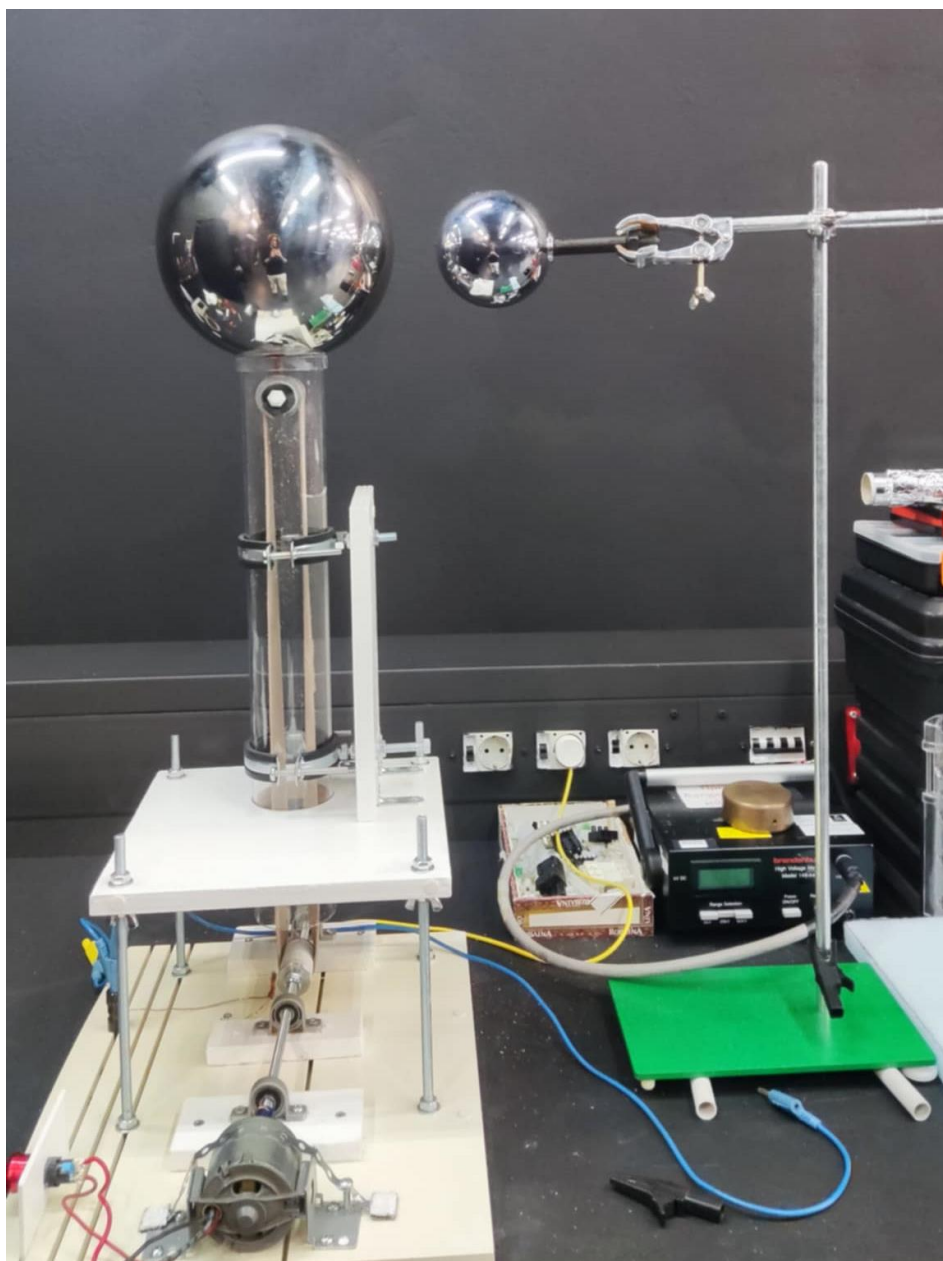
$$\delta = \frac{293 * 760}{760(23 + 273)} = 0,99$$

Και έτσι το E υπολογίζεται ως εξής:

$$E = 27,2 * 0,99 (1 + \frac{0,54}{\sqrt{0,99 * 10}}) = 31,55$$

Άρα καταλήγουμε στην τάση:

$$V = \frac{2 * 3,5 * 31,55}{\frac{3,5}{10} + \sqrt{(\frac{3,5}{10})^2 + 4}} = \frac{220,85}{4,7} = 47kV$$



Σχήμα 77 Πραγματοποίηση μέτρησης με sphere gap method

## Κεφάλαιο 5: Συμπεράσματα

### 5.1 Σύνοψη συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε ο τρόπος λειτουργίας μιας γεννήτριας Van de Graaff. Παράλληλα παρουσιάστηκαν αναλυτικά όλα τα μηχανικά και ηλεκτρολογικά της μέρη και τέλος δείξαμε τον τρόπο με τον οποίο κατασκευάσαμε την δικιά μας γεννήτρια. Ζητούμενο ήταν να σχεδιάσουμε και να κατασκευάσουμε μία γεννήτρια λειτουργική και ασφαλής στη χρήση. Το αποτέλεσμα ήταν η γεννήτριά μας να δουλεύει απροβλημάτιστα και να παράγει τάση άνω των 20kV, το οποίο την καθιστά και ασφαλή στα όποια πειράματα θέλουμε να διεξάγουμε.

### 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Ολοκληρώνοντας θα ήθελα να προτείνω κάποιους στόχους για μελλοντική ανάπτυξη της παρούσας γεννήτριας Van de Graaff. Μπορούν να μελετηθούν τρόποι οι οποίοι θα αυξήσουν την τάση που παράγει η γεννήτρια, όπως παραδείγματος χάρη να χρησιμοποιθούν διαφορετικά υλικά στον ιμάντα και τους κυλίνδρους ή η προσθήκη μίας διάταξης που θα δίνει φορτίο στην γεννήτρια. Επίσης προτείνεται η χρήση της γεννήτριας για διεξαγωγή διαφόρων πειραμάτων, τα οποία θα αναδείξουν τα φαινόμενα του στατικού ηλεκτρισμού και των υψηλών τάσεων.

## Βιβλιογραφία

[1] Wikipedia contributors, *Electrostatic generator*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrostatic_generator)

[2] Mičo GAĆANOVIĆ, " *ELECTROSTATIC APPLICATION PRINCIPLES*," International PhD Seminar on Computational electromagnetics and optimization in electrical engineering, Sofia, Bulgaria, 2010

[3] Wikipedia contributors, *Ηλεκτρισμός*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82>

[4] Just energy Blog, *The History of Electricity (and the Future of Electric Power)*, [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://justenergy.com/blog/history-of-electricity-electric-power/>

[5] Encyclopedia Britannica [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.britannica.com/>

[6] Wikipedia contributors, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.wikipedia.org/>

[7] Corrosion Doctors org [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.corrosion-doctors.org/Biographies/GuerickeBio.htm>

[8] Wikipedia contributors, *Γουίλιαμ Γκίλμπερτ (αστρονόμος)*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%BF%CF%85%CE%AF%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BC\\_%CE%93%CE%BA%CE%AF%CE%BB%CE%BC%CF](https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%93%CE%BF%CF%85%CE%AF%CE%BB%CE%B9%CE%B1%CE%BC_%CE%93%CE%BA%CE%AF%CE%BB%CE%BC%CF)

