

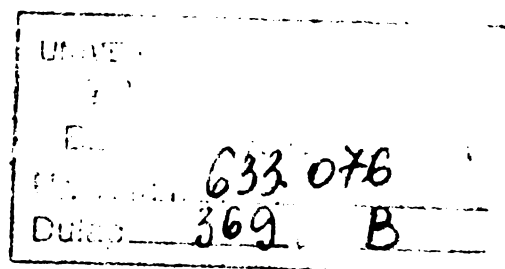
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA” DIN TIMIȘOARA

Facultatea de Mecanică

## TEZĂ DE DOCTORAT

Cercetări privind generarea formei constructive  
a magnetronului în vederea creșterii  
randamentului de conversie magnetică

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA „POLITEHNICA”  
TIMIȘOARA



Conducător științific  
Prof. Univ. Dr. Ing. Aurel Dreucean

Autor  
Ing. Petru Filip

TIMIȘOARA 2001

**Cuprins**

<b>1</b>	<b><u>PARAMETRII ȘI CARACTERISTICILE MAGNETRONULUI</u></b> .....	<b>4</b>
1.1	<u>CARACTERISTICI GENERALE ALE MAGNETRONULUI</u> .....	4
1.2	<u>TUBUL MAGNETRON – STRUCTURĂ ȘI FUNCȚIONARE</u> .....	5
1.2.1	<u>Structura de bază a magnetronului</u> .....	5
1.2.2	<u>Funcționarea magnetronului</u> .....	6
1.2.3	<u>Efectul câmpului magnetic</u> .....	7
1.3	<u>PARAMETRII UNUI MAGNETRON</u> .....	9
1.3.1	<u>Variația termică</u> .....	9
1.3.2	<u>Coeficientul de temperatură</u> .....	10
1.3.3	<u>Indicele de alunezare a frecvenței</u> .....	11
1.3.4	<u>Indicele de alunezare aval (IAA)</u> .....	12
<b>2</b>	<b><u>ÎNCĂLZIREA DIELECTRICILOR ÎN CÂMP DE MICROUNDĂ</u></b> .....	<b>14</b>
2.1	<u>ÎNCĂLZIREA DIELECTRICILOR ÎNTR-UN CÂMP ELECTROMAGNETIC DE ÎNALȚĂ FRECVENȚĂ</u> 14	
2.2	<u>TIPURI FUNDAMENTALE DE MAGNETROANE ȘI PRINCIPIUL LOR DE FUNCȚIONARE</u> .....	29
2.3	<u>MIȘCAREA ELECTRONULUI ÎN MAGNETRONUL PLAN. REGIMUL STATIC</u> .....	34
2.3.1	<u>Regimul static al magnetronului cilindric. Parabola regimului critic</u> .....	38
2.3.2	<u>Regimul dinamic al magnetronului plan</u> .....	41
2.3.3	<u>Circuitul magnetronului și distribuția câmpului electromagnetic</u> .....	45
2.3.4	<u>Regimul dinamic al magnetronului cu anodul prevăzut cu cavitate</u> .....	53
	<u>Caracteristica de sincronizare și randamentul magnetronului</u> .....	53
<b>3</b>	<b><u>PRINCIPIUL DE FUNCȚIONARE A MAGNETRONULUI</u></b> .....	<b>58</b>
3.1	<u>FUNCȚIONAREA MAGNETRONULUI</u> .....	58
3.2	<u>CONTROLUL MODULUI DE FUNCȚIONARE SUPERIOR</u> .....	61
3.2.1	<u>Câmpuri r.f. reduse în anod</u> .....	61
3.2.2	<u>Stabilitate mai mare a frecvenței</u> .....	61
3.2.3	<u>Reglajul magnetronului cu diode</u> .....	62
3.3	<u>STUDIUL CU AJUTORUL MIȘCĂRII MAGNETRONULUI ASUPRA FORȚILOR ELECTRICE RADIALE ÎNTR-UN ELEMENT CILINDRIC ICR</u> .....	62

3.4	<u>MAGNETROANE CU FRECVENȚĂ ALEATORIE</u> .....	66
<b>4</b>	<b><u>CERCETĂRI PRIVIND GENERAREA FORMEI CONSTRUCTIVE A MAGNETROANELOR</u></b> .....	<b>70</b>
4.1	<u>MATERIALE ȘI TEHNOLOGIILE FOLOSITE ÎN CONSTRUCȚIA MAGNETROANELOR</u> .....	70
4.1.1	<u>Catodul</u> .....	70
4.1.2	<u>Anodul</u> .....	72
4.1.3	<u>Dielectrici</u> .....	85
4.1.4	<u>Asamblarea finală</u> .....	90
<b>5</b>	<b><u>TEHNOLOGIA DE VIDARE ȘI FORMARE A MAGNETRONULUI</u></b> .....	<b>93</b>
5.1	<u>CONSIDERAȚII GENERALE</u> .....	93
5.2	<u>DISPOZITIVE ȘI SCULE NOI FOLOSITE ÎN PRODUCȚIA MAGNETROANELOR</u> .....	96
5.2.1	<u>Tehnologie și scule folosite la prelucrarea lamelelor</u> .....	97
5.2.2	<u>Utilaje specifice lipirii metal-metal</u> .....	98
5.2.3	<u>Utilaje specifice lipirii metal-sticlă</u> .....	104
5.2.4	<u>Stand pentru vidare</u> .....	107
5.2.5	<u>Considerații finale</u> .....	108
<b>6</b>	<b><u>TIPURI DE DEFECTE ALE MAGNETRONULUI</u></b> .....	<b>111</b>
6.1	<u>TIPURI DE DEFECTE SPECIFICE CATODULUI</u> .....	111
6.2	<u>TIPURI DE DEFECTE SPECIFICE ANODULUI ȘI CAVITĂȚII REZONANTE</u> .....	116
6.3	<u>TIPURI DE DEFECTE SPECIFICE MODULULUI DE CUPLARE CU SARCINA</u> .....	120
6.4	<u>TIPURI DE DEFECTE SPECIFICE MODULULUI DE ACORD AL MAGNETRONULUI</u> .....	122
6.5	<u>TIPURI ȘI DEFECTE SPECIFICE DE RĂCIRE</u> .....	124
6.6	<u>TIPURI DE DEFECTE SPECIFICE MODULUI DE ALIMENTARE (<math>U_a</math>, <math>I_a</math> și <math>B_0</math>)</u> .....	127
<b>7</b>	<b><u>DETERMINAREA TOLERANTELOR PENTRU DIMENSIUNILE ANODULUI</u></b> 128	
7.1	<u>GEOMETRIA BLOCULUI ANODIC</u> .....	128
7.1.1	<u>Observații introductive</u> .....	128
7.2	<u>ALEGEREA SISTEMULUI DE TOLERANȚE PENTRU DIMENSIUNILE GEOMETRICE ALI NODURILOR ȘI PIESELOR MAGNETROANELOR</u> .....	129
7.3	<u>METODE DE CONTROL A TOLERANTELOR LA FABRICAȚIA MAGNETROANELOR</u> .....	135

<b>8</b>	<b><u>PROGRAM DE CALCUL PENTRU GENERAREA FORMEI CONSTRUCTIVE A MAGNETRONULUI ÎN VEDEREA CREȘTERII RANDAMENTULUI DE CONVERSIE MAGNETICĂ</u></b> .....	<b>139</b>
8.1	<u>OBIECTIVE VIZATE - MEDII DE PROGRAMARE UTILIZATE</u> .....	139
	<i>8.1.1. Obiective vizate în timpul cercetărilor</i> .....	139
	<i>8.1.2. Medii de programare utilizate</i> .....	140
8.2	<u>PROGRAME SURSĂ - EXEMPLE DE CALCUL</u> .....	140
	<i>8.2.1. Exemple de calcul pentru îmbunătățirea randamentului de conversie magnetică a magnetronului cu ajutorul programului realizat în Microsoft Visual FoxPro 6.0</i> 155	
8.3	<u>CONCLUZII FINALE - AVANTAJELE UTILIZĂRII PROGRAMELOR</u> .....	159
<b>9</b>	<b><u>BIBLIOGRAFIE</u></b> .....	<b>161</b>

## 1 PARAMETRII ȘI CARACTERISTICILE MAGNETRONULUI

### 1.1 Caracteristici generale ale magnetronului

Până la apariția clistronului de putere cu mai multe cavități, magnetronul a fost singurul tub electronic de putere utilizabil la frecvențe foarte înalte.

Magnetronul este un tub electronic de construcție robustă, nu prea complicată, și de dimensiuni reduse, care lucrează în regim sinusoidal sau în impulsuri dând puteri de ordinul zecilor de kilowați sau al megawaților, cu randament ridicat.

Randamentul magnetronului, superior randamentului celorlalte tipuri de tuburi electronice de frecvență foarte înaltă, se datorește interacțiunii îndelungate între câmpul electromagnetic de înaltă frecvență și fasciculul de electroni. Această interacțiune îndelungată are loc în timp ce electronii se deplasează în jurul catodului în spațiul catod-anod.

Datorită cavităților rezonante prevăzute în anod, câmpul electromagnetic are la rezonanță intensitate mare, astfel încât la obținerea puterii de foarte înaltă frecvență contribuie atât timpul de interacțiune îndelungat cât și intensitatea mare a câmpului electric.

Studiul fenomenelor care au loc în magnetron este mai complex decât cel al fenomenelor din tuburile cu deplasarea electronilor pe traiectorii rectilinii (clistronul sau tubul electronic cu undă progresivă). Utilizarea câmpului magnetic și electric obligă electronul să se deplaseze pe o traiectorie complicată în jurul catodului și permite să se realizeze gruparea electronilor ca și frânarea lor la vitezele foarte mici cu care ating anodul.

Studiul mișcării electronului nu mai reprezintă o problemă reductibilă la o dimensiune ca, de exemplu, la clistron, ci o problemă privind mișcarea electronului în spațiu.

Existența mai multor moduri de lucru, caracterul de tub cu "câmp învârtitor" și cu cavități rezonante, ilustrează procesele complexe care au loc în timpul funcționării magnetronului.

Magnetronul prezintă dezavantajul de a lucra într-o bandă de frecvențe îngustă. Pentru a înlătura acest dezavantaj se iau măsuri speciale, ca acordul mecanic sau electronic. Magnetronul poate lucra în unde decimetrice, centimetrice și milimetrice.

## 1.2 Tubul magnetron – Structură și funcționare

### 1.2.1 Structura de bază a magnetronului

Nucleul unui sistem de frecvență înaltă este magnetronul. Acesta este un tub electronic de tip diodă care se folosește la producerea energiei de 2.450 MHz. Este clasificat ca o diodă pentru că nu are grilă (rețea) așa cum are un tub electronic normal. Un câmp magnetic interpus între anod și catod funcționează ca o grilă. În timp ce configurația externă poate varia, structura de bază internă este aceeași și la diferiți magnetroni. Aceasta include anodul, filamentul, catodul, antena și magneții.

Anodul este un cilindru de fier cu cavități cu un număr par de palete în interior (Figura 1.1). zonele în formă de trapez dintre palete sunt cavitățile rezonante care funcționează ca circuite acordate și care determină frecvența de ieșire a tubului. Anodul operează astfel încât segmentele alternate trebuie corectate sau îmbinate, pentru ca fiecare segment să fie opus ca polaritate segmentului din oricare parte. În acțiune cavitățile sunt conectate în paralel în ceea ce privește ieșirea.

Filamentul (sau catod) care funcționează ca și catodul tubului, este amplasat în centrul magnetronului și este susținut de conductorii filamentului care sunt întinși și rigizi, etanșați în tub și ecranati.

Antena este un senzor sau antenă buclă care este conectată la anod și se extinde într-una din cavitățile acordate. Antena este cuplată la ghidul de unde, o incintă de metal cu cavități, în care antena transmite energia RF.

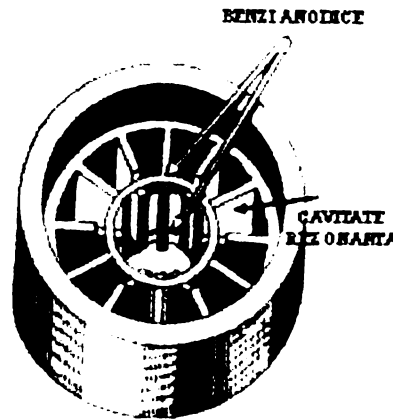


Figura 1.1

Câmpul magnetic este format de magneți puternici, permanenți, care sunt montați în magnetron pentru ca acest câmp magnetic să fie paralel cu axa catodului.

### 1.2.2 Funcționarea magnetronului

Această teorie se bazează pe mișcarea electronilor sub influența combinată a câmpurilor electrice și magnetice. Pentru ca tubul să funcționeze electronii trebuie să curgă de la catod la anod. Această traiectorie este guvernată de două legi fundamentale:

1. Forța exercitată de un câmp electric asupra unui electron este proporțională cu forța câmpului. Electronii tind să se mute de la un punct cu potențial negativ către unul cu potențial pozitiv. Figura 1.1A arată mișcarea uniformă și directă a electronilor într-un câmp electric în absența unui câmp magnetic, de la catod la anod.
2. Forța exercitată asupra unui electron într-un câmp magnetic este perpendiculară atât pe câmp cât și pe traiectoria electronului (este la unghiuri drepte atât către câmpul în sine, cât și către traiectoria electronului)

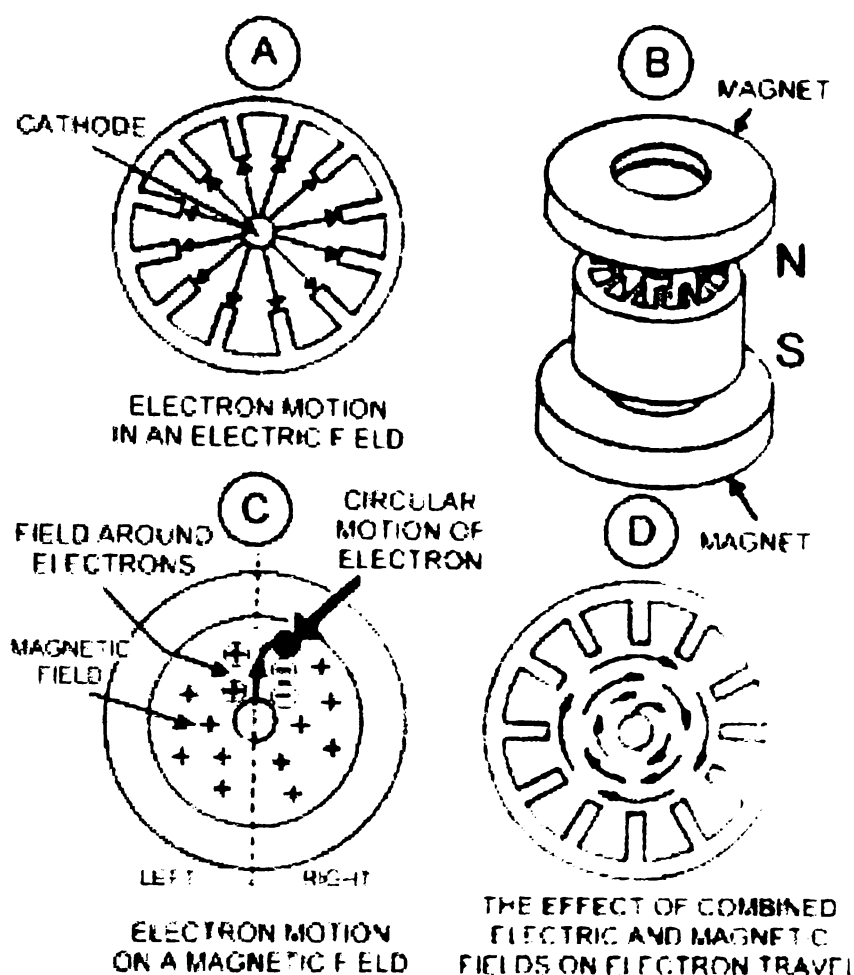


Figura 1.1

### 1.2.3 Efectul câmpului magnetic

În Figura 1.1B sunt adăugați 2 magneti permanenți deasupra și dedesubtul structurii tubului. În Figura 1.1C, se prezintă distribuția electronilor în jurul câmpului magnetic. Cel de jos magnetul polul sud este amplasat în partea de jos a paginii, deci câmpul magnetic pare să vină chiar prin pagină. Așa cum electroni care curg printr-un conductor cauzează un câmp magnetic pentru a se aduna în jurul aceluiași conductor, tot așa un electron care se mișcă prin spațiu tinde să-și construiască în jur un câmp magnetic. Într-o parte (stânga) a traiectoriei electronului, acest câmp magnetic indus se adaugă la câmpul magnetic permanent. În cealaltă parte (dreapta) a traiectoriei sale, are un efect opus de substragere din câmpul magnetic permanent. Câmpul magnetic din partea dreaptă este deci slăbit și traiectoria electronului se înclină în acea direcție, rezultând o mișcare circulară către anod.

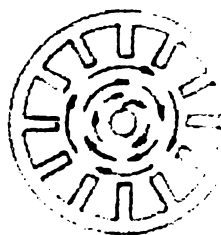


Procesul începe cu un voltaj slab aplicat filamentului care cauzează încălzirea (voltajul filamentului este de obicei 3 – 4 VAC, în funcție de fabricație și model), într-un magnetron filamentul funcționând ca și un catod. Temperatura crește și cauzează o activitate moleculară crescută în interiorul catodului, până la "fierbere" sau emiterea de electroni.

Electroni care părăsesc suprafața unui filament încălzit pot fi comparați cu moleculele care părăsesc suprafața apei care fierbe, sub formă de aburi. Spre deosebire de apă electronii nu se evaporă. Ei plutesc pe suprafața catodului, așteptând un moment de plecare. Electronii fiind sarcini negative, sunt respinși puternic de alte sarcini negative. Deci acest nor plutitor de electroni ar fi respins oricum de catod. Distanța și viteza traseului crește cu intensitatea sarcinii negative aplicate. Momentul mecanic este astfel oferit de o sarcină negativă de 4.000 volți DC, care este produsă de transformatorul de frecvență înaltă și de acțiunea dublă a diodei de frecvență înaltă și de capacitor (4.000 de volți este media, voltajul real variază în funcție de fabricație și model).

Un potențial de 4.000 volți negativ asupra catodului pune un potențial de 4.000 volți pozitiv asupra anodului. Nu mai e nevoie să spunem că electronii "zboară" de la catod ca niște mici rachete. Ei se deplasează spre anod, sau, cel puțin încearcă.

Pe măsură ce electronii se reped asupra obiectivului, întâlnesc câmpul magnetic puternic al celor doi magneti permanenți. Aceștia sunt poziționați în așa fel încât câmpurile magnetice sunt aplicate paralele cu catodul. Efectul câmpurilor magnetice tinde să devieze electronii în mișcare de la anod.



**Figura 1.1**

Figura 1.1 arată efectul combinat al câmpului magnetic și al celui electric pe traiectoria electronului. În loc să se îndrepte direct către anod aceștia deviază pe o traiectorie perpendiculară a direcției lor anterioare, rezultând o orbită circulară în jurul catodului, orbită care în cele din urmă ajunge la anod.

Norul turbionar de electroni, influențat de frecvența înaltă și de câmpul magnetic puternic formează un model rotativ care seamănă cu spițele dintr-o roată care se învârt, ca în Figura 1.2. Interacțiunea acestei roți cu sarcină spațială cu configurația suprafeței anodului produce un flux de curent alternativ în cavitățile rezonante ale anodului.

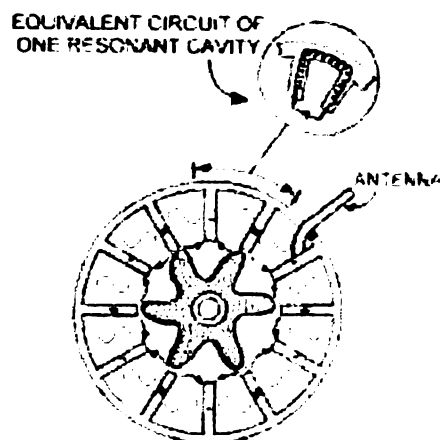


Figura 1.2

Aceasta se explică astfel: pe măsură ce o "spică" de electroni se apropie de o paletă a anodului (sau segmentul dintre două cavități), induce o sarcină pozitivă în acel segment. Când electronii au trecut, sarcina pozitivă se diminuează în primul segment în timp ce o altă sarcină pozitivă este indusă în următorul segment. Curentul este indus pentru că structura fizică a anodului formează echivalentul unei serii de circuite de înaltă rezonanță inductivă – capacitivă (LC). Q. efectul îmbinării segmentelor alternante este de a conecta circuitele LC în paralel.

### 1.3 Parametrii unui magnetron

#### 1.3.1 Variația termică

Atunci când o tensiune electrică înaltă este aplicată unui magnetron, echilibrul termic al mecanismului este brusc schimbat. Aripile anodului se încălzesc la capete datorită bombardării cu electroni și întreaga structură anod catod suferă o schimbare tranzitorie în configurația termică. În timpul necesitat de fiecare parte a magnetronului pentru a se stabili la temperatura normală de funcționare, frecvența de ieșire va "varia". Curba frecvenței de ieșire în funcție timpul care urmează porniri

inițiale se numește curba "variației termice". În general variația maximă apare în decursul primelor minute după pornire și se apropie încet de echilibru într-o perioadă de 10 – 30 de minute în funcție de masa structurii, puterea de ieșire, tipul de răcire și proiectul de bază al magnetronului.

Curbele de variație termică întâlnite la diferitele tipuri magnetroane care funcționează la aceeași frecvență și putere de ieșire pot fi foarte diferite. Fiecare tip este de regulă proiectat pentru un scop anume și diferențele subtile în configurația internă pot produce diferențe radicale în curba variației termice.

Trebuie observat că efectul unei variații termice nu va apărea la pornirea inițială, ci oricând puterea de intrare de vârf sau medie a magnetronului este schimbată, de exemplu o schimbare a duratei impulsului, viteza de repetiție a impulsurilor sau regimul de funcționare.



**Figura 1.1**

Figura 1.1 arată curbele de variație termică tipice pentru un magnetron special înregistrat ca o funcție a regimului. Linia punctată curba între 0,001 și 0,005 (0,007) indică efectul unei schimbări în regim de la 0,001 la 0,005 după ce echilibrul termic a fost inițial atins.

### 1.3.2 Coeficientul de temperatură

După ce a trecut perioada de variație termică și s-a atins o frecvență stabilă de funcționare, modificările condițiilor ambiante care cauzează o modificare corespunzătoare în temperatura magnetronului va produce o modificare în frecvența de ieșire. În acest context modificările de ambient include temperatura aerului de răcire sau presiunea la magnetroanele cu răcire cu aer; temperatura plăcii portante la magnetroanele cu răcire cu mediu absorbant de căldură și viteza de curgere / debitul sau temperatura la magnetroanele cu răcire cu lichid.

Modificarea frecvenței de ieșire a magnetronului pentru modificarea fiecărui grad în temperatura corpului / carcasei, măsurată într-un punct specificat pe partea exterioară a carcasei magnetronului este definită ca și coeficientul de temperatură a

magnetronului și este de obicei exprimat în MHz / °C. În majoritatea magnetronurilor coeficientul de temperatură este un număr negativ (frecvența descrește pe măsură ce temperatura crește) și este esențial constant în timpul duratei de funcționare a magnetronului.

Atunci când se estimează modificarea frecvenței magnetronului datorată coeficientului de temperatură, trebuie reținut faptul că acest coeficient de temperatură raportează frecvența magnetronului la temperatura corpului / carcusei și nu este neapărat o relație 1:1 dintre temperatura corpului / carcusei și, de exemplu, temperatura mediului ambiant. În plus, pentru sisteme aeriene, efectul de răcire a temperaturii aerului la altitudine se poate compensa printr-o reducere corespunzătoare a densității aerului.

### 1.3.3 Indicele de alunecare a frecvenței

Indicele de alunecare a frecvenței (IAF) a unui magnetron este definit ca modificarea în frecvența magnetronului datorată unei modificări în curentul catodic de vârf. Referindu-ne la teoria discutată anterior s-a observat că frecvența rezonantă a unui rezonator cu palete este determinată de dimensiunile lui mecanice, plus efectul reactiv al oricărei perturbații. Prezența electronilor în vecinătatea capetelor paletelor afectează capacitatea electrică a rezonatorului cu o cantitate proporțională cu densitatea electronilor, și, de vreme ce densitatea electronilor este în mod similar raportată la curentul de vârf al impulsului, modificările la nivelul curentului impulsului va produce modificări în frecvența de ieșire. IAF exprimat în MHz / Amp este reprezentat de panta unei frecvențe opus curbei curentului de vârf trasată pentru un anumit tip de magnetron.

Din curba din Figura 1.1 se poate observa că panta nu este constantă pe întregul interval al curentului de operare. De aceea nu are rost să vorbim de o valoare specifică pentru IAF dacă nu se specifică intervalul curentului de vârf pe care se aplică.

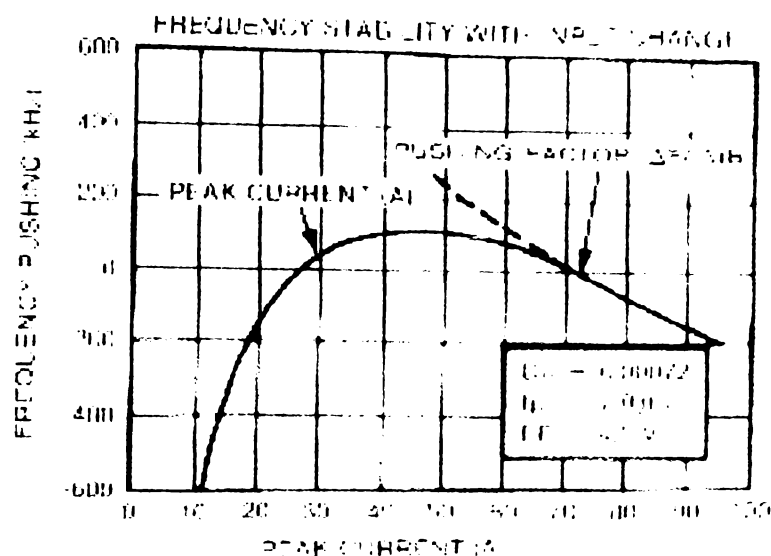


Figura 1.1

Trebuie reținut faptul că de vreme ce puterea de ieșire este proporțională cu curentul de vârf într-un magnetron, IAF la nivele de curent de vârf mult sub punctul normal de operare al magnetronului sunt de obicei neimportante pentru că puterea de ieșire la aceste nivel de curent este mică.

Lucrul important a unui IAF aproape de punctul de operare a magnetronului este că IAF va determina intra-impulsul FM (modulație de frecvență) și deci va afecta calitatea spectrală a impulsului de emisie.

#### 1.3.4 Indicele de alunecare aval (IAA)

Indicele de alunecare aval (IAA) este definit ca modificarea maximă în frecvența de ieșire care rezultă atunci când o dereglare externă de amplitudine fixă, amplasată în ghidul de unde de ieșire, este mutată la o distanță de o jumătate de lungime de undă relativă față de magnetron.

Exprimat oarecum mai puțin formal IAA este o măsură a abilității magnetronului de a menține o frecvență constantă de ieșire, chiar dacă sunt modificări de dezechilibru ale sarcini.

În timpul proiectării unui magnetron gradul de cuplare electrică a ghidului de unde de ieșire la structura rezonatorului intern este selectat pentru a optimiza anumiți parametri de funcționare. Cuplările puternice cresc puterea de ieșire și eficiența dar de asemenea cresc și fluctuația în timp și sensibilitatea la modificarea dezechilibrelor

de sarcină. În general cuplarea se alege pentru a obține cel mai bun compromis între eficiență și stabilitate.

În funcție de relația de fază dintre incident și puterea reflectată la orificiul de ieșire al magnetronului, puterea reflectată va apărea ca și o reactanță de-a lungul transformatorului de cuplare modificând efectiv gradul de cuplare. De aceea folosind un dezechilibru fix și variind distanța de la orificiul de ieșire al magnetronului se determina variația frecvenței magnetronului și a puterii de ieșire.

Pentru a standardiza puterile de măsurare, IAA este în mod normal măsurat folosind 1,5:1 VSWR (raport al tensiunilor de unde staționare); totuși la magneetroane de foarte mare putere, se folosește adesea un VSWR de 1,3:1. Atunci când se face referire la IAA a unui magnetron se va indica întotdeauna valoarea VSWR folosită la măsurare.

## 2 ÎNCĂLZIREA DIELECTRICILOR ÎN CÂMP DE MICROUNDRE

### 2.1 Încălzirea dielectricilor într-un câmp electromagnetic de înalta frecvență

Microundele sunt unde electromagnetice la care frecvența nu este fixată exact dar care se situează într-o gamă mergând aproximativ de la 300 MHz la 100 GHz. Proprietățile lor generale sunt descrise de ecuațiile lui Maxwell facilitând intervenția mărimilor caracteristice ale undelor electromagnetice: intensitatea câmpului electric și inducția electrică ( $E$  și  $D$ ), și intensitatea câmpului magnetic și inducția magnetică ( $H$  și  $B$ ).

Microundele sunt absorbite de apă, albumine, proteine, de alimentele în general și de un număr mare de diverse materiale. Absorbția se produce prin transformarea energiei lor în căldură. Spectrul hiperfrecvenței se divide în numeroase benzi alocate în diverse utilizări specifice (Tabelul 2.1). Frecvențele rezervate aplicațiilor microundelor în domeniul industriei, științei și medicinei sunt între 434, 915 MHz și 2450 MHz.

La această frecvență, profunzimea penetrației unde electromagnetice în materiale este de ordinul centimetrilor și încălzirea se face prin disiparea puterii în interiorul materialelor considerate.

Efectul microundelor asupra unui material depinde mult de proprietățile fizice din interiorul său. Deci rezultă că un material care are în mijlocul său mari pierderi dielectrice se va încălzi mai ușor decât materiale cu pierderi dielectrice slabe.

Datorită acestei proprietăți apa și în consecință produsele umede, se vor plasa în prima categorie, căci ele sunt bune captatoare de energie de microunde. Microundele pătrund în volumul materialului încălzit direct în interiorul său, unde energia electromagnetică este transformată în căldură. Localizarea sursei de căldură nu e limitată la periferia materialului, acesta va fi situată în interiorul materialului.

Mecanismul de absorbție a energiei electromagnetice a unui material depinde mult de proprietățile fizice din mijlocul său, implicit și efectul microundelor asupra sa.

Tabelul 2.1

Frecvența		Lungimea de undă	Denumire	
Hz	MHz	M		
$10^6$	1	300	Unde mijlocii	Unde herțiene
	3	100		
	6	50		
$10^7$	10	30	Unde scurte	
	30	10		
	60	5		
$10^8$	100	3	Unde ultrascurte	
	300	1		
$10^9$	1000	0,3	Unde centimetrice	
	3000	0,1		
	6000	0,05		
$10^{10}$	10000	0,03	Unde calorice	
	30000	0,01		
$10^{11}$	100000	$3 \times 10^{-3}$		
	300000	$1 \times 10^{-3}$		
$10^{12}$				Unde infraroșii
$10^{13}$				
$10^{14}$	$375 \times 10^{13}$	$0,8 \times 10^{-6}$		Unde roșii
				Spectru vizibil
				Unde violete
$10^{15}$	$75 \times 10^{13}$	$0,4 \times 10^{-6}$		Unde ultraviolete

Propagarea unei unde electromagnetice într-un mediu dielectric este descrisă de ecuațiile lui Maxwell:

$$\operatorname{rot} E = - \frac{\partial B}{\partial t} \quad (2.1)$$



$$\operatorname{rot}E = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\operatorname{div}B = 0 \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div}D = 0 \quad (2.4)$$

unde  $E$  și  $D$  sunt vectorii intensitatea câmpului electric și inducția electrică,  $H$  și  $B$  sunt vectorii intensitatea câmpului magnetic și inducția magnetică, iar  $J$  este vectorul densității de curent electric total.

Vectorii nu sunt independenți și în mediile izotope ei au relațiile complementare clasice.

$$D = \varepsilon E \quad (2.5)$$

$$B = \mu H \quad (2.6)$$

unde  $\varepsilon$  este permitivitatea dielectrică și  $\mu$  permeabilitatea magnetică.

Numeroase corpuri prezintă dipoli electrici care sunt orientați după direcția câmpului electric aplicat, acesta reprezentând fenomenul rotației dipolare. Materialul polarizat este caracterizat de permitivitatea dielectrică, iar dacă acest mediu este un dielectric perfect (fără sarcină electrică liberă și fără pierdere dielectrică prin frecare) vom avea  $\sigma=0$  iar  $\varepsilon$  este real, unde  $\sigma$  este conductivitatea electrică.

Frecarea fiind intermoleculară, mișcarea dipolilor nu urmează variația câmpului de excitație, aceasta va conduce la disiparea termică în material, iar dielectricul este atunci cu pierderi. În acest caz se ține cont de densitatea curentului de conducție  $J_c$  care caracterizează conducția ionică:

$$J_c = \sigma E \quad (2.7)$$

Dacă nu există frecare, va rezulta o densitate de curent de deplasare  $J_d$  care caracterizează rotația dipolară:

$$J_d = \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.8)$$

Curentul de deplasare nu mai este în fază cu  $\partial E / \partial t$  și permitivitatea dielectrică  $\varepsilon$  nu mai este reală, dar ia o valoare complexă,  $\sigma \neq 0$ :

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.9)$$

$\varepsilon'$  = coeficient de dispersie

$\varepsilon''$  = coeficient de pierdere prin relaxare dipolară.

În dielectric, densitatea curentului total este deci:

$$J = J_D + J_C \quad (2.10)$$

Dacă ne vom plasa în regim armonic  $\frac{\partial}{\partial t} = j\omega$  atunci legea circuitului magnetic se scrie, în cazul în care ne aflăm în afara surseilor:

$$\nabla \times H = J = (\sigma + j\omega\varepsilon)E \quad (2.11)$$

Deci aproximativ:

$$J = j\omega \left( \varepsilon' - j \left( \varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \right) \right) E \quad (2.12)$$

Sau dacă se înlocuiește:

$$\varepsilon''_p = \varepsilon'' + \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.13)$$

dar

$$\varepsilon' = \varepsilon_0 \varepsilon_r \quad (2.14)$$

unde  $\varepsilon_0$  este permitivitatea dielectrică a vidului și  $\varepsilon_r$  este permitivitatea dielectrică relativă a mediului.

Constanta dielectrică complexă devine:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon''_p \quad (2.15)$$

unde  $\varepsilon_p''$  este constanta dielectrică echivalentă, reprezentând pierderile prin relaxare și prin conducție. În material acestea sunt cele care caracterizează puterea de penetrare a undelor și capacitatea lor de încălzire pentru cazul unei frecvențe date. Se definește la fel o altă mărime caracteristică materialului și anume: unghiul de pierderi  $\delta^*$ , care reprezintă defazarea între câmp și curentul total și se folosește următoarea relație:

$$\operatorname{tg} \delta^* = \frac{\varepsilon_p''}{\varepsilon_p'} \quad (2.16)$$

iar pentru dielectricii "reputați" fără pierderi, tangenta unghiului de pierderi este de ordinea de  $10^{-3}$  la  $10^{-4}$ .

Dacă vom considera o undă electromagnetică plană ce se propaga urmând direcția  $z$  (Figura 2.1) într-un mediu cu pierderi, intensitatea câmpului electric are forma:

$$E = E_{\max} e^{j(\omega t - \beta z) - \alpha z} \quad (2.17)$$

Cu constanta de propagare:

$$\gamma = j\omega\sqrt{\varepsilon^* \mu} = \alpha + j\beta \quad (2.18)$$

Unde  $\alpha$  este un factor de atenuare  $\beta$  termen de fază.

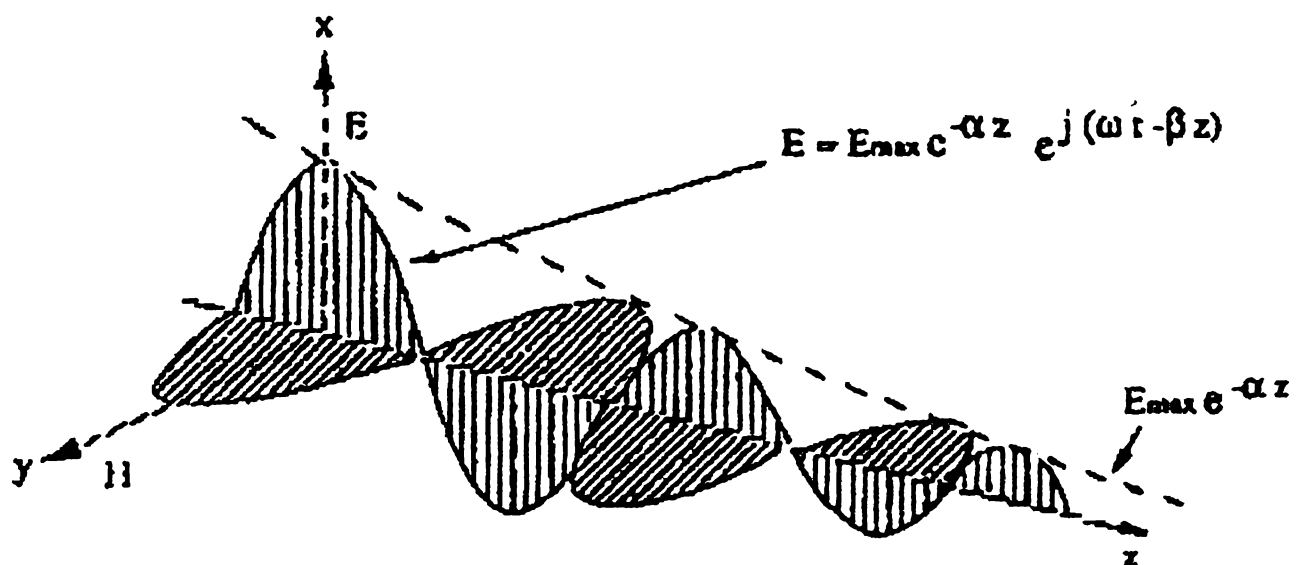


Figura 2.1

Unda este deci atenuată la traversarea mediului, iar aici se pierde energie. Se poate defini adâncimea de pătrundere,  $D_p$  ca distanța de la suprafața materialului la care puterea scade la  $e^{-1}$  din valoarea ei până la suprafață, având următoarea expresie:

$$D_p = \frac{1}{2\alpha} \quad (2.19)$$

Pentru cazul dielectricilor cu pierderi, această relație devine:

$$D_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\epsilon''}}{2\pi\epsilon_p'} \quad (2.20)$$

Unde  $\lambda_0$  este lungimea de undă a vidului.

Deci constatăm că adâncimea de pătrundere este funcție de lungimea de undă (funcție față de inversul frecvenței). Această remarcă este luată în considerare în alegerea frecvenței de lucru și în eficacitatea tratării materialelor cu ajutorul microundelor. Încălzirea în câmp de microunde va face deci să intervină mărimile fizice caracteristice materialului, pe care noi le-am presupus constante. Dificultatea studiilor teoretice rezidă din faptul că aceste valori sunt în realitate funcție nu numai de frecvență, de exemplu cum ar fi în cazul uscării, sunt funcție de umiditatea și temperatura produsului.

Numeroase studii prezintă variația acestor caracteristici pentru diferite materiale și în funcție de diferiți parametri. Figura 2.2, Figura 2.3, Figura 2.4 prezintă în acest sens câteva rezultate interesante.

În același timp în practică, complexitatea amestecului în cazul aliajelor și condițiile de operare, fac să iasă în evidență delicatetea cu care trebuie produse eșantioanele pentru a păstra aceleași mărimi fizice de la o experiență la alta.

Este cunoscut faptul că coeficientul de pierderi  $\epsilon''$  a lichidelor polarizate evoluează în mod caracteristic în funcție de frecvență (Figura 2.2B), iar coeficientul de dispersie  $\epsilon'$  (Figura 2.2A) descrește uniform atunci când partea imaginară  $\epsilon''$  (Figura 2.2B) trece prin maximum.

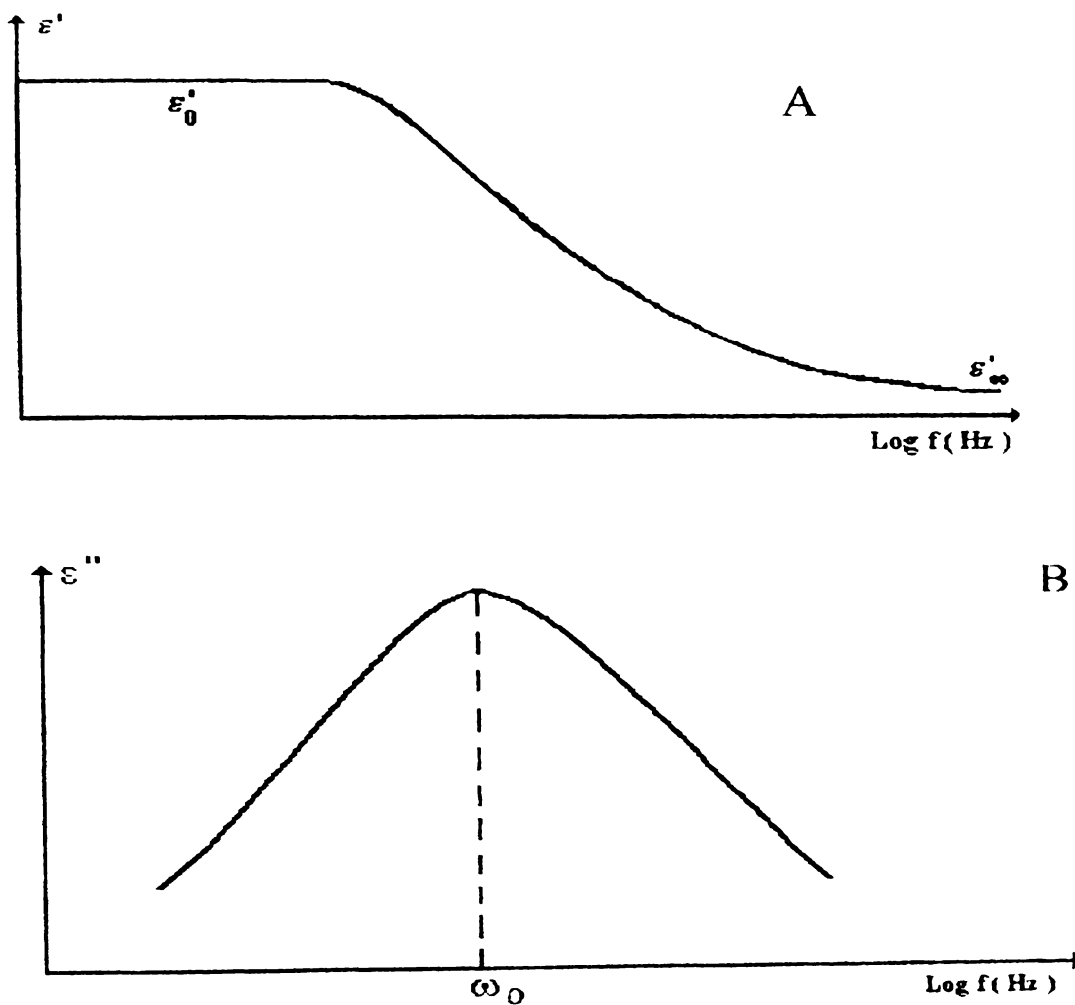


Figura 2.2

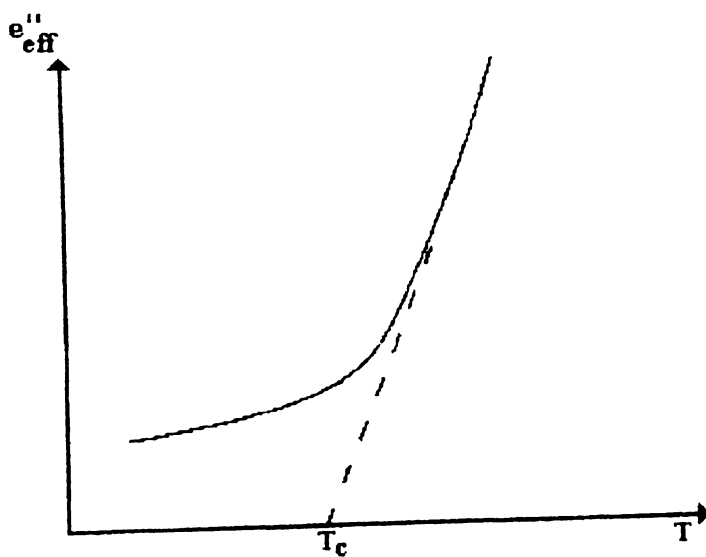


Figura 2.3

Valoarea maximă a abscisei definește o frecvență, numită frecvența de relaxare.

Variația factorului de pierdere în funcție de temperatură este reprezentată în Figura 2.3. La temperaturi joase acest factor de pierdere practic nu e afectat de temperatură. Însă începând de la temperatura critică,  $T_c$ , acest factor crește într-un mod semnificativ cu temperatura. Profunzimea penetrației în cazul apei crește în funcție de temperatură. Această profunzime este cu atât mai mare cu cât frecvența este mai mică (Figura 2.4).

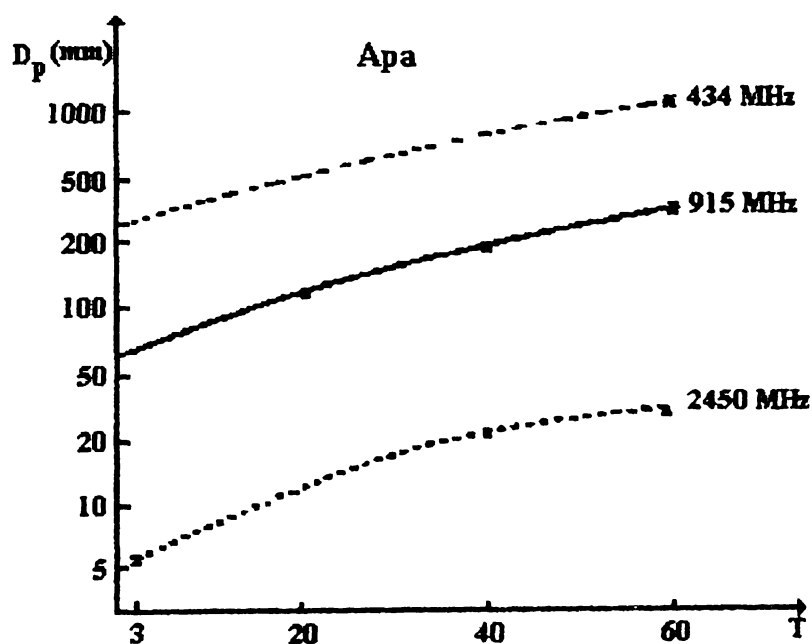


Figura 2.4

Există două feluri de pierderi: pierderi prin conducții ionice și pierderi prin relaxare bipolară. Pierderile prin conducții ionice provin din sarcinile libere care există într-un dielectric a cărui structură nu e niciodată perfectă.

