

**ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.**



## **ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

*Προσομοίωση ηλεκτρικής συμπεριφοράς της  
διάταξης MARX GENERATOR  
του κέντρου φυσικής, πλάσματος και LASER.*

*Υπεύθυνος Καθηγητής:*

**Ταταράκης Μιχαήλ**

**Όνοματεπώνυμο: Σοφριανός Δραπανιώτης**

**Αριθ. Μητρώου: 4141**



## **ΠΕΡΙΛΗΨΗ**

Η εργασία που ακολουθεί αναφέρεται στην ηλεκτρική συμπεριφορά της πειραματικής διάταξης *Marx generator*, η οποία παράγει παλμούς υψηλής έντασης σε μικρά διαστήματα, χρησιμοποιείται στην έρευνα και τη βιομηχανία. Η γεννήτρια *Marx* υφίσταται και στην περίπτωση μας είναι τριών βαθμίδων, αποτελεί μέρος των πειραματικών διατάξεων του κέντρου φυσικής πλάσματος και *LASER*, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών – ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ. Εκκινώντας θα γίνει θεωρητική αναφορά της διάταξης *Marx generator (marx-bank)* και στη συνέχεια ηλεκτρικές προσομοιώσεις σε προγράμματα *H/Y LTSPICE* και *SATE Mesh edu* .

## **ABSTRACT**

*The work that follows refers to the electrical behavior of the experimental set-Marx generator, which produces pulses of high intensity at short intervals used in research and industry. The Marx generator exists in our case is three tiers, is part of the experimental layout of the main plasma physics and LASER, Faculty of Applied Science - TEI of Crete. Starting will be theoretical reference device Marx generator (marx-bank) and then electrical simulations in computer programs, LTSPICE SATE and Mesh edu.*

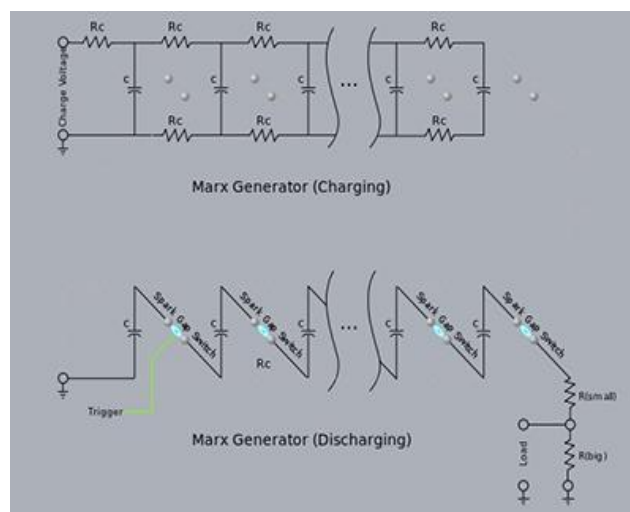
## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

<i>Εισαγωγή</i> .....	3
<i>ABSTRACT</i> .....	4
<b>Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup></b>	
<i>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</i> .....	6
<b>Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup></b>	
<i>ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ</i> .....	9
<b>Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup></b>	
<i>ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ MARX BANK</i> .....	19
<b>Αναφορές</b> .....	31

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup> ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η πτυχιακή εργασία που ακολουθεί αναφέρεται στην ηλεκτρική συμπεριφορά της πειραματικής διάταξης Marx generator. Η γεννήτρια Marx υφίσταται και στην περίπτωση μας είναι τριών βαθμίδων, αποτελεί μέρος των πειραματικών διατάξεων του κέντρου φυσικής πλάσματος και LASER, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών - ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ. Εκκινώντας θα γίνει θεωρητική αναφορά της διάταξης Marx generator (marx-bank) και στη συνέχεια ηλεκτρικές προσομοιώσεις σε προγράμματα H/Y LTSPICE και SATE Mesh edu .

Η γεννήτρια Marx είναι ένα ηλεκτρικό κύκλωμα που περιγράφηκε για πρώτη φορά από Erwin Otto Marx το 1924. Σκοπός της διάταξης είναι η δημιουργία παλμών υψηλής τάσης από πηγή συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης.



Σχήμα 1.1

Οι γεννήτριες Marx χρησιμοποιούνται σε πειράματα φυσικής υψηλής ενέργειας, καθώς και σε προσομοιώσεις για τις συνέπιες πτώσης κεραυνών στη γραμμή εργαλείων ισχύος καθώς και στον εξοπλισμό των αερομεταφορών.

Οι γεννήτριες Marx έχουν μια γενική κατασκευαστική αρχή η οποία εναλλάσσεται ανάλογα με την πειραματική διάταξη που εξυπηρετεί. Το κύκλωμα σε γενική αρχή παράγει έναν παλμό υψηλής τάσης φορτίζοντας αρχικά έναν αριθμό πυκνωτών σε παραλληλία και εν συνεχεία εκφορτίζουν προς την έξοδο εφόσον πρώτα έχουν συνδεθεί σε σειρά. Ο Αριθμός πυκνωτών ( $C$ ) της διάταξης συνδέεται παράλληλα με μία υψηλή τάση  $V$  διαμέσου των αντιστάσεων ( $RC$ ) επιτυγχάνοντας φόρτιση, για να συμβεί όμως αυτό μεταξύ τους υπάρχουν τα *spark gaps* (σπινθηριστές) τα οποία χρησιμοποιούνται ως διακόπτες απομονώνοντας τα στοιχεία μεταξύ τους. Τα *spark-gaps* για να συμπεριφερθούν ως κλειστό κύκλωμα απαιτητέ μια τάση διάσπασης του αερίου τους ( $SF_6$ ) μεγαλύτερη από αυτήν που έχουν στα άκρα τους λόγω των πυκνωτών, έτσι το κύκλωμα παραμένει ανοικτό όσο οι Πυκνωτές φορτίζουν. Το τελευταίο *spark-gap* απομονώνει την έξοδο της γεννήτριας από το φορτίο, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο την φόρτιση των πυκνωτών. Για να δημιουργηθεί ο παλμός εξόδου, το πρώτο *spark gap* αναγκάζεται να δημιουργήσει εκκένωση (ενεργοποιείται), η ηλεκτρική εκκένωση δημιουργεί

κλειστό κύκλωμα βάζοντας τους 2 πρώτους πυκνωτές σε σειρά, εφαρμόζοντας μια τάση περίπου  $2 \cdot V$  σε όλο το δεύτερο spark gap, κατά συνέπεια, το δεύτερο gap κάνει ηλεκτρική εκκένωση ώστε να προστεθεί και ο τρίτος πυκνωτής στο "σωρό", η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου διαδοχικά κάνουν εκκένωση όλα τα gaps. Το τελευταίο spark-gap συνδέει την έξοδο της σειράς «στοίβα» πυκνωτών στο φορτίο. Ιδανικά, η τάση εξόδου θα είναι  $n \cdot V$ , ο αριθμός των πυκνωτών είναι ανάλογος με την τάση φόρτισης, αλλά στην πράξη η τιμή είναι μικρότερη. Να σημειωθεί ότι σε καμία από τις αντιστάσεις φόρτισης  $R_c$  δεν ασκείτε μεγαλύτερη τάση από αυτή της φόρτισης. Το όριο φόρτισης εξαρτάται από την φόρτιση των πυκνωτών, έτσι η έξοδος είναι ένας σύντομος παλμός όπου οι πυκνωτές εκφορτίζονται μέσα από το φορτίο (φόρτιση αντιστάσεων). Σε μερικά σημεία τα spark gaps σταματούν να άγουν και η παροχή υψηλής τάσης ξεκινά τη φόρτιση των πυκνωτών εκ νέου, επαναλαμβάνοντας κατά αυτό τον τρόπο την διαδικασία από την αρχή.

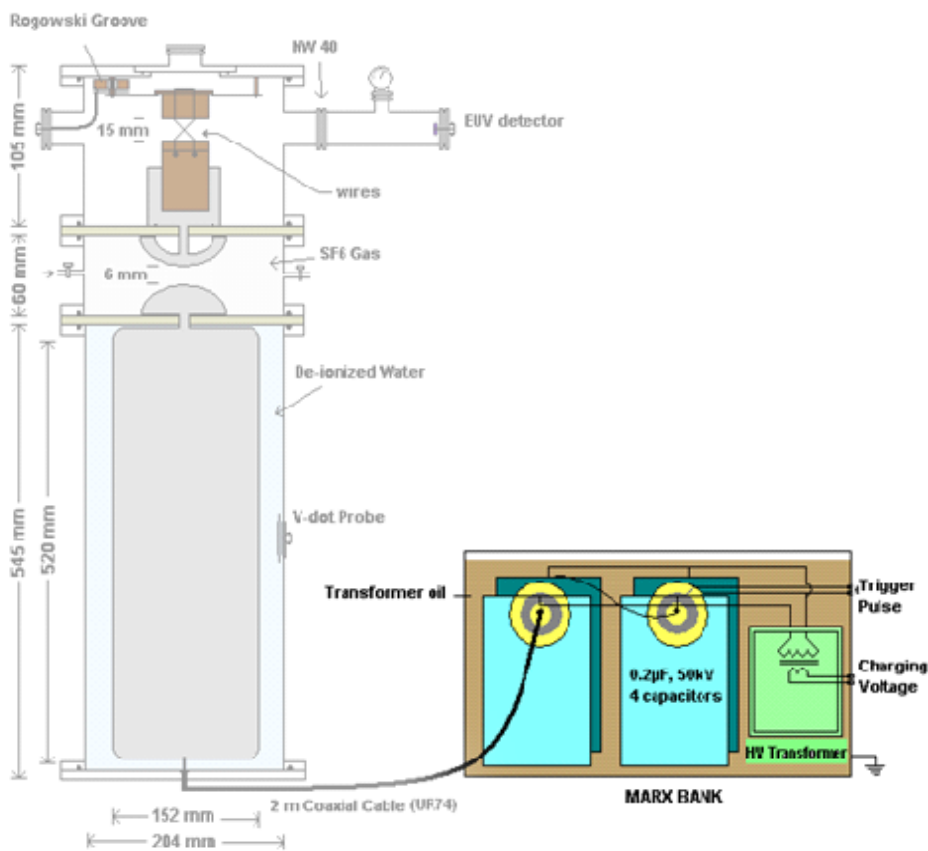


**Σχήμα 1.2** [http://en.wikipedia.org/wiki/Marx\\_generator#mediaviewer/File:High-Voltage\\_Impulse\\_Test\\_System.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator#mediaviewer/File:High-Voltage_Impulse_Test_System.jpg)  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Marx\\_generator#mediaviewer/File:Jabalpur\\_Engineering\\_College\\_\(JEC\)%27s\\_High\\_Voltage\\_Lab.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator#mediaviewer/File:Jabalpur_Engineering_College_(JEC)%27s_High_Voltage_Lab.jpg)



