

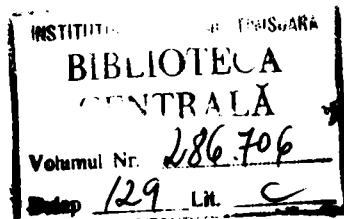
INSTITUTUL POLITEHNIC TIMIȘOARA  
FACULTATEA DE ELECTROTEHNICA

ing. IȘFANU TEODIL

STUDIUL INFLUENȚEI SATURAȚIEI, HISTEREZEI MAGNETICE  
ȘI A CURENȚILOR TURBIONARI ASUPRA FUNCȚIONĂRII BO-  
BINELOR DE STINGERE.

BIBLIOTECA CENTRALĂ  
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"  
TIMIȘOARA

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC  
Prof.dr.ing.DORDEA TOMA.



## C U P R I N S

	<u>Pagina</u>
<u>INTRODUCERE</u>	1
<u>1. CONDIȚII DE FUNCȚIONARE IN REGIM NORMAL DE EXPLOATARE SI DE AVARIE PENTRU O BOBINĂ DE STINGERE, MONTATĂ IN REȚELELE COMPENSATE.</u>	8
1.1. Rețea compensată în regim normal de exploatare.	8
1.2. Rețea compensată în regim de avarie.	17
1.2.1. Punerea la pământ a unei faze.	17
1.2.2. Întreruperea unei faze la plecarea din stația de alimentare a unei rețele compensate, deschisă la sosire.	20
1.2.3. Întreruperea unei faze la plecarea din stația de alimentare a unei rețele compensate, având conectat un transformator receptor la sosire.	29
<u>2. PARAMETRII BOBINEI DE STINGERE.</u>	33
2.1. Particularități constructive ale bobinei de stingere.	33
2.2. Scheme echivalente ale bobinei de stingere.	34
2.2.1. Schema echivalentă a unei bobine cu miez feromagnetic având dimensiunile miezului feromagnetic al bobinei de stingere, fără întrefieruri.	37
2.2.1.1. Rezistențele echivalente aferente pierderilor prin histerezis, $R_{hp}$ și $R_{hs}$ .	38
2.2.1.2. Rezistențele echivalente aferente pierderilor prin curenții turbionari, $R_{fp}$ și $R_{fs}$ .	41
2.2.1.3. Inductivitatea bobinei.	42

	Pag.
2.2.1.3.1. Bobina cu neglijarea pierderilor în miezul feromagnetic.	44
2.2.1.3.2. Bobina cu considerarea pierderilor prin histerezis.	46
2.2.1.3.3. Bobina cu considerarea pierderilor prin histerezis și curenții turbionari.	48
2.2.2. Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor echivalente $R_{hp}$ și $R_{fp}$ .	49
2.2.3. Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor echivalente $R_{hs}$ și $R_{fs}$ .	51
2.3. Concluzii privind parametrii bobinei de stingere.	52
2.4. Aproximarea analitică a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere.	53
<b>3. <u>INFLUENȚA SATURAȚIEI ASUPRA FUNCȚIONĂRII BOBINEI DE STINGERE.</u></b>	<b>56</b>
3.1. Influența saturației asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.	57
3.1.1. Rețea compensată cu o fază întreruptă la plecarea din stația de alimentare, fără punere la pământ.	57
3.1.1.1. Supratensiuni accidentale în condițiile ferorezonanței serie.	60
3.1.1.1.1. Caracteristica de magnetizarea ideală a unei bobine de stingere.	61

	Pag.
3.1.1.2. Supracurenții și supratensiunile accidentale datorite armonicilor de curent de ordin superior.	67
3.1.1.2.1. Condiții de rezonanță pentru armonicile de curent de ordin superior din curentul bobinei de stingere.	67
3.1.1.2.2. Limitarea supratensiunilor și supracurențiilor armonicilor de ordin superior din curentul bobinei de stingere prin efectul saturației magnetice (ferorezonanța).	71
3.1.2. Rețea compensată cu simplă punere la pământ.	75
3.1.2.1. Influența saturației magnetice asupra componentei reactive a curentului rezidual.	76
3.1.2.2. Influența saturației magnetice asupra armonicilor de ordin superior din curentul rezidual.	78
3.1.2.2.1. Condiții de rezonanță pentru armonicile de ordin superior din curentul bobinei de stingere.	78
3.1.2.2.2. Limitarea supratensiunilor și supracurențiilor armonicilor de ordin superior prin efectul saturației magnetice.	85

	Pag.
2.1.3. Concluzii privind influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.	86
3.2. Influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim tranzitoriu.	86
3.2.1. Caracteristicile circuitelor neliniare în regim tranzitoriu.	87
3.2.2. Regimul tranzitoriu la ruperea conductorului unei faze la plecarea din stația de alimentare.	88
3.2.3. Regimul tranzitoriu la punerea la pământ a unei faze într-o rețea compensată.	92
3.3. Influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim de supratensiuni atmosferice.	95
4. <u>INFLUENȚA HISTEREZEI MAGNETICE ASUPRA FUNCȚIONĂRII BOBINEI DE STINGERE.</u>	98
4.1. Influența pierderilor de putere activă datorită histerezei magnetice asupra funcționării bobinei de stingere.	98
4.1.1. Influența pierderilor prin histerezis în regim permanent.	98
4.1.1.1. Influența pierderilor prin histerezis asupra coeficientului de amortizare.	99
4.1.1.2. Influența pierderilor prin histerezis asupra dimensiunilor cuvei bobinei de stingere.	100
4.1.2. Influența pierderilor prin histerezis în regim tranzitoriu de funcționare.	100
4.2. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere.	101

	Pag.
4.2.1. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.	101
4.2.2. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere în regim tranzitoriu.	102
4.3. Concluzii privind influența histerezei magnetice asupra funcționării bobinei de stingere.	102
5. <u>INFLUENȚA CURENȚILOR TURBIONARI ASUPRA FUNCȚIONĂRII BOBINEI DE STINGERE.</u>	103'
5.1. Influența pierderilor de putere activă datorite curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere.	103'
5.1.1. Influența pierderilor prin curenții turbionari în regim permanent.	103'
5.1.1.1. Influența pierderilor prin curenții turbionari asupra coeficientului de amortizare.	104
5.1.1.2. Influența pierderilor prin curenții turbionari asupra dimensiunilor cuvei bobinei.	105
5.1.2. Influența pierderilor prin curenții turbionari în regim tranzitoriu de funcționare.	105
5.2. Influența curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere prin mărirea efectului ciclului de histerezis.	105
5.3. Concluzii privind influența curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere.	105

	Pag.
<b>6. <u>CONSIDERAȚII PRIVIND PROIECTAREA BOBINEI DE STINGERE ȚINÎND CONT DE INFLUENȚA SATURAȚIEI, HISTEREZEI MAG- NETICE ȘI A CURENȚILOR TURBIONARI ASUPRA FUNCȚIONĂRII EI.</u></b>	107
6.1. Concluzii pentru proiectare privind influența saturației magnetice.	108
6.2. Concluzii pentru proiectare privind histereza magnetică.	109
6.3. Concluzii pentru proiectare privind curenții turbionari.	110
<b>7. <u>PROIECTAREA, CONSTRUCTIA ȘI PROBAREA BOBINEI DE STINGERE.</u></b>	112
7.1. Realizări constructive de bobine de stingere.	112
7.1.1. Bobine de stingere cu ploturi fixe.	112
7.1.2. Bobine de stingere cu reglaj sub sar- cină.	114
7.2. Calculul electromagnetic al bobinei de stingere.	116
7.2.1. Calculul electromagnetic al bobinei de stingere plecînd de la o caracteristică de magnetizare dată.	117
7.2.2. Trasarea caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere proiectate.	123
7.3. Incercarea bobinei de stingere.	127
7.3.1. Ridicarea experimentală a caracteristicii de magnetizare.	128
7.3.2. Incercarea bobinei de stingere la func- ționarea de durată.	130
<b>8. <u>REALIZĂRI DE BOBINE DE STINGERE.</u></b>	131
8.1. Realizări de bobine de stingere cu ploturi fixe.	131
8.1.1. Bobina de stingere de 20,2 kV, cu cinci ploturi.	131
8.1.1.1. Bobine constructive de bază.	132

	Pag.
8.1.1.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.	135
8.1.2. Bobina de stingere de 20,2 kV cu trei ploturi.	138
8.1.2.1. Elemente constructive de bază.	138
8.1.2.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.	142
8.1.3. Bobina de stingere de 22,2 kV cu cinci ploturi.	145
8.1.3.1. Elemente constructive de bază.	145
8.1.3.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.	147
8.1.4. Bobina de stingere de 22,2 kV cu gase ploturi.	150
8.1.4.1. Elemente constructive de bază.	150
8.1.4.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.	150
8.2. Realizări de bobine de stingere cu reglaj continuu sub sarcină.	156
8.2.1. Elemente constructive de bază.	156
8.2.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.	163
8.3. Concluzii finale.	177
B I B L I O G R A F I E .	184



## I N T R O D U C E R E

Problema tratării neutrului, ca urmare a dezvoltării sistemelor electroenergetice, prezintă o importanță deosebită, atât din punct de vedere tehnic, cât și economic. Este o problemă complexă, cu multiple implicații privind proiectarea, construcția și exploatarea instalațiilor electroenergetice. Metodele folosite pentru tratarea neutrului influențează în mod direct asupra nivelului de izolație, mărimii și căilor de limitare a supratensiunilor, condițiilor de funcționare a întrerupătoarelor, sistemelor de protecție prin relee, stabilității funcționării în paralel a sistemelor electroenergetice, etc.

Din punctul de vedere al tratării neutrului, în corelare cu prevederile STAS 6489-67, se disting [105] :

- rețele cu neutrul izolat ;
- rețele compensate ;
- rețele cu neutrul pus la pământ, fie direct, fie printr-o rezistență sau reactanță de valoare suficient de mică.

La rețelele cu neutrul izolat, acesta nu are nici o legătură voită cu pământul, cu excepția celor realizate prin aparatele de măsură, semnalizare și protecție, având o impedanță foarte mare.

În cazul unei puneri la pământ în locul de defect apare un curent capacitiv, proporțional cu capacitatea totală a rețelei față de pământ. Dacă curentul capacitiv este mic, rețeaua poate funcționa fără întrerupere. Dacă curentul capacitiv depășește anumite valori, arcul electric în locul de defect nu se mai stinge, apar suprațensiuni, suprasolicitări termice ale echipamentului și pericolul scurtcircuitului polifazat. Rețeaua nu mai poate funcționa în asemenea condiții.

La rețelele compensate neutrul este pus la pământ prin bobină cu reactanță de o astfel de valoare, încât, în cazul punerii la

pământ a unei faze, curentul inductiv de frecvență industrială, care circulă între aceasta și locul defect, compensează în întregime sau în mare parte componenta capacitivă de frecvență industrială a curentului de defect. Curentul rezultat în locul defect este astfel limitat, încât arcul electric de punere la pământ se stinge spontan și rețeaua poate funcționa fără întrerupere [2,3,4,7,38] .

Rețelele cu neutrul pus la pământ pot avea toate punctele neutre puse la pământ, sau numai o parte din ele. În prezent este tot mai mult utilizată noțiunea de coeficient de punere la pământ, care, pentru o configurație dată a rețelei, este raportul, exprimat de regulă în procente, dintre cea mai mare tensiune efectivă de frecvență rețelei între o fază sănătoasă și pământ, în locul considerat, în timpul unor puneri la pământ pe una sau pe mai multe faze și tensiunea electrică între faze, care s-ar obține în același loc fără defect. În acest sens se definesc :

- rețele cu neutrul efectiv pus la pământ, la care coeficientul de punere la pământ nu depășește 80% ;

- rețele cu neutrul pus neefectiv la pământ, într-un loc determinat, la care coeficientul de punere la pământ depășește valoarea de 80%.

Punerea la pământ a neutrului rețelei transformă orice punere la pământ a unei faze în scurtcircuit monofazat, care conduce la funcționarea protecției și deci la deconectarea, rapidă sau temporizată, a porțiunii de rețea defectă. Arcul electric se stinge, echipamentul electric este solicitat un timp scurt la curenți mari de scurtcircuit, iar alimentarea cu energie electrică a consumatorilor se întrerupe.

Alegerea modului de tratare a neutrului este o problemă tehnico-economică importantă, a cărei rezolvare prezintă aspecte specifice pentru fiecare țară în parte. În țara noastră rețelele electrice de medie tensiune au neutrul compensat în cea mai mare parte, iar rețelele de înaltă tensiune, 110 kV și mai mult, au neutrul efectiv pus la pământ [38,92,93] .

Avantajele și dezavantajele rețelelor compensate sînt analizate în literatura de specialitate din foarte multe țări [2,3,4,5,7,19,37,38,49,51,65,80,81,85,90,92,94] .

Rețelele de medie tensiune compensate sînt răspîndite aproape în toată Europa și pătrund într-o măsură tot mai mare în multe țări ale lumii. În SUA se folosește metoda punerii efective a neutrlui la pămînt, iar în Franța tratarea lui cu rezistențe de limitare a valorii curenților de scurtcircuit monofazat.

Avantajele mai importante ale rețelelor compensate sînt:

- posibilitatea funcționării fără întreruperea alimentării consumatorilor în timpul unei puneri la pămînt monofazate, defectul cel mai frecvent, 70% - 80% din totalul acestora, soluție ideală pentru exploatare ;

- stingerea rapidă a arcului de punere la pămînt și deci prevenirea degradărilor prin efectul termic al curentului de punere la pămînt ;

- evitarea supratensiunilor prelungite ;

- evitarea supratensiunilor în liniile de telecomunicații, datorită curenților de scurtcircuit monofazat în lipsa compensării ;

- ameliorarea condițiilor de funcționare a întrerupătoarelor, cu număr de declanșări-anclanșări și puteri de rupere ;

- prevenirea defectării mantalelor de protecție ale cablurilor electrice, ca urmare a închiderii prin ele a curenților de scurtcircuit monofazat în lipsa compensării ;

- avertizarea personalului de exploatare cu privire la slăbirea izolației, prin creșterea tensiunii de deplasare a neutrlui peste valorile normale ;

- informarea personalului de exploatare cu privire la unele stări anormale apărute, conectări și deconectări nesimetrice ale echipamentului, topirea siguranțelor pe una sau două din fazele unei plecări și altele.

Dezavantajele mai importante ale unei rețele compensate sînt :

- costul mărit al izolației și al echipamentului aferent ;

- necesitatea unor măsuri suplimentare privind construcția rețelelor compensate, pentru micșorarea disimetriilor capacitive naturale.

Din cele expuse rezultă că bobina de stingere este un element constructiv al rețelelor electrice cu tendință de generalizare în instalațiile electroenergetice de medie tensiune din țara noastră. Cunoașterea fenomenelor care au loc în rețelele compensate, în exploatare normală și de avarie, în regim permanent și tranzitoriu, ca urmare a formării de circuite oscilante rezonante și ferorezonante, serie și paralel, care pot avea atât efecte favorabile, cât și nefavorabile asupra funcționării acestora, este de mare actualitate din punct de vedere tehnic și economic.

Tema își propune să adâncească teoretic și să explice practic influența saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinelor de stingere în rețelele compensate, în scopul stabilirii unor concluzii bine fundamentate privind proiectarea, construcția și exploatarea lor.

Deși problema compensării rețelelor electrice nu este nouă, totuși în literatura de specialitate nu se tratează influența factorilor de mai sus într-o formă unitară, practică și accesibilă personalului de proiectare și exploatare. Nu există o cale sigură de proiectare a unei bobine de stingere, cu o caracteristică de magnetizare dată, cu astfel să se renunțe la soluția folosită în prezent de calcul aproximativ și finalizare a construcției după mai multe probe făcute pe stand. Nu există o caracteristică de magnetizare ideală, care să îmbine într-o formă optimă avantajele și dezavantajele diverșilor factori care influențează funcționarea bobinei de stingere și care să fie valabilă pentru toată gama tensiunilor rețelelor compensate.

Tema își propune să completeze în mare măsură acest gol, cu concluzii și soluții proprii ale autorului, verificate prin executarea efectivă de astfel de bobine pentru rețelele de 6,25 și 35 kV.

#### Metode folosite în tratarea temei și contribuția autorului.

Calculul rețelelor electrice constă, în esență, în rezolvarea unor ecuații diferențiale, obținute prin aplicarea legilor și teoremelor generale și de material ale electromagnetismului. Variabila independentă e timpul, iar funcțiunile necunoscute sînt de obicei curenții din laturi. Dacă parametrii circuitului sînt constanți

circuitul e numit liniar. Dacă parametrii circuitului sînt funcțiuni date de timp, circuitul e numit parametric. Dacă parametrii circuitului depind de valorile curenților și tensiunilor din circuit, circuitul se numește neliniar.

În cazul rețelelor electrice prezența rezistoarelor, bobinelor și condensatoarelor, conectate în serie sau paralel, pot conduce la formarea de circuite electrice oscilante, rezonante sau fero-rezonante, serie sau paralel, alimentate cu tensiune sinusoidală sau nesinusoidală, periodică, în regim permanent sau tranzitoriu.

Rezolvarea circuitelor, atît timp cît sînt liniare, se face prin metoda suprapunerii efectelor, fiind valabilă teorema superpoziției. Această metodă se aplică atît în cazul tensiunilor sinusoidale, cît și în cazul tensiunilor nesinusoidale, în regim permanent și în regim tranzitoriu.

În cazul circuitelor neliniare nu există metode generale de rezolvare a lor. S-au elaborat metode analitice și grafice (grafico-analitice). Acestea folosesc caracteristicile elementelor neliniare și sînt adesea aproximative.

Metodele analitice constau din aproximarea analitică a caracteristicilor elementelor neliniare, drepte, segmente succesive de dreaptă, polinoame, mărimi sinusoidale echivalente.

Metodele grafice (grafico-analitice) se bazează pe folosirea directă a caracteristicilor în valori instantanee sau în valori efective ale elementelor neliniare. În felul acesta se determină grafic variația în timp a uneia dintre aceste două mărimi, cînd se cunoaște variația în timp a celeilalte.

În condițiile actuale de existență a calculatoarelor, metodele analitice pot conduce la rezultate care reproduc cel mai fidel realitatea fenomenelor. În studiul influenței celor trei factori enunțați, saturația magnetică, histereza magnetică și curenții turbionari, asupra funcționării bobinelor de stingere, se vor folosi în cea mai mare parte metodele analitice de cercetare.

✓ În lucrarea de față contribuțiile aduse constau în:  
• dezvoltarea teoriei schemelor echivalente ale unei bobine de stingere și stabilirea unor expresii analitice ale parametrilor acestora, astfel încît fenomenele ce au loc să poată fi vizate folosind matematica drept instrument de cercetare;

- exprimarea analitică a caracteristicii de magnetizare a unei bobine de stingere, cu și fără luarea în considerare a histerezei magnetice și a curenților turbionari ;

- exprimarea analitică, în unități relative, a caracteristicii de magnetizare ideale a unei bobine de stingere, valabilă pentru toate tipurile constructive și toate tensiunile nominale ale acesteia;

5) - folosirea saturației magnetice, ca factor funcțional de bază al unei bobine de stingere, pentru limitarea tensiunii de deplasare a neutrlui rețelelor compensate la valori voite, în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare, însoțite de formarea de circuite ferorezonante serie ;

- exprimarea analitică a valorilor fundamentalei și armonicilor de ordin superior ale curentului, cu și fără considerarea histerezei magnetice și a curenților turbionari, atunci când se cunoaște expresia analitică a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere ;

- dezvoltarea teoriei supratensiunilor și supracurenților armonicilor de curent de ordin superior din circuitele rezonante sau ferorezonante ce se formează în rețelele compensate, în regim de avarie ;

- evidențierea, pe cale grafică, a fenomenului de basculare, însoțit de creșteri în salturi ale curenților și tensiunilor, în cazul circuitelor ferorezonante, serie sau paralel, atât pentru fundamentală, cât și pentru armonicile de ordin superior ale curentului;

- exprimarea analitică a gradului de influență a pierderilor prin histerezis și curenții turbionari asupra funcționării bobinei, de stingere, atât pentru fundamentală cât și pentru armonicile de ordin superior ale curentului, prin intermediul coeficientului de amortizare ;

- conceperea și punerea la punct a unei metode originale de proiectare a unei bobine de stingere, plecându-se de la datele nominale ale acesteia, care permite obținerea unei caracteristici de magnetizare reale față de cea calculată cu abateri de ordinul a 2-5% ale curenților măsurați față de cei calculați, corespunzători tensiunii nominale;

- proiectarea și realizarea mai multor tipuri de bobine de stingere, pentru rețele cu tensiunea nominală de 6,25 și 35 kV, care confirmă valabilitatea și importanța concluziilor trase privind influența saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării lor.

Lucrarea conține opt capitole.

./.

1. CONDIȚII DE FUNCȚIONARE ÎN REGIM NORMAL DE EXPLOATARE ȘI DE AVARIE PENTRU O BOBINĂ DE STINGERE, MONTATĂ ÎN REȚELE COMPENSATE.

Prin regimul de avarie al unei rețele compensate se înțelege regimul de funcționare, în afară de scurtcircuitele bi și trifazate, cu una sau mai multe puneri la pământ pe una din faze, cu unul sau mai multe conductoare rupte, cu și fără punere la pământ, respectiv cu conectări sau deconectări a una sau a două din fazele rețelei respective.

O rețea compensată este considerată în regim normal de exploatare dacă, în timpul funcționării, nu este afectată de defectele de mai sus.

Fenomenele care apar în astfel de rețele sînt analizate în literatura de specialitate din diverse puncte de vedere [2,3,4,5,7,19,20,49,92,94]. În cele ce urmează se scot în evidență aspectele mai importante ale acestor fenomene, cu influență directă asupra funcționării bobinei de stingere.

1.1. Rețea compensată în regim normal de exploatare.

În fig.1 sînt date mai multe scheme echivalente ale rețelei compensate în regim normal de exploatare:

- schema echivalentă completă ;
- schema echivalentă redusă pentru calculul deplasării neutrului, cînd se ia drept cauză tensiunea de disimetrie ;
- schema echivalentă redusă pentru calculul deplasării neutrului, cînd se ia drept cauză curentul de dezechilibru.

În schemele de mai sus semnificația notațiilor folosite este următoarea :

- $C_1, C_2, C_3$  - capacitățile fazelor rețelei față de pământ;
- $R_{11}, R_{12}, R_{13}$  - rezistențele de izolație ale fazelor rețelei ;
- $R_0$  - rezistența corespunzătoare pierderilor de putere activă în bobină ;
- $L_B$  - inductivitatea bobinei ;
- $U_{ns}$  - tensiunea de disimetrie a rețelei ;
- $I_{ns}$  - curentul de dezechilibru al rețelei ;



$U_0$  - tensiunea de deplasare a neutrului ;

$$\left. \begin{aligned} C &= C_1 + C_2 + C_3 \\ R_1 &= R_{11} = R_{12} = R_{13} \\ \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_0} + \frac{3}{R_1} \end{aligned} \right\} (1)$$

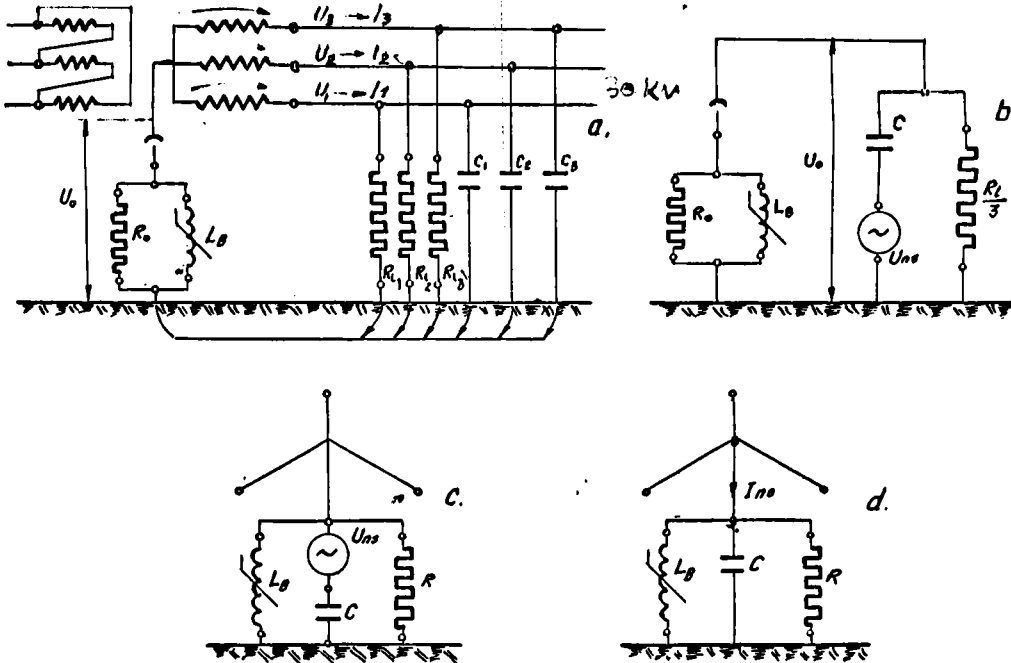


Fig.1 - Rețea compensată în regim normal de exploatare.

- a - schema echivalentă ;
- b - schema echivalentă redusă ;
- c - schema echivalentă redusă cu considerarea tensiunii de disimetrie ;
- d - schema echivalentă redusă cu considerarea curentului de dezechilibru.

Considerațiile de mai sus sînt valabile pentru rețelele de curent alternativ trifazat de medie și înaltă tensiune, cu următoarea definiție a mărimilor mai importante:

- ~~neutrul este~~ punctul de joncțiune a 3 impedanțe egale, legate în stea la cele trei faze ale sistemului. Se realizează în mod curent în punctul de joncțiune al înfășurărilor celor trei faze ale

unui transformator cu conexiunea în stea [94] ;

- tensiunea de deplasare a neutrlui este tensiunea punctului neutru față de pământ [2,3,7,9] ;

- tensiunea de disimetrie a rețelei este tensiunea de deplasare a neutrlui, la funcționarea cu el izolat, în regim de funcționare fără punere la pământ [2,3,7,9] ;

- curentul de dezechilibru al rețelei este curentul ce are loc sub acțiunea tensiunii de disimetrie într-un circuit format de suma impedanțelor fazelor și neutrlui față de pământ, în regim de funcționare fără punere la pământ [2,3] .

Din punct de vedere fizic, tensiunea de disimetrie și curentul de dezechilibru au ca geneză disimetriile capacitive ale rețelei.

În schemele echivalente de mai sus nu s-au luat în considerare curenții capacitivi aferenți capacităților dintre faze, întrucît nu intervin în fenomenele cu influență directă asupra funcționării bobinei de stingere [4,7,49] . De asemenea, într-o primă fază, se neglijează inductivitățile și rezistențele fazelor (transformator+linie), întrucît, față de măsurile de bază, valorile lor sînt relativ mici și intervin într-o mică măsură în fenomenele cu influență directă asupra funcționării bobinei de stingere [7,49] .

Considerînd tensiunea de disimetrie drept cauză a deplasării neutrlui, se observă formarea unui circuit oscilant, redat schematic în fig.2

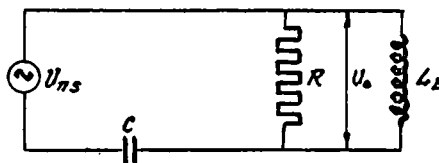


Fig.2 - Circuitul oscilant, simplificat, al rețelei compensate, în regim normal de exploatare.

Tensiunea aferentă inductivității bobinei de stingere este în același timp și tensiunea  $U_0$  de deplasare a neutrlui.

Această tensiune este dată de relația [7,49] :

$$\underline{U}_0 = \frac{\underline{U}_1 (j\omega C_1 + \frac{1}{R_{11}}) + \underline{U}_2 (j\omega C_2 + \frac{1}{R_{12}}) + \underline{U}_3 (j\omega C_3 + \frac{1}{R_{13}})}{j\omega (C_1 + C_2 + C_3) - j \frac{1}{\omega L_B} + \frac{1}{R_0} + (\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}})} \quad (2)$$

În cazul tensiunilor de fază simetrice :

$$|\underline{U}_1| = |\underline{U}_2| = |\underline{U}_3| = U_f \quad (3)$$

Ținând cont de (1) și (3), relația (2) devine:

$$\underline{U}_0 = U_f \frac{j\omega (C_1 + a^2 C_2 + a C_3)}{j\omega (C_1 + C_2 + C_3) - j \frac{1}{\omega L_B} + \frac{1}{R}} = U_f \frac{j\omega (C_1 + a^2 C_2 + a C_3)}{j(\omega C - \frac{1}{\omega L_B}) + \frac{1}{R}} \quad (4)$$

Cunoscându-se tensiunea de deplasare a neutrlui, se poate stabili gradul de deplasare a neutrlui,  $u$ , dat de relația :

$$u = \frac{U_0}{U_f} \quad \checkmark$$

avem :

$$u = \frac{U_0}{U_f} = \frac{\frac{j\omega (C_1 + a^2 C_2 + a C_3)}{j\omega (C_1 + C_2 + C_3) - j \frac{1}{\omega L_B} + \frac{1}{R}}}{\frac{j\omega (C_1 + C_2 + C_3)}{j\omega (C_1 + C_2 + C_3) - j \frac{1}{\omega L_B} + \frac{1}{R}}}} = \frac{U_0}{1 - K + jd} = \frac{u_0}{v - jd} \quad (5)$$

unde :

$u_0$  - gradul de disimetrie capacitivă a rețelei compensate;

$d$  - coeficientul de amortizare a rețelei compensate ;

$v$  - gradul de dezacord al rețelei compensate ;

$K$  - gradul de acord al rețelei compensate ,cu valorile :

$$a = e^{j \frac{2\pi}{3}}$$

$$u_0 = \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C_1 + C_2 + C_3} = \frac{C_1 + a^2 C_2 + a C_3}{C} \quad (6)$$

$$K = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2 + C_3) \omega L_B} = \frac{1}{\omega^2 C L_B} = \frac{1}{U_0 \omega C} \cdot \frac{U_0}{\omega L_B} = \frac{I_B}{I_C} \quad (7)$$

$$v = 1 - K$$

$$d = \frac{1}{R \omega (C_1 + C_2 + C_3)} \neq \left( \frac{1}{R_0} + \frac{3}{R_1} \right) \frac{1}{\omega (C_1 + C_2 + C_3)} =$$

$$\neq \frac{1}{R_0 \omega C} + \frac{3}{R_1 \omega C} = \frac{I_R}{I_C} \quad (8)$$

in care:

$I_B$  - curentul de compensare, inductiv, al bobinei de stingere,

$I_C$  - curentul capacitiv al rețelei compensate;

$I_R$  - componenta activă a curentului de punere la pământ.

Pentru rețelele compensate coeficientul de amortizare  $d$  este mai mare decât cel pentru rețelele cu neutrul izolat din cauza pierderilor active în bobinele de stingere.

Din schema echivalentă aferentă fig.1 a, rezistența  $R_0$  corespunde pierderilor de putere activă din bobina de stingere. Bobina de stingere se proiectează pentru funcționarea de durată alimentată cu o tensiune egală cu tensiunea de fază a rețelei.

Dacă  $Q_B$  este puterea bobinei de stingere, deci puterea compensată,  $P_B$  puterea activă pierdută în bobină, care reprezintă  $p\%$  din puterea compensată, atunci :

$$U_0 = U_T = I_B \omega L_B = I_{R_0} \cdot R_0 \text{ și deci :}$$

$$\frac{I_B}{I_{R_0}} = \frac{R_0}{\omega L_B} \quad (9)$$

$$\frac{Q_B}{P_B} = \frac{100}{p\%} \quad (10)$$

$$\frac{Q_B}{P_B} = \frac{I_B}{I_{R_0}} \quad (11)$$

$I_{R_0}$  este curentul ce are loc prin rezistența echivalentă  $R_0$  a pierderilor în bobină din schema echivalentă din fig.1 a, sub acțiunea tensiunii de fază  $U_F$ .

Din relațiile (9), (10) și (11) rezultă :

$$\frac{I_B}{I_{R_0}} = \frac{R_0}{\omega L_B} = \frac{100}{p\%} \quad (12)$$

de unde :

$$R_0 = \omega L_B \cdot \frac{100}{p\%} = \frac{\omega L_B}{p}$$

La bobinele de stingere de construcție obișnuită pierderile reprezintă 1,5 - 2% din puterea compensată [7,49] .