[%80%CE%B5%CF%81%CF%84 \(%CE%B1%CF%83%CF%84%CF%81%CE%BF%CE%BD%CF%8C%CE%BC%CE%BF%CF%82\)](#)

[9] Wikipedia contributors, *Electroscope*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://en.wikipedia.org/wiki/Electroscope>

[10] Tech Age Kids | Technology for Children [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.techagekids.com/2017/05/william-gilbert-facts-resources-kids.html>

[11] The University of Chicago Press Journals [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/350425?journalCode=isis>

[12] LINDA HALL LIBRARY, Scientist of the Day Johann Winkler, MARCH 12, 2021 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/johann-winkler/>

[13] Wikipedia contributors, *Ewald Georg von Kleist*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Ewald\\_Georg\\_von\\_Kleist](https://en.wikipedia.org/wiki/Ewald_Georg_von_Kleist)

[14] Wikipedia contributors, *Pieter van Musschenbroek*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Pieter\\_van\\_Musschenbroek](https://en.wikipedia.org/wiki/Pieter_van_Musschenbroek)

[15] Wikipedia contributors, *Leyden jar*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden\\_jar](https://en.wikipedia.org/wiki/Leyden_jar)

[16] LINDA HALL LIBRARY, Scientist of the Day William Watson, APRIL 3, 2017 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.lindahall.org/about/news/scientist-of-the-day/william-watson/>

[17] Wikipedia contributors, *Andrew Gordon (Benedictine)*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Andrew\\_Gordon\\_\(Benedictine\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Andrew_Gordon_(Benedictine))

[18] Forrester Rochelle, History of Electricity, (November 10, 2016). Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://ssrn.com/abstract=2876929> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2876929>

[19] Encyclopedia Britannica, Benjamin Franklin [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.britannica.com/biography/Benjamin-Franklin>

[20] Europa-Universität Flensburg, Electricity, Coulomb's Torsion Balance [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.uni-flensburg.de?id=16720&L=2>

[21] van MARUM, Martinus, *Description d'une tres Grande Machine Electrique*, Haarlem: Enschede and van Waire, 1785, 1787. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://www.people.vcu.edu/~mjmurphy/history\\_of\\_science/marum/marum.html](https://www.people.vcu.edu/~mjmurphy/history_of_science/marum/marum.html)

[22] Wikipedia contributors, *Edward Nairne*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Edward\\_Nairne](https://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Nairne)

[23] Wikipedia contributors, *Macchina di Winter*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://it.wikipedia.org/wiki/Macchina\\_di\\_Winter](https://it.wikipedia.org/wiki/Macchina_di_Winter)

[24] Wikimedia commons [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrical\\_Nicholson%27s\\_doubler\\_II.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electrical_Nicholson%27s_doubler_II.jpg)

[25] Wikipedia contributors, *Georg Ohm*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Georg\\_Ohm](https://en.wikipedia.org/wiki/Georg_Ohm)

[26] Wikimedia commons [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Belli%27s\\_doubler\\_with\\_Henley\\_electrometer\\_and\\_Leyden\\_jar.webm](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Belli%27s_doubler_with_Henley_electrometer_and_Leyden_jar.webm)

[27] Newcastle University, Northern Innovation, William George Armstrong [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://research.ncl.ac.uk/northerninnovation/exhibits/williamgeorgearmstrong/>

[28] Wikipedia contributors, *Wilhelm Holtz*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm\\_Holtz](https://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Holtz)

[29] Wikipedia contributors, *August Toepler*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/August\\_Toepler](https://en.wikipedia.org/wiki/August_Toepler)

[30] On Electric Machines Founded on Induction and Convection, By Sir William Thomson (Lord Kelvin), *Philosophical Magazine*, January 1868. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://zapatopi.net/kelvin/papers/on\\_electric\\_machines.html](https://zapatopi.net/kelvin/papers/on_electric_machines.html)

[31] Museo Galileo – Kundt and Cantoni electrical machine [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://catalogue.museogalileo.it/object/KundtCantoniElectricalMachine.html>

[32] Wikimedia commons [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carre\\_machine1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Carre_machine1.jpg)

[33] Wikipedia contributors, *Augusto Righi*, *Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://en.wikipedia.org/wiki/Augusto\\_Righi](https://en.wikipedia.org/wiki/Augusto_Righi)

[34] IEEE Spectrum, *James Wimshurst's Electrostatic Immortality Little is known about the man, but his iconic generators live on*, by Allison Marsh, 2023 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://spectrum.ieee.org/wimshurst-machine>

[35] W R Pidgeon 1897 *Proc. Phys. Soc. London* 16 253. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1478-7814/16/1/330>

[36] F. A. Furfari, "A history of the Van de Graaff generator," in IEEE Industry Applications Magazine, vol. 11, no. 1, pp. 10-14, Jan.-Feb. 2005, doi: 10.1109/MIA.2005.1380320.

keywords:

{History;Belts;Acceleration;Physics;Pulleys;Voltage;Electrostatics;Electrodes;Electron tubes}. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1380320>

[37] Encyclopedia of Alabama, *Robert Van de Graaff*, written by Robert B. Kane, Published October 6, 2016 [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://encyclopediaofalabama.org/article/robert-van-de-graaff/>

[38] MIT museum, *Van de Graaff, Robert Jemison*, [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://mitmuseum.mit.edu/collections/person/12402>

[39] Λ. Οικονόμου, Γ. Φώτης, Χ. Χριστοδούλου, *ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ, 3<sup>η</sup> Έκδοση*, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΤΖΙΟΛΑ, Θεσσαλονίκη, 2020

[40] Εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Τομέας Υψηλών Τάσεων, ΣΗΜΜΥ ΕΜΠ, pdf Παραγωγή Υψηλών Τάσεων, Αθήνα, 2023

[41] How stuff works [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://science.howstuffworks.com/transport/engines-equipment/vdg1.htm>

[42] Flinn scientific, *Van de Graaff Generator Safety*. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.flinnsci.com/api/library/Download/55117bbd809b4730a34e5c3c2335fc31>

[43] Steward physics, Lindsey Rasmussen, The Van de Graaff Generator, Lab: H001, UAID: 010582409. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.stewartphysics.com/honors/honorsspr12/lindsey-rasmussen.pdf>

[44] Ö. Kalenderli, "Construction of a Van de Graaff generator which is charging with triboelectric," *2016 National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering (ELECO)*, Bursa, Turkey, 2016, pp. 354-358.

keywords: {Generators;Education;Metals}, Authorized licensed use limited to: National Technical University of Athens (NTUA). Downloaded on May 30,2023

[45] Sithara Radhakrishnan, Sherin Joseph, E.J. Jelmy, K.J. Saji, T. Sanathanakrishnan, Honey John, Triboelectric nanogenerators for marine energy harvesting and sensing applications, Results in Engineering, Volume 15, 2022, 100487, ISSN 2590-1230. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022001578>

[46] Institute of Physics (IOP), *Van de Graaff generator safety*, [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://spark.iop.org/van-de-graaff-generator-safety>

[47] Robert Jemison Van de Graaff. (February 12, 1935). *ELECTROSTATIC GENERATOR* (Patent No. 1,991,236). UNITED STATES PATENT OFFICE. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://patents.google.com/patent/US1991236A/en>