Dacă densitatea sarcinilor libere devine ridicată, câmpul electric descrește rapid în material pentru a deveni aproape nul când materialul a devenit conductor. Densitatea volumetrică de putere a microundelor  $p$  transformată în densitate de putere termică într-un material este:

$$p = \frac{1}{2} \sigma_D E E^* \quad (2.21)$$

În cazul pierderilor prin relaxare dipolară o moleculă se comportă ca un dipol electric când centrul de gravitate al sarcinii pozitive și negative nu coincid. În Figura 2.5 se prezintă cazul unei molecule de apă care este un dipol permanent.

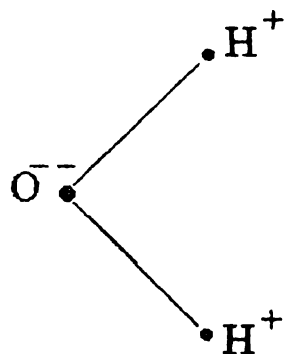


Figura 2.5

Dacă vom plasa acest dipol într-un câmp electric oscilant cu o pulsație  $\omega = 2\pi f$ , va avea, bineînțeles, tendința de-a oscila cu aceeași frecvență și va tinde să se orienteze în direcția câmpului electric ca un magnet într-un câmp magnetic.

În cazul microundelor, câmpul se inversează de câteva milioane și chiar miliarde de ori pe secundă. Molecula polară va urma această frecvență atât de ușor căci ea este ușoară și este liberă, o macromoleculă polară nu mai poate urma câmpul de la câțiva MHz, atunci când apa, de exemplu, urmează câmpul de la 10 până la 20 GHz.

Dar intervin alte fenomene, cum ar fi șocurile între molecule, acestea fiind îngreunate în mișcarea lor prin prezența altor molecule. Această multitudine de șocuri dezordonate, asemănătoare unui contact vâscos, transformă energia mecanică de vibrație în energie termică (Figura 2.6).

Dacă izolăm o moleculă considerată sferică, caracterizată prin dipolul electric, se poate calcula câmpul electric care există realmente în centrul cavității și care face ca ea să plonjeze în lichid. Vom considera că orientarea moleculei variază în raport cu agitația termică.

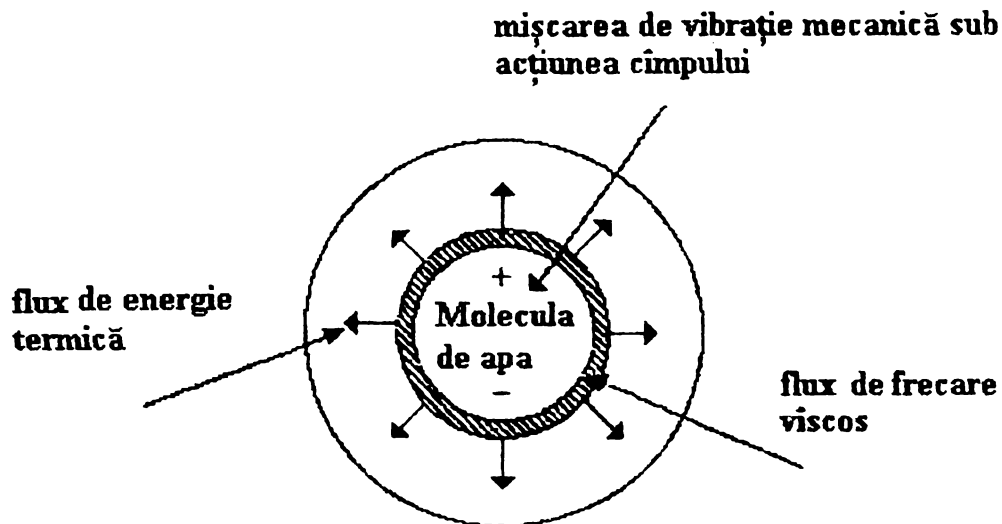


Figura 2.6

În cazul de față dacă se aplică un câmp electric, media variațiilor orientărilor moleculei nu este nulă. Orientarea moleculei considerate urmează media aceluși câmp cu o întârziere  $\tau$ :

$$\tau = \frac{4\pi a^2 \eta}{KT} \quad (2.22)$$

unde:  $a$  = regiunea sferei echivalată cu volumul moleculei

$\eta$  = vâscozitatea microscopică

$K$  = constanta Boltzman

$T$  = temperatura absolută

Calculul complet conduce la exprimarea permitivității lichidului prin formula:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'_\infty + \frac{\varepsilon'_0 - \varepsilon'_\infty}{1 + j\omega\tau} \quad (2.23)$$

unde  $\varepsilon'_\infty$  și  $\varepsilon'_0$  sunt două constante reale a căror semnificație este limita permitivității când frecvența câmpului electric tinde către infinit și respectiv zero.

Densitatea puterii microundelor transformată în putere termică este atunci:



$$p = \omega \varepsilon'' EE^* \quad (2.24)$$

În dielectricii situați într-un câmp electric constant în timp, principial se pot manifesta doar pierderi prin conducție electrică, dacă însă câmpul electric este variabil în timp, mai exact periodic, pe lângă pierderile prin conducție electrică, pot interveni și pierderile prin histerezis dielectric, care sunt proporționale cu frecvența.

Energia electromagnetică disipată într-un material dielectric cu pierderi se transformă în energie termică, deci avem o creștere a temperaturii materialului dielectric. Această creștere depinde de caracteristicile termice și electromagnetice a mediului dielectric considerat.

Ecuția câmpului termic caracteristică acestui fenomen este redată de următoarea relație:

$$\operatorname{div}(-K \operatorname{grad}(T)) + \rho C \frac{\partial T}{\partial t} = p \quad (2.25)$$

unde :

- K :este conductivitatea termică
- p :densitatea masică sau masa volumică
- C :capacitatea calorică
- T temperatura, t: timpul

Trebuie remarcat faptul că ecuația de propagare a câmpului electromagnetic (ecuația undei) și ecuația câmpului termic sunt cuplate, factorul care joacă rolul de cuplare între cele două ecuații fiind partea imaginară a permitivității dielectrice  $\varepsilon''$ , iar dacă acest factor este nul (dielectric fără pierderi) cele două ecuații devin independente.

În tehnică există două procedee principale de încălzire a dielectricilor în câmp electric și anume: la frecvențe foarte înalte în domeniul microundelor și la frecvențe ceva mai mici, în domeniul radiofrecvențelor. În linii mari, la încălzirea dielectricilor în câmp de microunde predomină pierderile prin histerezis dielectric, iar la încălzirea dielectricilor în radiofrecvență o pondere importantă o au pierderile prin conducție. Desigur că un rol important la încălzirea dielectricilor în câmp electric de înaltă și foarte înaltă frecvență îl au, printre altele și proprietățile de material, în principal funcție de frecvență. Trebuie menționat, că fenomenul primar care stă, de

fapt, la baza pierderilor prin histerezis dielectric este post - efectul electric, denumit uneori și vâscozitate electrică. Ca urmare a manifestării acestui fenomen, introducând dielectricul într-un câmp electric  $E$  alternativ, care este presupus pentru simplitate armonic, polarizația electrică a materialului  $P(t)$  va fi defazată în urmă față de  $E(t)$ . Fenomenul de întârziere a stabilirii polarizației electrice față de intensitatea câmpului electric aplicat este cunoscut de multă vreme în Fizică și există diferite expresii care pun în evidență acest lucru. De exemplu Boltzman a propus următoarea expresie pentru  $P(t)$ :

$$P(t) = \int_0^{\infty} g(t')E(t-t')dt' \quad (2.26)$$

în care  $g(t)$  este, așa zisa, funcție de întârziere.

Dacă ținem seama de legea legăturii dintre  $E$ ,  $D$  și  $P$  și inducția electrică  $D$  va fi defazată în urmă față de  $E$  cu un unghi pe care îl notăm cu  $\delta_H$  și se numește unghi de pierderi prin histerezis dielectric. Exprimând mărimile de stare ale câmpului electric în complex simplificat, pentru o orientare fixă a lui  $D$  și  $E$  vom avea:

$$E = E_M e^{j\gamma} \quad (2.27)$$

$$D = D_M e^{j(\gamma - \delta_H)} \quad (2.28)$$

În care  $E_M$  și  $D_M$  sunt amplitudinile intensității câmpului electric și a inducției electrice iar  $\gamma$  este faza inițială a lui  $E$ .

O consecință imediată a faptului că  $E$  și  $D$  sunt defazate este introducerea în studiu a permitivității relative complexe ( $\epsilon_r$ ):

$$\epsilon_r = \frac{D}{E} = \frac{D_M}{\epsilon_0 E_M} e^{-j\delta_H} = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (2.29)$$

De asemenea se mai notează cu  $tg\delta_H = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$ , trebuie menționat că  $\epsilon_r'$  și  $\epsilon_r''$  și  $tg\delta_H$  variază cu frecvența câmpului electric. Dependența de frecvență este accentuată în jurul așa numitei frecvență (pulsatie) de rezonanță  $f_0(\omega_0)$ , care depinde

de tipul de polarizare a materialului dielectric. Ca titlu informativ se poate menționa că în cazul polarizării electronice  $f_0 \approx 10^{14} - 10^{15}$  Hz, la polarizarea ionică  $f_0 \approx 10^{13} - 10^{14}$  Hz iar la polarizarea de orientare  $f_0 \approx 10^8$  Hz. Partea reală  $\epsilon_r'$  a permitivității relative complexe, pentru  $f \approx 0$ , este permitivitatea relativă (constanta dielectrică) cu care se lucrează în mod obișnuit în câmp electric, iar partea imaginară  $\epsilon_r''$  este o măsură a pierderilor și se numește factor (coeficient) de pierderi prin histerezis dielectric.

O consecință importantă a faptului ca  $E$  și  $D$  nu sunt în fază, o constituie dependența dintre  $E$  și  $D$ , adică  $D(E)$ , sub formă de elipsă, materialul dielectric fiind presupus liniar. Elipsa obținută se numește și ciclu de histerezis dielectric.

Se poate arăta că datorită ciclului de histerezis, apar pierderi de energie într-o perioadă, iar puterea corespunzătoare pierderilor prin histerezis dielectric, pe unitatea de volum, este proporțională cu suprafața ciclului de histerezis și cu frecvența.

$$P_H = C_H f S_V \quad (2.30)$$

În care  $C_H$  este un parametru de material.

Puterea aparentă în complexul  $S_H$ , corespunzătoare unității de volum, este:

$$S_H = P_H + jQ_H = EJ_D \quad (2.31)$$

Deoarece  $J_d = j\omega D$ , rezultă:

$$S_H = E(j\omega D)^* = E[j\omega\epsilon_0(\epsilon_r' - j\epsilon_r'')E]^* = \omega\epsilon_0\epsilon_r'E^2 - j\omega\epsilon_0\epsilon_r''E^2 \quad (2.32)$$

în care trebuie menționat că intervin valorile efective ale mărimilor de stare ale câmpului electric.

Partea reală a lui  $S_H$  reprezintă puterea activă datorită histerezisului dielectric, pe unitatea de volum. În continuare vom avea:

$$P_H = \omega\epsilon_0\epsilon_r''E^2 = \omega\epsilon_0\epsilon_r' \operatorname{tg}\delta_h E^2 \quad (2.33)$$

Observându-se că în adevăr  $\epsilon_r''$  intervine în expresia acelor pierderi, evident că această expresie se poate scrie și sub alte forme.

Dacă se ține seama de pierderile prin conducție, expresia densității de volum a puterii ce corespunde pierderilor totale (Figura 2.7), va fi:

$$P_t = (\sigma + \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' ) E^2 = \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_R} + \operatorname{tg} \delta_h \right) \omega \epsilon_0 \epsilon_R' E^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon_R' \operatorname{tg} \delta E^2 \quad (2.34)$$

Unde s-a folosit notația

$$\operatorname{tg} \delta = \left( \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon_R} + \operatorname{tg} \delta_h \right) \quad (2.35)$$

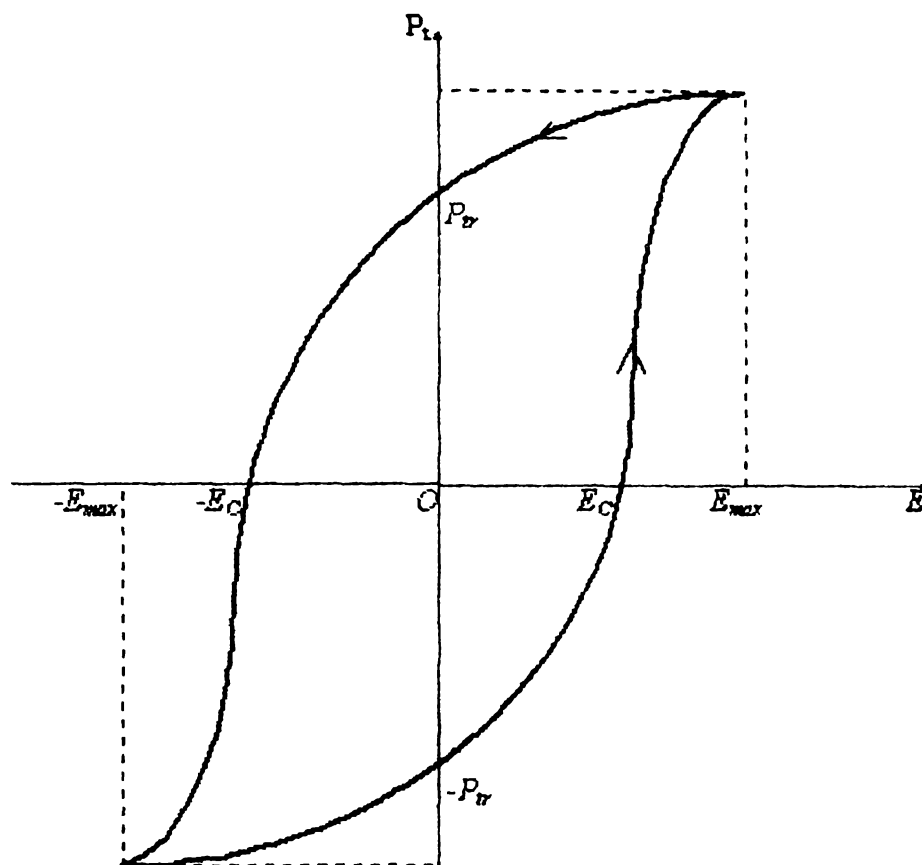


Figura 2.7

În această expresie,  $\delta$  este unghiul de pierderi totale, histeresis dielectric și conducție. Aceste rezultate se pot obține și pe altă cale și anume, plecând de la expresia densității totale de curent,  $J_t$  în dielectric, care are mai multe componente. Se știe că densitatea curentului de deplasare  $J_D = \frac{\partial D}{\partial t}$ , care în regim armonic este

$J_D = j\omega D$ , are următoarea expresie:

$$J_D = j\omega D = j\omega [\epsilon_0 (\epsilon_R' - j\epsilon_R'') E] = \omega \epsilon_0 \epsilon_R' E + j\omega \epsilon_0 \epsilon_R'' E \quad (2.36)$$

observându-se că  $j\omega D$ , are două componente: o componentă reală  $\omega\epsilon_0\epsilon_R''E$  în fază cu  $E$ , ce corespunde pierderilor prin histerezis dielectric și o componentă imaginară  $j\omega\epsilon_0\epsilon_R'E$ , care este defazată cu  $\frac{\pi}{2}$  față de  $E$ . A treia componentă a lui  $J_t$  este densitatea curentului de conducție  $J_C = \sigma E$ , astfel că expresia densității totale de curent este:

$$J_t = (\omega\epsilon_0\epsilon_R'' + \sigma)E + j\omega\epsilon_0\epsilon_R'E \quad (2.37)$$

Cele trei componente ale lui  $J_t$  sunt reprezentate în Figura 2.8

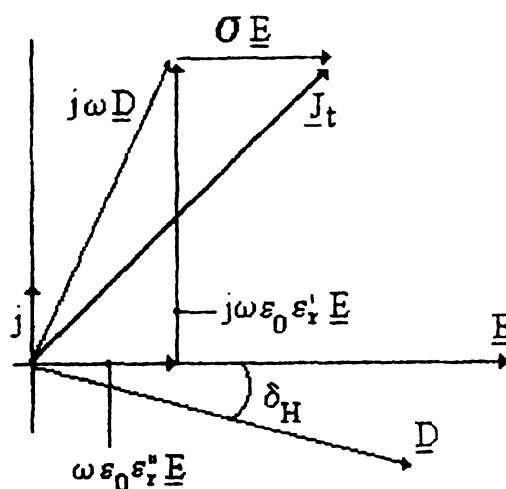


Figura 2.8

Dacă se înmulțesc scalar cu  $E$  componentele în fază cu componentele active rezultă tocmai densitatea de volum a puterii active  $P_t$  corespunzătoare pierderilor totale, stabilite anterior:

$$P_t = P_C + P_H = \omega\epsilon_0\epsilon_R'' \operatorname{tg} \delta E^2 \quad (2.38)$$

Cunoscând expresia puterii active dezvoltate pe unitatea de volum, prin integrarea acesteia se obține puterea dezvoltată în întreg corpul. La efectuarea acestui calcul, trebuie să se aibă în vedere faptul că unda electromagnetică este atenuată în procesul de pătrundere în dielectric, astfel că valoarea efectivă a lui  $E$  nu este constantă, ea scade de la suprafața corpului spre interiorul său.

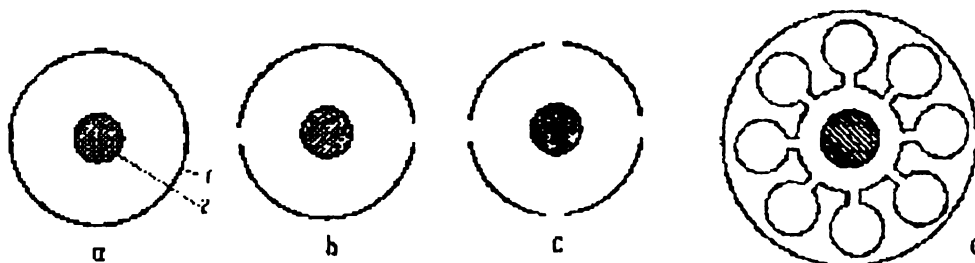
În această lucrare s-a definit și o adâncime de pătrundere a câmpului electromagnetic în dielectricul cu pierderi. În domeniul radiofrecvențelor, frecvența fiind mai mică decât în domeniul microundelor, adâncimea de pătrundere este mai mare. Ca urmare, în instalațiile cu radiofrecvență se pot încălzi, în întreaga masă, corpuri dielectrice de dimensiuni relativ mari decât cele încălzite în câmp de microunde. De asemenea, în domeniul radiofrecvențelor, lungimea de undă este mai mare decât în domeniul microundelor, ceea ce poate justifica în primul caz posibilitatea de a considera un regim cvasistaționar.

Bineînțeles că sunt și multe alte particularități ale celor două procedee de încălzire a dielectricilor, care toate determină domeniile specifice de aplicație în tehnică a fiecăruia dintre ele.

## 2.2 Tipuri fundamentale de magnetroane și principiul lor de funcționare

Primele modele de magnetron aveau un anod cilindric, continuu sau secționat (Figura 2.1). Tipurile moderne de magnetron sunt prevăzute cu un anod format dintr-un bloc metalic cu mai multe cavități (Figura 2.1d).

În axa cilindrului format de anod este plasat catodul cilindric de diametru mare în comparație cu diametrele catozilor altor tipuri de tuburi.



**Figura 2.1 Anodi de magnetron**

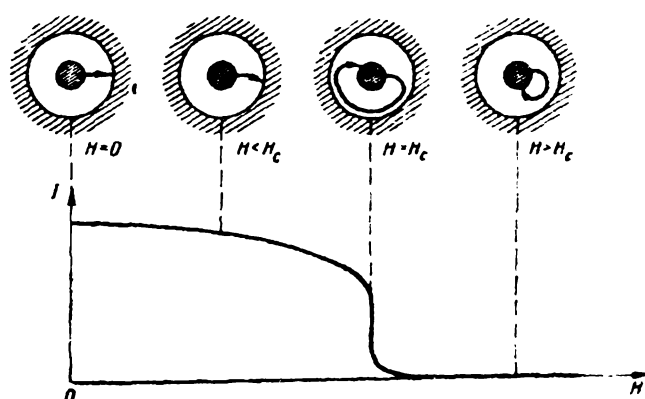
a- anod continuu: 1 – anod; 2 – catod; b – anod cu două secțiuni  
c – anod cu patru secțiuni; d – anod cu opt cavități

Pe anod se aplică o tensiune continuă de ordinul miilor de volți. Cu ajutorul unui magnet (la primele exemplare de magnetroane se folosea un electromagnet) se creează un câmp magnetic de inducție  $B_0$ , paralel cu axa catodului. În lipsa câmpului

magnetic electronii emiși de catod s-ar îndrepta spre anod, de-a lungul razei, executând o mișcare uniform accelerată. În prezența câmpului magnetic traiectoria electronului se modifică. Forța pe care o exercită câmpul magnetic asupra electronului fiind perpendiculară pe traiectoria electronilor, aceasta se curbează și dacă valoarea câmpului magnetic este suficient de mare, electronul nu mai ajunge pe anod; curentul anodic se anulează (Figura 2.2).

Câmpul magnetic, care determină tăierea curentului anodic, poartă numele de câmp magnetic critic  $H_c$ .

Întoarcerea electronilor pe catod provoacă încălzirea acestuia. De aceea, încălzirea catodului de la o sursă exterioară are loc numai în primele 2-3 min. de funcționare. Apoi alimentarea catodică se întrerupe, curentul fiind în continuare datorat în întregime emisiei secundare. La diferite temperaturi de lucru, un electron care lovește catodul poate scoate din acesta 10-100 de electroni secundari.



**Figura 2.2** Traiectoria electronului și variația curentului anodic la diferite valori ale câmpului magnetic  $H$

S-a arătat mai înainte care este rolul câmpului magnetic. El dă posibilitate să se comande curentul anodic al magnetronului; în mod aproximativ analog, în tuburile de joasă frecvență se comandă curentul anodic cu ajutorul tensiunii negative de grilă.

Regimul dinamic, adică regimul în care magnetronul produce oscilații, depinde de construcția magnetronului. Magnetronul cu anod secționat și cu circuite externe, de tip mai vechi și rar utilizat în prezent, poate fi considerat că se prezintă ca o rezistență negativă. Într-adevăr, la o creștere a potențialului anodic al unei secțiuni

a anodului este posibil ca valoarea curentului anodic al acestei secțiuni să scadă. În cele ce urmează se analizează, pe scurt, acest caz.

Se consideră un magnetron cu un anod cu două secțiuni (Figura 2.3). Pe cele două secțiuni ale anodului - conectate la un circuit derivație - se aplică tensiunile  $U_0 + \Delta U$  și  $U_0 - \Delta U$ .

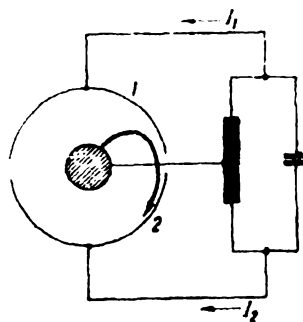


Figura 2.3 Schema de principiu a magnetronului cu două secțiuni

La creșterea tensiunii pe anodul 1 crește numărul de electroni care se îndreaptă spre acest anod. Datorită modificării traiectoriei, produsă de câmpul magnetic  $H_0$ , acești electroni ajung pe anodul 2, măbind curentul acestuia. Astfel, apare o rezistență negativă a caracteristicii statice; această funcționare se mai numește și de tip dinatron.

În Figura 2.4 este prezentată caracteristica de tip dinatron a magnetronului. Curbele sunt trasate pentru câmpul magnetic de inducție critic  $B_c$

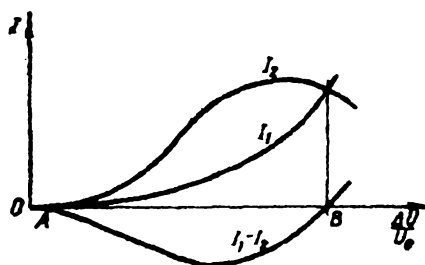


Figura 2.4 Curenți în cele două secțiuni ale anodului magnetronului și caracteristica rezultantă de tip dinatron



Un alt mod de funcționare caracteristic magnetronului cu bloc anodic cu mai multe cavități este funcționarea prin sincronizarea fasciculului de electroni cu câmpul electromagnetic de înaltă frecvență, astfel încât câmpul electromagnetic și electronii să se rotească în jurul axei magnetronului, în spațiul anod-catod, având un raport de viteze bine determinat. Energia electromagnetică de înaltă frecvență este obținută prin acțiunea de frânare pe care o exercită câmpul electric de înaltă frecvență asupra electronilor. Se va stabili, în cele ce urmează, raportul dintre viteza unghiulară a electronilor și pulsația câmpului electromagnetic la sincronism.

Efectul de frânare se produce în regiunea din jurul fiecărei fante care unește spațiul cilindric anod-catod cu o cavitate rezonantă.

Sincronismul se obține când timpul de trecere al electronului de la o fantă la alta este egal cu jumătate din perioada de oscilație a câmpului electromagnetic de înaltă frecvență.

Distanța între fante fiind marcată cu „ $d$ ” și viteza electronilor „ $v$ ”, la sincronism este valabilă relația

$$T = \frac{2d}{v} \quad (2.39)$$

Dacă diametrul magnetronului în care  $T$  este perioada de oscilație a câmpului electromagnetic. Dacă diametrul magnetronului la suprafața anodului este  $2\rho_a$  și numărul cavităților este  $N$ , rezultă că distanța dintre două fante este

$$d = \frac{2\pi\rho_a}{N} \quad (2.40)$$

Relația (2.39) devine

$$T = \frac{4\pi\rho_a}{Nv} \quad (2.41)$$

Viteza liniară  $v$  a electronului are valoarea

$$v = \omega_e \rho_a \quad (2.42)$$

unde  $\omega_e$  este viteza unghiulară a electronului (s-a considerat viteza liniară a electronului care ar aluneca la suprafața anodului). La sincronism, perioada de oscilație a câmpului electromagnetic este

$$T = \frac{4\pi}{N\omega_e} \quad (2.43)$$

Relația dintre pulsația câmpului electromagnetic și viteza unghiulară a fasciculului de electroni are forma

$$\frac{2\pi}{\omega_e} = \frac{4\pi}{N\omega_e} \quad (2.44)$$

Viteza unghiulară a electronilor este de  $N / 2$  ori mai mică decât pulsația câmpului electromagnetic la rezonanță, adică

$$\omega_E = \frac{N}{2} \omega_e \quad (2.45)$$

Dacă în momentul inițial electronul sau fasciculul de electroni a fost frânat de câmpul electric care se află în dreptul fantei 1 (componenta tangențială a câmpului electric a exercitat o forță de frânare asupra electronului), peste o jumătate de perioadă electronul se află în dreptul fantei următoare 2 (Figura 2.5).

În timpul unei jumătăți de perioadă, câmpul electric din fanta 2, care era pozitiv față de câmpul electric din fanta 1, își schimbă semnul, devenind negativ (prin câmp pozitiv se înțelege un câmp care accelerează electronul, iar prin câmp negativ, un câmp care îl frânează).

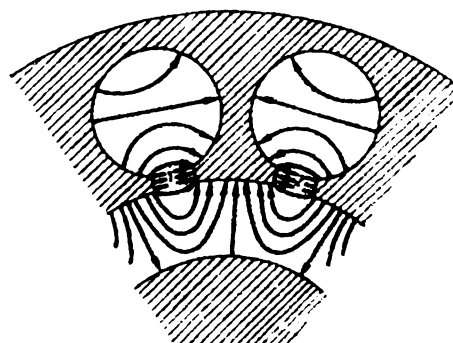


Figura 2.5 Câmpul electric într-o porțiune a blocului anodic cu mai multe cavități rezonante

Astfel, fasciculul de electroni care ajunge în dreptul fantei 2 este din nou frânat și se obține din nou energie în câmpul electromagnetic de înaltă frecvență. Fenomenul se repetă până când, din cauza frânării succesive, electronii își micșorează viteza și cad pe anod. Randamentul ridicat pe care îl au magnetronurile se datorește tocmai extragerii succesive de energie prin transformarea energiei electrice a fasciculului de electroni în energie a câmpului electromagnetic.

În acest caz, ca și la tubul electronic cu undă progresivă, se aplică principiul interacțiunii îndelungate între câmpul electromagnetic și fasciculul de electroni. Energia electromagnetică de înaltă frecvență, obținută prin transformarea energiei cinetice a fasciculului de electroni, poate fi exprimată ca echivalentă cu un lucru mecanic al unei forțe  $F = E e$ , pe o anumită distanță  $d$ . Pentru ca acest lucru mecanic să fie mare, există două posibilități: câmpul electric  $E$  să fie foarte mare și  $d$  limitat (cazul clistronului), sau invers (cazul tubului cu undă progresivă). În magnetron se folosesc simultan ambele posibilități.

### 2.3 Mișcarea electronului în magnetronul plan. Regimul static

Studiul funcționării magnetronului, oscilator de putere la frecvențe foarte înalte, are drept scop stabilirea condițiilor în care magnetronul intră în oscilație, analiza factorilor care influențează puterea utilă de foarte înaltă frecvență. Valoarea randamentului este un parametru important în funcționarea magnetronului, deoarece se lucrează la puteri mari. Întrucât puterea utilă produsă de magnetron este rezultatul frânării electronilor în câmpul electric de foarte înaltă frecvență, analiza mișcării electronului în magnetron este de primă importanță.

Deoarece această mișcare este complicată, se analizează treptat, pornindu-se de la situații simplificate și trecând apoi spre situația reală. Astfel, în studiul magnetronului se analizează succesiv: regimul static (fără oscilații) al magnetronului plan, regimul static al magnetronului cilindric, regimul dinamic al magnetronului plan și se trag concluzii asupra regimului dinamic al magnetronului cilindric.

Așadar, pentru analiza mișcării electronilor în spațiul anod-catod al magnetronului se folosesc modele simplificate ale magnetronului. Rezultatele obținute reprezintă etape intermediare, insuficient de exacte, dar sugestive.

Un asemenea model simplificat îl reprezintă magnetronul considerat plan și format din două plăci paralele (Figura 2.1).

Mișcarea electronului între aceste plăci se produce în prezența unei tensiuni  $U_0$  aplicată plăcilor, între care ia naștere un câmp electric uniform  $E_0$  și a unui câmp magnetic de inducție  $B_0$ , orientat de-a lungul axei  $x$ . Deoarece  $U_0$  și  $B_0$  nu variază în timp, regimul de lucru este static.

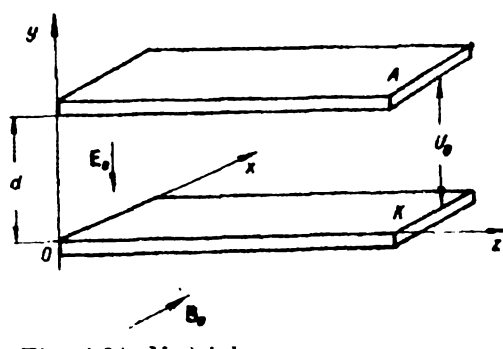


Figura 2.1 Modelul magnetronului plan

Forța care se aplică electronului reprezintă rezultanta forțelor exercitate de câmpul electric și de câmpul magnetic de inducție:

$$\mathbf{F} = -e\mathbf{E}_0 - e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0 \quad (2.46)$$

Folosind componentele după axele  $y$  și  $z$ , ecuația mișcării devine:

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 z}{dt^2} &= eB_0 \frac{dy}{dt} \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} &= -eB_0 \frac{dz}{dt} + eE_0 \end{aligned} \quad (2.47)$$

Când câmpul electric  $E_0$  este nul (tensiunea  $U_0$  este nulă), electronul execută în prezența câmpului magnetic o mișcare circulară, ale cărei ecuații parametrice sunt soluțiile ecuațiilor (2.47) pentru  $E_0=0$ :

$$\begin{aligned} z &= z_0 + R \sin(\omega_0 t + \varphi) \\ y &= y_0 + R \sin(\omega_0 t + \varphi) \end{aligned} \quad (2.48)$$

Traectoria pe care se mișcă electronul este cercul

$$(y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = R^2 \quad (2.49)$$

unde  $y_0$ ,  $z_0$ ,  $R$ ,  $\varphi$  sunt constante.

Pulsația  $\omega_0$  reprezintă viteza unghiulară ciclotronică a electronului și are valoarea

$$\omega_0 = \frac{e}{m} B_0 \quad (2.50)$$

Când tensiunea  $U_0$  este diferită de zero, centrul traiectoriei circulare, pe care o execută electronul în prezența câmpului de inducție  $B_0$ , se deplasează de-a lungul axei  $z$  cu viteza constantă  $v_0 = \frac{E_0}{B_0}$ , așa cum rezultă din ecuația parametrică pentru  $z$ :

$$z = z_0 + \frac{E_0}{B_0} t + R \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.51)$$

Sub influența câmpurilor electric și magnetic, electronul execută, deci, o mișcare compusă dintr-o mișcare uniformă de translație cu viteza  $v_0 = \frac{E_0}{B_0}$  și o mișcare de rotație cu viteza liniară  $R\omega_0$ .

Când viteza de translație și viteza liniară în mișcarea de rotație sunt egale, traiectoria pe care se deplasează electronul este o cicloidă, și la o rostogolire completă a cercului, centrul acestuia parcurge o distanță egală cu lungimea lui.

După cum viteza de translație este mai mare sau mai mică decât viteza liniară în mișcarea de rotație, traiectoria este o hipocicloidă sau o epicicloidă (Figura 2.2).

Electronul se mișcă pe traiectoriile indicate mai înainte, în absența câmpului electromagnetic de înaltă frecvență.

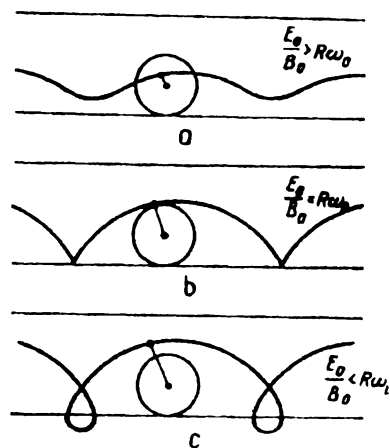


Figura 2.2 Traiectoria electronului în magnetronul plan

a – epicicloidă; b – cicloidă; c - hipocicloidă

Când electronul descrie cicloida și diametrul cercului rostogolitor este egal cu distanța dintre anod și catod, tensiunea anodică și câmpul magnetic de inducție sunt critice.

Folosind egalitatea dintre viteza liniară pe cerc și viteza de translație a centrului cercului  $R\omega_0 = \frac{E_0}{B_0}$  și ținând seamă de relația (2.50), se obține

$$2R = \left(\frac{2m}{e}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{U_{0c}}{B_{0c}}\right)^{\frac{1}{2}} = d \quad (2.52)$$

Dacă tensiunea  $U_0$  scade sub valoarea critică sau câmpul magnetic de inducție  $B_0$  crește peste valoarea critică, curentul anodic se întrerupe, trecându-se în zona de tăiere a curentului anodic (Figura 2.3).



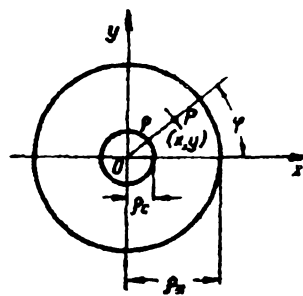
Figura 2.3 Caracteristica curent – câmp magnetic a magnetronului

În regim dinamic, când câmpul electromagnetic extrage energie din energia cinetică a electronului, se lucrează în zona de tăiere, în care electronul nu trece direct de la catod la anod, ci după ce a parcurs o traiectorie mai complicată între catod și anod și a fost frânat succesiv de câmpul electric de înaltă frecvență, cum se va arăta mai târziu. Dacă electronul reușește să treacă de la catod la anod într-un timp scurt, parcurgând, de exemplu, numai o jumătate de buclă de cicloidă tangentă în punctul maxim la anod, timpul de interacțiune este foarte scurt și deci energia de înaltă frecvență obținută este neglijabilă.

### 2.3.1 Regimul static al magnetronului cilindric. Parabola regimului critic

Magnetronul plan a servit ca etapă intermediară în studiul fenomenelor care au loc în magnetron, și anume, cum s-a văzut mai înainte, pentru stabilirea traiectoriei electronului și a regimului critic.

Un model mai apropiat de magnetronul real îl reprezintă magnetronul cilindric. În acest caz, ecuația mișcării electronului se exprimă mai simplu în coordonate polare. Se consideră anodul continuu și de rază  $\rho_a$ . Raza catodului este  $\rho_c$  (Figura 2.1).



**Figura 2.1** Sistemul de coordonate utilizat la studiul mișcării electronului în magnetronul cilindric

Ecuția mișcării electronului scrisă pe componente, în coordonate cilindrice, devine:

$$m \left[ \frac{d^2 \rho}{dt^2} - \rho \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 \right] = -e(E_0 \rho + v_\varphi B_0) \quad (2.53)$$

$$m \left[ \rho \frac{d^2 \varphi}{dt^2} + 2 \frac{d\rho}{dt} \frac{d\varphi}{dt} \right] = e v_\rho B_0 \quad (2.54)$$

Unde

$$\begin{aligned} m \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)^2 &= \frac{v_\rho^2}{\rho} \quad \text{este accelerația centripeta} \\ 2 \frac{d\rho}{dt} \frac{d\varphi}{dt} &\quad \text{este accelerația Coriolis} \\ v_\rho &= \frac{d\rho}{dt} \quad \text{este viteza radială} \\ v_\varphi &= \rho \frac{d\varphi}{dt} \quad \text{este viteza tangențială} \end{aligned} \quad (2.55)$$

Ecuația (2.54) se poate scrie sub forma

$$\frac{d}{dt} \left( \rho^2 \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{e}{m} B_0 \frac{d}{dt} \left( \frac{\rho^2}{2} \right)$$

Integrând între limitele  $\rho$  și  $\rho_c$ , rezultă

$$\rho^2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right) - \rho_c^2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)_{\rho=\rho_c} = \frac{e}{2m} B_0 (\rho^2 - \rho_c^2) \quad (2.56)$$

La suprafața catodului viteza electronului este nulă  $\left( \frac{d\varphi}{dt} \right)_{\rho=\rho_c} = 0$

În continuare, cunoscând valoarea vitezei unghiulare  $\omega_0$ , se poate scrie

$$\left( \frac{d\varphi}{dt} \right) = \frac{\omega_0}{2} \left( 1 - \frac{\rho_c^2}{\rho^2} \right) \quad (2.57)$$

Viteza unghiulară a electronului în mișcare de rotație, în jurul catodului, este proporțională cu viteza ciclotronică și este funcție de raza orbitei și a catodului.



Pentru  $\rho = \rho_a$  relația (2.57) devine, înmulțind ambii termeni cu  $\rho_a^2$ :

$$\rho_a v_{\varphi a} = \rho_a^2 \left( \frac{d\varphi}{dt} \right)_{\rho = \rho_c} = \frac{\omega}{2} (\rho_a^2 - \rho_c^2) \quad (2.58)$$

unde  $v_{\varphi a} = \rho_a \frac{d\varphi}{dt}$  este viteza tangențială a electronului la anod.

Deoarece la anod viteza radială este nulă, urmează că viteza tangențială reprezintă totodată viteza totală a electronului.

Câmpul de inducție  $B_0$  exercită asupra electronului o forță perpendiculară pe traiectoria sa și deci nu se produce lucru mecanic, întreaga energie a electronului fiind absorbită, în regimul static, numai de la sursa de curent continuu, de tensiune  $U_0$ . Viteza electronului se calculează în funcție de  $U_0$ , aplicând formula cunoscută.

Când viteza este tangențială la anod, tensiunea anodică este critică și deci câmpul magnetic de inducție critic se poate exprima în funcție de tensiunea critică.

$$B_{0c} = \frac{2 \left( \frac{2m}{e} \right)^{\frac{1}{2}} U_{0c}^{\frac{1}{2}}}{\rho_a \left( 1 - \frac{\rho_c^2}{\rho_a^2} \right)} = \frac{2 \left( \frac{2m}{e} \right)^{\frac{1}{2}} U_{0c}^{\frac{1}{2}}}{d \left( 1 + \frac{\rho_c}{\rho_a} \right)} \quad (2.59)$$

unde  $d = \rho_a - \rho_c$ .

Dacă raza catodului are o valoare apropiată de valoarea razei anodului, aproximarea magnetronului cilindric cu unul plan este bună. Într-adevăr, dacă  $\frac{\rho_c}{\rho_a} \approx 1$ ,

din relația (2.59) rezultă relația (2.60).

$$U_{0c} = \frac{B_{0c}^2 d^2}{2m} = B_{0c}^2 k \quad (2.58)$$

Pe măsură ce raza catodului scade, crește eroarea de determinare a regimului critic cu ajutorul modelului plan. Când raza catodului  $\rho_c$  tinde către zero,

valoarea reală a câmpului magnetic critic obținută cu modelul cilindric este de două ori mai mare decât valoarea dedusă cu ajutorul modelului plan.

Reprezentarea grafică a relației (1.60) este parabola regimului (Figura 2.2)  $U_{oc} = f(B_{oc})$ .

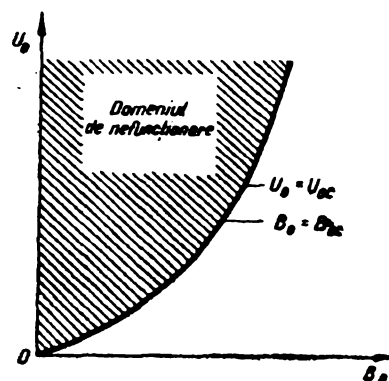


Figura 2.2 Parabola regimului critic

Parabola împarte planul în două regiuni. În regiunea cuprinsă între parabolă și axa  $B_0$  magnetronul poate lucra; în regiunea dintre parabolă și axa  $U_0$  magnetronul nu funcționează din motivele arătate la magnetronul plan (trecerea directă a electronului de la catod la anod).

### 2.3.2 Regimul dinamic al magnetronului plan

Regimul static nu poate explica producerea puterii de foarte înaltă frecvență. Într-adevăr, puterea rezultă din interacțiunea între câmpul electric de foarte înaltă frecvență și fasciculul electronic. De fapt, câmpul electric de înaltă frecvență este produs de însuși fasciculul electronic care trece prin fața fantelor de cuplaj ale cavităților rezonante. Pentru simplitate se presupune că între anod și catod există un câmp electric de foarte înaltă frecvență, care în magnetronul plan are aceeași orientare ca și câmpul electric continuu  $E_0$ . Prezența câmpului electric de înaltă frecvență permite explicarea transformării energiei cinetice a electronului în energie electrică de foarte înaltă frecvență. În cazul magnetronului plan cu plăci paralele nu este posibil să se explice modulația în viteză și gruparea electronilor. De aceea, se va apela într-o etapă ulterioară la modelul magnetronului plan cu anod cu cavități.

În prima etapă se examinează efectul prezenței câmpului electric de foarte înaltă frecvență.

Procesul obținerii puterii de foarte înaltă frecvență ca rezultat al interacțiunii între câmpul electromagnetic și electronul în mișcare poate fi descris dacă se exprimă simplu modul în care variază energia electronului.

În regim dinamic, asupra electronului acționează, așa cum s-a stabilit mai înainte, câmpul electric continuu  $E_0$  și câmpul electric de înaltă frecvență  $E_1 \sin(\omega_0 t + \phi)$ , ambele cu aceeași direcție. După transformări simple ecuația mișcării, în care s-a introdus câmpul electric de foarte înaltă frecvență, devine

$$\frac{d^2 v_z}{dt^2} + \omega_0^2 v_z = \frac{\omega_0^2}{B_0} [E_0 + E_1 \sin(\omega_0 t + \phi)] \quad (2.61)$$

$$v_y = \frac{1}{\omega_0} \frac{dv_z}{dt} \quad (2.62)$$

Aplicând metoda variației constantelor și considerând condițiile la limită  $v_z(0) = v_y(0) = 0$ , rezultă soluțiile

$$\frac{v_z}{v_0} = 1 - \cos \omega_0 t + \frac{E_1}{2E_0} [\cos \phi \sin \omega_0 t - \omega_0 t \cos(\omega_0 t + \phi)] \quad (2.63)$$

$$\frac{v_y}{v_0} = \sin \omega_0 t + \frac{E_1}{2E_0} [\sin \phi \sin \omega_0 t + \omega_0 t \sin(\omega_0 t + \phi)] \quad (2.64)$$

Unde  $v_0 = \frac{E_0}{B_0}$ .

Dacă se integrează ecuațiile (2.63) și (2.64) se obține

$$\frac{z}{R} = \omega_0 t - \sin \omega_0 t + \frac{E_1}{2E_0} [\cos(\omega_0 t + \phi) + \phi_0 t \sin(\omega_0 t + \phi) + \cos \phi \cos \omega_0 t - 2 \cos \phi] \quad (2.65)$$

$$\frac{y}{R} = 1 - \cos \omega_0 t + \frac{E_1}{2E_0} [\cos \phi \sin \omega_0 t - \omega_0 t \cos(\omega_0 t + \phi)] \quad (2.66)$$

Pentru  $\phi = \pi$  tensiunea alternativă frânează electronul la fiecare alternanță, așa cum se vede în Figura 2.1, adică faza este optimă sau „favorabilă”.

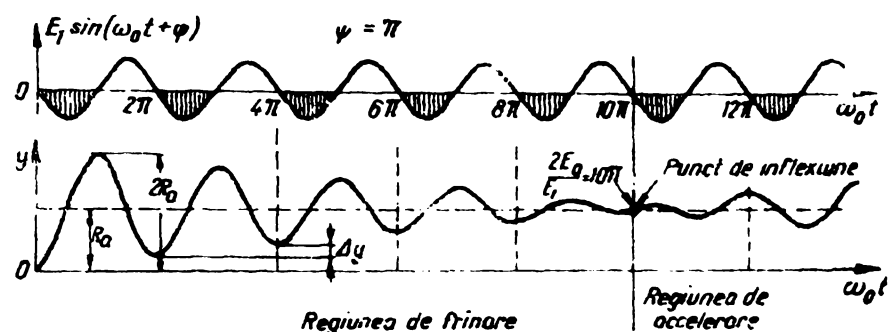


Figura 2.1 Influența câmpului electric alternativ asupra electronului

Defazajul  $\phi$  între electron și câmp pune în evidență faptul că în raport cu câmpul unii electroni vor avea fază „favorabilă”, alții „nefavorabilă”, ceea ce va fi explicat mai pe larg în continuare.

În cazul regimului static  $E_1 = 0$ , electronul se întoarce la catod, după ce a parcurs o buclă a cicloidei, cu aceeași viteză cu care a plecat (de obicei, considerată nulă), de unde rezultă că viteza sa medie pe axa  $y$  este nulă și că energia pe care o absoarbe de la sursa de curent continuu până ajunge la  $y_{max}$  (adică la maximumul cicloidei) o redă sursei când revine la catod, pentru  $E_1 = 0$ .