Cu aceste precizări expresia (8) a coeficientului de amortizare a rețelei compensate devine :

$$d = \frac{1}{R_0 \omega C} + \frac{3}{R_1 \omega C} = \frac{p}{\omega L_B \cdot \omega C} + \frac{3}{R_1 \omega C} = pK + d' \quad (13)$$

La un acord/la rezonanță  $K = 1$  și deci avem :

$$d = d' + p \quad (14)$$

unde  $d'$  este coeficientul de amortizare al rețelei în cazul funcționării cu neutrul izolat.

Deci coeficientul de amortizare al rețelelor compensate, dat de relația (14), este cu 1,5-2% mai mare decât cel al rețelelor cu neutrul izolat.

Din ultimul termen al relației (5) rezultă valoarea absolută a gradului de deplasare a neutrului :

$$u = \frac{u_0}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (15)$$

Valoarea tensiunii de deplasare a neutrului este dată de relația:

$$U_o = uU_f = \frac{u_o}{\sqrt{v^2+d^2}} U_f = \frac{u_o U_f}{\sqrt{v^2+d^2}} = \frac{U_{ns}}{\sqrt{v^2+d^2}} \quad (16)$$

unde:

$$U_{ns} \approx u_o U_f.$$

La rezonanță, când  $k=1$  și deci  $v = 0$ , valoarea tensiunii de deplasare a neutrului este :

$$U_o = \frac{U_{ns}}{d} = U_{ns} \frac{1C}{1R} \quad (17)$$

Cu relația (17) se calculează valoarea maximă a tensiunii de deplasare a neutrului, corespunzătoare funcționării la acord perfect, atunci când se cunoaște tensiunea de disimetrie,  $U_{ns}$ . Aceasta din urmă se poate măsura în mod direct, când rețeaua funcționează cu neutrul izolat [7,49].

În rețelele de medie tensiune coeficientul de amortizare  $d$  nu este, de regulă, mai mare decât 5%, iar gradul de disimetrie  $u_o$  al rețelelor electrice aeriene, prin construcție, este de 0,5-1,5% [2,3,7,49]. Pentru rețelele în cablu gradul de disimetrie este zero [2,3,7,49].

Rezultă că pe neutrul rețelelor compensate, în regim normal de exploatare, poate să apară o tensiune maximă avînd valoarea :

$$U_{omax} = \frac{(U_{ns})_{max}}{d_{med}} = \frac{1,5 U_f}{5} = 0,3 U_f \quad (18)$$

,deci 30% din tensiunea de fază.

Din măsurările făcute în rețelele electrice aeriene rezultă că un grad de disimetrie mai mare de 3,5% nu se întîlnește în condițiile normale de exploatare, motiv pentru care în literatura de specialitate acesta este considerat ca un caz limită teoretic [7,41,42].

În conformitate cu relațiile (5) și (6), atât gradul de disimetrie  $u_o$ , cît și gradul de deplasare a neutrului  $u$  sînt mărimi fazoriale. Locul geometric al gradului de deplasare a neutrului din

relația (5) este un cerc, care trece prin origine. Acest cerc se poate construi, pentru o disimetrie capacitivă anumită, în funcție de gradul de dezacord, dacă se dă coeficientul de amortizare, sau în funcție de coeficientul de amortizare, dacă se dă gradul de dezacord [7,49].

În fig.3 este dată construcția diagramei cercului pentru gradul de disimetrie maxim admis teoretic, provenit din disimetria capacitivă pe o fază,  $u_{01} = -0,035$ , respectiv din disimetria capacitivă pe două faze,  $u_{02} = 0,035$ . Pentru ambele cazuri coeficientul de amortizare este cel mediu admis,  $d = 0,05$ .

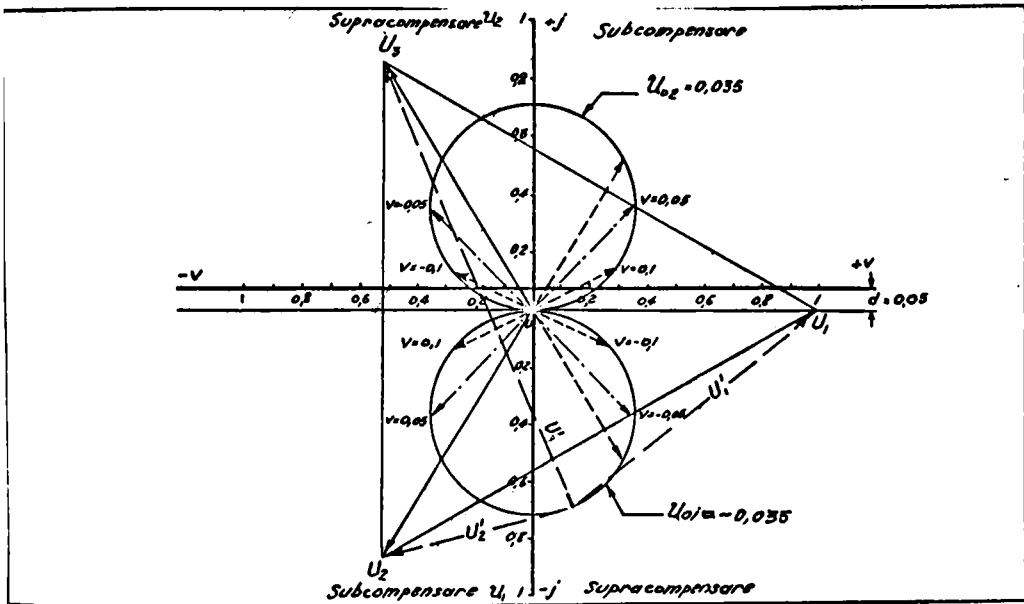


Fig.3 - Diagrama circulară a gradului de deplasare a neutrului  $u_1$ , pentru un grad de disimetrie capacitivă  $u_{01} = -0,035$  și  $u_2$ , pentru un grad de disimetrie capacitivă  $u_{02} = 0,035$ , în funcție de gradul de dezacord  $v$ , pentru un coeficient de amortizare dat,  $d = 0,05$ .

Tehnica de construcție a diagramei este dată, în literatură de specialitate [7,14,49].

Disimetria  $u_{01}$  provine din micșorarea capacității fazei 3, iar disimetria  $u_{02}$  din micșorarea simultană a capacităților fazelor 2 și 3, fig.3.

Din diagrama de mai sus se observă că oricare ar fi natura disimetriei, pe una sau pe două din faze, gradul maxim de deplasare a neutrului, egal cu diametrul cercurilor, este :

$$|u_1| = |u_2| = 0,7 \quad (19)$$

corespunzător funcționării cu acordul la rezonanță.

În aceste condiții, în regim normal de exploatare, bobina de stingere se va găsi sub acțiunea unei tensiuni de  $0,7 U_f$ , mai mică decât tensiunea nominală a acesteia.

În cazul rețelelor în cablu gradul de disimetrie capacitivă fiind zero [2,3,7,49], nu apar deplasări ale neutrului și deci, în regim normal de exploatare, bobina de stingere are la borne tensiunea zero.

În consecință, în regim normal de exploatare, pentru cazurile cele mai dezavantajoase privind coeficientul de amortizare și gradul de disimetrie capacitivă, la o compensare la rezonanță, bobina de stingere poate fi alimentată cu o tensiune ce nu depășește tensiunea nominală a acesteia.

Tabela 1.

Tensiunea kV	Tipul rețelei	Curentul de punere la pământ, A.	Pierderile %
6	rețea în cablu ordinară	20,5	9,5
30	idem	450	4,5
30	idem	2800	3,5
10	rețea aeriană	6,5	11
25	idem	3	12
25	idem	9	8
25	idem	10 - 45	10 - 14
50	idem	7	3 - 9,5
100	idem	22 - 54	3,3 - 4,75
100	idem	70	4,3



În tabela 1 se dau pierderile procentuale de putere în rețele, după Wilhelm și Waters [3], mărimi care determină valoarea coeficientului de amortizare  $d$ . Se confirmă afirmațiile făcute cu privire la valoarea medie a coeficientului de amortizare.

1.2. Rețea compensată în regim de avarie.

Sînt posibile diverse avarii într-o rețea compensată, fiecare cu aspecte specifice, cu condiții specifice de funcționare pentru bobina de stingere. În continuare, se analizează numai cazurile reprezentative de avarii.

Acestea sînt :

- punerea la pămînt a unei faze a rețelei compensate;
- întreruperea unei faze la plecare din stația de alimentare a unei rețele compensate, deschisă la sosire ;
- întreruperea unei faze la plecare din stația de alimentare a unei rețele compensate, avînd conectat un transformator receptor la sosire.

1.2.1. Punerea la pămînt a unei faze.

În fig.4 sînt date două scheme echivalente ale rețelei compensate cu simplă punere la pămînt și diagrama fazorială a curenților ce au loc.

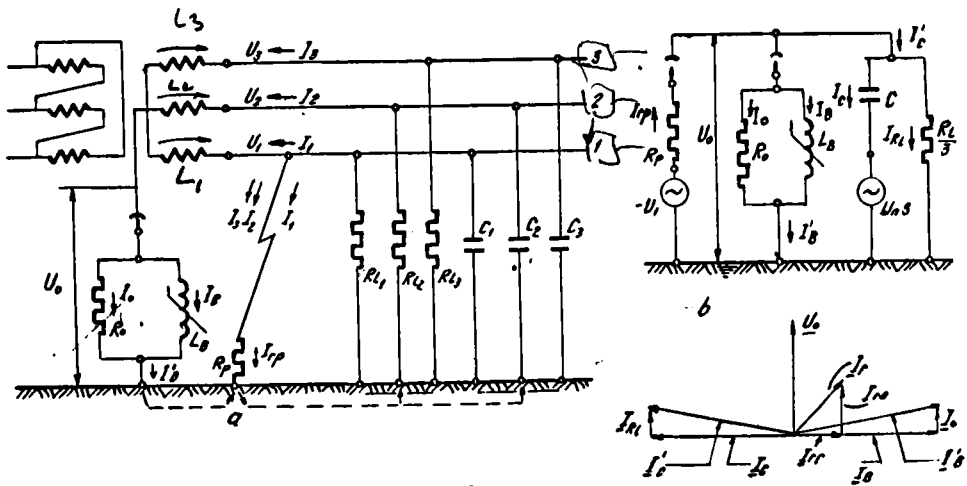


Fig. 4.

Fig. 1 - Schema rețelei compensate cu simplă punere la pământ.

- a - schema echivalentă ;
- b - schema echivalentă redusă ;
- c - diagrama fazorială a curenților totali din capacitățile rețelei și bobină,  $I'_C$  și  $I'_B$  .

Semnificația notațiilor, apărute în plus față de cele folosite pînă în prezent, este următoarea :

- $R_p$  - rezistența arcului de punere la pământ ;
- $I_{rp}$  - curentul rezidual de punere la pământ ;
- $I_r$  - curentul rezidual de frecvență industrială ;
- $I_{ra}$  - componenta activă a curentului rezidual ;
- $I_{rr}$  - componenta reactivă a curentului rezidual ;
- $I'_C$  - curentul total al capacităților față de pământ ale rețelei compensate ;
- $I'_B$  - curentul total al bobinei de stingere.

În schema echivalentă redusă de mai sus s-a neglijat inductivitatea și rezistența aferentă conductoarele liniei și inductivitatea fazelor transformatorului de formare a nulului, la care este racordată bobina de stingere.

Punerea la pământ conduce la formarea unui circuit cu rezonanță de curent, rezonanță paralel, iar dacă se ține cont de saturația miezului feromagnetic al bobinei de stingere, la fenomenul de ferorezonanță în paralel.

La rezonanță  $K = 1$ , deci :

$$\omega L_B = \frac{1}{\omega(C_1 + C_2 + C_3)} = \frac{1}{\omega C} \quad (21)$$

$L_B$  este inductanța totală a unei faze a rețelei compensate, adică inductivitatea generatorului, transformatorului la care este racordată bobina și a liniei însăși. În ipoteza că rețeaua este simetrică, avem :

$$C_2 = C_3 = \frac{C}{3}$$

Pentru ca curentul în locul de defect să fie zero, trebuie să fie satisfăcută relația :

$$\boxed{I_B + I_2 + I_3 = 0} \quad (22)$$

Pe de altă parte, curentul în faza 1 fiind zero, punctul de defect este la potențialul zero. Potențialul neutrului fiind tot timpul  $-U_1$ , pentru fazele 2 și 3 ale rețelei au loc relațiile :

$$U_2 - U_1 = j\omega L_1 I_2 - j \frac{I_2}{\omega \frac{C}{3}} \quad (23)$$

$$U_3 - U_1 = j\omega L_1 I_3 - j \frac{I_3}{\omega \frac{C}{3}} \quad (24)$$

iar pentru faza 1 :

$$-U_1 = j\omega L_B I_B \quad (25)$$

Din relațiile (23), (24) și (25) se obține :

$$\begin{aligned} -3U_1 &= j\left(\omega L_1 - \frac{3}{\omega C}\right)(I_2 + I_3) = -j\left(\omega L_1 - \frac{3}{\omega C}\right) I_B \\ &= -3j\omega L_B I_B, \end{aligned}$$

de unde :

$$\boxed{L_B = \frac{1}{\omega^2 C} - \frac{L_1}{3}} \quad (26)$$

Din relația (26) rezultă că inductivitatea bobinei de stingere  $L_B$  pentru care are loc în realitate acordul la rezonanță,  $K=1$ , diferă de cea dată de relația (21), ca urmare a influenței inductivității totale  $L_1$  a fazelor rețelei compensate [4]. În calculele obișnuite nu se ține cont de această influență [2,3,7,49].

Curentul rezidual nu poate avea niciodată valoarea zero, datorită rezistențelor ce apar în circuit și componentelor de armonice superioare [~~2,3,7,49~~]. Pînă în prezent, în practică nu s-a considerat necesar să se compenseze aceste armonici [49].

În consecință, valoarea curentului rezidual  $I_{rp}$  este dată de relația :

$$I_{rp} = \sqrt{I_{ra}^2 + I_{rr}^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2}$$

(1)  
(2)

unde :

$$n = 2K - 1$$

Din cele de mai sus se trage concluzia că în regim de funcționare cu simpla punere la pământ bobina de atingeră ca element deformant de prima categorie [14], devine sursă de armonici de ordin superior pentru curentul din circuit, care, în caz de rezonanță sau ferorezonanță, pot da naștere la supratensiune. În funcție de tensiunea neutrului pot avea loc supracurenți.

1.2.2. Întreruperea unei faze la plecarea din stația de alimentare a unei rețele compensate, deschisă la sosire.

Schema echivalentă a unei astfel de rețele este dată în fig.5.

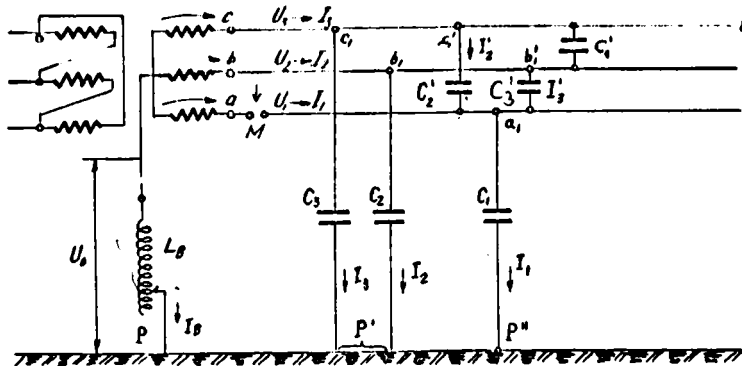


Fig.5) - Schema echivalentă a unei rețele compensate cu o fază întreruptă la plecarea din stația de alimentare, deschisă la sosire.

Semnificația notațiilor, apărute în plus față de cele folosite pînă în prezent, este următoarea :

./.

$C'_1, C'_2, C'_3$  - capacitățile între faze ale rețelei ;

$I'_1, I'_2, I'_3$  - curenții capacitivi aferenți capacităților  
între faze.

În punctul M, la plecarea din stația de alimentare, are loc o întrerupere a fazei 1, fără punere la pământ. Linia are capătul liber. În aceste condiții se distinge un circuit principal format din cele două faze 2 și 3 și capacitățile lor,  $C_2$  și  $C_3$ , în paralel, cu închidere prin pământ și bobina de stingere, iar în paralel cu acesta un circuit auxiliar, care cuprinde capacitățile  $C'_2$  și  $C'_3$  ale celor două conductoare sănătoase față de conductorul 1, în serie cu capacitatea  $C_1$ , cu închidere, de asemenea, prin pământ și bobina de stingere. Capacitatea  $C'_1$  dintre conductoarele sănătoase determină <sup>între</sup> și curenți de circulație locală, care nu influențează funcționarea bobinei de stingere [4] .

Dacă rețeaua e simetrică, avem :

$$\begin{aligned} C_1 &= C_2 = C_3 = \frac{C}{3} && ) \\ &&& ) \\ C'_2 &= C'_3 = \frac{C'}{3} \text{ , unde :} && ) \\ &&& ) \\ C &= C_1 + C_2 + C_3 && ) \\ &&& ) \\ C' &= C'_1 + C'_2 + C'_3 && ) \end{aligned} \quad (28)$$

Se neglijează rezistențele din circuitele ce se formează și se ține cont numai de inductivitatea  $L_1$ , definită la punctul 1.2.1.

Pentru aceste circuite sînt valabile relațiile :

$$\begin{aligned} j\omega L_B I_B + U_2 - j\omega L_1 (I_2 + I'_2) &= -j \frac{3}{\omega C} I_2 = -j \frac{3}{\omega C} I'_2 - j \frac{3}{\omega C} I_1 \\ j\omega L_B I_B + U_3 - j\omega L_1 (I_3 + I'_3) &= -j \frac{3}{\omega C} I_3 = -j \frac{3}{\omega C} I'_3 - j \frac{3}{\omega C} I_1 \quad (29) \\ I'_2 + I'_3 &= I_1 \\ I_B + I_1 + I_2 + I_3 &= 0 \\ U_1 + U_2 + U_3 &= 0 \end{aligned}$$

Adunând primele două ecuații și ținând cont de ultimele trei, se obține :

$$j \left[ (2L_B + L_1)\omega - \frac{3}{\omega C} \right] \underline{I}_B = \underline{U}_1 + j \frac{3}{\omega C} \underline{I}_1$$

$$\frac{\underline{I}_B + \underline{I}_1}{C} = - \frac{\underline{I}_1}{C'} - \frac{2\underline{I}_1}{C}$$

Din ultima relație rezultă :

$$\frac{\underline{I}'_1}{C} = - \underline{I}_B \frac{C'}{3C'+C} \quad (30)$$

iar din prima :

$$\underline{I}_B = \frac{-j \underline{U}_1}{(2L_B + L_1)\omega - \frac{2C'+C}{3C'+C} \frac{3}{\omega C}} \quad (31)$$

sau :

$$\underline{I}_B = -j \frac{\frac{\underline{U}_1}{2}}{\omega (L_B + \frac{L_1}{2}) - \frac{1}{\omega C_e}} \quad (32)$$

unde :

$$\frac{1}{C_e} = \frac{3}{C} - \frac{2C'+C}{3C'+C}$$

Relația (32) se interpretează în sensul că totul se petrece ca și când o tensiune electromotoare monofazată  $\frac{\underline{U}_1}{2}$  ar acționa într-un circuit cuprinzând inductivitatea bobinei de stingere  $L_B$ , mărită cu inductivitatea celor două faze în paralel  $\frac{L_1}{2}$ , în serie cu capacitatea echivalentă  $C_e$ .

Circuitul devine rezonant la frecvența fundamentală pentru valori ale inductivității bobinei de stingere care anulează numitorul relației (31). Avem :

$$\omega(2L_B + L_1) - \frac{2C'+C}{3C'+C} \cdot \frac{3}{\omega C} = 0$$

de unde :

$$L_B = \frac{3}{2\omega C} \cdot \frac{-23}{2C' + C} \cdot \frac{\omega L_1}{2} = \frac{1}{2\omega C_e} \cdot \frac{\omega L_1}{2} \quad (33)$$

Conform relației (14) bobina de stingere se dimensionează pentru o inductivitate dată de relația :

$$\omega L_B = \frac{1}{\omega C} - \frac{\omega L_1}{3}$$

Dacă se neglijează inductivitatea  $L_1$  și capacitățile  $C'$ , inductivitatea bobinei de stingere, potrivit relației (26), devine :

$$L_B = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (34)$$

iar din condiția de rezonanță (33) se obține :

$$L_B = \frac{3}{2\omega^2 C} \quad (35)$$

Se observă că inductivitatea de rezonanță dată de relația (35) este cu 50% mai mare decât inductivitatea dată de relația (34), corespunzătoare acordului la rezonanță, la funcționarea bobinei de stingere în regim normal de exploatare.

Cu simplificările făcute, neglijarea inductivității  $L_1$  și capacităților  $C'$ , schema echivalentă a rețelei cu întreruperea unei faze la plecare, fig.5, se reduce la schema echivalentă din fig.1 b, cu observația că în locul tensiunii de nesimetrie  $U_{ns}$  acționează tensiunea  $\frac{U_f}{2}$  și că rezonanța are loc la valori ale inductivității

bobinei de stingere cu 50% mai mari.

Dacă bobina de stingere este dimensionată pentru o funcționare în regim de subcompensare cu 33%, în condiții normale de exploatare, atunci, la întreruperea unei faze la plecare, rețeaua intră în regim de rezonanță, iar tensiunea de alimentare a circuitului fiind  $\frac{U_f}{2}$  are loc o deplasare mare a neutrului, singurul element de limitare, dacă nu se ia în considerare saturația miezului feromagnetic al bobinei de stingere, fiind coeficientul de amortizare dat de relația (13).

Plecînd de la aceste simplificări, unii autori [7,49], tratează problema întreruperii unei sau a două din fazele rețelei, la plecare sau la o distanță oarecare de stația de alimentare, prin prisma disimetriilor capacitive analizate în capitolul 1.

După Lihacev [7], unul din acești autori, concluziile sînt următoarele :

Gradul de disimetrie  $u_0$ , dat de relația (6), are valorile maxime :

- în cazul întreruperii unei faze la plecare :

$$u_{01} = - 0,5 ; \quad (36)$$

- în cazul întreruperii a două faze la plecare :

$$u_{02} = 1 ; \quad (37)$$

Tensiunile de disimetrie, date de relația (16), obțin valorile :

$$\left. \begin{aligned} U_{ns-1} &= u_{01} U_f = - 0,5 U_f = - 0,5 U_f \\ U_{ns-2} &= u_{02} U_f = 1 U_f = U_f \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

Noile dezacorduri sînt date de relațiile :

$$\left. \begin{aligned} v_1' &= v + K u_{01} \\ v_2' &= v - 2K u_{02} \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

unde :

$v_1'$  - noul dezacord în cazul disimetriei pe o fază ;  
 $v_2'$  - noul dezacord în cazul disimetriei pe două faze ;  
(de același ordin de mărime pentru fiecare fază)

Pentru disimetriile maxime ce pot avea loc (36) și (37), noile dezacorduri au valorile :

$$\left. \begin{aligned} v_1' &= v - 0,5.K = (1-K) - 0,5K = 1 - 1,5 K \\ v_2' &= v - 2.1.K = v - 2K = (1-K) - 2K = 1 - 3K \end{aligned} \right\} \quad (40)$$

Gradul de deplasare a neutrului, dat de relația (15), în urma modificării dezacordului, devine :

$$u_{1,2} = \frac{u_{01,2}}{\sqrt{d^2 + (v_{1,2}')^2}} \quad (41)$$



Fie  $m$  schimbarea relativă a capacităților. Avem:

$$\left. \begin{aligned} m_2 &= \frac{C_2}{C_1} \\ m_3 &= \frac{C_3}{C_1} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Dacă se schimbă capacitatea numai a unei faze, ceea ce corespunde cu intreruperea unei faze la plecarea sau la o distanță oarecare de stația de alimentare, avem :

$$C_2 = C_1 \text{ și } C_3 \neq C_1$$

și deci :

$$\begin{aligned} m_2 &= 1 \\ m_3 &= \frac{C_3}{C_1} = m \end{aligned}$$

Dacă se schimbă capacitatea a două faze, în aceeași măsură pe fiecare din ele, ceea ce corespunde cu intreruperea a două faze la plecarea sau la aceeași distanță de stația de alimentare, avem:

$$C_2 = C_3 \neq C_1$$

și deci:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{C_3}{C_1}$$

sau:

$$m_2 = m_3 = m \quad (44)$$

În fig.6 sînt date curbele de variație a gradului de deplasare a neutrlui în funcție de schimbarea relativă a capacităților fazelor  $m$ , pentru rețelele compensate, care în condiții normale de exploatare au funcționat în regim de acord la rezonanță sau supra-compensare, cu un coeficient de amortizare  $d = 5\%$  [7] .

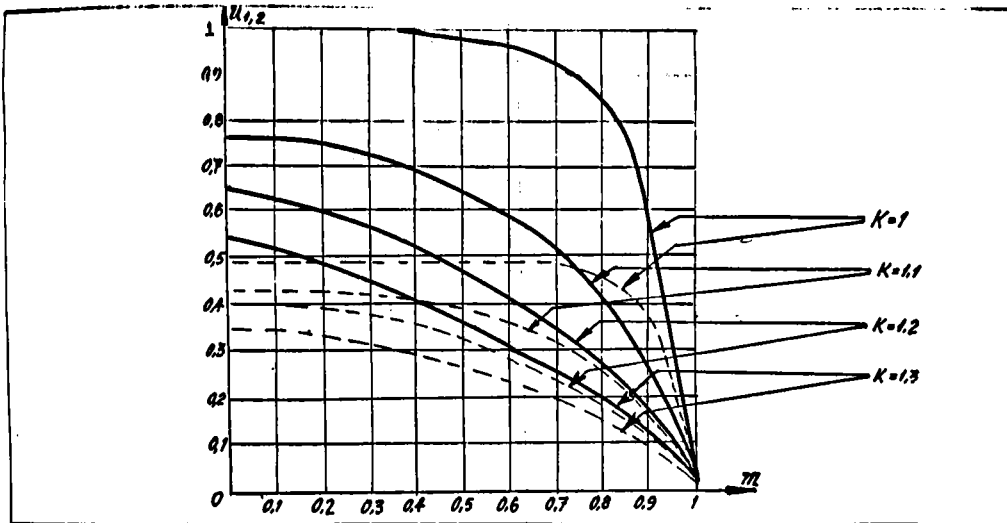


Fig.6 - Gradul de deplasare a neutrului in functie de schimbarea relativă a capacităților  $m$  ( $K \geq 1$ )

— deconectări pe o fază ;  
- - - deconectări, la aceeași distanță, pe două faze.

Din analiza acestor curbe se observă că cea mai mare deplasare a neutrului apare la deconectarea unei faze,  $m = 0$ , în cazul când rețeaua în condițiile normale de exploatare a funcționat în regim de acord la rezonanță. Dacă inițial s-a funcționat în regim de supra-compensare mai mare, deplasarea neutrului este mai mică.

Deconectarea a două faze conduce la deplasări mai mici ale neutrului, întrucât dezacordul crește mai repede și îndepărtarea de rezonanță se face într-o măsură mai mare decât în cazul deconectării unei singure faze, pentru același  $m$ .

Oricare ar fi disimetria capacitivă, pe una sau pe două faze, noul dezacord care se stabilește nu conduce la deplasări ale neutrului mai mari decât tensiunea de fază  $U_F$ , dacă înainte de avarie rețeaua compensată a funcționat în regim de acord la rezonanță sau supra-compensare.

In fig.7 sînt date curbele de variație a gradului de deplasare a neutrului în funcție de aceeași variabilă  $m$ , pentru rețele compensate, care în condiții normale de exploatare au funcționat în regim de subcompensare, cu un coeficient de amortizare  $d = 5\%$  [7].

Prin comparație cu curbele precedente, la acestea se observă un maxim pentru grade inițiale de acord  $0,7 < K < 1$ , ceea ce confirmă caracterul lor de curbe de rezonanță. Deci, funcționîndu-se în condiții normale de exploatare în regim de subcompensare, la deconectarea parțială sau totală a uneia sau două din fazele rețelei, se ajunge la funcționarea cu acord la rezonanță.

Din aceleași curbe se observă că gradul de deplasare a neutrului poate atinge valori mari, 8 și chiar mai mult, deci teoretic bobina de stingere poate fi supusă acțiunii unei tensiuni, de frecvența fundamentalei, de pînă la 8 ori mai mare decît tensiunea de fază a rețelei, sau chiar mai mult, dacă coeficientul de amortizare  $d$  este mai mic de 5%, pentru care s-au trasat curbele de mai sus.

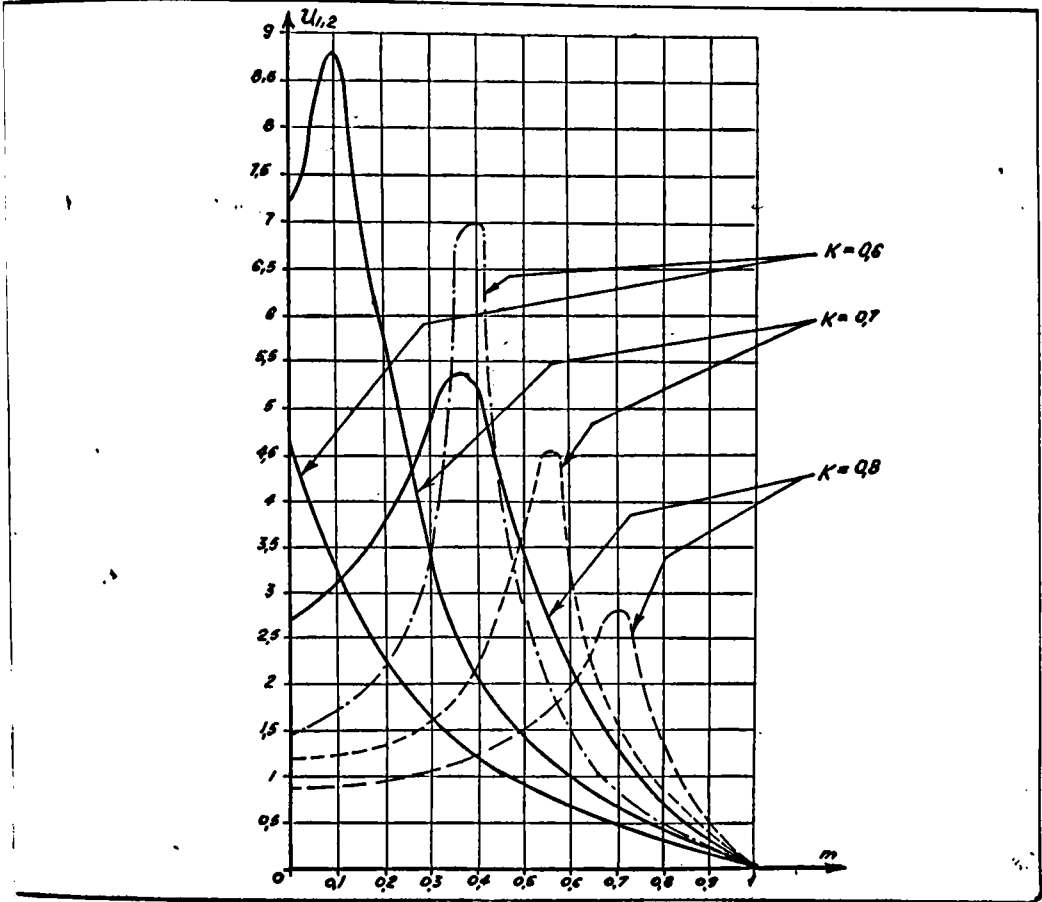


Fig.7 - Gradul de deplasare a neutrului în funcție de schimbarea relativă a capacității fazelor  $m$ ,  $K < 1$ .

— deconectări pe o fază ;

- - - deconectări, la aceeași distanță, pe două faze.

Min cele de mai sus se trage concluzia că în regim de funcționare cu întreruperea unei sau a două din fazele rețelei compensate bobina de stingere poate fi pusă sub acțiunea unei tensiuni care, în anumite condiții, depășește cu mult tensiunea pe fază a acesteia. Bete una din solicitările electrice cele mai mari, ale cărei efecte distructive trebuie să fie prevenite prin măsuri de exploatare și de construcție a bobinei de stingere.