[48] Jochen's High Voltage Page, *Measuring high voltages by spark length* [Online]. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

<https://www.kronjaeger.com/hv/hv/msr/spk/>

[49] Jaitu, Aditya & Iohar, Amish & Patil, Sumit & Mokal, Vaishnavi & Kasar, Nikhil. (2020). Design and Implementation of Van de Graaff Generator. International Journal of Innovative Science and Research Technology. 5. 10.38124/IJISRT20SEP274. Διαθέσιμο στον ιστότοπο:

[https://www.researchgate.net/publication/345211314\\_Design\\_and\\_Implementation\\_of\\_Van\\_de\\_Graaff\\_Generator](https://www.researchgate.net/publication/345211314_Design_and_Implementation_of_Van_de_Graaff_Generator)

[50] Moore, A. D. (1973). *Electrostatics and Its Applications*. John Wiley & Sons

[51] Pan, S., Zhang, Z. Fundamental theories and basic principles of triboelectric effect: A review. *Friction* 7, 2–17 (2019). Διαθέσιμο στον ιστότοπο: <https://doi.org/10.1007/s40544-018-0217-7>



# Παράρτημα Α' - Η Πατέντα

Feb. 12, 1935.

R. J. VAN DE GRAAFF

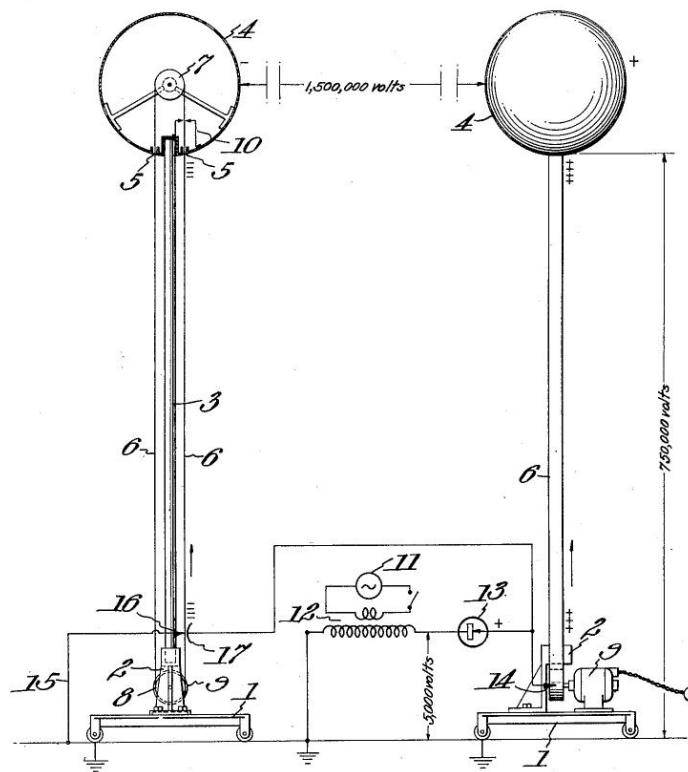
1,991,236

ELECTROSTATIC GENERATOR

Filed Dec. 16, 1931

4 Sheets-Sheet 1

*Fig. 1.*



Inventor:

Robert J. Van de Graaff,  
By *Byrnes, Dornand & Potter,*  
Attorneys.

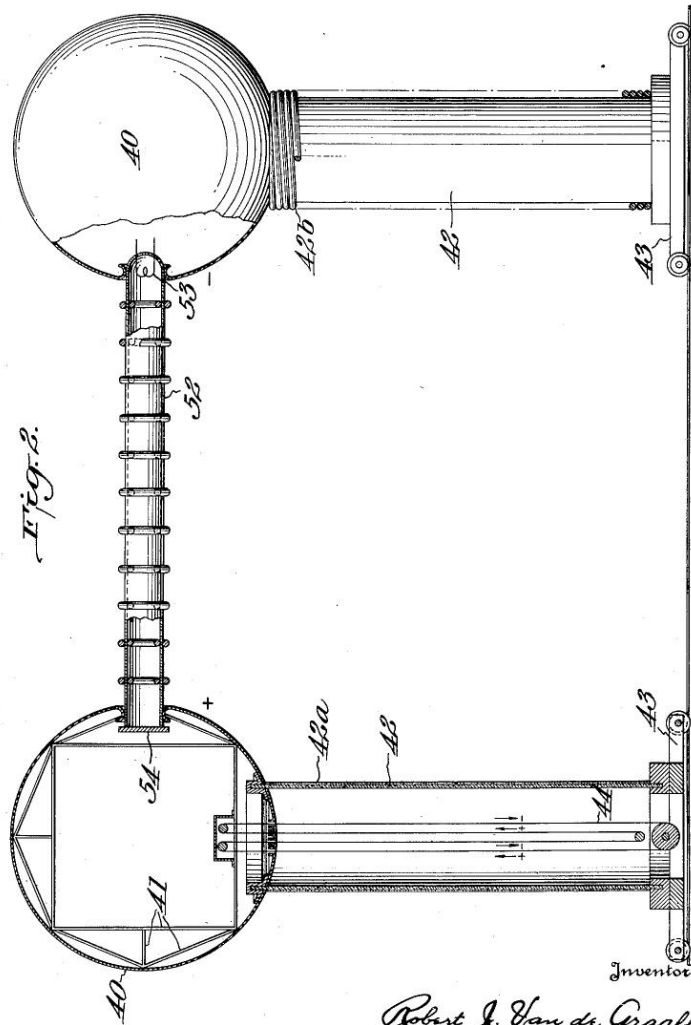
Feb. 12, 1935.

R. J. VAN DE GRAAFF  
ELECTROSTATIC GENERATOR

1,991,236

Filed Dec. 16, 1931

4 Sheets-Sheet 2



Inventor:

Robert J. Van de Graaff,  
By *Byrnes, Townsend & Potter*,  
Attorneys.

Feb. 12, 1935.

R. J. VAN DE GRAAFF

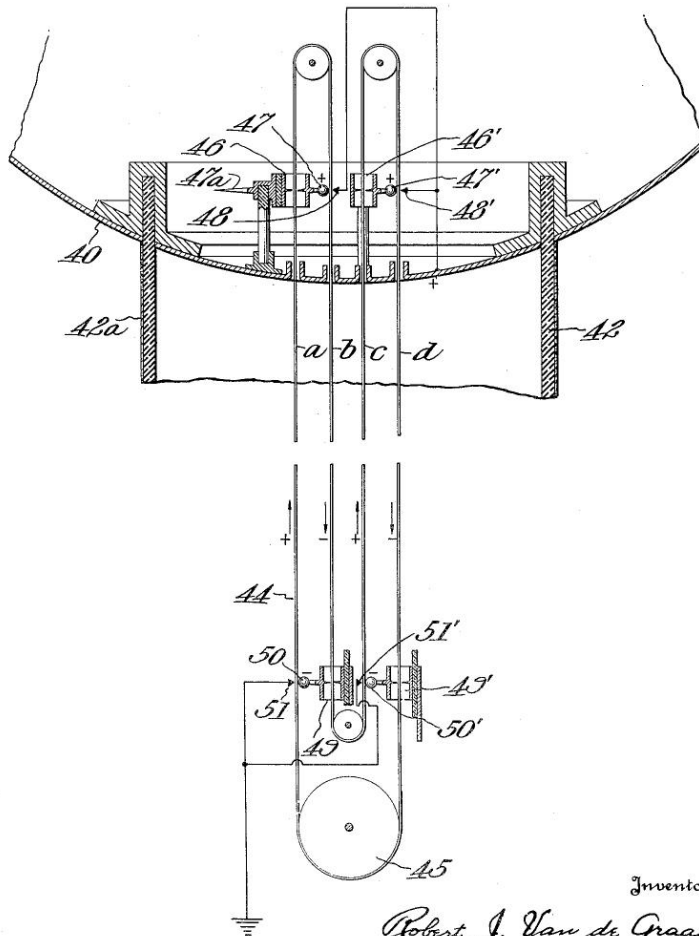
1,991,236

ELECTROSTATIC GENERATOR

Filed Dec. 16, 1931

4 Sheets-Sheet 3

*Fig. 3.*



Inventor:

*Robert J. Van de Graaff*  
By *Byrnes, Downmond & Potter*,  
Attorneys.