În cazul regimului dinamic, viteza medie pe axa  $y$  nu mai este nulă și se deduce ușor din relația (2.64):

$$v_{ymed} = \frac{1}{T} \int_0^T v_y dt = -v_0 \frac{1}{2} \frac{E_1}{E_0} \cos \phi \quad (2.67)$$

Pentru  $\phi = \pi$

$$v_{ymed} = \frac{1}{2} v_0 \frac{E_1}{E_0} = \frac{1}{2} \frac{E_1}{B_0} \quad (2.68)$$

Așa cum se observă în Figura 2.1, în regiunea de frânare electronul își micșorează din ce în ce mai mult amplitudinea deplasării pe axa  $y$ . Variația energiei dată de câmpul electric continuu, când amplitudinea mișcării electronului pe axa  $y$  variază cu  $\Delta y$ , se obține ușor, utilizând relația (2.66), în care se consideră  $\phi = \pi$  și  $t = T$ ,

$$\Delta y = 2\pi \frac{E_1}{2E_0} R \quad (2.69)$$

Variația energiei este

$$\Delta W_0 = eE_0 \Delta y = 2\pi \frac{E_1}{E_0} \left( \frac{1}{2} m v_0^2 \right) \quad (2.70)$$

unde  $R$  s-a înlocuit cu valoarea sa  $R = \frac{v_0}{\omega_0}$ . O parte a acestei energii se consumă pentru mărirea energiei cinetice a electronului, iar altă parte este radiată sub formă de câmp electromagnetic.

Variația energiei cinetice este

$$\Delta W_{cin} = \frac{m}{2} (v_{yn}^2 - v_{yn-1}^2) = (2n-1)\pi^2 \frac{E_1^2}{E_0^2} \frac{m v_0^2}{2} \quad (2.71)$$

dedusă utilizând valorile vitezei  $v_y$  din (2.64) pentru  $\phi = \pi$  și  $t = nT$ , respectiv  $t = (n-1)T$ .

Energia cedată câmpului electromagnetic se determină cu ajutorul relației

$$\Delta W = \Delta W_0 - \Delta W_{cin} = 2\pi \frac{E_1}{E_0} \left[ 1 - (2n-1) \frac{\pi}{2} \frac{E_1}{E_0} \right] \frac{m v_0^2}{2} \quad (2.72)$$

Relația arată, ca și Figura 2.1, că în regiunea de frânare, pe măsură ce crește numărul perioadelor, scade energia cedată într-o perioadă câmpului electromagnetic. Mișcarea electronului pe cicloida modificată de prezența câmpului alternativ este arătată în Figura 2.2.

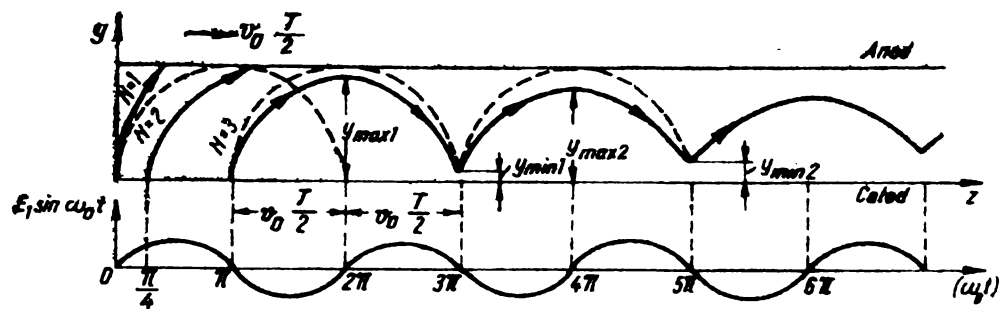


Figura 2.2 Mișcarea electronului pe cicloida modificată de prezența câmpului alternativ

### 2.3.3 Circuitul magnetronului și distribuția câmpului electromagnetic

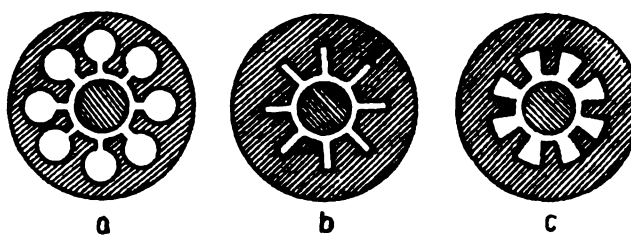
Deoarece regimul dinamic al magnetronului plan cu plăci paralele nu poate explica fenomenul de modulare în viteză și de grupare a electronilor, este necesar să se recurgă la un model mai apropiat de magnetronul real, și anume magnetronul plan cu cavități rezonante în anod.

În acest mod este posibil să se analizeze care este distribuția câmpului electric de foarte înaltă frecvență între catod și anod, când sunt prevăzute cavitățile rezonante, și ce influență are distribuția câmpului electric de foarte înaltă frecvență asupra mișcării electronilor. Înainte de a se analiza direct această influență este util să se studieze circuitele echivalente ale blocului anodic și relația dintre frecvența de rezonanță a cavităților și frecvența de lucru a magnetronului.

Tuburile electronice de înaltă frecvență au circuitele înglobate în interiorul tubului. Magnetronul, diodă cu vid cu comandă magnetică, are circuitele plasate în blocul anodic, sub formă de cavități rezonante.

Tipurile de circuite ale magnetronului se caracterizează prin forma cavităților.

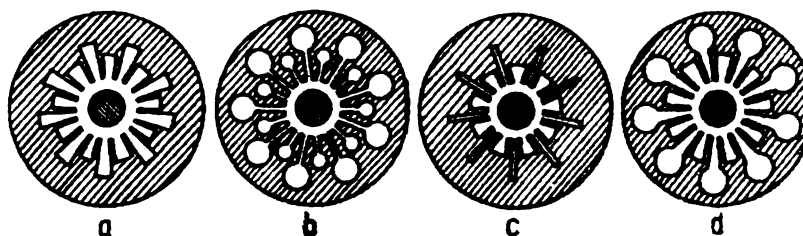
În fig. Figura 2.1a este reprezentat magnetronul cu cavități cilindrice, Figura 2.1b, magnetronul cu cavități de secțiune dreptunghiulară, iar în Figura 2.1c, magnetronul cu cavități de secțiune sectorială.



**Figura 2.1 Diferite blocuri anodice cu mai multe cavități**  
 a – cu cavități cilindrice; b – cu cavități fantă; c – cu cavități sectoriale

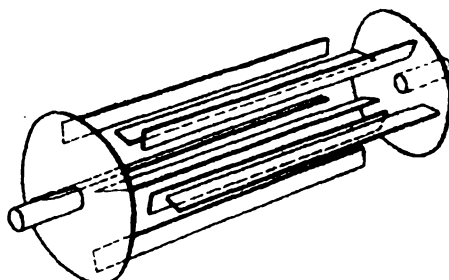
Magnetronurile au o bandă de frecvențe de lucru îngustă, datorită cavităților rezonante din blocul anodic.

Magnetronurile cu banda de frecvențe de lucru mai largă au două rânduri de cavități așezate în blocul anodic, pe raze de mărime diferită. Astfel de blocuri anodice sunt prezentate în Figura 2.2. Blocul anodic din Figura 2.2c este de tipul „soare-răsare”.



**Figura 2.2 Blocuri anodice cu două serii de cavități**  
 A – dublă serie de cavități sectoriale; b – dublă serie de cavități cilindrice; c – bloc anodic de tipul soare – răsare; d - bloc anodic mixt

Un tip deosebit de magnetron de bandă largă este cel cu anodul în formă de „colivie de veveriță” (Figura 2.3). Acest circuit are rolul de linie de întârziere (linie interdigitală).



**Figura 2.3 Anod de tipul colivie de veveriță**

Fiecare dintre circuitele indicate mai înainte are o schemă echivalentă care reprezintă o rețea electrică periodică, constituită din circuitele echivalente ale cavităților.

În spațiul anod-catod se formează câmpul electric de înaltă frecvență, care frânează electronii. Un asemenea câmp de frânare ia naștere și în cavitatea rezonantă a clistronului sau clistronului reflex, unde, datorită factorului de calitate foarte bun al cavității, valoarea câmpului electric de frânare este mare. În magnetron se îmbină avantajele unui câmp intens de frânare datorită unui  $Q$  foarte bun (când se lucrează pe bandă îngustă) și timpul lung de interacțiune între câmp și fasciculul de electroni.

Faptul că frânarea are loc fără ca fasciculul de electroni să-și micșoreze intensitatea, datorită trecerii succesive prin mai multe grile, reprezintă unul dintre factorii care contribuie la obținerea unui randament ridicat.

În cazul clistronului cu mai multe cavități sau al clistronului reflex, curentul care acționează efectiv asupra cavității este mult mai mic decât curentul catodic.

Pentru a explica necesitatea utilizării cavităților rezonante, se folosește modelul magnetronului plan. Între plăcile paralele anod-catod câmpul electromagnetic se propagă cu o viteză de fază mai mare decât viteza luminii sau cel puțin egală cu ea. La valorile practic aplicabile ale câmpului electric continuu  $E_0$  și ale câmpului magnetic de inducție  $B_0$ , viteza electronilor este de 10-12 ori mai mică decât viteza luminii.

În concluzie, pentru realizarea interacțiunii îndelungate între electroni și câmpul electromagnetic este necesară o linie de întârziere (un ghid periodic). Aceste condiții explică configurația blocului anodic al magnetronului.

Concluziile asupra propagării câmpului electromagnetic în ghiduri periodice sunt aplicabile blocului anodic al magnetronului. Astfel, distribuția câmpului este spațial periodică și există armonice spațiale. Interacțiunea între electron și câmp se consideră, cu aproximație, bună, deoarece are loc numai cu fundamentală spațială a câmpului electric.

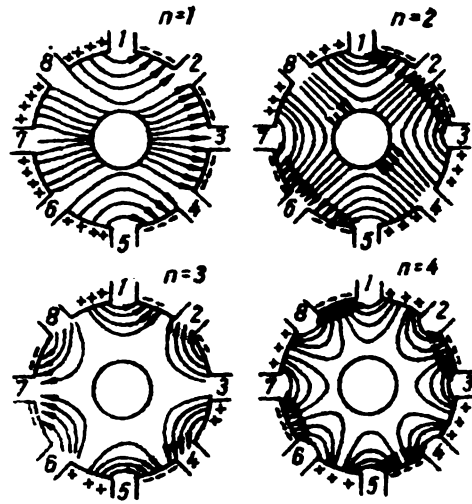
Câmpul în spațiul anod-catod este:



$$\begin{aligned}
 E_z &= EshKye^{j(\omega t - \beta z)} \\
 E_y &= -j \frac{\beta}{K} EchKye^{j(\omega t - \beta z)} \\
 H_x &= \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{\lambda_g}{\lambda_0} E_y
 \end{aligned}
 \tag{2.73}$$

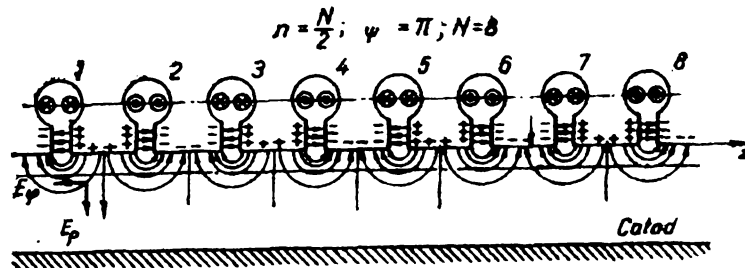
Reprezentarea grafică a câmpului electric pe baza relațiilor (2.73) este asemănătoare cu reprezentarea din Figura 2.5.

În fanta de cuplaj dintre cavitatea rezonantă și spațiul anod-catod, câmpul electric este uniform, iar în cavitatea cilindrică ia naștere oscilația  $H_{111}$ . Evident, că în blocul anodic pot lua naștere mai multe moduri de oscilație (Figura 2.4).



**Figura 2.4** Moduri de oscilație ale câmpului electromagnetic în magnetronul cu mai multe cavități

Pentru a elimina modurile nedorite sau mai exact pentru modificarea condițiilor la limită, se utilizează conductoare pentru fixarea potențialelor unind de exemplu, porțiunile de bloc anodic, despărțite prin două cavități pentru modul fundamental  $\pi$ .



**Figura 2.5** Variația câmpului electric și magnetic în funcție de  $z$

În Figura 2.5 sunt prezentate liniile câmpului electric și magnetic. Pentru a stabili frecvența de lucru a magnetronului se poate utiliza circuitul cu constante concentrate, echivalent unui sector al blocului anodic. Acest circuit este reprezentat de un cuadripol nesimetric, format dintr-un circuit rezonant echivalent cavității și o capacitate echivalentă spațiului anod-catod (Figura 2.6).

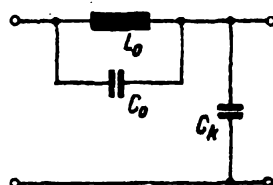


Figura 2.6 Cuadripolul echivalent unei cavități a blocului anodic

Sub forma mai generală, cuadripolul considerat fără pierderi este prezentat în Figura 2.7.

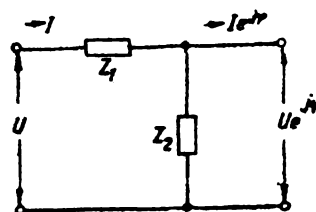


Figura 2.7 Circuitul general al cuadripolului echivalent

Variația fazei câmpului electromagnetic care străbate circuitele anodice se determină cu ajutorul relației:

$$\varphi = \frac{2\pi n}{N} \quad (2.74)$$

în care  $n$  este numărul de lungimi de undă care iau naștere în blocul anodic:

$$n = \frac{2\pi\rho_a}{\lambda}$$

$N$  - numărul de cavități.

Numărul  $n$  este un indice al modului de oscilație care apare în magnetron.

Când  $\varphi = \pi$ , numărul de lungimi de undă este egal cu jumătate din numărul cavităților:

$$\frac{n}{N} = \frac{1}{2} \quad (2.75)$$

Acest mod de oscilație se numește oscilație de tip  $\pi$  și reprezintă un mod fundamental de lucru al magnetronului. Din modul de prezentare fizic rezultă, de asemenea, că defazajul pe o celulă a circuitului anodic este  $\pi$ . În majoritatea cazurilor, magnetronul cu mai multe cavități lucrează pe modul fundamental  $\pi$ . Circuitul echivalent al unei secțiuni a blocului anodic se poate stabili pe baza circuitului rezonant echivalent al cavității rezonante.

Astfel, se consideră circuitul din Figura 2.7, în care  $Z_1$  corespunde elementelor  $L_0$ ,  $C_0$ , iar  $Z_2$ , elementului  $C_k$  din Figura 2.6. Întrucât celulele sunt conectate în lanț închis (în cerc), iar de-a lungul lor se propagă o undă progresivă (câmpul electromagnetic), trebuie să se considere terminate pe impedanța iterativă. Tensiunea la intrare și ieșire diferă ca fază, la fel ca și curentul. Cum elementele circuitului sunt reactive, deci nu se consumă putere reală, iar la intrare și ieșire este aceeași impedanță, rezultă că  $U$  și  $I$  au aceleași amplitudini ca și la intrare, dar faza lor variază, adică

$$Z_{i_1} = \frac{U}{I} = \frac{Ue^{j\varphi}}{Ie^{j\varphi}} \quad (2.76)$$

$$P = UI = Ue^{j\varphi} Ie^{-j\varphi}$$

unde  $Z_{i_1}$  este impedanța iterativă pe care lucrează lanțul;

$P$  - puterea transmisă.

Faptul că s-a admis lucrul pe impedanța iterativă  $Z_{i_1}$  este impus de necesitatea existenței unei unde progresive a câmpului electromagnetic și de faptul că numai în acest caz, fie că lanțul este terminat pe o impedanță  $Z_{i_1}$ , fie că se închide pe el însuși, situația electrică a circuitului nu se schimbă.

În circuitul din Figura 2.7 sunt valabile relațiile,

$$\begin{aligned}
 U - Ue^{j\varphi} &= Z_1 I \\
 I - Ie^{j\varphi} &= \frac{Ue^{j\varphi}}{Z_2}
 \end{aligned}
 \tag{2.77}$$

Eliminând pe  $U$  și  $i$ , se obține

$$(1 - e^{j\varphi})^2 = e^{j\varphi} \frac{Z_1}{Z_2}$$

Deci,

$$\cos \varphi = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \tag{2.78}$$

Din relația (2.78), notând  $\omega_0^2 = \frac{1}{L_0 C_0}$  și ținând seamă de relația (2.74), rezultă

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1 + \frac{C_k}{2C_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi m}{N}\right)}}} \tag{2.79}$$

sau

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{1 + \frac{C_k}{2C_0 \left(1 - \cos \frac{2\pi m}{N}\right)}} \tag{2.80}$$

Frecvența de lucru a magnetronului este cu atât mai apropiată de frecvența de rezonanță a cavității, cu cât capacitatea de cuplaj  $C_k$  este mai mică. Pentru oscilația de tip  $\pi$ , abaterea de la frecvența de rezonanță este minimă.

În cazul magnetronului cu cavități rezonante diferite, circuitul echivalent este dat în Figura 2.8.

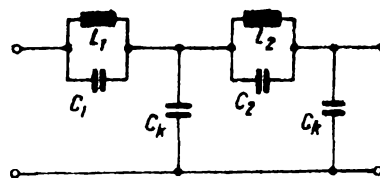


Figura 2.8 Circuitul echivalent al unui sector de bloc anodic cu două serii de cavități

Circuitele rezonante  $L_1, C_1$  și  $L_2, C_2$  corespund, respectiv, celor două tipuri de cavități care există în blocul anodic. Procedând ca mai înainte, se obține relația următoare, valabilă pentru cazul când frecvența de lucru este apropiată de frecvența de rezonanță a circuitului  $L_1, C_1$ :

$$\lambda = \lambda_1 \sqrt{1 + \frac{C_k}{C} \frac{1}{1 - \cos \frac{4\pi n}{N}}} \quad (2.81)$$

În cazul oscilațiilor de tip  $\pi$ , frecvența de lucru corespunde frecvenței de rezonanță a celor două circuite rezonante, corespunzătoare respectiv cavității mari și celei mici, puse în paralel:

$$\omega^2 = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2} \frac{1}{C_1 + C_2} \quad (2.82)$$

În cazul general, considerând

$$Z_1 = \frac{\frac{L_1}{C_1}}{j\left(L_1\omega - \frac{1}{C_1\omega}\right)}, \quad Z_2 = \frac{\frac{L_2}{C_2}}{j\left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}\right)} \text{ și } Z_k = \frac{1}{j\omega C_k} \text{ iar } \varphi = 2\frac{2\pi n}{N}$$

Din analiza circuitului din Figura 2.8 rezultă relația

$$\cos \varphi = 1 + \frac{Z_1}{Z_k} + \frac{Z_2}{Z_k} + \frac{Z_1 Z_2}{Z_k^2} \quad (2.83)$$

Relațiile (2.81) și (2.82) sunt cazuri particulare ale relației (2.83).

### 2.3.4 Regimul dinamic al magnetronului cu anodul prevăzut cu cavități

#### Caracteristica de sincronizare și randamentul magnetronului

În paragrafele anterioare a fost analizată mișcarea unui electron, în regim static sau dinamic, în magnetronul plan sau cilindric cu anod continuu.

În cazul magnetronului cu anod având mai multe cavități, câmpul electric are două componente  $E_p$  și  $E_\phi$ , care pot fi asimilate cu componentele  $E_y$  și  $E_z$  ale câmpului din magnetronul plan cu mai multe cavități. Aceste componente au un rol important în funcționarea magnetronului în regim dinamic. Astfel, componenta  $E_p \approx E_\phi$  se compune cu câmpul  $E_0$  și realizează selecția electronilor ieșiți din catod. Electronul care a ieșit cu fază „favorabilă” este supus acțiunii câmpului  $E_0 + E_\phi$  și execută o mișcare după o traiectorie cicloidală înclinată, realizând mai multe bucle de cicloidă (Figura 2.1).

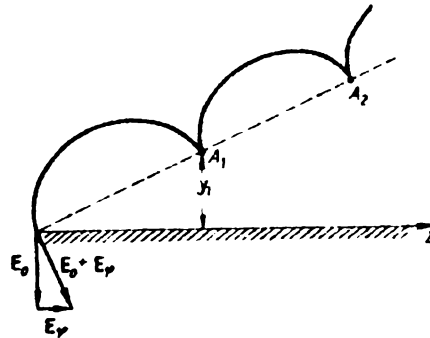


Figura 2.1 Influența componentei  $E_\phi$  asupra traiectoriei electronului cu faza favorabilă

Dacă electronul nu este util (are faza „nefavorabilă”), el este readus la catod în mai puțin de o perioadă (Figura 2.2).

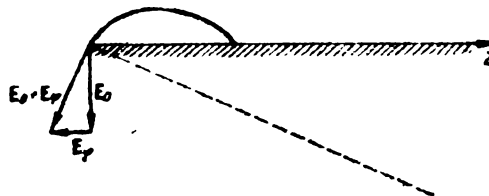


Figura 2.2 Influența componentei  $E_\phi$  asupra traiectoriei electronului cu faza nefavorabilă

În funcție de faza cu care ies din catod, electronii sunt triați de componenta  $E_\phi$ . La regimul dinamic al magnetronului plan s-a constatat că faza optimă a electronului este  $\phi = \pi$ .

De remarcat faptul că viteza medie a electronului de-a lungul axei  $z$ , sau în jurul catodului, nu este influențată de componenta  $E_\phi$ .

Componenta  $E_p$  are rolul de a realiza modulația în viteză a electronilor (Figura 2.3).

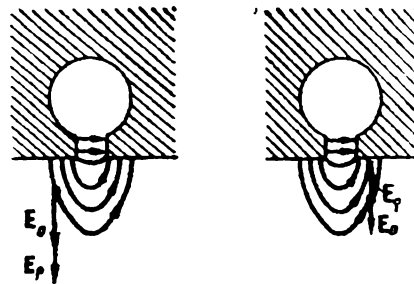


Figura 2.3 Influența componentei  $E_p$  asupra vitezei electronului

Când componenta  $E_p$  se adaugă la  $E_0$ , viteza medie a electronului crește, devenind

$$v_{0M} = \frac{E_0 + E_p}{B_0} \quad (2.84a)$$

Când componenta  $E_p$  are semn contrar cu  $E_0$ , viteza medie a electronului scade, devenind

$$v_{0m} = \frac{E_0 - E_p}{B_0} \quad (2.84b)$$

În general, se poate scrie că viteza medie a electronului este

$$v = \frac{E_0}{B_0} + \frac{E_0}{B_0} \sin \omega t \quad (2.85)$$

Relația (2.85) arată că există o modulație de viteză a electronilor ca și în cazul clistroanelor. Evident, această modulație de viteză are ca efect o modulație în densitate, o grupare a electronilor.

Dacă în jurul catodului se consideră o distribuție uniformă a electronilor, influența componentei  $E_p$  îi va obliga să se grupeze în spițe (Figura 2.4a). Individual electronii execută cicloide. Astfel rezultă mișcarea electronilor în cazul regimului dinamic în magnetronul cu mai multe cavități (Figura 2.4b).

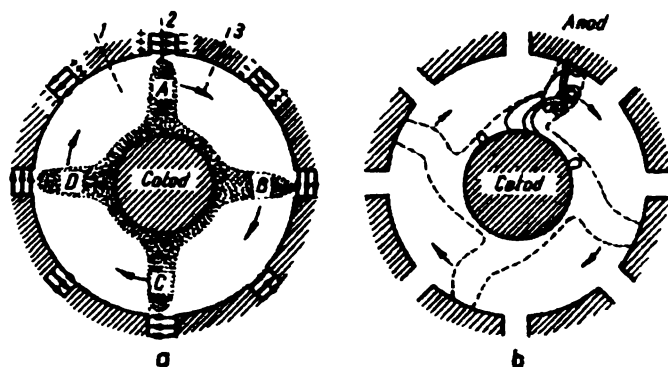


Figura 2.4 Distribuția sarcini în jurul catodului

Relația de sincronism scrisă pentru viteze liniare are forma

$$\frac{2\rho\omega_E}{N} = \rho\omega_e = v_0 = \frac{E_0}{B_0} \quad (2.86)$$

Se consideră raza medie a magnetronului la jumătatea distanței dintre anod și catod,

$$\rho = \rho_c + R \quad (2.87)$$

unde  $\rho_c$  este raza catodului;

$R$  - raza cercului corespunzătoare jumătății distanței  $d$  dintre anod și catod

Exprimând valorile razei  $R$ , ale câmpului electric constant  $E_0$  în funcție de tensiunea  $U_0$  și de câmpul magnetic de inducție  $B_0$ , ale pulsației electronului în funcție de pulsația câmpului electromagnetic, se obține forma finală:

$$\frac{U_0}{(\rho_a - \rho_c)B_0} = \frac{4\pi f}{N} \left[ \rho_c + \frac{m}{e} \frac{U_0}{(\rho_a - \rho_c)B_0^2} \right] \quad (2.88)$$

Această relație reprezintă ecuația caracteristicii de sincronizare. De aici se deduce tensiunea minimă de prag sub care magnetronul nu poate produce putere de foarte înaltă frecvență, deoarece grupul de electroni iese repede din sincronism și nu poate fi frânat în mod succesiv.



Tensiunea de prag are valoarea

$$U_{0p} = \frac{4\pi f \rho_c (\rho_a - \rho_c) B_0^2}{N \left( B_0 - \frac{2\omega_E m}{Ne} \right)} \quad (2.89)$$

Dacă  $B_0 \gg \frac{2\omega_E m}{Ne}$  relația (2.88) devine liniară și deci

$$U_{0p} \approx \frac{4\pi f}{N} \rho_c (\rho_a - \rho_c) B_0 \quad (2.90)$$

Dreapta  $U_{0p} - KB_0 = 0$  determină, împreună cu parabola regimului critic, domeniul regimului de lucru (dinamic) al magnetronului (Figura 2.5).

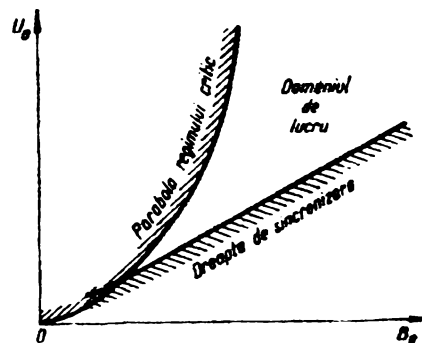


Figura 2.5 Domeniul regimului dinamic al magnetronului

Utilitatea modelului plan al magnetronului este pusă în evidență și de posibilitatea deducerii randamentului magnetronului printr-un calcul simplu. Energia potențială a electronului este  $eU_0$ . Când electronul se deplasează spre anod, el își mărește energia cinetică. Viteza cu care ajunge pe anod este cuprinsă între  $\frac{E_0}{B_0}$  și  $2\frac{E_0}{B_0}$ , prima fiind viteza de translație, iar a doua, suma dintre viteza de translație și viteza tangențială a electronului în mișcare pe orbita circulară.

Energia cinetică se transformă în energie disipată pe anod. Energia disipată maximă are valoarea

$$W_D = \frac{1}{2} m \left( 2 \frac{E_0}{B_0} \right)^2 \quad (2.91)$$

Diferența dintre energia potențială și energia disipată reprezintă energia cedată câmpului electromagnetic:

$$W_e = eU_0 - \frac{1}{2} m \left( 2 \frac{E_0}{B_0} \right)^2 \quad (2.92)$$

Dacă se raportează energia câmpului electromagnetic la energia potențială, înlocuind câmpul electric  $E_0$  în funcție  $U_0$  și de  $2R = d$ , rezultă randamentul

$$\eta = \left[ 1 - \frac{U_0}{U_{0c} 10^3} \left( \frac{B_{0c}}{B_0} \right)^2 \right] \cdot 100 \quad (2.93)$$

În care:

$$B_0 = \frac{U_0 \cdot N}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \frac{d_c \cdot 0,001}{2} \cdot \left[ \frac{(d_a - d_c) \cdot 0,001}{2} - \Delta \right]} \quad (2.94)$$

Unde:

$U_0$  – tensiunea anodică [kV]

$N$  – numărul de cavități rezonatoare

$f$  – frecvența de lucru [MHz]

$d_c$  – diametrul catodului [mm]

$d_a$  – diametrul anodului [mm]

$\Delta = A_s - A_i$  (diferența dintre abaterea superioară și abaterea inferioară pentru diametrul anodului)

$U_{0c}$  – tensiunea anodică critică exprimată prin:

$$U_{0c} = 1,25 \cdot 10^4 \cdot \frac{d_c}{2} \cdot 0,001 \cdot B_0 \quad (2.95)$$

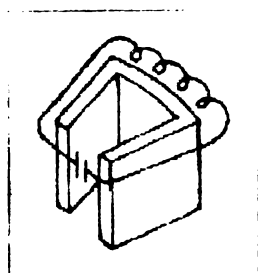
$B_{0c}$  - inducție anodică critică exprimată prin:

$$B_{0c} = \frac{9 \cdot \sqrt{U_0}}{\frac{d_a}{2} \cdot 0,001} \quad (2.96)$$

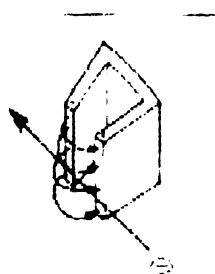
### 3 PRINCIPIUL DE FUNCTIONARE A MAGNETRONULUI

#### 3.1 Funcționarea magnetronului

Un magnetron este un oscilator cu microunde de înaltă putere în care energia potențială a unui nor de electroni de lângă catod este transformată în energie de radio-frecvență într-o serie de cavități rezonatoare ca cele arătate în Figura 3.1. Așa cum este descris de analogul frecvenței joase, peretele posterior al structurii poate fi considerat ca parte inductivă, iar regiunea capetelor paletelor ca parte transformatoare a circuitului rezonant echivalent. Frecvența rezonantă a unei cavități cu microunde este astfel determinată de dimensiunea fizică a rezonatorului împreună cu efectul reactiv al oricărei perturbări la partea inductivă sau capacitivă a circuitului echivalent. Acesta este un punct important și va fi rediscutat mai târziu.



**Figura 3.1 Rezonatorul magnetronului**



**Figura 3.2 Mecanismul transferului de energie**

### Transferul de energie în magnetron. Mecanismul rezonatorului

Pentru a susține oscilațiile dintr-un circuit rezonant trebuie să fie alimentate continuu cu energie în faza corectă. Referindu-ne la Figura 3.2, în cazul în care câmpul r.f. instantaneu, datorită stării constante a oscilațiilor în rezonator este în direcția arătată și un electron cu viteză se va mișca prin câmpul r.f. astfel încât acest câmp să micșoreze viteza într-o anumită măsură, atunci descreșterea energiei electronului se va compensa exact printr-o creștere a forței câmpului r.f.

Într-un magnetron, sursa electronilor este un catod încălzit amplasat pe axul structurii anodului care conține rezonatori cu microunde. Vezi Figura 3.3. Electronii pornesc de la catod și sunt accelerați către anod, datorită câmpului dc (curent continuu) stabilit de sursa de tensiune E. Prezența unui câmp magnetic puternic B în regiunea dintre catod și anod produce o forță asupra fiecărui electron care este reciproc perpendiculară pe câmpul de curent continuu și vectorii de viteză ai electronului, cauzând astfel mișcări spirale de la catod în curbe variate, în funcție de viteza inițială a electronului în momentul părăsirii catodului.

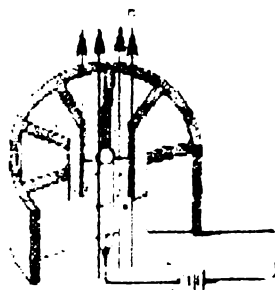


Figura 3.3 Structura anod catod

Pe măsură ce acest nor de electroni se apropie de anod cade sub influența câmpurilor r.f. la capetele paletelor, iar electronii sau vor fi încetiniți din viteză dacă se întâmplă să întâlnească un câmp r.f. opus, sau vor fi accelerați dacă sunt aproape de un câmp r.f. ajutător. Pentru că forța asupra unui electron datorată câmpului magnetic B este proporțională cu viteza electronului prin câmp, electronii cu viteza încetinită vor avea o forță de curbare mai mică și astfel se vor abate către anod, în timp ce electronii cu viteză mărită vor face o curbă înapoi de la anod. Rezultatul este o colectare automată de "spîțe" de electroni pe măsură ce norul se apropie de anod

(vezi Fig. 4), fiecare spiță fiind amplasată la un rezonator având un câmp r.f. opus, în următoarea jumătate de ciclu a oscilației r.f. modelul r.f. va avea o polaritate inversată iar modelul spițelor se va roti pentru a-și menține prezența într-un câmp opus.

Sincronismul "automatic" între modelul spițelor electronilor și polaritatea câmpului r.f. într-un dispozitiv de câmpuri încrucișate permite unui magnetron să mențină o funcționare relativ stabilă asupra unei game largi de parametri de intrare. De exemplu, un magnetron proiectat pentru o putere de ieșire de 200 kw vârf va funcționa destul de bine la 100 kw vârf de ieșire prin reducerea nivelului mecanismului / circuitului de modulație.

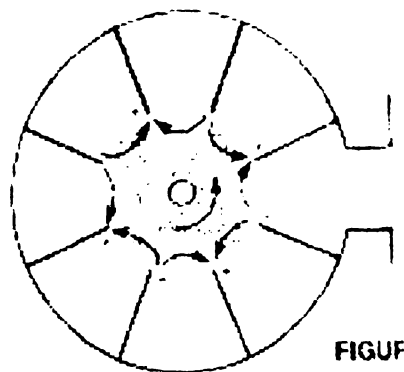


Figura 3.4

Veți observa că modelul instantaneu al câmpului r.f. arătat în Figura 3.1 are exact  $180^\circ$  de schimbare de fază (radiani) între fiecare pereche adiacentă de palete rezonatoare și de aceea este numit modul. Alte modele de oscilații (moduri) pot fi susținute de structura anodului; totuși, modelul modului va produce numărul maxim de spițe de electroni și astfel energia maximă de transfer către câmpul r.f., adică modul cel mai eficient. Asigurarea că magnetronul menține modul de oscilație, cu excluderea tuturor celorlalte moduri este una dintre cele mai importante probleme în proiectarea unui magnetron.

Tehnicile de verificare a modului într-un magnetron obișnuit, de exemplu conectarea electrică a capetelor paletelor alternante împreună pentru a asigura un potențial identic, folosirea similarităților geometrice între rezonatoarele alternante pentru a favoriza modul de oscilare va menține în mod adecvat controlul modului în

anodul magnetronelor convenționale. Datorită parametrilor de separare a modului, numărul rezonatoarelor în anodul magnetronelor convenționale este limitat și rareori depășește 20 de palete rezonatoare. Pentru că mărimea fizică a fiecărui rezonator este fixată prin frecvența de ieșire dorită, mărimea totală a anodului este limitată, restricționând astfel dimensiunile catodului și capacitatea de disipare a căldurii. Rezultatul este că la frecvențe mai înalte magnetronul convențional a redus capacitatea puterii de ieșire, are o siguranță mai redusă și o durată de funcționare mai mică ce poate fi îmbunătățită la frecvențe mai joase de microunde.

Caracteristica distinctivă a magnetronului coaxial este prezența unei cantități de stabilizare înalte  $Q$  între anod și ghidul de unde de ieșire. Teoria funcționării prezentată pentru un magnetron convențional se aplică în mod egal regiunii anod – catod a structurii coaxiale. Totuși, cavitatea coaxială de stabilizare oferă îmbunătățiri semnificative în funcționarea în ansamblu a magnetronului.

### 3.2 Controlul modului de funcționare superior

Operând cavitatea în regimul TE<sub>011</sub> și cuplând în fantă rezonatoarele anodice alternante la cavitate se produce un control anodic de o asemenea intensitate încât permite construcția magnetronelor coaxiale cu rezonatoare mai multe decât în cele convenționale. Aceasta înseamnă o densitate a emisiei catodice mai slabă, o viață mai scurtă și o mai mare siguranță.

#### 3.2.1 Câmpuri r.f. reduse în anod

În timp ce toată energia stocată într-un magnetron convențional este închisă în rezonatoarele paletelor, într-un magnetron coaxial aproximativ 85% din energia totală stocată este conținută în cavitatea de stabilizare. Aceasta înseamnă intensitate redusă a câmpului r.f. la capetele paletelor cu o tendință mai mică de arcuire.

#### 3.2.2 Stabilitate mai mare a frecvenței

Redistribuția energiei stocate în magnetronul coaxial face ca această cavitate  $Q$  de înaltă stabilizare să fie determinantul principal al frecvenței de ieșire a

magnetronului. Aceasta înseamnă un indice mai slab de alunecare a frecvenței, un spectru îmbunătățit și emisii parazite reduse.

### 3.2.3 Reglajul magnetronului cu diode

În magnetronul convențional reglajul se face prin inserarea unor borne inductive în partea posterioară a fiecărui rezonator sau prin încărcarea capacitivă în regiunea capetelor paletelor. Ambele tehnici reprezintă o perturbație adversă a geometriei naturale a rezonatoarelor care adesea rezultă în variații ale puterii de ieșire cu reglaj, instabilități de pornire, susceptibilitate crescută de arcuire și în general o viață redusă de funcționare a magnetronului. Spre deosebire de acesta, magnetronul coaxial este reglat prin mișcarea unui piston fără contact în cavitatea de stabilizare (vezi Figura 3.1). Rezultatul este un reglaj caracteristic fără discontinuități, o bandă de reglare îngustă și nici un dezavantaj care rezultă din perturbări în regiunea anod – catod.

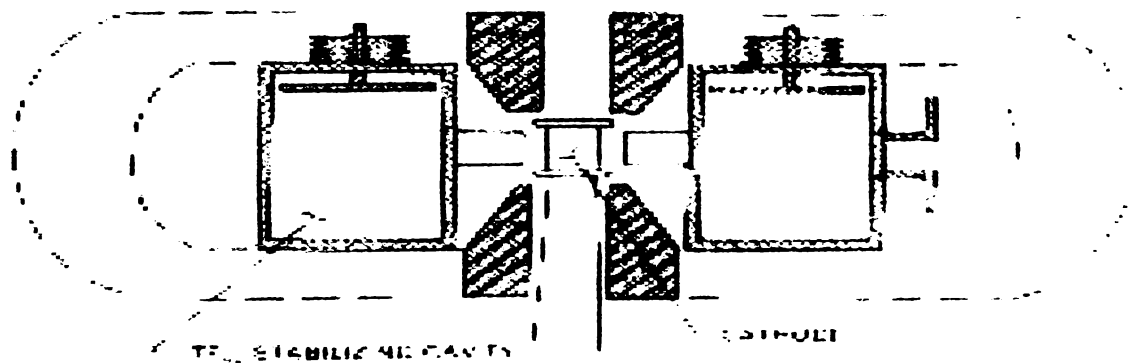


Figura 3.1

### 3.3 Studiu cu ajutorul mișcării magnetronului asupra forțelor electrice radiale într-un element cilindric ICR

Spectrometrele de masă cu rezonanță ion ciclotron funcționează prin reținerea unui ion-mostră într-o capcană Penning, care închide ionii într-un câmp

magnetic uniform și câmp electric nominal static cvadripolar (Peurrung et al 1996). Masa ionilor este determinată de agitarea ionilor la frecvența lor de rezonanță ion ciclotron (ICR), apoi prin observarea diminuării tranzitorii (de scurtă durată) a curentilor de imagine induși plăcilor de detectare care funcționează ca și electrozi electrostatici de prindere. Aceste semnale sunt digitalizate, transformate Fourier și dispuse ca un spectru de frecvență sau de masă. Într-o funcționare normală, lungimea (perioada) diminuării tranzitorii este atât de lungă încât lățimea liniilor observate este limitată de rezoluția de transformare. Această stabilitate extremă permite o distribuție precisă a frecvenței, dar pentru a folosi în întregime măsurarea de determinare a masei unui ion necesită o înțelegere mai profundă a mecanismelor fizicii.

Frecvența ICR observată este dată de relația(3.1)

$$\omega_{ICR} = \frac{\Omega}{2} + \frac{\Omega}{2} \sqrt{1 - \frac{4}{m\Omega} \left[ \frac{F(r)}{r} \right]} \quad (3.1)$$

unde  $\Omega = qB/m$  este frecvența ciclotronului ( $q =$  sarcina,  $B =$  câmpul magnetic,  $m =$  masa) și  $F(r)$  este forța radială.

În această lucrare se iau în considerare doar forțele electrice care pot fi scrise ca și gradientele ale potențialelor:

$$F(r) = qE_r = -q \frac{\partial}{\partial r} \Phi(r, \theta, z) \quad (3.2)$$

unde  $\Phi(r, \theta, z)$  este potențialul electric, care nu trebuie să fie o soluție a ecuației lui Laplace. Împreună cu mișcarea ciclotronului și oscilațiile axiale de-a lungul câmpului magnetic despre care nu discutăm aici, un ion sau un nor de ioni pot de asemenea să execute o mișcare de abatere slabă  $E \times B$ , numită în general modul "magnetron sau  $m = 1$  diocotron". Frecvența modului este dată de (3.3)

$$\omega_m = \frac{\Omega}{2} - \frac{\Omega}{2} \sqrt{1 - \frac{4}{m\Omega} \left[ \frac{F(r)}{r} \right]} \quad (3.3)$$

Este ușor de arătat că

$$\omega_{ICR} = \Omega - \omega_m \quad (3.1)$$



Astfel, atât frecvența ICR cât și modul magnetismului sunt strâns legate. Mai mult, ambele frecvențe conțin informații despre mediul electric. Totuși, frecvența joasă și foarte slaba dependență de masă a mișcării magnetronului îl fac să fie un mod preferat de caracterizare a efectelor electrice.

Se măsoară câmpul magnetic și potențialele electrice apoi se interpretează rezultatele. Într-o serie de calibrări multidimensionale folosind ioni  $\text{Cs}^+$  s-a stabilit întâi că acest câmp magnetic era de 7,04691(2) tesla și că abaterea lui pe termen lung a fost  $\ll 0,1$  ppm/h, așa cum a fost specificat de producător. Tensiunile de captare sunt în general de 10 ppm sau mai mult. Apoi, s-au putut determina coeficienții expansiunii /extinderii multipolare a potențialului electric a captatronului,  $C_2 = -0,935(3)$ ,  $C_4 < 0,005$  și  $C_6 = 0,22(1)$ ; aceste numere experimentale pot fi comparate cu cele prevăzute teoretic,  $C_2 = -0,938$ ,  $C_4 \approx 0,005$  și  $C_6 = 0,23$ . În final s-a determinat și efectele sarcinii ionului, unde doar termenul linear și de cea mai joasă ordine non-linear contribuie. Efectul de masă este atât de mic la electron încât ecuația pentru frecvența magnetronului poate fi simplificată la:

$$F_m (\text{Hz}) = 52,8208V + 3,06(10^{-6})N + \left[ -0,15r_m - 1,2z_p + 1,8r_m^2 z_p^2 \right] (10^{-3})V^2 + \left[ 2,3r_m^2 - 1,9z_p^2 \right] (10^{-8})N \quad (3.5)$$

Unde  $V$  este voltajul / tensiunea de captare în volți,  $N$  este numărul sarcinilor stocate,  $r_m$  este radiusul agitației magnetronului în mm iar  $z_p$  este lungimea în mm a norului de ioni. Această ecuație este scrisă într-o formă care ne permite să interpretăm contribuțiile diferite direct la frecvența magnetronului. Prima linie din partea dreaptă conține contribuțiile lineare de la captare și sarcina spațiului. A doua linie reprezintă contribuțiile de la termenul  $C_6$  ale câmpului de captare. A treia linie se obține din sarcina nonlineară a imaginii cu perturbația mărită. O relație pentru radiusul norului de ioni în termenii câmpului de captare, numărul de ioni și lungimea norului au fost aflate de Dubin (1996).

Modul magnetronului poate fi excitat în același mod ca și mișcarea ciclotronului, adică prin aplicarea unui semnal modular de frecvență transversal pe plăcile de excitare ale capcanei. Se monitorizează din nou răspunsul. În contrast cu modul ciclotronului, aici frecvențele sunt mult mai joase, de obicei de câteva sute de

Hz până la câțiva kHz, ceea ce înseamnă că modul are mult mai puțină energie decât o excitare a ciclotronului. Se observă de asemenea perioada de diminuare de la câteva secunde la minute.

Figura 3.1 arată evoluția în timp a unui nor mare de ioni electroni. Graficul frecvență / timp ne arată totuși că forma norului de electroni evoluează datorită coliziunilor cu gazul de fond (probabil hidrogen). Din evoluția frecvenței și folosind calibrații anterioare ale capcanei câmpului magnetic se pot determina parametrii norului de ioni. Acest nor a conținut aproximativ  $1,35 \times 10^7$  electroni. Inițial ( $t = 0$ ) norul a fost un sferoid prelungit de 8 mm în diametru și aproximativ 12,1 mm lungime. Rata extinderii radiale a fost de aproximativ  $1,5 \times 10^{-4}$  mm / s. După 1200 de secunde norul a fost un sferoid turtit de 12,5 mm în diametru și 8,5 mm lungime. Acest fel de date pot fi folosite în viitor pentru a măsura secțiunile transversale ale momentului neutru de transfer de ioni (sau electroni) în condiții termale normale (condiții care sunt dificil de îndeplinit prin tehnici standard ale tubului de comandă dinamică).