## Κεφάλαιο 2° ΘΕΩΡΙΑ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Η πρώτη βαθμίδα αποτελείται από ένα μεταβλητό μετασχηματιστή που επιτρέπει να ληφθεί μια εναλλασσόμενη τάση ομαλά και συνεχόμενα από τα 0V έως τα 220V.



Σχήμα 2.1

Η δεύτερη βαθμίδα αποτελείται από ένα ακόμα μετασχηματιστή, ο οποίος συνδέεται με την πρώτη βαθμίδα και δύο κυκλώματα αναρρίχησης. Τα κυκλώματα αυτά, που αποτελούνται από ένα πυκνωτή και δύο διόδους το κάθε ένα, λειτουργούν ως εξής. Για το

θετικό κύκλωμα αναρρίχησης ισχύει ότι στην πρώτη αρνητική ημιπερίοδο της τάσης εισόδου η δίοδος άγει και φορτίζει τον πυκνωτή στο πλάτος της τάσης εισόδου, λίγο μετά την αρνητική κορυφή η δίοδος αποκόπτεται, η τάση εξόδου είναι ίση με το άθροισμα των τάσεων της πηγής τάσης και του πυκνωτή, έτσι η έξοδος είναι ένα ημιτονοειδές σήμα που έχει μετατοπιστεί προς τα πάνω, επειδή, όμως οι αρνητικές κορυφές βρίσκονται λίγο κάτω από τα 0V χρησιμοποιείται μια δίοδος στην έξοδο του κυκλώματος για ανόρθωση. Για το αρνητικό κύκλωμα αναρρίχησης αρκεί να αναστρέψουμε την πολικότητα της διόδου που με αποτέλεσμα να αναστρέφεται η πολικότητα της τάσης του πυκνωτή, έτσι, το ημιτονοειδές σήμα μετατοπίζεται προς τα κάτω.



**Σχήμα 2.2**

[www.plusparkstar.com/En/ProductView.asp?ID=403&SortID=175](http://www.plusparkstar.com/En/ProductView.asp?ID=403&SortID=175)

Η τρίτη βαθμίδα αποτελεί το βασικό κομμάτι του Marx Bank, εκεί βρίσκονται τέσσερις πυκνωτές (σχήμα

2.2) οι οποίοι φορτίζουν παράλληλα από το κύκλωμα της αρνητικής αναρρίχησης και εν συνεχεία αφού η συνδεσμολογία τους (χειροκίνητα) γίνει σειράς εκφορτίζουν. Οι πυκνωτές της κυκλωματικής διάταξης είναι χωρητικότητας  $0.2\mu\text{F}$  και τάσης  $30\text{KV}$  έκαστος. Η διάταξη απαιτεί κάποια λεπτά έως ότου φορτίσει τους πυκνωτές, επιτυγχάνοντας με αυτό τον τρόπο όμοια τάση σε αυτούς. Μεταξύ των πυκνωτών υπάρχουν τα spark-gaps (διάκενα σπινθηρισμού) τα οποία είναι κατασκευασμένα από υψηλής αντοχής βιομηχανικού πλαστικού ertalon και έχουν κυλινδρική μορφή. Στο εσωτερικό τους έχουν μεταλλικές επιφάνειες από ανοξείδωτο ατσάλι και τέλος είναι συμπληρωμένα με υψηλής πίεσης ( $3\text{bar}$ ) διηλεκτρικό αέριο  $\text{SF}_6$  (εξαφθοριούχο θείο). Τα διάκενα σπινθηρισμού εμποδίζουν την ροή του ρεύματος, εκτός αν εφαρμοστεί εξωτερική τάση για να διαπεράσει το αέριο  $\text{SF}_6$  έτσι ώστε να δημιουργηθεί αγωγιμότητα. Στην ιδανική περίπτωση, το κλείσιμο του διακόπτη πιο κοντά στην παροχή ρεύματος φόρτισης εφαρμόζει μια τάση  $2\text{V}$  στο δεύτερο διακόπτη. Αυτός ο διακόπτης θα κλείσει, εφαρμόζοντας μια τάση  $3\text{V}$  στο τρίτο διακόπτη κ.ο.κ. Στην συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιείται "διπλή τροφοδοσία" για να γίνει χρήση λιγότερων διακενων σπινθηρισμού.

Οι αντιστάσεις φόρτισης,  $R_c$ , πρέπει να είναι στο κατάλληλο μέγεθος τόσο για φόρτιση όσο και για εκφόρτιση. Σε πολλές γεννήτριες οι αντιστάτες κατασκευάζονται από σωλήνες πλαστικού ή γυαλιού γεμάτες με αραιό διάλυμα θειικού χαλκού ( $\text{CuSO}_4$ ). Οι

αντιστάσεις υγρής μορφής έχουν αντοχή σε αρκετά υψηλές τάσεις 50KV και άνω, υπερνικώντας πολλά από τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι περισσότερες με συμβατικά στερεά υλικά αντιστάσεις.



**Σχήμα 2.3** <http://www.indiamart.com/quality-manufacturing/physics-instruments.html>

Η τιμή των αντιστάσεων που χρησιμοποιούνται με διάλυμα θειικού χαλκού επαληθεύεται από τον μαθηματικό τύπο  $R=p \cdot l/s$  όπου:

R: Τιμή Αντίστασης

p: Τιμή Ειδικής Αντίστασης Διαλύματος

l: Πλάτος Αντίστασης

s: Διάμετρος Αντίστασης

Η γενική εξίσωση αντιστάσεων υγρού διαλύματος και διάγραμμα αυτής:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

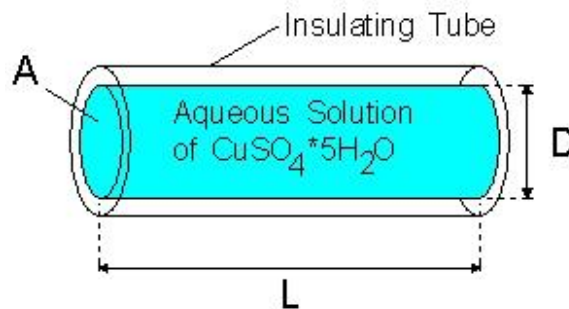
$$\rho = \frac{R \cdot A}{l}$$

$$C'_s(\rho) = \text{from table}$$

$$C'_w(\rho) = \text{from table}$$

$$V = A \cdot l$$

where,  
*A* = electrode area  
*D* = electrode diameter  
 $\pi = 3.14159265\dots$   
*l* = length of resistor  
 *$\rho$*  = resistivity of solution  
*C'<sub>s</sub>* = concentration of  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  in solution  
*C'<sub>w</sub>* = concentration of water in solution  
 (not including water from  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )  
*V* = volume of resistor  
 units are MKS, except for *C*, which is CGS