1.2.3. Intreruperea unei faze la plecure din statia de alimentare a unei retele compensate,avind conectat un transformator receptor la sosire.

Schema echivalentă a unui astfel de rețele este dată

in fig.8.

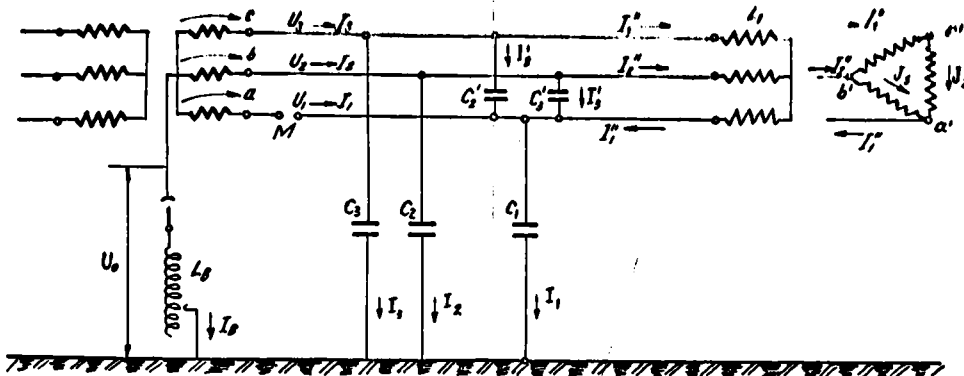


Fig.8 - Schema rețelei compensate cu o fază intreruptă la plecure,avind conectat un transformator receptor la sosire.

Semnificația notațiilor,apărute in plus față de cele folosite pînă in prezent,este următoarea :

$I_1'', I_2'', I_3''$  - curenții din înfășurarea primară a transformatorului receptor ;

$J_1, J_2, J_3$  - curenții din înfășurarea secundară a transformatorului receptor ;

$L_1$  - inductivitatea unei faze primare a transformatorului receptor.

Se presupune că transformatorul receptor este cu fluxuri libere și că are înfășurările primare conectate in stea. Transformatorul funcționează in gol.Față de cazul precedent, tratat la punctul 1.2.2., fig.5, mai apare un circuit, in care se stabilesc curenții  $I_1'', I_2''$  și  $I_3''$ . Curentul  $I_1''$  se însușează cu curenții  $I_2''$  și  $I_3''$

Se neglijează rezistențele din circuitele ce se formează.

Pentru circuitele date sînt valabile relațiile:

$$j\omega L_B I_B + U_2 - j\omega L_1 (I_2 + I_3' + I_2'') = -j \frac{3}{\omega C} I_2 =$$

$$-j \frac{3}{\omega C} I_2' - j \frac{3}{\omega C} I_1 = j\omega L_1 I_2'' + j\omega L_1 I_1'' - j \frac{3}{\omega C} I_1 \quad (47)$$

$$j\omega L_B I_B + U_3 - j\omega L_1 (I_3 + I_2' + I_3'') = -j \frac{3}{\omega C} I_3 =$$

$$= -j \frac{3}{\omega C} I_2' - j \frac{3}{\omega C} I_1 =$$

$$j\omega L_1 I_3'' + j L_1 \omega I_1'' - j \frac{3}{\omega C} I_1 \quad (48)$$

$$I_B + I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (49)$$

$$I_1'' = I_2'' + I_3'' \quad (50)$$

$$I_1 = I_2' + I_3' + I_1'' \quad (51)$$

$$U_1 + U_2 + U_3 = 0 \quad (52)$$

Din ultimele cinci relații rezultă:

$$\left. \begin{aligned} j \left[ (2L_B + L_1)\omega - \frac{3}{\omega C} \right] I_B - U_1 &= j \frac{3}{\omega C} I_1 \\ \frac{1}{C} (I_B + I_1) &= - \frac{I_1 - I_1''}{C} - \frac{2I_1}{C} \\ - \frac{1}{\omega C} (I_1 - I_1'') &= \omega L_1 I_1'' \end{aligned} \right\} \quad (53)$$

Intrucît  $I_1 - I_1'' = I_1'$ , ultima relație (53) conduce la

$$\frac{I_1''}{I_1'} = - \frac{1}{\omega^2 L_1 C} \quad (54)$$

Din relațiile (53) rezultă :

$$I_1 = - \frac{I_B}{3} \frac{1 - \omega^2 L_1 C'}{1 - \omega^2 L_1 (C' + \frac{C}{3})}$$

sau:

$$\begin{aligned} \frac{I_B}{3} &= -j \frac{U_1}{\omega(2L_B + L_1) - \frac{1}{\omega C} \frac{2 - \omega^2 L_1 (2C' + C)}{1 - \frac{\omega^2 L_1}{3} (3C' + C)}} = \\ &= -j \frac{\frac{U_1}{2}}{\omega(L_B + \frac{L_1}{2}) - \frac{1}{\omega C_e}} \end{aligned} \quad (55)$$

unde:

$$\frac{1}{C_e} = \frac{1}{C} \frac{2 - \omega^2 L_1 (2C' + C)}{1 - \frac{\omega^2 L_1}{3} (3C' + C)} \quad (56)$$

Deci rețeaua se comportă ca și când o tensiune electromotoare  $\frac{U_1}{2}$  ar acționa într-un circuit având în serie o inductivitate  $(L_B + \frac{L_1}{2})$  și o capacitate  $C_e$ .

Rezonanța bobinei de stingere se obține pentru valori ale inductivității  $L_B$  care anulează numitorul relației (55). Avem :

$$\omega L_B = \frac{1}{\omega C} \cdot \frac{1 - 0,5 \omega^2 L_1 (2C' + C)}{1 - \frac{\omega^2 L_1}{3} (3C' + C)} = \frac{\omega L_1}{2} \quad (57)$$

Dacă se neglijează inductivitatea  $L_1$  și capacitățile  $C'$ , inductivitatea de rezonanță a bobinei de stingere din circuitul de mai sus devine :

$$L_B = \frac{1}{\omega^2 C} \frac{3 - 1,5 \omega^2 L_1 C}{3 - \omega^2 L_1 C} \quad (58)$$

Inductivitatea de rezonanță a bobinei de stingere la funcționarea în regim normal de exploatare, dată de relația (26), devine prin neglijearea inductivității  $L_1$ :

$$L_B = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (59)$$

Din compararea relațiilor (58) și (59) rezultă că inductivitatea de rezonanță a bobinei de stingere la funcționarea rețelei cu un conductor întrerupt la plecarea, având răcordat un transformator receptor la sosire, este mai mică decât inductivitatea de rezonanță corespunzătoare funcționării acesteia în regim normal de exploatare.

Dacă neglijăm inductivitatea  $L_1$  a transformatorului receptor, relația (58) devine :

$$L_B = \frac{1}{\omega^2 C} \quad (60)$$

Deci circuitul cu un astfel de defect are inductivitatea de rezonanță a bobinei de stingere egală cu cea corespunzătoare funcționării în regim normal de exploatare, iar studiul comportării circuitului se poate face plecând de la disimetriile capacitive, așa cum s-a arătat la punctul 1.2.2. [7].

În acest caz, cu simplificările făcute, este valabilă concluzia de la sfârșitul punctului 1.2.2.

Condițiile de funcționare ale bobinei de stingere analizate în acest capitol sînt specifice regimului forțat de funcționare, cînd se face alimentarea ei cu o tensiune de o anumită frecvență, egală sau diferită de frecvența industrială, care coincide cu frecvența armonicii fundamentale.

Aceste concluzii se folosesc la studiul influenței saturației, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere.



## 4. PARAMETRII BOBINEI DE STINGERE

Studiul circuitelor electrice filiforme în regim cvasistaționar arată că fiecare latură a unui asemenea circuit poate fi privită ca o asociație de elemente de circuit ideale sau pure, rezistențe, bobine, condensatoare etc., fiecare element fiind caracterizabil prin câte un singur parametru de circuit - rezistență, inductivitate și capacitate. Elementele reale de circuit au proprietăți complexe, care nu sînt caracterizabile printr-un singur parametru. În măsura în care circuitul e filiform și regimul e cvasistaționar, se poate găsi o schemă echivalentă, alcătuită din elemente ideale de circuit, care să conducă la aceleași ecuații ca și în cazul elementelor reale.

Bobina de stingere este un element complex de circuit și este avantajos să se stabilească pentru ea o schemă echivalentă, formată din elemente ideale sau idealizate, care să permită studiul influenței saturației, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării ei, folosind ca instrument matematic.

### 2.1. Particularități constructive ale bobinei de stingere

În fig. 10 este dată o secțiune printr-o bobină de stingere cu pleturi fixe și întrefieruri repartizate pe cele două coloane.

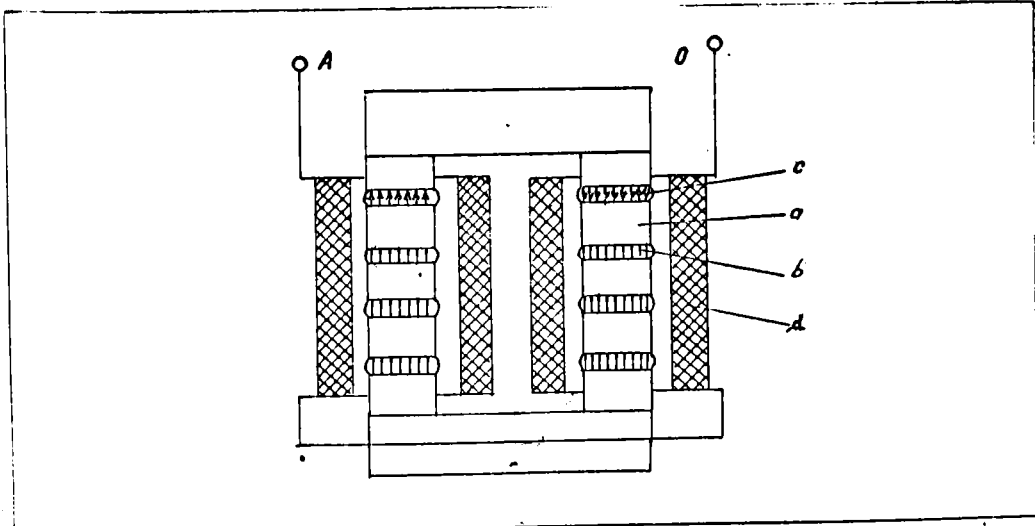


Fig. 10 - Bobină de stingere cu pleturi fixe.

a. pachet de tole; b. - întrefier; c - flux marginal; d - înfășurarea de bază.

Bebinele de stingere funcționează în principiu ca și reactoarele liniare, de care se deosebesc prin aceea că reactanța inductivă este sensibil mai mare, iar caracteristica tensiune-curent în general nu mai este liniară pentru tensiuni mai mari decât cea nominală. Asigurarea unei anumite forme a caracteristicii tensiune-curent a unei bobine de stingere, cât mai apropiată de cea stabilită teoretic ca ideală, este realizabilă prin folosirea unui miez feromagnetic cu întrefieruri, de regulă repartizate pe înălțimea celeanelor, așa cum se vede în fig. 46.

Un singur întrefier are urmări nedorite, determinând un flux marginal important și prin urmare încălziri locale de stingere cu pleturi fixe, întrefierul se divizează și se repartizează pe înălțimea celeanelor, în porțiunea aferentă înfășurării de bază. Celeanele se execută din pachete de tele, care se separă cu garnituri solide din hirtie impregnată cu bachelită sau din carton electrotehnic acoperit cu lac. Aceste garnituri ocupă spațiul întrefierurilor. Celeanele astfel pregătite și jugurile executate tot din tele, se string cu ajutorul unor buleane nemagnetice. Prin această construcție se micșorează pendera fluxului marginal și scade timpul funcționării. Practic nu se folosesc întrefieruri mai mari de 25 mm, iar în unele țări [2,3] lungimile pachetelor de tele sînt standardizate (31,8, 38,1; 76,2; 101,6 mm).

În cazul bobinei de stingere cu reglaj continuu sub sarcină, se practică cel puțin două întrefieruri, reglabile în funcție de mărimea curentului.

#### 2.2. Scheme echivalente ale bobinei de stingere.

În fig. 47 este dată o secțiune printr-una din celeanele bobinei de stingere, în dreptul unui întrefier, cu evidențierea fluxurilor ce au loc.

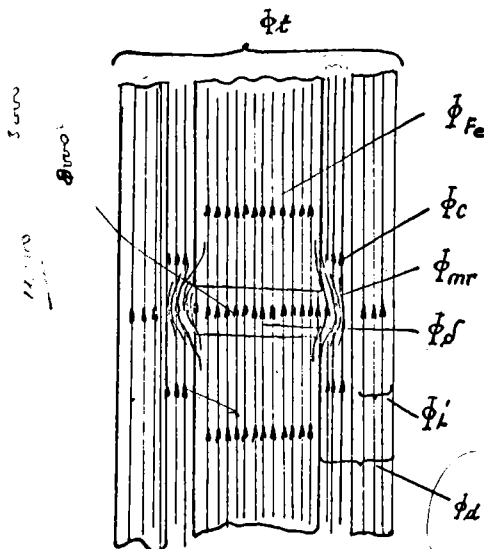


Fig.11 - Fluxurile magnetice dintr-o bebină de stingere  
Semnificația notațiilor din figura de mai sus este

următoarea:

- $\Phi_t$  - fluxul fascicular total al bebinei ;
- $\Phi_c$  - fluxul fascicular care are loc în spațiul dintre coloana miezului magnetic și diametrul interior al înfășurării ;
- $\Phi_i$  - fluxul fascicular care are loc prin înfășurare, deci în spațiul cuprins între diametrul interior și cel exterior al acesteia ;
- $\Phi_{mr}$  - fluxul fascicular care are loc între marginile pachetelor de tele învecinate, numit în mod curent flux marginal ;
- $\Phi_s$  - fluxul fascicular din întrefier ;
- $\Phi_{Fe}$  - fluxul fascicular prin miezul feromagnetic ;
- $\Phi_d$  - fluxul fascicular prin înfășurare și aer.

Între fluxurile de mai sus sînt valabile următoarele relații :

$$\begin{aligned}
 \Phi_{Fe} &= \Phi_{\delta} + \Phi_{mr} & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} & (15) \\
 \Phi_d &= \Phi_e + \Phi_i & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} & (16) \\
 \Phi_t &= \Phi_{\delta} + \Phi_{mr} + \Phi_e + \Phi_i = \Phi_{Fe} + \Phi_d & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} & 
 \end{aligned}$$

Cele 4 fluxuri parțiale,  $\Phi_e$ ,  $\Phi_i$ ,  $\Phi_{mr}$  și  $\Phi_{\delta}$ , au fost grupate în două și anume :

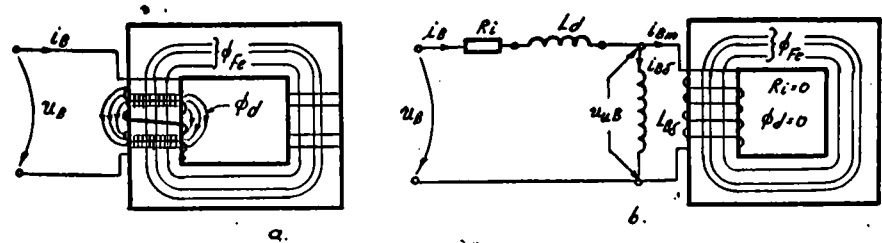
- fluxul  $\Phi_{Fe}$ , corespunzător fluxului din bobina nu miez feromagnetic numit flux util [14] ;
- fluxul  $\Phi_d$ , corespunzător fluxului din bobina cu miez feromagnetic numit flux de dispersie.

Aceste denumiri sînt însă numai formale.

Fluxul  $\Phi_{Fe}$  poate fi considerat ca aparținînd la două bobine în paralel, avînd același număr de spire și anume :

- e bobină cu miez feromagnetic avînd dimensiunile miezului feromagnetic al bobinei de stingere fără întrefieruri ;
- e bobină fără miez feromagnetic cu lungimea circuitului egală cu suma grosimilor întrefierurilor.

În fig. 12 este dată schema bobinei de stingere și schema echivalentă în conformitate cu precizările de mai sus.



**Fig.12** - Bobina de stingere dată schematic.  
 a - schema reală ;  
 b - schema echivalentă.

În schema echivalentă de mai sus  $L_d$  este inductivitatea de dispersie corespunzătoare fluxului  $\Phi_d$ , iar  $L_{Df}$  este inductivitatea bobinei fără miez feromagnetic avînd lungimea circuitului egală cu suma grosimilor întrefierurilor.

Se precizează că fluxul magnetic fascicular al bobinei fără miez feromagnetic este egal cu cel al bobinei cu miez feromagnetic.

În schema de mai sus mărimile  $R_i, L_d$  și  $L_{Df}$  pentru o bobină de stingere dată se pot calcula folosind relațiile cunoscute din electrotehnică [2,3,14] .

2.2.1. Schema echivalentă a unei bobine cu miez feromagnetic avînd dimensiunile miezului feromagnetic al bobinei de stingere, fără întrefieruri.

În cele ce urmează se consideră reprezentarea schematică prin elemente de circuit ideale, rezistoare și bobine, caracterizate prin parametrii aferenți, rezistențe și inductivități. În regimul cvasistaționar capacităților electrice ale spirelor între ele și față de pămînt se pot neglija [2,14,25] .

În fig.13 este dată schema bobinei cu miez feromagnetic, fără întrefieruri și rezistența electrică a înfășurării, inclusiv schemele echivalente în concepția de mai sus.

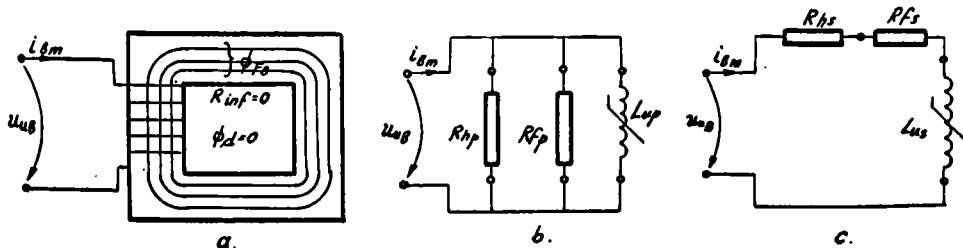


Fig.13 - Bobina cu miez feromagnetic, fără întrefieruri.

b - schema echivalentă paralel ;

c - schema echivalentă serie.

In schemele echivalente de mai sus semnificatia notatiilor folosite este urmatoarea :

$R_{hp}$ ,  $R_{hs}$  - rezistențele echivalente, paralel și serie, aferente pierderilor prin histerezis ;

$R_{fp}$ ,  $R_{fs}$  - rezistențele echivalente, paralel și serie, aferente pierderilor prin curenți turbionari ;

$L_{up}$ ,  $L_{us}$  - inductivitățile, paralel și serie, ale bobinei cu miez feromagnetic, fără întrefieruri.

2.2.1.1. Rezistențele echivalente aferente pierderilor prin histerezis,  $R_{hp}$  și  $R_{hs}$ .

Pierderile prin histerezis sînt cunoscute și analizate fenomenologic în literatura de specialitate [12,14,15] .

Pentru circuitele magnetice omogene, cum este cazul bobinei din fig.13 a, aceste pierderi sînt date de expresia [12,14] :

$$P_h = f \cdot \eta B_{max}^n V \quad (62)$$

unde:

$P_h$  - pierderile în miezul feromagnetic al bobinei ;  
 $f$  - frecvența tensiunii de alimentare ;

$B_{max}$  - valoarea maximă a inducției din miezul feromagnetic ;

$\eta$  - un coeficient al formulei empirice a lui Steinmetz ;

$n$  - exponent,  $1,6 < n < 2$  ;

$V$  - volumul miezului feromagnetic.

Pe de altă parte, în cazul unei tensiuni sinusoidale de alimentare, pierderile prin rezistența echivalentă  $R_{hp}$ , fig. 13 b, sînt date de relația :

$$P_h = \frac{U_{uB}^2}{R_{hp}}$$

și deci:

$$R_{hp} = \frac{U_{uB}^2}{P_h} = \frac{U_{uB}^2}{f \eta B_{max}^n V} = \frac{U_{uB}^2}{bf \left(\frac{U_{uB}}{cf}\right)^n} =$$

$$= b^{-1} c^n U_{uB}^{2-n} f^{n-1} = a' U_{uB}^{2-n} f^{n-1} \quad (63)$$

unde:

$$b = \eta V ;$$

$$c = \frac{U_{uB}}{f B_{max}} ;$$

$$a' = b^{-1} c^n.$$

Dacă  $n = 2$ , relația (63) devine:

$$R_{hp} = b^{-1} cf = af \quad (64)$$

unde:

$$a = b^{-1} c$$

Pentru o armonică de ordinul  $v$  avem :

$$R_{vhp} = b^{-1} cvf = a.v.f. \quad (65)$$

iar pierderile de putere prin histeresis pentru o armonică earecare  $v$  devin :

$$P_{vh} = \frac{U_{vuB}^2}{R_{vhp}} = \frac{U_{vuB}}{a.v.f} \quad (66)$$

Deci pentru o tensiune dată pierderile de putere prin histeresis sînt invers proporționale cu frecvența, iar rezistența paralelă aferentă acestora este direct proporțională cu frecvența.

Pentru un  $n$  earecare, mai mic decît 2, exponenții  $2-n$  și  $n-1$  sînt subunitari, iar relația (63) devine ( $1 < n < 2$ ) :

$$R_{hp} = b^{-1} c^n \frac{1}{f^{2-n}} U_{uB} \frac{1}{f^{n-1}} = a' \frac{1}{f^{2-n}} U_{uB} \frac{1}{f^{n-1}} \quad (67)$$

În schemele echivalente se folosesc pentru  $R_{hp}$  expresiile (64) și (65). Această rezistență este un element neliniar, fiind funcție de valoarea fluxului.

Dacă curentul este sinusoidal, pierderile prin rezistența

echivalentă  $R_{hs}$ , fig. 13 c, sînt date de relația :

$$R_h = I_{uB}^2 R_{hs}$$

și deci :

$$\begin{aligned} R_{hs} &= \frac{P_h}{I_{uB}^2} = \frac{f \cdot \gamma \cdot B_{max}^n \cdot V}{I_{uB}^2} = \frac{f \cdot \gamma \cdot B_{max}^n \cdot V}{c'^2 \cdot B_{max}^2} = \\ &= b \cdot c'^{-2} \cdot f \cdot B_{max}^{n-2} = b_0 \cdot f \cdot B_{max}^{n-2} \end{aligned} \quad (68)$$

unde :

$$b = \gamma V$$

$$c' = \frac{I_{uB}}{B_{max}}$$

$$bc'^{-2} = b_0$$

Dacă  $n = 2$ , relația (68) devine :

$$R_{hs} = bc'^{-2} f = b_0 f \quad (69)$$

Pentru o armonică de ordinul  $v$  avem :

$$R_{vhs} = bc'^{-2} v f = b_0 v f \quad (70)$$

Pierderile de putere prin histerezis pentru o armonică oarecare  $v$  de vin :

$$P_{vh} = I_{vuB}^2 R_{vhs} = I_{vuB}^2 \cdot b_0 \cdot v \cdot f \quad (71)$$

Deci, pentru un curent dat prin bobină, ceea ce corespunde unei inducții magnetice date, pierderile de putere prin histerezis și rezistența echivalentă serie aferentă acestora sînt direct proporționale cu frecvența. Relațiile (69) și (70) sînt valabile pentru  $n=2$ . Pentru un  $n$  oarecare, mai mic decît 2,  $1 < n < 2$ , exponentul  $n - 2$  devine subunitar și negativ și deci relația (68) devine :

$$R_{hs} = bc'^{-2} f \frac{1}{\sqrt[2-n]{B_{max}}} = \frac{b_0 f}{\sqrt[2-n]{B_{max}}} \quad (72)$$

./.



In schemele echivalente se folosesc pentru  $R_{ms}$  expresiile (69) și (70).

2.2.1.2. Rezistențele echivalente aferente pierderilor prin curenții turbionari,  $R_{fp}$  și  $R_{fs}$ .

Pentru circuitele magnetice omogene, cum este cazul bobinei din fig.13 a, aceste pierderi sînt date de expresia [12,14]

$$P_f = \frac{K_f^2}{\rho} \cdot \Delta^2 \cdot f^2 B_{max}^2 V \quad (73)$$

unde:

- $P_f$  - pierderile în miezul feromagnetic al bobinei ;
- $\Delta$  - grosimea tolei feromagnetice ;
- $f$  - frecvența tensiunii de alimentare ;
- $B_{max}$  - valoarea maximă a inducției din miezul feromagnetic ;
- $V$  - volumul miezului feromagnetic ;
- $K_f$  - un coeficient (factorul de feră al tensiunii unități de măsură).

Pierderile prin rezistența echivalentă  $R_{fp}$ , fig.13 b, sînt date de relația :

$$P_f = \frac{U_{uB}^2}{R_{fp}} \quad \begin{matrix} 21 \\ (74) \end{matrix}$$

și deci:

$$\begin{aligned} R_{fp} &= \frac{U_{uB}^2}{P_f} = \frac{U_{uB}^2}{\frac{K_f^2}{\rho} \cdot \Delta^2 \cdot f^2 B_{max}^2 V} = \\ &= \frac{U_{uB}^2}{\Delta^{-1} \cdot f^2 \cdot \left(\frac{U_{uB}}{\sigma f}\right)^2} = \sigma^2 d \quad \begin{matrix} 22 \\ (75) \end{matrix} \end{aligned}$$

unde:

$$d = \frac{\rho}{K_f^2 \Delta^2 V} ;$$

$$\sigma = \frac{U_{uB}}{f \cdot B_{max}}$$

Deci pentru o tensiune dată, rezistența echivalentă paralel și pierderile de putere prin curenții turbionari sînt constante și independente de frecvență.

Pierderile prin rezistența echivalentă serie  $R_{rs}$ , fig.13 c, sînt date de relația :

$$P_r = R_{rs} \cdot I_{uB}^2 \quad (23)$$

și deci:

$$R_{rs} = \frac{P_r}{I_{uB}^2} = \frac{k_f \Delta^2 \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 V}{I_{uB}^2} =$$

$$\frac{k_f \Delta^2 \cdot f^2 \cdot B_{max}^2 V}{c' \cdot B_{max}^2} = d^{-1} \cdot c' \cdot f^2 \quad (24)$$

unde:

$$d = \frac{\rho}{k_f^2 \Delta^2 V} ;$$

$$c' = \frac{I_{uB}}{B_{max}} .$$

Notînd cu :

$$a_0 = d^{-1} \cdot c' \cdot f^2$$

se obține:

$$R_{rs} = a_0 f^2 \quad (25)$$

iar pentru o frecvență oarecare  $v$  se obține:

$$R_{vrs} = a_0 (vf)^2 = a_0 v^2 \cdot f^2 \quad (26)$$

### 2.2.1.3. Inductivitatea bobinei

Pentru o bobină cu miez feromagnetic, caracteristica flux-curent,  $\psi = f(i)$  în regim periodic este o curbă închisă, așa

cum rezultă din figura 14.

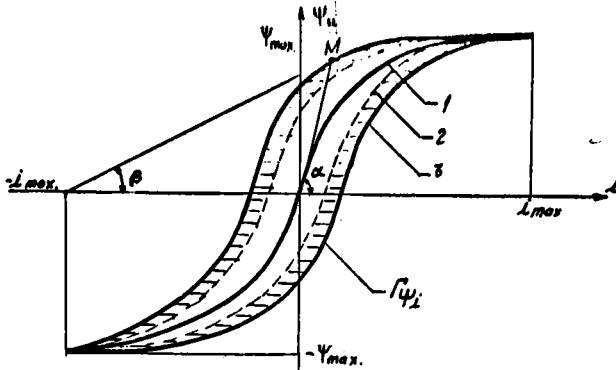


Fig.14 - Ciclu de magnetizare al unei bobine cu miez feromagnetic, la o alimentare cu tensiune sinusoidală.

- 1 - caracteristica fundamentală ;
- 2 - ciclul de magnetizare cu considerarea pierderilor prin histerezis (ciclul de histerezis) ;
- 3 - ciclul de magnetizare cu considerarea pierderilor prin histerezis și curenții turbionari (ciclul de magnetizare normal).

În condițiile de mai sus inductivitatea unei bobine nu mai este o constantă. Practic se definesc 3 inductivități, în funcție de caracteristica ce se ia în considerare [14,16] :

- inductivitatea statică și permeabilitatea magnetică statică :

$$L_{st} = \frac{\Psi_M}{i_M} = k_L \operatorname{tg} \alpha$$

$$\mu_{st} = \frac{B_M}{H_M} = k_\mu \operatorname{tg} \alpha \quad (80)$$

unde:

$$K_L = \frac{K_\Psi}{K_i}, \text{ coeficientul de scară al inductivităților;}$$

$$K_\mu = \frac{K_B}{K_H}, \text{ coeficientul de scară al permeabilităților magnetice ;}$$

- inductivitatea dinamică și permeabilitatea magnetică dinamică :

$$\left. \begin{aligned} L_d &= \left( \frac{d\Psi}{di} \right)_M = K_L \operatorname{tg} \beta \\ \mu_d &= \left( \frac{dB}{dn} \right)_M = K_\mu \operatorname{tg} \beta \end{aligned} \right\} \quad (81)$$

Unghiurile  $\alpha$  și  $\beta$  sînt indicate în fig.14 [16] .

Mărimile de mai sus pot fi derivate pentru oricare din cele trei curbe din fig.14.

Între cele două inductivități există relația :

$$L_d = \frac{d\Psi}{di} = \frac{d}{di} (L_{st.i}) = L_{st} + i \frac{dL_{st}}{di} \quad (82)$$

Bobina neliniară din fig.13 a este un element de circuit tipic neinerțial, avînd proprietăți remanente în câmpul magnetic. În funcție de modul în care se consideră ciclul de histeresis și pierderile prin curenții turbionari, bobina de stingere poate fi privită ca un element neliniar neinerțial cu sau fără pierderi [16] .

### 2.2.1.31. Bobina cu neglijarea pierderilor în miezul feromagnetic.

În acest caz caracteristica flux-curent nu prezintă histeresis. Caracteristica ciclului de magnetizare se reduce la caracteristica fundamentală. În fig.15 este dat procedeul grafic de determinare a curentului, cînd fluxul este sinusoidal [14,15,16,25,26] .

./.

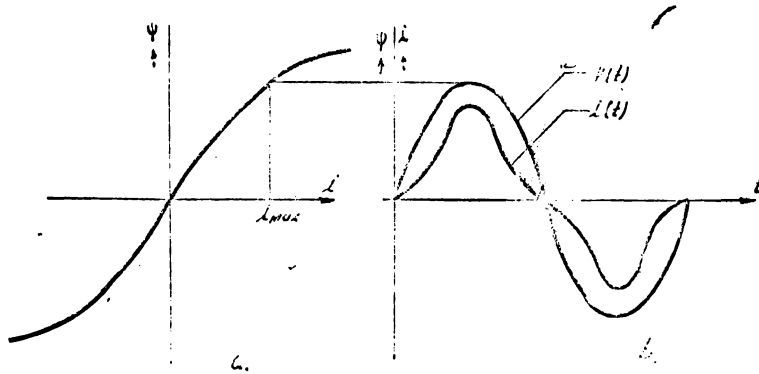


Fig.13 - Diagrama de legătură între pierderile în miez și fluxul magnetic.

a. caracterizați cu fundamentala de magnitudine.

b. determinați grafica a curentului.

precizie ridicată (sinusoidal în cazul

de curenți mici) și este în fază cu fluxul. Curba curentului este, prin urmare, nec sinusoidală, bisimetrică și satisface relațiile

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) \quad (85)$$

$$i(t) = i_1(t) + i_3(t) + \dots$$

Prin urmare, curentul conține numai componente de ordin impar în sinus.

Pentru așezarea de calcul, funcția de densitate a pierderilor poate fi aproximativ primitiv un polinom de gradul  $n$

$$P = \sum_{k=0}^n a_k \psi^k$$

Pentru  $n = 2$  [56] se obține:

$$i = a_1 \psi + a_3 \psi^3 + a_5 \psi^5 \quad (85)$$

Cunoscându-se caracteristica de magnetizare ridicată experimental, se pot determina valorile coeficienților  $a_{2k+1}$ , fie prin metoda alegerii punctelor de coincidență, fie prin metoda celor mai mici patrate [16,56] .