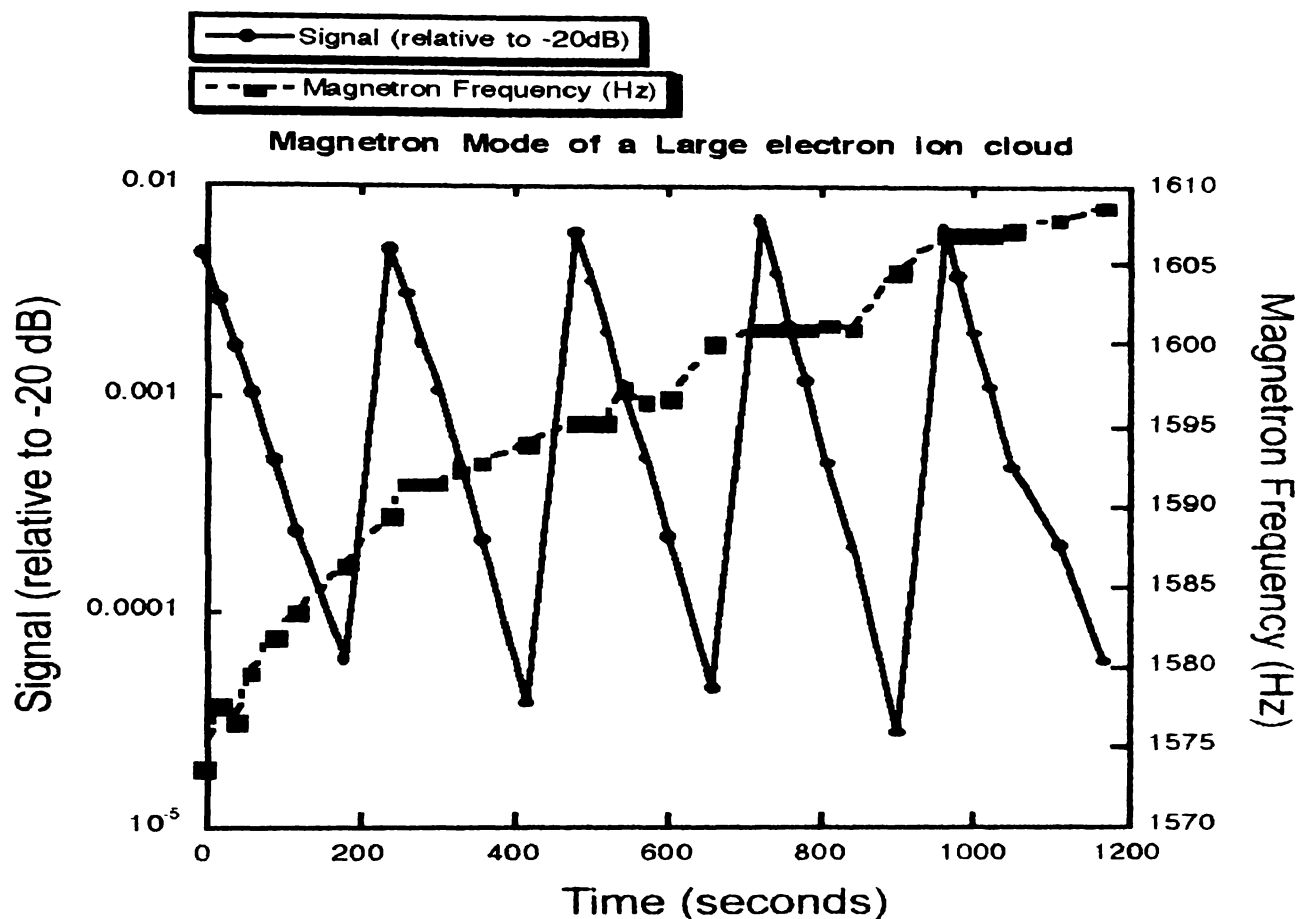


Figura 3.1

Deși termenii anarmonici și efectele lor sunt mici, ei pot fi repede observați în acest sistem.

### 3.4 Magnetron cu frecvență aleatorie

Frecvența aleatorie (FA) în ceea ce privește funcționarea radarelor este definită ca fiind capacitatea de a regla frecvența de ieșire a radarului cu o viteză suficientă pentru a produce o schimbare a frecvenței impuls la impuls mai mare decât cea necesită pentru a obține o decorelare efectivă a ecourilor adiacente ale radarului.

S-a stabilit foarte precis că FA împreună cu circuitele de sarcină de integrare corespunzătoare oferă o migrare / scintilație redusă a ecoului, o abilitate crescută de a detecta țintele într-un mediu cu ecouri parazite, eliminarea celei de-a doua ture de ecouri și o rezistență crescută la contramăsurători electronice. chestiuni imposibile la o frecvență fixă sau sisteme de radar reglabile. Este important de observat că

exceptând rezistența ECM, crescând spațiul frecvenței impuls cu impuls se va îmbunătăți funcționarea sistemului care poate fi realizat maxim în punctul în care este obținută decorelarea (nominal  $1/tp$ ). Spațiile frecvenței impuls la impuls mai mari decât această valoare critică nu produc creșteri în performanța sistemului și de fapt poate rezulta o descreștere a performanței datorită inacurateții mari IF (frecvență medie), determinate de necesitatea AFC (reglare automată a frecvenței) de a corecta erori de frecvență impuls la impuls.

Pe de altă parte, în ceea ce privește rezistența la bruiatul electronic (ECCM), cu cât este mai mare spațierea frecvenței impuls – la - impuls cu atât mai dificilă va fi centrarea unui transmițător pe frecvența radar pentru a se interfera efectiv cu funcționarea sistemului.

Fiecare aplicație a sistemului radar trebuie luată în considerare separat pentru a determina care parametri FA vor îndeplini mai bine cerințele specifice. Așa cum cerințele FA ale fiecărui radar variază, tot așa diferă și mecanismele pentru a produce optim parametrii aleatorii necesari. Nu a fost găsită o schemă unică de reglare care să fie universal valabilă și să satisfacă cerințele fiecărei aplicații FA.

**Considerații asupra proiectului unui magnetron cu frecvență aleatorie**

La prima vedere s-ar putea trage concluzia următoare: cu cât este mai mare schimbarea frecvenței la cea mai mare rată, cu atât performanța radarului va fi mai bună. Din păcate, acest lucru nu este adevărat.

S-au făcut multe studii teoretice separate și experimente cuprinzătoare pentru a stabili relația dintre creșterea performanței radarului și diferenței frecvenței impuls la impuls. Creșterea funcționării eficiente este atinsă atunci când diferența frecvențelor dintre impulsurile radarului este destul de mare pentru a elimina orice corelație dintre ecourile reflectate.

**Devierea frecvenței aleatorii:** Variația totală de frecvență a transmițătorului în timpul funcționării cu frecvențe aleatorii.

**Rata frecvenței aleatorii:** Numărul de impulsuri pe secundă în care frecvența transmițătorului traversează devierea frecvenței aleatorii și se întoarce la frecvența de pornire.

Studiile experimentale au arătat că această creștere a performanței variază cu  $N$ , unde  $N$  este numărul impulsurilor independente (decorelate) în cadrul ansamblului de circuite de sarcină, până la maximum 20 de impulsuri.

Trebuie observat că numărul impulsurilor, care poate fi eficient integrat, nu poate fi mai mare decât numărul impulsurilor amplasate asupra țintei în timpul unei testări a antenei și de aceea lățimea razei antenei și rata testării devin factori care trebuie considerați în determinarea perioadei de integrare a radarului.

Folosind cele de mai sus, o valoare proiectată pentru Abaterea frecvenței aleatorii poate fi acum exprimată în termeni de parametri ai funcționării radarului.

Abaterea frecvenței aleatorii =  $N / T$ , unde  $N$  este numărul impulsurilor pe țintă în timpul unei testări radar, sau 20, oricare este mai mic, iar  $T$  este cea mai mică durată a impulsurilor folosite în sistem.

Determinarea ratei de abatere se cere acum. Obiectul trebuie să traverseze întreaga gamă de abateri în perioada necesară pentru a transmite numărul de impulsuri pe țintă în timpul unei testări a antenei.

#### Exemplu:

Să presupunem că se dorește adăugarea de frecvență aleatorie unui radar cu următorii parametri de funcționare:

Durata impulsului: 0,25, 0,5 și 1,0 ms

Raportul ciclului de lucru: 0,001

Impulsuri pe țintă, per testare 16

Folosind formulele derivate mai sus se obține

Durata abaterii frecvenței =  $N/T=16/0,25=64$  MHz

$R = \text{ciclul de lucru} / T = 0,001/0,25 \times 10^{-6} = 4000$  pps

Timpul pentru 16 impulsuri =  $16/4000=0,004$  s

Rata frecvenței aleatorii\* =  $1/(2)(0,004) = 125$  Hz

\*Numărul 2 în numitor dovedește faptul că două abateri prin gama de frecvențe aleatorii apare în timpul fiecărui ciclu al ratei frecvenței aleatorii.

Parametrii aleatorii folosiți mai sus au fost derivați folosind reducerea ecourilor parazite ca obiectivul cel mai important. Eliminarea scânteierii țintei

necesită satisfacerea unei condiții adiționale, și anume faptul că abaterea frecvenței aleatorii în MHz trebuie să fie cel puțin egală cu  $150/D$ , unde  $D$  este distanța caracteristică în metri între punctele majore de reflectare pe secțiunea transversală a țintei.

Pentru majoritatea situațiilor practice, o abatere care a îndeplinit cerințele reducerii ecourilor parazitare va fi de obicei suficientă pentru a satisface și cerințele de scânteiere ale țintei.

## 4 GENERAREA FORMEI CONSTRUCTIVE A MAGNETROANELOR

Realizarea magnetroanelor presupune următoarele: întocmirea unor proiecte de execuție bună, alegerea celor mai indicate materiale, folosirea tehnologiilor de execuție și asamblare adecvate, vidarea și formarea magnetronului.

### 4.1 Materiale și tehnologii folosite în construcția magnetroanelor

Alegerea materialelor care intră în componența magnetroanelor s-a făcut avându-se în vedere fenomenele care au loc în magnetron în timpul funcționării, în timpul depozitării și în final, dar nu în ultimul rând de comportarea lor în timpul execuției. Se amintesc aici câteva din aceste fenomene: electrice, termice, mecanice, privind vidarea etc.

#### 4.1.1 Catodul

Din punct de vedere constructiv și a modului de funcționare catodii sunt cu încălzire directă și cu încălzire indirectă, în general fiind activați. S-au luat în studiu magnetroanele cu putere de 250 W catodii cu încălzire indirectă cu strat din atomi de bariu, iar pentru magnetroanele cu puteri mai mari (800 W și 1500 W) catodii cu încălzire directă din wolfram toriat, carburati.

În legătură cu catodul cu încălzire directă, problema de bază este alegerea materialului din care este formată spira care emite electronii.

Spira realizată în condiții de laborator este formată din wolfram cu 1,7 – 2 % toriu care este supusă apoi unui proces de carburare și activare. În urma procesului de carburare scade lucru de extracție a electronilor în așa fel încât la 200 °K se obține un curent de emisie de 3,400 mA / cm<sup>2</sup>.

Discurile reflectoare și tijele de alimentare se realizează din molibden. Alegerea molibdenului s-a făcut avându-se în vedere temperatura la care se ajunge în zona respectivă (temperatura de evaporare este mai mare decât temperatura catodului) și faptul că molibdenul este metalul cu absorbția de hidrogen mai mică, hidrogenul absorbit în timpul asamblării magnetronului; prin desorbție se elimină la vidare crescând costul vidării.

Lipirea spirei catodului de discurile reflectoare se face cu platină pe considerente de temperatură și punct de evaporare în vid.

Din punct de vedere tehnologic spira de wolfram toriat se execută prin înfășurarea în jurul unui dorn filetat cu pasul egal cu pasul spirei. Având în vedere modul de comportare al wolframului la deformare și în timpul deformării sârma se încălzește până la temperatura de creștere a plasticității acesteia.

Catodul cu încălzire indirectă a fost folosit la realizarea magnetronului cu puterea de 250 W. Numărul mic de magnetroane realizat de acest tip nu ne-a permis să tragem concluzii relevante asupra modului de comportare în funcționare.

Problemele deosebite în realizarea acestui tip de catod au fost acoperirea filamentului de încălzire cu o masă ceramică izolatoare și depunerea de substanță emisivă pe tubul de nichel.

Inelele reflectoare care intră în componența catodului se realizează prin sinterizare din molibden. Tijele de alimentare sunt executate din sârmă de molibden prin deformare la rece. Izolatorul ceramic se realizează de asemenea prin sinterizare.

Asamblarea catodului decurge în două faze. În prima fază se assemblează reperele conform Figura 4.1a, urmând ca în a doua fază să se realizeze asamblarea celui de-al doilea disc reflector spirei și tijeii centrale (Figura 4.1b)



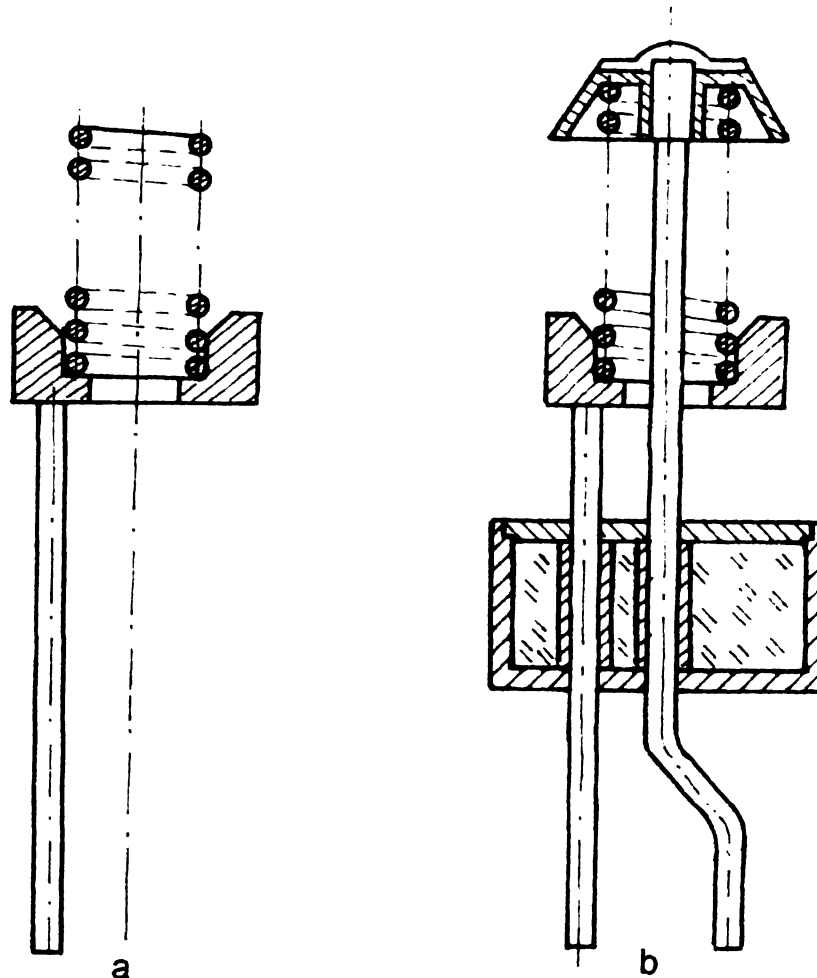


Figura 4.1 Fazele asamblării catodului

#### 4.1.2 Anodul

Subansamblul anod are în componența sa blocul anodic, lamele cavității rezonante, inele de scurtcircuitare, antena, piese polare și bușele de ieșire.

Blocul anodic, cavitățile rezonante și inelele de scurtcircuitare se execută din cupru liber de oxigen marca OFHC (Oxygen Free High Conductivity). Alegerea cuprului la realizarea acestor repere s-a prefăcut având în vedere considerente de ordin electric și cele privind absorbția gazelor. O cantitate ridicată de oxigen în cupru face cuprul neutilizabil. Datorită combinației oxigenului cu hidrogenul pe perioada asamblării (la asamblare se folosește un cuptor cu atmosferă reducătoare de hidrogen) se face posibilă operația așa zisei "boli de hidrogen" care face blocul

anodic "transparent" la gaze. Prezența oxigenului în cupru poate avea două cauze. În primul rând oxigenul este absorbit de cupru în cadrul elaborării se acceptă la construcția magnetronului cupru care să nu depășească 20 părți pe milion (p.p.m) oxigen după elaborare.

O a doua cauză este absorbția oxigenului în timpul execuției reperelor și asamblării subansamblului anod.

Conform cu 45 curba dependenței cantității de oxigen absorbit de temperatură, trece printr-un minim care se găsește pentru oxigen și în cupru în apropiere de 400 °C. Recomandarea pe care o facem și pe care am avut-o în vedere la execuția magnetronului este aceea că temperatura maximă atinsă de blocul anodic să nu depășească 400-450 °C și lipirea subansamblului anod să se facă în atmosferă reducătoare de hidrogen.

Hidrogenul folosit ca atmosferă reducătoare asigură o curgere foarte bună a aliajului de lipit în interstițiile dintre piese și mai prezintă avantajul că până la temperaturi de 1000 °C este absorbit în cantități foarte mici de cupru. 45

Din punct de vedere electric s-a ales cupru pentru că este nemagnetic și prezintă o conductivitate electrică bună. Curentul de înaltă frecvență circulă în cavitățile rezonante la o adâncime mică în piese. Având în vedere acest lucru toate reperetele de cupru sunt lustruite pentru a se evita pierderile Joule-Lenz.

Asamblarea blocului lamelelor cu blocul anodic se face prin lipire cu aliaj de argint, lamelele putând fi fixate în canalele practicate în bloc sau poziționarea lor făcându-se cu ajutorul unui dispozitiv.

Piesele polare fixate la capetele blocului anodic au o construcție specială (Figura 4.1) care să favorizeze concentrarea câmpului magnetic în zona spațiului de întârziere.

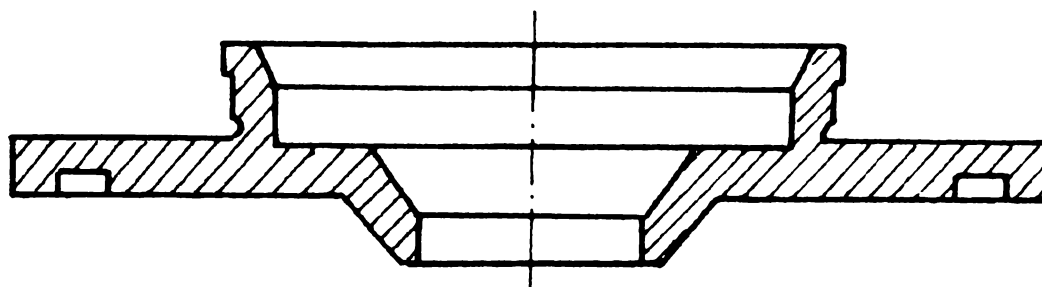


Figura 4.1 Piesă polară

Două sunt proprietățile din punct de vedere magnetic pe care trebuie să le îndeplinească materialul din care se execută aceste piese: să nu aibă reanență magnetică și să nu aibă proprietăți de anizotropie magnetică.

Aceste condiții sunt îndeplinite de aliajul cunoscut sub numele de ARMCO. În rest piesele trebuie să asigure păstrarea vidului în incintă și să nu conțină o cantitate mare de gaze.

Pentru a asigura condițiile bune de lipire piesele polare sunt cuprate și lustruite. La contactul oxigenului cu cuprul se formează granule mari de oxid de cupru ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ), care se reduc la încălzirea în timpul vidării, ceea ce duce la obținerea unui strat de cupru lipsit de oxigen și pe suprafața pieselor polare.

Pentru realizarea trecerilor de curent în vid se folosesc joncțiuni metal-sticlă sau metal-ceramică. Pentru realizarea unei bune joncțiuni și care să reziste în timp se recomandă ca sticla sau ceramica să aibă același coeficient de dilatare ca metalul pe care se lipește. În această idee bucșele de ieșire se execută din kovar care este un aliaj de fier cu cobalt cu coeficientul de dilatare controlat.

Antena prin care se extrage puterea de înaltă frecvență din magnetron este cuplată la una din lamelele cavității rezonante și se realizează din cupru.

Lipirea subansamblului anod se face cu un aliaj entectic din cupru și argint (Ag72 Cu28). S-a evitat folosirea argintului pur pentru că oxigenul se absoarbe în argintul topit în cantitate foarte mare (în intervalul de temperatură  $920^\circ\text{C} - 970^\circ\text{C}$ ) solubilitatea oxigenului este de 40 de ori mai mare decât cantitatea de metal. La răcirea argintului care a absorbit cantități mari de oxigen, oxigenul este degajat violent, formând pori și fisuri în masa metalului, surse sigure de neetanșeități în

elementele lipite. Pe măsură ce în argint se introduce cupru scade și temperatura de topire și se reduce în același timp și cantitatea de oxigen absorbit.

În ce privește tehnologiile de execuție a reperelor din subansamblu anod, este de reținut că s-au folosit metode clasice de prelucrare prin așchiere și prin prelucrare la rece.

Indiferent de modul de obținere se urmărește ca pe timpul prelucrării pieselor să nu se dezvolte căldură prea mare, căldură care favorizează absorbția de oxigen. În același timp se are în vedere gradul prelucrabilitate a cuprului lipsit de oxigen și calitatea suprafeței care trebuie obținută.

Ca operații specifice prelucrării blocului anodic sunt operațiile de strunjire, de degroșare și de finisare. În urma unor cercetări experimentale au fost stabilite elementele regimului de așchiere care sunt date în Tabelul 4.1 Strunjirile se execută cu cuțite placate cu plăcuțe din carburi metalice.

**Tabelul 4.1 Elementele regimului de așchiere**

Faza de lucru	t (mm)	s (mm/rot)	v (m/min)
Strunjire de degroșare	2,5	0,4	200-250
Strunjire de finisare	0,2	0,008	300-350

Notă: t –adâncimea de așchiere; s –avansul; v –viteza de așchiere

Ca urmare a aplicării acestor regimuri de așchiere s-au putut obține rugozități foarte mici (0,8) câmpul de toleranță H (h) și clasa de precizie 7 (6).

În cazul anodului monobloc cavitățile rezonante au fost prelucrate prin electroeroziune pe o mașină de prelucrat prin eroziune electrică ELEROFIL – 10, folosind un electrod filiform.

Parametrii de lucru utilizați, în prelucrarea cavităților sunt dați în Tabelul 4.2

**Tabelul 4.2 Parametrii de lucru**

Viteza (m/min)	0,3
Intensitatea curentului (A)	2,74 – 6,7
Diametrul firului (mm)	0,2

Lamelele din care se realizează cavitățile rezonante se execută pe ștanțe de precizie din tablă. După operația de ștanțare sunt finisate pe suprafețele pe care circulă curenții de înaltă frecvență în așa fel încât asperitățile de pe suprafață să aibă adâncimea mult mai mică decât adâncimea de pătrundere a curențului. Această stare de lucruri defavorizează pierderile prin efect Joule – Lentz și reduc suprafața de absorbție a oxigenului și hidrogenului.

Bucșele de ieșire se realizează prin presare la rece pe matrițe de ambutisat în două faze. După ambutisare se strunjesc pentru a se forma zonele prin care se assemblează cu piesa polară și cu sticla ceramică. În vederea asamblării lamelelor pe blocul anodic se folosește dispozitivul prezentat în Figura 4.2. Se constată că acest dispozitiv are un suport (1) și un dorn central (2). Blocul anodic se centrează pe suport, lamela se introduce între corpul anodic și domul central. Introducerea lamelelor se face în mod succesiv diametral opus și se fixează în bloc prin deformare cu ajutorul unei dălți în zona de asamblare. Orientarea lamelelor și precizia cavităților rezonante se obțin cu ajutorul canalelor din blocul anodic. După fixarea tuturor lamelelor blocului anodic se scoate de pe dispozitiv. Nu același lucru se întâmplă în cazul blocului anodic care nu are canale pe suprafața interioară.

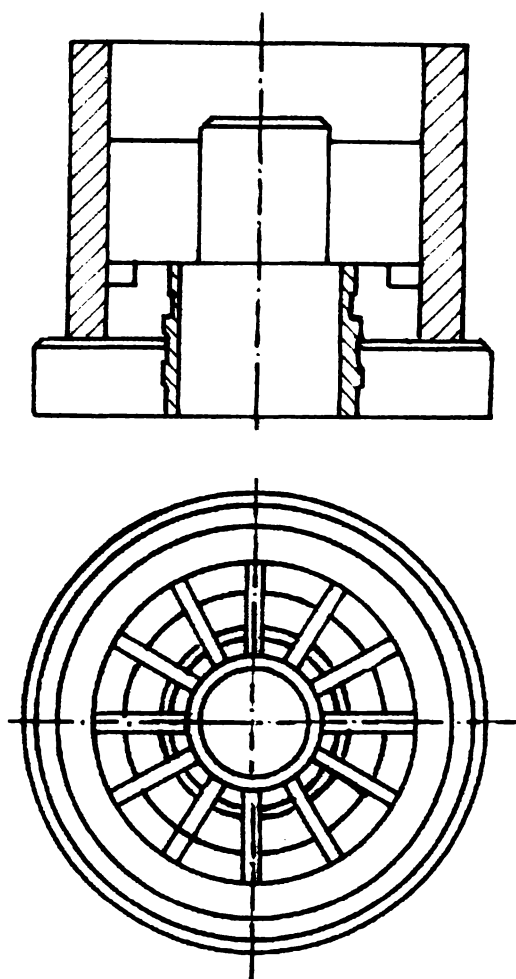


Figura 4.2

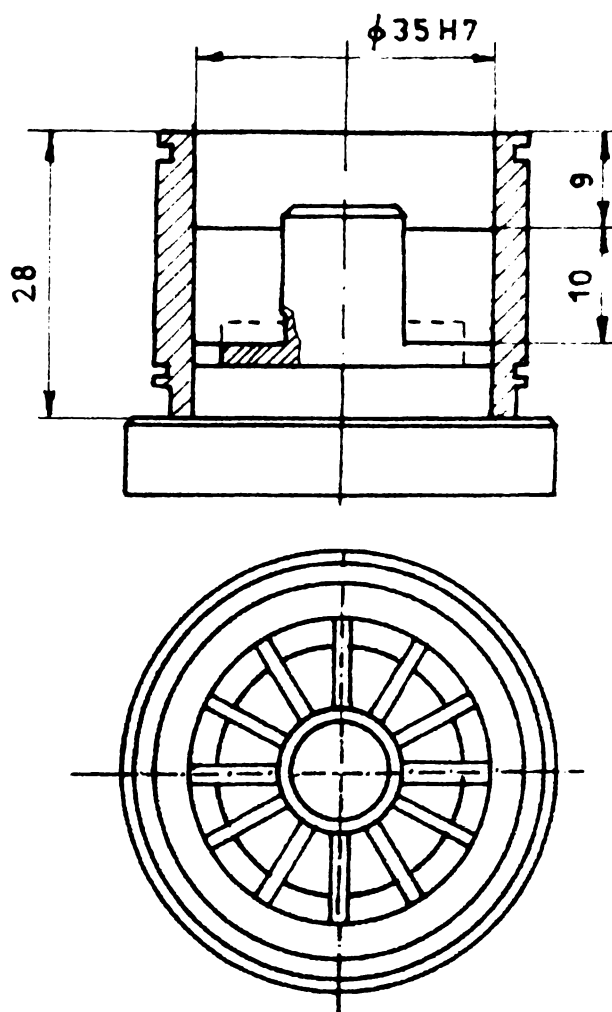


Figura 4.3

În vederea orientării lamelelor, suportul dispozitivului este prevăzut cu canale orientate radial în care se introduc lamelele (Figura 4.3).

În vederea lipirii, aliajul de argint sub forma unor călăreți este plasat prin presare în zona în care urmează să aibă loc lipirea. Pe blocul anodic astfel obținut se introduc piesele polare, antena și bușele de ieșire.

Pentru menținerea în poziție fixă a antenei pe timpul lipirii se folosește un dispozitiv plasat în bușă de ieșire. De reținut este faptul că în piesele polare și în blocul anodic există practicate canale în care se introduce aliajul de lipit în formă de sârmă.

Se face mențiunea că înainte de asamblare toate piesele se curăță. În prima fază piesele se spală cu apă caldă și detergent, apoi cu alcool. După uscarea cu aer

cald piesele se introduc într-o baie de tricloretilenă. După uscare, piesele nu se vor manevra decât cu mâna în mănușă. După asamblare, subansamblul anod este introdus în cuptorul cu atmosferă reducătoare. Încălzirea cuptorului se face treptat. Viteza de încălzire este de 25 – 28 °C / min. În vederea lipirii, subansamblul se menține în cuptor 15 minute. Scoaterea din cuptor se face după răcire. În scopul răcirii se întrerupe alimentarea cu curent electric a rezistoarelor cuptorului fără însă a se întrerupe alimentarea cu hidrogen a cuptorului, răcirea făcându-se odată cu cuptorul.

O altă tehnologie de asamblare a blocului anodic este cea folosită la magnetronurile cu puterea 650 W. Conform Figura 4.4 se poate constata că bușele de ieșire au o altă configurație decât bușele de ieșire pentru magnetronul cu puterea de 800 W, iar blocul anodic prezintă două degajări la cele două capete.

Prin canalul prelucrat, la cele două capete a anodului se obțin două zone din anod cu grosimea redusă în raport cu grosimea peretelui anodului, care favorizează posibilitatea de asamblare prin sudură. Se folosește pentru sudură procedeul de sudură WIG, care este o sudură cu arc electric fără material de adaos și în atmosferă protectoare.

Se apreciază că folosirea acestei tehnologii duce la reducerea costului magnetronului în condițiile păstrării aceluiași nivel de fiabilitate. Această reducere a costului se bazează pe eliminarea aliajelor de lipit (Ag – Cu) de la asamblarea pieselor polare și bușelor de ieșire cu anodul și pe faptul că tehnologia propusă asigură o frecvență mai mare de execuție prin reducerea timpului de asamblare. După lipire subansamblul anod este supus unei operații de control a modului în care a avut loc lipirea. Dacă rezistă încercărilor de păstrare a vidului, urmează asamblarea catodului.

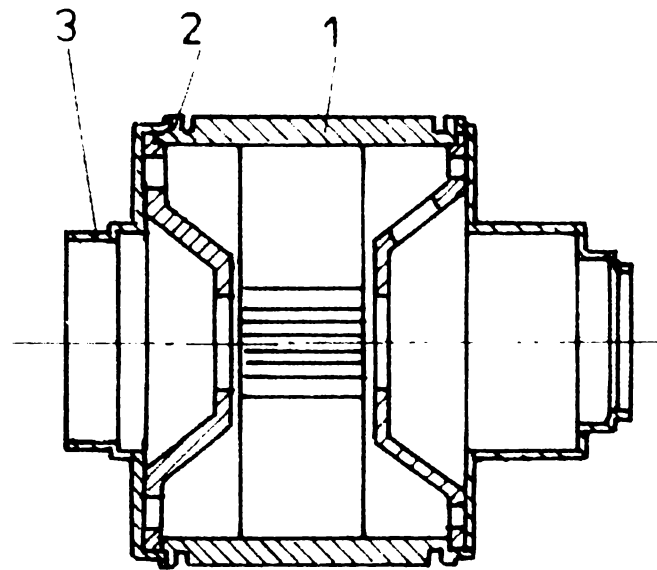


Figura 4.4 Bloc anodic (M650)

Secțiune 1 – anod; 2 – Piesă polară; 3 – Bucșă de ieșire

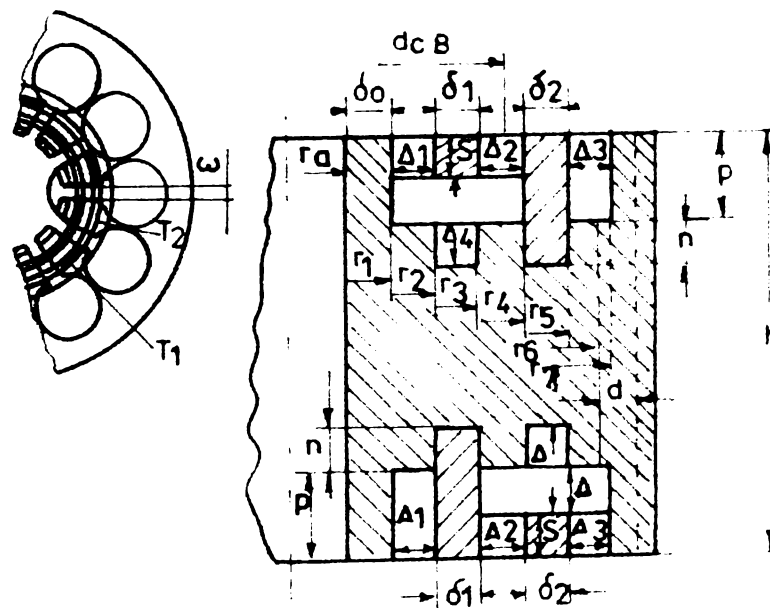


Figura 4.5 Représentarea ligamentelor duble bilaterale fantă – orificiu

$$C_{CB} = \epsilon_0 \left( \frac{P_{cp1} \tau_1}{\Delta_{cp1}} + \frac{P_{cp2} \tau_{21}}{\Delta_{cp2}} + \frac{2S\omega}{\Delta_2} \right); P_{cp1} = P + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} + S + \delta_1 + n;$$

$$P_{cp2} = P + \frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} + S + \delta_{21} + n; \Delta_{cp1} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + 2\Delta + \Delta_4}{5}; \Delta_{cp2} = \frac{\Delta_2 + \Delta_3 + 2\Delta + \Delta_4}{5};$$

$$\tau_1 = \frac{\pi(r_1 + r_4)}{N} - \omega; \tau_{21} = \frac{\pi(r_3 + r_7)}{N} - \omega; h_{cp} = h - 2P \frac{r_7 - r_6}{d}$$



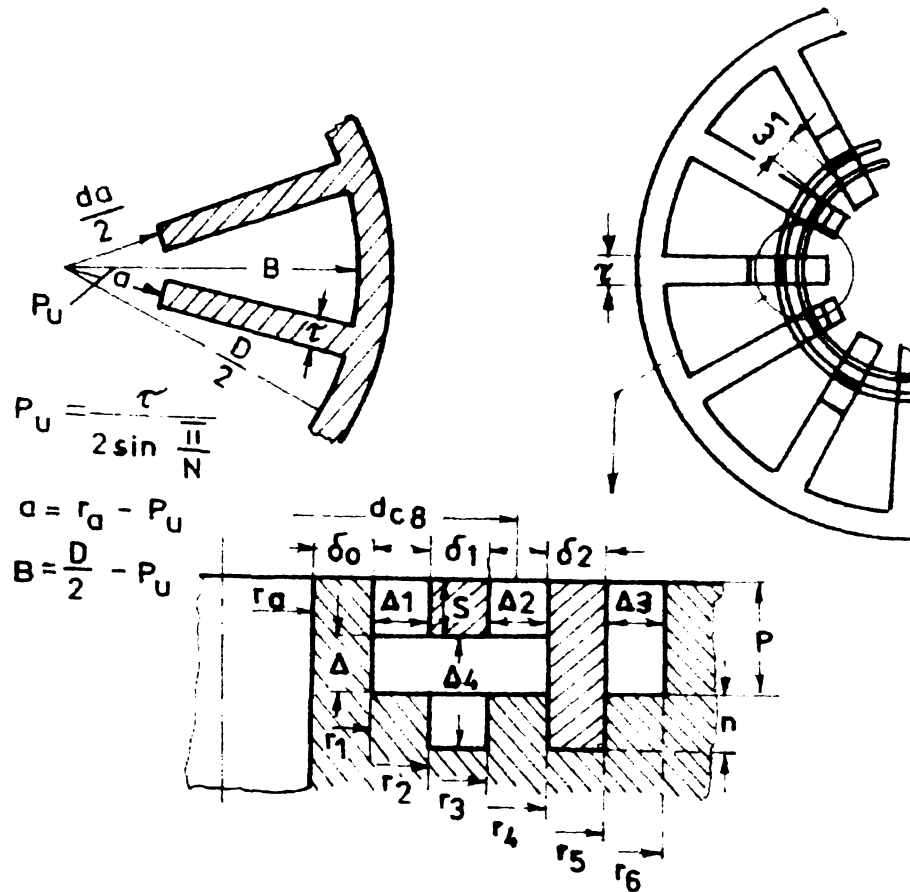


Figura 4.6 Reprezentarea ligamentelor duble bilaterale tip sector pentru ligamentele pavajului superior al blocului anodic

$$C_{CB} = \left\{ \frac{P_{cp1} \tau}{\Delta_{cp1}} + \frac{P_{cp2} \tau}{\Delta_{cp2}} + \frac{2S\omega}{\Delta_2} \right\}; P_{cp1} = P + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} + S + \delta_1 + n,$$

$$P_{cp2} = P + \frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2} + S + \delta_2 + n, \Delta_{cp1} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + 2\Delta + \Delta_4}{5};$$

$$\Delta_{cp2} = \frac{\Delta_2 + \Delta_3 + 2\Delta + \Delta_4}{5}; \omega_1 = \frac{\pi d_c}{N} - \tau; h_{cp} = h - 2P \frac{q}{b-a}$$

$$q = \Delta_1 + \delta_1 + \Delta_2 + \delta_2 + \Delta_3$$

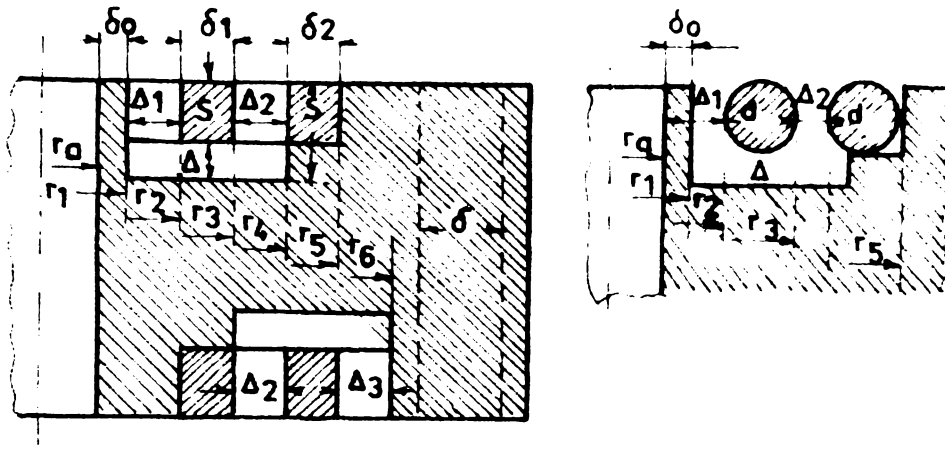


Figura 4.7 Schiță pentru calculul capacității ligamentelor duble bilaterale sferice pentru tipul fantă – orificiu

$$C_{CB} = \left( \frac{P_{cp1} \tau}{\Delta_{cp1}} + \frac{P_{cp2} \tau}{\Delta_{cp2}} + \frac{2S\varpi}{\Delta_2} \right); P_{cp1} = P + S + \delta_1 + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2};$$

$$P_{cp2} = P + S + \delta_2 + \frac{\Delta_2 + \Delta_3}{2}; \Delta_{cp1} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta}{3};$$

$$\Delta_{cp2} = \frac{\Delta_2 + \Delta_3 + \Delta}{3}; \tau_1 = \frac{\pi(r_1 + r_4)}{N} - \varpi; \tau_2 = \frac{\pi(r_3 + r_6)}{N} - \varpi; d_c = \frac{2}{\pi}(S + \delta_1)$$

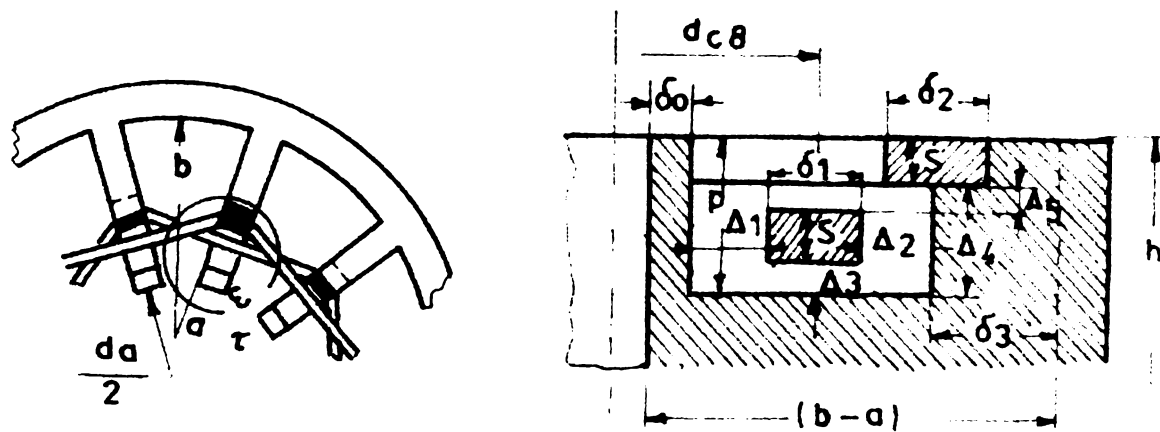


Figura 4.8 Schiță pentru calculul capacității ligamentelor poligonale, pentru calculul volumului sectorial

$$C_{CB} = \varepsilon_0 \left\{ \tau \left( \frac{4S}{\Delta_1} + \frac{\delta_1}{\Delta_3} + \frac{\delta_1}{\Delta_4} \right) + \frac{2S \left( \delta_1 \sin \frac{2\pi}{N} + \omega_1 \cos \frac{2\pi}{N} \right)}{\Delta_5} \right\}$$

$$\omega_1 = \left( \frac{d_{CB}}{2} - \frac{\tau}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{N} \right) \operatorname{tg} \frac{2\pi}{N}; h_{cp} = \frac{(\delta_0 + \delta_3)h + (\Delta_1 + \delta_1 + \Delta_2)(h - 2P)}{b - a}$$

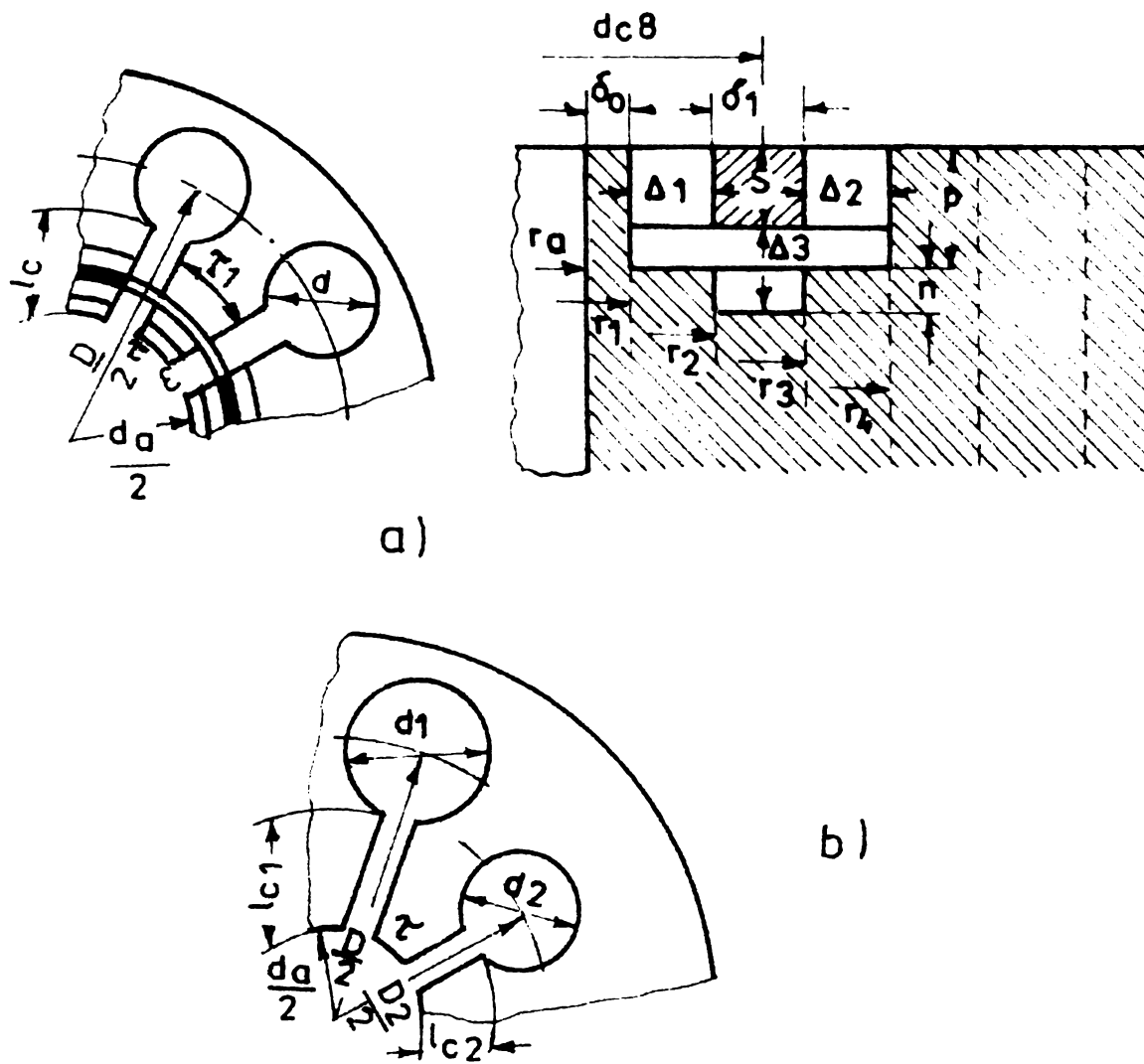


Figura 4.9 Sistem rezonator cu diapazonul de 50 mm

a) secțiune algoritmică gravată pentru tipul „cu ligamente ordinare”; b) secțiune plată

$$C_{CB} = \left( \frac{P_{cpl} \tau_1}{\Delta_{cpl}} + \frac{2S\varpi}{\Delta_2} \right); P_{cpl} = P + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2} S + \delta_1 + n,$$

$$\Delta_{cpl} = \frac{\Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3}{3}; \tau_1 = \frac{\pi(r_1 + r_4)}{N} - \varpi; d_{cb} = r_1 + r_4$$

$$l_{c1} = \frac{D_1 - \sqrt{d_a^2 - \omega^2} - \sqrt{d_1^2 - \omega^2}}{2}; l_{c2} = \frac{D_2 - \sqrt{d_a^2 - \omega^2} - \sqrt{d_2^2 - \omega^2}}{2};$$

$$L_1 = \mu_0 \frac{3(d_1^2 + 0,76\omega l_{c1})}{4(h + 0,45d_1)}; L_2 = \mu_0 \frac{3(d_2^2 + 0,76\omega l_{c2})}{4(h + 0,45d_2)},$$

$$C_1 = \varepsilon_0 (h + 0,3\omega) \left( \frac{l_{c1}}{\omega} + 0,73 \lg \frac{L_0}{\omega} + 1,13 \right); C_2 = \varepsilon_0 (h + 0,3\omega) \left( \frac{l_{c2}}{\omega} + 0,73 \lg \frac{L_0}{\omega} + 1,13 \right)$$

$$\lambda_1 = 2\pi \sqrt{L_1 C_1}; \lambda_2 = 2\pi \sqrt{L_2 C_2}; \rho_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}}; \rho_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}};$$

$$\lambda_0 \approx \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2}; \rho_c \approx \frac{2\rho_1 \rho_2}{N(\rho_1 + \rho_2)}$$