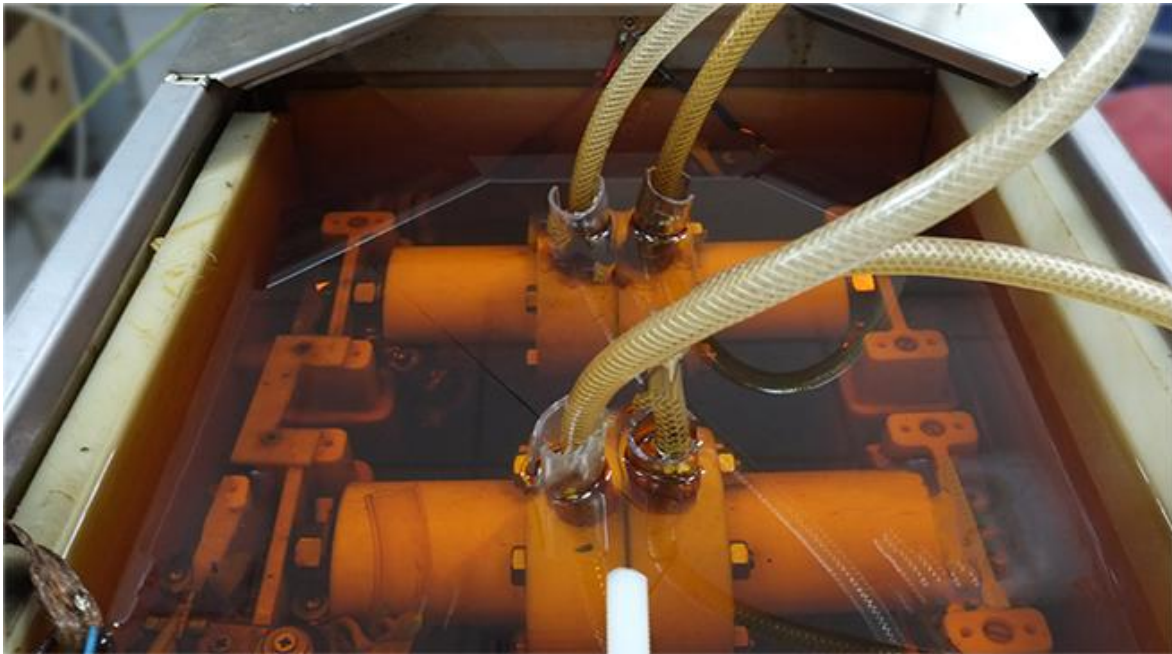
**Σχήμα 2.4** <http://www.pulsedpower.net/Applets/PulsedPower/CopperSulfateResistor/CopperSulfateResistor.html>

Οι αντιστάσεις υγρού διαλύματος ( $\text{CuSO}_4$ ) κατασκευάζονται ανάλογα με τις απαιτήσεις των διατάξεων για αυτό το λόγο οι τιμές τους δεν είναι σταθερής αντίστασης.

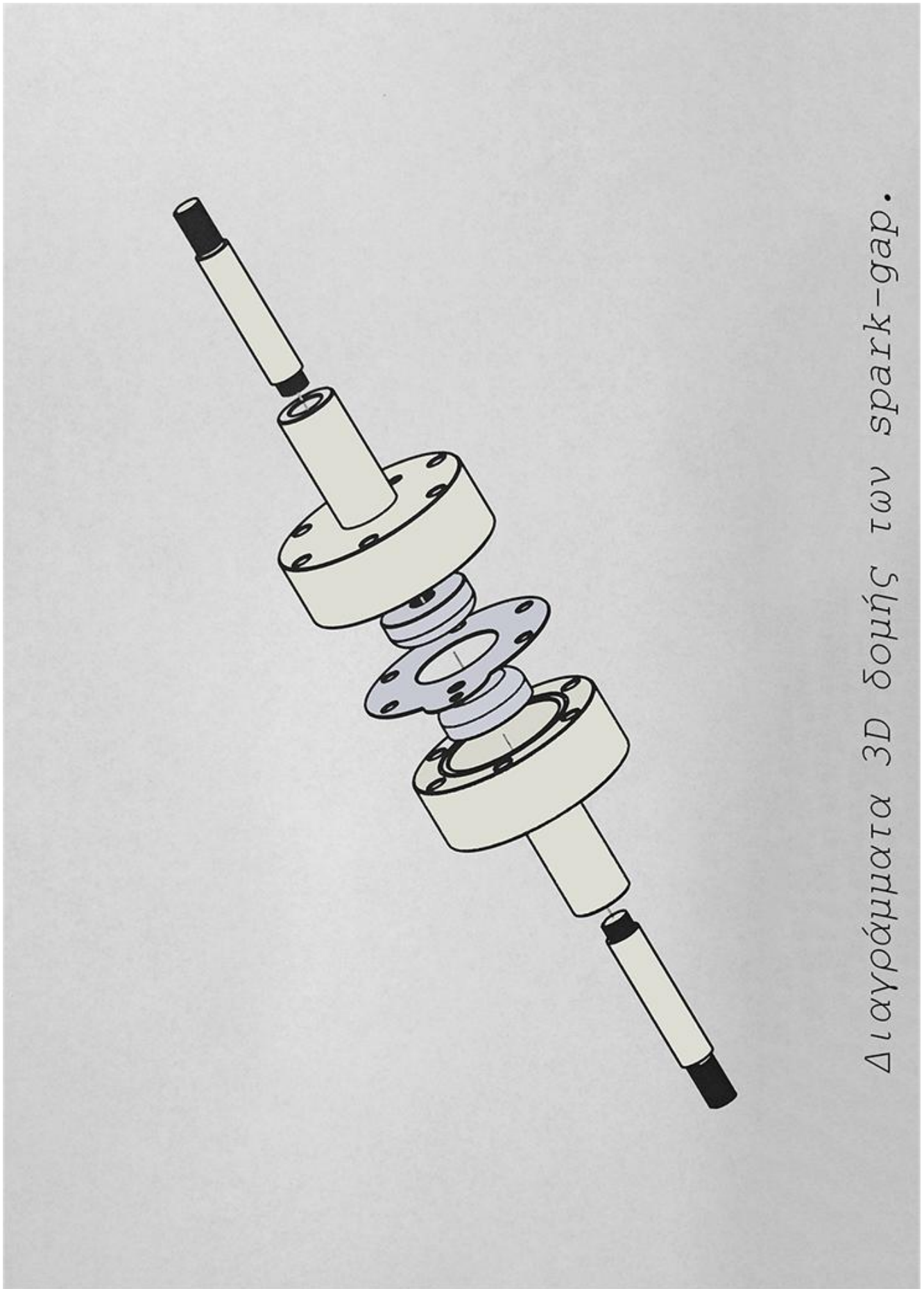
Η γεννήτρια Marx για λόγους ασφαλείας είναι τοποθετημένη σε δοχείο το οποίο είναι συμπληρωμένο με λάδι καλύπτοντας την πλήρως, μη επιτρέποντας τυχόν διαρροές και βραχυκυκλώματα στα τμήματα της.



Στην εικόνα που ακολουθεί υπάρχει απεικόνιση της γεννήτριας Marx. Στις τέσσερις πλευρές υπάρχουν πλάκες Πολυτετραφθοροαιθυλενίου για καλύτερη μόνωση, κάτω από της επιφάνια του λαδιού υπάρχουν τα 2 spark-gaps τα οποία είναι συνδεδεμένα με 4 πυκνωτές έναν στα τέσσερα άκρα τους, στην εικόνα δεν απεικονίζονται μετασχηματιστές και αντιστάσεις  $\text{CuSO}_4$ , τέλος οι σωληνώσεις  $\frac{1}{2}$  inch διοχετεύουν το αέριο  $\text{CF}_6$  στους θαλάμους. Η διάταξη συνδέετε στην έξοδο της με ομοαξονικό καλώδιο μεγάλης διατομής μεταφέροντας τον παλμό υψηλής ενέργειας στην πειραματική διάταξη X-pinch.



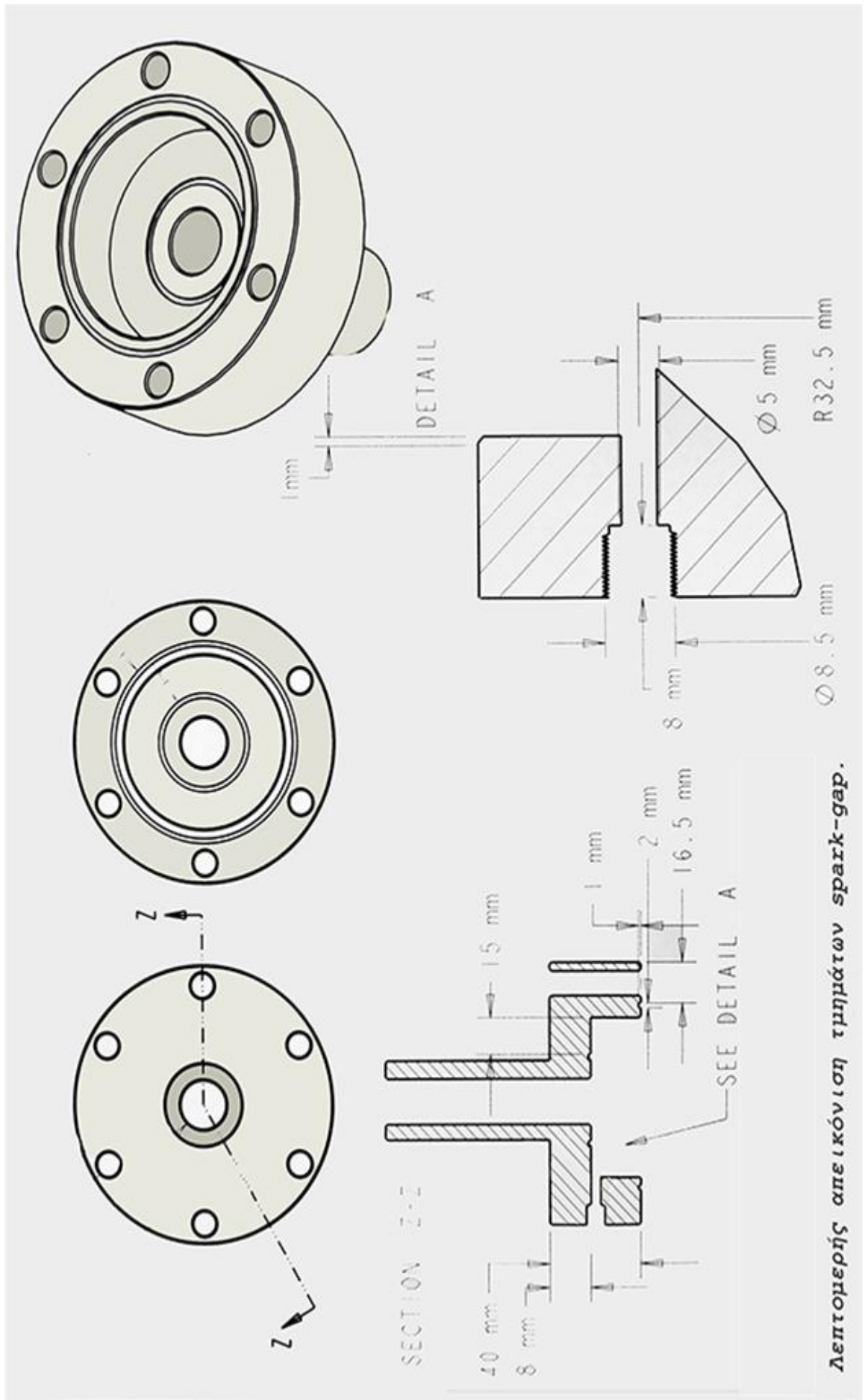
Σχήμα 2.6



Διαγράμματα 3D δομής των spark-gap.