În general, tensiunea de care se dispune în rețelele electrice poate fi considerată ca sinusoidală [2,3] și deci și fluxul prin bobină poate fi aproximat ca o mărime sinusoidală. În aceste condiții se poate scrie :

$$\psi = \psi_{\max} \sin \omega t \quad (86)$$

Introducând expresia fluxului (86) în relația (85) se obține :

$$i = a_1 \psi_{\max} \sin \omega t + a_3 \psi_{\max}^3 \sin^3 \omega t + a_5 \psi_{\max}^5 \sin^5 \omega t \quad (87)$$

Ținându-se cont de relațiile:

$$\sin^3 \omega t = \frac{1}{4} (3 \sin \omega t - \sin 3 \omega t) \quad (88)$$

$$\sin^5 \omega t = \frac{1}{16} (10 \sin \omega t - 5 \sin 3 \omega t + \sin 5 \omega t)$$

relația (87) devine :

$$i = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3 \omega t + I_5 \sin 5 \omega t \quad (89)$$

unde:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \left( a_1 + \frac{3}{4} a_3 \psi_{\max}^2 + \frac{5}{8} a_5 \psi_{\max}^4 \right) \psi_{\max} \\ I_3 &= \left( \frac{1}{4} a_3 + \frac{5}{16} a_5 \psi_{\max}^2 \right) \psi_{\max}^3 \\ I_5 &= \frac{1}{16} a_5 \psi_{\max}^5 \end{aligned} \right\} \quad (90)$$

În relațiile (90)  $I_1, I_3$  și  $I_5$  sînt amplitudinile fundamentale și armonicilor de ordinul 3 și 5 ale curentului. Dacă expresia (85) a caracteristicii de magnetizare ar fi conținut și un termen cu  $\psi$  la puterea a 7-a, s-ar fi obținut și expresia amplitudinii armonicii de ordinul 7 a curentului din înfășurarea bobinei.

Se trage deci concluzia că prin aproximarea analitică a caracteristicii de magnetizare se pot determina analitic armonicele curentului din înfășurarea bobinei, la o alimentare cu tensiune sinusoidală.

### 2.2.1.3.2. Bobina cu considerarea pierderilor prin histerezis.

În fig.16 este dată caracteristica de magnetizare și procedeul grafic de determinare a curentului cînd fluxul este sinusoidal și se ține cont de histerezis. În acest caz curba curentului are o formă satisfăcută de relația :

$$i(t) = -i(t + \frac{\pi}{2}) \quad (91)$$

și deci curba curentului conține, de asemenea, numai armonici de ordin impar, atât în sinus cît și în cosinus.

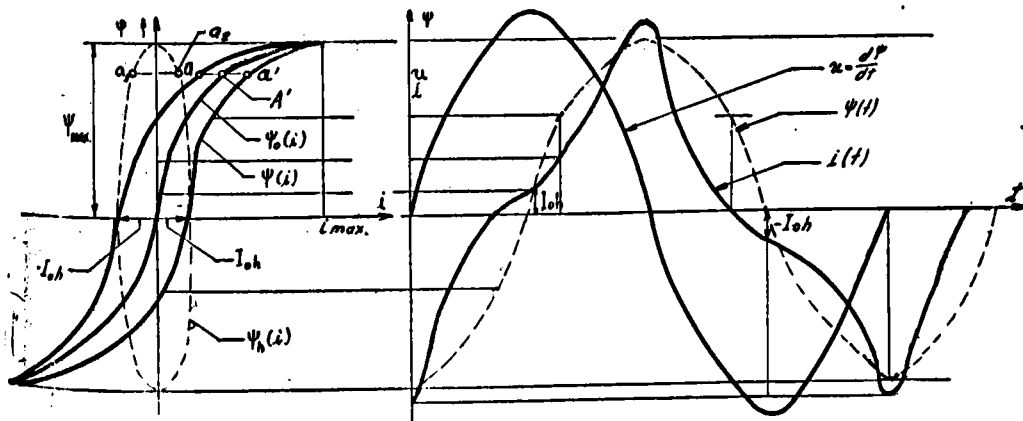


Fig.16 - Bobina cu considerarea pierderilor prin histerezis în miezul feromagnetic.  
 a - ciclul de magnetizare ;  
 b - determinarea grafică a curentului pentru un flux dat, sinusoidal.

În fig.16 a sînt reprezentate următoarele curbe :

$\psi_0(i)$  - caracteristica de magnetizare fundamentală ;

$\psi_h(i)$  - caracteristica de aproximare a pierderilor prin histerezis ;

$\psi(i)$  - caracteristica de magnetizare cu considerarea pierderilor prin histerezis.

Grafic curba de aproximare a pierderilor prin histerezis,  $\psi_h(i)$ , se obține astfel [16] :

Se duce dreapta AA', care intersectează curba ciclului de magnetizare în punctele a și a'. Se deplasează segmentul aa'a' astfel ca A' să ajungă în A. Se obțin punctele a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub>. Repetînd construcția de mai sus se obține elipsea  $\psi_h(i)$ , a cărei ecuație este :

$$\frac{i^2}{I_{oh}^2} + \frac{\psi^2}{\psi_{max}^2} = 1 \quad (92)$$

Un punct oarecare al curbei ciclului de magnetizare,  $\psi(i)$ , se obține cu relația :

$$i(\psi) = i(\psi_0) \pm i(\psi_h) = i(\psi_0) \pm I_{oh} \sqrt{1 - \frac{\psi^2}{\psi_{max}^2}} \quad (93)$$

Se consideră, ca și în cazul precedent, că tensiunea de care se dispune în rețele este sinusoidală. În acest caz se poate scrie :

$$\psi = \psi_{max} \sin \omega t \quad (94)$$

Introducînd expresia (94) a fluxului în relația (93) se obține:

$$i(\psi) = a_1 \psi_{max} \sin \omega t + a_3 \psi_{max}^3 \sin^3 \omega t + a_5 \psi_{max}^5 \sin^5 \omega t \pm I_{oh} \sqrt{1 - \frac{\psi_{max}^2 \sin^2 \omega t}{\psi_{max}^2}} \quad (95)$$

Tinîndu-se cont de relațiile (88) și de relația :

$$\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t = 1 \quad (96)$$



se obține:

$$i(\psi) = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t \pm I_{oh} \cos \omega t \quad (97)$$

unde  $I_1, I_2$  și  $I_3$  sînt amplitudinile fundamentalei și cele ale armonicilor de ordinul 3 și 5 ale curentului, a căror valoare este dată de expresiile (90).

Se confirmă astfel și pe cale analitică concluzia trasă plecînd de la construcția grafică din fig.16 b că, în cazul fluxului sinusoidal, curentul din înfășurarea bobinei conține numai armonici de ordin impar, atît în sinus, cît și în cosinus.

#### 2.2.1.3.3. Bobina cu considerarea pierderilor prin histerezis și curenții turbionari.

În regim staționar, relația dintre  $\psi$  și  $i$  reprezintă, la o altă scară, relația dintre  $B$  și  $H$ , adică ciclul de histerezis al materialului feromagnetic. Această relație este reprezentată cu linie întreruptă în fig.14.

În regim variabil, practic chiar de la frecvența industrială de 50 Hz, relația de mai sus nu mai este asemenea cu cea dintre  $B$  și  $H$ , pentru motivul că la solenația  $\Theta_1 = Ni$  a înfășurării mai trebuie adăugată contribuția curenților turbionari, induși în miezul feromagnetic de variația în timp a fluxului magnetic. Contribuția lor la magnetizarea miezului e practic egală cu o solenație  $\Theta_r$ , dată de relația :

$$\Theta_r = - \frac{k}{N} \frac{d\psi}{dt} \quad (98)$$

unde:

$k > 0$  - o constantă proporțională cu lungimea circuitului și invers proporțională cu rezistivitatea miezului ;

$N$  - numărul de spire.

Lin această cauză ciclul de magnetizare e mai lat decît în regim staționar, curba plină din fig.14. Virfurile ciclului se păstrează neschimbate.

Din cele de mai sus se desprinde concluzia că procesul de obținere a curentului, în cazul unui flux sinusoidal, nu diferă de cel dat în fig.16 decât prin faptul că elipsa  $\psi_h(i)$  își mărește axa mică de la  $2 I_{oh}$ , corespunzător ciclului histerezis, la  $2 I_{oh+f}$ , corespunzător ciclului histerezis și curenților turbionari, deci corespunzător ciclului de magnetizare cu considerarea pierderilor totale în miezul feromagnetic.

Rezultă că relația (97), cu modificarea precizată privind curentul  $I_{oh}$ , reprezintă funcția de aproximare a ciclului de magnetizare real :

$$i(\psi) = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t \pm I_{oh+f} \cos \omega t \quad (99)$$

Schema din fig.13 b consideră bobina ca un element neliniar inerțial în circuitul respectiv, întrucât curentul  $I_{Bm}$  nu conține toate armonicile, rezistențele echivalente în paralel,  $R_{hp}$  și  $R_{fp}$ , nefiind în măsură să reproducă ciclul de magnetizare. Această schemă este utilă pentru evidențierea efectului de amortizare a oscilațiilor ce apar în anumite condiții de funcționare [16] .

Schema din fig.13 c consideră bobina ca un element neliniar neinerțial, permițând evidențierea, pe cale analitică, a histerezisului și curenților turbionari, deci permite o reproducere mai fidelă a fenomenelor ce au loc în circuitele electrice cu bobina cu miez feromagnetic [16] .

În condițiile de mai sus, se pot sintetiza schemele echivalente ale bobinei de stingere.

### 2.2.2. Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor echivalente

$$\underline{R_{hp} \text{ și } R_{fp}}$$

Schema este dată în fig.17.

./.

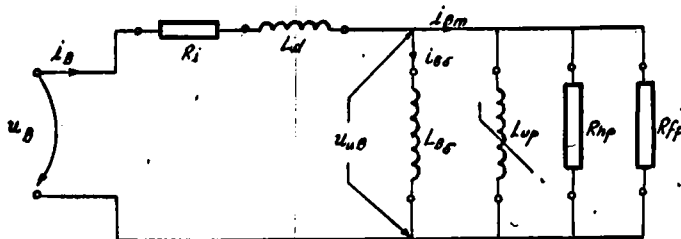


Fig.17. - Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor echivalente  $R_{hp}$  și  $R_{fp}$ .

Semnificația parametrilor bobinei de stingere, rezistențe și inductivități, folosiți în schema de mai sus rezultă din fig.12 și 13.

În fig.18 este dată construcția grafică a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere plecând de la caracteristicile elementelor din schema echivalentă.

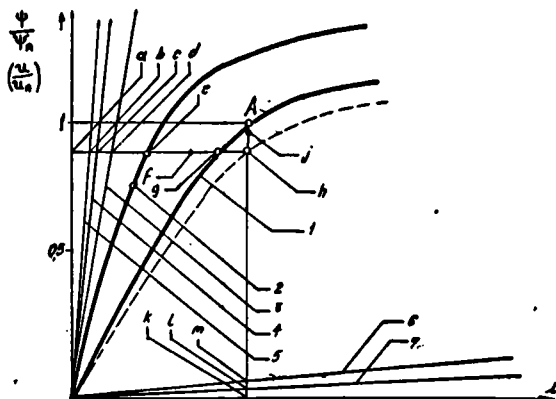


Fig.18 . Caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere cu schema echivalentă din fig.17.

In figura de mai sus semnificația notațiilor este următoarea :

- 1 - caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere ;
- 2 - caracteristici de magnetizare a bobinei de stingere fără întrefieruri și fără pierderi, cu inductivitatea  $L_{up}$  ;
- 3 - caracteristica corespunzătoare inductivității  $L_{B\delta}$ .

Celelalte caracteristici sînt aferente rezistențelor și inductivității  $L_d$  a bobinei de stingere, raportate la aportul lor privind curentul rezultat. Nu sînt deci caracteristicile tensiune-curent reale ale acestor elemente de circuit. Notațiile folosite corespund următoarelor caracteristici raportate :

- 4 - caracteristica aferentă rezistenței  $R_{hp}$  ;
- 5 - caracteristica aferentă rezistenței  $R_{fp}$  ;
- 6 - caracteristica aferentă inductivității  $L_d$  ;
- 7 - caracteristica aferentă rezistenței  $R_i$ .

Pentru fig.18 sînt valabile următoarele relații de construcție :

$$ab = gh$$

$$ac = fg$$

$$ad = ef$$

$$kl = hj$$

$$km = jA$$

### 2.2.3. Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor echivalente

$$\underline{R_{hs} \text{ și } R_{fs}}$$

Schema este dată în fig.19.

./.

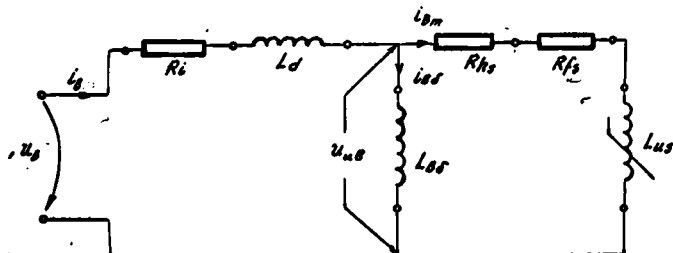


Fig.19 - Schema echivalentă a bobinei de stingere cu considerarea rezistențelor de pierderi

$R_{hs}$  și  $R_{fs}$

Semnificația parametrilor bobinei de stingere, rezistențe și inductivități, folosite în schema de mai sus rezultă din fig.12 și 13.

Se poate construi caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere cu schema echivalentă de mai sus în condiții similare cu cea construită în cazul schemei echivalente precedente. Întrucât nu sînt diferențe esențiale între cele două construcții de caracteristici de magnetizare, nu o mai repetăm.

### 2.3. Concluzii privind parametrii bobinei de stingere.

Din cele prezentate se desprind cîteva concluzii importante și anume :

- bobina de stingere poate fi reprezentată în rețelele compensate prin scheme echivalente, care permit evidențierea influenței saturației, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării ei în diverse condiții de exploatare ;

- cunoscîndu-se dimensiunile constructive și pierderile într-o bobină de stingere construită, se pot calcula toți parametrii de circuit din schemele echivalente ;

- sînt posibilități de aproximare analitică a caracteristici de magnetizare a unei bobine de stingere, cu și fără neglijarea ciclului de histerezis și a pierderilor prin curenții turbionari, care să confirme în circuite caracterul de element neliniar, neinerțial al acesteia.

2.4. Aproximarea analitică a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere.

Plecînd de la una din schemele echivalente de mai sus și neglijînd pierderile, deci rezistențele de circuit, avem :

$$i_B = i_{Bm} + i_{B\delta} \quad (100)$$

Potrivit relației (93)  $i_{Bm}$  este dat de expresia :

$$i_{Bm}(\psi) = a_1 \psi_{uB} + a_3 \psi_{uB}^3 + a_5 \psi_{uB}^5 \pm I_{ouB} \sqrt{1 - \frac{\psi_{uB}^2}{\psi_{\max uB}^2}} \quad (101)$$

Pe de altă parte  $L_{B\delta}$  fiind o inductivitate liniară se poate scrie:

$$i_{B\delta}(\psi) = \frac{\psi_{uB}}{L_{B\delta}} = b_1 \psi_{uB} \quad (102)$$

unde :

$$b_1 = \frac{1}{L_{B\delta}}$$

Cu aceste precizări, expresia analitică a caracteristicii bobinei de stingere, în forma ei cea mai generală, devine :

$$i_B(\psi) = (a_1 + b_1) \psi_{uB} + a_3 \psi_{uB}^3 + a_5 \psi_{uB}^5 \pm I_{ouB} \sqrt{1 - \frac{\psi_{uB}^2}{\psi_{\max uB}^2}} \quad (103)$$

În această expresie, pentru o bobină de stingere dată, coeficientul  $b_1$  se poate calcula, iar coeficienții  $a_1$ ,  $a_3$  și  $a_5$  se deduc din caracteristica de magnetizare a miezului feromagnetic al acesteia, fără întrefieruri.

Rezultă deci că determinarea valorilor coeficienților  $a_1$ ,  $a_3$  și  $a_5$  este condiționată de cunoașterea dimensiunilor miezului feromagnetic al bobinei de stingere.

Din această cauză, pînă în prezent nu s-au stabilit formule de calcul care să permită stabilirea directă a dimensiunilor elementelor constructive ale bobinei de stingere. Dimensiunile miezului feromagnetic se stabilesc printr-un calcul aproximativ, să execută în baza acestuia și se ridică pe stand caracteristica de magnetizare, fără întrefieruri.

În fig. 20 este dat montajul folosit de autor la ridicarea caracteristicilor de magnetizare ale miezurilor feromagnetice aferente bobinelor de stingere proiectate și executate în atelierele I.R.E - Ploiești. Secțiunea jugului miezului feromagnetic este mai mare decît cea a coloanelor. La sfîrșitul lucrării se prezintă rezultatele obținute.

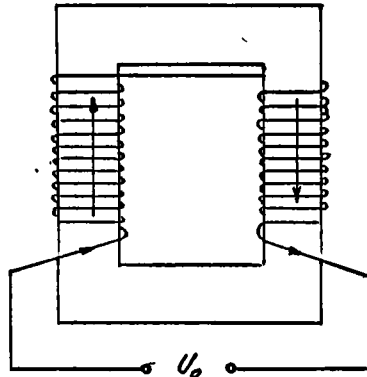


Fig. 20 - Montaj pentru ridicarea caracteristicii de magnetizare a miezului feromagnetic, fără întrefieruri, al unei bobine de stingere.

În relația (103)  $\psi_{UB}$  corespunde tensiunii  $U_{UB}$ , care este cu 8 - 10 procente mai mică decît tensiunea de alimentare a bobinei de stingere  $U_B$ . În expresia (103) a caracteristicii de

..//

magnetizare a bobinei de stingere această diferență între valorile celor două tensiuni este evidențiată prin folosirea fluxului  $\psi_{uB}$  și nu a fluxului  $\psi_u$ .

Dacă se admite că tensiunea de alimentare este sinusoidală, se poate scrie :

$$\psi_{uB} = \psi_{\max uB} \sin \omega t \quad (104)$$

cu care expresia (103) a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere, în forma ei cea mai generală, devine :

$$i_B(\psi) = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_{\max uB} \cos \omega t \quad (105)$$

unde :

$$\begin{aligned} I_1 &= (b_1 + a_1 + \frac{3}{4} a_3 \psi_{\max uB}^2 + \frac{5}{8} a_5 \psi_{\max uB}^4) \psi_{\max uB} \\ I_3 &= (\frac{1}{4} a_3 + \frac{5}{16} a_5 \psi_{\max uB}^2) \psi_{\max uB}^3 \\ I_5 &= \frac{1}{16} a_5 \psi_{\max uB}^5 \end{aligned} \quad (106)$$

În relațiile (106)  $I_1, I_3$  și  $I_5$  sînt amplitudinile fundamentale și armonicilor de ordinul 3 și 5 în sinus ale curentului din înfășurarea bobinei. Mărimile  $I_1, I_3$  și  $I_5$  se pot calcula atât pentru o bobină de stingere dată, cît și pentru o bobină de stingere ce urmează a fi proiectată.

./.



### 3. INFLUENTA SATURATIEI ASUPRA FUNCTIONARII BOBINEI DE STINGERE

In capitolul 1 au fost analizate condițiile de funcționare ale unei bobine de stingere, montată într-o rețea compensată.

In acest capitol se analizează aspectele pozitive și negative ale influenței saturației, spre a se obține concluzii bine fundamentate teoretic privind forma caracteristicii de magnetizare a unei bobine de stingere, pentru realizarea unei compensări ideale a curenților capacitivi, deci o compensare care să permită continuitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor casnici, industriali și de altă natură, fără ca totuși să se ajungă la situații periculoase, supratensiuni și supracurenți, oricare ar fi condițiile de funcționare, regim de exploatare normal sau de avarie.

In același capitol s-a stabilit că atât timp cât tensiunea de disimetrie naturală nu depășește 3,5% din tensiunea pe fază a rețelei, la o compensare la rezonanță, în regim normal de exploatare tensiunea de deplasare a neutrului nu atinge tensiunea pe fază a rețelei compensate. Rezultă că în condiții normale de exploatare saturația magnetică nu influențează asupra funcționării bobinei de stingere. Fenomenele ce au loc în rețele în această situație sînt specifice circuitelor electrice liniare.

In regim de avarie sînt două cazuri în care saturația influențează în mod hotărîtor asupra funcționării bobinei de stingere și anume :

- la ruperea unui conductor al unei faze la plecarea din stația de alimentare, fără punere la pămînt ;
  - la punerea la pămînt a unei faze a rețelei compensate
- In continuare se analizează cele două cazuri enunțate, în regim permanent și în regim tranzitoriu de funcționare.

./.

3.1. Influența saturației asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.

3.1.1. Rețea compensată cu o fază intreruptă la plecarea din stația de alimentare, fără punere la pământ.

În rețeaua compensată se formează un circuit ferorezonant serie, asupra căruia acționează o tensiune egală cu  $\frac{U_f}{2}$ . Este o tensiune de disimetrie accidentală și este cauza unor supratensiuni și supracurenți importanți.

În fig.21 este dată schema echivalentă simplificată a rețelei avariate, în care se formează circuitul ferorezonant serie.

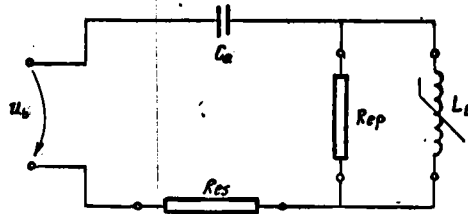


Fig.21 - Schema echivalentă simplificată a rețelei compensate cu o fază intreruptă la plecarea, fără punere la pământ.

Semnificația notațiilor folosite este următoarea:

$C_e$  - capacitatea echivalentă a rețelei avariate ;

$L_B$  - inductivitatea bobinei de stingere ;

$R_{ep}$  - rezistența echivalentă paralel ;

$R_{es}$  - rezistența echivalentă serie.

În  $R_{ep}$  și  $R_{es}$  sînt incluse rezistențele conductoarelor rețelei, de izolare ale fazelor rețelei, cele corespunzătoare pierderilor de putere în miezul transformatorului, al bobinei de stingere, care sînt antrenate în circuitul ferorezonant serie format.

./.

In fig.22 a și b sînt date caracteristicile de funcționare ale unui circuit ferorezonant serie, în condițiile alimentării lui cu o tensiune carecarea  $U_b$ , cu și fără considerarea rezistenței serie.

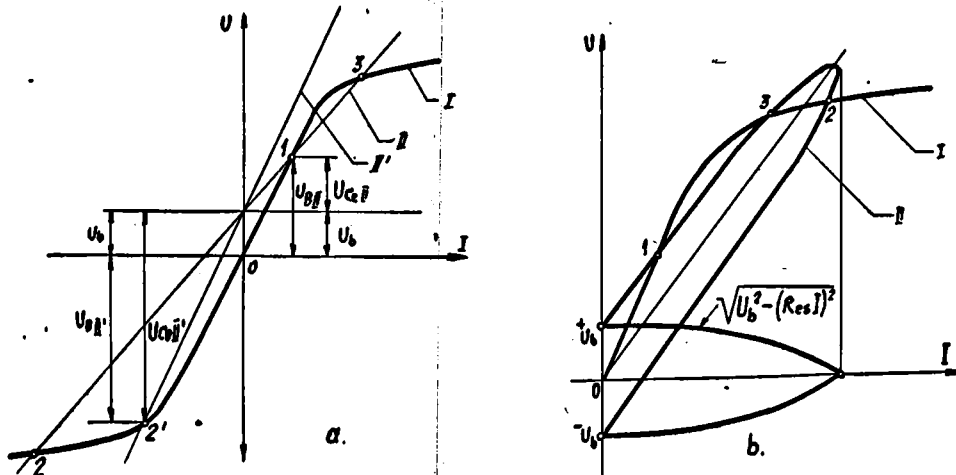


Fig.22 - Ferorezonanța serie într-un circuit neliniar, inercial.

- a - fără considerarea rezistenței echivalente serie,  $R_{es}$ , din circuit ;
- b - cu considerarea rezistenței echivalente serie,  $R_{es}$ , din circuit.

Construcția caracteristicilor din figura de mai sus este tratată în literatura de specialitate [1,2,3]. Semnificația notațiilor este următoarea :

- I - caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere ;
- II, II' - caracteristicile capacității echivalente  $C_e$ , pentru două valori distincte ale acesteia ;
- 1,2,2',3 - puncte de funcționare.

Punctele 1,2 și 2' corespund unui regim stabil de funcționare, iar punctul 3 unui regim instabil.

Analizînd caracteristicile II și II' ale capacită-

./.

ții  $C_0$  se observă că la scăderea ei sub o anumită valoare se trece de la funcționarea de pe partea pozitivă a caracteristici de magnetizare a bobinei de stingere pe partea negativă a acesteia, iar tensiunea bobinei crește de la  $U_{B II}$  la  $U_{B II}'$ . Această creștere a tensiunii bobinei de stingere are loc prin salt, caracteristic fenomenului de basculare în circuitele ferorezonante.

Punctul 2' de funcționare, după basculare, se poate stabili, printr-o construcție grafică potrivită, folosind ramura pozitivă a caracteristici de magnetizare. Construcția este dată în fig.23 [1].

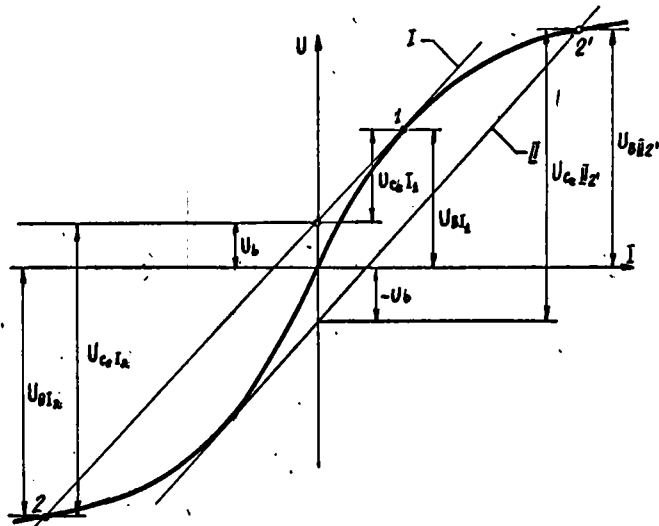


Fig.23 - Stabilirea pe cale grafică a punctului de funcționare, după basculare.

În figură punctul 2' dă valoarea tensiunii aplicate bobinei de stingere după basculare,  $U_{B II_2}'$ , care este cu mult mai mare decât tensiunea dinaintea basculării,  $U_{B I_1}$ . Se observă că  $|U_{B I_2}'| = |U_{B II_2}'|$ .

### 3.1.1.1. Supratensiuni accidentale în condițiile ferorezonanței serie.

Relațiile (32) și (55) permit să calculeze valoarea curentului ce are loc prin circuitul oscilant ce se formează când o fază este întreruptă la plecarea din stația de alimentare. Avem :

- în cazul liniei deschise la sosire :

$$\underline{I}_B = -j \frac{1}{\omega \left( L_B + \frac{L_1}{2} \right) - \frac{1}{\omega C_e}} \cdot \frac{U_1}{2} \quad (107)$$

- în cazul liniei cu transformator conectat la sosire :

$$\underline{I}'_B = -j \frac{1}{\omega \left( L_B + \frac{L_1}{2} \right) - \frac{1}{\omega C'_e}} \cdot \frac{U_1}{2} \quad (108)$$

Cei doi curenți  $\underline{I}_B$  și  $\underline{I}'_B$  diferă ca valoare, căci

$$C_e \neq C'_e .$$

Potențialul neutrilor este dat de potențialul bornei de legătură la neutru a bobinei de stingere și are expresia :

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 = \underline{U}_B &= j \omega L_B \underline{I}_B = \frac{\omega^2 L_B C_e}{\omega^2 L_B C_e - 1} \cdot \frac{U_1}{2} = \\ &= \frac{1}{1 - \frac{1}{\omega^2 L_B C_e}} \cdot \frac{U_1}{2} \end{aligned} \quad (109)$$

În expresia (109) a potențialului s-a neglijat inductivitatea conductoarelor liniei,  $L_1$  .

Se observă, ~~ca și în capitolul 1~~, că, la rezonanța, potențialul are tendința să devină foarte mare, teoretic infinit.

Vom analiza numai influența saturației asupra supra-tensiunilor accidentale ce au loc în astfel de situații.

Dacă pentru curentul  $\underline{I}_B$  bobina de stingere funcționează pe partea saturată a curbei de magnetizare, inductivitatea acesteia nu mai este constantă. Are loc fenomenul de ferorezonanță serie, iar potențialul  $\underline{U}_0$  corespunde tensiunii  $U_{BII2}$ , din fig.23, tensiunea  $U_b$

fiind egală cu  $\frac{U_r}{2}$ . În funcție de valoarea capacității echivalente  $C_e$ , tensiunea de deplasare a neutrului poate lua valori mai mari sau mai mici pentru o bobină de stingere cu caracteristica de magnetizare dată.

Pentru o rețea dată, ruperea conductorului unei faze la plecarea din stația de alimentare constituie cazul cel mai dezavantajos de funcționare, cu cele mai mari tensiuni de disimetrie accidentală. Oricare ar fi însă valoarea capacității echivalente  $C_e$ , tensiunea de deplasare a neutrului este limitată de fenomenul de saturație, care dă caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere un pronunțat caracter de caracteristică neliniară.

Influența saturației asupra funcționării bobinei de stingere se poate rezuma astfel, în cazul ruperii conductorului unei faze la plecare :

- limitează tensiunea de deplasare a neutrului la valori impuse prin forma caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere, față de cazul cu bobină fără miez feromagnetic, cînd tensiunea de deplasare este limitată numai de rezistențele din circuitul echivalent, corespunzătoare pierderilor de putere ;

- poate conduce la variații bruste ale potențialului neutrului prin fenomenul de basculare, specific ferorezonanței.

Ținînd cont de concluziile de mai sus, putem stabili pe cale analitică expresia caracteristicii de magnetizare ideale a unei bobine de stingere, valabilă pentru toate tensiunile, care este astfel gîndită încît, în cele mai dezavantajoase condiții de funcționare, tensiunea de deplasare a neutrului să nu depășească o anumită valoare.

#### 3.1.1.1.1. Caracteristica de magnetizare ideală unei bobine de stingere.

Atribuim caracterul de ideală unei caracteristici de magnetizare care întrunește următoarele calități :

- este general valabilă, independent de tensiunea nominală a bobinei de stingere ;

- limitează tensiunea de deplasare a neutrului la valori impuse.

În literatură nu există un punct de vedere unitar privind limitarea tensiunii de deplasare a neutrlui. Unii [2,3,4] recomandă ca curbura caracteristicii să înceapă la o tensiune mai mică decât cea nominală. Alții recomandă [41,49] ca tensiunea de deplasare a neutrlui, în cele mai dezavantajoase condiții de funcționare, să fie limitată la  $1,5 U_p$ . Aceste condiții corespund întreruperii unei faze la plecarea din stația de alimentare, fără punere la pământ, cu funcționare la rezonanță după producerea avariei. La stabilirea expresiei analitice a caracteristicii de magnetizare ideale, vom ține cont de ultima recomandare.

Intr-o rețea, pentru care ne propunem să proiectăm o bobină de stingere, se poate stabili capacitatea echivalentă  $C_e$  din relația (32), deci se poate trasa caracteristica acesteia.

Neglijînd fenomenul de histerezis, expresia (103) a caracteristicii de magnetizare a unei bobine de stingere devine:

$$i_B(\Psi) = (a_1 + b_1) \Psi_{uB} + a_3 \Psi_{uB}^3 + a_5 \Psi_{uB}^5 \quad (110)$$

notînd :

$$a_1 + b_1 = a'_1$$

$$\frac{\Psi_{uB}}{\Psi_{nb}} = \frac{u_{uB}}{U_{nb}} = u_{xb} ; \quad \frac{i_B}{I_{nb}} = i_{xb} \quad (111)$$

unde:  $U_{nb}$ ,  $\Psi_{nb}$  și  $I_{nb}$  sînt mărimi nominale aferente bobinei de stingere, care se iau ca mărimi de bază în calculul ce urmează .