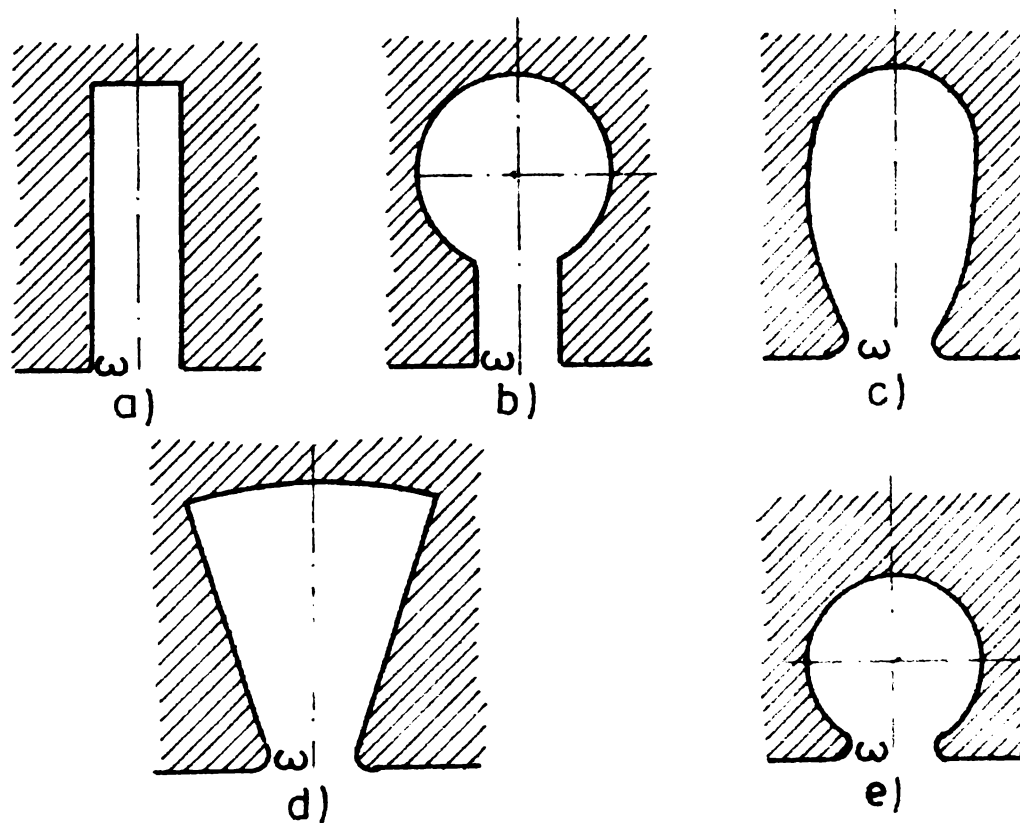
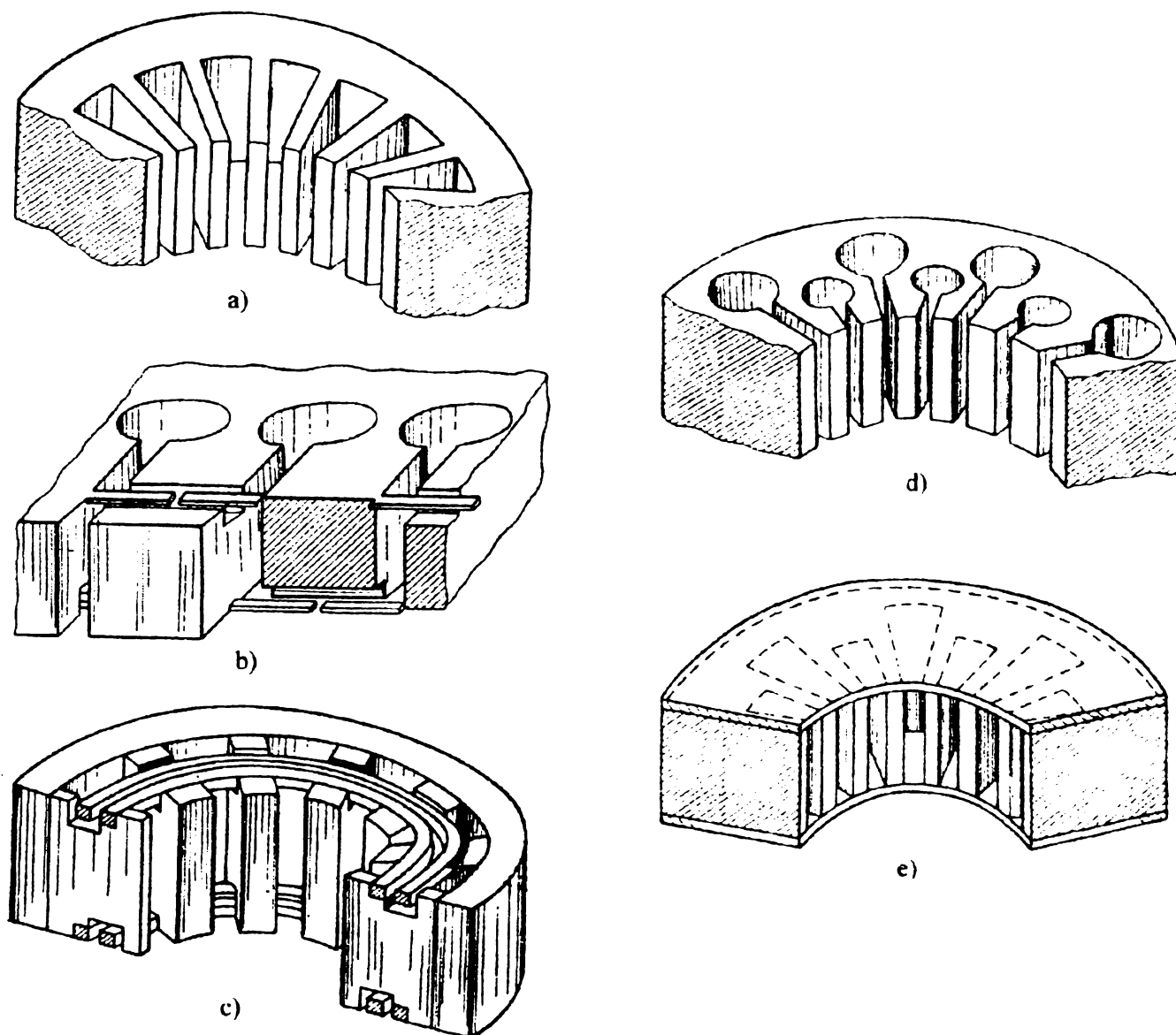


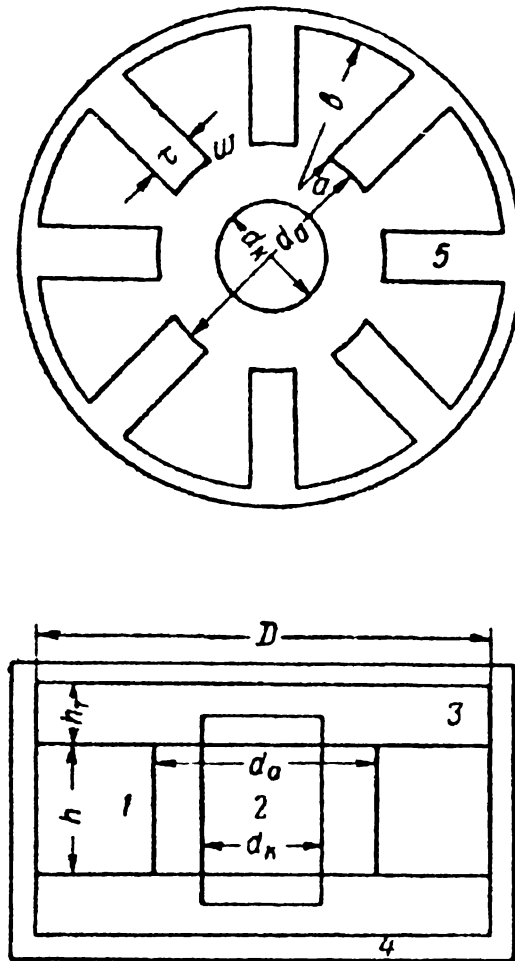
Figura 4.10 Forma transversală secționată a rezonatorilor, aplicată în practică la construirea magnetronelor

a) fantă; b) fantă onficu; c) ovală; d) sector de cerc; e) cilindrică



**Figura 4.11 Variante constructive pentru anod – Prezentare schematică**

- a) secțiuni egale netede sub formă sectorială; b) secțiune fantă orificiu netedă a sistemului de tip deschis; c) sistem plat diferit; d) sistem plat cu ligamente duble; e) sistem plat de tip închis



**Figura 4.12** Schema pentru determinarea caracteristicilor rezonatorului fără ligamente a cavității frontale

1 sistem rezonator; 2 catod; 3 cavitate frontală; 4 capacul cavității frontale.

#### 4.1.3 Dielectrici

Realizarea trecerilor de curent din atmosferă în vid și realizarea “ferestrelor” de microunde se face prin joncțiuni metal – dielectric. Materialele dielectrice folosite la realizarea magnetroanelor sunt sticla și ceramica.

Sticla este frecvent folosită în construcția magnetroanelor, deoarece prezintă următoarele proprietăți:

- asigură o etanșeitate ridicată într-un interval larg de temperatură față de toate gazele;
- este un izolator electric excelent într-un interval larg de temperatură;

- poate fi ușor prelucrată și modelată;
- permite o cuplare ușoară cu instalațiile de vidare;
- poate participa la realizarea unor joncțiuni etanșe în vid;
- este un material ieftin și ușor de întreținut.

Dezavantajul principal este rezistența limitată la șocuri mecanice și termice. S-au folosit două tipuri de joncțiuni metal – sticlă. În primul caz joncțiunea între tijele de alimentare a catodului din molibden și tubul de sticlă și în al doilea caz joncțiunea între bucșa de ieșire și tubul de sticlă (Figura 4.1).

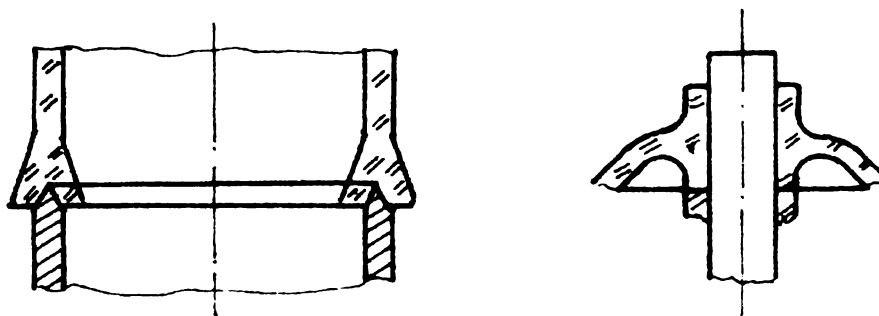


Figura 4.1 Joncțiuni metal – sticlă

Pentru a face posibilă realizarea unei joncțiuni metal – sticlă trebuie să se îndeplinească două condiții: coeficientul de dilatare termică a materialului să fie cât mai apropiat de cel al sticlei și să se poată obține pe suprafața metalelor compuși chimici aderenți la aceștia, care totodată să fie capabili să se combine chimic cu sticla. Pentru tuburile de sticlă de kovar, care poate realiza joncțiuni în bune condiții și cu molibdenul. În vederea lipirii, sticla și piesa metalică se încălzesc până la temperatura de înmuiere a sticlei. În timpul încălzirii la suprafața tijelor de molibden se obține prin oxidare un strat acoperit cu ioni de molibden, care poate intra în combinație cu sticla obținându-se astfel lipirea. Pentru a se asigura o curgere cât mai bună a sticlei peste bucșa de kovar, remontăm în baza experienței noastre o formă specială a bucșei (Figura 4.2). Se poate constata că în zona în care urmează să fie în contact cu sticla se face o strunjire în vederea subțierii bucșei și obținerea unei elasticități mai ridicate.

Un alt dielectric folosit în construcția magnetroanelor este ceramica superaluminosă. Se amintesc aici doar două avantaje care pledează pentru folosirea ceramicii: rezistența mare la șocuri mecanice și termice și pierderile în dielectric mult mai mici.

Tipurile de treceri metal – ceramică încercate și folosite în construcția magnetroanelor sunt cele date în Figura 4.3.

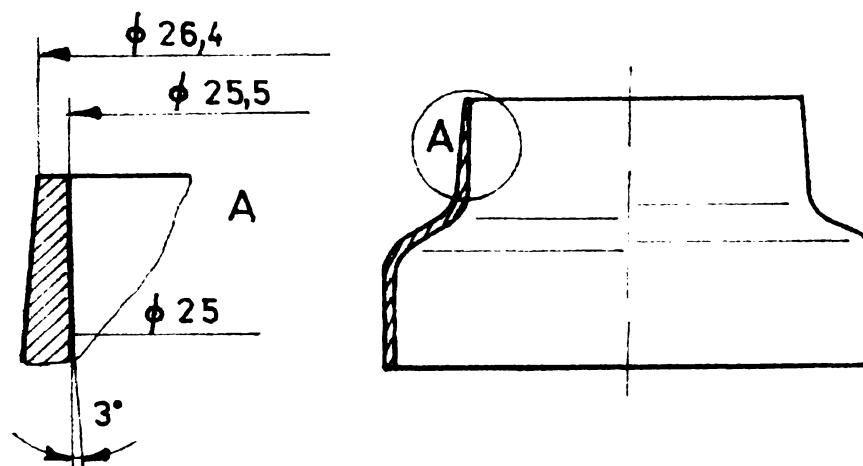


Figura 4.2 Geometria buçei de kovar

Pentru a fi posibilă lipirea metal – ceramică, este obligatorie, în tehnologia analizată, prezența pe piesa ceramică a unui strat metalic. Acesta este format dintr-o pastă de metale refractare (Mo, Mn, W) care se depune pe ceramică. Piesa astfel obținută se arde la o temperatură cu 100 °C sub temperatura de vitrifiere a ceramicii. Tratamentul termic astfel aplicat permite difuzia metalelor refractare în masa ceramică.



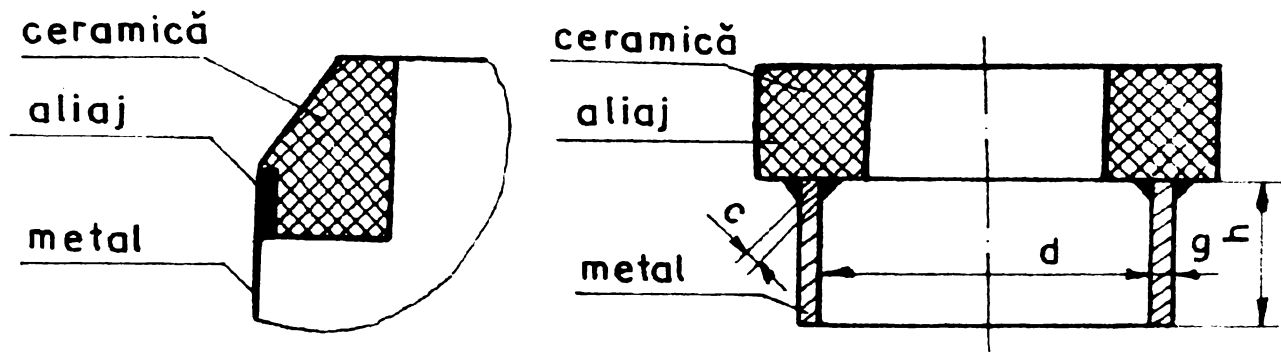


Figura 4.3 Treceți metal – ceramică

Pentru lipire se folosește un aliaj eutectic de Cu și Ag cu punctul de topire 780 °C, care prezintă bune calități de scurgere în interstițiile dintre cele două piese. În Figura 4.4 este redată o secțiune printr-o lipitură metal – ceramică.

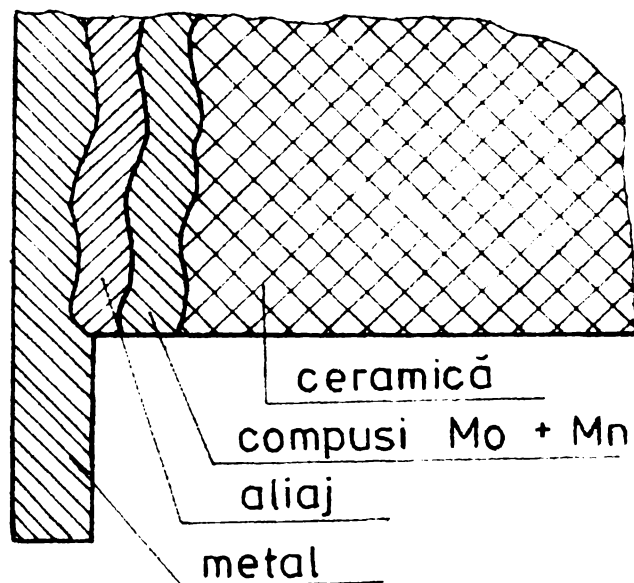


Figura 4.4 Lipitura metal – ceramică

Ca și în cazul trecerilor metal – sticlă și în acest caz se impune folosirea unor piese metalice cu coeficient de dilatare sensibil egal cu cel al ceramicii. Se folosește și în acest caz kovarul și se face mențiunea că piesele care urmează să se lipească (metal și ceramică) trebuie să fie prelucrate în așa fel încât să asigure un interstițiu mic, dar controlat între ele. Asigurarea ajustajului între piese la tipul de lipire din Figura 4.3a este o problemă delicată și costisitoare. Atât piesa metalică cât și cea din

ceramică sunt greu de prelucrat . Prima pentru că are pereții subțiri și se poate deforma la fixarea în dispozitiv, a doua pentru că este foarte dură și sunt necesare în vederea rectificării pietrei abrazive, diamantate. În scopul evitării operației de rectificare, se folosește tipul de asamblare frontală din Figura 4.3b. Același tip de lipire frontală mai prezintă avantajul că se pot folosi și alte metale pentru bucșe, kovarul fiind scump.

Pentru obținerea trecerilor cu lipire frontală, s-au folosit tuburi din oțel (0LC10) care comparativ cu kovarul folosit anterior este mult mai ieftin.

În cazul folosirii oțelului, acesta are un coeficient de dilatare ( $\alpha_{OL}$ ) diferit de cel al ceramicii ( $\alpha_{OR}$ ) astfel că se produce o contracție împiedicată care conduce la tensiuni de forfecare în cordoanele de lipire, periclitând etanșarea. Aceste tensiuni se limitează prin calcularea presiunii optime a peretelui tubului.

Prin răcirea de la temperatura  $t_1$  la temperatura  $t_2$  cele două materiale – oțel, ceramică – se contractă diferit, scurtarea specifică împiedicată fiind:

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{OL} - \varepsilon_{CR} = (\alpha_{OL} - \alpha_{CR}) \cdot (t_1 - t_2) \quad (4.1)$$

Căruia îi corespunde o tensiune în tub:

$$\sigma = E_{OL} (\alpha_{OL} - \alpha_{CR}) \cdot (t_1 - t_2) \quad (4.2)$$

unde  $E_{OL}$  este modulul de elasticitate al oțelului.

Forța de tracțiune este:

$$F_t = h \cdot s \cdot E_{OL} (\alpha_{OL} - \alpha_{CR}) \cdot (t_1 - t_2) \quad (4.3)$$

unde  $h$  și  $s$  sunt înălțimea, respectiv grosimea tubului.

Această forță trebuie echilibrată de forța capabilă a cordoanelor de lipire.

$$F_{cap} = 2\pi \cdot d \cdot a \cdot \tau_{af} \quad (4.4)$$

unde  $d$  este diametrul tubului;

$a$  – grosimea lipiturii;

$\tau_{af}$  – efortul admisibil la forfecare.

Din relațiile (4.3) și (4.4) rezultă grosimea maximă admisă a pereților tubului pentru  $h, d$  și  $a$  adoptați:

$$s = \frac{2\pi \cdot d \cdot a \cdot \tau_{af}}{h \cdot E_{OL} (\alpha_{OL} - \alpha_{CR}) \cdot (t_1 - t_2)} \quad [\text{mm}] \quad (4.5)$$

4.1.4. Asamblarea finală

Prin asamblarea finală se înțelege asamblarea catodului cu subansamblul anod și se face fie prin lipirea sticlei fie prin lipirea ceramicii de bușele de ieșire. Prima asamblare se face prin încălzirea într-o instalație cu curenți de înaltă frecvență a două în cuptorul cu atmosferă de hidrogen.

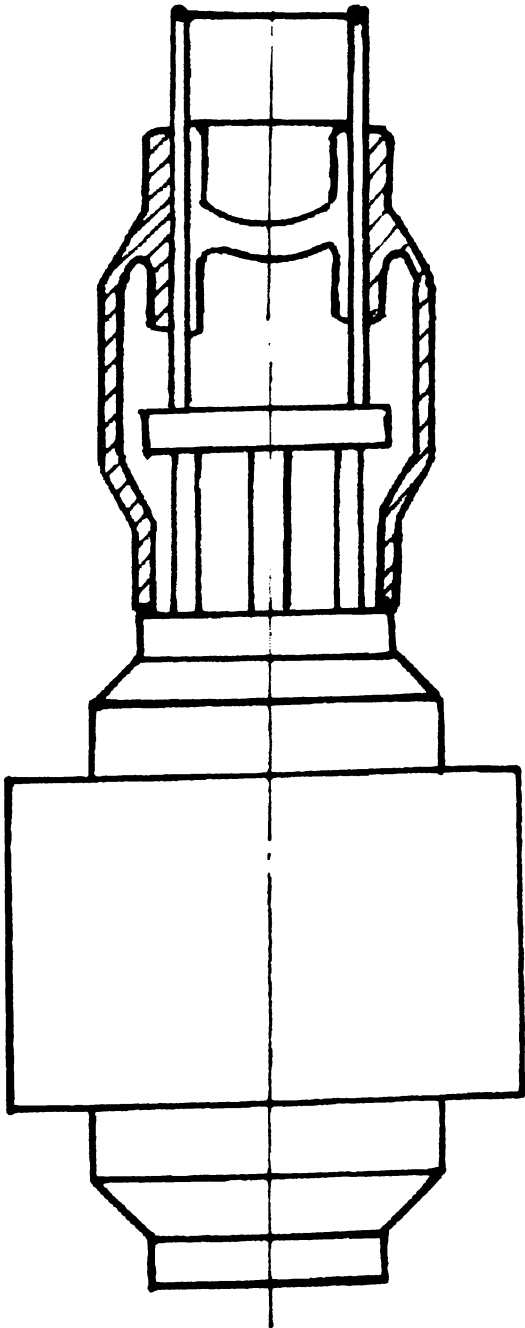


Figura 4.1 Asamblare. Faza I.

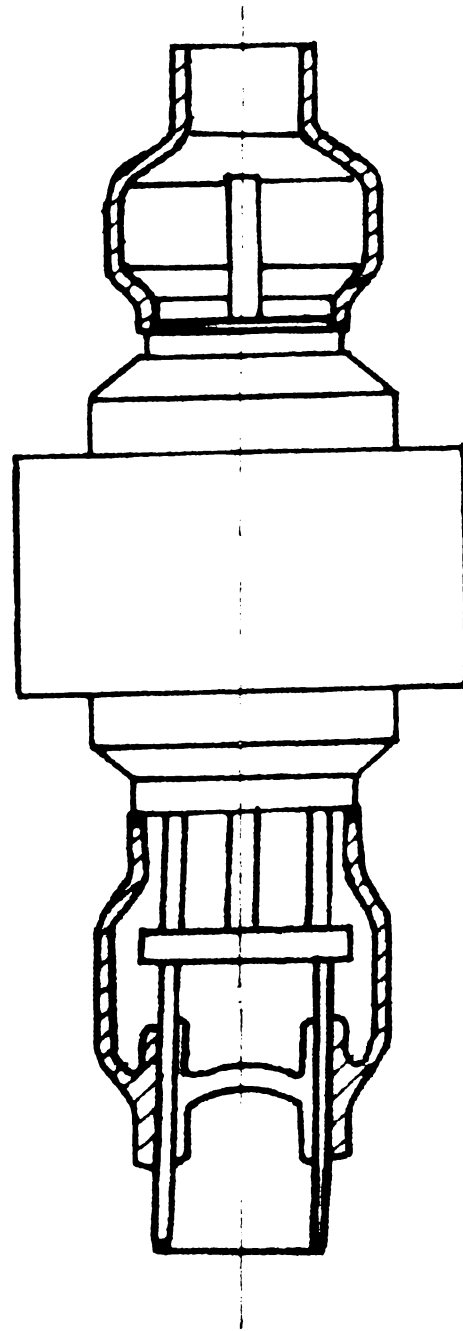


Figura 4.2 Asamblare. Faza a II-a

Asamblarea finală pentru magnetronul cu puterea de 800 W și respectiv 1500 W decurge în două faze. În prima fază catodul este introdus în anod și peste el se introduce balonul de sticlă (Figura 4.1).

Poziționarea catodului în anod atât axial cât și diametral se face prin intermediul unui dispozitiv care face parte din construcția instalației de lipit prin CIF.

Prima lipire se face între bucșa de ieșire și tub. De la bucșa încălzită căldura este preluată de sticla care se înmoaie și începe să curgă peste muchia bucșei. Cursa de coborâre a balonului de sticlă este de 2,5 mm.

Experiența a demonstrat că lipirea manșoanelor pe tijele de alimentare a catodului nu se poate face direct ci numai după ce în prealabil tijele au fost acoperite cu tuburi de sticlă prin lipire în zona de contact cu manșoanele. La lipirea directă o parte din gazul găsit în molibden se degajă rezultând o asamblare neomogenă care datorită tensiunilor induse la variații de temperatură se fisurează ușor.

Și în acest caz încălzirea se face prin inducție, dar s-a constatat că este insuficientă căldura degajată de tijele molibden, de aceea în exteriorul manșoanelor sunt plasate teci de grafit care au dublu rol: cel de a radia căldura și cel de apăsare asupra manșoanelor de sticlă pentru a veni în contact cu tijele.

În a doua fază de lipire, magnetronul se întoarce și se sudează balonul de sticlă din partea antenei (Figura 4.2), sudarea decurgând similar cu sudarea din faza precedentă. Se apreciază că sudarea sticlei pe bucșa de ieșire este bună când cordonul format este continuu, uniform, fără bule de aer și în mod evident dacă rezistă la vid. Încercarea la vid se face cu ajutorul unui detector cu heliu.

Dacă detectorul folosit este ceramică, ordinea asamblării se schimbă, realizându-se trei subansambluri: bloc anodic, subansamblu catod și subansamblu de vidare.

Toate cele trei subansambluri se obțin prin lipire în cuptor cu atmosfera de hidrogen. Precizia geometrică și dimensională se obține prin folosirea unor dispozitive adecvate. Asamblarea finală se obține prin sudură pe perimetru în zona de contact bucșa de ieșire – anod.

Avem preocupări în continuare de lărgire a gamei de magnetroane. În faza de execuție este magnetronul cu puterea de 5 KW și funcționare continuă. Ca

noutate în construcția acestui magnetron se folosește un catod din wolfram sinterizat sub forma unei bucșe în care este introdusă substanța emisivă și care este cu încălzire indirectă.

## 5 TEHNOLOGIA DE VIDARE SI FORMARE A MAGNETRONULUI

### 5.1 Considerații generale

Fiabilitatea și randamentul magnetronelor depind de calitatea vidului realizat în interiorul acestora.

Instalația de vidare este un agregat de vid AV-100, dotat cu vacumetru de tip VTI.71. Racordarea magnetronului la agregatul de vid se face prin intermediul unui tub special de cauciuc folosit în tehnica vidului, în cazul în care tubul de racordare a magnetronului este din sticlă sau prin intermediul unor flanșe adecvate, în cazul în care tubul de racordare este din cupru.

Operația de vidare cuprinde două faze. În prima fază se obține un vid preliminar cu ajutorul unei pompe de vid preliminar de  $4\text{m}^3/\text{h}$ , iar în a doua fază vidul înalt se obține cu ajutorul unei pompe de difuzie PD-100 cu debitul de  $100\text{ l/s}$ . Cele două pompe constituie părți componente a agregatului AV-100.

Funcționarea independentă a pompei de difuzie în timpul în care pompa de vid preliminar videază incinta de lucru este asigurată de un vas tampon aflat permanent la o presiune de  $10^{-1} - 10^{-2}$  torr.

Operația de vidare începe cu realizarea vidului preliminar măsurat cu ajutorul unei joje termice montată deasupra pompei de vid preliminar, indicația sa citindu-se la vacumetru. La atingerea valorii de presiune, se cuplează pompa de difuzie concomitent cu închiderea circuitului de încălzire a magnetronului. Aceasta constă într-un cuptor electric în interiorul căruia se află magnetronul pe toată durata vidării.

Temperatura de lucru în interiorul acestuia este de  $450\text{ }^\circ\text{C}$  și se măsoară cu ajutorul unui termocuplu conectat la un instrument de măsură special etalonat.

Pentru a se evita oxidarea corpului magnetronului exterior, în cuptorul de încălzire circulă un curent de gaz protector (în cazul nostru argon) pe durata cât

temperatura corpului magnetronului depășește valoarea de  $80^{\circ}\text{C}$ . Intervalul de încălzire și de vidare la temperatura de  $450^{\circ}\text{C}$  este în jur de 15 ore.

În momentul când vidul a ajuns la valoarea de  $2 \cdot 10^{-6}$  este declanșată operația de degazare și formare a catodului.

În cadrul vidării magnetronului se urmărește și îndepărtarea gazelor pe care le conține subansamblul catod. Degazarea fiind dependentă de temperatură, prin încălzirea până la  $450^{\circ}\text{C}$  nu se elimină toate gazele. De aceea în timpul vidării subansamblul catod trebuie să fie încălzit la o temperatură superioară temperaturii de funcționare. Acest lucru prezintă garanția că pe timpul funcționării catodul nu va mai degaza.

Încălzirea catodului se face electric, cu ajutorul unui transformator adecvat controlând printr-un ampermetru curentul de încălzire, fără oprirea instalației de vidare.

Cunoscute fiind intensitatea nominală a curentului de filament la magnetron (pentru M500  $I_f = 28-30 \text{ A}$ ) și tensiunea de filament ( $U_f = 6\text{V}$ ) pentru încălzirea catodului se va ridica treptat curentul de filament și tensiunea la valori superioare conform Tabelul 5.1

Mentținerea curentului și tensiunii pe catod se face pentru intervale de timp de 15 secunde cu pauză de câte 2 minute între două încălziri succesive.

**Tabelul 5.1 Tensiunea și curentul de filament**

$U_{f(V)}$	7	8	9	10
$I_{f(A)}$	35	37	40	43

În vederea protejării termice a magnetronului pe perioada degazării catodului se va reduce puterea de încălzire a cuptorului electric, astfel ca temperatura blocului anodic să nu depășească  $350^{\circ}\text{C}$ .

Pentru primele perioade de încălzire, vidul se va diminua putând ajunge și la valori de  $10^{-5}$  torr. Încălzirile periodice se vor repeta până când vidul nu se diminuează sub  $4 \cdot 10^{-6}$  torr.

În finalul operației de vidare se revine la valorile nominale de alimentare a catodului ( $I_f=28 - 30$  A,  $U_f=6$ V) și dacă vidul este  $1 - 2 \cdot 10^{-6}$  se consideră vidarea terminată. În caz contrar se vor repeta încălzirile succesive pînă se obține valoarea vidului mai sus menționată. În Figura 5.1 sunt prezentate graficele  $T_a = f_1(t)$ ,  $T_c = f_2(t)$  și  $p=f_3(t)$  care reprezintă variația presiunii din incinta magnetronului în timp.

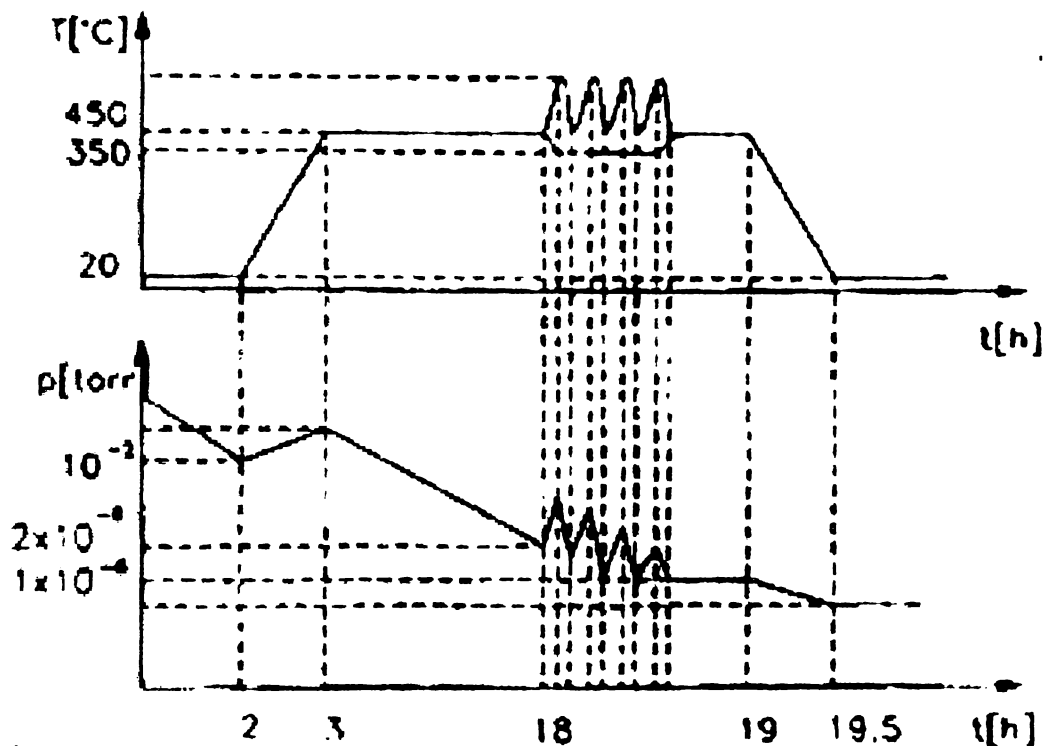


Figura 5.1 Dependența temperaturii anodului, catodului și presiunii de timpul de vidare

În această fază se mai controlează prezența curentului de emisie după care magnetronul se reîncălzește la  $450^{\circ}$  C, temperatura la care magnetronul va fi închis prin încălzirea cu flacără a tubului de vidare. Datorită prezenței vidului și înmuierii sticlei, tubul de vidare se strangulează. Scoaterea magnetronului din cuptor se face în momentul când temperatura lui a ajuns la valori sub  $80^{\circ}$ C. La magnetroanele executate calitatea vidului a fost apreciată prin valoarea curentului de fugă. Aplicând între anod și catod o tensiune de 4 KV și folosind instrumentul "ISOLATIONS MESSER TYPE P435-MERATRONIC" s-a putut măsura un curent de fugă sub  $0,5 \mu$ A.



Înainte de formare magnetronul trebuie să fie echipat cu sistemul de răcire. În vederea formării se aplică o tensiune anodică continuă de 350 V și se caută un astfel de curent de filament care să facă posibilă obținerea unui curent anodic de 0,15 A timp de 2 ore.

A doua fază de formare presupune o tensiune anodică de 15 V și un curent de filament care să facă posibilă obținerea unui curent anodic de 1A pe timp de 2 ore.

După aceste operații magnetronul se poate considera format și se poate folosi în instalații de microunde.

## 5.2 Dispozitive și scule noi folosite în producția magnetronelor

Procesul de producție a magnetronelor presupune folosirea unei palete relativ largi de procese tehnologice și utilaje. De reținut este faptul că utilajele folosite ca de altfel și tehnologiile sunt atât din cadrul celor cu caracter universal cât și categorii specifice magnetronului.

Din cadrul tehnologiilor cu caracter universal se pot aminti tehnologiile de prelucrare prin așchiere și prin presare la rece.

Având în vedere calitatea și precizia deosebită impuse elementelor componente, a fost necesară proiectarea și realizarea unor tehnologii adecvate care presupun scule, dispozitive și verificatoare specifice producției de mecanică fină.

În cele ce urmează ne vom referi numai la elementele care considerăm că prezintă noutate față de tehnologiile cunoscute și pe care le clasificăm în tehnologii și utilaje specifice prelucrărilor prin așchiere, tehnologii și utilaje specifice lipirilor metal-metal, tehnologii și utilaje specifice lipirilor metal-sticlă, tehnologii și utilaje specifice operațiilor de vidare.

## 5.2.1 Tehnologie și scule folosite la prelucrarea lamelelor

Din cele menționate anterior se reține faptul că tehnologiile privind realizarea pieselor metalice sunt tehnologii: de așchiere, de ștanțare și matrițare și tehnologii de sinterizare. Din toate tehnologiile folosite reține atenția tehnologia de obținere a lamelelor cu ajutorul cărora se obține cavitatea rezonantă.

Se ia ca bază de discuție lamela (Figura 5.1) pentru magnetronul cu puterea de 800 W.

Tehnologia cunoscută presupune două faze: decupat din banda grosime de 2,5 mm și rectificat în vederea obținerii suprafețelor A și B la calitatea impusă.

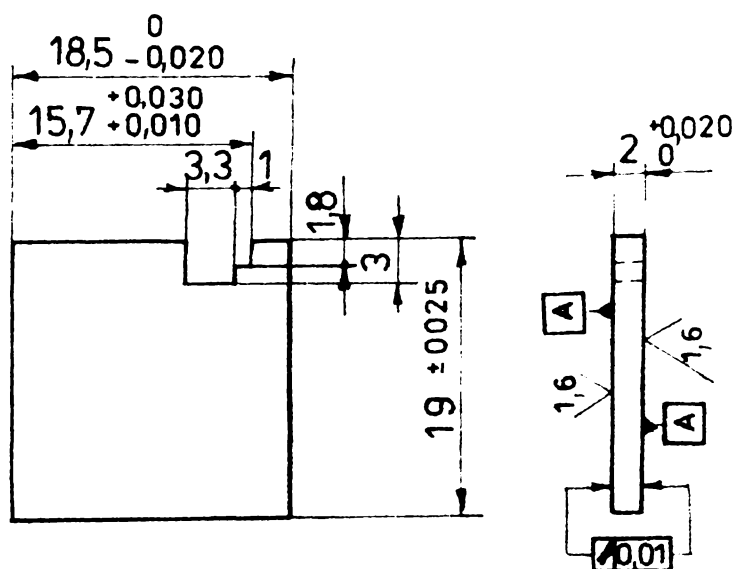


Figura 5.1 Lamela

În vederea rectificării este necesar un dispozitiv de fixare a piesei pe masa mașinii de rectificat și o piatră abrazivă cu totul specială. Dezavantajele acestui procedeu de rectificare rezidă din faptul că cuprul fiind moale îmbăcsește foarte repede piatra abrazivă. În această situație frecările dintre piatra abrazivă și piesă cresc, dezvoltându-se căldura suplimentară. Calitatea suprafeței piesei nu mai este bună (apar smulgeri de material) și datorită căldurii dezvoltate în proces cuprul absoarbe o cantitate mare de oxigen, în același timp având în vedere grosimea relativ redusă piesa se poate deforma după scoaterea din dispozitiv.

Tehnologia propusă înlocuiește rectificarea cu operații de frezare în două faze: o fază de degroșare și o fază de finisare.

În urma încercărilor efectuate s-a stabilit că piesa (conform Figura 5.1) se obține la toleranțele date în desenul de execuție dacă se respectă următorul regim de așchiere la finisare:

- adaos de prelucrare.....0,2 mm;
- viteza de avans.....40 m/min;
- turație.....630 rot/min.

Pentru așchiere s-a folosit o freză de tipul cilindrofrontală cu 6 dinți având următoarea geometrie a părții așchietoare:

- unghiul de așezare  $\alpha=5^\circ$ ;
- unghiul de degajare  $\gamma=15^\circ$ ;
- unghiul de așezare transversal  $\alpha_t=12^\circ$ ;
- diametrul frezei  $D_f=25\text{mm}$ ;
- număr de dinți  $z=3$ .

### 5.2.2 Utilaje specifice lipirii metal-metal

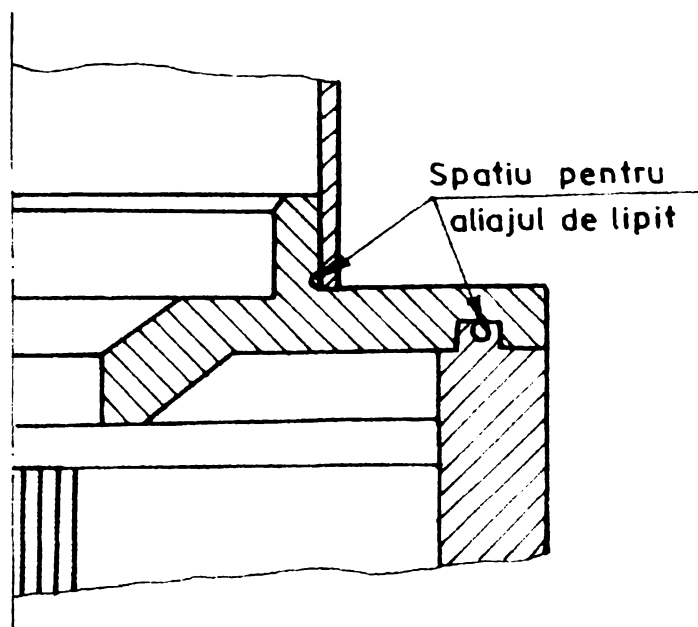
Asamblarea părților metalice ale magnetronului se face prin lipire. Această lipire trebuie să se facă în condițiile păstrării vidului pe toată perioada de exploatare a magnetronului.

Condițiile pe care trebuie să le îndeplinească aliajul de lipit și lipitura au fost prezentate anterior. Se reține că aliajul de lipit este sub formă de sârmă care se introduce în locurile special pregătite din blocul anodic și din piesele polare (Figura 5.1)

Lipirea trebuie să aibă loc în atmosfera reducătoare de hidrogen.

Sunt cunoscute utilajele mari care intră în dotarea întreprinderilor care au în specific procese tehnologice care se desfășoară în atmosfera de hidrogen, dar

pentru operații de mentenanță și pentru o producție relativ redusă investiția nu ar fi eficientă.



**Figura 5.1** Poziționarea canalelor pentru aliajul de lipit

Pentru acestea s-a conceput și s-a realizat un cuptor electric cu funcționare intermitentă. Există în exploatare cuptoare electrice care lucrează în mediu reducător de hidrogen având ca parte principală corpul cuptorului, confecționat din tablă de oțel, sub forma unui clopot cilindric deschis în partea inferioară.

Hidrogenul introdus printr-un tub în partea superioară a clopotului substituie aerul care este mai greu și care părăsește incinta prin partea inferioară a clopotului. În momentul în care clopotul este plin cu hidrogen acesta curge în continuare formând curenți descendenți.

Cuptorul în construcția prezentată prezintă o serie de dezavantaje:

- pericolul aprinderii sau exploziei hidrogenului care poate avea consecințele: rebutarea pieselor de lipit, deteriorarea cuptorului, producerea de accidente și incendii, cheltuieli suplimentare cu reparațiile;
- consum mare de hidrogen,
- randament scăzut,
- condiții improprii de muncă.

Varianta constructivă folosită înlătură dezavantajele enumerate mai sus prin aceea că în scopul eliminării exploziei hidrogenului folosește elementele constructive:

- o cămașă de captare și o conductă de evacuare a gazelor care împreună asigură îndepărtarea excesului de hidrogen din cuptor,
- o cameră cu gaz inert, așezat sub clopot, care are drept scop izolarea hidrogenului de aer.

În prima fază se introduce gaz inert în camera respectivă după care se introduce hidrogen în clopot. Pe măsura alimentării cu hidrogen aerul din clopot coboară și împreună cu gazul inert este eliminat prin camera de captare și conducta de evacuare. La umplerea cu hidrogen a clopotului hidrogenul cu gazul inert vor străbate același traseu ca aerul. În acest fel se asigură buna separare a hidrogenului de aer, eliminându-se pericolul exploziei.

Un capac fund de siguranță aplicat în partea de jos camerei cu gaz inert, confecționat din folie metalică subțire închide cuptorul și permite menținerea suprapresiunii gazului inert și a hidrogenului față de exterior. În cazul unei exploatare greșite, clopot incomplet umplut cu hidrogen, se produce explozia. Datorită exploziei, folia se sparge, consumând o parte din energia exploziei, efectele fiind mai mici decât în cazul cuptorului deschis.

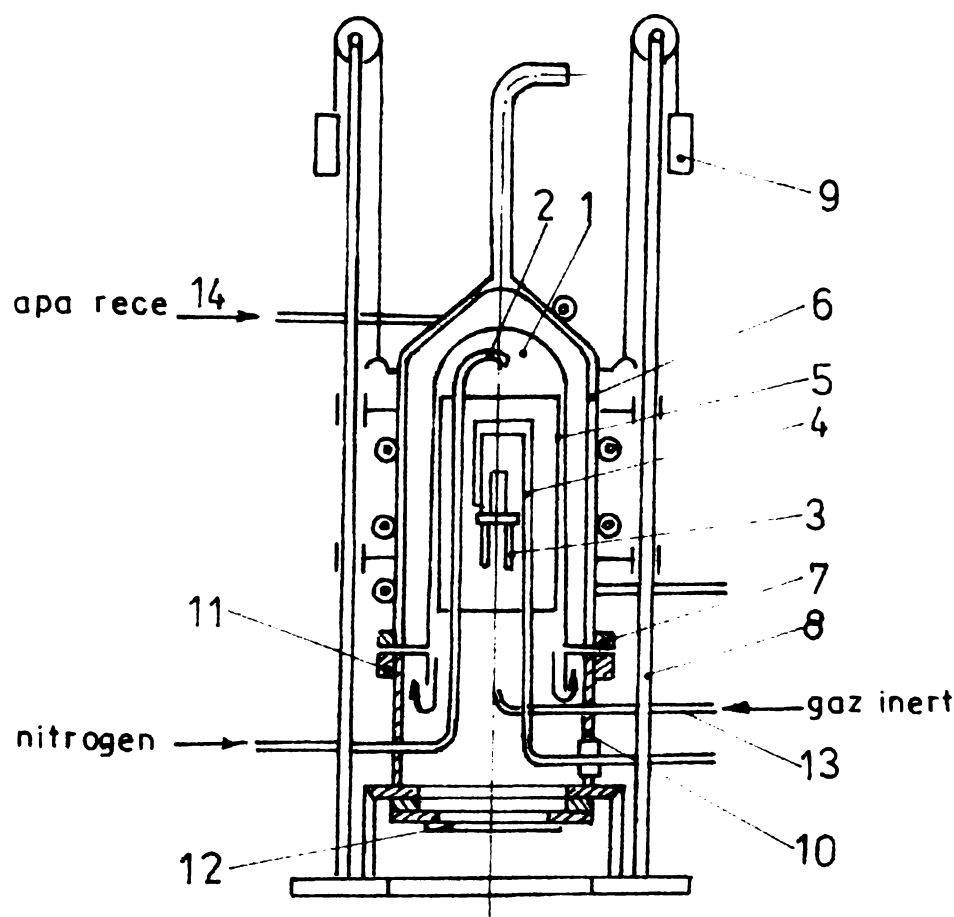


Figura 5.2 Cuptor cu atmosferă reducătoare de hidrogen.

În Figura 5.2 se prezintă o secțiune longitudinală a cuptorului propus și executat de noi.

Cuptorul se compune din clopotul (1) care este spațiul de lucru în atmosfera de hidrogen introdus prin tubul (2). Clopotul are în interior masuța (3) pe care sunt așezate piesele de lipit. Încălzirea se face electric prin rezistoarele (4). Concentrarea câmpului termic în zona mesei se face prin intermediul ecranului cilindric (5) care este fixat pe clopotul (1). Clopotul (1) este fixat la rândul lui pe cămașa de evacuare a gazelor (6). În partea inferioară cămașa de captare se termină cu o flanșă de etanșare (7).