Σχήμα 2.7





Σχήμα 2.8

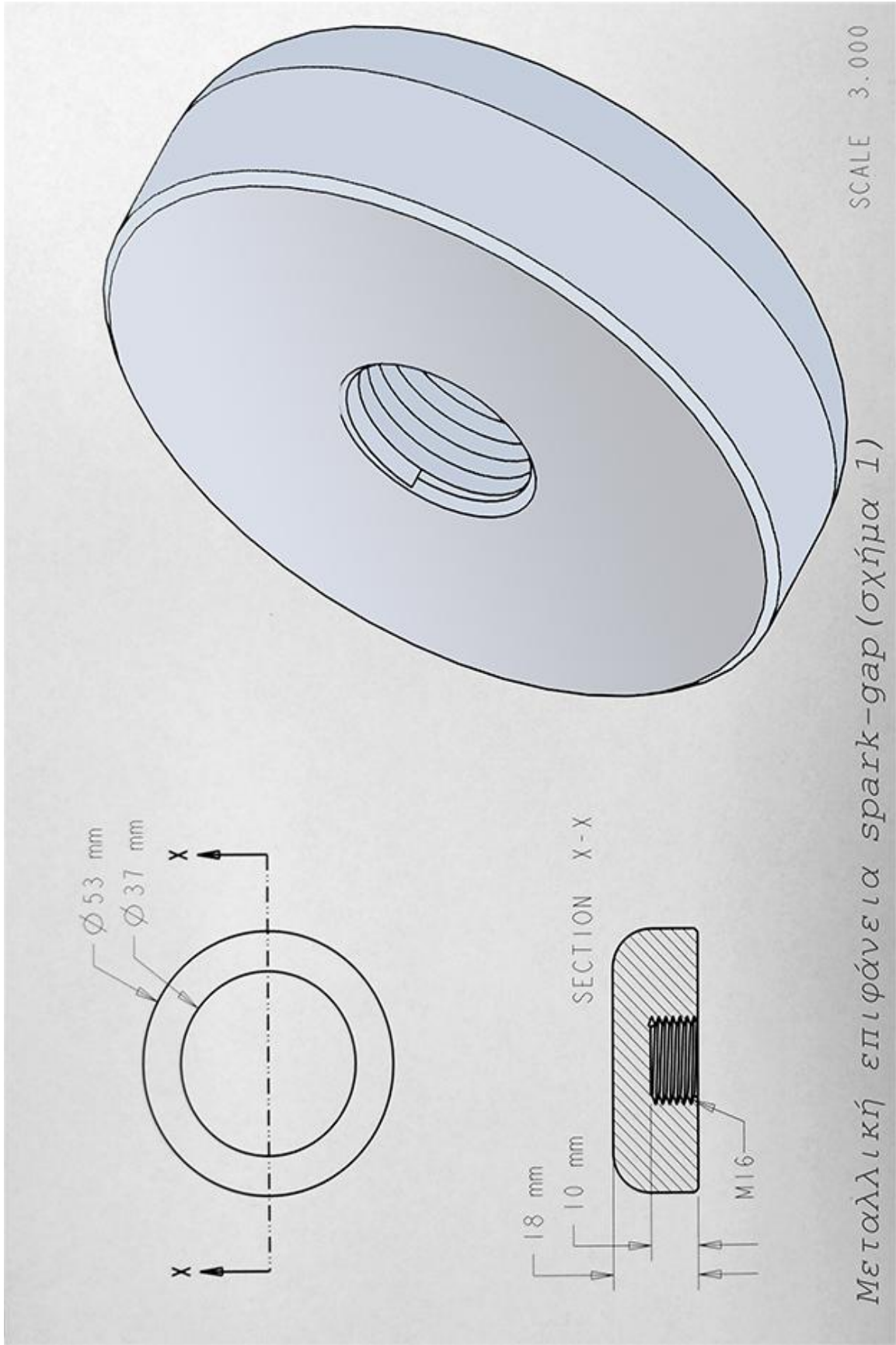
## **Κεφάλαιο 3°**

### **ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ MARX GENERATOR**

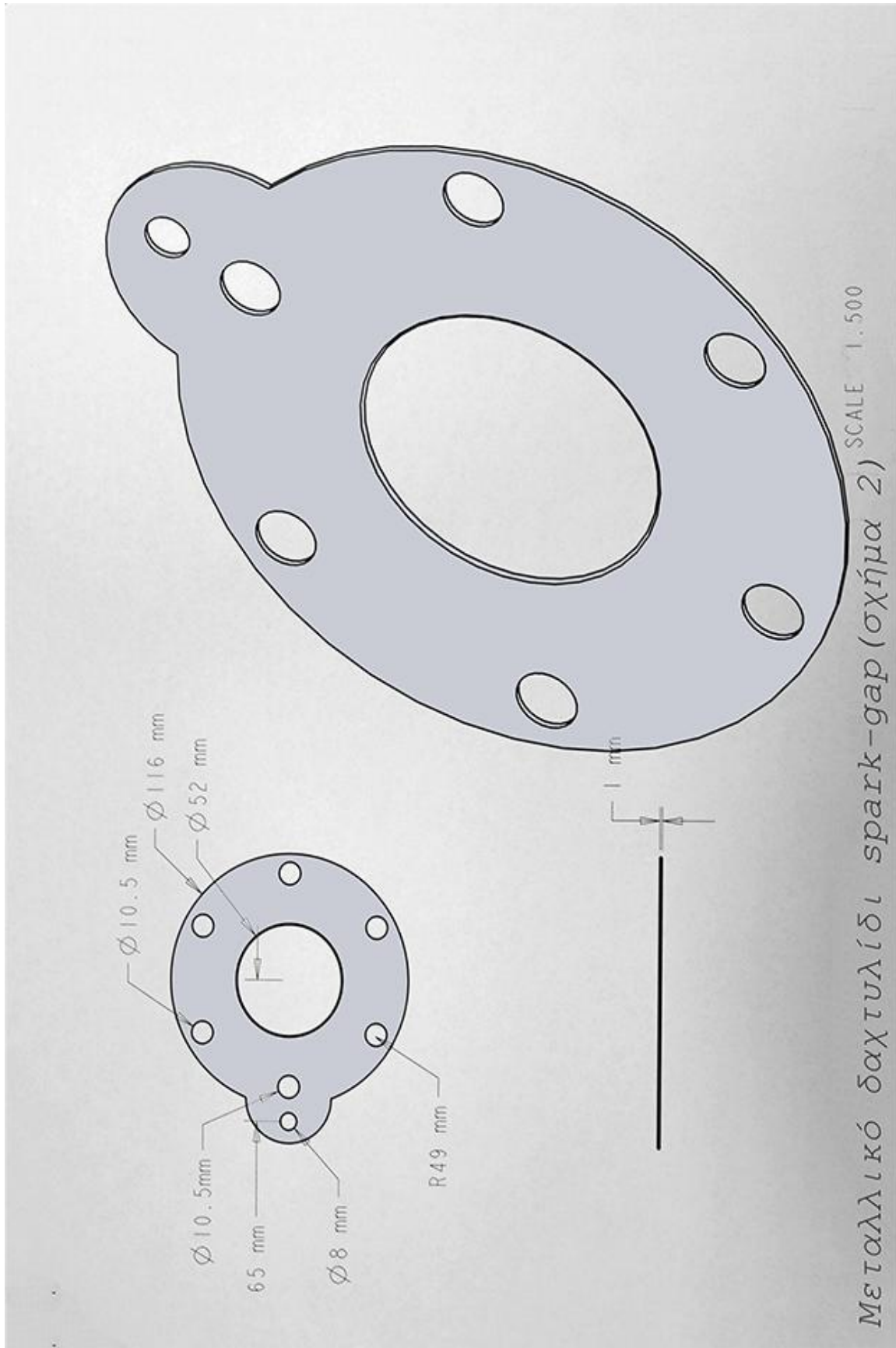
Ξεκινώντας θα γίνει αναφορά, μελέτη και ανάλυση των ηλεκτρικών πεδίων που δημιουργούνται στο εσωτερικό των spark-gaps την στιγμή που εφαρμόζεται εξωτερική τάση διαπερνάται το αέριο SF<sub>6</sub> και δημιουργείτε αγωγιμότητα σε αυτά.