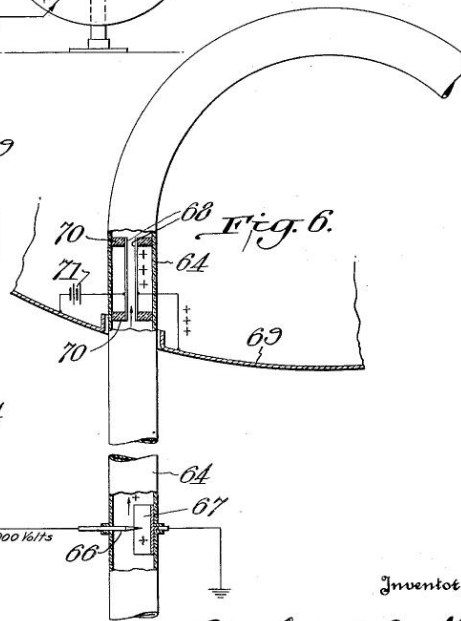
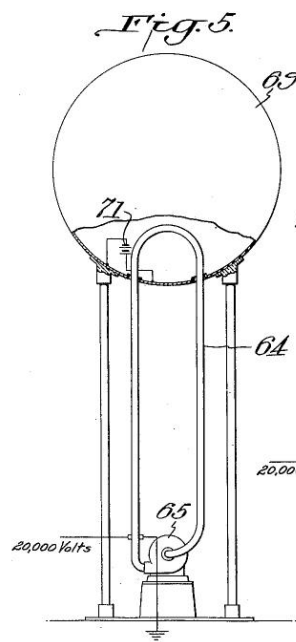
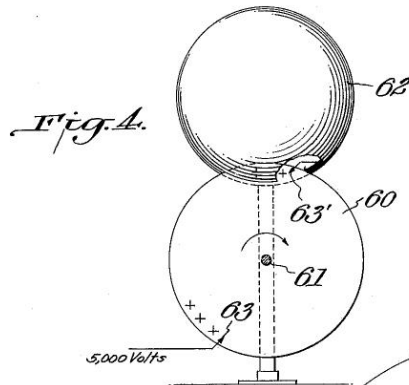
Feb. 12, 1935.

R. J. VAN DE GRAAFF  
ELECTROSTATIC GENERATOR

1,991,236

Filed Dec. 16, 1931

4 Sheets-Sheet 4



Inventor:

Robert J. Van de Graaff,

By *Byrne Darnwood & Potter*,  
Attorneys.

## UNITED STATES PATENT OFFICE

1,991,236

## ELECTROSTATIC GENERATOR

Robert J. Van de Graaff, Cambridge, Mass., assignor to Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., a corporation of Massachusetts

Application December 16, 1931, Serial No. 581,499

53 Claims. (Cl. 171—329)

This invention relates to electrostatic generators for the production of direct current voltages, and also to apparatus including an electrostatic generator and the electrical device, such as an X-ray tube, operated thereby.

Influence machines of the general types designed by Holtz and Wimshurst have been employed in the production of direct current potentials, but the output voltages have been restricted to relatively low values. The presence of the conducting wires or bodies required to transfer the electrical charges from the rotating disks to the generator terminals facilitates leakage and limits the maximum voltage that may be established between the generator terminals.

Higher potentials may be obtained by the rectification of alternating current but apparatus of this type is quite costly and, as with influence machines, the maximum available voltage is limited. So far as I am aware, the maximum steady direct current voltage attained by prior workers in this art was about 700,000 volts, and was obtained by the rectification of alternating current.

An object of this invention is to provide an electrostatic generator which will produce steady, direct current voltages of an order substantially higher than any previously obtained by influence machines and/or the rectification of alternating current. An object is to provide a generator in which the electrical charges are established directly upon the electrodes or terminals, as distinguished from prior influence machines in which the charges were collected upon a system of conductors leading to the electrodes. A further object is to provide an electrostatic generator having electrodes in the form of hollow bodies, and non-conducting charge carriers which transfer charges between the interior of the hollow electrodes and a grounded point. More specifically, an object is to provide an electrostatic generator including two hollow electrodes supported on insulator columns, and a charge carrier for each electrode, the charge carriers having the form of silk belts passing over pulleys within the electrodes and driven by motors located at the base of the insulator columns. Other specific objects relate to the provision of high voltage apparatus combining generators of the types stated with the high potential electrical apparatus to be energized thereby.

These and other objects of the invention will be apparent from the following specification

when taken with the accompanying drawings, in which,

Fig. 1 is a side elevation, with parts in section, of one embodiment of the invention.

Fig. 2 is a side elevation of a combined generator and X-ray tube installation, the generator being adapted to produce potentials of the order of several million volts,

Fig. 3 is a diagrammatic view of the charge transferring system of the generator shown in Fig. 2.

Fig. 4 is a side elevation, with parts in section, showing a unit having a charge carrier of disk form,

Fig. 5 is a somewhat diagrammatic fragmentary side elevation, with parts in section, of a unit having a fluid charge carrier, and

Fig. 6 is an enlarged fragmentary view of the carrier system of Fig. 5.

Two substantially identical units are shown in Fig. 1, the units being turned at right angles to each other for the better illustration of the structural details at the base of the units. Each unit includes a wheeled supporting base 1 to which is secured a bracket 2 that carries an insulator column 3. The insulators 3 may be, and preferably are, glass rods of a height sufficient to provide adequate insulation between the grounded base 1 and hollow electrodes 4 that are mounted on the rods 3. The exterior surfaces of the electrodes 4 are free from projections or points which would promote leakage and, in general, will be of spherical form.

The lower portion of each electrode is provided with slots 5 for passage of a non-conducting belt 6 that passes over a pulley 7 mounted within the electrodes 4 and a conducting pulley 8 that is located at and driven by a motor 9 on the base 1. The belt 6 is non-conducting and may be silk or a fabric treated with a non-conducting flexible plastic, such as a cellulose ester. Interposed between the two runs of each belt is a solid insulating medium, herein of glass, and comprising the glass rod 3. Within the electrode, brushes or combs 10 are provided adjacent the belt 6, the brushes being electrically connected to the interior of the electrode.