Cu acestea expresia (110) devine :

$$i_{xb} = a'_1 u_{xb} + a_3 u_{xb}^3 + a_5 u_{xb}^5 \quad (112)$$

unde  $i_{xb}$  și  $u_{xb}$  sînt mărimi raportate.

În fig.24 este dată partea grafică a soluției.

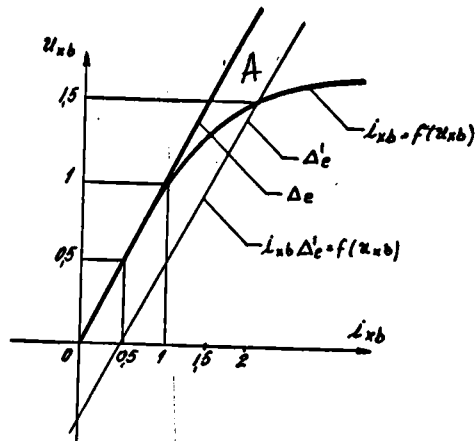


Fig.24 - Caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere în unități relativ.

Plecînd de la ideea că în condițiile cele mai grele de funcționare, deci cu conductorul unei faze întrerupt la plecarea din stația de alimentare, să existe rezonanță, trebuie să fie satisfăcută relația :

$$\omega L_{OB} = \frac{1}{\omega C_e} \quad (113)$$

unde:

$L_{OB}$  - inductivitatea bobinei de stingere în porțiune liniară a caracteristicii de magnetizare ;

$C_e$  - capacitatea echivalentă , după avarie .

Relația (113) impune condiția ca dreapta  $\Delta_e$ , aferentă caracteristicii capacității echivalente și caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere să aibă în porțiunile lor inițiale același coeficient unghiular.

Acest coeficient poate fi dedus din expresia (112) prin derivare.

Se obține :



$$\frac{di_{xb}}{du_{xb}} = a_1' + 3a_3 u_{xb}^2 + 5a_5 u_{xb}^4 \quad (114)$$

Pentru originea axelor de coordonate,  $u_{xb} = 0$ , derivata devine :

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_{xb}}{du_{xb}} &= a_1' \\ u_{xb} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (115)$$

, iar ecuația dreptei  $\Delta_e$  este :

$$i_{xb} \Delta_e = a_1' u_{xb} \quad (116)$$

Punctul A, corespunzător celor mai grele condiții de funcționare, se găsește la intersecția dreptei  $\Delta_e'$  cu caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere. Ecuația acestei drepte este :

$$i_{xb} \Delta_e' = a_1' (u_{xb} + 0,5) \quad (117)$$

Determinarea coeficienților  $a_1'$ ,  $a_3$  și  $a_5$  se face impunând trei condiții pentru caracteristica de magnetizare ideală. Acestea sînt:

$$\text{pentru : } \left. \begin{aligned} u_{xb} = 0,5 & \quad i_{xb} = 0,5035 \\ u_{xb} = 1 & \quad i_{xb} = 1,07 \\ u_{xb} = 1,5 & \quad i_{xb} = i_{xb} \Delta_e' \end{aligned} \right\} \quad (118)$$

Inlocuind condițiile (118) în relațiile (112) și (117) se obține:

$$\left. \begin{aligned} 0,5035 &= 0,5 a_1' + 0,125 a_3 + 0,0313 a_5 \\ 1,07 &= a_1' + a_3 + a_5 \\ a_1' (1,5-0,5) &= 1,5 a_1' + 3,375 a_3 + 7,594 a_5 \end{aligned} \right\} \quad (119)$$

din care, prin rezolvare, rezultă :

./.

$$\begin{aligned} a_1 &= 1,01 && ) \\ a_3 &= -0,01 && ) \\ a_5 &= 0,07 && ) \end{aligned}$$

(120)

Cu acestea, expresia caracteristicii de magnetizare ideale, în mărimi relative, devine :

$$i_{xb} = 1,01 u_{xb} - 0,01 u_{xb}^3 + 0,07 u_{xb}^5 \quad (121)$$

În tabela 2 sînt date rezultatele calculelor făcute pentru trasarea curbei caracteristicii de magnetizare ideale a unei bobine de stingere.

Tabela 2

$u_{xb}$	0,5	1	1,1	1,5	2	3	4
$i_{xb}$	0,5035	1,07	1,198	2,002	4,18	19,77	75

În fig.25 este dată caracteristica de magnetizare trasată cu valorile din tabela 2.

În literatura de specialitate [2,3,49] se consideră că o caracteristică de magnetizare este cu atît mai bună, cu cît limitînd tensiunea de deplasare a neutrilor, sînt mai mici variațiile curentului din bobină la funcționarea cu punere la pămînt monofazată în rețea, deci la alimentarea cu tensiunea nominală. Se recomandă [49,92] ca la o depășire a tensiunii cu 10%, curentul din bobină să nu crească cu mai mult de 20%. În cazul nostru avem:

$$\begin{aligned} &\text{- pentru } u_{xb} = 1,1 \\ &\quad i_{xb} = 1,198 \end{aligned}$$

deci :

$$\Delta i_{xb} \% = \frac{1,198 - 1}{1} \cdot 100 = 19,8 < 20$$

În concluzie, caracteristica de magnetizare ideală a bobinei de stingere, exprimată prin relația (121), limitează deplasarea neutrilor în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare la valori nepericuloase, stabilite în mod gîndit pentru rețeaua compensată și asigură totodată variații ale curentului la funcționarea cu o punere la pămînt în limita unor valori admisibile.

...//.

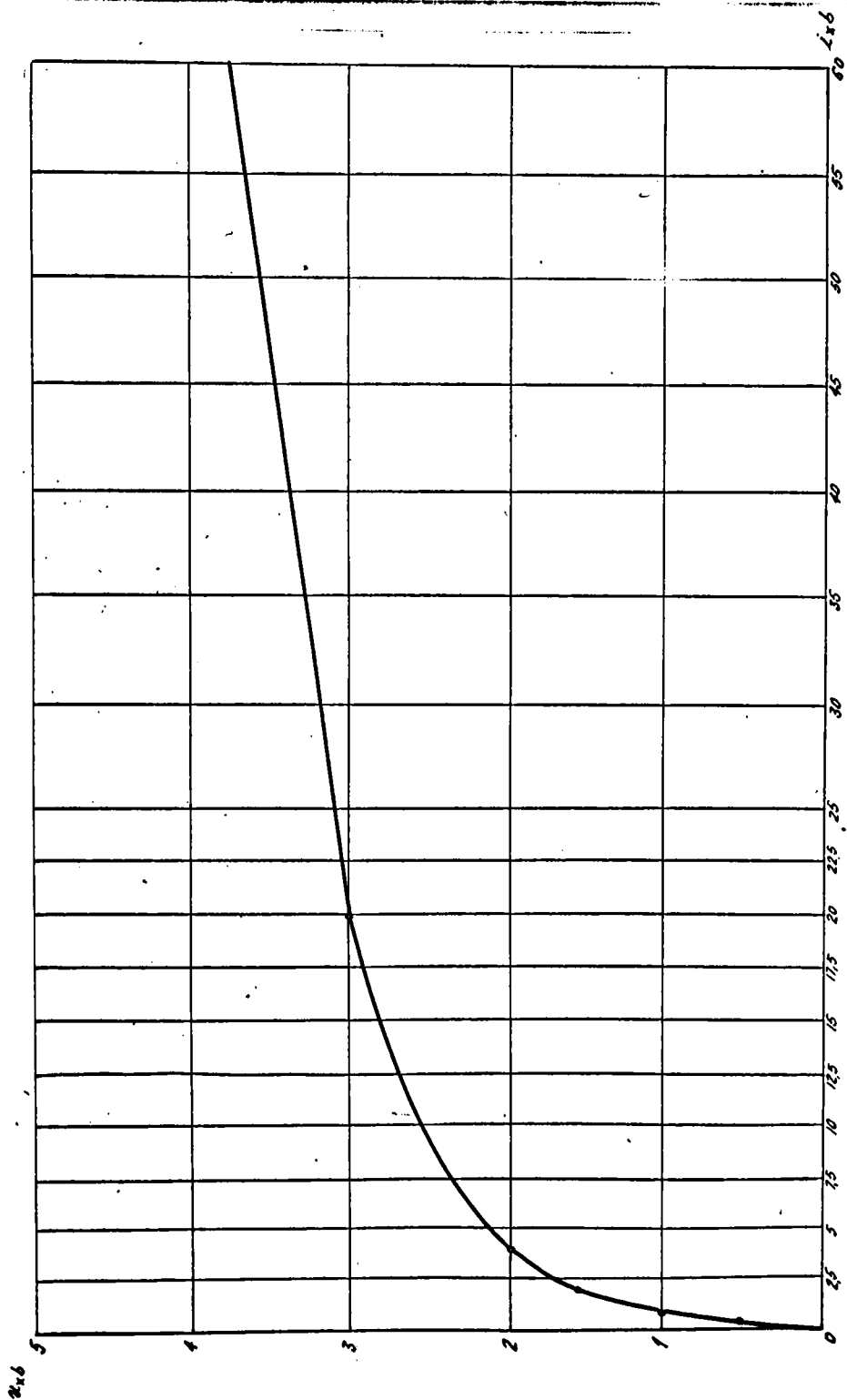


Fig 25-CARACTERISTICA DE MAGNETIZARE IDEALA A BOBINEI DE STINGERE, IN UNITATI RELATIVE

3.1.1.2. Supracurenții și supratensiunile accidentale datorite armonicilor de curent de ordin superior.

Din caracteristica de magnetizare a unei bobine de stingere se observă că, pentru porțiunea neliniară a acesteia, creșterea curentului din înfășurare are loc într-o măsură din ce în ce mai mare, prin comparație cu creșterea tensiunii de alimentare. Astfel, din tabela 2 rezultă că pentru o tensiune aplicată bobinei de stingere de 4 ori mai mare decât tensiunea nominală, curentul crește de mai bine de 21 ori. Asemenea supratensiuni, în regim permanent de funcționare, practic nu sînt posibile, ele fiind limitate, pentru condițiile cele mai grele de funcționare, la  $1,5 U_f = 1,5 U_n$ .

O funcționare cu o tensiune de alimentare mai mare decât tensiunea corespunzătoare porțiunii de proporționalitate a caracteristicii de magnetizare, poate conduce la deformarea sensibilă a curentului, bobina de stingere devenind în circuit un element deformant de primă categorie [13,14], deci generator de armonici superioare de curent.

3.1.1.2.1. Condiții de rezonanță pentru armonicile de ordin superior din curentul bobinei de stingere.

În fig.26 este dată schema echivalentă a rețelei compensate cu o fază întreruptă la plecarea din stația de alimentare, în care bobina de stingere este privită ca un generator de armonici de curent.

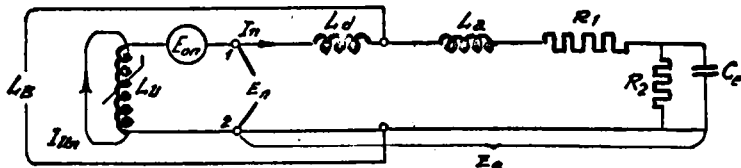


Fig.26 - Schema echivalentă a rețelei compensate, cu o fază întreruptă, aferentă armonicilor de ordin superior.

./.

Semnificația notațiilor folosite în plus față de cele din schemele echivalente anterioare este următoarea :

- $L_a$  - inductivitatea de scurtcircuit a sursei de alimentare (transformator, generator) ;
- $R_1, R_2$  - rezistențele echivalente, serie și paralel, corespunzătoare pierderilor de putere din rețeaua compensată ;
- $L_u$  - inductivitatea bobinei de stingere, corespunzătoare fluxului  $\Psi_{uB}$ .

Din schema echivalentă din fig.17 rezultă :

$$\frac{1}{L_u} = \frac{1}{L_{up}} + \frac{1}{L_{B\delta}} \quad (122)$$

Bobina de stingere este privită ca generator de armonici de curent de ordin superior în circuitul oscilant format, fig. 26, care se poate transforma în circuit rezonant sau ferorezonant.

Fie  $Z_{ne}$  impedanța echivalentă a circuitului din fig. 26, față de bornele 1-2, corespunzătoare armonicii de ordinul  $n$ . Avem :

$$Z_{ne} = R_1 + j \omega_n L_a + j \omega_n L_u + \frac{R_2}{1 + j R_2 \cdot \omega_n C_e} \quad (123)$$

Relațiile analitice se pot obține considerând injectată în circuitul echivalent din fig.26 o tensiune echivalentă  $E_{on}$ , corespunzătoare armonicii de ordinul  $n$ . Aceasta produce circulația curentului  $I_n$ , dat de relația [2,3,92] :

$$I_n = \frac{E_{on}}{j \omega_n L_u + Z_{ne}} \quad (124)$$

Dacă se consideră curentul de magnetizare  $I_{un}$  ca un curent injectat dat de relația :

$$I_{un} = \frac{E_{on}}{j \omega_n L_u} \quad (125)$$

rezultă, comparând relațiile (124) și (125) :

$$I_n (j \omega_n L_u + Z_{ne}) = I_{un} j \omega_n L_u \quad (126)$$

sau:

$$I_n = I_{un} \frac{j\omega_n L_u}{j\omega_n L_u + Z_{ne}} = I_{un} \frac{\frac{1}{Z_{ne}}}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (127)$$

Tensiunea  $E_n$  corespunzătoare armonicii de ordinul  $n$ , care apare la bornele 1-2 ale circuitului oscilant, este dată de relația:

$$E_n = I_n Z_{ne} = I_{un} \cdot \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (128)$$

Pentru:

$R_1 = 0$  (pierderi neglijabile) și  $R_2 \rightarrow \infty$  (izolație bună),

avem:

$$\begin{aligned} Z_{ne} &= j\omega_n L_d + j\omega_n L_a + \frac{1}{j\omega_n C_e} = \\ &= j\omega_n (L_d + L_a) + \frac{1}{j\omega_n C_e} \end{aligned} \quad (129)$$

și deci:

$$E_n = I_{un} \frac{1}{\frac{1}{j\omega_n (L_d + L_a) + \frac{1}{j\omega_n C_e}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (130)$$

sau:

$$E_n = I_{un} \frac{j}{\frac{1}{\omega_n (L_d + L_a) - \frac{1}{\omega_n C_e}} + \frac{1}{\omega_n L_u}} \quad (131)$$

Puleția de rezonanță a armonicii de ordinul  $n$ ,  $\omega_{on}$ , se obține din relația (131), prin anularea numitorului acesteia. Se poate scrie:

$$\frac{1}{\omega_n (L_d + L_a) - \frac{1}{\omega_n C_e}} + \frac{1}{\omega_n L_u} = 0 \quad (132)$$

și deci:

$$\omega_{on} = \frac{1}{\sqrt{(L_u + L_d + L_a) C_e}} \quad (133)$$

Dacă se neglijează inductivitatea sursei,  $L_s=0$ ,  
rezultă:

$$\omega_{on} = \frac{1}{\sqrt{(L_u+L_d)C_e}} = \frac{1}{\sqrt{L_B C_e}} = \omega_0 \quad (134)$$

unde  $\omega_0$  este pulsația de rezonanță a fundamentalei.

Din relația (134) se trage o concluzie foarte importantă în sensul că expresia pulsației de rezonanță a unei armonici oarecare a curentului este egală cu expresia pulsației de rezonanță a fundamentalei. Rezultă deci că în cazul unei rețele compensate, cu conductoarele fazelor neîntrerupte, acordarea bobinei de stingere la rezonanță pentru frecvența industrială îndepărtează posibilitatea apariției rezonanței pentru o armonică oarecare.

Dacă acordul de rezonanță este realizat pentru rețeaua compensată neavariată, este posibil ca la ruperea de conductoare să se formeze condiții de rezonanță pentru una din armonicile de ordin superior.

Pentru acordul la rezonanță la frecvența industrială avem :

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_B C_e}} \quad (135)$$

unde  $C_e$  este capacitatea echivalentă a rețelei neavariate.

Pulsația de rezonanță a unei armonici oarecare  $n$  este dată de relația :

$$\omega_{on} = \frac{1}{\sqrt{L_B C_{en}}} \quad (136)$$

Pentru ca  $\omega_{on} = 3\omega_0$ , trebuie să fie satisfăcută relația :

$$\frac{1}{\sqrt{L_B C_{en}}} = \frac{3}{\sqrt{L_B C_e}}$$

și deci:

$$C_{en} = \frac{C_e}{9} \quad (137)$$

Rezultă că este posibil ca în rețeaua avariată să se formeze condiții de rezonanță pentru armonica a treia dacă  $C_{en} = \frac{C_e}{9}$ ,

deci dacă în circuit rămâne numai  $\frac{1}{9}$  din lungimea totală a rețelei compensate, care să prezinte disimetrii capacitive suficient de mari pentru a conduce la o tensiune de deplasare a neutrului compatibilă cu funcționarea bobinei de stingere în porțiunea cu saturație a caracteristicii de magnetizare, generatoare de armonici de ordin superior.

Ca o concluzie a analizei de mai sus se poate afirma că într-o rețea compensată cu acord la rezonanță pentru frecvența industrială, deci a fundamentalei, este puțin probabil, în condiții de avarii, să se formeze circuite rezonante pentru o armonică de ordin superior.

La acest punct al lucrării s-a tratat problema rezonanței armonicilor de curent de ordin superior, ceea ce presupune că inductivitatea bobinei de stingere este constantă. Dacă această inductivitate nu mai este constantă, pentru o armonică oarecare apare fenomenul de ferorezonanță, cu aspecte complexe și mai greu de prins în relații matematice simple. Această problemă este analizată în continuare, la punctul următor.

3.1.1.2.2. Limitarea supratensiunilor și supra-  
curenților armonicilor de ordin superior  
din curentul bobinei de stingere prin  
efectul saturației magnetice (ferorezo-  
nanta).

Se analizează efectul de limitare de mai sus prin prisma mărimilor  $E_n$  și  $I_n$ , definite la punctul precedent.

Se reia relația (128) :

$$E_n = I_n Z_{ne} = I_{un} \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (158)$$

Să analizăm mai multe valori ale curentului  $I_n$ .

a. Armonica de ordinul  $n$  a curentului din rețeaua echivalentă este egal cu armonica de ordinul  $n$  a curentului de magnetizare. Avem :

$$I_n = I_{un} \quad (159)$$



Din relația (138) rezultă:

$$\begin{aligned} I_n Z_{ne} &= I_{un} \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} = \\ &= I_n \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \end{aligned} \quad (140)$$

de unde:

$$Z_{ne} = \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (141)$$

sau:

$$1 + \frac{Z_{ne}}{j\omega_n L_u} = 1$$

deci:

$$Z_{ne} = 0 \text{ și } |Z_{ne}| = 0 \quad (142)$$

Neglijind pierderile active  $Z_{ne}$  devine reactanță pur  $j X_n$ . Din (141) rezultă că  $X_n = 0$ , ceea ce corespunde regimului de scurtcircuit.

$$E_n = I_n Z_{ne} = I_{un} Z_{ne} = I_{un} \cdot 0 = 0$$

In concluzie, se poate scrie :

$$\begin{aligned} I_n &= I_{un} \quad ) \\ E_n &= 0 \quad ) \end{aligned} \quad (143)$$

b. Armonica de ordinul  $n$  a curentului din rețeaua echivalentă este egală cu zero.

Avem :

$$I_n = 0 \quad (144)$$

Din relația (140) se deduce :

$$I_n = I_{un} \frac{1}{1 + \frac{Z_{ne}}{j\omega_n L_u}} = 0 \quad (145)$$

sau:

$$1 + \frac{Z_{ne}}{j\omega L_u} \rightarrow \infty$$

deci:  $Z_{ne} \rightarrow \infty$  si  $|Z_{ne}| \rightarrow \infty$ , intrucit  $\omega L_u \neq 0$

iar:

$$E_n = E_{ne}$$

In concluzie, se poate scrie:

$$\left. \begin{array}{l} I_n = 0 \\ E_n = E_{ne} \end{array} \right\} \quad (146)$$

c. Armonica de ordinul n a curentului din rețeaua echivalentă tinde să crească foarte mult.

Avem:

$$I_n \rightarrow \infty$$

Din relația (140) se deduce:

$$1 + \frac{Z_{ne}}{j\omega_n L_u} = 0$$

sau:

$$Z_{ne} = -j\omega_n L_u \quad (147)$$

deci:

$$|Z_{ne}| = \omega_n L_u \quad (148)$$

Relația (148) este echivalentă cu relația (132), care a permis determinarea pulsației de rezonanță. Rezultă deci:

$$\left. \begin{array}{l} I_n \rightarrow \infty \\ E_n \rightarrow \infty \end{array} \right\} \quad (149)$$

Aceste valori, în cazul circuitelor rezonante serie, sînt limitate numai de rezistențele din circuit. În cazul circuitelor fererezonante serie, are loc o variație bruscă a armonicii respectiv a curentului și a tensiunii aferente pe de o parte, iar pe de altă parte are loc o limitare a valorilor acestora, impusă de caracteristica

de magnetizare a bobinei de stingere, deci implicit de saturația magnetică a miezului feromagnetic al acesteia.

Pentru evidențierea, pe cale grafică, a afirmației de mai sus, se reiau fig.22 și fig.23, adaptate la circuitul din fig. 26. Tensiunea de care se dispune în circuitul ferorezonant este  $U_{en}$ .

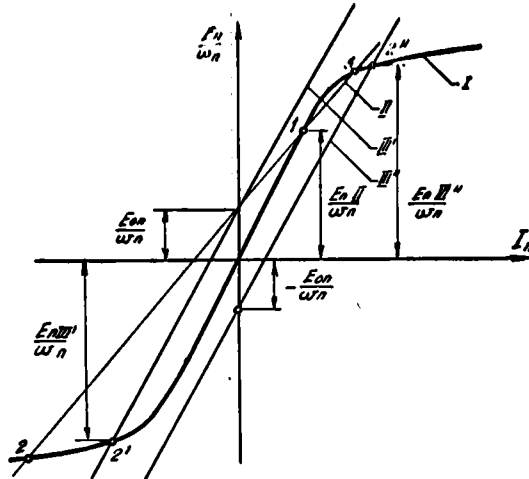


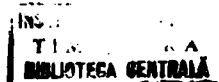
Fig.27 - Ferorezonanța serie în circuitul unei armonici de curent de ordinul n.

Semnificația notațiilor din figura de mai sus este următoarea :

- I - caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere ;
- II, III' - caracteristicile capacității echivalente  $C_0$  pentru două valori distincte ale acesteia ;
- 1, 2, 3 - punctele de funcționare în cazul caracteristicii II ;
- 2' - punct de funcționare în cazul caracteristicii III'.

Pentru un punct oarecare 1 de funcționare din fig. 22 este valabilă relația :

$$U_B = \omega f(I) = U_b + \frac{1}{\omega C_0} \quad (15e)$$



Impărțind relația (150) cu  $\omega$  se obține:

$$\frac{U_B}{\omega} = f(I) = \frac{U_b}{\omega} + \frac{1}{\omega^2 C_e} \quad (151)$$

Ca urmare, caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere este independentă de frecvență, iar panta caracteristicii capacităților variază invers proporțional cu patratul pulsației. În felul acesta în fig.27 pe ordonată apare  $\frac{E_n}{\omega}$  și nu  $E_n$ , ca în fig.22.

Efectul de limitare a tensiunii la bornele bobinei de stingere și deci implicit în circuitul ferorezonant serie se observă din construcția caracteristicilor III și III', a cărei tehnică nu o mai repetăm.

Din cele analizate mai sus se trage concluzia că în cazul formării unui circuit ferorezonant serie pentru una din armonicile curentului bobinei de stingere, saturația magnetică limitează supratensiunile cu supracurenții la valori impuse prin forma caracteristicii de magnetizare a acesteia. Dacă nu ar exista saturația magnetică, deci dacă caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere ar fi o dreaptă, supratensiunile și supracurenții ar fi limitați numai din rezistențele de circuit, în condițiile specifice rezonanței.

Ca aspect negativ, în anumite condiții, au loc variații în salt ale armonicii respective a curentului bobinei de stingere și ale tensiunii aferente.

### 3.1.2. Rețea compensată cu simplă punere la pământ.

În rețeaua compensată cu simplă punere la pământ se formează un circuit oscilant, care, în anumite condiții, poate deveni rezonant sau ferorezonant. Condițiile de funcționare pentru bobina de stingere în acest regim au fost analizate în cap.1, pct.1.1.

În fig.28 este dată schema echivalentă, reluată din fig.4 b, a rețelei compensate cu simplă punere la pământ, cu unele simplificări.

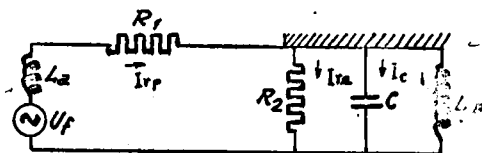


Fig.28 - Schema echivalentă a rețelei compensate cu punere la pământ, cu considerarea inductivității sursei.

În schemă s-a notat cu  $L_a$  inductivitatea sursei de alimentare cu energie electrică, iar cu  $R_1$  și  $R_2$  rezistențele echivalente serie și paralel, ale pierderilor de putere activă în rețeaua compensată.

Curentul rezidual este dat de relația (27) :

$$I_{rp} = \sqrt{I_{ra}^2 + I_{rr}^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_n^2} \quad (152)$$

În acest regim de funcționare a bobinei de stingere saturația magnetică influențează asupra valorii componentei reactive  $I_{rr}$  și armonicilor de ordin superior,  $I_3 \dots I_n$ , unde  $n = 2K-1$ .

### 3.1.2.1. Influența saturației magnetice asupra componentei reactive a curentului rezidual.

Componenta reactivă  $I_{rr}$  este dată de diferența aritmetică a componentelor reactive, aferente armonicilor fundamentale. Se poate scrie :

$$I_{rr} = I_{1B} - I_{1C} = I_{1B} - I_C \quad (153)$$

În relația de mai sus curentul capacitiv este considerat fără armonici, deci  $I_{1C} = I_C$ .

Diferența (153) poate fi zero, pozitivă sau negativă după cum se funcționează la acord la rezonanță, cu o ușoară supracompensare, sau cu o ușoară subcompensare.

Chiar dacă este realizat un acord la rezonanță, datorită saturației magnetice, la variații mici ale tensiunii de alimentare pot avea loc variații mari ale diferenței ( $I_B - I_C$ ), cu efect negativ privind valoarea curentului rezidual.

În fig.29 este analizată această influență pe caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere, pentru oscilații ale tensiunii de alimentare în plus sau în minus față de tensiunea nominală.

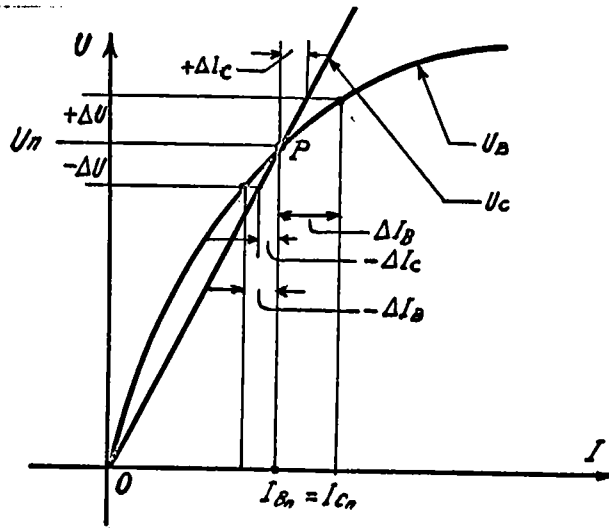


Fig.29 - Variația curentului din bobina de stingere în funcție de variația tensiunii de alimentare.

Caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere scoate, de fapt, în evidență variația de mai sus pentru curentul total din bobină, nu numai pentru armonica de bază, conform relației (153). Avem :

- pentru  $\Delta U > 0$  :

$$\Delta I = \Delta I_B - \Delta I_C > 0 ;$$

- pentru  $\Delta U < 0$  ;

$$\Delta I = - \Delta I_B - (- \Delta I_C) = - \Delta I_B + \Delta I_C < 0 \quad ;$$

Se observă că :

$$|\Delta I| \text{ pt}ru \Delta U > 0 > |\Delta I| \text{ pt}ru \Delta U < 0 \quad (154)$$

Neegalitatea (154) scoate în evidență influența nefavorabilă a saturației magnetice asupra variațiilor de curent, atunci cînd au loc variații ale tensiunii din rețeaua compensată. Rezultă că dacă bobina de stingere are o caracteristică de magnetizare la care zona cu saturație începe la o tensiune mai mică decît cea nominală, un anumit acord poate exista numai pentru anumită valoare a curentului acesteia, ceea ce practic conduce la existența permanentă a unui dezechilibru care are ca rezultat o pierdere de energie. Potrivit indicațiilor din unele lucrări de specialitate [7,49,92], caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere se consideră corespunzătoare dacă:

$$|\Delta I_B| < 0,2 I_{Bn} \text{ pt}ru |\Delta U| = e,1 U_{Bn} \quad (155)$$

unde prin  $I_{Bn}$  și  $U_{Bn}$  s-au notat valorile nominale ale curentului și tensiunii acesteia.

În concluzie, saturația magnetică influențează negativ asupra funcționării unei bobine de stingere în cazul unei puneri la pământ monofazate într-o rețea compensată.

### 3.1.2.2. Influența saturației magnetice asupra armonicilor de ordin superior din curentul rezidual.

Se analizează numai armonicile din curentul rezidual cauzate de saturația magnetică a bobinei de stingere.

În fig.30<sub>c</sub> este indicat drumul pe care-l parcurg aceste armonici, generate de bobina de stingere.

#### 3.1.2.2.1. Condiții de rezonanță pentru armonicile de ordin superior din curentul bobinei de stingere.

Modul de gîndire privind stabilirea condițiilor de rezonanță nu diferă de cel folosit la punctul 3.1.1.2.1. Se folosesc aceleași notații cu aceleași semnificații,  $E_{on}$  și  $E_n$  pentru tensiuni,  $I_{un}$  și  $I_n$  pentru curenți, respectiv  $Z_{ne}$  impedanța schemei echivalente din fig.30 c față de bornele 1 - 2.

Aşa cum rezultă din fig.30 c, sînt două căi de închidere a circuitului exterior aferent armonicilor superioare. Se notează cu  $I_n'$  și  $I_n''$  curenții, respectiv cu  $Z_{ne}'$  și  $Z_{ne}''$  impedanțele echivalente corespunzătoare celor două căi de închidere a circuitului exterior.

Pentru schemele echivalente din fig.30 sînt valabile următoarele notații și relații :

$R_p$  - rezistența arcului de punere la pămînt :

$$\left. \begin{aligned} R_{11}' &= R_{12} = R_{13} = R_1 \\ C_1 &= C_2 = C_3 = C \\ R_1' &= \frac{R_1}{2} \\ C' &= 2 C \\ L &= \frac{L_a}{2} + L_L \\ L_x &= L_a + x \frac{L_L}{2} \end{aligned} \right\} \quad (156)$$

În relațiile de mai sus  $L_L$  este inductivitatea unei faze a rețelei compensate,  $L_a$  inductivitatea pe fază a sursei de alimentare, iar  $x$  este distanța de la plecarea din stația de alimentare pînă la locul defectului.

./.