Το spark-gap στο εσωτερικό του έχει 2 μεταλλικές επιφάνειες (σχήμα 1) οι οποίες απέχουν 10mm μεταξύ τους και η κάθε μια είναι συνδεδεμένη σε έναν από τους τέσσερεις πυκνωτές της διάταξης, μεταξύ των 2 επιφανιών σε απόσταση 6mm από την κάθε μια υπάρχει ένα μεταλλικό δαχτυλίδι (σχήμα 2 και 3) το οποίο εφαρμόζει την τάση που διαπερνά το αέριο SF<sub>6</sub> και κάνει αγωγή το spark-gap κλείνοντας με αυτό τον τρόπο το κύκλωμα.

Η ανάλυση θα γίνει με το πρόγραμμα προσομοίωσης Mesh της SATE, το οποίο δημιουργεί σύμμορφη τριγωνικού πλέγματος για κάθε αγωγή γεωμετρικό σχήμα του δοθεί. Σύμμορφη είναι η διαδικασία κατά την οποία το σχήμα διαιρείτε σε μια σειρά απεμονωμένα τρίγωνα που ακολουθούν στενά τα όρια του υλικού, η προσέγγιση αυτή δίνει λύσεις υψηλής ακρίβειας στον τομέα των πεδίων μικρού χρόνου. Στις αναλύσεις θα χρησιμοποιηθεί σε παράλληλη τομή το μισό spark-gap εφόσον όλα τα μέρη του είναι κυλινδρικά και τα ηλεκτρικά πεδία που εμφανίζονται είναι συμμετρικά. Τα πεδία ανάλογα με την ένταση τους απεικονίζονται, με μοβ τα ασθενέστερα και ακολουθώντας το φάσμα του ορατού φωτός με κόκκινο τα ισχυρότερα (Σχήμα 3.5 και 3.6).



Σχήμα 3.1



Σχήμα 3.2

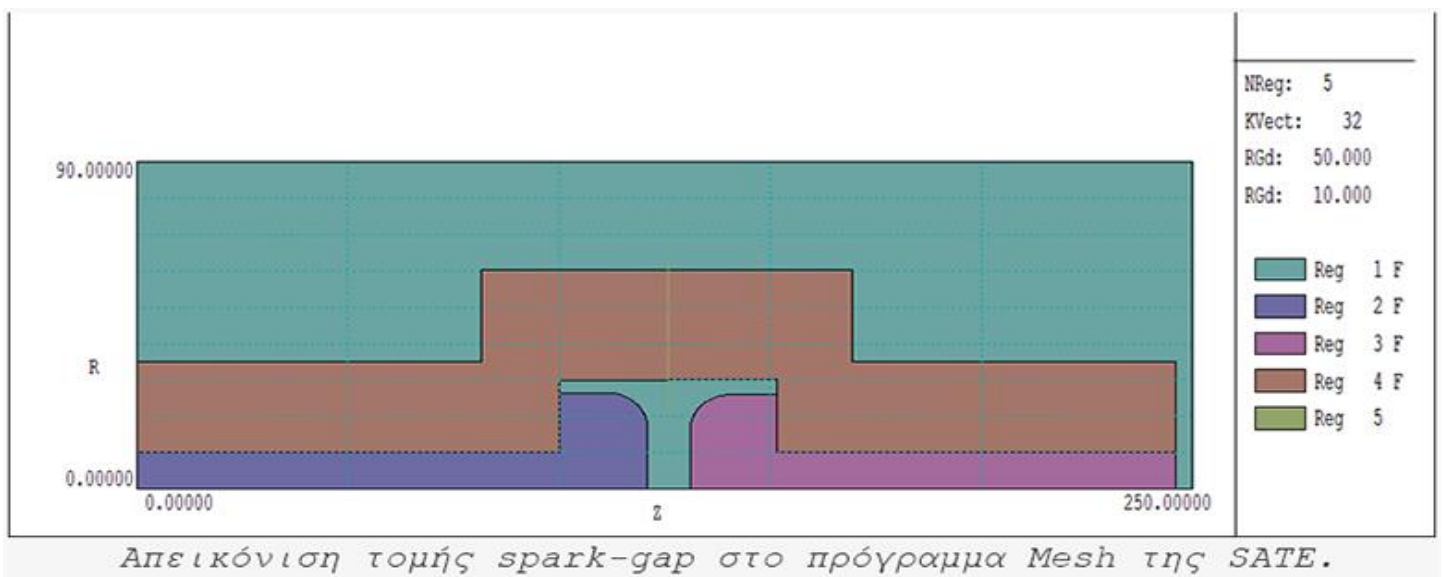
**Τομή μεταλλικών επιφανειών spark-gap.**



σχήμα 3

**Σχήμα 3.3**

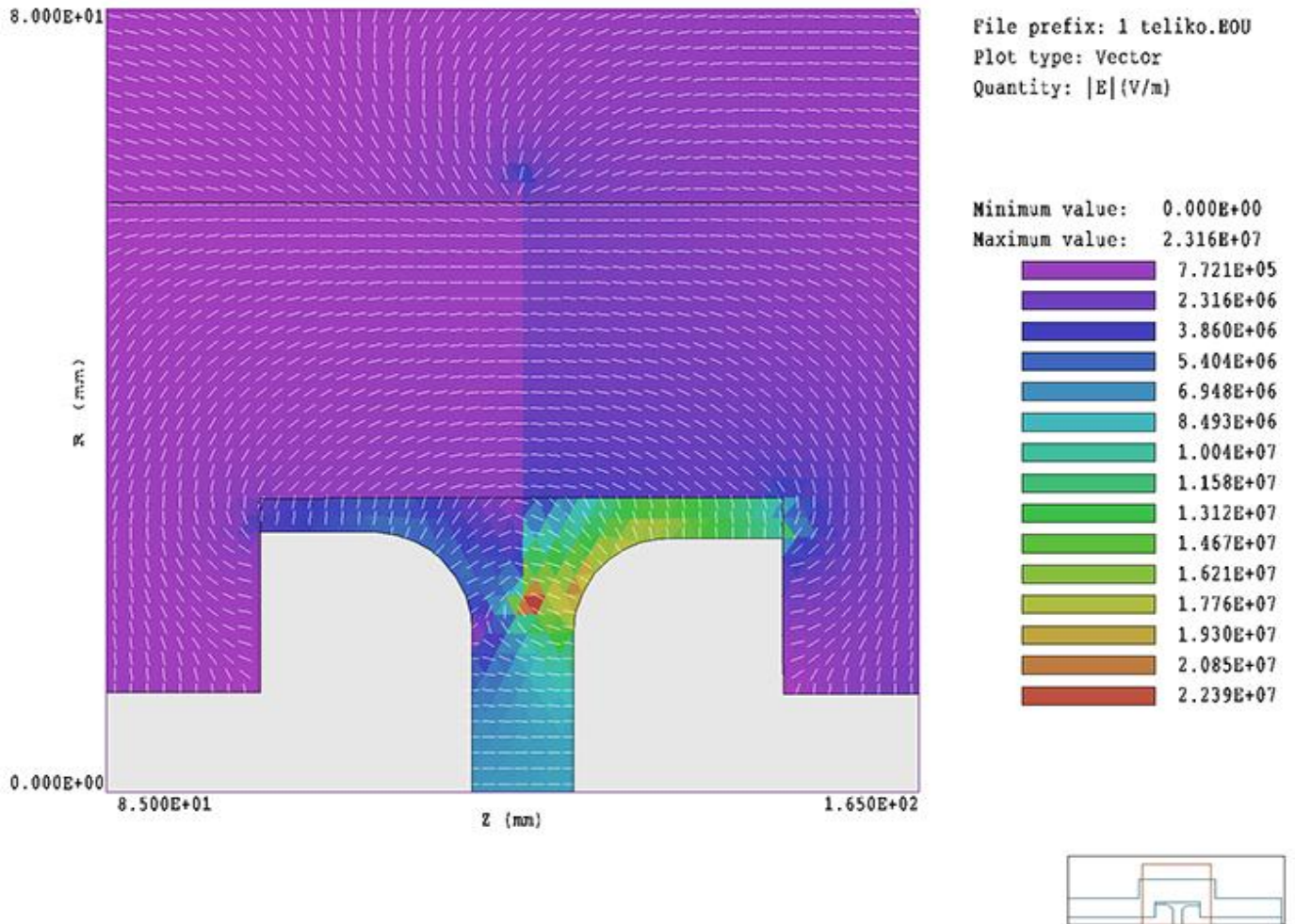
Με κόκκινο χρώμα απεικονίζεται το μεταλλικό δαχτυλίδι το οποίο βρίσκεται 6mm από τις 2 επιφάνειες και μεταφέρει στο εσωτερικό την τάση που άγει το αέριο SF6 (Σχήμα 3.3).