Ansamblul format de cămașa de captare, clopot și ecranul cilindric se poate ridica pe coloanele (8) cu ajutorul greutăților (9). Sub acest ansamblu se găsește camera de gaz inert (10) care are în partea de sus flanșă de etanșare (11) și în partea inferioară capacul de siguranță (12) prevăzut cu o folie metalică subțire. Gazul

inert (s-a folosit  $\text{CO}_2$ ) este introdus în camera etanșă prin tubul (13). În vederea răcirii cuptorului cămașa de evacuare a gazelor este prevăzută pe exterior cu o tubulatură (14) prin care circulă apa.

În vederea parcurgerii unui ciclu de lipire sunt necesare următoarele faze:

- se ridică subansamblul cămașa de evacuare;
- se introduc piesele de lipit în cuptor;
- se coboară subansamblul cămașa și se strâng flanșele de evacuare;
- se umple camera de gaz inert;
- se umple clopotul cu hidrogen;
- se încălzește cuptorul și se menține la temperatura de  $810^\circ\text{C}$  în vederea lipirii;
- se oprește și se răcește cuptorul;
- când se ajunge în jur de  $100-80^\circ\text{C}$  se oprește alimentarea cu hidrogen și gaz inert;
- se scot piesele.

Diagrama de funcționare a cuptorului este prezentată în Figura 5.3 și se poate constata că pentru atingerea temperaturii de lucru sunt necesare 32 minute. Menținerea pieselor în vederea lipirii se face în 15 minute și răcirea se face în 33 minute.

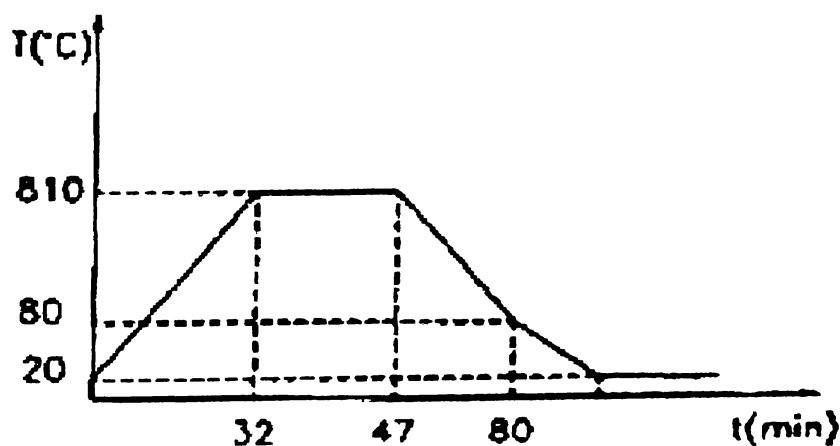


Figura 5.3 Diagrama de funcționare a cuptorului

Înlocuirea lipiturilor dintre bucșele de ieșire și corpul magnetronului cu operația de sudare e posibilă prin adaptarea unor soluții noi în ceea ce privește construcția magnetronului.

Pentru realizarea acestei suduri se folosește utilajul prezentat în Figura 5.4

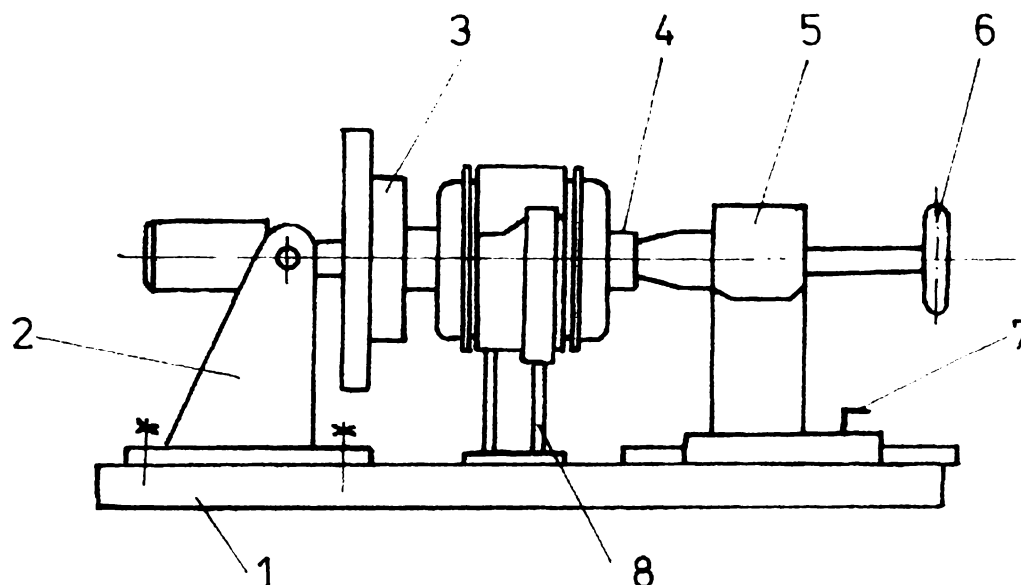


Figura 5.4 Utilaj de sudură

Utilajul de sudură folosit este format dintr-o placă de bază (1) pe care sunt fixate masa de sudură și pinola mobilă (5). Magnetronul se fixează și centreează între dispozitivul (3), prins pe masa de sudură (2) și vârful de centrare din pinola (5). Prin acționarea roții de manevră (6) se îndepărtează vârful pinolei și se face posibilă înlocuirea magnetronului sudat.

Pentru a avea o productivitate mărită dispozitivul este dotat cu două capete pentru sudat (8) care execută sudarea la ambele capete ale magnetronului. Utilajul prezentat prezintă și un grad de universalitate. Astfel prin înlocuirea dispozitivelor (3) și (4), prin folosirea într-o altă poziție a pinolei cu ajutorul manetei (7) și printr-o reglare adecvată a poziției capetelor de sudură se pot suda și alte tipuri de magneetroane.

Pentru a face posibilă sudarea pe tot conturul mișcarea de rotație a magnetronului este dată de motorul electric cu care este dotată masa de sudură. Ca



procedeu de sudură s-a folosit procedeul WIG care este un procedeu de sudare în mediu protector de argon.

Reglajele care se fac sunt:

- distanța între electrod și piese de sudat 2 mm;
- densitatea de curent 18 A/mm<sup>2</sup>;
- tensiunea arcului 50 V;
- presiunea argonului – 0,4 at.

### 5.2.3 Utilaje specifice lipirii metal-sticlă

Se cunoaște procedeul îmbinării la cald a pieselor metalice pe sticlă folosind încălzirea cu flacără de gaz metan obținută din unul sau mai multe arzătoare, dirijată spre marginea celor două semifabricate. Piesele sunt fixate și rotite în același sens cu ajutorul unor dispozitive. Concomitent cu încălzirea și cu mișcarea de rotație, printr-o mișcare de translație executată după axa comună de simetrie a semifabricatelor, acestea sunt aduse încet în contact.

Procedeul cunoscut prezintă următoarele dezavantaje:

- folosește un mecanism complicat care participă în același timp la două mișcări (rotație și translație) necesitând angrenaje și care este supus coroziunii cauzată de flacără;
- mișcarea compusă a semifabricatelor trebuie corelată cu poziționarea și reglarea intensității flăcării;
- procedeul presupune folosire de forță de muncă de înaltă calificare;
- calitatea joncțiunii este influențată de caracterul chimic al flăcării, care, în funcție de raportul gaz metan-oxigen poate să fie reducător, neutru sau oxidant, depinzând de calificarea operatorului;
- calitatea joncțiunii este influențată de puritatea gazelor întrebuintate pentru flacără;

- procedeul nu asigură încălzirea uniformă, pe întreaga circumferință a semifabricatelor și poate conduce din acest motiv la tensiuni mecanice și la realizarea incompletă a joncțiunii metal-sticlă;
- nu asigură igiena tehnologică cerută în tehnica vidului, joncțiunea putând fi impurificată de substanțele reziduale rezultate în urma arderii;
- nu permite folosirea unei atmosfere neutre prezența oxigenului participând la oxidarea porții metalice în zone învecinate cu lipitura.

Procedeul și utilajul folosit la realizarea joncțiunilor metal-sticlă, înlătură dezavantajele întâlnite în procedeul încălzirii cu flacără oferind următoarele avantaje:

- prin faptul că se folosește încălzirea inductivă cu putere continuu reglabilă oferă posibilitatea obținerii unui câmp termic progresiv dispus uniform de simetrie cilindrică și cu repartiția temperaturii adecvate a semifabricatului metalic de formă cilindrică, găsit în interiorul unui inductor;
- semifabricatul de sticlă, așezat coaxial cu cel metalic primește căldura prin radiație și conducție. Căldura se degajă în piesa metalică doar în zona în care are loc lipirea și într-o zonă adiacentă acesteia de mărime relativ redusă;
- necesită forță de muncă cu calificare medie nefiind necesare reglaje deosebite pe timpul desfășurării procesului de lipire (se reglează doar puterea de încălzire);
- procedeul asigură igiena tehnologică impusă de tehnica vidului, joncțiunea nefiind impurificată de flacără;
- datorită încălzirii uniforme joncțiunea metal-sticlă este lipsită de tensiuni mecanice, crescând în acest fel calitatea și fiabilitatea acesteia;
- procedeul folosește încălzirea în atmosferă controlată (argon), evitându-se în acest fel oxidarea părților metalice și absorbția de gaze pe perioada lipirii;
- procedeul și utilajul folosit din punctul de vedere al productivității este superior procedeului vechi;
- procedeul poate fi ușor automatizat iar utilajul poate fi înglobat ușor într-o linie tehnologică automatizată.

Procedeul a cărui avantaje au fost prezentate mai sus poate fi folosit cu succes atât la lipirea baloanelor de sticlă pe bușele de ieșire cât și la lipirea tuburilor de sticlă pe tijele de molibden. În consecință s-au realizat două utilaje.

În Figura 5.1 este prezentată o secțiune axială prin instalația de lipire a baloanelor de sticlă pe bușele de ieșire.

Utilajul realizat se compune din: inductorul (1) de formă elicoidală, cu dimensiunile geometrice corelate cu cele ale semifabricatului metalic (2) de încălzit și cu parametri corelați ai procesului termochimic și are rolul de a produce încălzirea progresivă și uniformă, generatorul de înaltă frecvență (3) cu putere continuu reglabilă, dispozitivul de fixare a semifabricatului metalic (4) care are rolul de poziționare în inductor a semifabricatului metalic astfel încât axa de simetrie a acestuia să coincidă cu cea a inductorului, dispozitiv de fixare și limitare a mișcării semifabricatului de sticlă (6), având rolul de fixare a sticlei în poziție coaxială cu semifabricatul metalic, de ghidare și limitare a deplasării în cursa de coborâre a tubului de sticlă. Limitarea deplasării se face de către limitator (5) și opritorul (7).

Mediul protector este argonul care se introduce sub clopotul (8) care joacă și rolul de scut termic, asigurând și răcirea lentă a joncțiunii.

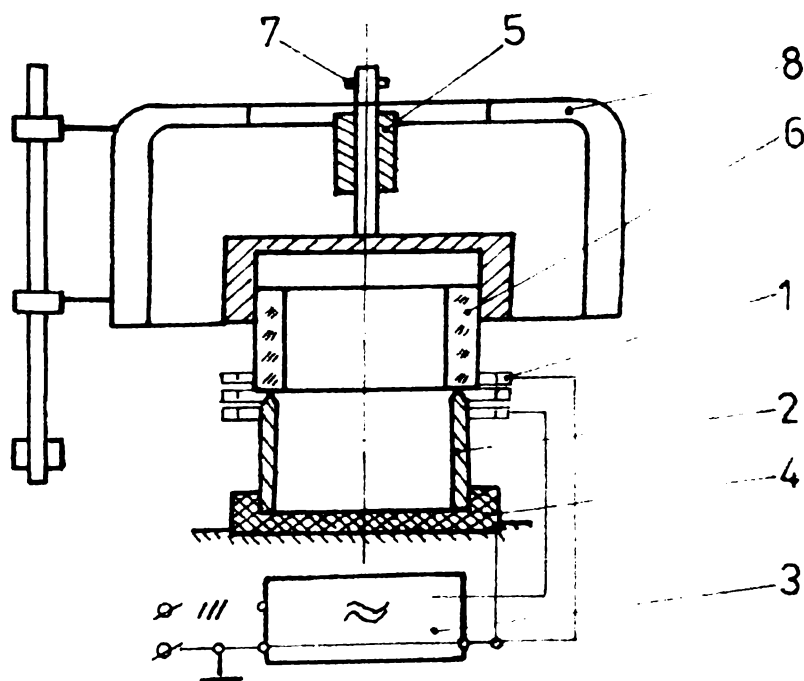


Figura 5.1 Utilaj pentru lipirea baloanelor de sticlă

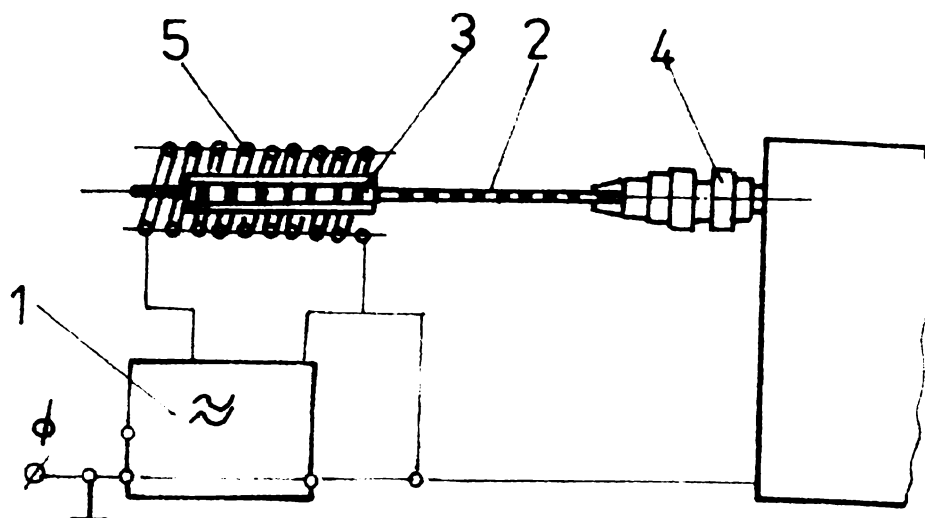


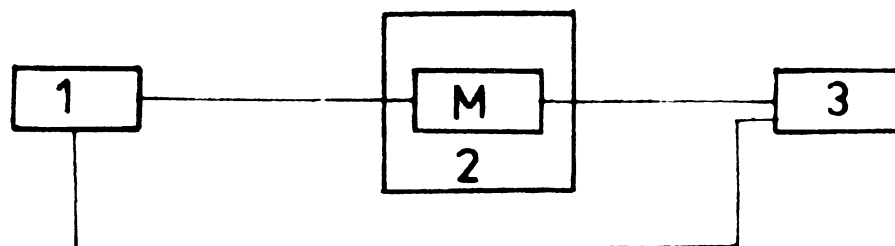
Figura 5.2 Utilaj pentru lipirea tuburilor de sticlă pe tijele de molibden

În Figura 5.2 este prezentat al doilea tip de utilaj folosit la lipirea tuburilor de sticlă pe tijele de molibden. În construcția lui se folosește același tip de generator de înaltă frecvență (1) ca și în cazul utilajului precedent. Tija (2) pe care urmează să se lipească tubul de sticlă (3) este fixată într-un dispozitiv (4) care îi imprimă o mișcare de rotație. Inductorul (5) de forma elicoidală este așezat coaxial cu cele două semifabricate.

Folosirea acestui utilaj permite obținerea unor tije de molibden acoperite cu un strat uniform și omogen de sticlă, lucru care favorizează lipirea tijeii de balonul de sticlă.

#### 5.2.4 Stand pentru vidare

Unul din elementele de bază care asigură buna funcționare și fiabilitatea magnetronului este vidul creat în incinta lui. Standul pentru vidarea magnetronului a cărui schemă bloc este prezentată în Figura 5.1 conține trei elemente de bază: agregatul de vidare (1), cuptorul pentru încălzirea magnetronului în timpul vidării (2) și instalația electrică (3).



**Figura 5.1 Schema bloc a standului de vidare**

1- instalația electrică. 2- cuptor. 3- Agregat de vidare.

Pe perioada în care magnetronul este încălzit pentru degazare, în incinta cuptorului se introduce argon în vederea evitării oxidării părții exterioare a magnetronului.

Cuptorul folosit la încălzirea magnetronului este cu rezistență electrică și asigură încălzirea, progresivă. În construcția prezentată, în cuptor se poate introduce un singur magnetron care este fixat pe suportul superior prin intermediul unui dispozitiv de fixare.

Cuptorul propriu-zis are posibilitatea de deplasare pe verticală pentru a face posibilă introducerea și scoaterea magnetronului. Legătura între magnetron și agregatul de vidare se face printr-o tubulatură din cauciuc special pentru instalațiile de vidare.

#### 5.2.5 Consideratii finale

Realizarea magnetroanelor presupune o bună pregătire tehnică și materială. Asupra fiabilității magnetroanelor influențează în mod hotărâtor atât materialele cât și tehnologiile folosite.

În acest sens s-a pus accent deosebit pe realizarea catozilor cu încălzire directă care prezintă o fiabilitate mărită în raport cu catozii cu oxizi. Materialul folosit pentru realizarea catodului este wolframul toriat cu un conținut de 1,7 % toriu.

Pentru tije de alimentare s-a folosit molibdenul care prezintă o capacitate mică de absorbție a gazelor. Tehnologia de asamblare are în vedere temperatura (+2000 °C) la care lucrează catodul. (Lipiturile dintre piese se fac cu platină).

În vederea degazării catodului, în partea finală a vidării se încălzește catodul la o temperatură cu 100 °C peste temperatura de funcționare.

Anodul și lamelele cavității rezonante se realizează din cupru lipsit de oxigen (OFHC) îndeosebi pentru faptul că este nemagnetic și conține o mică cantitate de oxigen (sub 20 p.p.m).

Cuprul are etanșeitate proprie foarte ridicată și în cazul unor suprafețe lustruite prezintă o gazeare specifică mică.

Tehnologia de prelucrare mecanică a anodului și a lamelelor presupune o succesiune de faze și operații care în final concură la realizarea pieselor în sistem alezaj unitar, clasele de precizie 6 și 7, precum și obținerea unor suprafețe cu rugozitate foarte mică. Prin micșorarea rugozității se reduce suprafața de degazare.

Piese polare se realizează din aliajul ARMCO care nu are rezonanță magnetică și proprietăți de anizotropie magnetică. Pentru o mai bună etanșare și în urma lipirii pieselor polare acestea se cuprează și se lustruiesc.

În vederea realizării trecerilor de curent în vid se folosesc joncțiunile metal-sticlă și metal-ceramică. Bucșele de ieșire se realizează din kovar și au o construcție specială.

Asamblarea blocului anodic se face prin lipire cu aliaj de argint și cupru (Ag 72 Cu 28) care are temperatura de topire la 780°C. Piesele încălzite se mențin în cuptorul cu atmosferă reducătoare de hidrogen un timp de 15 minute la temperatura de 810°C.

Dielectricii folosiți sunt sticla și ceramica. Sticla este mai ieftină și pretinde folosirea unei tehnologii mai accesibile. Ceramica presupune tehnologii mai complexe, dar este mai rezistentă la șocuri mecanice și termice asigurând pierderi în dielectric mai mici. Creșterea fiabilității magnetronelor este strâns legată de dielectricul folosit.

Asamblarea finală a magnetronului se face prin lipirea dielectricilor de bucșele de ieșire în condițiile asigurării păstrării vidului în incinta magnetronului și a poziționării corecte a catodului în anod.

Ca operații finale în realizarea magnetronelor sunt vidarea și formarea finală. Operația de vidare presupune obținerea unui vid la nivelul  $10^{-6} - 10^{-7}$  torr. În

timpul operației de vidare magnetronul este încălzit la 450°C, iar pentru degazare se procedează la încălzirea acestuia la o temperatură superioară temperaturii de funcționare.

În vederea vidării se folosește un stand care are în componența sa un agregat de vidare și un cuptor de încălzire care asigură împreună toate condițiile necesare obținerii vidului propus.

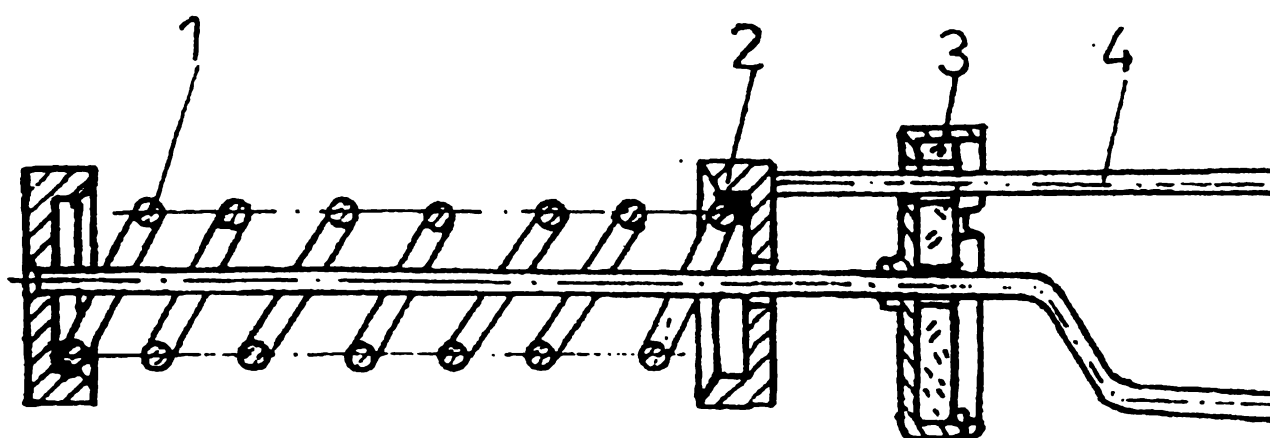
Tehnologiile și utilajele folosite în construcția magnetroanelor sunt cu caracter universal, dar sunt și o parte care au caracter specific producției de magnetroane. În acest sens se pot reține tehnologiile de prelucrare a cavităților rezonante, precum și tehnologiile de asamblare și utilajele folosite în acest sens. Utilajul folosit la lipirile metal-metal este un cuptor electric cu funcționare intermitentă în atmosfera de hidrogen și cu protecție împotriva exploziei construit în două variante: cu 1 post de lucru și cu patru posturi de lucru. Pentru varianta sudată a corpului anodic se folosește un utilaj de sudură cu două capete de sudat care realizează sudura consecutiv la ambele capete ale magnetronului.

Lipirile metal-sticlă realizate pentru prima dată la noi în țară (pentru piese de dimensiuni mari) se fac pe utilaje care folosesc încălzirea prin curenți de înaltă frecvență a pieselor metalice. Căldura necesară topirii sticlei se transmite prin conducție și radiație de la piesa metalică. Folosind acest procedeu s-au lipit baloanele de sticlă pe bușele de ieșire asigurându-se joncțiuni metal-sticlă de înaltă calitate, rezistente la vid și fără tensiuni interne.

## 6 TIPURI DE DEFECTE ALE MAGNETRONULUI

### 6.1 Tipuri de defecte specifice catodului

În atenția noastră au stat două tipuri de catodi: catodi cu încălzire directă (Figura 6.1) și catodi cu încălzire indirectă (Figura 6.4).



**Figura 6.1 Catod cu încălzire directă.**

1. Spiră 2. Discuri reflectoare 3. Izolator ceramic 4. Tije de alimentare.

Catodii cu încălzire directă au o construcție relativ simplă și sunt formați din: spirala (1) realizată din wolfram toriat, două discuri reflectoare (2), tijele de alimentare (4) și izolatorul ceramic (3) între cele două tije.

În urma operației de carburare și activare, atomii de toriu ies la suprafața catodului și formează un strat monoatomic care constituie stratul emisiv.

Încălzirea în vederea emisiunii se realizează datorită efectului Joule - Lenz. Din punct de vedere tehnologic catodul se realizează cu tehnologii clasice, iar asamblarea tijelor spiralei și a discurilor reflectoare se realizează prin lipirea cu platină.

În construcția prezentată catodul are trei funcții. În primul rând funcția unui rezistor, temperatura dezvoltată în el fiind necesară fenomenului de emisie. În al doilea rând este depozitor de substanță emisivă, aliajul W-To conține toriu în



proporție de (1,5-2) % care poate fi scos la suprafața spiralei prin carburare. În al treilea rând este suportul stratului monoatomic de toriu emisiv.

Tipurile de solicitare la care este supus catodul sunt cele electrice și cele legate de ambianță.

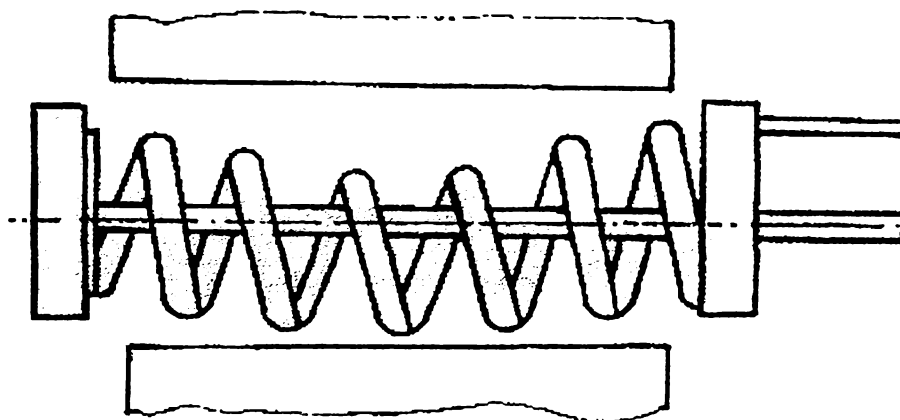


Figura 6.2 Deplasarea radială a spiralei filamentului

În cazul solicitărilor electrice se amintesc tensiunea excesivă și puterea disipată excesivă. În ambele cazuri mecanismul de defectare este deteriorarea elementului rezistiv iar modul de defectare este rezistența modificată.

Dacă puterea disipată este prea mare, crește nejustificat de mult temperatura cu două repercurșiuni. În primul rând crește emisivitatea catodului, stratul monoatomic de toriu epuizându-se repede.

În acest fel se reduce timpul de funcționare între două reparații ale magnetronului. În al doilea rând datorită temperaturii ridicate se modifică și caracteristicile mecanice ale aliajului W-To, lucru care poate să ducă la modificarea geometriei spiralei.

După poziția magnetronului, spirala poate să aibă deplasări radiale (Figura 6.2), în cazul unei poziții orizontale a magnetronului, sau deplasări axiale (Figura 6.3), în cazul unei poziții verticale a magnetronului.

Deplasările radiale modifică forma și dimensiunile spațiului de întârziere, cu implicații directe asupra condiției de sincronism între viteza medie de rotație a spițelor în care sunt organizați electronii și viteza de fază medie a undei electromagnetice care se propagă în spațiul de interacțiune.

Deplasările axiale modifică pasul spirei catodului. Mărimea pasului spirei este dată de relația:  $d/p = 0,3$  unde  $d$  este diametrul sârmei catodului, (se recomandă ca  $d = (0,4-0,8)$ ) și influențează în mod direct asupra zgomotului de linie.

Pentru ca atomii de toriu să fie mai bine fixați la suprafața catodului, (pentru a se reduce viteza de evaporare) tehnologia de execuție a catozilor presupune și o operație de carburare. După carburare, catodul devine sfărâmicos și este foarte sensibil la șocuri mecanice și vibrații.

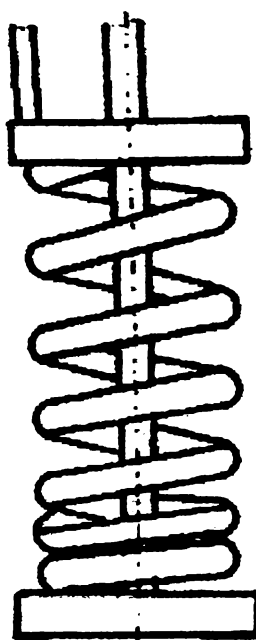


Figura 6.3 Deplasarea axială a spiralei filamentului

În construcția catozilor mai intră și izolatorul ceramic (3) care în urma unui șoc termic prea mare se poate fisura și în final sârma.

Prin distrugerea izolatorului cele două tije de alimentare a catodului pot să vină în contact și catodul să fie scurcircuitat.

În concluzie Tabelul 6.1 prezintă modurile și mecanismele de defectare a catodului spiralat în legătura cu solicitările la care este supus. După cum se constată în Tabelul 6.1, modurile principale de defectare ale catodului constau în modificarea sau întreruperea emisivității.

Tabelul 6.1 Moduri și mecanisme de defectare a catozilor din W-To

Tipul de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Puterea disipată	Rezistența disipată	Emisivitate modificată
	Rezistența scurtcircuitată	Emisivitate întreruptă
Putere disipată excesivă	Rezistența modificată	Emisivitate modificată
	Rezistența întreruptă	Emisivitate întreruptă
	Deteriorarea spirei catodului (pas modificat)	Zgomot
	Deteriorarea stratului	Emisivitate modificată
	Deteriorarea izolatorului ceramic	Catod scurtcircuitat
Ambianța șocuri vibrații sau accelerații constante	Spiră întreruptă	Emisivitate întreruptă
	Deteriorarea izolatorului ceramic	Catod scurtcircuitat
	Deteriorarea sistemului de susținere (îndoirea tijelor)	Spațiu de întârziere modificat
		Catod scurtcircuitat
Vid slab	Deteriorarea elementului rezistiv	Emisivitate modificată
Umiditate ridicată	Rezistența modificată	Emisivitate modificată

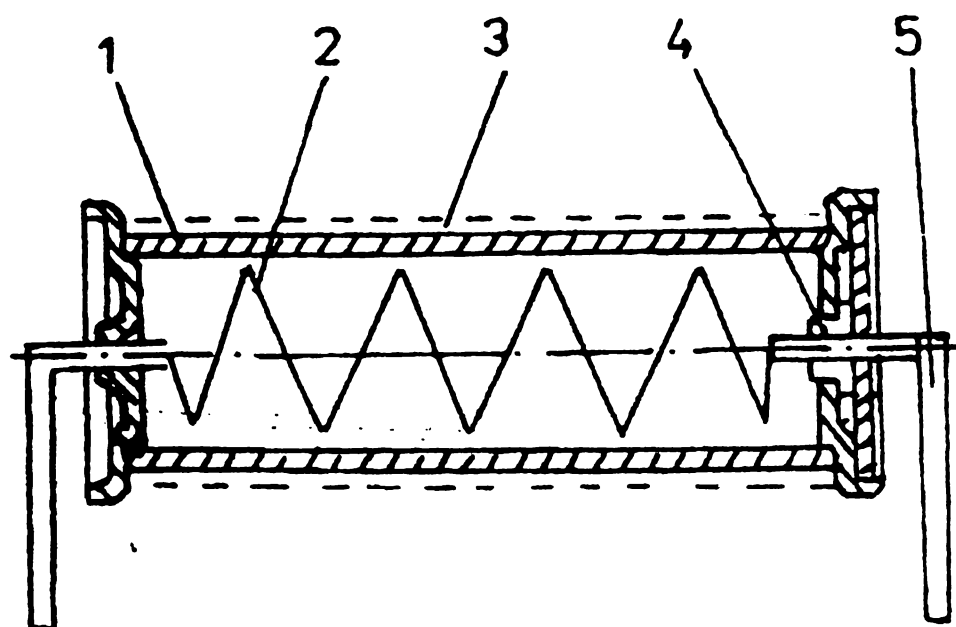
În Figura 6.4 se prezintă catodul cu încălzire indirectă folosit în construcția magnetronelor. Un catod de acest fel are în componența sa un tub de nichel central (1) peste care este depusă substanță emisivă (3).

Ca substanță emisivă se folosește carbonatul de bariu ( $BaCO_3$ ) din care în timpul activării se separă atomi de bariu metalic pe suprafața catodului.

Încălzirea se face prin intermediul filamentului care este izolat de tubul de nichel printr-un strat de oxid de aluminiu depus pe suprafața elementului. După ce catodul începe să emită, o parte din electroni revin pe catod realizându-se în acest fel bombardamentul regresiv care și el produce încălzirea catodului.

Solicitările la care este supus catodul sunt solicitări electrice și datorate ambianței.

Solicitările de natură electrică duc la același tipuri de defecte ca în cazul catozilor cu încălzire directă. De reținut mai este faptul că în cazul în care puterea disipată pe filament crește repede, apare un șoc termic care poate să ducă la deteriorarea stratului emisiv prin desprinderea de pe tubul de nichel a unei părți din substanța emisivă.



**Figura 6.4 Catod cu încălzire indirectă**

1. Tub de nichel 2. Filament 3. Substanță emisivă 4. Izolator ceramic 5. Tije de alimentare a catodului.

În același timp, datorită aceluiași motiv, de pe filament se poate desprinde o parte din stratul izolator, lucru care duce la modificarea rezistenței filamentului cu implicații asupra reducerii temperaturii.

Pe măsură ce temperatura la care lucrează catodul scade, scade în mod implicit și emisivitatea lui.

În prima fază în care puterea disipată pe rezistență crește, crește și temperatura de lucru a catodului. Datorită acestui fenomen crește emisivitatea în mod implicit și bombardamentul regresiv cu electroni.

Există situații și nu de puține ori, când în urma acestui bombardament se desprind părți din materialul emisiv.

În urma acestor desprinderi, se deteriorează suprafața emisivă, se reduce volumul de material emisiv și în final se reduce emisivitatea catodului.

**Tabelul 6.2 Moduri și mecanisme de defectare a catozilor cu încălzire indirectă**

Tipul de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Solicitarea electrică Tensiunea excesivă	Rezistența modificată	Emisivitate modificată
	Rezistența întreruptă	Emisivitate întreruptă
Puterea disipată excesivă	Rezistența modificată	Emisivitate modificată
	Rezistența întreruptă	Emisivitate întreruptă
	Deteriorarea parțială a suprafeței emise	Emisivitate întreruptă
	Deteriorarea stratului de izolație a rezistorului	Emisivitate modificată
	Deteriorarea izolatorului ceramic	Catod scurcircuitat
Ambianță, șocuri, vibrații sau accelerații constante	Rezistor desprins	Emisivitate întreruptă
	Deteriorarea izolatorului ceramic	Catod scurcircuitat
	Deteriorarea elementului rezistiv	Emisivitate modificată
	Rezistența modificată	Emisivitate modificată

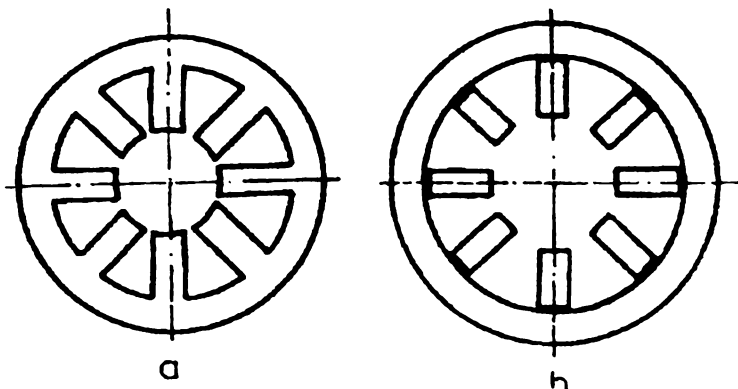
În Tabelul 6.2 sunt prezentate modurile și mecanismele de defectare a catozilor cu încălzire indirectă. În concluzie amândouă tipurile de catozi prezintă cu preponderență același mod de defectare emisivă.

## 6.2 Tipuri de defecte specifice anodului și cavității rezonante

Anodul magnetronului este format dintr-un bloc masiv de cupru în care sunt practicate cavitățile rezonante sau după caz, sunt obținute prin lipirea în interiorul blocului anodic a unor lamele (Figura 6.1).

Se consideră că, tot în cazul defectelor referitoare la blocul anodic, să se abordeze și defectele specifice capacelor, bușelor de kovar și a dielectricilor folosiți

cu care formează subansamblu comun, obținut prin lipirea în diferite faze tehnologice (Figura 6.2).



**Figura 6.1 Anodul magnetronului**

a. Anod monobloc b. Anod obținut prin lipire

Pentru o bună funcționare a magnetronului, subansamblul bloc anodic trebuie să asigure păstrarea integrității cavității rezonante precum și păstrarea vidului la valorile prescrise anterior.

Solicitările la care este supus subansamblul blocului anodic sunt de două tipuri: solicitări termice și solicitări mecanice.

Căldura degajată în timpul funcționării se transmite, prin radiație, conducție și convecție, mediului înconjurător prin intermediul anodului și a radiatorului de răcire.

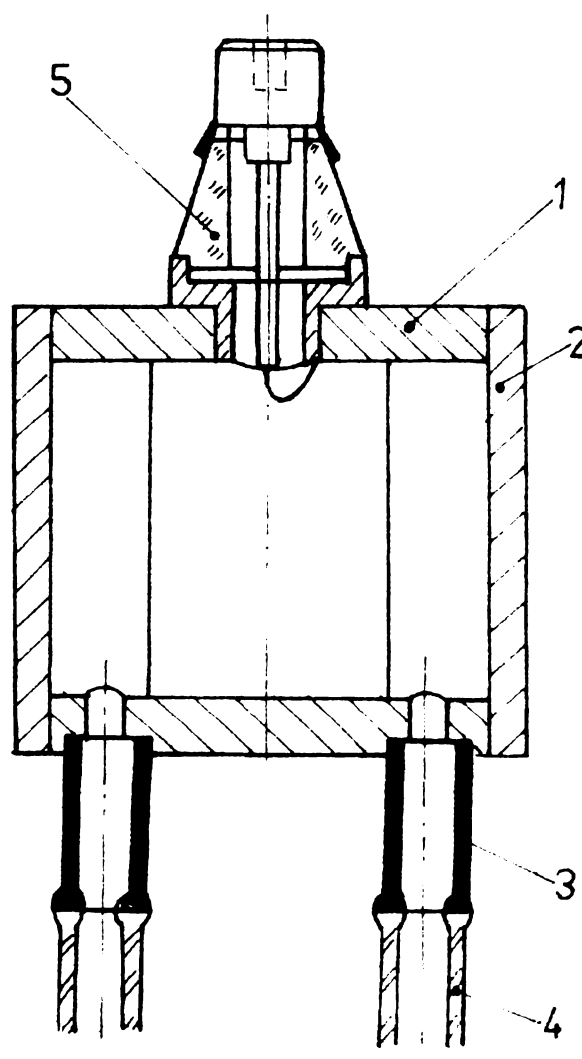
Sistemul de răcire se calculează în așa manieră încât să se ajungă la un regim staționar de funcționare fără ca temperatura anodului să depășească în partea lui exterioară  $105^{\circ}\text{C}$ .

Există cazuri accidentale în exploatarea magnetronului (putere disipată pe catod excesivă sau defectarea sistemului de răcire) când temperatura blocului anodic depășește limitele prescrise. Aceste situații influențează în mod negativ în funcționarea magnetronului și duc la diferite stări de defectare.

Odată cu creșterea temperaturii peste limita temperaturii de vidare, începe degazarea elementelor constructive. Gazele conținute în părțile metalice se deplasează spre interiorul catodului și duc la scăderea vidului în incintă.

Prezența gazelor în incinta magnetronului provoacă străpungerea între anod și catod care pot distruge local suprafața anodului. Pe măsură ce temperatura crește sunt afectate și lipiturile metal-metal.

În prima fază se pot dezlipi inelele de scurcircuitare ceea ce duce la schimbarea modului de oscilație. Antena care este lipită de una din lamelele cavității rezonante se poate dezlipi, magnetronul nemaiputând debita putere pe sarcină.



**Figura 6.2 Subansamblu bloc anodic**

1. Anod 2. Capac 3. Bucșa kovar 4. Balon sticlă 5. Bucșă ceramică

Dacă este afectată lipitura, între capace și anod apar interstii care fac să comunice incinta magnetronului cu atmosfera.

Unul din punctele cele mai sensibile la creșterea temperaturii sunt lipiturile metal dielectric (sticlă sau ceramică). Creșterea temperaturii în această zonă produce dilatarea diferită a celor două elemente, lucru care duce la fisurarea dielectricului.

De reținut este și faptul că materialele dielectrice folosite la treceri (sticlă și metal) sunt sensibile la șocuri termice, o creștere bruscă a temperaturii poate să ducă la fisurarea lor.

Sensibilitate mare prezintă piesele din sticlă și ceramică la șocuri și vibrații, efectul unor șocuri și vibrații relativ mari este distrugerea lor și în mod implicit scoaterea din uz a magnetronului.

**Tabelul 6.1 Moduri și mecanisme de defectare a blocului anodic**

Tip de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Ambianță, șocuri, vibrații sau accelerații constante	Deteriorarea dielectricului	Absența vid Emisie întreruptă
Temperatură înaltă	Dezlipirea inelelor de scurtcircuit	Salt mod de oscilație
	Modificarea geometriei cavităților rezonante	Modificarea frecvenței
	Dezlipirea capacelor	Absența vid Emisie întreruptă
	Degazarea părților metalice	Absența vid, străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
Șoc termic	Deteriorarea dielectricului	Absența vid, străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
Atmosferă corozivă	Deteriorarea lipiturilor metal - dielectric	Absența vid, străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă

În Tabelul 6.1 sunt prezentate modurile și mecanismele de defectare cu referire la blocul anodic.

Dacă se face o trecere în revistă a modurilor de defectare specifice blocului anodic, se poate constata că datorită unui vid neadecvat apar străpungeri între anod și catod, care favorizează scoaterea din uz a magnetroanelor.



### 6.3 Tipuri de defecte specifice modulului de cuplare cu sarcina

Modulul de cuplaj se folosește la transmiterea energiei spre sarcină și se construiește în două variante: tip coaxial (Figura 6.1) și tip ghid de undă (Figura 6.2).

În cazul sistemului de ieșire de tip coaxial, cuplajul se realizează cu o buclă plasată în cavitatea rezonantă sau prin lipirea antenei de una din cavitățile rezonante ale blocului anodic.

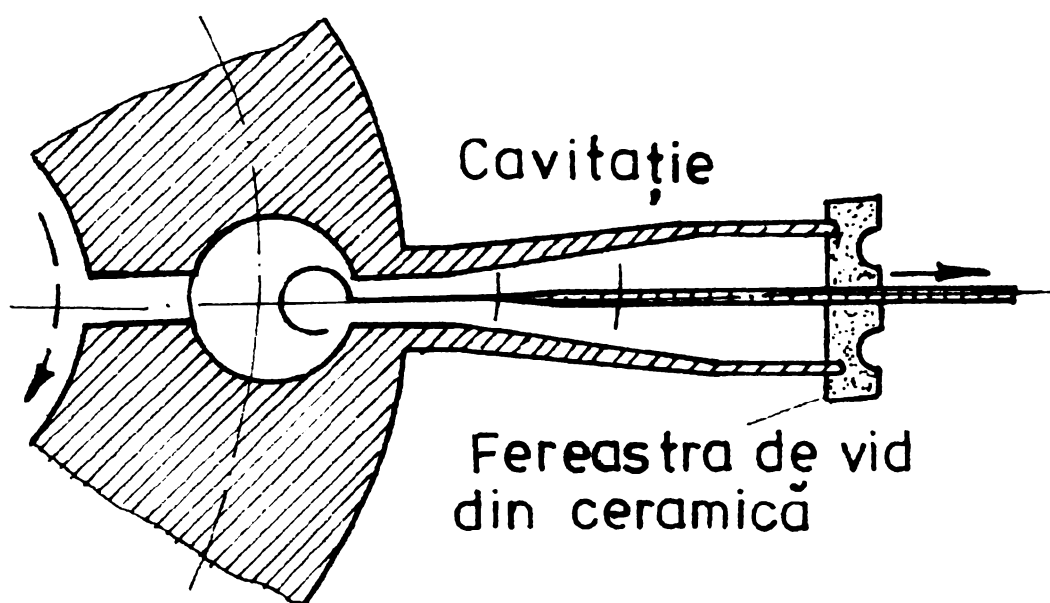


Figura 6.1 Cuplaj cu sarcină de tip coaxial

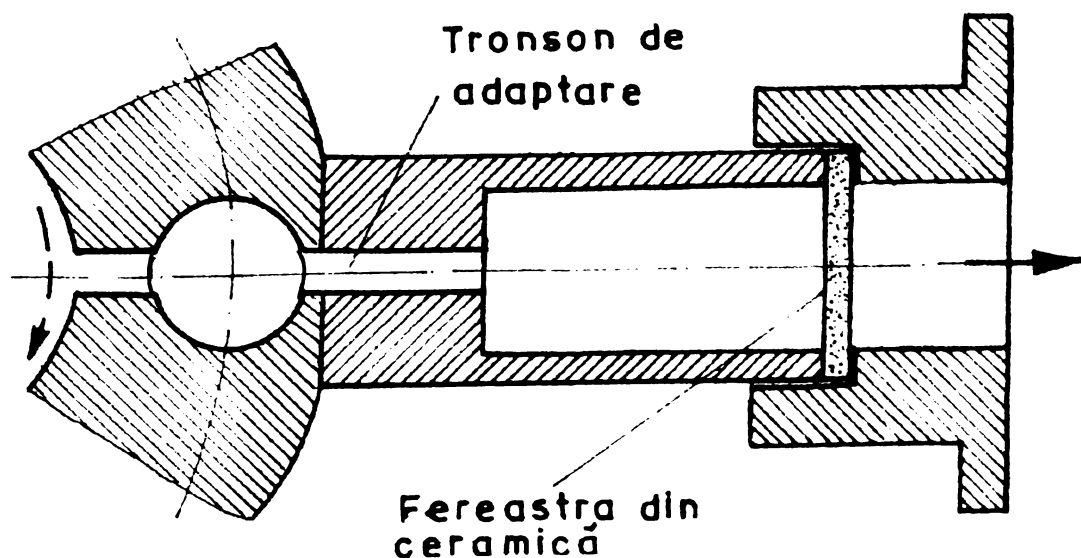


Figura 6.2 Cuplaj cu sarcină prin ghid de adaptare

Adaptarea impedanței de undă se realizează prin variația secțiunii antenei și a cilindrului coaxial. Debitarea puterii spre sarcină se poate face direct sau prin ghid de undă cu secțiune dreptunghiulară sau printr-un cablu coaxial.

Sistemul de ieșire de tip ghid de undă se folosește în cazul unor puteri mari și lungimi de undă mici. Adaptarea impedanței interne a magnetronului cu cea a ghidului de transmisie se face prin intermediul unui tronson de ghid de undă în  $\lambda/4$ .

Amândouă sistemele presupun prezența unei "ferestre de microunde" care să separe partea vidată a magnetronului de exterior.

"Fereastra de microunde" se realizează din sticlă de kovar sau din ceramică superaluminoasă. Solicitări la care poate să fie supus sistemul de ieșire pot fi de natură mecanică.

În cazul unei încălziri suplimentare, peste limita admisă, este de așteptat să se producă fie dezlipirea unor componente, fie fisurarea dielectricului atunci când încălzirea sau răcirea (șoc termic) se fac cu viteze mari.