The belts 6 constitute the charge carriers which transfer to the electrodes the electrical charges which are established at the lower ends of the belts. The apparatus for charging the belts is shown diagrammatically in Fig. 1, as an alternating current source 11, a transformer 12, and a rectifier 13 in the secondary circuit of the transformer. The terminal of the secondary which is

negative, during cycles when rectifier 13 is conductive is connected to ground and the positive terminal of rectifier 13 is connected to a brush electrode 14 adjacent the portion of the upward run of belt 6 where it engages the lower pulley of the positive electrode unit. At the negative electrode unit, a conductor 15 extends from ground to a brush electrode 16 that is adjacent the lower portion of the upward run of the belt and directly opposite the rounded electrode 17 that is connected to the positive terminal of the rectifier 13. The electrical charges placed on the belts by this low voltage circuit are indicated by the + and - signs adjacent the belts.

It will be apparent that, as each charged belt passes by the brushes 10, the charge passes from the belt to the brush, and thence to the interior surface of the electrode 4. As charges can not remain upon the interior surface of a hollow body, the electrical charges pass to the exterior surfaces of the electrodes. The fact that charges will not accumulate at the interior surface makes it possible to increase the charge or voltage on the electrodes 4 to a value determined only by the form and location of the electrodes. The maximum voltage that may be established between electrodes 4 is limited by the sharpest maximum curvature of the electrode surfaces, and by the spacing of the electrodes from each other and from ground, i. e., from the conducting brackets 2 which carry the rod insulators 3.

The legends applied to Fig. 1 indicate the voltages obtained with one particular generator in which the electrodes 4 were twenty-four inch spheres mounted on seven foot glass rods. With spherical electrodes of this size, leakage from the electrode restricts the maximum voltage on the electrode to about 750,000 volts, thus limiting the voltage between the oppositely charged electrodes to about 1,500,000 volts. The belts 6 were of silk and the rectifier charging system established a relatively low voltage of about 5,000 volts between each brush and its corresponding rounded terminal.

This external source of relatively low voltage for charging the belt is illustrated in the drawings to facilitate a more ready understanding of the method of operation of the device but it will be understood that the machines may be made self-exciting, in which case they may be primed by small stray charges generated by friction or otherwise. Furthermore, it will be apparent that each unit can be made to operate as a motor if a high potential difference is established between the electrode 4 and its grounded base. For example by moving the units to bring the electrodes 4 into contact, and operating the motor 9 of one unit to establish a high potential upon the electrodes, the belt 6 of the other unit will be driven as the electrical charges move upwardly from the grounded base to neutralize the charge established in that unit.

A little consideration of the described apparatus will show that, by decreasing the curvature of the electrode surfaces and increasing the insulation between each electrode and ground, higher voltages may be obtained. The absence of conducting paths between the electrodes, and the transfer of charges to the interior surfaces of the electrodes make it possible to increase the voltages to values of an order not obtainable with any known type of direct current generator.

A generator system operative to produce voltages of the order of several million volts is illustrated in Fig. 2. For convenience of description,

it will be assumed that a maximum voltage of about 10,000,000 volts is to be produced between the spherical electrodes 40, i. e., a potential difference of about 5,000,000 volts between each electrode and ground. The electrodes take the form of a thin conducting shell 40 that is supported by an interior framework 41, the conducting shell being free from surface irregularities or projections and having a diameter of about 10 feet. The insulator columns 42 which support the electrodes 40 on the movable bases 43 may be tubular sleeves of non-conducting material, for example, paper or wood veneer impregnated with shellac or an artificial resin. Adequate insulation will be provided when the insulator columns have a length of about fifteen feet.

To insure most efficient operation it is highly desirable to maintain a uniform potential gradient between the electrode and ground along the supporting column 42. This condition will obtain when the insulating support presents high conductivity in horizontal planes and a controlled resistance in vertical planes along the column. By providing a conductive coating upon the surface of the column, the coating being of substantially constant but relatively low conductivity, the leakage flow of current will establish a uniform potential gradient along the column and, since the potential will be substantially constant over any horizontal plane, the lines of force in the space within the column will be substantially linear and parallel to the axis of the column. This leakage coating may take the form of a paint or varnish layer 42\*, of low conductivity, as shown in Fig. 3 and at the left of Fig. 2, or it may comprise a cord or thread 42<sup>b</sup> that is rendered slightly conductive by treatment with graphite or India ink, and is wound spirally around the column 42, as shown at the right of Fig. 2.

The gradual potential gradient down the insulating column tends likewise to produce a lowering of the electric field at points on the spherical electrode adjacent the entering portion of the column 42, thus resulting in the location of the most concentrated electric field at a region of the electrode remote from the supporting column.

The charge conveyor system may be of the type previously described but, as illustrated, includes a more efficient arrangement in which the carrier belt 44 is doubled back to provide a plurality of upward runs. The current carrying capacity of such a belt is, for a given belt width, equivalent to that of two simple belts of the type shown in Fig. 1. This method of increasing the current output may be carried further by doubling the charge carrier back and forth to provide additional sections of one upward and one downward run. The current output may also be increased by the use of wider charge carriers or higher carrier speeds.

The collector brushes within the electrodes 40 are insulated from the electrode and the potential difference between the brush and electrode is employed to place on the belt, just before it leaves the hollow electrode, a charge of opposite sign to that brought to the electrode by the belt. The belt does double duty by not only bringing to the electrode charges of one sign but also by carrying away charges of the opposite sign.

As best shown in the diagrammatic view, Fig. 3, the upward run *a* of belt 44 passes through a sleeve or brush electrode 46 that is supported within but insulated from the hollow electrode. The brush electrode 46 is connected to a rounded terminal

47 that is positioned adjacent the downward run *b* of the belt and opposite a brush or comb electrode 48. A similar arrangement of a brush electrode 46', rounded terminal 47' and brush 48' is provided for the runs *c* and *d* of the other section of the belt. The brush electrodes 48, 48' are connected to each other and to the interior of the electrode 40. At the lower end of the belt, brush electrodes 49, 49' are positioned adjacent the runs *b* and *d*, respectively, of the belt and are connected to rounded terminals 50, 50' adjacent the corresponding upward runs. Brush electrodes 51, 51' are positioned at the opposite faces of the upward runs for cooperation with the rounded terminals, the brushes 51, 51' being connected to each other and to ground.

If the electrode 40 is to be given a positive charge, the upward runs *a* and *c* of the belt 44 carry positive charges to the interior of the electrode. These charges are removed from the belt by the brush electrodes 46, 46', thus placing positive charges on the rounded terminals 47, 47'. The difference of potential thus established between these rounded terminals and the brush electrodes 48, 48' causes a corona or brush discharge from the electrodes 48, 48' thus liberating negative charges that are drawn toward the rounded terminals and, being intercepted by the non-conducting belt 44, some or all of these negative charges are carried away by the departing run of the belt. Obviously, this withdrawal of negative charges from the spherical electrode 40 has the effect of increasing the positive potential of that electrode with respect to ground. At the lower portion of the belt, a similar action places positive charges on the upward runs *a*, *c*, respectively.