**Σχήμα 3.4**

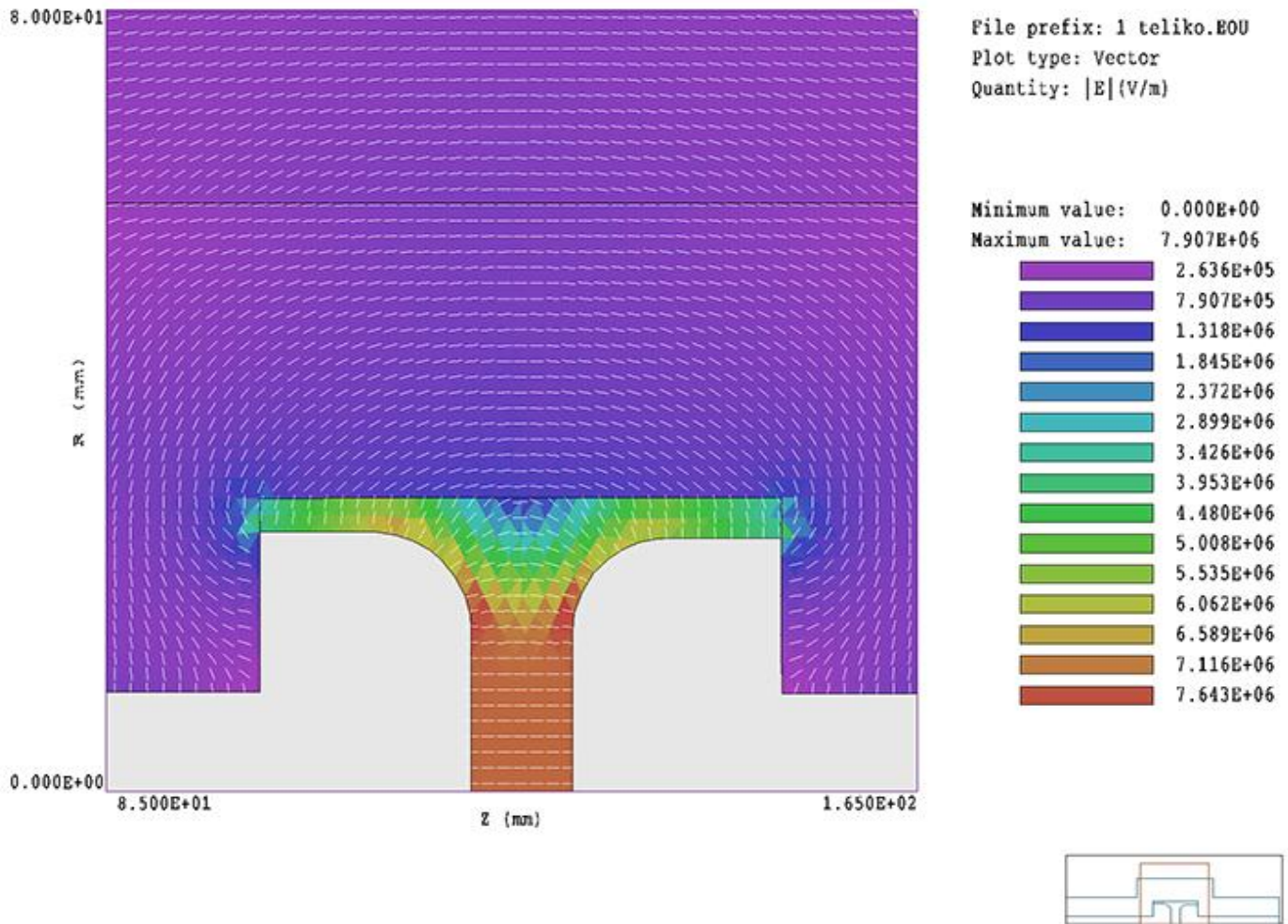
Καφέ χρώμα εξωτερική επιφάνεια έρταλον, μοβ ροζ και κίτρινο μεταλλικά μέρη,

Πράσινο αέριο SF6 και τέλος με μπλε ατμοσφαιρικός αέρας (Σχήμα 3.4).



Σχήμα 3.5

**Εμφάνιση τάσης στο εσωτερικό μέρος του μεταλλικού δαχτυλιδιού (SATE Mesh) .**

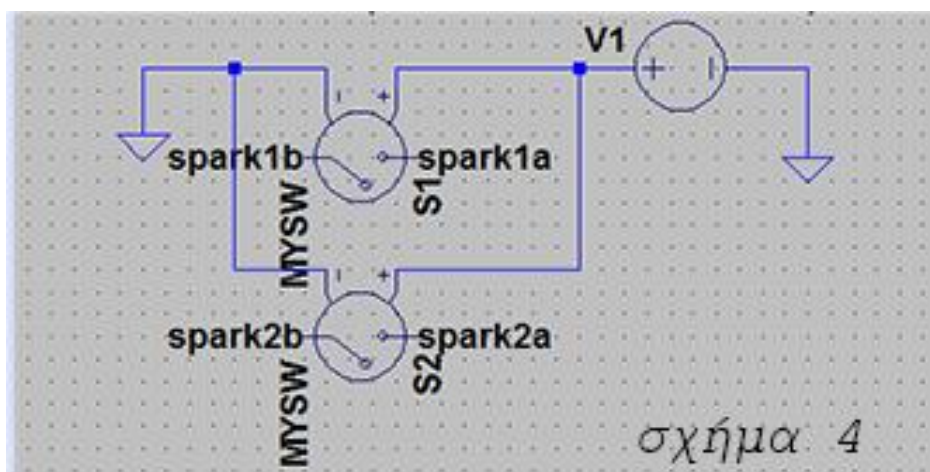


**Σχήμα 3.6**

**Δεύτερη φάση κατά την οποία το SF6 άγει και εμφανίζεται πεδίο στις 2 επιφάνειες.**

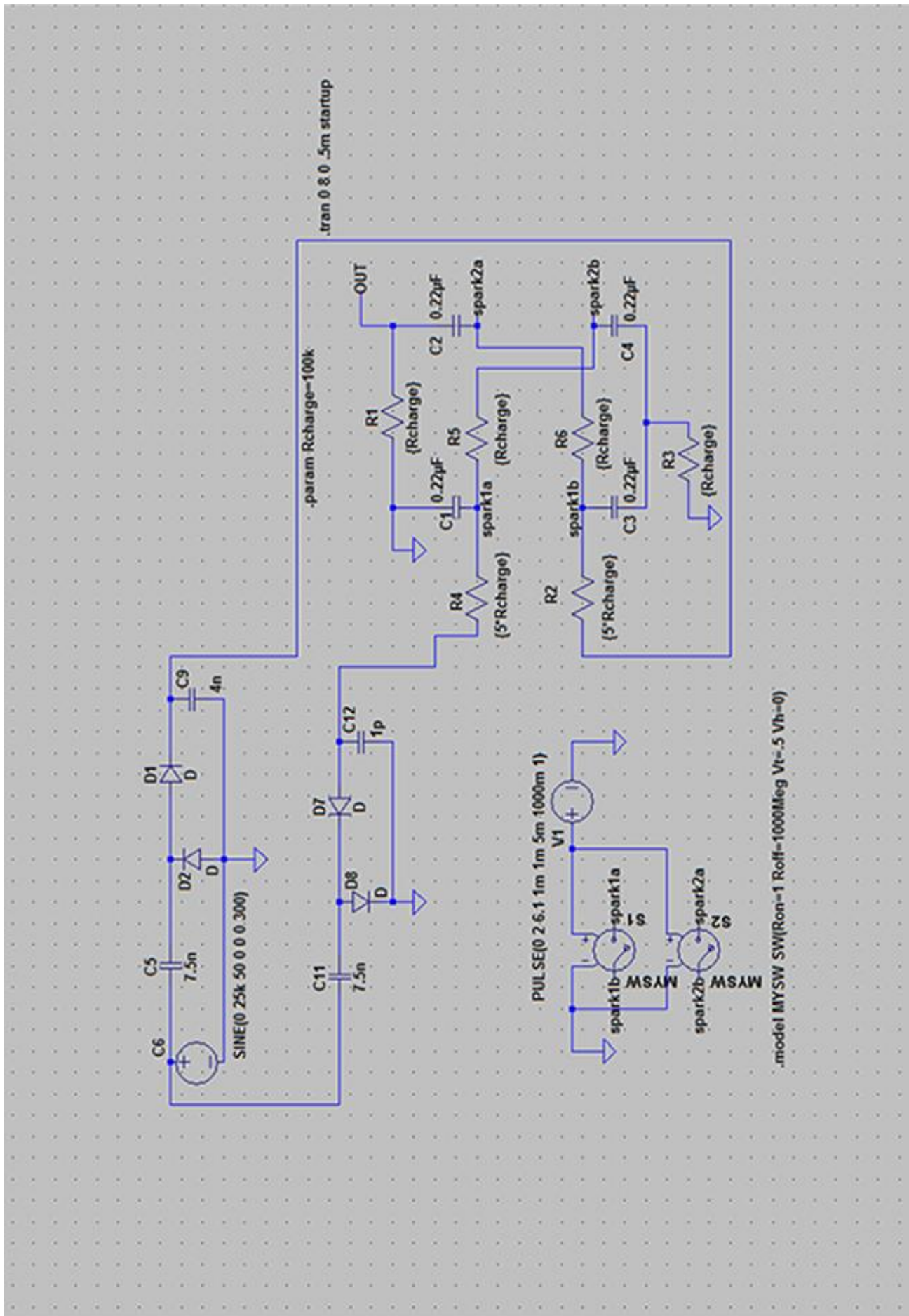
Η ηλεκτρική ανάλυση της διάταξης Marx-bank θα γίνει με το πρόγραμμα προσομοίωσης LTSPICE IV (LINEAR TECHNOLOGY), το οποίο ειδικεύεται στις προσομοιώσεις υψηλής απόδοσης ολοκληρωμένων κυκλωμάτων και επιτρέπει την απεικόνιση σε γραφικό περιβάλλον οποιασδήποτε παραμέτρου. Στην ηλεκτρική προσομοίωση της γεννήτριας MARX θα γίνει χρήση σχηματικού, το οποίο περιλαμβάνει και τις τρεις βαθμίδες που αναφέρονται αναλυτικά στο κεφάλαιο 2 (θεωρία διάταξης. τα γραφήματα για ευχρηστία θα έχουν διαφορετικά χρώματα για κάθε έξοδο της διάταξης.