**Tabelul 6.1 Moduri și mecanisme de defectare ale modulelor de ieșire**

Tipul de solicitare	Mecanismul de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Șocuri, vibrații și accelerație constantă	Deteriorarea dielectricului	Absență vid. Emisie întreruptă
	Absența tronsonului de cuplare	Modificarea impedanței de ieșire. Tirirea frecvenței
Șoc termic	Deteriorarea dielectricului	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
	Deteriorarea lipiturilor	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
Atmosferă corozivă	Deteriorarea lipiturilor	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
Praf și alte impurități	Ecranarea 'ferestrei de microunde'	Reducerea puterii
Umezeală	Coroziune chimică	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
	Coroziune galvanică	Întreruperea conexiunilor. Reducerea puterii.
Atmosferă sărată	Coroziune chimică	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
	Coroziune galvanică	Întreruperea conexiunilor. Reducerea puterii.

În amândouă cazurile dispare vidul din magnetron, consecință fiind nefuncționarea magnetronului.

Două pot fi efectele unor solicitări mecanice dure. În primul rând poate fi distrus dielectricul, în al doilea rând poate fi deformat tronsonul de adaptare.

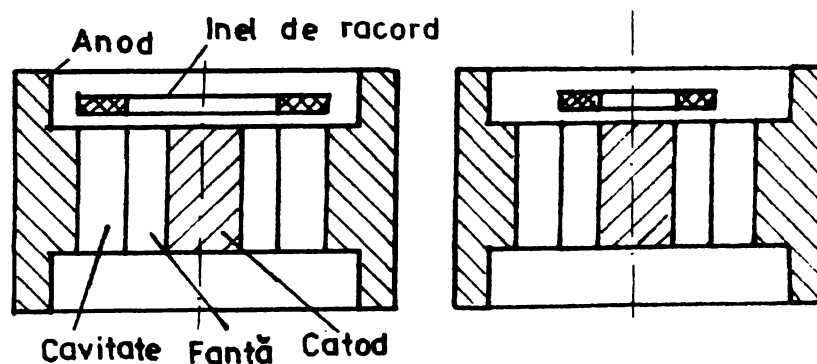
În Tabelul 6.1 sunt prezentate modurile și mecanismele de defectare, cu referire la sistemul de cuplare cu sarcina.

Se poate constata că în urma solicitărilor la care este supus sistemul de cuplare cu sarcina, pot fi afectate prin diferite fenomene fizice și chimice integritatea "ferestrei de microunde" și tronsonul de adaptare, cu consecințe privind emisiunea, puterea și frecvența magnetronului.

#### 6.4 Tipuri de defecte specifice modulului de acord al magnetronului

Din punct de vedere al frecvenței, magnetroanele se pot clasifica în magnetroane care emit microunde de o anumită frecvență fixă și magnetroane destinate să funcționeze într-o bandă largă de frecvență.

Acestea din urmă sunt prevăzute cu elemente de acord mecanic.



**Figura 6.1 Acord mecanic al cavităților rezonante cu inele metalice**

Metodele de acord folosite sunt :acord inductiv sau capacitiv al capacităților rezonante, realizat cu inele metalice plasate la capetele cilindrului anodic (Figura 6.2), acord inductiv sau capacitiv realizat prin inele metalice prevăzute cu știfturi (Figura 6.2); acord prin utilizarea unei cavități rezonante externe coaxială cu magnetronul (Figura 6.3).

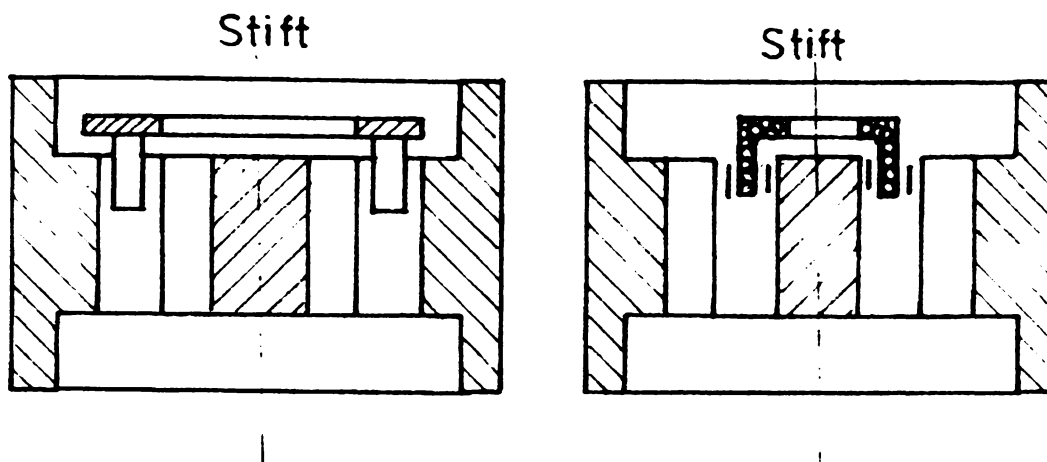


Figura 6.2 Acord mecanic prin inele metalice cu știfturi

În primele situații cavitatea rezonantă este închisă printr-o membrană elastică de care sunt fixate elementele de acord. Deplasarea inelelor plate sau a inelelor cu știfturi se realizează prin intermediul unui mecanism melc - roată melcată.

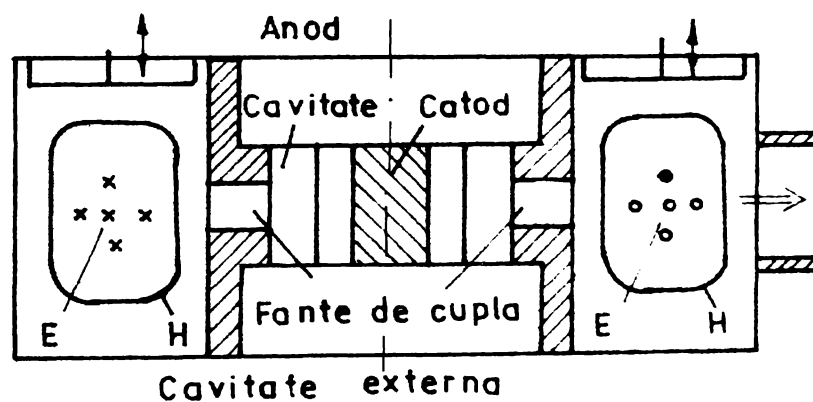


Figura 6.3 Acord mecanic al magnetronului cu utilizarea unei cavități externe

În urma solicitărilor termice se poate produce deplasarea elementelor de acord și îmbătrânirea prematură a membranelor elastice.

Mănuirea brutală a mecanismului de acordare poate să ducă la uzura mecanismului și la fisurarea membranei elastice.

În Tabelul 6.1 sunt prezentate modurile și mecanismele de defectare ale sistemului de acord.

Două sunt modurile de defectare care apar: reducerea posibilităților de realizare a acordului și întreruperea emisieii magnetronului.

**Tabelul 6.1 Moduri și mecanisme de defectare ale sistemului de acord**

Tip de solicitare	Mecanism de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Șocuri, vibrații și accelerație constantă	Deteriorarea mecanismului de acord. Slăbirea pieselor filetate și danturate	Reducerea posibilităților de a realiza acordul mecanic
	Perforarea membranei elastice	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
Mănuire brutală, forțarea dispozitivului	Fisurarea membranei elastice	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă
	Contact între inelele de acord și cavitatea rezonantă	Scurtcircuitarea cavităților rezonante. Emisie întreruptă
	Deteriorarea angrenajului melc roată melcată	Reducerea posibilităților de acord
Încălzire excesivă	Uzura excesivă Blocarea lagărelor	Reducerea posibilităților de acord
	Deformarea inelelor și a știfturilor de reglare	Scurtcircuitarea cavităților rezonante. Emisie întreruptă
	Distrugerea lipiturilor membranei	Absență vid. Străpungeri anod - catod. Emisie întreruptă

### 6.5 Tipuri și defecte specifice de răcire

Modulul de răcire oferă posibilitatea menținerii magnetronului într-un regim termic constant.

Există două posibilități de răcire: cu aer, cu ajutorul unui ventilator și cu apă, prin radiatorul prevăzut pe magnetron. Orice defectare a sistemului de răcire duce la o încălzire excesivă a magnetronului cu întreaga suită de consecințe ce rezultă de aici.

Pentru un mai bun schimb de căldură cu mediul înconjurător se recomandă vopsirea în negru a magnetronului și a sistemului de răcire. Excesul de temperatură

poate să provoace dezlipirea aripilor radiatorului de pe anod, reducându-se în acest fel și posibilitățile de răcire.

În cazul în care aripile radiatorului nu sunt cositorite pe anod între anod și aripioară, în cazul unei atmosfere cu umiditate relativ ridicată, se poate forma un strat de oxid care înrăutățește condițiile de transfer.

Fiind realizate din tablă subțire, aripile radiatorului se pot deforma ușor în urma unor solicitări mecanice. Prin modificarea formei lor se modifică traseul aerului de răcire producându-se perturbații în sistemul de răcire.

În cazul răcirii magnetronului cu un agent lichid, se recomandă apa, aceasta trebuind să îndeplinească o serie de calități dintre care se amintesc: să nu conțină elemente care să se depună pe conductele prin care circulă, să nu intre în combinație chimică cu materialele cu care vine în contact, să nu fie coroziv, să nu fie nociv, să fie ieftin, să se poată vehicula cu ușurință etc.

Depunerile de pe pereții orificiilor prin care trece lichidul, micșorează coeficientul de transfer termic, având ca efect înrăutățirea condițiilor de răcire.

Prezența în lichidul de răcire a unor elemente corozive poate să ducă la perforarea țevilor și chiar a blocului anodic cu efecte nedorite asupra vidului din incinta magnetronului, și asupra integrității sistemului de răcire. Dacă lichidul de răcire intră în combinație chimică cu cuprul din care sunt realizate țevile sau blocul anodic pot să formeze compuși care să stranguleze orificiile de trecere sau să îmbâcsească filtrele prezente în circuitul de răcire a magnetronului. Dacă lichidul de răcire se vehiculează cu greutate sau dacă sunt necesare stații speciale de vehiculat, se înrăutățește randamentul global al magnetronului.

În Tabelul 6.1 sunt prezentate mecanismele și modurile de defectare a magnetronului cu referire la sistemul de răcire. La o trecere în revistă a modurilor de defectare, se poate constata că orice dereglare a sistemului duce la creșterea temperaturii și la întreruperea emisiei magnetronului.

Tabelul 6.1

Tip de solicitare	Mecanism de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Șocuri și vibrații	Deformarea aripilor radiatorului de răcire	Temperatura mărită Degazare Emisie întreruptă
	Dezlipirea aripilor radiatorului	Temperatura mărită Degazare Emisie întreruptă
	Strangularea țevilor de răcire	Temperatura mărită Degazare Emisie întreruptă
	Deformarea tronsonului de vehiculare a aerului	Temperatura mărită Degazare Emisie întreruptă
	Slăbirea șuruburilor de fixare a tronsonului	Temperatura mărită Degazare Emisie întreruptă
Temperatura excesivă	Dezlipirea radiatorului	Crește temperatura Degazare Emisie întreruptă
	Deformarea pieselor din material plastic din tronsonul de vehiculare a aerului	Crește temperatura Degazare Emisie întreruptă
Atmosferă corozivă	Distrugerea radiatorului de răcire	Temperatura mărită Emisie întreruptă
	Desprinderea vopselei	Modifică coeficientul de transfer termic Temperatură mărită Emisie întreruptă
	Perforarea anodului	Lipsă vid Emisie întreruptă
Praf și impurități	Strangularea orificiilor de trecere	Temperatura mărită Emisie întreruptă
	Acoperirea radiatorului de răcire	Temperatura mărită Emisie întreruptă
Umezeală	Favorizează depunerea prafului pe radiatorul de răcire	Temperatura mărită Emisie întreruptă

**6.6 Tipuri de defecte specifice modului de alimentare ( $U_a$ ,  $I_f$  și  $B_0$ )**

Modul de alimentare a magnetronului se subdivide în trei module: modulul pentru tensiunea anodică, modulul pentru curent de filament și modulul pentru inducția magnetică.

În Tabelul 6.1 sunt prezentate mecanismele și modurile de defectare cu referire la modulele de alimentare.

**Tabelul 6.1 Moduri și mecanisme de defectare a modulelor de alimentare**

Tipuri de solicitare	Mecanism de defectare	Modul de defectare
1	2	3
Șocuri, vibrații și accelerație constantă	Deformația carcasei	Modificarea parametrilor magnetici
	Deteriorarea magnetului	Modificarea parametrilor magnetici
Atmosferă corozivă	Coroziune	Înteruperea legăturilor electrice
Umiditate ridicată	Coroziune	Înteruperea legăturilor electrice
	Scurgere la suprafață	Modificarea parametrilor de alimentare

Se constată că toate defectele care apar cu privire la modulele de alimentare, concură la modificarea parametrilor de alimentare și în mod implicit vor influența în mod negativ asupra funcționării magnetronului.



## 7 DETERMINAREA TOLERANTELOR PENTRU DIMENSIUNILE ANODULUI

### 7.1 Geometria blocului anodic

#### 7.1.1 Observatii introductive

Stabilitatea de funcționare și de repetabilitate a parametrilor de ieșire a magnetroanelor în cazul fabricării acestora în masă, depinde de următorii factori:

- 1). - corectitudinea de alegere a sistemului de rezonanță și de ieșire a energiei,
- 2). - tipul de reglare;
- 3). - tipul catodului;
- 4). - sistemul de răcire;
- 5). - cât de corect sunt alese regimurile de funcționare a magnetroanelor;
- 6). - precizia de prelucrare dimensională a reperelor;
- 7). - elementele geometrice de construcție a magnetroanelor;
- 8). - corectitudinea metodelor de măsurare;
- 9). - controlul parametrilor electrici și constructivi ai materialelor;
- 10). - calitatea materialelor electrovacumate;
- 11). - complexitatea și precizia proceselor tehnologice de prelucrare a magnetroanelor;
- 12). - tipul considerat;
- 13). – starea igienică sistemului de vacuum;
- 14). - organizarea muncii în cadrul firmei respective;
- 15). - regimul și condițiile de exploatare a magnetroanelor în cadrul aparaturii;

Toți acești factori acționează într-un mod foarte complicat, unul asupra celuilalt și determină în cele din urmă stabilitatea, siguranța și durata de viață a magnetroanelor în construcții electrotehnice.

Cu toate acestea, ca și oricare producție, producția de magnetroane se supune unor legi proprii, a căror nerespectare se reflectă negativ asupra calității aparatelor electrovacumate.

De aceea constructorilor și tehnologilor de magnetroane le sunt foarte cunoscute unele reguli specifice tehnologiei propriu-zise de fabricare a magnetroanelor.

Elementele acestor construcții în respectivele noduri ale magnetroanelor trebuie să fie fabricate din sorturi de materiale dintre cele mai bune, în corespondență precisă cu dimensiunile precizate de desenele tehnice respective, cât și de toleranțele respective (acestea din urmă cer o atenție deosebită atât în cazul construcțiilor, cât și al controlului care se efectuează în timpul fabricației).

Astfel, se recomandă realizarea unui număr minim de suduri vacumate.

Toate operațiile tehnologice (în afara controlului asupra scurgerilor nodurilor care au fost lipite) trebuie să se facă într-un timp minim posibil, și într-o ordine foarte exactă, care să excludă eventualele particule de praf sau distrugerea materialelor de legătură din interiorul magnetroanelor.

Operațiile de control trebuie să garanteze fiabilitatea în exploatare a produsului.

## 7.2 Alegerea sistemului de toleranțe pentru dimensiunile geometrice ale nodurilor și pieselor magnetroanelor

Se pot considera patru moduri diferite de alegere a sistemului de toleranțe (productive) asupra dimensiunilor blocului anodic:

1. Determinarea toleranțelor asupra dimensiunilor geometrice ale sistemului rezonator, plecând de la sistemul de toleranțe după standardele STAS, care sunt considerate în fabricarea de scule de precizie.

2. Determinarea toleranțelor plecând de la valoarea dată a împrăștierilor lungimilor de undă de rezonanță a blocurilor anodice a magnetroanelor, în cazul fabricării acestora în masă, după unul și același desen tehnic.

3. Determinarea toleranțelor plecând de la normele date pentru o oarecare valoare (mărime), care caracterizează gradul de asimetrie a câmpului electromagnetic în spațiul de interacțiune.

4. Determinarea toleranțelor plecând de la valoarea maximă, care este determinată din practică, în procesul de fabricare al magnetronelor, a unuia și aceluiași tip în cazul unei metode date de pregătire (fabricare) a blocurilor anodice.

Cel mai simplu și obișnuit mod îl constituie determinarea toleranțelor după prima metodă: când sunt cunoscute dimensiunile geometrice ale sistemului rezonator și a altor elemente constructive ale magnetronelor. Toleranțele pentru aceste dimensiuni în desenele tehnice de execuție, sunt trecute din orice îndrumător cu referire la fabricarea sculelor.

În acest caz se folosește sistemul arbore unitar sau sistemul alezaj unitar, după clasele de precizie 6, 7 conform STAS.

O asemenea alegere formală duce de regulă, la urmări destul de grave pentru prelucrarea magnetronelor.

Până atunci când aceste toleranțe la dimensiuni geometrice a sistemului rezonator (și a altor noduri ale magnetronelor) nu vor fi corelate cu toleranțele asupra parametrilor electrici ai magnetronelor respective, producția oricărui tip de magnetron nu poate să se considere ca fiind asimilată, întrucât nivelul rebuturilor va fi mare.

Alegerea acestui sistem de toleranțe se explică din lipsa unor relații simple care să lege acești parametri electrici echivalenți ai sistemului rezonator  $\lambda_0$ ,  $p_{cl}$ ,  $Q_0$ , cu dimensiunile lui geometrice și cu toleranțele la aceste dimensiuni.

În al doilea rând, este esențial și sistemul de fabricare în serie al altor firme și fabricanți, a multitudinii de calibre standartizate, de scule de măsurare și dispozitive, a căror precizie de fabricare este destul de înaltă și este corespunzătoare cu clasa de precizie corespunzătoare după STAS, ceea ce nu poate să nu ușureze și să nu ducă la reducerea costurilor de fabricație a magnetronelor, dacă toleranțele la dimensiunile geometrice a sistemului rezonator și a altor elemente constructive sunt respectate.

O rezolvare corectă a problemelor cu privire la toleranțe trebuie să se caute într-un compromis științific făcut între toleranțele după STAS și toleranțele care să fie determinate după parametrii electrici ai magnetronelor.

Compromisul însă, trebuie să se supună următoarelor considerente:

- alegerea sistemului de toleranțe și stabilirea claselor de precizie depinde în principal de construcția aparatului respectiv;

- problemele legate de factorii economici și tehnici de fabricație care intră în complexul alegerii sistemului de toleranță;

În acest sens se pune problema pentru care dintre aceste considerente se poate ajunge la neconcordanța toleranțelor dimensiunilor geometrice cu toleranțele parametrilor electrici ai magnetronelor și cu tehnologia de fabricație.

Ținând seama de faptul că rezonatorul electromagnetic reprezintă un domeniu al spațiului delimitat de o suprafață de discontinuitate a parametrilor electromagnetici, în care are loc fenomenul de rezonanță în microunde, se prezintă două cazuri distincte, după cum urmează:

a).-Într-unul din magnetronele de impulsuri cu diametrul interior  $d_0=30$  mm (diametrul rezonatorului) în calitate de transformator care să se acordeze la ieșirea energiei, au fost folosite așa-numitele segmente sau adaosuri exponențiale.

După fabricarea acestor adaosuri sau segmente, acestea s-au introdus într-o conductă și împreună cu aceasta, s-au lipit cu ajutorul unor aliaje de lipit din Cu-Ag, la anodul blocului magnetron.

În acest caz, valoarea de calcul a fascicolului de ieșire, adică a fantei de ieșire a energiei a fost egală cu 0,15 mm.

Pentru menținerea parametrilor de ieșire a magnetronului se recomandă ca toleranța diametrului interior al rezonatorului să fie  $\pm 0.15$  mm deci  $d_0=30 \pm 0.15$  mm.

Prin urmare în cazul dat, această toleranță este justificată pentru că ea corespunde ca toleranță, clasei 6 de precizie pentru unul din parametrii geometrici ai magnetronului.

Exemplul de mai sus arată necesitatea unei atenții sporite în cazul unificării unor elemente separate în construcția magnetronelor precum și la determinarea tipului constructiv al nodurilor separate a magnetronelor, factorul tehnic și economic având un rol decisiv.

Gradul de unificare a elementelor în fabricație este relevant în cazul producției de serie mare și masă (de exemplu-productia de magnetron pentru cuptoarele cu microunde).

b).-Într-un alt caz studiat se consideră un magnetron de rezonator a cărui diametru interior este  $d_0=30$  mm la care, în locul transformatorului clasic, a fost folosit transformatorul în formă de "H" în secțiune, având patru lungimi de undă.

În acest caz, valoarea de calcul a fascicolului de ieșire, adică a fantei de ieșire a energiei a fost egală cu 1,32 mm.

În cazul transformatorului de patru unde, care are un coeficient mai mare de transformare asupra valorii rezistenței exterioare, s-a constatat că o modificare a lățimii fantei de legătură cu 20  $\mu\text{m}$  determină o reducere a puterii folosite cu 15 %. Exemplele date arată că în practică se întâlnesc cazuri când, toleranțele după STAS din fabricarea sculelor de precizie nu corespund cu toleranțele parametrilor electrici și nici cu producția de fabricație a magnetronelor, sau a unor noduri separate ale magnetronelor.

Dimensiunile rezonatoarelor și a spațiului de interacțiune devin în acest caz miniaturizate, iar toleranțele după STAS sunt rigide.

Se consideră de exemplu, un sistem rezonator al unui magnetron de diametru  $d_0 = 8$  mm.

Sistemul rezonator are următoarele dimensiuni geometrice:

1. Diametrul orificiului anodic  $d_a = 3,15^{+0,013}$  mm;
2. Diametrul pentru spatele a rezonatoarelor mici  $d_N = 5,1^{+0,016}$  mm;
3. Diametrul pentru spatele rezonatoarelor mari  $d_M = 6,9^{+0,016}$  mm;
4. Grosimea lamelelor  $\delta = 0,3^{-0,01}$  mm;

Precizia de prelucrare a blocurilor anodice la asemenea dimensiuni cu toleranțele respective, precum și realizarea operațiilor tehnologice (curățirea, lipirea, recoacerea, etc.) este dificilă.

În baza acestui considerent a apărut magnetronul cu regim de funcționare cu un câmp magnetic slab. Datorită acestei dimensiuni radiale a blocului rezonator și a spațiului de interacțiune, scăderea cerințelor față de toleranțe la dimensiunile rezonatorului au permis să se construiască magnetronuri pentru microunde.

Acest exemplu arată că problemele preciziei și a tehnologiei de fabricație conduc nu numai la reconstruirea unor noduri separate a magnetronelor dar, în același timp stimulează construirea de sisteme rezonatoare cu folosirea unor regimuri noi de lucru, mai puțin studiate în privința interacțiunii câmpului electromagnetic cu fluxul electronic.

Ținând seama de cele menționate mai sus, în ceea ce privește modul de stabilire a toleranțelor la geometria dimensiunilor sistemului rezonator, și la alte elemente ale construcției magnetronelor, se pot preciza următoarele aspecte:

1).Toleranțele la dimensiunile pieselor care într-un grad sau altul determină parametrii electrici și caracteristicile magnetronului, trebuie să corespundă cu toleranțele la parametrii și caracteristicile tehnologiei de fabricare și îmbinare în aceste noduri a elementelor constructive de bază a magnetronelor (descrise în Capitolul 4).

2).Toleranțele pentru dimensiunile anumitor repere (de exemplu: inelul de legătură de pe blocul anodic și de pe terminatoarele de poli, capacele laterale, componentele catodului și nodurile de ieșire a energiei, etc.) nu influențează asupra parametrilor de calitate și asupra caracteristicilor magnetronelor, dar influențează stabilitatea funcționării magnetronelor și într-o oarecare măsură siguranța magnetronului în exploatare. Totodată, toleranțele trebuie să fie determinate în concordanță cu proprietățile fizice ale materialelor ce se folosesc, cât și a combinațiilor prin lipire din procesul de fabricație a magnetronelor, în toate stadiile sale de fabricație.

De asemenea, regimurile electrice și mecanice de funcționare a magnetronelor (de exemplu în cazul calculului distanței și toleranțelor care determină locul de poziționare a catodului și lungimea anodului cu golurile laterale, este necesar să se țină seama de alungirea datorată temperaturii a așa-numitului picior catodic).

3).Toleranțele pentru dimensiunea de gabarit a magnetronului (în îmbinările din flanșă asupra coaxialității terminatoarelor de poli) trebuie să corespundă cu toleranțele la dimensiunile flanșelor de legătură a sistemului magnetic.

4).În condiții de laborator s-a stabilit influența câmpului de toleranță (aplicat la valoarea nominală a diametrului piesei anodice) și a rugozității suprafeței acestuia, asupra randamentului de conversie magnetică. La elaborarea programelor de calcul s-a ținut seamă și de aceste aspecte.

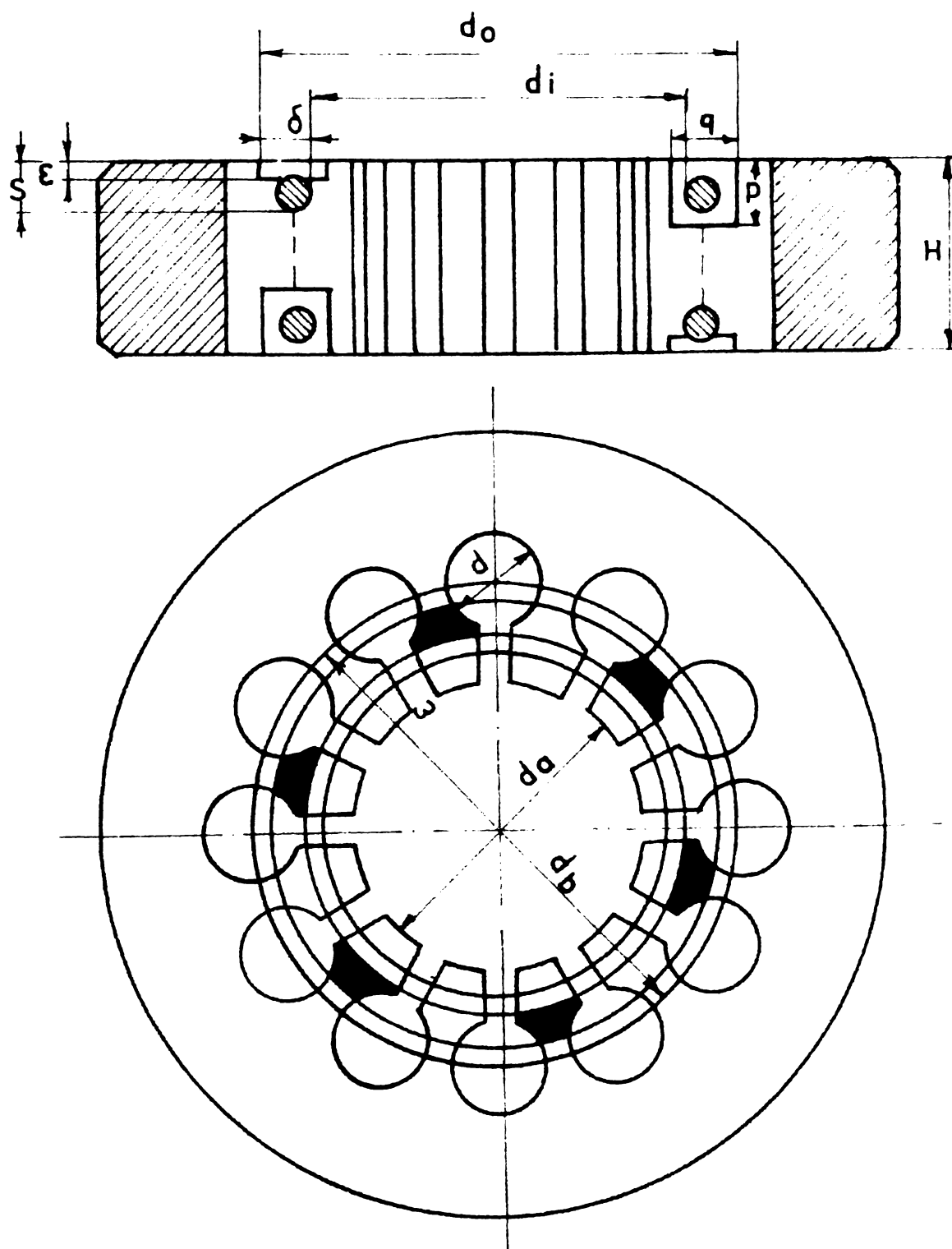


Figura 7.1

În Figura 7.1 este redată schema unui astfel de magnetron iar semnificația notațiilor și valorile sunt prezentate în

Tabelul 7.1

Tabelul 7.1

Parametrul	Valoarea nominală [ mm ]	Toleranța parametrului ±	Procent de îmbunătățire a randamentului [ $\eta$ ] funcție de toleranța parametrului
$d_a$	25.0	0.023	1.9
$d_i$	38.0	0.027	2.2
$d_b$	42.0	0.050	5.0
$d_o$	42.0	0.050	0.62
$d$	6.0	0.020	0.65
$\delta$	3.0	0.030	1.0
$q$	6.0	0.020	1.7
$p$	5.6	0.020	1.5
$s$	3.8	0.020	0.9
$H$	16.0	0.060	2.0
$\varepsilon$	2.6	0.020	0.7

### 7.3 Metode de control a toleranțelor la fabricația magneetroanelor

Rezolvarea problemelor legate de toleranțele folosite la sistemele de magneetroane și de rezonatoare include în sine determinarea câmpului de toleranță pentru fiecare dimensiune care într-o măsură sau alta, într-un grad sau altul, influențează asupra parametrilor electrici și caracteristicilor sistemului (unda de rezonanță și simetria câmpului respectiv), controlul corespunzător al dimensiunilor la fabricare a blocurilor anodice, controlul și păstrarea dimensiunilor în limitele date



(câmpul de toleranță) în procesul tuturor operațiilor, incluzând încercările dinamice a magnetronelor fabricate.

Pentru a preîntâmpina rebutarea blocurilor anodice (în privința dimensiunilor geometrice) în timpul procesului de fabricare a lor, se vor utiliza de instrumente de măsură și control uzuale cum sunt: micrometru, calibrele și microscopul optic.

În secția de asamblare, există trei posibilități de a controla blocurile anodice în ceea ce privește caracteristicile electrice:

- a). după valoarea frecvenței unde de rezonanță și a aspectului de lucru al oscilațiilor;
- b). după valoarea indicelui de calitate;
- c). după simetria câmpului electromagnetic în spațiul de interacțiune cu frecvența de rezonanță a aspectului de funcționare a oscilațiilor;

Fără a analiza precizia metodelor de control a simetriei câmpului și a acestui indice de calitate propriu-zis, se precizează că nici una din caracteristicile electrice enumerate a sistemului rezonator, nu poate să fie folosită ca o măsură cantitativă după care, să se poată calcula (și da ca dată inițială) toleranțele pentru dimensiunile geometrice a sistemului rezonator.

Acest lucru se explică prin următoarele cauze:

-1). lipsesc așa numitele corespondențe simple care să lege între ele valorile de tensiuni asupra fantelor diferitelor rezonatoare ale blocului anodic și valoarea indicelui de calitate propriu și exterior, cu valorile absolute (sau relative) a dimensiunilor fiecărui rezonator a sistemului.

Controlul optic al blocurilor anodice după simetria câmpului în spațiul de interacțiune și după valoarea acestui indice de calitate, permite să ne facem numai o imagine calitativă în ceea ce privește calitatea blocurilor anodice prelucrate, după sistemul de comparare a acestora cu blocul etalon.

În cel mai bun caz un asemenea control permite să se stabilească care dintre dimensiuni influențează cel mai mult asupra simetriei câmpului și asupra acestui indice de calitate și prin urmare, care din toleranțe sunt cele mai importante.

-2). valoarea amplitudinii tensiunii de înaltă frecvență, asupra fantelor rezonatoarelor și valoarea acestui indice de calitate propriu, se determină nu numai cu dimensiunile geometrice ale rezonatoarelor dar și cu valoarea și uniformitatea de repartitie a pierderilor active care depind de rugozitatea prelucrării suprafeței

rezonatoarelor și în special de calitatea îmbinării prin lipire, și de oscilogramele câmpului.

-3). Întrucât efectuarea oscilogramei câmpului și măsurarea acestui indice de calitate de neîncărcare a sistemului are loc în regimul de oscilații forțate, forma oscilogramelor câmpului și valoarea acestui indice de calitate propriu, depinde de frecvența ( $f_0$ ) de rezonanță a blocului anodic definit.

-4). precizia metodelor moderne de măsurare a undei (frecvența) este atât de mare încât influența parțială a oricărei dimensiuni constructive a sistemului (și a câmpului de toleranță pentru fiecare dimensiune) asupra undei de rezonanță proprie poate să fie stabilită experimental. În Tabelul 7.1 se prezintă influența toleranțelor standard asupra valorilor de creștere a undei de rezonanță pentru sistemul rezonator, cu rezonator de tipul "fantă-orificiu" cu  $N=18$  cavități rezonatoare.

Tabelul 7.1

<b>Notarea dimensiunilor</b>	<b>Valoarea Dimensiunilor [mm]</b>	<b>Câmpul de toleranță indicat pe desen [mm]</b>	<b>Valoarea numerică a coeficientului de influență</b>	<b>Valoarea relativă a câmpului de toleranță [%]</b>
w	1,4	+0,015	-11,15	-0,253
$d_1$	4,7	+0,013	+4,4	+0,086
$d_2$	4,5	+0,013	+2,2	+0,043
$D_1$	41,6	$\pm 0,030$	+1,28	$\pm 0,058$
$D_2$	25,0	$\pm 0,030$	+1,57	$\pm 0,061$
$d_a$	16,4	+0,019	-2,65	-0,076
h	20,0	-0,050	+0,2	-0,015

Toleranța pentru lățimea fantei  $w$ , este ceva mai mare, (aproximativ de 2,5 ori), în acest fel, dimensiunea cea mai importantă în sistemul rezonator cercetat, de tipul "fantă-gaură", fiind de fapt, lățimea fantei rezonatoarelor -deci și grosimea segmentului.

În sistemele rezonatoarelor de tip sectorizat dimensiunile cele mai importante sunt lățimea fantei rezonatorului și diametrul găurii centrale deoarece concentrarea rezonatorului este relativ redusă.

O altă etapă importantă, este corespondența toleranțelor cu posibilitățile tehnologice de realizare a magnetroanelor.

## **8 PROGRAM DE CALCUL PENTRU GENERAREA FORMEI CONSTRUCTIVE A MAGNETRONULUI ÎN VEDEREA CREȘTERII RANDAMENTULUI DE CONVERSIE MAGNETICĂ**

### **8.1 Obiective vizate - Medii de programare utilizate.**

Pentru elaborarea programului de calcul, s-a ținut seamă de aspectele constructive prezentate în capitolele anterioare și de întregul suport matematic necesar, în vederea dimensionării magnetronului.

Cercetările personale în acest domeniu au fost de lungă durată.

#### **8.1.1. Obiective vizate în timpul cercetărilor**

Plecând de la tipurile constructive de magnetroane analizate, în urma cercetărilor de laborator s-a ținut seamă de următoarele aspecte:

- gama constructivă de magnetroane;
- elementele de calcul necesare și etapele de proiectare ale magnetroanelor;
- analiza constructivă a magnetroanelor;
- analiza funcțională;
- posibilitățile tehnice de realizare cu utilaje moderne, existente în România
- influența factorilor constructivi asupra randamentului;
- influența parametrilor regimului de așchiere la fabricarea elementelor componente de bază ale magnetroanelor;
- influența câmpului de toleranță (precizie dimensională) între anod și catod asupra randamentului de conversie magnetică;
- utilizarea unor medii de programare cu licență;
- realizarea unui program performant în medii de programare performante, cu facilități grafice;

8.1.2 Medii de programare utilizate

Ținând seamă de cele de mai sus, mediile de programare alese au fost:

Microsoft Visual Fox-Pro 6.0 și MatLab utilizate în ingineria proiectării de soft.

1. Pentru executarea programelor în MatLab s-au parcurs următoarele etape:

- a.1.) - realizarea bazelor de date în urma cercetării experimentale;
- b.1.) - transpunerea fișierelor tip bază de date în fișiere tip matrice;
- c.1.) - realizarea programului;
- d.1.) - trasarea diagramelor.

2. Pentru executarea programelor în Microsoft Visual Fox-Pro 6.0 s-au parcurs următoarele etape:

- a.2.) - transpunerea aparatului matematic în algoritm de calcul;
- b.2.) - realizarea schemelor logice;
- c.2.) - elaborarea fișierelor specifice;
- d.2.) - realizarea fișierului executabil și a dischetelor de instalare.

8.2 Programe sursă - Exemple de calcul.8.2.1. Exemple - Diagrame obtinute în MatLab

```
load g6_8.txt
WHITEBG;
x=g6_8(:,1);
y=g6_8(:,2);
a=g6_8(:,3);
b=g6_8(:,4);
h=plot(x,y,x,a,x,b);
hold on;
legend('N=6','N=7','N=8');
grid on;
set(gca,'XTick',[3:1:15]);
set(gca,'YTick',[15:5:100]);
set(h,'LineWidth',2);
% 'grosimea liniei'
xlabel('Tensiunea Uo','Color',[1,1,1]);
ylabel('Randamentul magnetronului','Color',[1,1,0]);
title('DIAGRAMA TENSIUNE-RANDAMENT','Color',[0,1,1]);
h1=text('Color',[1,0.5,0.5]);
grid on;
end
```

Parametrii inițiali care au stat la baza rulării programului în cazul exemplului mai jos prezentat au fost:

- frecvența de lucru.....  $f=2450$  Mhz;
- tensiunea anodică aplicată.....  $U_0=4 \dots 15$  KV;
- diametrul anodului.....  $D_a=16$  mm;
- diametrul catodului.....  $D_c=5,9$  mm;
- numărul de cavități.....  $N=6 \dots 8$  mm;

Rezultatele sunt date în Figura 8.1 ... Figura 8.4



Figura 8.1 Diagrama tensiune anodică-randament pentru  $N=6,7,8$

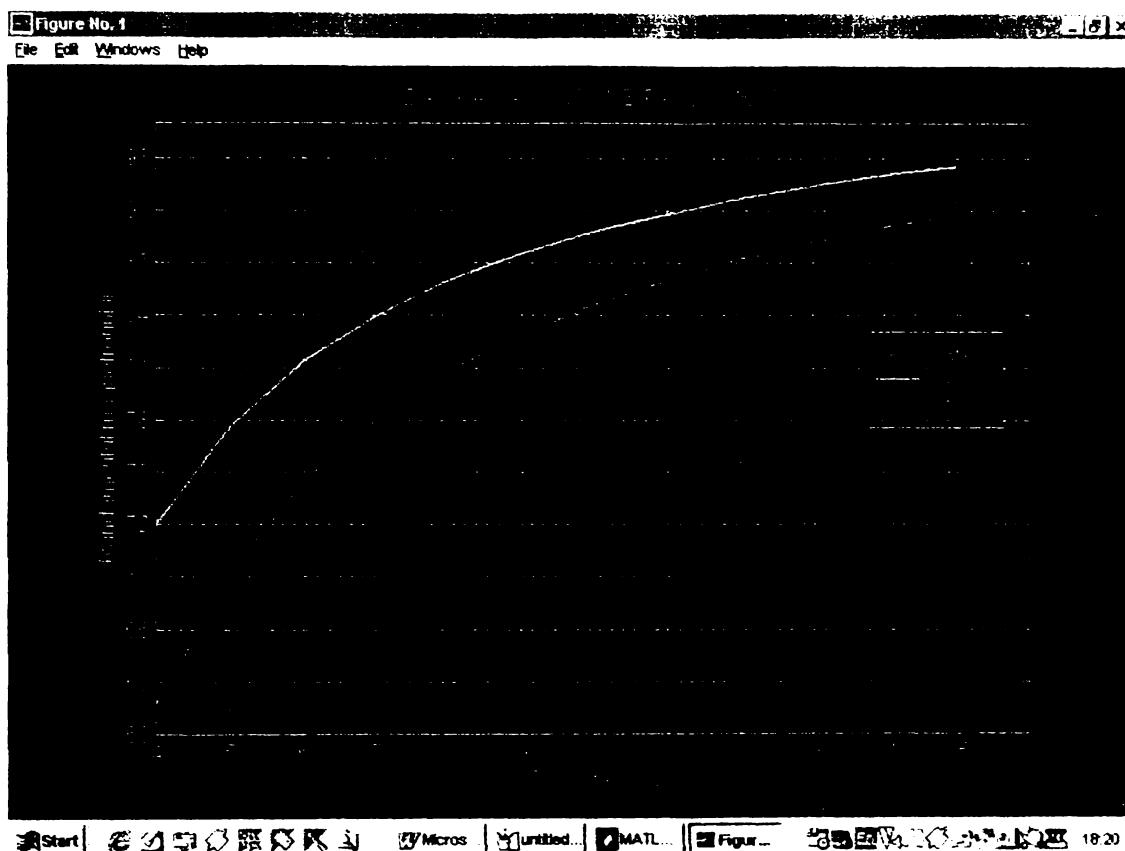


Figura 8.2 Diagrama tensiune anodică-randament pentru N=9,10,11

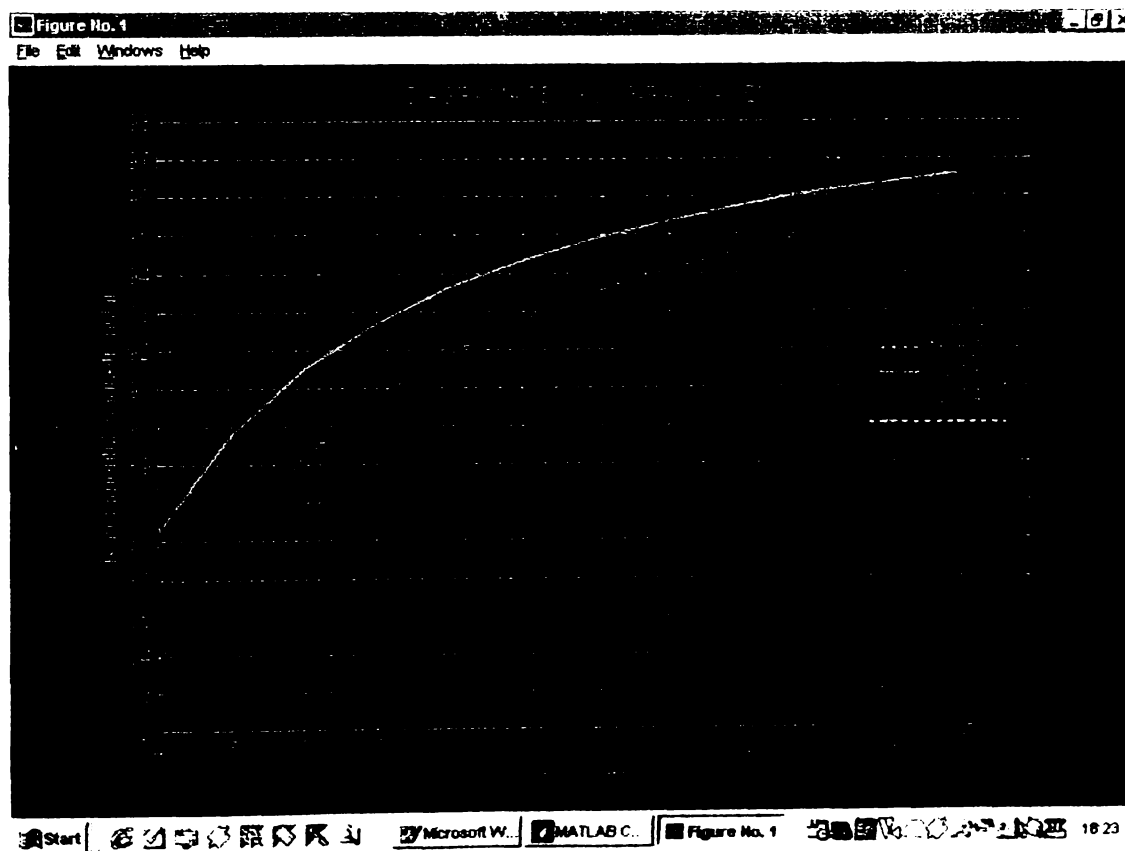


Figura 8.3 Diagrama tensiune anodică-randament pentru N=12,13,14

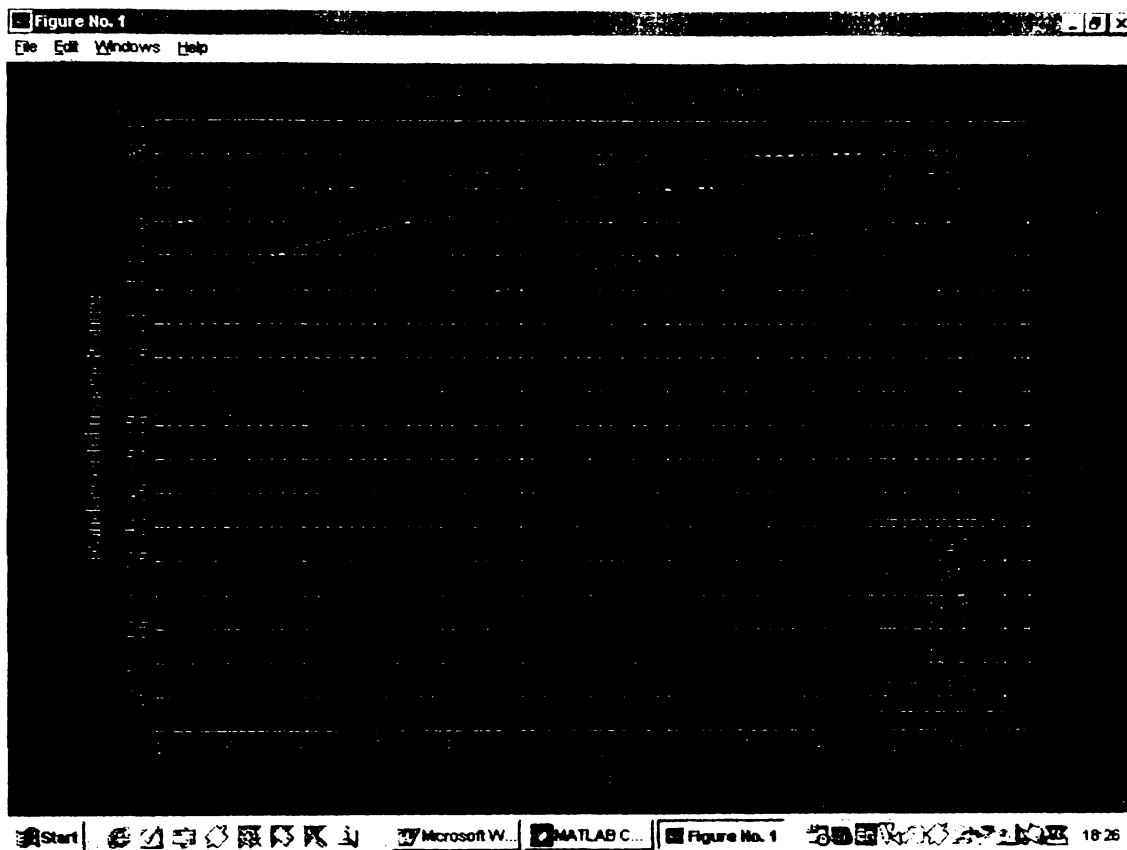


Figura 8.4 Diagrama tensiune anodică-randament pentru  $N=7 \dots 12$

### 8.2.2 Secvență de program sursă

```

***** * C:\TFIL\PROGR\MAGNET\PROIECT\MAIN.PRG
*:*****
*:
*: Procedure File C:\TFIL\PROGR\MAGNET\DOCS\MAIN.PRG
*:
*:
*: Documented using Visual FoxPro Formatting wizard version .05
*:*****
*****
*:   MAIN
DO form magnet.scx
READ EVENTS
Clear events
QUIT

***** * C:\TFIL\PROGR\MAGNET\PROIECT\MAGNET.SCX
Name = "Dataenvironment"
Height = 440
Width = 620
ShowWindow = 2
DoCreate = .T.
AutoCenter = .T.
Caption = "Randamentul magnetronului"