In the event that the corona discharge from brushes 48, 48' does not fully neutralize the positive charges arriving on the terminals 46, 46' from the belt, the potential difference between the interior or neutral surface of the spherical electrode 40 and the brush electrodes 46, 46' will tend to increase. Pointed electrodes 47<sup>a</sup> extend from the brush electrodes 46, 46' toward the interior of the shell and, by corona discharge, limit the maximum potential difference which may be established between the brush electrodes 46, 46' and the spherical electrode. The discharge from positively charged electrodes 47<sup>a</sup> to the interior of the electrode 40 will increase the positive charge on the hollow electrode 40.

These conditions will be best understood if it is kept in mind that the pointed or brush terminal constitutes a terminal having, at the region of its pointed end, a high potential gradient as compared with the potential gradient at the surface of its complementary, relatively rounded terminal. This creates an electric field between the two terminals sufficiently intense to ionize the air with the liberation of free positive and negative charges or ions. By far the greater number of free charges are liberated in the immediate vicinity of the pointed terminal where the potential gradient is highest,—the so-called corona discharge emanated from the point being evidence of their presence. This causes the passage or migration of ions of one sign from the pointed terminal toward the rounded terminal.

If the pointed terminal is negative with respect to the opposing rounded terminal, the free negative charges in the vicinity of the point will be repulsed and driven toward the rounded terminal to be intercepted by the belt. If the pointed terminal is positive it will propel the free posi-

tive charges toward the opposing terminal and the belt will collect positive charges. The charges thus become "sprayed", as it were, on the belt from the pointed or brush terminal due to the ionized condition of the air and to the electric forces of the field.

In the embodiment of the invention shown in Fig. 3, the voltage across the terminal is built up by the structures holding the rounded terminals receiving and accumulating the charges which are initially placed upon the belt by friction or from any external source. Due to the friction of the moving belt on the pulley, for example, a small initial charge may be applied to the belt. This will result in the cumulative separation of positive and negative electricity by induction, thus charging the rounded terminals and priming the machine. When the voltage across the terminal gaps is sufficient to cause ionization adjacent the pointed terminal, the apparatus functions in a very definite manner and begins to operate as self-exciting and at full power.

In Fig. 1, however, a strong uni-directional field is impressed across the lower ionization terminals from a source of sustained voltage independent of the belt and pulley and comprising the transformer and rectifier. With excitation supplied in this manner, the apparatus builds up very quickly on the hollow sphere a high voltage charge of a certain and predetermined sign.

The belt is initially primed either by friction or by some other source of small charges. It will be apparent that, after placing an initial small charge on the belt, the apparatus is self-exciting and will rapidly build up to its maximum output.

The high potential difference under which the two electrode units are charged may be utilized to supply direct current or, in fact, continuous current power where desirable to a high voltage, power-consuming device, operatively related to the electrode units, and herein shown as extending between and supported by the electrodes 40, the transmission of power taking place from one generator to the other through this connecting link which thus becomes a power transmission element or line. As an example of such a device, there is shown in Fig. 2 an X-ray tube comprising a glass cylinder 52 having a cathode 53 comprising a filament sealed in one end of the cylinder and having a metal target 54 secured across the opposite end of the cylinder. In the case of a hot filament as shown, emitting electrons, and in the event that the vacuum is high, the power would be transmitted by electrons only. On the other hand, of course, ions of both signs could take part. The ends of the tube extend through openings formed in the surface of the hollow cylinder. The bounding edges of these openings through which the tube enters are provided with a rounded, re-entrant contour to prevent corona discharge thereat. The operators work within the hollow electrodes, suitable doors (not shown) being provided to permit access to the interior of these operating rooms. When closed, the door should continue the continuity of the smooth exterior surface of the electrode to avoid the corona discharge which would take place from sharp edges. The operators are thus fully protected from the high potentials since no charge exists on the interior wall of the electrodes. This is a matter of great convenience as it enables the operator to work in contact with the electrode and avoids the use of external conductors. This feature is particularly important as

it would be quite difficult to design conductors for transferring current between the electrodes and an electrical device spaced an appreciable distance from them. If the operator were outside of the electrode, it would be impossible for him to approach within several feet of the charged electrodes.

As shown in Fig. 4, the charge carrier takes the form of a disk 60 of paper, impregnated fabric or other insulating material which is mounted on and rotated by an insulating rod or shaft 61. The upper portion of the disk passes into the hollow electrode 62 through a narrow slit and the charges to be transferred to the electrode are placed on the edge of the disk 60 by a corona discharge electrode 63 that is energized by a relatively low potential source of unidirectional current, which is indicated in Fig. 4 by the legend "5,000 volts", and these charges are removed from the disk by a brush or collector 63'.

As shown in Figs. 5 and 6, the charge carrier is a fluid medium, such as oil, circulated through the endless pipe line 64 by a pump 65. The fluid medium is charged, at the lower portion of the system, by a discharge point 66 which extends into the conduit 64 and terminates adjacent the larger and rounded electrode 67. Condenser plates 68 are arranged within a portion of the conduit 64 which lies within the hollow electrode 69, and washers or baffles 70 compel the moving column of oil to flow between the condenser plates. The condenser is charged by a current source of low voltage, such as a battery 71 of the low current drain type commonly used with vacuum tubes as a plate battery, the battery being connected between one condenser plate and the electrode 69, while the other plate is connected directly to the electrode.

With this arrangement, the moving column of a fluid non-conducting medium receives electrical charges as it passes the pointed electrode 66, and the charges are removed and transferred to the electrode as the medium passes between the condenser plates. If desired, the fluid medium may have fine particles suspended therein to act as the charge carriers, but this is not generally necessary as the charges may be applied directly to the non-conducting fluid. The fluid may be a liquid or a gas or vapor, or a mixture.

The use of conducting spots or zones on a belt or disk type of charge carrier operating in air is, contrary to the prior practice, to be avoided as it results in decreased efficiency due to the lessened effective surface for transferring charges and may materially reduce the maximum voltage that may be established on the electrode or terminal. This will be apparent since a conducting spot or zone on the charge carrier forms, at the instant that it enters the slot in the wall of the electrode, a relatively sharp edged extension of the electrode, thus promoting a corona or leakage discharge from the electrode.

The endless belt, say of the type illustrated in Fig. 1, may be driven by a blast of air, in which case the pulleys may be replaced by curved guide-channels, and the channels may be extended along substantially the full length of the belt as an enclosing housing and providing a passage-way along the looped belt for the air. The air is forced into the channel by suitable means and is circulated through the channel carrying the belt around with it.

The described apparatus are illustrative of the operating methods and of appropriate physical structures contemplated by the invention. It will

be apparent that other physical structures which may be designed fall within the scope of the invention as set forth in the following claims.

I claim:

1. In high voltage electrostatic apparatus, a pair of spaced apart electrodes, means constituting an insulating support for the respective electrodes, and endless non-conducting charge carriers for transferring charges between ground and the respective electrodes.

2. In high voltage electrostatic apparatus, a pair of mechanically independent and relatively movable units, each unit comprising an electrode, an insulating support for the electrode, an endless non-conducting charge carrier for transferring charges to the electrode, and means at the opposite end of said support for driving said charge carrier.

3. In high voltage electrostatic apparatus, the combination with a hollow electrode, and means for establishing a high direct current potential difference between said electrode and ground, of a high voltage power-consuming device exterior to said electrode and having one end thereof extending through the wall of said electrode.

4. In high voltage electrostatic apparatus, the combination with a pair of hollow electrodes and means for establishing high direct current potentials of opposite sign on the respective electrodes, of a high voltage power-consuming device extending between said electrodes and having the ends thereof structurally connected to the opposing walls of the respective electrodes.