Το σχηματικό των δυο spark-gaps της γεννήτριας MARX στο LTSPICE (σχήμα 3.7) έγινε με χρήση των διαθέσιμων προς επιλογή εξαρτημάτων και πιο συγκεκριμένα δυο διακοπών (voltage controlled switch). Το spark-gap κατ' ουσίαν είναι ένας διακόπτης μεγάλης αντοχής, ο οποίος λόγω έλλειψης επαφών (και κόνοντας χρήση τόξου) ενδείκνυται για βιομηχανική χρήση.

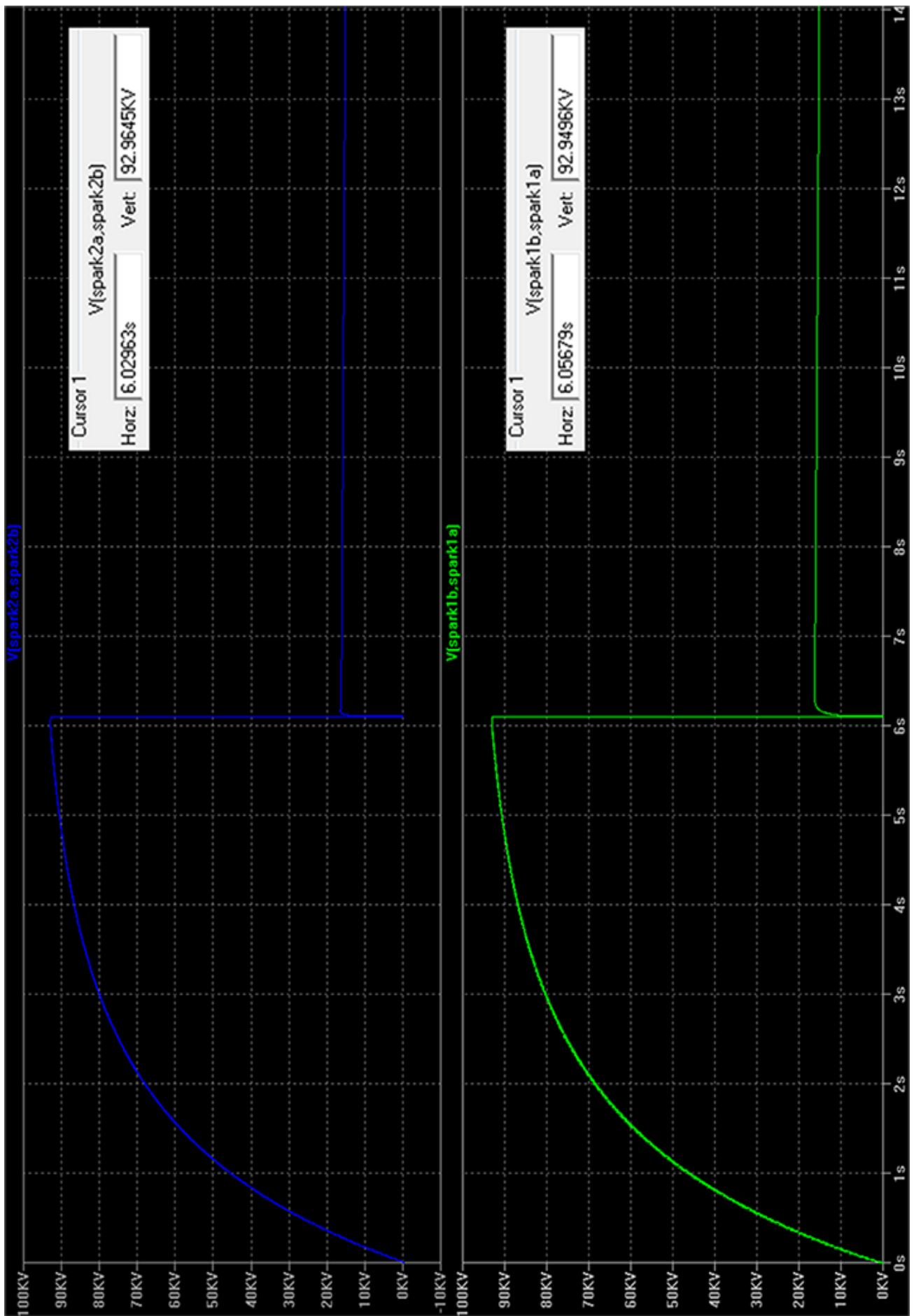


Σχήμα 3.7

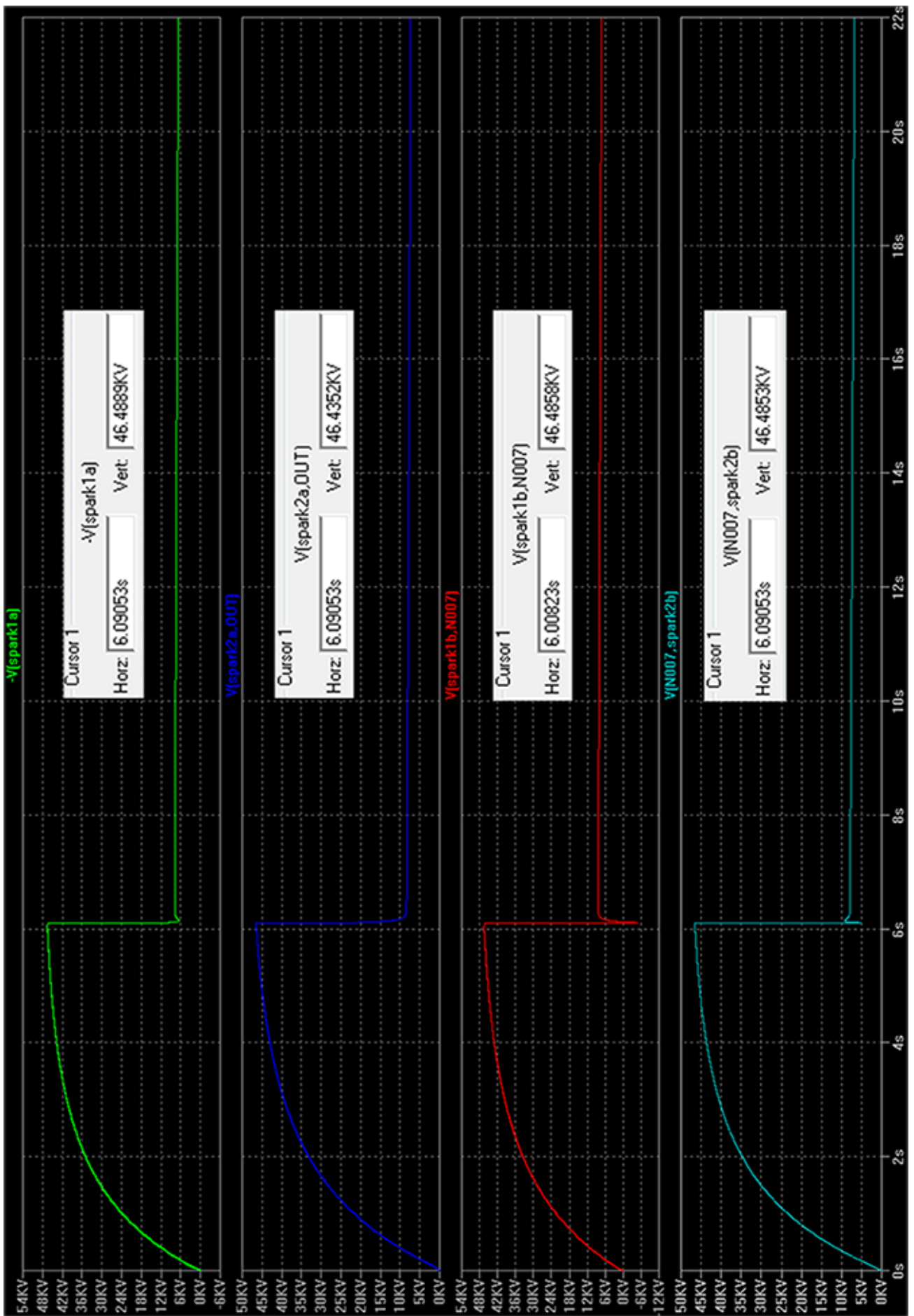




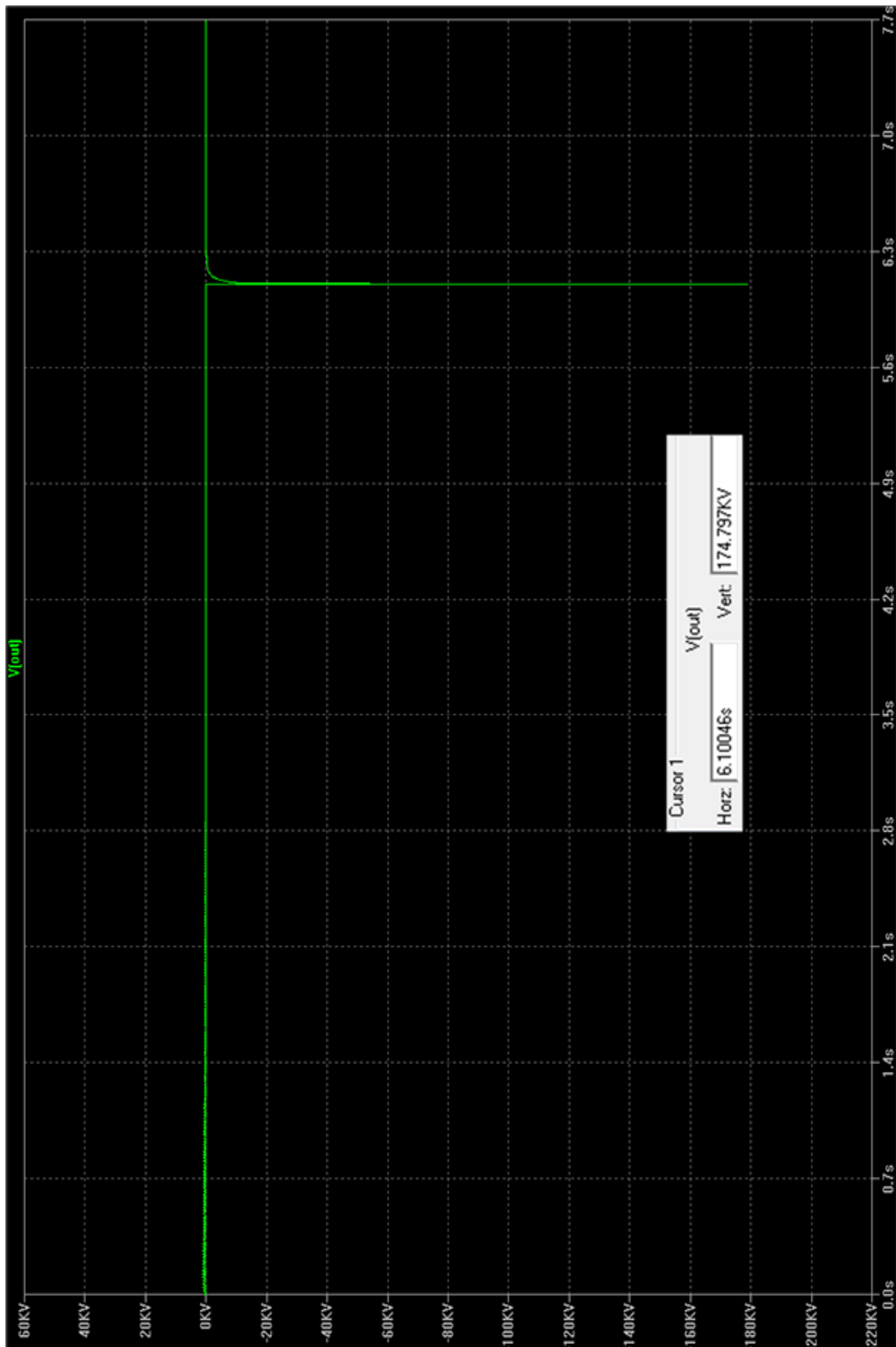
Σχήμα 3.8 Σχηματικό Marx Generator (LTSPICE IV)



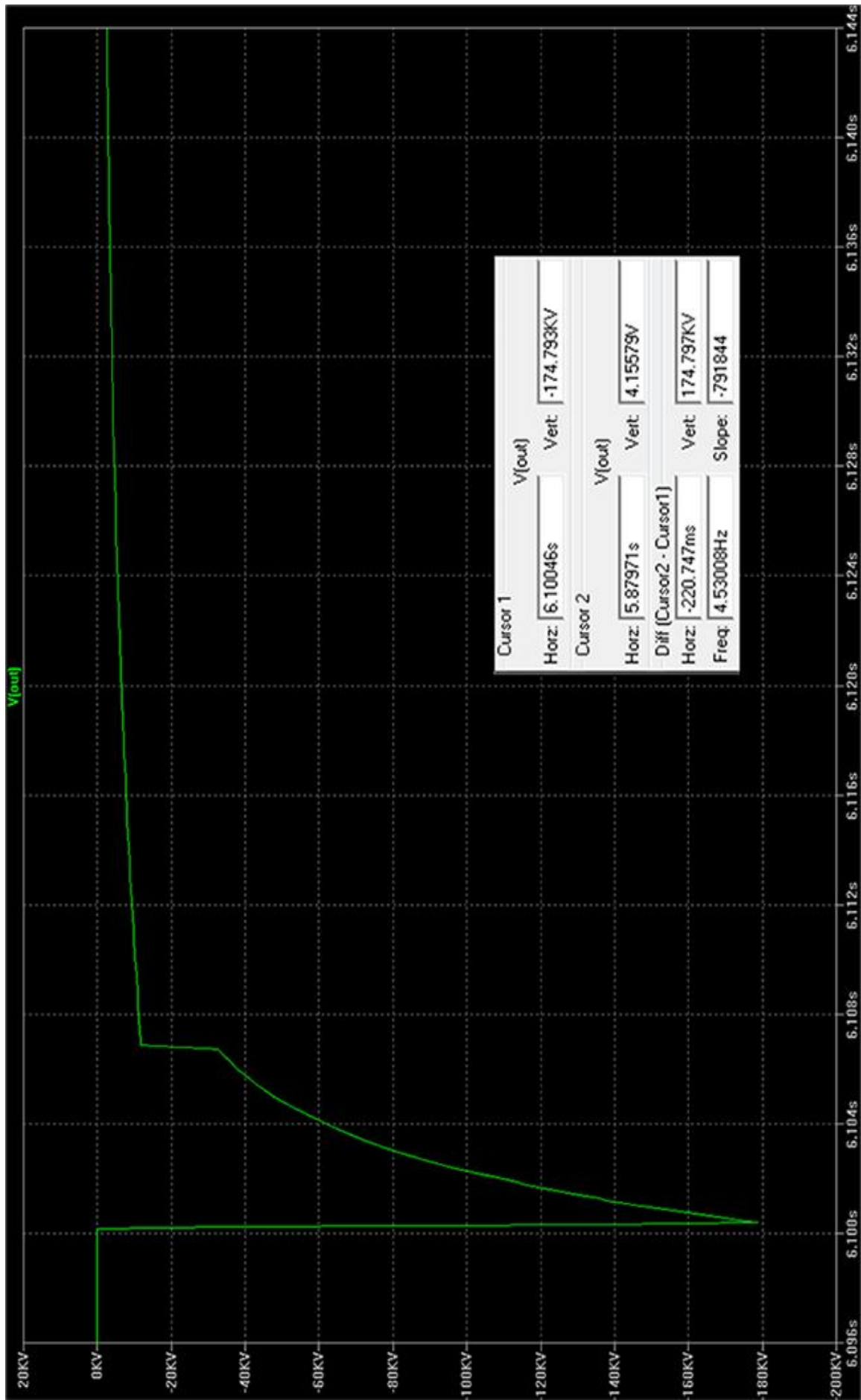
Σχήμα 3.9 Τάση στα spark gaps (LTSPICE IV)



Σχήμα 3.11 Τάση στους τέσσερις πυκνωτές (LTSPICE IV)



Σχήμα 3.12 Τάση στην έξοδο της διάταξης (LT SPICE)



Σχήμα 3.13 zoom in, καμπύλη εξόδου (LTSPICE IV)

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.11 παρατηρούμε τους 4 πυκνωτές της διάταξης σε πλήρη φόρτιση στα 6.09sec με μια ανοχή της τάξης των 10msec και τάση 46.4KV ο κάθε ένας. Στο σχήμα 3.9 η τάση στα spark-gaps φτάνει σε μέγιστη τιμή σε λίγα milliseconds από την εκφόρτιση των τεσσάρων πυκνωτών και έχει τιμή 92.96KV έκαστο, όπου  $V[\text{spark1}] = V[C1] + V[C3]$  και  $V[\text{spark2}] = V[C2] + V[C4]$ . Στην έξοδο της γεννήτριας Marx (σχήμα 3.12) παρατηρείτε παλμός τάσης 178.6KV όπου  $V[\text{OUT}] = V[\text{spark1}] + V[\text{spark2}]$  και ο οποίος συμπίπτει χρονικά με την εκφόρτιση των spark-gaps.