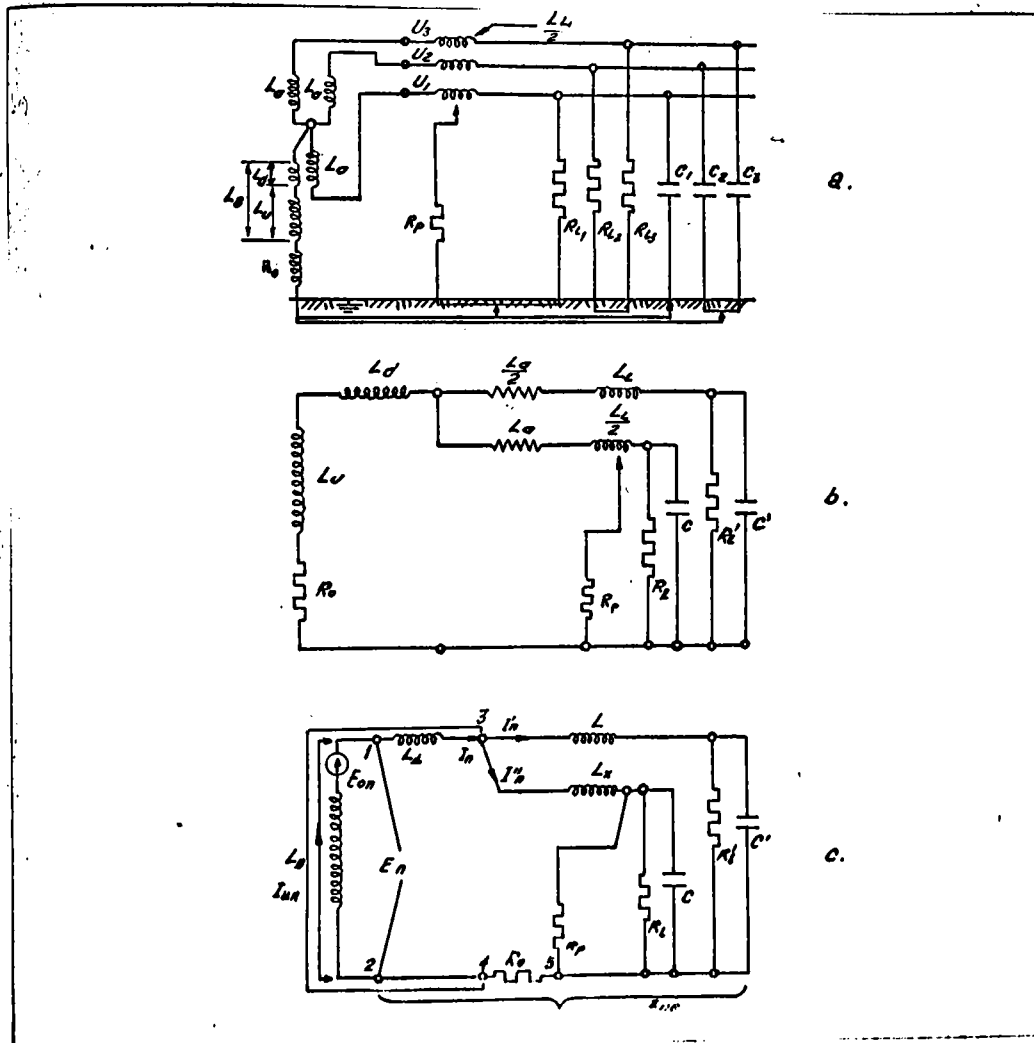


Fig.30 - Schema rețelei compensate aferentă armoniilor de ordin superior din curentul bobinei de stingere, la funcționarea cu o punere la pământ.

Cu precizările făcute se poate scrie :

$$E_{on} = I_n (j \omega_n L_u + Z_{ne}) \quad (157)$$

$$Z_{ne} = j \omega_n L_d + \frac{1}{Y_{ne}' + Y_{ne}''} + R_0 \quad (158)$$

$$\frac{Z'_{ne}}{Y'_{ne}} = \frac{1}{Y'_{ne}} = j\omega_n L + \frac{1}{\frac{1}{R'_1} + j\omega_n C'} \quad (159)$$

$$\frac{Z''_{ne}}{Y''_{ne}} = \frac{1}{Y''_{ne}} = j\omega_n L_x + \frac{1}{\frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_p} + j\omega_n C} \quad (160)$$

și deci:

$$\frac{Z_{ne}}{Y_{ne}} = \frac{1}{\frac{1}{j\omega_n L + \frac{1}{\frac{1}{R'_1} + j\omega_n C'}} + \frac{1}{j\omega_n L_x + \frac{1}{\frac{1}{R'_1} + \frac{1}{R_p} + j\omega_n C}}} \quad (161)$$

Pentru :

$R_o = 0$  (pierderi neglijabile în bobina de stingere) ;

$R_1 \rightarrow \infty$  (izolație bună în regim normal de funcționare) ;

$R'_1 \rightarrow \infty$  (izolație bună în regim normal de funcționare) ;

$L_d = 0$  (inductivitatea de dispersie a bobinei de stingere neglijabilă) ;

$R_p = 0$  (punere la pământ netă, fără rezistență) ;

se obține:

$$\frac{Z_{ne}}{Y_{ne}} = \frac{1}{\frac{1}{j(\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C'})} + \frac{1}{j\omega_n L_x}} \quad (162)$$

sau:

$$\begin{aligned} \frac{Z_{ne}}{Y_{ne}} &= \frac{j}{\frac{1}{\omega_n L - \frac{1}{\omega_n C'}} + \frac{1}{\omega_n L_x}} = \\ &= \frac{j\omega_n L_x (\omega_n^2 LC' - 1)}{\omega_n^2 C' L_x + \omega_n^2 LC' - 1} \quad (163) \end{aligned}$$

Dacă se consideră curentul de magnetizare  $I_{un}$  ca un curent injectat, avem relația :

./.

$$I_{un} = \frac{E_{on}}{j\omega_n L_u} \quad (164)$$

Comparând relațiile (157) și (164) se poate scrie :

$$I_n(j\omega_n L_u + Z_{ne}) = I_{un} j\omega_n L_u \quad (165)$$

sau:

$$\begin{aligned} I_n &= I_{un} \frac{j\omega_n L_u}{j\omega_n L_u + Z_{ne}} = I_{un} \frac{1}{1 + \frac{Z_{ne}}{j\omega_n L_u}} \\ &= I_{un} \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \end{aligned} \quad (166)$$

Tensiunea  $E_n$  este dată de relația :

$$E_n = I_n \cdot Z_{ne} = I_{un} \frac{1}{\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u}} \quad (167)$$

Pulsanția de rezonanță a armonicilor de ordinul  $n, \omega_{on}$ , se obține din relația (167), prin anularea numitorului acesteia. Se poate scrie :

$$\frac{1}{Z_{ne}} + \frac{1}{j\omega_n L_u} = 0$$

Înlocuind pe  $Z_{ne}$  cu valoarea rezultată din (163), se obține:

$$\frac{\omega_n^2 C' L_x + \omega_n^2 L C' - 1}{j\omega_n L_x (\omega_n^2 L C' - 1)} + \frac{1}{j\omega_n L_u} = 0 \quad (168)$$

de unde :

$$\omega_{on} = \sqrt{\frac{L_u + L_x}{C' (L_x L_u + L_x L + L \cdot L_u)}} \quad (169)$$

iar pentru  $L_x = 0$

$$\omega_{on} = \frac{1}{\sqrt{L_u C'}}$$

Sub aspectul procesului de stingere a arcului electric contează numai componenta  $I_n''$ , care se închide prin locul de defect.

Tensiunea la bornele 3 - 4 ale circuitului,  $(E_n)_{3-4}$ , este aceeași, oricare ar fi calea de curant pe care s-ar merge, pe latura de circuit corespunzătoare curentului  $I_n'$ , sau pe cea corespunzătoare curentului  $I_n''$ .

Sînt valabile relațiile :

$$(E_n)_{3-4} = I_n' Z_{ne}' = I_n'' Z_{ne}'' \quad (171)$$

și deci față de bornele 1-2 ale circuitului se poate scrie :

$$\begin{aligned} E_n &= I_n (R_o + j\omega_n L_d) + I_n' Z_{ne}' \\ E_n &= I_n (R_o + j\omega_n L_d) + I_n'' Z_{ne}'' \end{aligned} \quad (172)$$

sau :

$$\begin{aligned} I_n' &= \frac{E_n - I_n (R_o + j\omega_n L_d)}{Z_{ne}'} \\ &= \frac{E_n - I_n (R_o + j\omega_n L_d)}{j\omega_n L + \frac{1}{\frac{1}{R_1'} + j\omega_n C'}} \end{aligned} \quad (173)$$

și :

$$\begin{aligned} I_n'' &= \frac{E_n - I_n (R_o + j\omega_n L_d)}{Z_{ne}''} \\ &= \frac{E_n - I_n (R_o + j\omega_n L_d)}{j\omega_n L_x + \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_p} + j\omega_n C}} \end{aligned} \quad (174)$$

./.

Pentru :

$R_0 = 0$  (pierderi neglijabile în bobina de stingere) ;

$R_1 \rightarrow \infty$  (izolație bună în regim normal de funcționare) ;

$R_1' \rightarrow \infty$  (izolație bună în regim normal de funcționare) ;

$L_d = 0$  (inductivitatea de dispersie a bobinei de stingere neglijabilă) ;

$R_p = 0$  (punere la pământ netă, fără rezistență)

avem :

$$\underline{I}'_n = j \frac{\underline{E}_n}{\frac{1}{\omega_n C'} - \omega_n L} \quad (175)$$

și :

$$\underline{I}''_n = -j \frac{\underline{E}_n}{\omega_n L_x} \quad (176)$$

Din relațiile (162), (170), (175) și (176) se trag câteva concluzii importante și anume :

- dacă  $L_x = 0$ , punerea la pământ are loc în imediată apropiere a stației de alimentare cu energie electrică, iar impedanța  $Z_{ne} = 0$ . Pentru armonicile de ordin superior ale curentului bobinei de stingere această funcționare este caracteristică regimului de scurt circuit. În curentul rezidual apar toate armonicile de mai sus, cu valorile lor de producere, calculabile cu relațiile (105) și (106) ;

- în anumite condiții, când sînt satisfăcute relațiile (170) și (175), se poate forma un circuit rezonant serie aferent curentului  $\underline{I}'_n$ , alimentat însă cu o tensiune foarte mică, dată de tensiunea de scurtcircuit la bornele 3-5 din fig. 30 c.

Dacă  $L_x$  crește și  $R_p > 0$  tensiunea de alimentare a acestui circuit rezonant crește și deci se pune problema unor suprațensiuni și supracurenți mari, dați de una din armonicile  $\underline{I}'_n$ .

./.

3.1.2.2. Limitarea supratensiunilor și supracurențiilor armoniceilor de ordin superior prin efectul saturației magnetice.

Din cele de mai sus am desprins concluzia că sînt posibile cazuri de rezonanță serie, pentru una din armonicile curentului bobinei de stingere, dacă este satisfăcută relația (169). Circuitul echivalent serie rezultă din fig. 30 c.

Bobina de stingere devine sursă de armonici, care conduc, pentru una din ele de ordinul  $n$ , la tensiunea  $E_{on}$ , ce alimentează circuitul ferorezonant format. Saturația magnetică, prin forma caracteristicii de magnetizare, limitează creșterea tensiunilor și curenților din circuit. Construcția grafică privind efectul de limitare este identică cu cea din fig. 27 și deci nu o mai repetăm.

Un caz particular îl constituie situația în care  $L_x = 0$  și  $R_p = 0$ . Se formează un circuit rezonant local, aferent curentului  $I_n'$ , dacă este satisfăcută relația (170), cînd numitorul expresiei (175) se anulează și deci curentul din circuit tinde spre valori mari. Dacă tensiunea  $(E_n)_{3-5}$  crește,  $L_x \neq 0$  și  $R_p \neq 0$ , limitarea supratensiunilor și supracurențiilor din circuitul astfel format are loc prin efectul saturației magnetice în prezența ferorezonanței serie. Construcția grafică nu diferă de cea din fig. 27.

Tragem concluzia că în cazul funcționării unei rețele compensate cu o simplă punere la pămînt în care au loc armonici de ordin superior, generate de bobina de stingere, supratensiunile și supracurenții posibili în anumite configurații ale acesteia, se limitează prin efectul saturației magnetice.

Trebue să precizăm însă că fenomenul de basculare în cazul ferorezonanței conduce la creșteri în salturi ale curenților și tensiunilor, cu efecte negative asupra fiabilității instalațiilor electroenergetice aferente.

### 3.1.3. Concluzii privind influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.

Pe parcursul analizei acestei influențe, în diverse condiții de funcționare posibile cu prezența saturației magnetice, am tras concluziile ce s-au desprins.

În cele ce urmează se dau, în sinteză, concluziile mai importante:

- saturația magnetică transformă bobina de stingere într-un element deformant, într-un circuit electric, de prima categorie, devenind astfel generator de armonici de curent de ordin superior ;

- saturația magnetică limitează supracurenții și supratensiunile interne din rețelele electrice compensate, în regim permanent de funcționare, la valori nepericuloase, prin acțiunea combinată a fenomenului de ferorezonanță și forma caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere ;

- fenomenul de ferorezonanță, inerent circuitelor electrice neliniare cu bobine cu saturație magnetică și capacități, conduce la creșterea în salturi a curenților și tensiunilor atunci când au loc formări de circuite oscilante ferorezonante, cu efecte negative privind fiabilitatea instalațiilor electroenergetice aferente.

### 3.2. Influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim tranzitoriu.

Într-un circuit electric prin regim tranzitoriu se înțelege regimul variabil de trecere de la o anumită stare inițială, la un anumit regim permanent, rezultat de obicei în urma unei perturbații.

În cazul bobinelor de stingere astfel de perturbații pot fi ocazionate de apariția unei puneri la pământ, ruperea conductoarelor unei sau mai multor faze ale unei rețele compensate în funcțiune, etc.

Corelat cu complexitatea perturbației, bobina de stingere poate fi alimentată cu o tensiune mai mică sau mai mare decât tensiunea nominală.

În acest paragraf se analizează procesele care apar într-o rețea electrică compensată în regim tranzitoriu de funcționare în condițiile existenței saturației magnetice.

### 3.2.1. Caracteristicile circuitelor neliniare în regim tranzitoriu.

Ecuațiile unui circuit electric neliniar, cu bobină cu miez feromagnetic, în regim tranzitoriu sînt ecuații diferențiale neliniare de formă generală [16] :

$$F\left(y, \frac{dy}{dt}, \frac{d^2y}{dt^2}, \dots, t\right) = 0 \quad (178)$$

, iar soluția generală de formă:

$$y = y(t) \quad (179)$$

caracterizează regimul tranzitoriu al circuitului.

Datorită caracterului neliniar al circuitului, teorema suprapunerii nu este satisfăcută și deci, spre deosebire de circuitele liniare, soluția generală (179), corespunzătoare regimului tranzitoriu, nu mai poate fi descompusă în două componente, una caracterizînd regimul forțat, iar cealaltă regimul liber.

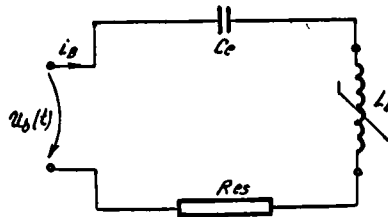
Gradul de dificultate cel mai mare îl prezintă obținerea soluțiilor exacte sau chiar aproximative ale ecuațiilor diferențiale neliniare. Integrarea exactă este înfrîntă și utilizată în tehnică numai în mod excepțional, în timp ce integrarea aproximativă este avantajoasă, în deosebi atunci cînd ordinul ecuației nu depășește doi [16] .

În principal se utilizează metode numerice, grafo-analitice și analitice pentru obținerea soluției aproximative a unei ecuații diferențiale neliniare.



**3.2.2. Regimul tranzitoriu la ruperea conductorului  
unei faze la plecarea din stația de alimentare.**

Schema echivalentă simplificată, cu neglijarea rezistențelor echivalente în paralel, este dată în fig.31. Aceasta provine din schema echivalentă din fig.21, în care se consideră  $R_{ep} = 0$ , lucru compatibil cu realitatea atunci când izolația conductoarelor fazelor față de pământ, în condiții normale de exploatare, este foarte bună. Bobina de stingere, ca element de circuit, se tratează după schema echivalentă din fig.19, deci cu considerarea rezistențelor echivalente serie.



**Fig.31 - Schema echivalentă simplificată a rețelei  
compensate cu o fază intreruptă la plecare,  
fără punere la pământ, cu neglijarea rezisten-  
ței echivalente paralele.**

Ecuția diferențială a circuitului de mai sus la alimentarea cu o tensiune  $u_b(t)$  este :

$$\frac{d\Psi}{dt} + R_{es}i + \frac{1}{C_e} \int idt = u_b(t) \quad (18e)$$

Pentru simplificarea scrierii relațiilor, la tratarea acestui punct, se folosesc următoarele notații:

- $i_b \rightarrow i$
- $R_{es} \rightarrow R$
- $C_e \rightarrow C$
- $u_b(t) \rightarrow u(t)$

In continuare se evidențiază influența caracteristicii de magnetizare neliniare a bobinei de stingere asupra formei curbei curentului și tensiunilor din circuit, la alimentarea acestuia cu o sursă exterioară de tensiune. In acest caz caracteristica de magnetizare este privită ca o relație între inducția magnetică B și câmpul magnetic H, ceea ce permite o construcție grafică a curbei curentului și tensiunilor din circuit în fiecare perioadă a oscilațiilor [1].

Aceste mărimi specifice sînt legate de fluxul  $\psi$  și curentul  $i$  prin secțiunea transversală S a miezului feromagnetic, lungimea l a acestuia și numărul de spire N, în baza relațiilor:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\psi}{NS} & ) \\ & & ) \\ H &= \frac{Ni}{l} & ) \end{aligned} \quad (181)$$

Ecuția (180) a circuitului, ținînd cont de relațiile (181) devine :

$$NS \frac{dB}{dt} + R \frac{l}{N} H + \frac{1}{NC} \int H dt = u(t) \quad (182)$$

sau, introducînd parametrul  $\tau$ , denumit timpul propriu al circuitului, dat de relația :

$$\tau = \sqrt{C \frac{S}{l} N^2} = \sqrt{CA} \quad (183)$$

se obține:

$$\frac{dB}{dt} + \frac{RC}{\tau} H + \frac{1}{\tau} \int H dt = \frac{\tau}{SN} u(t) \quad (184)$$

Introducînd, în continuare, notațiile prescurtate de mai jos :

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{RC}{\tau} = \frac{R}{\sqrt{\frac{C}{S}}} & ) \\ & & ) \\ e(t) &= \frac{\tau}{SN} u(t) = \sqrt{\frac{C}{SI}} u(t) & ) \\ \nu &= \frac{t}{\tau} & ) \end{aligned} \quad (185)$$

unde  $t$  este timpul curent, relația (184) devine :

$$\frac{dB}{d\psi} + \rho H + \int H d\psi = e(\psi) \quad (186)$$

Primul termen al relației (186) este determinat, în esență, de forma caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere, cel de al doilea termen de mărimea rezistenței, cel de al treilea caracterizează influența capacității, iar partea dreaptă a relației reprezintă tensiunea aplicată.

Pentru calcul relația (186) se scrie sub forma :

$$\frac{dB}{d\psi} = e(\psi) - \rho H - \int H d\psi \quad (187)$$

Se observă că variația în timp a inducției  $B$  este determinată în primul rând de tensiunea aplicată, din care se scad căderile de tensiune în rezistență și în capacitate. Fluxul remanent în miez și sarcina inițială a condensatorului intervin în soluție sub formă de condiții inițiale.

Ecuația diferențială (186) poate fi rezolvată pe cale grafică.

În fig.32 sînt reprezentate curbele  $\frac{dB}{d\psi}$ ,  $H$  și  $Hd\psi$ , proporționale cu tensiunea la bornele bobinei, curentul din circuit și tensiunea la bornele capacității, pentru un caz concret, rezolvat cu un integrator mecanic, după R.Rüdenberg [1], potrivit schemei echivalente din fig.31. Curbele de mai sus au fost construite pentru o tensiune de alimentare sinusoidală  $u(t)$  dată, cu faza inițială nulă, aplicată brusc circuitului cu schema echivalentă din fig.31. Această ipoteză corespunde cazului în care are loc ruperea conducteurului unei faze la plecarea din stația de alimentare, cînd se aplică circuitului format o tensiune egală cu  $\frac{U_f}{2}$ . În principiu, se poate considera că într-o rețea de transport și distribuție se dispune de o tensiune sinusoidală [2,3].

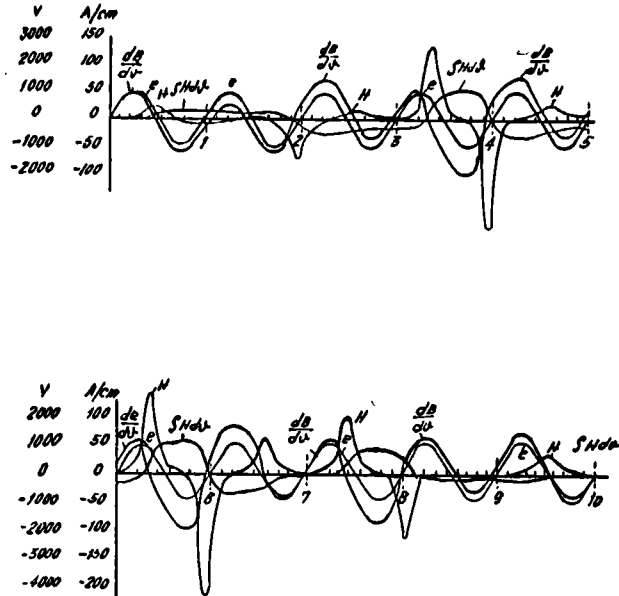


Fig.32 - Influența saturației magnetice în regim tranzitoriu la punerea bruscă sub tensiune a circuitului echivalent din fig.31.

Influența saturației magnetice, așa cum rezultă din figura de mai sus, se poate rezuma astfel [1] :

- creșterea treptată a curentului din circuit, valorile amplitudinilor lui variind considerabil și neregulat. Amplitudinile nu au tot timpul semne alternative. În multe perioade se succed două amplitudini ale curentului de același semn. Nu există o repetare regulată a procesului oscilațiilor ;

- asemănarea formei tensiunii la bornele bobinei de stingere, proporțională cu  $\frac{dB}{dV}$ , cu forma tensiunii aplicate  $e(\sqrt{V})$ , cu mai multe abateri privind regularitatea ei ;

- evoluția cu totul diferită a tensiunii capacitive, proporțională cu  $\int Hd\sqrt{V}$ , care cuprinde în special alternanțe trapezoidale turtite, deseori cu o durată mai mare decât o perioadă.

Curbele de mai sus confirmă apariția unor curenți și a unor tensiuni anarmonice de amplitudini considerabile, a căror variație în timp decurge cu totul altfel decât variația periodică a tensiunii aplicate.

Spre deosebire deci de cazul circuitelor liniare, când o alimentare cu o tensiune cu fază nulă în momentul conectării au loc salturi de curent, în cazul circuitelor cu elemente cu saturație magnetică creșterea acestuia are loc în mod treptat, deosebire esențială între cele două tipuri de circuite electrice [1] .

### 3.2.3. Regimul tranzitoriu la punerea la pământ a unei faze într-o rețea compensată.

Schema echivalentă simplificată, cu neglijarea rezistențelor echivalente serie, este dată în fig.33. Aceasta provine din schema echivalentă din fig.28, în care s-au neglijat rezistența serie și inductivitatea de scurtcircuit a sursei.

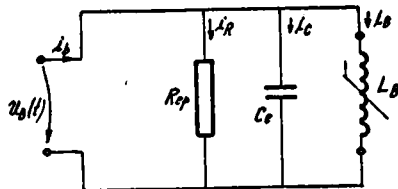


Fig.33 - Schema echivalentă simplificată a rețelei compensate, cu punere la pământ și neglijarea rezistenței echivalente serie și a inductivității de scurtcircuit a sursei.

Se procedează ca și în cazul punctului 3.2.2. Folosim aceleași notații pentru inducția magnetică, câmpul magnetic, curentul din circuit, etc.

Pentru simplificarea scrierii relațiilor, se folosesc următoarele notații :

$$R_{ep} \rightarrow R ;$$

$$C_e \rightarrow C ;$$

$$u_b(t) \rightarrow u(t) ;$$

$$i_b(t) \rightarrow i(t) .$$

Aplicînd legile cunoscute din electrotehnică [12,14] pentru circuitul din fig.33 se poate scrie :

$$i = i_R + i_B + i_C \quad (188)$$

Intrucît inductivitatea nu este constantă, pentru bobină este valabilă relația :

$$u = \frac{d\psi}{dt} \quad (189)$$

unde  $\psi$  este fluxul total al acesteia.

Folosind expresiile cunoscute din electrotehnică pentru curenții  $i_R$ ,  $i_B$  și  $i_C$  și relația (189) se poate scrie :

$$\left. \begin{aligned} i_R &= \frac{u}{R} = \frac{d\psi}{dt} \frac{1}{R} \\ i_B &= \frac{Hl}{N} \\ i_C &= C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt} \left( \frac{d\psi}{dt} \right) = C \frac{d^2\psi}{dt^2} \end{aligned} \right\} \quad (190)$$

unde  $l$  și  $N$  au semnificația indicată pentru relația 2 din (181).

Cu aceste precizări relația (188) devine :

$$i = \frac{1}{R} \frac{d\psi}{dt} + \frac{Hl}{N} + C \frac{d^2\psi}{dt^2} \quad (191)$$

./.

sau :

$$\frac{1}{C}i = \frac{1}{RC} \frac{d\psi}{dt} + \frac{1}{NC} \cdot H + \frac{d^2\psi}{dt^2}$$

iar prin integrare se obtine:

$$\frac{1}{C} \int idt = \frac{\psi}{RC} + \frac{1}{NC} \int Hdt + \frac{d\psi}{dt} \quad (192)$$

Folosind relația 1 din (181),  $\psi = BSN$ , relația (192)

devine :

$$SN \frac{dB}{dt} + \frac{SN}{RC} B + \frac{1}{NC} \int Hdt = \frac{1}{C} \int idt = u(t) \quad (193)$$

care se mai poate scrie astfel :

$$\frac{SN^2 C}{1} \frac{dB}{dt} + \frac{SN^2 C}{1} \frac{1}{RC} B + \int Hdt = \frac{NC}{1} u(t) \quad (194)$$

Notind :

$$\tau = \sqrt{C \frac{S}{1} N^2} \quad (195)$$

relația (194) devine :

$$\tau^2 \frac{dB}{dt} + \tau^2 \frac{1}{RC} B + \int Hdt = \frac{NC}{1} u(t) \quad (196)$$

sau :

$$\tau \frac{dB}{dt} + \frac{\tau}{RC} B + \frac{1}{\tau} \int Hdt = \frac{NC}{1} \frac{1}{\tau} u(t) \quad (197)$$

Folosind notațiile :

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{t}{\tau} & ) \\ & & ) \\ e' &= \frac{\tau}{RC} & ) \end{aligned} \quad (198)$$

relația (197) devine :

$$\frac{dB}{d\nu} + e' B + H d\nu = e(\nu) \quad (199)$$

unde:

$$e(\nu) = \frac{NC}{1} \frac{1}{\tau} u(t) = \sqrt{\frac{N^2 \cdot C^2}{1^2} \frac{1}{CSN^2}} \cdot u(t) = \sqrt{\frac{C}{S1}} u(t) \quad (200)$$

./.

Se observă că relația (199) diferă de relația (187) prin conținutul termenului al doilea, care devine  $\varphi'B$ , față de  $\varphi H$ , unde  $\varphi' = \frac{1}{\varphi}$ .

Concluziile sînt asemănătoare cu cele de la punctul 3.2.1. și nu le mai repetăm.

### 3.3. Influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în regim de supratensiuni atmosferice.

Față de supratensiunile atmosferice, înfășurarea unei bobine de stingere se caracterizează prin rezistența ei electrică, inductivitatea spirelor, capacitatea spirelor între ele și față de pământ.

În fig.34 este dată schema echivalentă, completă și simplificată, față de supratensiunile atmosferice.

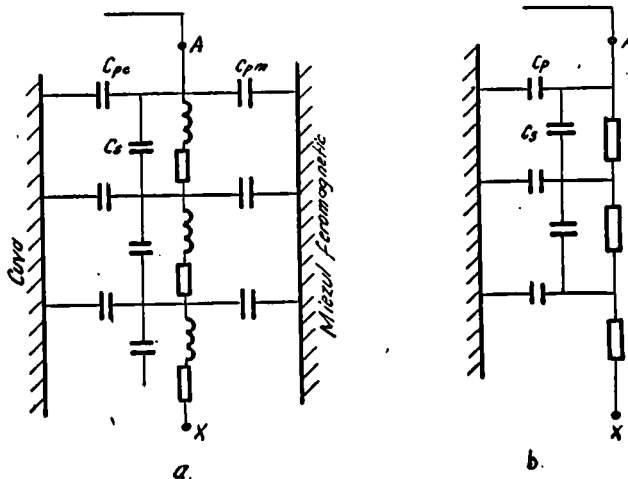


Fig.34 - Schema echivalentă a unei bobine de stingere față de supratensiunile atmosferice.

- a. schema completă ;
- b. schema simplificată.



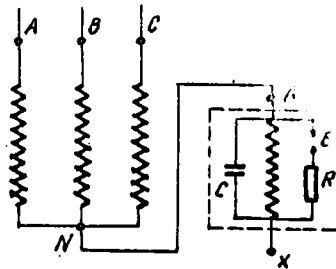
Atit capacitățile diferitelor spire față de pământ, cît și cele dintre spirele alăturate se pot considera egale între ele [25] . Se notează cu  $C_p$ , respectiv cu  $C_s$  aceste capacități.

Datprită vitezelor mari de deplasare a undelor de supratensiuni atmosferice, inductivitatea spirelor face ca sarcinile electrice, în primul moment, să nu treacă pe cale de conducție electrică prin conductoare, ci numai prin capacitățile spirelor între ele și față de pământ. Din acest motiv, în momentul în care unda de supratensiuni ajunge la borna bobinei, aceasta se comportă ca un condensator cu capacitatea  $C_t$ , aproximativ egală cu media geometrică dintre capacitatea înfășurării față de pământ,  $NC_p$  și capacitatea echivalentă a capacităților dintre spire,  $\frac{C_s}{N}$  . Prin urmare se poate scrie :

$$C_t \approx \sqrt{NC_p \cdot \frac{C_s}{N}} = \sqrt{C_p C_s} \quad (201)$$

Bobina de stingere se racordează totdeauna la nulul unui transformator de putere. Așa cum rezultă din literatura de specialitate [2,3,25,26] , înfășurările transformatoarelor de putere preiau în cea mai mare parte efectul acestor supratensiuni, atit în faza inițială, cît și în faza finală și în timpul oscilațiilor libere dintre cele două faze.

Dacă se mai iau unele măsuri constructive, așa cum rezultă din fig.35 [25] , se poate spune că bobina de stingere este protejată față de supratensiunile atmosferice . Normativele în vigoare [38,39,93] prevăd și luarea de măsuri de protecție exterioară.



**Fig.35** - Bobina de stingere racordată la punctul neutru al unui transformator de putere cu măsuri constructive suplimentare de protecție.

Se desprinde concluzia că nu se pun probleme deosebite privind influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere în cazul supratensiunilor atmosferice.

În principiu, saturația conduce la micșorarea inductivității spirelor și deci influențează asupra repartiției finale a undelor de supratensiune, dacă nu se iau măsuri de protecție împotriva acestora, constructive și de montaj.

./.

4. INFLUENȚA HISTEREZEI MAGNETICE ASUPRA FUNCȚIONĂRII BOBINEI DE STINGERE.

În capitolul 2 s-a arătat cum se reflectă histereza magnetică în parametrii bobinei de stingere și s-au stabilit relații care să permită evidențierea ei pe cale analitică.

Histereza magnetică se manifestă, într-un miez feromagnetic, prin :

- pierderi de putere activă ;
- ciclul de histerezis.

4.1. Influența pierderilor de putere activă datorită histerezei magnetice asupra funcționării bobinei de stingere.

În continuare se folosește pentru pierderile de putere activă datorite histerezei magnetice denumirea simplă de pierderi prin histerezis. Se analizează influența lor în cele două regimuri de bază de funcționare a bobinei de stingere permanent, și tranzitoriu.