5. In high voltage electrostatic apparatus, a conductive shell of rounded form constituting a hollow electrode and containing an interior operator's room to which access is provided, a column supporting said shell above ground and insulating said shell therefrom, an endless non-conducting charge carrier movable from a point within said shell to a point at the opposite end of said column.

6. The invention as set forth in claim 5, wherein an opening is provided in said shell midway the top and bottom thereof, in combination with a high voltage power-consuming device exterior to said room and having one end thereof connected to said opening in said shell.

7. In high voltage electrostatic apparatus, a pair of conductive shells and constituting each a hollow electrode containing an operator's room, insulating supporting columns for the respective shells, endless charge carriers for transferring charges to the respective shells to impart thereto electrical potentials of opposite sign, an elongated high voltage power-consuming device, and means supporting said device between said shells and with the opposite ends thereof projecting through said shells to the interior thereof.

8. The combination with a hollow electrode, a hollow insulating support for said electrode, and a charge carrier within said support for transferring charges between said electrode and ground, of means establishing a controlled potential gradient along said insulating support.

9. The invention as set forth in claim 8, wherein said support has the form of a cylinder and said means comprises a coating of a material on the wall of said cylinder having a receptivity relatively low as compared with that of said support.

10. The invention as set forth in claim 8, wherein said means comprises a low conductivity conductor wound on the wall of said support.

11. In an electrostatic machine, the combina-

tion of a body to be charged, said body being insulated from ground, an insulating charge conveyor, and means supporting said conveyor for movement along an endless path and with a plurality of spaced portions of said conveyor moving into and out of said body, and means for transferring electric charges between said body and each of said spaced portions of said conveyor.

12. In an electrostatic machine, the combination of a body to be charged, said body being insulated from ground, an insulating belt, means supporting said belt for movement along an endless path and with a plurality of spaced portions of said belt moving into and out of said body, and means for charging substantially the entire length of said belt to effect thereby a transfer of charges between the electrode body and points on said belt path spaced therefrom.

13. In an electrostatic machine, the combination of an electrode body insulated from ground, an insulating belt, and means supporting said belt for movement along an endless path and with a plurality of spaced portions of said belt moving into and out of said electrode, means for placing electrical charges on each of said spaced belt portions moving towards said electrode body, and means within the electrode body for transferring to said electrode body the electrical charges carried thereto by the said portions of the belt.

14. In an electrostatic machine, the combination of a hollow electrode body insulated from ground, an insulating conveyor, and means supporting said conveyor for movement along an endless path and with a plurality of spaced portions of said conveyor moving into and out of said electrode, means for placing charges upon that section of each of said spaced conveyor portions which moves towards and into said electrode body, and means for transferring charges of opposite sign from the electrode body to that section of each of said spaced conveyor portions which moves out of said electrode body.

15. In an electrostatic generator, a hollow electrode, an insulating support for the same, endless belt charging means including a plurality of pairs of complementary flights extending into the interior of said hollow electrode, means for driving said endless belt means, and electrode means spaced from said hollow electrode for placing electric charges upon the flights of said endless belt means.

16. The invention as set forth in claim 15, wherein said driving means moves adjacent flights of said belt in opposite directions, and said electrode means places upon a belt flight moving towards said hollow electrode an electric charge of the sign opposite to that of the adjacent belt flight which is moving away from said hollow electrode.

17. In an electrostatic machine, the combination with a hollow electrode, an insulating support for the same, and charge-transferring means within said hollow electrode, of endless belt means for conveying electrical charges to and from the interior of said hollow electrode, said belt means including a plurality of pairs of complementary belt flights passing into and out of said electrode, supporting means for said belt means and including a set of pulleys within and another set of pulleys spaced from said electrode, means for moving adjacent flights of said belt means in opposite directions and charge-transferring electrode means adjacent said belt means and spaced from said hollow electrode.

18. In an electrostatic apparatus, a pair of spaced hollow electrodes of rounded contour, columns supporting and insulating each electrode from ground, traveling means for carrying electric charges of one sign to and into one of said electrodes and charges of the opposite sign to and into the other of said electrodes, and means within each of said electrodes for transferring to the electrode the charges brought thereto by said traveling means.

19. In a high voltage apparatus, an electrode structure comprising a hollow shell with an operator's room contained therein, and means for electrostatically charging the shell.

20. In a high voltage electrostatic apparatus, the combination with an electrode, of a movable charge-carrying means for charging said electrode, an insulating connection between said electrode and a point having a high potential difference with relation to said electrode, and means for establishing a controlled potential gradient along said insulating connection.

21. In a high voltage electrostatic apparatus, the combination with a body to be charged, of an insulating support for the body, a movable charge-conveying medium having a path of movement entering the body in the vicinity of the connection of said support, and means for establishing a controlled potential gradient along said support.

22. An electrostatic machine having a body to be charged, a movable charge-conveying means, means establishing a plurality of paths for said conveying means, each path having an entry into and an exit from said body, and means for transferring electrical charges between said body and said conveying means.

23. The invention as set forth in claim 22, characterized by the fact that the means for transferring electrical charges serves to transfer electrical charges to said body from said conveying means at a plurality of the entering portions of said conveying means.

24. The invention as set forth in claim 22, in which the means for transferring electrical charges serves to transfer electrical charges from said body to said conveying means at a plurality of exit portions of said conveying means.

25. The invention as set forth in claim 22, characterized by the fact that the means for transferring electrical charges serves to transfer electrical charges from said conveying means to said body at a plurality of entering portions of said conveying means and to remove electrical charges to said conveying means from said body at a plurality of exit portions thereof.

26. An electrostatic machine having a body to be charged, and movable charge conveying means for transferring electric charges between said body and said conveying means, said conveying means having a plurality of looped portions within said body.

27. In an electrostatic apparatus, the combination with a body to be charged, of a hollow insulating tube supporting said body, and a moving conveying medium for transferring electric charges to said body having a path of movement within said insulating tube.

28. In an electrostatic apparatus, the combination with a body to be charged, of a traveling charge conveying medium operatively related thereto, and means for causing a transference of electric charges to said medium comprising a source of sustained voltage independent of said

medium and opposed terminals between which said medium travels, one of which is connected to said voltage source, said terminals providing one a region of relatively high potential gradient and the other a region of relatively low potential gradient.

29. An electrostatic apparatus, comprising a hollow body to be charged, insulating means spacing the same from ground, an endless charge conveyor with means for causing the travel of the same into and out of said body, means for applying electric charges to said conveyor at a point outside of said body, an electrode within and insulated from said body for removing electric charges from the entering portion of said conveyor, a terminal connected to said electrode and presenting a relatively extended surface positioned adjacent the departing portion of said conveyor, and an electrode connected to the interior of said hollow body and positioned adjacent said departing portion and opposite said terminal, thereby to place charges on the departing portion of a sign opposite that of the charges brought to said body by said conveyor.

30. In a high voltage electrostatic apparatus, the combination with an electrode comprising a hollow body of rounded contour, of means for charging the same to an abnormally high voltage, said body having an opening in its surface, the bounding edges of said opening having a rounded re-entrant contour, and a member entering the opening in said body.