Ο παλμός εξόδου  $V[\text{out}]$  του Marx generator μεταφέρεται μέσω ομοαξονικού καλωδίου διατομής 1 inch στη διάταξη εκπομπής ακτινοβολίας πλάσματος X-pinch. Πρακτικά το τροφοδοτικό της διάταξη X-pinch είναι η γεννήτρια Marx, εφαρμογές της οποίας έχουμε στην Extreme Ultra-violet lithography.

## **ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

### **ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Marx\\_generator](http://en.wikipedia.org/wiki/Marx_generator)
- <http://home.earthlink.net/~jimlux/hv/marx.htm>
- <http://www.penguinlab.com/marx.htm>
- <http://www.fieldp.com/mesh.html>
- <http://www.editorialdigitaltecdemonterrey.com/materialadicional/id212/cap1/LTSpiceGuide.pdf>
- <http://www.electricstuff.co.uk/marxgen.htm>
- <http://www.plusparkstar.com/En/default.asp>
- Τα Σχήματα 2.5, 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.11, 3.12 έχουν εξαχθεί από τα προγράμματα Linear Technology (LT SPICE IV) και SATE (Mesh edu)
- Τα Σχήματα 2.1, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8 έχουν ληφθεί από το κέντρο φυσικής πλάσματος και LASER, Σχολή Εφαρμοσμένων Επιστημών - ΤΕΙ ΚΡΗΤΗΣ.