```



```
Closable = .F.
MaxButton = .F.
MaxHeight = 440
MaxWidth = 620
MinHeight = 440
MinWidth = 620
Icon = hh.ico
WindowType = 1
ua = 4
N = 7
dc = 5.9
frecv = 2450
da = 0.000
ba = 0.000
uacr = 0
bacr = 0.000
randam = 0.000
AS = 0.002
ai = 0.001
randami = 0.000
delta = 0.000
bai = 0.000
bacri = 0.000
uacri = 0.000
Name = "magnet"
PROCEDURE Init
    this.shpProgBar.width=0
    this.txtHeader1.caption='Cercetari privind generarea formeii
constructive a magnetronului'
    this.txtHeader2.caption='in vederea cresterii randamentului de
conversie magnetica'

ENDPROC
PROCEDURE Refresh
    thisform.height=440
    thisform.width=620

ENDPROC
Top = 60
Left = 11
Height = 167
Width = 290
BackStyle = 0
FillStyle = 1
SpecialEffect = 0
Name = "Shape1"
Top = 264
Left = 10
Height = 136
Width = 291
BackStyle = 0
FillStyle = 1
SpecialEffect = 0
Name = "Shape2"
```

```
Top = 360
Left = 317
Height = 39
Width = 295
BackStyle = 0
FillStyle = 1
SpecialEffect = 0
Name = "Shape3"
Top = 264
Left = 317
Height = 62
Width = 295
BackStyle = 0
FillStyle = 1
SpecialEffect = 0
Name = "Shape4"
Top = 406
Left = 11
Height = 25
Width = 519
BackStyle = 0
SpecialEffect = 0
Name = "shpProgBox"
AutoSize = .T.
Caption = "Tensiune anodica Ua="
Height = 17
Left = 33
Top = 81
Width = 127
TabIndex = 15
Name = "Label1"
AutoSize = .T.
Caption = "Nr. cavitati rezonatoare N="
Height = 17
Left = 33
Top = 113
Width = 145
TabIndex = 16
Name = "Label2"
AutoSize = .T.
Caption = "Diametrul catodului Dc="
Height = 17
Left = 33
Top = 144
Width = 134
TabIndex = 17
Name = "Label3"
AutoSize = .T.
Caption = "Frecventa de lucru"
Height = 17
Left = 33
Top = 174
Width = 102
TabIndex = 18
```

```
Name = "Label4"
AutoSize = .T.
Caption = "Diametrul anodului Da="
Height = 17
Left = 15
Top = 281
Width = 133
TabIndex = 19
Name = "Label5"
AutoSize = .T.
Caption = "Valoarea inductiei magnetice Ba="
Height = 17
Left = 15
Top = 305
Width = 186
TabIndex = 20
Name = "Label6"
AutoSize = .T.
Caption = "Tensiunea anodica critica Uacr="
Height = 17
Left = 15
Top = 329
Width = 179
TabIndex = 21
Name = "Label7"
AutoSize = .T.
Caption = "Inductia anodica critica Bacr="
Height = 17
Left = 15
Top = 353
Width = 162
TabIndex = 22
Name = "Label8"
AutoSize = .T.
Caption = "Randamentul magnetronului ="
Height = 17
Left = 15
Top = 377
Width = 170
TabIndex = 23
Name = "Label9"
AutoSize = .T.
Caption = "Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului"
Height = 17
Left = 325
Top = 274
Width = 284
TabIndex = 24
Name = "Label10"
AutoSize = .T.
Caption = "As="
Height = 17
Left = 339
Top = 298
```

```
Width = 23
TabIndex = 25
Name = "Label11"
AutoSize = .T.
Caption = "Ai="
Height = 17
Left = 475
Top = 298
Width = 19
TabIndex = 26
Name = "Label12"
AutoSize = .T.
Caption = "Rezulta randamentul imbunatatit:"
Height = 17
Left = 330
Top = 374
Width = 183
TabIndex = 27
Name = "Label13"
Picture = tunein.jpg
Stretch = 1
Height = 200
Left = 319
Top = 60
Width = 292
Name = "imgGraf"
Height = 25
InputMask = "99"
KeyboardHighValue = 15
KeyboardLowValue = 4
Left = 182
SpinnerHighValue = 15.00
SpinnerLowValue = 4.00
TabIndex = 1
Top = 75
Width = 48
Format = "k"
Value = 4
ControlSource = "thisform.ua"
Name = "txtUa"
Height = 25
InputMask = "99"
KeyboardHighValue = 24
KeyboardLowValue = 4
Left = 182
SpinnerHighValue = 24.00
SpinnerLowValue = 4.00
TabIndex = 2
Top = 107
Width = 48
Format = "k"
Value = 7
ControlSource = "thisform.n"
Name = "txtN"
```

```

Height = 25
Increment = 0.10
InputMask = "99.9"
KeyboardHighValue = 15
KeyboardLowValue = 2
Left = 169
SpinnerHighValue = 15.00
SpinnerLowValue = 2.00
TabIndex = 3
Top = 138
Width = 61
Format = "k"
Value = 5.9
ControlSource = "thisform.dc"
Name = "txtDc"
Top = 234
Left = 39
Height = 25
Width = 245
Caption = "Calculeaza randamentul"
TabIndex = 5
Name = "Command1"
PROCEDURE Click
    thisform.timer.enabled=.t.
    WITH thisform
        .frecv=IIF(.radFrecv.value=1,2450,915)
        STORE 0 TO .da,.ba,.uacr,.bacr,.randam,randami
        .refresh
        .da=.dc+10
        .ba=(.ua*.n)/(4 * PI() * .frecv * (.dc*0.001/2) * (.da-
        .dc)*0.001/2 )
        .uacr=1.25*10000*(.dc*0.001/2)*(dc*0.001/2)*.ba
        .bacr=9*SQRT(.ua)/(da*0.001/2)
        .randam=(1 - (.ua/(.uacr*1000)) *
        (.bacr/.ba)*(bacr/.ba))*100
    ENDWITH

ENDPROC
Top = 331
Left = 347
Height = 25
Width = 243
Caption = "Calculeaza randamentul imbunatatit"
TabIndex = 13
Name = "Command2"
PROCEDURE Click
    WITH thisform
        .randami=0
        .refresh
        .delta=(.as-.ai)/2
        .bai=(.ua*.n)/(4 * PI() * .frecv * (.dc*0.001/2) * ((.da-
        .dc)*0.001/2 - .delta))
        .uacri=1.25*10000*(.dc*0.001/2)*(dc*0.001/2)*.bai
        .bacri=9*SQRT(.ua)/(da*0.001/2)

```

```
.randami=(1 - (.ua/(.uacri*1000)) *
(.bacri/.bai)*(.bacri/.bai))*100
.timer.enabled=.T.
ENDWITH
cPictFile='graf'+strtran(str(thisform.txtN.value,2),'
','0')+'.jpg'
IF FILE(cPictFile)
    thisform.imgGraf.picture=cPictFile
ELSE
    thisform.imgGraf.picture='tunein.jpg'
ENDIF

ENDPROC
Height = 25
Increment = 0.01
InputMask = "9.999"
KeyboardHighValue = 9
KeyboardLowValue = -9
Left = 372
SpinnerHighValue = 9.00
SpinnerLowValue = -9.00
TabIndex = 11
Top = 295
Width = 61
Value = 0
ControlSource = "thisform.as"
Name = "txtAs"
ControlSource = "thisform.da"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 203
TabIndex = 6
Top = 281
Width = 65
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtDa"
ControlSource = "thisform.ba"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 203
TabIndex = 7
Top = 303
Width = 65
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtBa"
ControlSource = "thisform.uacr"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 203
TabIndex = 8
Top = 326
```

```
Width = 65
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtUacr"
ControlSource = "thisform.bacr"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 203
TabIndex = 9
Top = 348
Width = 65
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtBacr"
ControlSource = "thisform.randam"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 203
TabIndex = 10
Top = 370
Width = 65
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtRandam"
Top = 414
Left = 12
Height = 10
Width = 515
BackColor = 0,0,255
Name = "shpProgBar"
Top = 60
Left = 300
Height = 24
Width = 24
Enabled = .F.
Interval = 30
Name = "Timer"
PROCEDURE Timer
    IF
thisform.shpProgBox.width>thisform.shpProgBar.width+thisform.shpProg
Box.width/100

        thisform.shpProgBar.width=thisform.shpProgBar.width+thisform.sh
pProgBox.width/100
            IF
(thisform.shpProgBar.width/thisform.shpProgBox.width)*100>20
                thisform.txtDa.refresh
            ENDIF
            IF
(thisform.shpProgBar.width/thisform.shpProgBox.width)*100>40
                thisform.txtBa.refresh
            ENDIF
            IF
(thisform.shpProgBar.width/thisform.shpProgBox.width)*100>60
                thisform.txtUacr.refresh
```

```
        ENDIF
        IF
(thisform.shpProgBar.width/thisform.shpProgBox.width)*100>80
            thisform.txtBacr.refresh
        ENDIF
    ELSE
        thisform.shpProgBar.width=0
        this.enabled=.f.
        thisform.refresh
    ENDIF
ENDPROC
BackStyle = 0
ControlSource = "thisform.randami"
Enabled = .F.
Format = "z"
Height = 22
Left = 514
TabIndex = 14
Top = 370
Width = 49
DisabledBackColor = 192,192,192
DisabledForeColor = 0,0,0
Name = "txtRandamimb"
Height = 25
Increment = 0.01
InputMask = "9.999"
KeyboardHighValue = 9
KeyboardLowValue = -9
Left = 503
SpinnerHighValue = 9.00
SpinnerLowValue = -9.00
TabIndex = 12
Top = 296
Width = 61
Value = 0
ControlSource = "thisform.ai"
Name = "txtAi"
AutoSize = .T.
Caption = "kV"
Height = 17
Left = 238
Top = 81
Width = 15
TabIndex = 28
Name = "Label14"
AutoSize = .T.
Caption = "cavitati"
Height = 17
Left = 240
Top = 113
Width = 39
TabIndex = 29
Name = "Label15"
AutoSize = .T.
```



```
Caption = "mm"
Height = 17
Left = 241
Top = 144
Width = 24
TabIndex = 30
Name = "Label16"
AutoSize = .T.
Caption = "MHz"
Height = 17
Left = 241
Top = 191
Width = 25
TabIndex = 31
Name = "Label17"
AutoSize = .T.
ButtonCount = 2
Value = 1
Height = 46
Left = 172
Top = 175
Width = 56
TabIndex = 4
Name = "radFrecv"
Option1.Caption = "2450"
Option1.Value = 1
Option1.Height = 17
Option1.Left = 5
Option1.Top = 5
Option1.Width = 46
Option1.AutoSize = .T.
Option1.Name = "Option1"
Option2.Caption = "915"
Option2.Height = 17
Option2.Left = 5
Option2.Top = 24
Option2.Width = 39
Option2.AutoSize = .T.
Option2.Name = "Option2"
AutoSize = .T.
Caption = "mm"
Height = 17
Left = 274
Top = 284
Width = 24
TabIndex = 32
Name = "Label18"
AutoSize = .T.
Caption = "kV"
Height = 17
Left = 274
Top = 331
Width = 15
TabIndex = 33
```

```
Name = "Label19"
AutoSize = .T.
Caption = "3"
Height = 17
Left = 275
Top = 375
Width = 13
TabIndex = 34
Name = "Label20"
AutoSize = .T.
Caption = "8"
Height = 17
Left = 569
Top = 373
Width = 13
TabIndex = 35
Name = "Label21"
AutoSize = .T.
Caption = "mm"
Height = 17
Left = 439
Top = 299
Width = 24
TabIndex = 36
Name = "Label22"
AutoSize = .T.
Caption = "mm"
Height = 17
Left = 573
Top = 300
Width = 24
TabIndex = 37
Name = "Label23"
AutoSize = .T.
Caption = "Gs"
Height = 17
Left = 275
Top = 306
Width = 18
TabIndex = 38
Name = "Label24"
AutoSize = .T.
Caption = "Gs"
Height = 17
Left = 275
Top = 352
Width = 18
TabIndex = 39
Name = "Label25"
AutoSize = .T.
FontSize = 14
Caption = "Date de intrare:"
Height = 25
Left = 34
```

```
Top = 51
Width = 131
TabIndex = 41
Name = "Label27"
Top = 408
Left = 540
Height = 25
Width = 73
Caption = "Exit"
Name = "Command3"
PROCEDURE Click
    thisform.release
    Clear events
ENDPROC
Top = 2
Left = 11
Height = 53
Width = 595
BackStyle = 0
FillStyle = 1
SpecialEffect = 0
Name = "Shape5"
AutoSize = .T.
FontName = "Times New Roman CE"
FontSize = 14
Alignment = 2
Caption = "Label26"
Height = 24
Left = 276
Top = 9
Width = 61
Name = "txtHeader1"
AutoSize = .T.
FontName = "Times New Roman CE"
FontSize = 14
Alignment = 2
Caption = "Label26"
Height = 24
Left = 276
Top = 31
Width = 61
Name = "txtHeader2"
***** * C:\TFIL\PROGR\MAGNET\PROIECT\TUNEIN.JPG
***** * C:\TFIL\PROGR\MAGNET\PROIECT\UTT.ICO
```

În Figura 8.1 se prezintă procesarea programului în timpul compilării

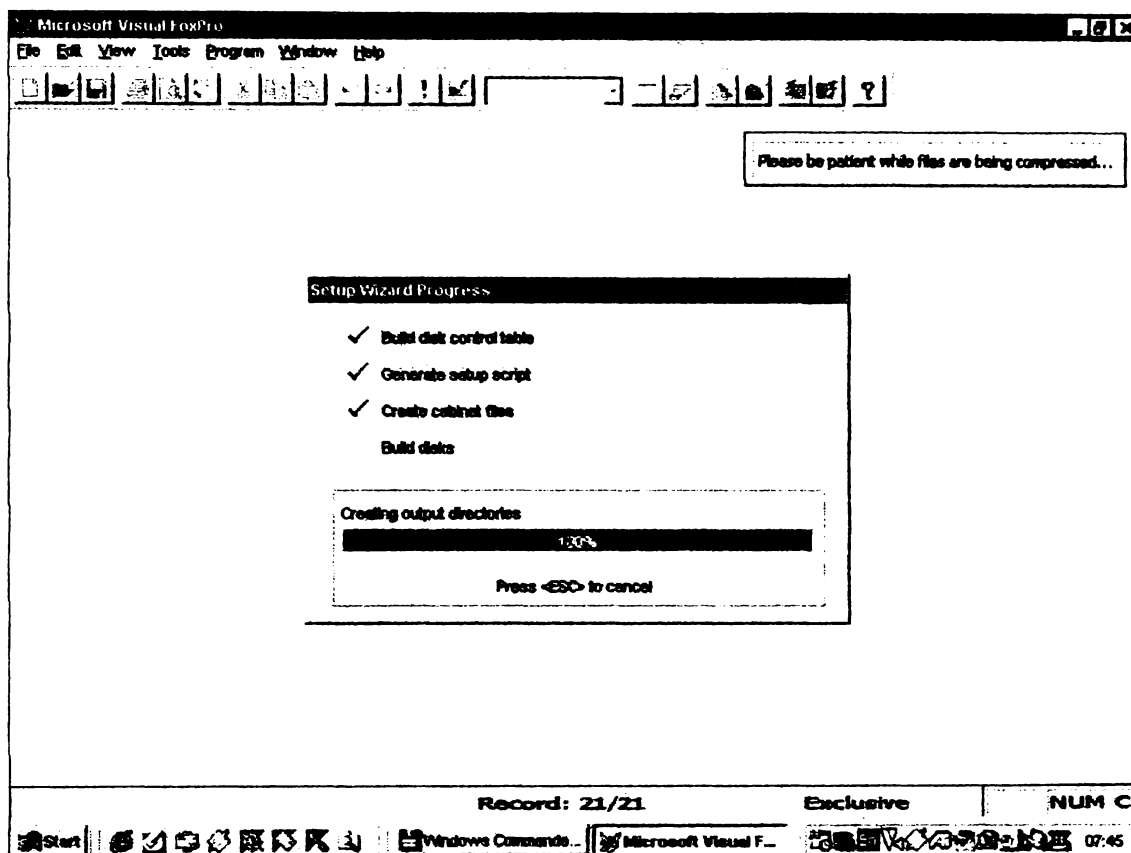


Figura 8.1

8.2.1. Exemple de calcul pentru îmbunătățirea randamentului de conversie magnetică a magnetronului cu ajutorul programului realizat în Microsoft Visual –FoxPro 6.0

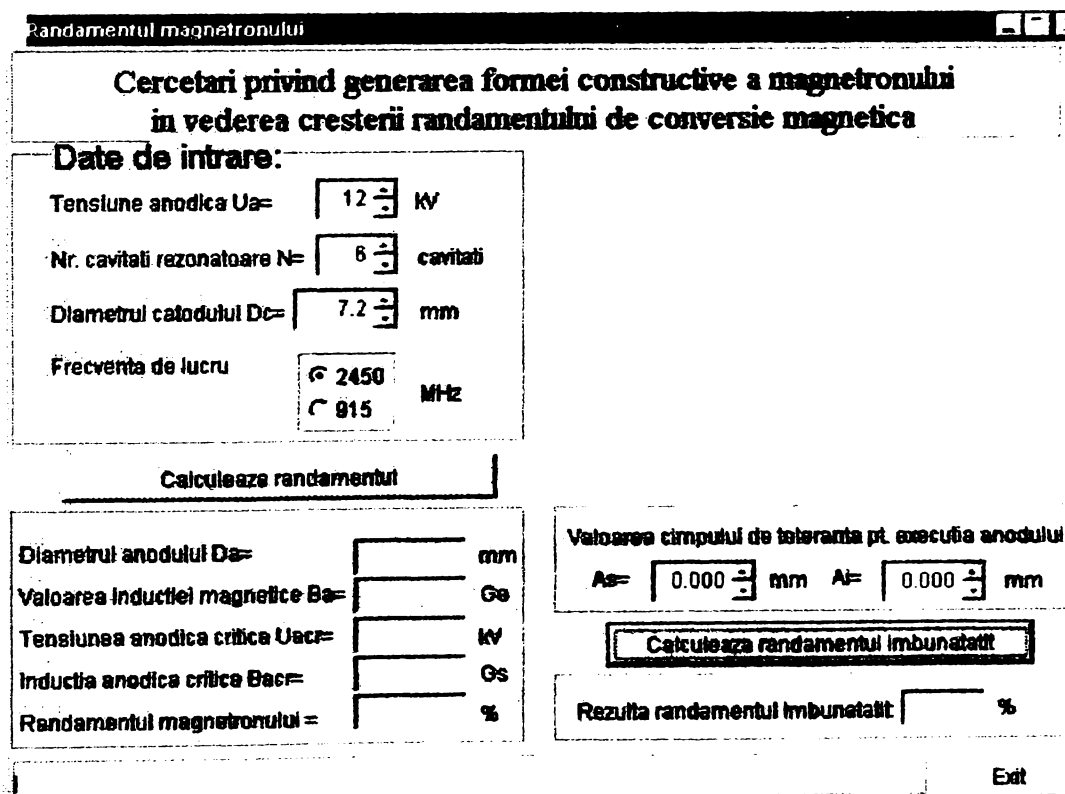


Figura 8.1 Date inițiale de calcul

**Randamentul magnetronului**

**Cercetari privind generarea formei constructive a magnetronului  
in vederea cresterii randamentului de conversie magnetica**

**Date de intrare:**

Tensiune anodica  $U_a =$   kV

Nr. cavitati rezonatoare  $N =$   cavitati

Diametrul catodului  $D_c =$   mm

Frecventa de lucru  2450  915 MHz

**Calculeaza randamentul**

Diametrul anodului  $D_a =$   mm

Valoarea inductiei magnetice  $B_a =$   Gs

Tensiunea anodica critica  $U_{acr} =$   kV

Inductia anodica critica  $B_{acr} =$   Gs

Randamentul magnetronului =  %

Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului  
 $A_s =$   mm  $A_f =$   mm

**Calculeaza randamentul imbunatatit**

Rezultul randamentului imbunatatit:  %

Exit

Figura 8.2 Rezultate calculate =>  $\eta = 55,61$  %

**Randamentul magnetronului**

**Cercetari privind generarea formei constructive a magnetronului  
in vederea cresterii randamentului de conversie magnetica**

**Date de intrare:**

Tensiune anodica  $U_a =$   kV

Nr. cavitati rezonatoare  $N =$   cavitati

Diametrul catodului  $D_c =$   mm

Frecventa de lucru  2450  915 MHz

**Calculeaza randamentul**

Diametrul anodului  $D_a =$   mm

Valoarea inductiei magnetice  $B_a =$   Gs

Tensiunea anodica critica  $U_{acr} =$   kV

Inductia anodica critica  $B_{acr} =$   Gs

Randamentul magnetronului =  %

Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului  
 $A_s =$   mm  $A_f =$   mm

**Calculeaza randamentul imbunatatit**

Rezultul randamentului imbunatatit:  %

Exit

Figura 8.3 Randamentul imbunătățit =>  $\eta = 77,27$  %

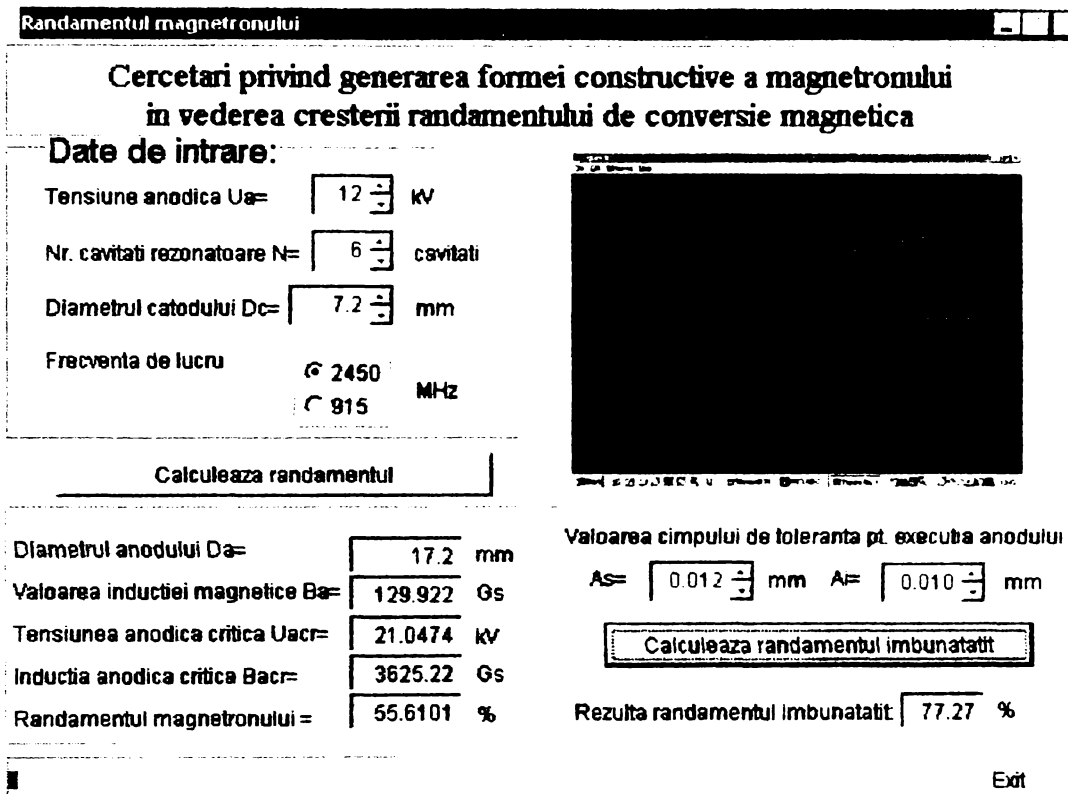


Figura 8.4 Rezultate finale cu diagrama

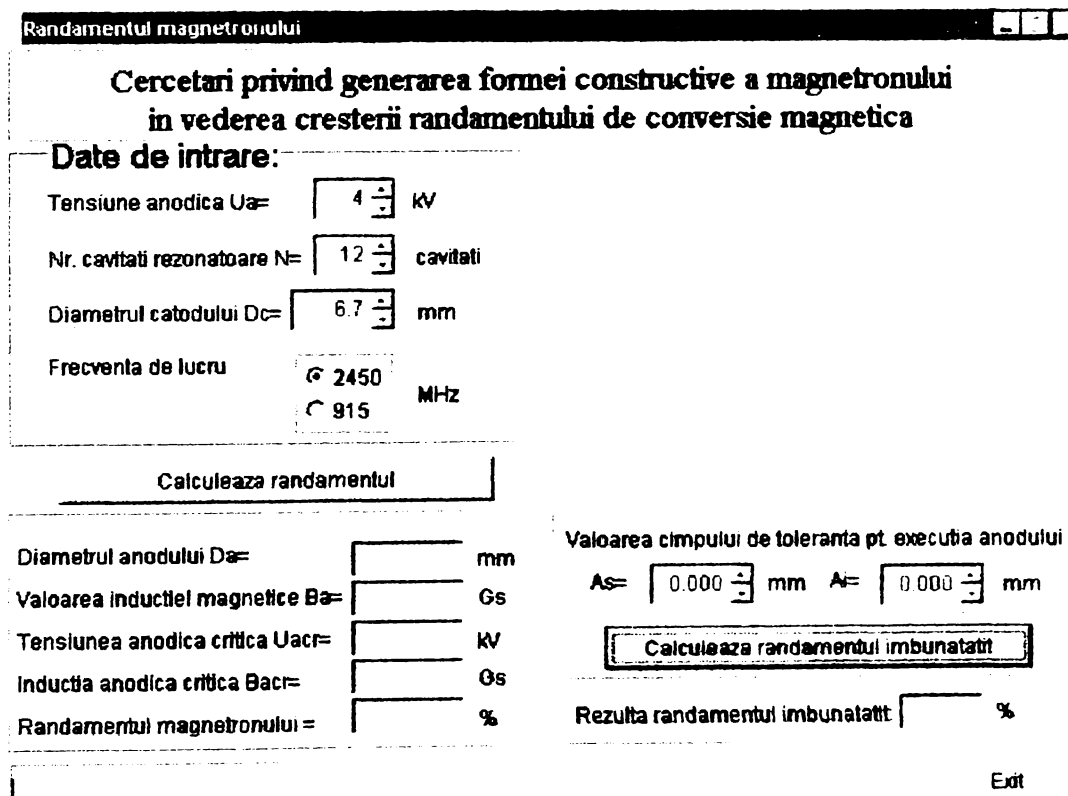


Figura 8.5 Date inițiale de calcul

**Randamentul magnetronului**

**Cercetari privind generarea formei constructive a magnetronului  
in vederea cresterii randamentului de conversie magnetica**

**Date de intrare:**

Tensiune anodica  $U_a =$   kV

Nr. cavitati rezonatoare  $N =$   cavitati

Diametrul catodului  $D_c =$   mm

Frecventa de lucru  2450  915 MHz

**Calculeaza randamentul**

Diametrul anodului  $D_a =$   mm

Valoarea inductiei magnetice  $B_a =$   Gs

Tensiunea anodica critica  $U_{acr} =$   kV

Inductia anodica critica  $B_{acr} =$   Gs

Randamentul magnetronului =  %

Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului  
 $A_s =$   mm  $A_f =$   mm

**Calculeaza randamentul imbunatatit**

Rezultata randamentului imbunatatit  %

**Exit**

Figura 8.6 Rezultate calculate =>  $\eta = 83,56$  %

**Randamentul magnetronului**

**Cercetari privind generarea formei constructive a magnetronului  
in vederea cresterii randamentului de conversie magnetica**

**Date de intrare:**

Tensiune anodica  $U_a =$   kV

Nr. cavitati rezonatoare  $N =$   cavitati

Diametrul catodului  $D_c =$   mm

Frecventa de lucru  2450  915 MHz

**Calculeaza randamentul**

Diametrul anodului  $D_a =$   mm

Valoarea inductiei magnetice  $B_a =$   Gs

Tensiunea anodica critica  $U_{acr} =$   kV

Inductia anodica critica  $B_{acr} =$   Gs

Randamentul magnetronului =  %

Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului  
 $A_s =$   mm  $A_f =$   mm

**Calculeaza randamentul imbunatatit**

Rezultata randamentului imbunatatit  %

**Exit**

Figura 8.7 Randamentul îmbunătățit =>  $\eta = 91,58$  %

**Randamentul magnetronului**

**Cercetari privind generarea formei constructive a magnetronului  
in vederea cresterii randamentului de conversie magnetica**

**Date de intrare:**

Tensiune anodica  $U_a =$   kV

Nr. cavitati rezonatoare  $N =$   cavitati

Diametrul catodului  $D_c =$   mm

Frecventa de lucru  
 2450 MHz  
 915 MHz

**Calculeaza randamentul**

Diametrul anodului $D_a =$	<input type="text" value="16.7"/> mm
Valoarea inducției magnetice $B_a =$	<input type="text" value="93.0787"/> Gs
Tensiunea anodica critica $U_{acr} =$	<input type="text" value="13.0572"/> kV
Inductia anodica critica $B_{acr} =$	<input type="text" value="2155.68"/> Gs
Randamentul magnetronului =	<input type="text" value="83.5683"/> %

Valoarea cimpului de toleranta pt. executia anodului  
 $A_s =$   mm  $A_f =$   mm

**Calculeaza randamentul imbunatatit**

Rezulta randamentul imbunatatit:  %

**Exit**

Figura 8.8 Rezultate finale cu diagrama

### 8.3 Contribuții personale - Avantajele utilizării programelor

Activitatea de proiectare a magnetronelor constituie un domeniu de cercetare vast pentru specialiștii în domeniu. Preocupările personale au fost orientate spre identificarea unor soluții originale în vederea realizării unui model complex care să analizeze criteriile de proiectare și execuție la fabricarea anodului și catodului ca părți componente de bază ale magnetronului. Ținând seamă și de valorile mărimilor electrice aplicate am căutat elemente de legătură care să permită îmbunătățirea randamentului de conversie magnetică.

#### Concluzii:

În urma realizării programelor de calcul și a determinărilor experimentale efectuate pe tot parcursul cercetărilor în domeniu, creșterea randamentului de conversie magnetică la magnetron este posibilă prin:



- realizarea calității suprafeței anodice la parametrii de rugozitate 0,2... 0,4  $\mu\text{m}$ ;
- execuția părții anodice pe mașini de prelucrare prin electroeroziune cu electrod filiform;
- numărul optim de cavități rezonatoare este  $N=12$ ;
- valoarea optimă a câmpului de toleranțe pentru anod este  $A_s=10 \mu\text{m}$  și  $A_i=8 \mu\text{m}$ ;

Contributii personale:

1. Realizarea unui studiu complex privind tehnologia de execuție a magnetroanelor.
2. Realizarea unei metode originale de calcul a randamentului de conversie magnetică a magnetronului – prin elaborarea unui program informatic în vederea determinării creșterii randamentului de conversie magnetică a magnetronului.
3. Realizarea unor modele pentru transpunerea ușoară în programe de calculator plecând de la aparatul matematic studiat și folosind medii specifice de programare.
4. Generarea prin simulare a diagramelor tensiune anodică randament prin crearea unor programe specifice în MatLab.
5. Posibilitatea aplicării programelor realizate în fabricarea magnetroanelor în firme de profil.

## 9 BIBLIOGRAFIE

1. \* \* \* „MATLAB High-Performance Numeric Computer and Visualisation Software Reference Guide”, The MATH WORKS, Inc. Natick Massachusetts, 1992
2. \* \* \* „Tuburi electronice pentru unde decimetrice”. Ed. Transporturilor și telecomunicațiilor, București, 1992
3. \* \* \* Documentație de pe internet
4. Olland-Merten E. L. "Tehnica vidului ", Editura Tehnică, București, 1993;
5. Albert H., Florea I. "Alimentarea cu energie electrică a întreprinderilor industriale ", Vol. I, Editura Tehnică, București, 1987;
6. Anderson, J.R. „Experimental investigation of a large signal Travelling-Wave Magnetron Theory”, În Trans. I.R.E., ED-8, New York, 1991
7. B. Pistoulet, Sovelli M. "Phisique des dispotifis electronique", Dunod, Paris, 1995;
8. Baican R. "Oscilatori și amplificatori de microunde ", Editura Academiei Române, București, 1994;
9. Baraf I., Sabac B. "Îmbunătățirea calității îmbinărilor sudate", Editura Tehnică, București, 1993;
10. Bignenet C. "Les cathodes chodes. Theorie et pratiques", Paris, Edition de la Revue d'Optique theorique et instrumentale, 1997;
11. Bîcikov, S.I. „Injenernîi metod rasciota asnovnăh parametrov I haracteistik magnetronov I platinotronov”, Radiotekhnika, nr. 6, Moscova, 1985
12. Bodea M., Silard A., Luca M. "Calculul cvasitridimensional al distribuțiilor de temperatură în circuite integrate. Cercetări în tehnologie electronică și fiabilitate ", Editura Didactică și Pedagogică, București, 1989;
13. Bucur C.M. "Metode numerice ", Editura Facla, Timișoara, 1988;
14. Buzdugan Gh. "Rezistența materialelor ", Editura Academiei Române,

- București, 1986;
15. Capson A. David,  
Decaran V. Robert  
Owens  
1987;
16. Cedighian S. *"Materiale magnetice"*, Editura Tehnică, București, 1988;
17. Collins B.G. *"Microwave Magnetrons "*, Edited by George B. Collins, New York, Toronto, London, Mc Graw - Hill Book Company, 1995
18. Collins, G.B. *„Magnetroni santimetrego diapazona”*, Izd. Sovetskoe radio, Moscova, 1985
19. Colombat D. G., Lau Y.Y. *"Maximum microwave conversion from a modulated intense relativistic electronbeam "*, Phys., Rev A 45, 1992;
20. Comșa D. *"Instalații electrotermice industriale "*, vol I și II, Editura Tehnică, București, 1986;
21. Copson D.A. *"Microwave Heating in Freeze-drying, Electronic Ovens and other Application "*, Westport, 1992;
22. Cornea C. *"Asamblări nedemontabile pentru vid înalt"*, "Al VII-lea seminar național de organe de mașini", Suceava, 1987;
23. Dascălu D., Marin N. *"Probleme ale tehnologiei dispozitivelor semiconductoare de microunde. Cercetări în tehnologie electronică și fiabilitate "*, Editura Didactică și Pedagogică București, 1982;
24. Dascălu L., ș.a. *"Bazele aşchierii și generării suprafețelor "*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981;
25. Dima, G.M,  
26. Dreucean, A,  
București 1968
27. Dreucean, A.,ș.a. *„Mașini unelte și control dimensional, Lucrări de laborator”*, Litografia Institutului Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, Partea I, 1991
28. Ernest C. Okress *"Microwave - Power Engineering"*, Academic Press,

- New York and London, 1992;
29. Etter, D.M, „*Engineering Problem Solving with MATLAB*” Pretince Hall, New Jersey, 1993
30. Felea I. "*Considerațiuni cu privire la fiabilitatea sistemelor energotehnologice*", Comunicare la al VII-lea simpozion - Siguranța în funcționare a instalațiilor energetice, 1983;
31. Felea L, Radu I. "*Fiabilitatea instalațiilor cu microunde* ", Rev. Optimum Q, vol. I, nr. I/1991;
32. Filip,P. *Aspects regarding constructing and operating the multi-cavity magnetron*; International Conference On Economic Engineering And Manufacturing Systems, Transilvania University of Brașov, 2001
33. Filip,P. *Contributions to elaborating and producing heat installations*, International Conference, Timișoara, 2001
34. Filip,P. *New technologies in the production of servovalves*; International Conference On Economic Engineering And Manufacturing Systems, Transilvania University of Brașov, 2001
35. Filip,P. *Oscillating modes and frequencies in the multi-cavity magnetron*; International Conference On Economic Engineering And Manufacturing Systems, Transilvania University of Brașov, 2001
36. Filip,P. *Study regarding the multiple cavity magnetron*, International Conference, Timișoara, 2001
37. Filip,P. *The mathematical and physical model of heat transfer in the magnetron*, International Conference, Timișoara, 2001
38. Gafițeanu M., Petrașcu V. F., Mihalache N. "*Elemente finite și de frontieră cu aplicații la calculul organelor de mașini*", Editura Tehnică, 1987;
39. Gandhi C.P. "*Microwave engineering and application*", New York, Pergamon Press, 1981;

40. Gârbea D. *"Utilizarea analizei prin elemente finite în probleme de schimb de căldură prin conducție"*, Revista transporturilor și telecomunicațiilor, 1980;
41. Gewartowski J. W.,  
Watson H. A. *"Principles of Electron Tubes. Including Grid-controlled Tubes, Microwave Tubes and Gas Tubes"*, Princeton, Van Nostrand, 1985;
42. Gherstein, G.M.,  
Vitels, G.M. *O rasşirenii kolebatelnîh zon magnetronov. În Radiotekhnika I Elektronika, Moscova, 1987*
43. Gittins J. F. *"Power Traveling Wave Tubes"*, London, English Universities Press, 1984;
44. Harvey A. F. *"Microwave Engeneerind"*, Academic Press, New York, London, 1993;
45. Haviland R. P. *"Technique de fiabilite et duree de vie des equipements"*, Eyrolles, Paris, 1996;
46. Hinkel K. *"Les magnetrons"*, Biblioteque technique Philips, 1993;
47. Iankina, A.A *K teorii staticeskogo rejima ploskogo magnetrona. În Radiotekhnika I Elektronika, 5, Moscova, 1984*
48. Iliescu D. V., Vodă V.  
Gh. *"Statistică și toleranțe"*, Editura Tehnică, București, 1987;
49. Ițhoki, A.S. *Nelineinaia radiotekhnika*, Izd Sovetskoe radio, Moscova, 1985
50. Jacomono J. M. *"Dispositifs de traitement hemogen de materiaux par des micro-ondes reemises par des antennes regroupees par paires sur des guides d'omdes - Brevet d'invention"*, Paris, 1982
51. Kalinin, V.N.,  
Gherştein, G.M.,
52. Ken Ishino, Yasuo  
Hashimito *"Dispositif absorbeur pour fuites de microondes"*, Brevet d'invention nr. 8219333, Paris, 1982.39. Lasko N.F., Lasko S. V., *Brazing and Soldering of metals. Translated from the Russian, Moscow, Mir Publishers, 1979;*
53. Kline, J. *The megatron as a negative resistance amplifier. În*

- Trans. I.R.E., ED-8, New York, 1991
54. Kovalenko, V.F. *Vvedenie v elektroniku sverhvisokih ciastot.* Izd. Sovetskoe radio, Moscova, 1985
55. Lăzărescu LD. *"Toleranțe, ajustaje, calculul cu toleranțe, calibrare "*, Editura Tehnică, București, 1984;
56. Lebedev I. *"Microwave Electronics "*, Mir Publishers, Moscow, 1984;
57. Lebedev, N.V. *„Elektronika sverhvisokih ciastot”*, Min. Visș obraz. SSSr Moskovskii Energ. Institut, 1982
58. Lewin L. *"Teory of Wave Guides. Techniques for the Solution of Waveguide Problems "*, New York, Toronto J.Wiley.1995;
59. Licea I. *"Fizica metalelor "*, Editura Științifică și Enciclopedică București, 1988;
60. Maghiar T., Jurcuț T., Radu L, Roman Șt., Moga I. *"Treceri metal ceramică folosite în tehnica microundelor: condiții, proprietăți ,si tehnologii de execuție. Progrese în fizică "*, "A XI-a sesiune anuală de comunicări științifice a ICF", Oradea, 1989;
61. Malkin,S,Guo,C, *Journal of Engineering for Industrie*, vol.118 California,U.S.A., 1996
62. Marcu Gh. *"Chimia metalelor "*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1989;
63. Marin Gh. *"Tehnica vidului și aplicații în industrie "*, Editura Tehnică, București, 1983;
64. Mașala, I, Simularea dinamicii procesului de frezare  
Construcția de Mașini, nr.6/1995
65. Megla, G. *Dezimetrewelltechnik*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1991
66. Mel M. Schwartz *"Modern Metal Joining Techniques"*, Witey Intersciens. Division of Wiley Sans, New York;
67. Metexeas, A.C., Meredith, R.J. *Industrial microwave heating.* În peter peregrinus Ltd, Londra, 1993
68. Mihoc A., Firărescu D. *"Statistică matematică"*, Editura Didactică și

- Pedagogică, București, 1986;
69. Mihoc Ghe., Muja A., Deatcu E. *"Bazele matematice ale fiabilității"*, Editura Dacia, Cluj Napoca, 1987;
70. Milliou A., Milliou C. *"Lipirea și aliaje de lipit"*, Editura Tehnică, București, 1986;
71. Minciu, C. *„Proiectarea sculelor așchietoare”*, Editura Tehnică, București, 1995
72. Mocanu C. I. *"Teoria câmpului electromagnetic"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981;
73. Negru L. D. *"Transmiterea căldurii"*, Litografia Institutului Politehnic Timișoara, 1980;
74. Nichici A., ș.a. *"Fiabilitatea în energetică"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980;
75. Nițu V. *"Fiabilitatea în energetică"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1980;
76. Nobou L, Junzo T., Hirofumi Y. *"Appareil de chauffage et microondes muni d'un dispositif d'etoucheile pour microondes"*, Brevet d'invension, nr.8019486, Paris 1980;
77. Okres, E.C., Gleason, C.H., White, R.A., Hayter, W.R. *„Design and performance of a high power pulsed magnetron”*. În Trans. I.R.E. ED-4, New York, 1987
78. Oltu A. *"Determinarea regimului termic staționar al aparatelor electronice realizate în casete paralelipedice. Cercetări în tehnologie și fiabilitate "*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983;
79. Oprean A., ș.a. *"Fiabilitatea mașinilor unelte "*, Editura Tehnică, București, 1983;
80. Oprean,C, Lăzărescu ,I. *„Teoria și practica sculelor așchietoare”*, Editura Universității din Sibiu, 1994
81. Pages A., Gauchon M. *"Fiabilite des systemes "*, Editions Eyroles, Paris, 1980;
82. Pascariu I. *"Elemente finite. Concepte aplicații "*, Editura Militară, București, 1985;
83. Pickering, A.H. *Modern trends în Magnetron Design*, În Electronic

- Tehnolog. 37, Londra 1983
84. Popa B., ș.a. *"Solicitări termice în construcția de mașini "*, Editura Tehnică, București, 1982;
85. Popa B., Theil H., Mădărășan T. - *"Schimbătoare de căldură industriale "*, Editura Tehnică, București, 1983;
86. Popa B., Vintilă C. *"Transferul de căldură în procesele industriale "*, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1985;
87. Pushner M. *"Worme durch Microwellen "*, Philips technische Bibliothek, 1984;
88. Radu I. *"Fizica defectelor care apar în funcționarea generatoarelor de microunde cu magnetron "*, Referat în cadrul tezei de doctorat
89. Robertshaw, E.G., Willshaw, W.E. *Some properties of magnetron using Spatial Harmonic Operation.* În Proc. I.E.E., 103C, Londra, 1986
90. Roznjevic K. *"Tabele și diagrame termotehnice"*, Editura Tehnică, București, 1978;
91. Rulea G. *"Tehnica frecvențelor foarte înalte "*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1991;
92. Rulea G. *"Tehnica microundelor"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1991;
93. Sandu D. D. *"Dispozitive electronice pentru microunde "*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1988;
94. Schwartz H., Schlegel H. *"Metallkiesen und glasfaserver Stärkte Kunnststoffe in der Technik"*, B.m Verl 1, Technik, 1991;
95. Sims G.D.Stephen. *"Microwave Tubes and Semiconductor Devices L "*, Glaskow, Blankie, 1993;
96. Singh., A., Vaidya, N.C. *An experimental Wide tuning Range Inverted Magnetron.* În Proc. I.R.E., 48, New York, 1990
97. Slater, J.G. *Microwave Electronics*, Van Nostrand, New York, 1990
98. Smirnov, V.I. *Curs de matematici superioare*, vol. II, Ed. Tehnică, București, 1984
99. Stetiu,C, *„Măsurări geometrice în construcția de mașini”*,



100. Suciu I. Editura științifică și enciclopedică, București, 1988  
*"Bazele calculului .solicitărilor termice ale aparatelor electrice"*, Editura Tehnică, București, 1980;
101. Șandru E., ș.a. *"Termotehnică și aparate termice "*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982;
102. Ștefănescu D., Leca A. *"Transfer de căldură ,si masă. Teorie si aplicații"*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983;
103. Tanaka L, Yamakita T., *"Microwellenofen"*, Patent, Elveția, 1982;  
Kusunoki S.
104. Tănăsescu, T. *„Manual de tuburi și circuite electronice”*, vol III, Ed. Academiei, București, 1987
105. Teodorescu C. C. *"Îmbinări sudate"*, Editura Tehnică, București, 1987;
106. Tiagunov G. A. *"Tuburi electronice"*, Editura Tehnică, București, 1991;
107. Valentin F., Banssean *"Circuit et dispositifs electroniques"*, Dunod, Paris,  
G. 1998;
108. Vaughan, J.R.M. *„A millimetre Wave magnetron”*. În Proc. I.E.E., 103C, Londra, 1995
109. Velicu, S, *„Metode de cercetare a localizării petelor de contact”*  
Construcția de Mașini, nr.6/1995
110. Voss W.A.G. *"Electrowârme Theorie und Praxis. Heransgegeben von der Union Internationale d'Electrothermie (UIE)"*, Paris, Verlag W.Girardet, Essen;
111. Welch, H.W. *„Prediction of traveling wave magnetron Frequency Characteristics: Frequency Pushing and Voltage Tuning”*. În Proc. I.R.E., 41, New York, 1993