31. In an electrostatic apparatus, the combination with a body to be charged, of a charge-conveying medium, means for applying electric charges to said medium, and means for transferring charges from said medium to said body, including charge collecting means operatively related to said body and comprising conducting terminals of opposite polarity and an independent source of voltage for exciting said terminals.

32. In an electrostatic charging system, the combination with a pair of terminals, of electrostatic means for creating a high potential difference between said terminals, an evacuated tubular member structurally connected to one of said terminals, and means within the tubular member for completing a path of current from one terminal to the other.

33. An electrostatic machine comprising a hollow body constituting an electrode-terminal, on the surface of which a high potential charge is to be established, a movable charge carrier having a looped portion thereof located within said body and entering and leaving the latter, and means substantially wholly within said hollow body for transferring charges between said charge carrier and said body.

34. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of movable charge conveying means having entrance into and exit from said body, and means for transferring charges of one sign to said body from the charge conveying means on entrance therein and for removing charges of the opposite sign to said charge conveying means on exit therefrom.

35. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of an endless charge conveying belt having a movement into and out of said body, means for transferring charges from an entering portion of said belt to said body, and means for removing charges of an opposite sign from said body to a departing portion of said belt.

36. In an electrostatic machine, the combina-

tion with a body to be charged, of a movable charge conveying medium having a path of movement into and out of said body, means for transferring charges from said medium to said body on entering the latter, and means for transferring charges of the opposite sign to said medium from said body on leaving the latter.

37. In an electrostatic apparatus, the combination with a hollow body to be charged, of an endless conveying medium having a path of movement into and out of said body, means for transferring charges from an entering portion of the medium to said body, and means for removing charges of the opposite sign from said body to a departing portion of said medium, both said transferring and said removing means being substantially wholly within said hollow body.

38. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of endless charge conveying means for carrying electric charges to and into said body and having portions traveling in closely adjacent parallel paths, and a solid elongated insulating body lying between said parallel portions.

39. In an electrostatic power transmission system, the combination with an electrode body, of means for charging the same electrostatically to a high potential, a second electrode body insulated from ground adapted to be electrically connected to said first body to receive current therefrom, and an endless charge carrier having a path of movement into and out of said second electrode body with means for the transfer of electric charges between said second body and the ground to operate said charge carrier as a motor.

40. In high voltage electrostatic apparatus, a vertically disposed insulating column, a hollow electrode supported at the top of said column, an endless charge carrier and means for moving the same between a point near the base of said column and the interior of said hollow electrode, means for applying electrical charges to a portion of said carrier at a point remote from said electrode, and means within said hollow electrode for removing said electrical charges from said carrier.

41. In an electrostatic machine, a hollow body of rounded contour constituting an electrode-terminal on the surface of which a high potential charge is to be established, insulating means supporting said electrode, a pulley within and substantially surrounded by said body, an endless charge carrier comprising a belt having a loop passing about said pulley and entering and leaving said body, and means for driving said charge carrier.

42. In an electrostatic apparatus, the combination with a pair of spaced hollow bodies constituting each an electrode-terminal on the surface of which a high potential charge is to be established, of insulating means supporting said bodies, traveling charge-carrying means for carrying electric charges of one sign to and into one of said electrodes and charges of the opposite sign to and into the other of said electrodes, and means substantially wholly within and surrounded by each of said electrodes for transferring to the said electrodes electric charges brought thereto by said charge-carrying means.

43. In an electrostatic apparatus, the combination with a pair of spaced hollow bodies constituting each an electrode-terminal on the surface of which a high potential charge is to be established, of insulating means supporting said bodies, traveling charge-carrying means for carrying electric charges of one sign to and into one of said

electrodes and charges of the opposite sign to and into the other of said electrodes, means substantially wholly within and surrounded by each of said electrodes for transferring to the said electrodes electric charges brought thereto by said charge-carrying means, and means for establishing a predetermined path of current transference between the electrodes comprising a vacuous casing connected to and extending between said electrode-terminal bodies.

44. In an electrostatic apparatus, the combination with a pair of spaced hollow bodies constituting each an electrode terminal on the surface of which a high potential charge is to be established, of insulating means supporting said bodies, traveling charge-carrying means for carrying electric charges of one sign to and into one of said electrodes and charges of the opposite sign to and into the other of said electrodes, means substantially wholly within and surrounded by each of said electrodes for transferring to said electrodes electric charges brought thereto by said charge-carrying means, means for establishing a predetermined path of current transference between the electrodes comprising a vacuous casing connected to and extending between said electrode terminal bodies, and a power-consuming device located in said path of current transference.

45. In a high voltage electrostatic apparatus, the combination with a hollow body constituting an electrode-terminal on the surface of which a high potential charge is to be established, of a moving charge-conveying insulating medium having a path of movement entering and leaving said body, means for applying charges to said medium at a point remote from said body, and means substantially wholly within and enclosed by said body for removing charges from said medium within said body, said charge-conveying medium being of substantially uniform insulating properties thereby to prevent concentration of the electric field along its path and to suppress corona discharges.

46. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of a movable charge-conveying medium for carrying charges to and from said body, and charge transferring means substantially surrounded by the equipotential surface of said body for transferring a charge of one sign from said medium to said body and for removing a charge of the opposite sign from said body to said medium.

47. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of a movable

charge-conveying medium for carrying charges to and from said body, and charge transferring means substantially within said body for transferring a charge of one sign from said medium to said body and for removing a charge of the opposite sign from said body to said medium.

48. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of a movable charge-conveying medium for carrying charges to and from said body, and charge transferring means operating independently of and unaffected by the potential of said body for transferring a charge of one sign from said medium to said body and for removing a charge of the opposite sign from said body to said medium.

49. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of a movable charge-conveying medium for carrying charges between said body and a point remote therefrom, and charge transferring means independent of and unaffected by the potential of said body for transferring to said medium at said point a charge of one sign and for removing from said medium at said point a charge of the opposite sign.

50. The combination with a body charged to a high potential, of a movable charge-conveying medium operatively related to said body, and means for operating said charge-conveying medium as a motor including means for transferring charges of one sign from said medium to said body and for removing charges of the opposite sign from said body to said medium, said charge transferring and removing means operating independently of and unaffected by the potential of said body.

51. In an electrostatic apparatus, the combination with a movable charge-conveying medium, of charge transferring means operatively related thereto, and continuous charge supplying means including an electro-magnetic source of power therefor.

52. An electrostatic apparatus comprising a movable charge-conveying medium, charge transferring means operatively related thereto, and electro-magnetic means for providing continuous, steady excitation for said transferring means.

53. In an electrostatic machine, the combination with a body to be charged, of a charge-conveying medium having a path of movement between said body and a point remote therefrom, and a casing in which said medium is contained and of which said body forms an essential part.

ROBERT J. VAN DE GRAAFF.

## CERTIFICATE OF CORRECTION.

Patent No. 1,991,236.

February 12, 1935.

ROBERT J. VAN de GRAAFF.

It is hereby certified that error appears in the printed specification of the the above numbered requiring correction as follows: Page 4, second column, line 69, claim 9, for "receptivity" read resistivity; and that the said Letters Patent should be read with this correction therein that the same may conform to the record of the case in the Patent Office.

Signed and sealed this 12th day of March, A. D. 1935.

Leslie Frazer

(Seal)

Acting Commissioner of Patents.