4.1.1. Influența pierderilor prin histerezis în regim permanent.

Pierderile prin histerezis sînt date de relația (62), iar rezistențele echivalente, la o tensiune de alimentare dată sau un curent prin bobină dat, se calculează cu relațiile (63), (64), (65), (68), (69) și (70) :

$$\begin{aligned}
 P_h &= f \eta E_{\max}^n V & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 R_{hp} &= a' U_{\mu B}^{2-n} f^{n-1} & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 R_{hs} &= b_0 f B_{\max}^{n-2} & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 &- \text{pentru } n = 2 \text{ și frecvența de bază :} & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \quad (202) \\
 R_{hp} &= a f & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 R_{hs} &= b_0 f & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 &- \text{pentru } n=2 \text{ și o armonică oarecare } \nu & \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} \\
 R_{\nu hp} &= a \nu f & \\
 R_{\nu hs} &= b_0 \nu f &
 \end{aligned}$$

4.1.1.1. Influența pierderilor prin histerezis asupra coeficientului de amortizare.

Oricare ar fi schema de funcționare, normală sau de avarie, rețeaua compensată formînd un circuit oscilant serie sau paralel, pierderile în miezul magnetic al bobinei de stingere și deci inclusiv pierderile ~~oarec~~ prin histerezis, intervin cu o cotă parte în coeficientul total de amortizare  $d$ , dat de relația (13). Notăm cu  $d_h$  cota parte aferentă acestor pierderi. Se poate scrie :

$$d_h = \frac{1}{R_h \omega C} \quad (203)$$

În cazul unei tensiuni de alimentare date, la rezonanță paralel:

$$(d_h)_{U_{uB}} = \frac{1}{R_{hp} \omega C} = \frac{1}{a f \omega C} = \frac{1}{2 \pi a f^2 C} \quad (204)$$

, iar pentru o armonică oarecare:

$$\begin{aligned} (d_h)_{U_{\nu uB}} &= \frac{1}{R_{\nu hp} \omega_{\nu} C} = \frac{1}{a \nu f \omega_{\nu} C} = \\ &= \frac{1}{2 \pi a \nu^2 f^2 C} \end{aligned} \quad (205)$$

În cazul unui curent dat prin bobină, la rezonanță serie:

$$(d_h)_{I_{uB}} = \frac{R_{hs}}{\omega L_B} = \frac{b_0 f}{\omega L_B} = \frac{b_0}{2 \pi L_B} \quad (206)$$

, iar pentru o armonică oarecare:

$$(d_h)_{I_{\nu uB}} = \frac{R_{\nu h1}}{\omega_{\nu} L_B} = \frac{b_0 \nu f}{\omega_{\nu} L_B} = \frac{b_0}{2 \cdot \pi \cdot L_B} \quad (207)$$

Din relațiile (204) și (205) rezultă că coeficientul de amortizare aferent pierderilor prin histerezis, în cazul circuitelor rezonante paralel, este invers proporțional cu patratul frecvenței, atât pentru fundamentală, cât și pentru o armonică oarecare. Deci în circuitele rezonante paralel amortizarea descrește repede la creșterea frecvenței.

În cazul circuitelor rezonante serie, relațiile (206) și (207) conduc la concluzia că acest coeficient este independent de frecvență, lucru deosebit de important pentru bobina de stingere privită ca generator de armonici.

#### 4.1.1.2. Influența pierderilor prin histerezis asupra dimensiunilor cuvei bobinei de stingere.

Pierderile prin histerezis influențează asupra dimensiunilor cuvei.

Calculul termic al cuvei se bazează pe relația :

$$S_{cuv} = \frac{\Delta P}{\nu_{cuv} (\gamma \alpha_{con.} + \frac{S_{rad} \alpha_{rad}}{S_{con}})} = \frac{\Delta P}{\alpha_{tot.} \nu_{cuv}} \quad (208)$$

unde :

$\Delta P$  - pierderile totale în bobină, deci inclusiv pierderile prin histerezis ;

$S_{cuv}$  - suprafața laterală a cuvei, suprafața exterioară reală ;

$S_{rad}$  - suprafața de radiație ;

$\nu_{cuv}$  - creșterea medie de temperatură a suprafeței exterioare a cuvei în raport cu temperatura mediului ambiant ;

$\gamma$  - coeficientul de corecție ;

$\alpha_{con.}$  și  $\alpha_{rad}$  - coeficienții de transmisie a căldurii prin convecție și radiație.

Se observă că dimensiunile suprafeței cuvei sînt direct proporționale cu pierderile din bobină, deci inclusiv cu pierderile prin histerezis. Din punct de vedere economic este bine ca dimensiunile cuvei să fie cît mai mici.

#### 4.1.2. Influența pierderilor prin histerezis în regim tranzitoriu de funcționare.

Din relația (186) se observă că în măsură ce coeficientul  $\varphi$ , proporțional cu rezistența echivalentă  $R_{es}$  din fig.31, re-

zistență în care sînt incluse toate pierderile, deci inclusiv cele prin histerezis în bobina de stingere, este mai mare, ponderea termenului care conține pe  $H$  este mai mare prin comparație cu ponderea termenilor care conțin derivate sau integrale ale mărimilor  $H$  și  $B$ , generatoare de elemente de neproportionalitate. Dacă  $\varphi \rightarrow \infty$  pentru un  $\omega$  dat, termenii  $\frac{dB}{d\varphi}$  și  $\int H d\varphi$  tind spre zero.

Se trage concluzia că pierderile prin histerezis în regim tranzitoriu au un efect de limitare a valorii mărimilor variabile prin salturi din circuitul electric format, ceea ce are un efect pozitiv asupra funcționării bobinei de stingere.

#### 4.2. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere.

Din fig.16 se observă că ciclul de histerezis conduce la deformări ale curbei curentului, chiar atunci cînd fluxul are o variație în timp sinusoidală. Cu cît această deformare a curbei curentului este mai mare, cu atît numărul și valoarea armonicilor de ordin superior este mai mare.

În continuare, se analizează influența ciclului de histerezis în cele două regimuri de funcționare de bază ale bobinei de stingere, permanent și tranzitoriu.

##### 4.2.1. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere în regim permanent.

În capitolul 2, în care s-au analizat parametrii bobinei de stingere, s-au stabilit relații care permit calculul armonicii de ordin  $n$ , generată de ciclul de histerezis.

Relația (103) permite stabilirea influenței ciclului de histerezis asupra caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere pentru un regim oarecare periodic, permanent, de funcționare.

Relațiile (106) permit calculul măririi armonicilor generate de acest ciclu în cazul cînd fluxul magnetic al bobinei de

stingere are o variație sinusoidală. Se observă că atunci când curentul bobinei de stingere conține o fundamentală și armonici de ordin superior în sinus, ciclul de histerezis contribuie cu o fundamentală în cosinus. Cu cât suprafața ciclului este mai mare, cu atât deformarea curbei curentului bobinei de stingere este mai accentuată.

#### 4.2.2. Influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere în regim tranzitoriu.

În figura 32 este dată rezolvarea grafică a ecuației diferențiale (186) pentru un caz concret. Această rezolvare are la bază valorile momentane ale lui B și H pentru oscilațiile care au loc în regim tranzitoriu.

Se observă că dacă se ține cont de ciclul de histerezis, se obțin valori diferite ale inducției B pentru aceeași valoare a cimpului magnetic H, în funcție de procesul de magnetizare, deci dacă H este în creștere sau descreștere.

Această variație a lui B în funcție de H, în cadrul unui ciclu conduce la deformări și mai accentuate ale curbelor  $\frac{dB}{d\varphi}$ , H și  $\int H d\varphi$  din fig. 32, proporționale cu tensiunea la bornele bobinei, curentul din circuit și tensiunea la bornele capacității. Deformările sînt cu atât mai mari cu cât suprafața ciclului de histerezis este mai mare.

Din considerentele de mai sus rezultă că influența ciclului de histerezis asupra funcționării bobinei de stingere în regim tranzitoriu este negativă.

#### 4.3. Concluzii privind influența histerezei magnetice asupra funcționării bobinei de stingere.

Concluziile mai importante sînt :

- histereza magnetică, prin mărirea amortizării circuitelor oscilante, rezonante sau ferorezonante, cauzată de pierderile de putere, are o influență pozitivă ;

- histereza magnetică, prin pierderile de putere, are o influență negativă asupra dimensiunilor cuvei acesteia, în sensul mării lor ;

- histereza magnetică deformează curba curentului din bobina de stingere ca urmare a prezenței ciclului de histerezis, accentuând și mai mult rolul de generator de armonici al acesteia, în regim permanent de funcționare;

- histereza magnetică deformează într-o măsură și mai mare curbele de variație a curentului și tensiunii la bornele bobinei și la bornele capacității echivalente în regim tranzitoriu de funcționare.

./.



5. INFLUENȚA CURENȚILOR TURBIONARI ASUPRA FUNCȚIONĂRII  
BOBINEI DE STINGERE.

Curenții turbionari se manifestă într-un miez feromagnetic prin :

- producerea de pierderi de putere activă ;
- mărirea efectului ciclului de histerezis .

5.1. Influența pierderilor de putere activă datorite  
curenților turbionari asupra funcționării bobinei  
de stingere.

În continuare se folosește pentru pierderile de putere activă datorite curenților turbionari denumirea de pierderi prin curenți turbionari. Se analizează influența lor în cele două regimuri de bază de funcționare a bobinei de stingere, permanent și tranzitoriu.

5.1.1. Influența pierderilor prin curenții turbionari  
în regim permanent.

Pierderile prin curenții turbionari sînt date de relația (73), iar rezistențele echivalente, la o tensiune de alimentare dată, sau un curent prin bobină dat, se calculează cu relațiile (75), (78) și (79) :

$$\begin{aligned} P_f &= \frac{K_f^2}{\rho} \cdot \Delta \cdot f^2 B_{\max}^2 v & ) \\ R_{fp} &= c^2 d & ) \\ R_{fs} &= a_0 f^2 & ) \\ R_{vfp} &= c^2 d & ) \\ R_{vfs} &= a_0 v^2 f^2 & ) \end{aligned} \quad (209)$$

./.

5.1.1.1. Influența pierderilor prin curenții turbionari asupra coeficientului de amortizare.

Ca și în cazul histerzei, pierderile prin curenții turbionari contribuie la creșterea valorii coeficientului total de amortizare. Fie  $d_f$  cota parte aferentă pierderilor prin curenții turbionari :

$$d_f = \frac{1}{R_f \cdot \omega C} \quad (210)$$

În cazul unei tensiuni de alimentare date, rezonanță paralel :

$$(d_f)_{U_{uB}} = \frac{1}{R_{fp} \omega C} = \frac{1}{c^2 d \omega C} = \frac{1}{2 \pi c^2 d f C} \quad (211)$$

sau pentru o armonică oarecare :

$$(d_f)_{U_{uB}} = \frac{1}{R_{vfp} \cdot \omega_v C} = \frac{1}{c^2 d \omega_v C} = \frac{1}{2 \pi c^2 d v f C} \quad (212)$$

În cazul unui curent prin bobina de stingere dat, rezonanță serie :

$$(d_f)_{I_{uB}} = \frac{R_{fs}}{\omega L_B} = \frac{a_0 f^2}{\omega L_B} = \frac{a_0 f}{2 \pi L_B} \quad (213)$$

sau pentru o armonică oarecare :

$$(d_f)_{I_{vuB}} = \frac{R_{vfs}}{\omega_v L_B} = \frac{a_0 v^2 f^2}{\omega_v L_B} = \frac{a_0 v f}{2 \pi L_B} \quad (214)$$

Analizîndu-se relațiile (211) și (212) se trage concluzia că acest coeficient, aferent pierderilor prin curenții turbionari în cazul circuitelor rezonante paralel, este invers proporțional cu frecvența, atât pentru fundamentală, cât și pentru o armonică oarecare.

În funcție de frecvență, efectul de amortizare al curenților turbionari este mai mare decît al histerzei magnetice, relațiile (204) și (205) .

În cazul circuitelor rezonante serie, coeficientul de amortizare este direct proporțional cu frecvența fundamentalei sau a unei armonici oarecare, lucru deosebit de important pentru prevenirea supratensiunilor. La frecvențe mari, amortizarea este mare.

5.1.1.2. Influența pierderilor prin curenții turbionari asupra dimensiunilor cuvei bobinei.

În relația de calcul termic al cuvei (174), intervin și pierderile prin curenții turbionari, ca și cele prin histerezis. Concluziile sînt aceleași, explicitate la punctul 4.1.1.2.

5.1.2. Influența pierderilor prin curenții turbionari în regim tranzitoriu de funcționare.

Influența acestor pierderi este oglindită în relația (186), iar interpretarea este cea dată la punctul 4.1.2.

5.2. Influența curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere prin mărirea efectului ciclului de histerezis.

Atît pentru regim permanent, cît și pentru regim tranzitoriu sînt valabile concluziile de la punctul 2, din capitolul 4.

Spre deosebire de histereză, curenții turbionari influențează suprafața ciclului de histerezis în funcție de frecvență și anume ciclul devine cu atît mai lat cu oît frecvența e mai mare și deci cu atît efectul de deformare a curbei curențului din bobina de stingere e mai mare. Această influență de mărire a suprafeței ciclului de histerezis, proporțional cu creșterea frecvenței, rezultă din relația (98).

5.3. Concluzii privind influența curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere.

Concluziile mai importante sînt :

- curenții turbionari, prin mărirea amortizării circuitelor oscilante, rezonante și ferorezonante, cauzată de pierderile de putere, au o influență pozitivă ;

- curenții turbionari, prin pierderile de putere, au o influență negativă asupra dimensiunilor cuvei acesteia, în sensul măririi lor ;

- curenții turbionari deformează curba curențului din bobina de stingere ca urmare a mărimii suprafeței ciclului de histerezis, accentuând și mai mult rolul de generator de armonici al acesteia, în regim permanent de funcționare ;

- curenții turbionari deformează într-o măsură și mai mare curbele curențului tensiunii la bornele bobinei și tensiunii la bornele capacității în regim tranzitoriu de funcționare.

Rolul de amortizare a circuitelor rezonante și de deformare a curbei curențului din bobina de stingere este cu atât mai mare cu cât frecvența crește, iar în cazul armonicilor, cu cât ordinul acestora este mai mare.

./•

6. CONSIDERATII PRIVIND PROIECTAREA BOBINEI DE STINGERE TININD CONT DE INFLUENȚA SATURAȚIEI, HISTEREZEI MAGNETICE SI A CURENȚILOR TURBIO- NARI ASUPRA FUNCȚIONĂRII EI.

Calculul bobinei de stingere ridică unele probleme specifice prin comparație cu calculul unui transformator de putere. Problemele esențiale nu le constituie calculul electric, termic și mecanic, comune cu cele ale unui transformator de putere, ci calculul electromagnetic, care trebuie să imbine într-o formă optimă influența mărimilor electrice și magnetice, dintr-o bobină de stingere, asupra funcționării ei, în strinsă corelare cu fenomenele care au loc într-o rețea compensată, în regim de funcționare tranzitoriu și permanent.

Condițiile mai importante pe care trebuie să le satisfacă o bobină de stingere sînt :

- asigurarea unei game de curenți de compensare corespunzătoare unui domeniu larg de scheme posibile de funcționare normală a unei rețele compensate ;

- asigurarea unui reglaj în trepte mici și pe cît posibil continuu al curentului de compensare, pentru realizarea unui anumit acord, rezonanță, sub sau supracompensare, pentru oricare din schemele de funcționare posibile ale rețelei compensate ;

Corelat cu exigențele de exploatare, se impune ca acest reglaj să se facă automat ;

- limitarea tensiunii de deplasare a neutrului, în condițiile de funcționare cele mai dezavantajoase ale unei rețele electrice compensate, în regim tranzitoriu sau permanent, cu apariția de fenomene de rezonanță sau ferorezonanță, serie sau paralel ;

- limitarea variațiilor curenților de compensare, atunci cînd au loc variații ale tensiunii de alimentare în regim normal de exploatare, pentru a nu se deregla, de la un moment la altul, acordul stabilit ;

- prevenirea apariției armonicilor de curent de ordin superior în funcționarea normală și limitarea dezvoltării lor în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare a unei bobine de stingere ;

- prevenirea sau restrângerea oscilațiilor nearmonice în regim tranzitoriu de funcționare, generatoare de variații în salturi ale mărimilor electrice și magnetice din bobina de stingere și rețeaua compensată ;

- realizarea unui utilaj electric ieftin, de dimensiuni mici, fiabil, ușor de exploatat, de întreținut și pe cât se poate mai estetic.

În cele ce urmează se scot în relief, sub formă de sinteză, concluziile ce se desprind pentru proiectare din studiul influenței saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere, iar în capitolul următor se evidențiază tehnica de calcul stabilită de autor și rezultatele obținute în strînsă corelare cu aceste concluzii.

#### 6.1. Concluzii pentru proiectare privind influența saturației magnetice.

Dacă bobina de stingere are o caracteristică de magnetizare lipsită de saturație, se realizează următoarele:

- prevenirea dereglării acordului impus în funcționarea normală, la variațiile de tensiune, inerente unei rețele electrice;

- prevenirea apariției armonicilor de curent în regim permanent de funcționare, exploatare normală și de avarie, care au ca efect deformarea curentului din rețea și pot duce la supratensiuni;

- prevenirea variațiilor în salt a mărimilor electrice și magnetice, din bobina de stingere și rețea, în regim tranzitoriu;

- prevenirea ferorezonanței serie sau paralel, în regim permanent, deci a salturilor de curenți și tensiuni la trecerea din regim de funcționare cu subcompensare în regim de funcționare cu supracompensare și invers.

O astfel de caracteristică de magnetizare, lipsită deci de saturație magnetică, este vulnerabilă în cazul funcționării rețelei compensate cu acord la rezonanță. În funcționarea de exploatare normală, tensiunile de disimetrie ce depășesc o anumită valoare,

teoretic 3,5%, pot conduce la o tensiune de deplasare a neutrului egală sau mai mare decât tensiunea pe fază a rețelei, în funcție de coeficientul de amortizare, singurul element limitator al acestei deplasări. O astfel de deplasare a neutrului devine periculoasă pentru exploatarea rețelei compensate.

În funcționarea de avarie, când tensiunea de disimetrică accidentală poate avea valori mari,  $(\frac{1}{2} \sim 1)U_f$ , tensiunea de deplasare a neutrului atinge valori de ordinul a  $(8-10)U_f$ , apropiate de supra-tensiunile atmosferice pentru rețelele de medie tensiune și mai mari decât acestea pentru rețelele de înaltă tensiune, 110 kV și mai mult.

Prevenirea apariției unor astfel de supra-tensiuni nu se poate realiza decât prin asigurarea unei anumite forme a caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere. Pentru realizarea acestei forme se folosește saturația magnetică a miezului feromagnetic.

Prin urmare pentru proiectare se desprinde concluzia că saturația magnetică trebuie să fie astfel folosită, încît, pe de o parte să se prevină o deplasare a neutrului mai mare de  $1,5 U_f$  în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare, iar pe de altă parte să se asigure o variație cît mai liniară a curentului bobinei de stingere în zona tensiunii nominale. Se consideră că o caracteristică de magnetizare este satisfăcătoare sub acest aspect dacă, la o creștere a tensiunii de alimentare pînă la 10% peste tensiunea nominală, curentul din bobina de stingere nu crește<sup>ca</sup> mai mult de 20% din curentul nominal.

#### 6.2. Concluzii pentru proiectare privind histereza magnetică.

Histereza magnetică deformează curba curentului bobinei de stingere, dînd naștere la armonici de ordin superior. În cazul alimentării bobinei de stingere cu o tensiune sinusoidală, histereza magnetică conduce la existența a două componente ale curentului de frecvența fundamentalei, în sinus și cosinus, confirmîndu-se astfel efectul de deformare al acesteia.

Pierderile prin histerezis conduc la mărirea dimensiunilor cuvei bobinei de stingere.

Efectul de amortizare în circuitele rezonante paralele este foarte slab, coeficientul de amortizare fiind invers proporțional cu pătratul frecvenței pentru fundamentală, respectiv pătratul frecvenței și pătratul ordinului aferent pentru o armonică carecure.

Efectul de amortizare în circuitele rezonante serie este independent de frecvență.

Se desprinde concluzia că histereza magnetică influențează în principiu în mod negativ funcționarea unei bobine de stingere, conducând totodată și la mărirea costului acesteia.

Prin urmare, la proiectarea miezului feromagnetic este bine să se folosească tole cu o suprafață a ciclului de histerezis cât mai mică, cât mai îngustă.

### 6.3. Concluzii pentru proiectare privind curenții turbionari.

Curenții turbionari măresc efectul de deformare a curbei curențului bobinei de stingere prin acțiunea histerezei magnetice.

Pierderile prin curenții turbionari conduc, de asemenea, la mărirea dimensiunilor cuvei bobinei de stingere.

Efectul de amortizare, în circuitele rezonante paralele este independent de frecvență, iar în circuitele rezonante serie crește cu frecvența.

Se desprinde concluzia că curenții turbionari influențează în principiu în mod negativ funcționarea unei bobine de stingere, într-o măsură însă mai mică decât histereza magnetică, întrucât coeficientul de amortizare depinde într-o măsură mai mare de pierderile prin acești curenți.

Prin urmare, la proiectarea miezului feromagnetic este bine să se folosească tole cu pierderi prin curenții turbionari cât mai mici.

Din tot ce s-a spus mai sus rezultă, ca o concluzie generală, că o bobină de stingere nu poate fi gândită fără o folosire rațională a influenței saturației magnetice asupra funcționării ei pe de o parte, iar pe de altă parte că histereza magnetică și curenții turbionari trebuie să fie priviți ca elemente inerente existenței



- 111 -

miezului feromagnetic, cu tendință de limitare a efectelor acestora.

./.

## 7. PROIECTAREA, CONSTRUCTIA SI PROBAREA BOBINEI DE STINGERE.

Proiectarea unei bobine de stingere este o problemă complexă, care comportă o pregătire prealabilă, aferentă stabilirii mărimilor nominale ale acesteia [2,3] .

Proiectarea bobinei de stingere are la bază trei grupe de calcule distincte și anume :

- electromagnetice ;
- termice ;
- mecanice.

În cele ce urmează se prezintă numai calculele electromagnetice și se insistă asupra acelor elemente care sînt un rezultat direct al concluziilor privind influența saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere.

### 7.1. Realizări constructive de bobine de stingere.

Se construiesc în țară și străinătate două tipuri de bobine de stingere și anume :

- cu ploturi fixe ,cu comutare: fără tensiune ;
- cu reglaj sub sarcină.

Bobinele de stingere cu reglaj sub sarcină sînt realizate în două variante constructive și anume :

- cu comutator de ploturi sub sarcină ;
- cu reglaj continuu al curentului.

#### 7.1.1. Bobine de stingere cu ploturi fixe.

La aceste bobine de stingere reglajul curentului se face în trepte, cu scoaterea lor de sub tensiune. Prezintă dezavantajul că nu permit realizarea unui acord perfect, la rezonanță, decît

./.

în cazurile în care curenții nominali ai ploturilor sînt egali, ca valoare, cu curenții capacitivi ai rețelei compensate.

Acesta este tipul de bobine care s-au construit, atît la noi în țară cît și în străinătate, în prima fază de folosire a lor la compensarea curenților capacitivi din rețelele electrice.

În fig.36 sînt date cîteva tipuri reprezentative de miezuri feromagnetice, iar în fig.37 este dat ultimul tip de construcție de înfășurare pentru astfel de bobine de stingere.

Miezul din fig.36 a face parte din primele realizări și s-a folosit în Germania, Elveția și alte țări, cel din fig. 36 b a fost folosit de Electroputere Craiova, iar cel din fig.36 c face parte din ultimele realizări pentru bobinele de stingere cu ploturi fixe, folosit în deosebi în țările europene.

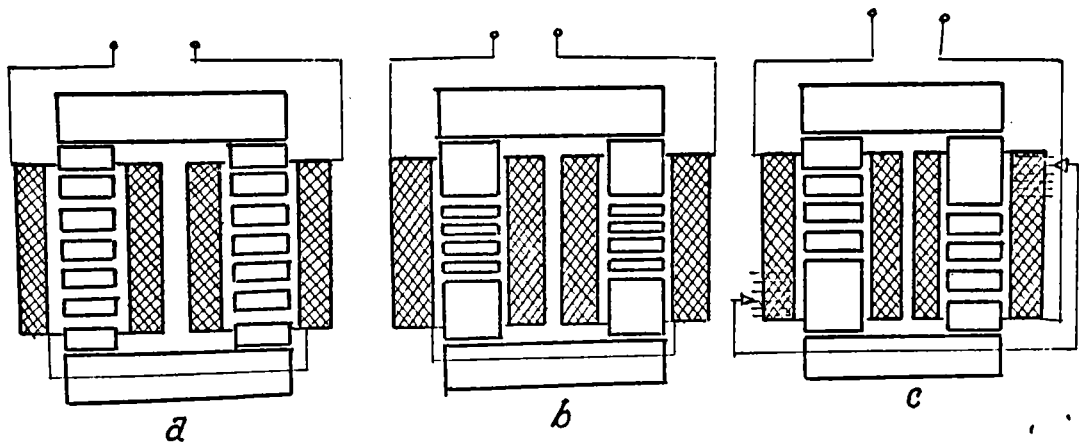


Fig.36 - Construcții de miezuri feromagnetice pentru bobinele de stingere cu ploturi fixe.

./.

Infășurarea din fig.37 este stratificată și astfel gândită încît partea de reglare, cuprinsă între două ploturi succesive, să formeze unul sau mai multe straturi complete. Este folosită la executarea bobinelor de stingere aferente rețelelor de 110 și 220 kV [2,3].

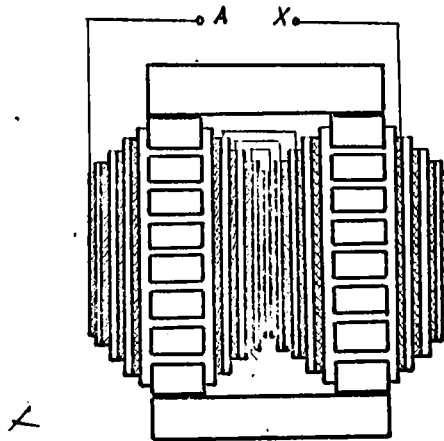


Fig.37 - Execuția stratificată a infășurării bobinei de stingere.

#### 7.1.2. Bobine de stingere cu reglaj sub sarcină

Bobinele de stingere cu comutator de ploturi sub sarcină diferă de cele cu ploturi fixe descrise la punctul precedent numai prin construcția comutatorului. Comutator folosit la aceste bobine are la bază același principiu de funcționare ca și cel folosit la transformatoarele de putere cu reglaj sub sarcină și asigură reglajul în trepte, cu bobina în funcțiune.

./.

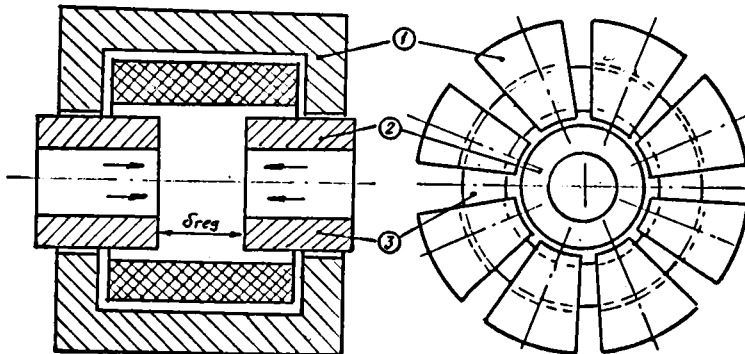


Fig.38 - Bobina de stingere cu reglaj continuu cu două plonjoare și miezuri multiple în formă de U.

- 1 - partea fixă a miezului feromagnetic ;
- 2 - partea mobilă a miezului feromagnetic, plonjoarele;
- 3 - înfășurarea;  $\delta_{reg}$  - întrefierul reglabil.

Pentru bobinele de stingere cu reglaj continuu al curentului, sub sarcină, ca realizare constructivă, sau elaborat trei soluții și anume :

- folosirea submagnetizării (demagnetizării) în curent continuu ;
- folosirea unei înfășurări mobile;
- folosirea miezului feromagnetic cu întrefier reglabil.

Cele mai răspândite sînt cele cu miez feromagnetic cu întrefier reglabil.

În fig.38 este dată o secțiune printr-o astfel de bobină, utilizată în RSC, URSS și la noi în țară. Plonjoarele mobile 2 execută o deplasare în sensuri opuse, mărind sau micșorînd întrefierul  $\delta_{reg}$ , în condiții de perfectă simetrie. În felul acesta s-au realizat bobine de stingere cu raportul valorilor extreme ale curenților,

$\frac{I_{max}}{I_{min}}$ , de 5:1 la noi în țară și 10:1 în alte țări.

## 7.2. Calculul electromagnetic al bobinei de stingere.

Calculul electromagnetic nu este tratat în mod unitar în literatura de specialitate [2,3,49,51]. Astfel, după Willheim R. și Waters M. [3], calculul unei bobine de stingere se face plecându-se de la expresiile analitice ale celor patru fluxuri parțiale,  $\Phi_i$ ,  $\Phi_c$ ,  $\Phi_{mr}$  și  $\Phi_g$  din fig.11, în funcție de elementele constructive ale acesteia.

Expresiile analitice ale celor patru fluxuri parțiale [2,3] conțin, pe lângă solenația bobinei de stingere, mărimi privind unele dimensiuni fizice ale miezului feromagnetic și înfășurării. Se consideră solenația ca mărime necunoscută, iar dimensiunile fizice ale miezului feromagnetic se stabilesc, într-o primă aproximație, prin comparație cu cele ale bobinelor de stingere executate, cu date nominale apropiate. Folosindu-se, în aceste condiții, două din legile de bază ale electrotehnicii, legea circuitului magnetic și legea inducției electromagnetice, se determină numărul de spire ale înfășurării. Se fac toate calculele pentru trasarea caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere și în funcție de aceste prime rezultate se reia calculul, acționându-se în deosebi asupra mărimii întrefierurilor și numărului de spire, care se reface pînă se ajunge la rezultate satisfăcătoare.

Metoda se bazează pe tatonări, iar elementele constructive ale bobinei de stingere se definitivează în baza probelor pe stand, cînd se mai fac ultimele corecturi privind, în deosebi, întrefierurile.

Remarcăm faptul că nu se pleacă de la o caracteristică de magnetizare anumită, ci de la valorile tensiunii și curenților nominali ai ploturilor bobinei de stingere, iar prin mai multe încercări se stabilesc elementele constructive ale acesteia. Sînt cazuri cînd se fac modificări constructive importante cu ocazia ridicării caracteristicii de magnetizare pe standul de probe, pentru ca ea să corespundă, în limita unor abateri admisibile, condițiilor de funcționare, despre care s-a vorbit în capitolele precedente.

În cele ce urmează se prezintă o metodă originală privind calculul electromagnetic al bobinei de stingere, care pleacă de la o caracteristică de magnetizare gândită, dată, în cazul nostru de la caracteristica de magnetizare ideală, fig.25.

7.2.1. Calculul electromagnetic al bobinei de stingere plecând de la o caracteristică de magnetizare dată.

Din capitolele 3,4, și 5 s-a desprins concluzia că o bobină de stingere trebuie să fie gândită nu numai pentru a asigura compensarea curenților capacitivi dintr-o rețea în cazul unei simple puneri la pământ, ci și pentru a asigura condiții de funcționare optime, în regim normal sau în regim de avarie, în sensul prevenirii apariției unor supratensiuni interne periculoase ca urmare a formării unor circuite oscilante, rezonante sau ferorezonante, serie sau paralel și în sensul prevenirii prezenței unor armonici de curent de valoare mare în curentul rezidual de punere la pământ, care, în concepția de până în prezent, aproape generalizată, de netratare a lor, ar înrăutăți condițiile de stingere a arcului electric.

Așa cum s-a arătat, soluția optimă o constituie realizarea unei bobine de stingere cu o caracteristică de magnetizare astfel gândită încât să corespundă cerințelor de mai sus. Această caracteristică a fost denumită ideală, iar în capitolul 3 s-a stabilit expresia analitică a ei, în mărimi raportate.

În virtutea acestei gândiri, noua metodă de calcul al unei bobine de stingere, aplicată de autor și propusă spre generalizare, pleacă tocmai de la expresia analitică a caracteristicii de magnetizare ideale, care se corelează cu datele nominale, tensiunea și curenții nominali, ale bobinei de stingere ce se proiectează.

Reluăm relația (121), care este expresia analitică, în mărimi raportate, a caracteristicii de magnetizare ideale:

$$i_{xb} = 1,01 u_{xb} - 0,01 u_{xb}^3 + 0,07 u_{xb}^5 \quad (215)$$

./.

Pentru calcul se folosesc următoarele notații:

- $N$  - numărul total de spire ale înfășurării bobinei de stingere ;
- $l_{Fe}$  - lungimea circuitului magnetic al miezului feromagnetic al bobinei de stingere, fără întrefieruri;
- $\Sigma\delta$  - lungimea totală a întrefierurilor ;
- $S_{Fe}$  - secțiunea miezului feromagnetic;
- $N_0 I_0$  - solenația de magnetizare a miezului feromagnetic, fără întrefieruri, determinată pe standul de probe, fig.20.

În fig.39 este dată construcția grafică pentru determinarea unui punct de funcționare al caracteristicii de magnetizare ideale.

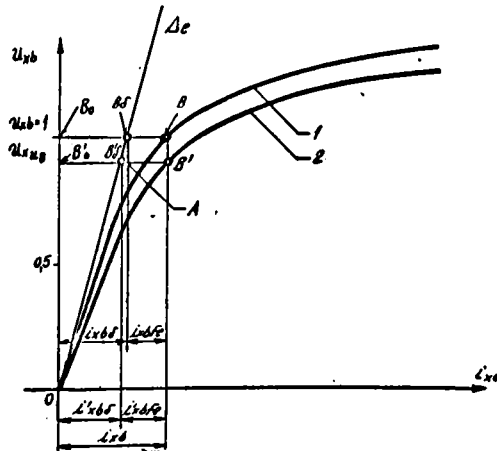


Fig.39 - Determinarea unui punct de funcționare al caracteristicii de magnetizare ideale.

În figura de mai sus s-au folosit următoarele notații:

- 1 - caracteristica de magnetizare ideală a bobinei de stingere ;



- 2 - caracteristica de magnetizare a bobinei de stingere fără considerarea fluxului de dispersie, deci corespunzătoare inductivităților  $L_{up}$  și  $L_{B\delta}$  din schema echivalentă din fig. 17 ;
- $\Delta_0$  - caracteristica inductivității  $L_{B\delta}$  din schema echivalentă din fig.17 ;
- B - un punct al caracteristicii de magnetizare ideale a bobinei de stingere, corespunzător tensiunii  $u_{xb} = 1$  ;
- $i_{xb}$  - curentul din bobina de stingere, corespunzător punctului B ;
- $i_{xb\delta}$  - curentul din bobina de stingere aferent inductivității constante  $L_{B\delta}$  , fig.17 ;
- $i_{xbFe}$  - curentul din bobina de stingere aferent inductivității variabile, în funcție de saturație,  $L_{up}$ , fig.17 ;

Curenții  $i'_{xb\delta}$  și  $i'_{xbFe}$  au aceeași semnificație și sînt aferenți punctului B' de pe caracteristica de magnetizare 2.

Bobina de stingere, prin construcția ei, are și flux de dispersie. Analizînd fig.17 și fig.39 se observă că cele două bobine, cu inductivitățile  $L_{B\delta}$  și  $L_{up}$ , în paralel, sînt alimentate cu o tensiune  $U_{uB}$  mai mică decît tensiunea de alimentare a bobinei de stingere  $U_B$ , ca urmare a căderii de tensiune în inductivitatea de dispersie  $L_d$  și rezistența serie  $R_1$ .

În construcția grafică din fig.39 s-au neglijat rezistențele echivalente, întrucît pierderile totale de putere în acestea, în condițiile nominale de funcționare, sînt cuprinse între 1 - 2% din puterea bobinei de stingere, [7,49] .

Prin punctul  $B_0$  , corespunzător tensiunii  $u_{xb} = 1$ , se duce orizontala  $B_0B$  , care intersectează caracteristica de magnetizare ideală a bobinei de stingere, curba 1, în punctul B, căruia îi corespunde curentul  $i_{xb}$  din înfășurarea acesteia. Punctul  $B_\delta$  de pe caracteristica  $\Delta_0$  împarte curentul  $i_{xb}$  în cele două componente,  $i_{xb\delta}$  și

$i_{xBFe}$ , pe care le-am definit mai sus. Prin punctul B se duce o verticală, care intersectează caracteristica 2 în punctul B'. Orizontala dusă prin B' intersectează caracteristica  $\Delta_e$  în punctul B'\_0, iar ordonata în punctul B'\_0.

Se obține astfel tensiunea  $u_{xUB}$ , care se aplică celor două bobine în paralel, cu inductivitățile  $L_{Up}$  și  $L_{B\delta}$ . Punctul B'\_0 împarte curentul  $i_{xB}$  în cele două componente  $i'_{xB\delta}$  și  $i'_{xBFe}$ , definite mai sus.

Rezultă deci, că, cunoscându-se caracteristicile 1, 2, și  $\Delta_e$ , se pot stabili curenții din bobina de stingere pentru o tensiune oarecare. Caracteristica 1 este cunoscută, fiind o caracteristică ideală și deci valabilă pentru toate bobinele de stingere. Caracteristicile 2 și  $\Delta_e$  fac legătura între caracteristica ideală și elementele constructive ale bobinei de stingere reale, ce se proiectează.

Se notează cu K raportul fluxurilor fasciculare  $\Phi_d$  și  $\Phi_t$ , fig. 11 :

$$K = \frac{\Phi_d}{\Phi_t} = \frac{\Phi_d}{\Phi_d + \Phi_{Fe}} \quad (216)$$

sau:

$$\left. \begin{aligned} \Phi_d &= K\Phi_t \\ \Phi_{Fe} &= (1-K)\Phi_t \end{aligned} \right\} \quad (217)$$

Se notează cu  $I_B$ ,  $I'_{B\delta}$  și  $I'_{BFe}$  valorile eficace ale curenților din bobină de stingere, bobina cu inductivitatea  $L_{B\delta}$  și bobina cu inductivitatea  $L_{Up}$  din schema echivalentă din fig. 17.

Din legea inducției electromagnetice și legea circuitului magnetic [12, 14] se deduc următoarele relații pentru bobina de stingere :

$$\left| \begin{aligned} \Phi_t &= \frac{\sqrt{2}U_B}{\omega N} \\ H_{\delta} \sum \delta_1 &= \frac{B_{\delta}}{\mu_0 \mu_{r \text{ aer}}} \sum \delta_1 = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \sum \delta_1, \end{aligned} \right. \quad (218)$$

intrucît pentru aer  $\mu_r = 1 + 0,4 \cdot 10^{-6} \sim 1$  [14]

și deci:

$$H_{\delta} \sum \delta_i = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \sum \delta_i = N \sqrt{2} I'_{B\delta} \quad (219) \checkmark$$

$$\frac{B_{Fe}}{\mu_0 \mu_{rFe}} \cdot l_{Fe} = \theta_{Fe} = N \sqrt{2} I_B - N \sqrt{2} I'_{B\delta} =$$

$$= N \sqrt{2} (I_B - I'_{B\delta}) = N \sqrt{2} I'_{BFe} \quad (220)$$

$$\frac{B_{Fe}}{\mu_0 \mu_{rFe}} \cdot l_{Fe} = N_0 \sqrt{2} I_0 \quad (221) \checkmark$$

$$B_{Fe} S_{Fe} = \Phi_{Fe} \quad (222)$$

Calculul se face pentru tensiunea nominală a bobinei de stingere ce se proiectează. Se alege o anumită valoare pentru inducția magnetică din miezul feromagnetic, cuprinsă între 14.000 și 15.000 G<sub>s</sub> pentru tolele obișnuite și o anumită valoare pentru inducția magnetică din întrefieruri, cuprinsă de regulă între 7000-9000 G<sub>s</sub>. Se stabilește o anumită valoare pentru coeficientul K. Din practica de proiectare și execuție de până în prezent acest coeficient are valoarea cuprinsă între 0,08 și 0,12.

Se admite o anumită mărime a suprafeței secțiunii miezului feromagnetic, în zona coloanelor acestuia, comparativ cu realizări constructive similare. Din relația (222) se obține fluxul fascicular  $\Phi_{Fe}$ , iar din cea de a doua relație (217) se determină fluxul fascicular  $\Phi_t$ . Cunoșcîndu-se astfel  $\Phi_t$ , din relația (218) rezultă N, tensiunea fiind dată.

Ecuatia dreptei  $\Delta_e$ , conform relației (116), este:

$$i_{xb} \Delta_e = a_1' u_{xb} = 1,01 u_{xb} \quad (223)$$

$a_1'$  avînd valoarea 1,01 pentru caracteristica de magnetizare ideală, așa cum rezultă din relațiile (120). Pentru  $u_{xb} = 1$ , avem:

$$i_{xb} \Delta_e = 1,01 \cdot 1 = 1,01 \quad (224)$$

./.

Mărimea  $i_{xb} \Delta e$  astfel stabilită are ca și corespondent în fig.39 segmentul  $B_0 B_\delta$ . Din aceeași figură rezultă:

$$BB' = \Delta u_{xb} = K u_{xb} \quad (225)$$

$$AB'_\delta = BB' \frac{1}{a'} = \frac{K u_{xb}}{a'} = \frac{K u_{xb}}{1,01} \quad (226)$$

și deci:

$$B'_\delta B' = AB'_\delta + AB' = AB'_\delta + B_0 B - B_0 B_\delta =$$

$$\frac{K u_{xb}}{1,01} + i_{xb} - i_{xb} \Delta e = i'_{xb} B'e \quad (227)$$

Pentru  $u_{xb} = 1$ , tensiunea nominală, relația (227) devine:

$$\begin{aligned} i'_{xb} B'e &= \frac{K}{1,01} + (1,01 - 0,01 + 0,07) - 1,01 = \\ &= \frac{K}{1,01} + 0,06 \end{aligned} \quad (228)$$

sau:

$$I'_{nB'e} = I_{nB} \left( \frac{K}{1,01} + 0,06 \right) \quad (229)$$

și :

$$I'_{nB\delta} = I_{nB} - I'_{nB'e} \quad (230) \checkmark$$

unde indicele n arată că mărimea respectivă corespunde tensiunii nominale a bobinei de stingere.

Cu relațiile (219) și (221), (229) și (230) se stabilește lungimea medie a circuitului magnetic fără întrefieruri,  $l_{Fe}$  și lungimea totală a întrefierurilor,  $\sum \delta_i$ . În felul acesta miezul feromagnetic, inclusiv întrefierurile, are toate dimensiunile calculate.

Se verifică dacă spațiul realizat de miezul feromagnetic astfel calculat permite amplasarea înfășurării bobinei de stingere, ținând cont de dimensiunile acesteia, distanțele necesare față de masă și înfășurarea de pe coloana sau coloanele vecine. Dacă spațiul nu corespunde, calculul de mai sus se reface.

După ce s-a dimensionat și înfășurarea, se verifică valoarea coeficientului  $K$ . Dacă, în urma stabilirii dimensiunilor bobinei, înfășurării și miezului feromagnetic,  $K$  are o valoare diferită de cea adoptată inițial, întreg calculul se reface.

După câteva încercări se definitivează dimensiunile elementelor constructive de bază ale bobinei de stingere ce se proiectează, miezul feromagnetic, interfierurile și înfășurarea.

### 7.2.2. Trasarea caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere proiectate.

În acest punct se expune metoda stabilită de autor pentru calculul elementelor necesare trasării caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere proiectate, care urmează să fie comparată cu caracteristica de magnetizare ideală, respectiv cu caracteristica reală, ce urmează să fie ridicată pe standul de probe.

Cunoscându-se dimensiunile înfășurării și miezului feromagnetic se poate calcula inductivitatea de dispersie  $L_d$  din schema echivalentă din fig.17. Pentru calculul acesteia sînt date relații în literatura de specialitate [2,3,25]. În principiu nu diferă de calculul inductivității de dispersie a unui transformator de putere.

Fluxul fascicular din miezul feromagnetic, fig. 11, este dat, potrivit relațiilor (61) de expresia :

$$\Phi_{Fe} = \Phi_{\delta} + \Phi_{mr} \quad (231)$$

unde:

$$\Phi_{\delta} = S_g B_{\delta} \quad (232)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{mr} &= F dB_{\delta} \cdot \delta (0,09 + 0,73 \log \frac{h + \delta}{\delta}) = \\ &= \alpha B_{\delta} \quad (233) \end{aligned}$$

În relațiile (232) și (233) semnificația mărimilor folosite este următoarea :

$S_g$  - suprafața geometrică a miezului feromagnetic în dreptul coloanelor ;

$\delta$  - mărimea unui întrefier (întrefierurile repartizate pe coloane, sînt egale) ;

$h$  - înălțimea unui pachet de tole din care sînt formate coloanele miezului feromagnetic ;

$d$  - diametrul echivalent suprafeții  $S_g$ .

Acest diametru este dat de relația :

$$d = \sqrt{\frac{4S_g}{\pi}} \quad (234)$$

Cu aceste precizări relația (231) poate fi scrisă astfel :

$$\Phi_{Fe} = \Phi_{\delta} + \Phi_{mr} = S_g B_{\delta} + \alpha B_{\delta} = (S_g + \alpha) B_{\delta} = B_{Fe} S_{Fe} \quad (235)$$

și deci:

$$\frac{B_{Fe}}{B_{\delta}} = \frac{S_{Fe}}{S_g + \alpha} = \frac{1}{\beta}, \quad \beta > 1 \quad (236)$$

Relația (236) ne permite să calculăm inducția  $B_{Fe}$ , dacă se pleacă de la  $B_{\delta}$  și invers, întrucît coeficientul  $\beta$  este cunoscut.

Notăm cu  $U_0$  tensiunea de alimentare a înfășurării formată din  $N_0$  spire, cu care se face ridicarea caracteristicii de magnetizare a miezului feromagnetic al bobinei de stingere, fără întrefieruri, pe stand, fig. 20.

Din aplicarea legii inducției electromagnetice se obține :

$$\Phi_{Fe} = \frac{\sqrt{2}U_0}{\omega N_0} \quad (237)$$

Potrivit relațiilor (220) și (221) se poate scrie :

$$I'_k \frac{B_{Fe}}{\mu_0 \mu_{rFe}} = N \sqrt{2} I'_{BFe} = N_0 \sqrt{2} I_0 \quad (238)$$

și deci:

$$I'_{BFe} = I_0 \frac{N_0}{N} \quad (239)$$

iar din relația (219) rezultă:

$$I'_{B\delta} = \frac{B\delta \sum \delta_i}{\mu_0 \sqrt{2N}} \quad (240)$$

și deci:

$$(I_B)_1 = I'_{BFe} + I'_{B\delta} \quad (241)$$

Cu aceste precizări putem calcula elementele necesare trasării caracteristicii de magnetizare. Se întocmește tabela 3. În această primă fază de calcule se neglijează căderea de tensiune în inductivitatea de dispersie  $L_d$  și rezistența înfășurării  $R_1$ .

Tabela 3

No. crt.	Mărimea	$U_{xb}$									
		0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
1.	$B\delta$										
2.	$B_{Fe}$										
3.	$\Phi_{Fe}$										
4.	$U_0 = \frac{\omega N_0}{\sqrt{2}} \Phi_{Fe}$										
5.	$I_0$ - cettit										
6.	$I'_{BFe} = I_0 \frac{N_0}{N}$										
7.	$I'_{B\delta} = \frac{B\delta \sum \delta_i}{\mu_0 \sqrt{2N}}$										
8.	$(I_B)_1 = I'_{BFe} + I'_{B\delta}$										

In tabela de mai sus  $(I_B)_1$  este curentul din bobina de stingere calculat intr-o primă fază, cu neglijarea căderii de tensiune în inductivitatea de dispersie  $L_d$  și rezistența înfășurării  $R_i$ , schema echivalentă din fig.17. Cu aceste prime valori ale curentului din bobina de stingere se calculează căderea de tensiune de mai sus și astfel se obține tensiunea  $U_{uB}$  din aceeași schemă, care va permite un calcul mai exact al curentului din bobină în funcție de tensiunea de alimentare  $U_B$ .

In tabela 4 este dată sinteza acestui calcul.

Tabela 4.

No. crt.	Mărimea	$U_{xb}$													
		0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5				
1.	$R_i$														
2.	$L_d$														
3.	$Z_d = \sqrt{R_i^2 + (\omega L_d)^2}$														
4.	$(I_B)_1$ (din tabela precedentă.)														
5.	$\Delta U_d = (I_B)_1 Z_d$														
6.	$U_{uB} = U_B - \Delta U_d$														
7.	$B_\delta$														
8.	$B_{Fe}$														
9.	$\phi_{Fe}$														
10.	$U_o = \frac{\omega N_o}{\sqrt{2}} \phi_{Fe}$														
11.	$I_o$ - cetit.														
12.	$I''_{BF_e} = I_o \frac{N_o}{N}$														
13.	$I''_{B_\delta} = \frac{B_\delta \sum \delta_i}{\mu_o \sqrt{2N}}$														
14.	$(I_B)_2 = I''_{BF_e} + I''_{B_\delta}$														

./.



Din practica de proiectare a rezultat că nu sînt necesare mai mult decît două reveniri pentru a se obține valori ale curentului din bobina de stingere foarte apropiate de cele reale, măsurate pe standul de probe.

Se trasează caracteristica de magnetizare și dacă nu sînt satisfăcute condițiile impuse prin caracteristica de magnetizare ideală, fig. 25, se reface calculul de la punctul 7.2.1., acționîndu-se de regulă asupra mărimii întrefierurilor.

Se observă că metoda de proiectare a unei bobine de stingere expusă prezintă marele avantaj de a nu necesita executarea ei în întregime, inclusiv uscarea și corectarea dimensiunilor după ce se fac probele pe stand, ci este suficientă numai executarea miezului feromagnetic, toate modificările constructive necesare fiind deduse pe cale de calcul.

Pe parcursul expunerii metodei s-a accentuat asupra faptului că este bazată pe schemele echivalente ale bobinei de stingere analizate în capitolul 2 și pe concluziile trase în capitolele 3, 4 și 5 privind influența saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării acesteia.

Metoda de calcul expusă a fost verificată de autor cu ocazia proiectării mai multor bobine de stingere pentru rețele de 6,25 și 35 kV. În capitolul următor se prezintă rezultatele obținute.

### 7.3. Inercarea bobinei de stingere.

În țară nu sînt încă normative specifice pentru incercarea bobinelor de stingere în timpul și la terminarea fabricației. Normativul 3-El-67, elaborat de Ministerul Energiei Electrice în anul 1967 stabilește încercările ce se fac, condițiile și limitele în care trebuie să se înscrie rezultatele acestora, în cazul unei bobine de stingere pregătită pentru a fi dată în exploatare, sau după o revizie periodică, respectiv o reparație capitală. Normativul PE-116/1973, elaborat de același minister în anul 1973 și care înlocuiește normativul 3-El-67 are practic același conținut cu privire la bobinele de stingere.

gi anume ; Două încercări sînt specifice bobinei de stingere

- ridicarea experimentală a caracteristicii de magnetizare ;
- funcționarea de durată în sarcină, sub acțiunea curentului maxim.

### 7.3.1. Ridicarea experimentală a caracteristicii de magnetizare.

În fig.40 este dată schema folosită pentru ridicarea experimentală a caracteristicii de magnetizare. Bobina de stingere din schemă este prevăzută cu înfășurare de măsură (tensiune).

Sursa de energie electrică trebuie să permită variația tensiunii de alimentare în limitele (0,5-1,5)  $U_n$ . Sursa de alimentare poate fi un generator de curent alternativ funcționând pe bare separate. În țară nu dispunem de un stand de încercări adecvat pentru astfel de lucrări.

Nu se insistă asupra tehnicii ridicării caracteristicii de magnetizare încît ea nu diferă de cea folosită în cazul unor încercări similare ale transformatoarelor de putere. Trebuie să se dea mare atenție citirii corecte și simultane a tuturor aparatelor de măsură din schemă.

./.

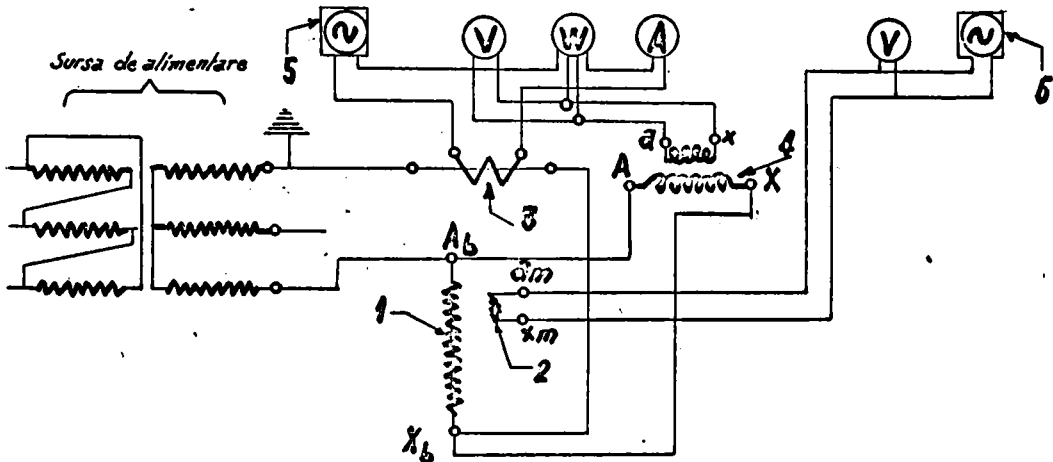


Fig.40 - Schema folosită pentru ridicarea experimentală a caracteristicii de magnetizare a unei bobine de stingere.

- 1 - înfășurarea principală a bobinei de stingere ;
- 2 - înfășurarea de măsură (tensiune) a bobinei de stingere ;
- 3 - transformatorul de curent ;
- 4 - transformatorul de tensiune;
- 5,6 - oscilografe.

Pentru cele 7 tipuri de bobine de stingere cu ploturi fixe și una cu reglaj continuu sub sarcină, proiectate de autor și executate sub îndrumare directă, încercările de mai sus s-au făcut în centrale electrice, folosindu-se ca surse de energie electrică cu tensiune reglabilă generatoare electrice ce au funcționat pe bare separate. Aparatele de măsură și transformatoarele de măsură au fost de clasele de precizie 0,2 și 0,5.

### 7.3.2. Inercarea bobine de stingere la functionarea de durată.

Schema de alimentare cu energie electrică este identică cu cea din fig.40.

Această incercare are ca scop verificarea încălzirilor locale, în deosebi în zonele în care inducția magnetică este maximă, cum sînt muchiile pachetelor de tole din care sînt formate coloanele în dreptul întrefierurilor și a bobinei de stingere primită în ansamblu ca un utilaj electric în funcțiune.

Pentru bobinele de stingere executate în țară durata de funcționare impusă este de 2 ore. Alimentarea se face cu tensiunea nominală pe plotul, în cazul bobinelor de stingere cu ploturi fixe, sau într-o poziție a miezului feromagnetic, în cazul celor cu reglaj continuu, corespunzătoare curentului maxim al acestuia.

Temperatura straturilor superioare ale uleiului s-a măsurat cu termometre cu mercur industriale, folosindu-se în acest scop locașurile special amenajate în cuva bobinei de stingere, iar temperatura în zonele cu încălziri locale s-a măsurat cu ajutorul termocuplelor.

Temperatura maximă admisibilă a straturilor superioare de ulei s-a luat, prin comparație cu prevederile standardelor în vigoare pentru transformatoarele de putere [102,103], de 95°C. Aceeași temperatură limită a fost admisă și pentru zonele cu încălziri locale.

În cazul bobinelor de stingere proiectate de autor nu s-a depășit această temperatură.

Celelalte măsurări, verificări, probe și încercări se vor face în condiții asemănătoare cu cele aferente transformatoarelor de putere și nu le mai analizăm.

./.

## 8. REALIZARI DE BOBINE DE STINGERE.

Studiu privind influența saturației, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinelor de stingere s-a desfășurat într-o etapă în care în cadrul I.R.E. - Ploiești s-au proiectat și executat bobine de stingere pentru rețele electrice cu tensiunea nominală de 6,25 și 35 kV, necesare întreprinderilor de rețele electrice din toată țara. La început s-au construit bobine de stingere cu ploturi fixe, fie prin proiectarea lor în întregime, fie prin re-proiectarea unor bobine existente, de fabricație străină sau E.P. Craiova, iar mai târziu s-au construit bobine de stingere cu reglaj continuu sub sarcină, într-o concepție proprie.

În condițiile de mai sus, activitatea desfășurată în cadrul I.R.E. Ploiești, pe această linie, s-a concretizat în proiectarea și realizarea a șapte tipuri de bobine de stingere cu ploturi fixe și un tip de bobină cu reglaj continuu sub sarcină, cu întrefieruri reglabile.

În continuare se prezintă câteva din bobinele proiectate și executate, care permit evidențierea modului în care s-a ținut cont de influența celor trei factori studiați asupra funcționării lor.

Primele bobine proiectate și executate nu au ținut cont de influența factorilor de mai sus în forma în care este prezentată în acest studiu, întrucât nu a fost cunoscută în totalitatea și complexitatea ei. Ultimele bobine realizate au prins o etapă de execuție când problema a fost cunoscută mai bine.

### 8.1. Realizări de bobine de stingere cu ploturi fixe

Astfel de bobine s-au realizat pentru rețelele electrice cu tensiunea nominală de 25 și 35 kV.

#### 8.1.1. Bobina de stingere de 20,2 kV, cu cinci ploturi

Bobina are următorii curenți nominali aferenți celor cinci ploturi :

$$I_{p1} = 23,2 \text{ A ;}$$

$$I_{p2} = 20,3 \text{ A ;}$$

$$I_{p3} = 16,6 \text{ A ;}$$

$$I_{p4} = 13,8 \text{ A ;}$$

$$I_{p5} = 11 \text{ A ;}$$

#### 8.1.1.1. Elemente constructive de bază.

Bobina s-a executat folosindu-se miezul unui transformator cu parametrii depășiți, de 250 KVA, 25/0,56 kV/kV.

Miezul feromagnetic este executat din tablă silicioasă de 0,35 mm grosime, laminată la cald. S-a realizat din miezul transformatorului de putere de mai sus prin înlăturarea coloanei mijlocii.

În fig.41 a sînt date dimensiunile de bază ale miezului feromagnetic, iar în fig.41 b o secțiune prin coloană.

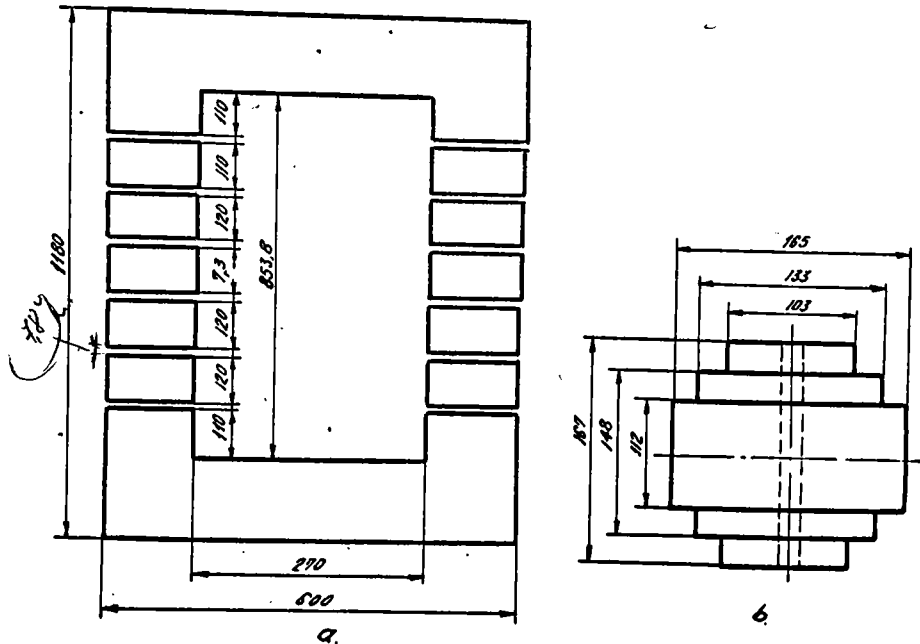


Fig.41 - Miezul feromagnetic al bobinei de stingere.

a - secțiune longitudinală prin miezul feromagnetic ;

b - secțiune prin coloană.

Miezul feromagnetic are câte 6 întrefieruri pe coloană, de 7,3 mm fiecare.

Înfășurarea principală a bobinei de stingere este realizată din conductor de cupru rotund,  $\varnothing$  2,7 mm fără izolație, respectiv  $\varnothing$  3 mm cu izolația de bumbac aferentă, execuția fiind în galeți.

Înfig.42 este dată schema înfășurării, inclusiv comutatorul de ploturi.

./.

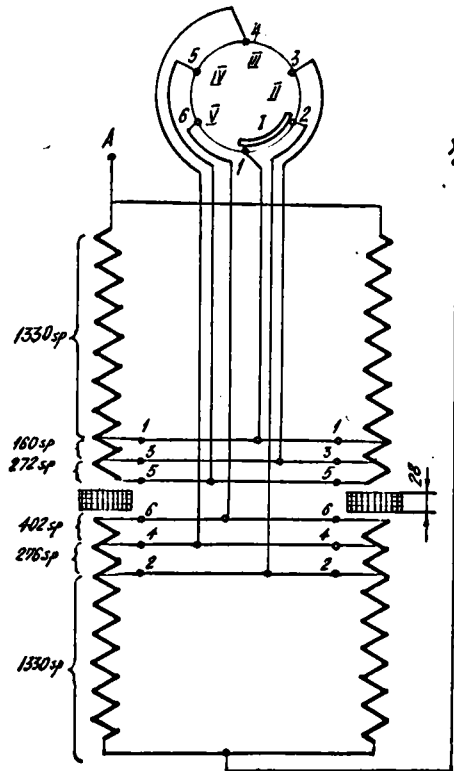


Fig.42 - Schema infăgurării bobinei de stingere.

A - borna de intrare, de racordare la nului transformatorului ;

X - borna de ieșire, de racordare la priza de pământ.

Se precizează că infăgurările de pe cele două coloane se leagă în paralel, încît nu s-a dispus, la timpul respectiv, de conductor de cupru de secțiunea necesară. Partea de reglaj este dispusă la mijlocul coloane, cele două jumătăți de infăgurare, pe fiecare coloană, fiind separate printr-un inel de pertinax în grosime de 28 mm.



Bobina de stingere este prevăzută cu o înfăgurare de tensiune de 100 V. Răcirea este asigurată prin circulație naturală de ulei.

### 8.1.1.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.

În fig.43 este dată construcția grafică a caracteristicilor de magnetizare pentru cele cinci ploturi, respectiv cei cinci curenți nominali ai bobinei de stingere.

Se observă că deplasările maxime posibile ale neutrilor, în regim permanent, în condițiile ruperii unei conductor la plecarea din stația de alimentare, când circuitului oscilant format și se aplica tensiunea  $\frac{U_f}{2}$ , depășesc cu puțin  $1,5 U_f$  și corespund caracteristicii de magnetizare aferente curentului minim, punctul  $A_1$ . De asemenea, se observă că punctul  $A_2$ , corespunzător acelorași condiții de funcționare de pe caracteristica de magnetizare aferentă curentului maxim, nu conduce la deplasări mai mari ale neutrilor de cca.  $(1,25 \sim 1,26) U_f$ .

Creșterea curentului bobinei de stingere, în cazul cel mai avantajos de funcționare, deci pe plotul aferent curentului maxim, este de cca. 3,8 A, la o creștere a tensiunii cu 10% peste cea nominală.

Avem :

$$\frac{3,8}{23,2} \cdot 100 = 16,5$$

Caracteristicile aferente ploturilor cu curenți nominali mici,  $I_{p3}$ ,  $I_{p4}$  și  $I_{p5}$ , sînt practic liniare pînă la tensiunea nominală, ceea ce asigură valori minime ale armonicilor de curent de ordin superior la funcționarea rețelei cu simplă punere la pământ. Pentru ceilalți curenți,  $I_{p1}$  și  $I_{p2}$ , caracteristicile au o ușoară abatere de la variația liniară în funcție de tensiune, deci

./.

pot conduce la existența unor armonici de curent de ordin superior.

Din analiza de mai sus se desprind următoarele concluzii mai importante :

- deși bobina de stingere are multe ploturi, cu un raport al curenților nominali de ordinul a 2,5, totuși, toate caracteristicile de magnetizare limiteză deplasarea neutrului rețelei, în cele mai dezavantajoase condiții de funcționare, la ( $\sim 1,5$ )  $U_f$ , prin efectul saturației magnetice, deci se corelează cu concluziile trase în capitolul 3 al studiului privind influența acesteia asupra funcționării bobinei de stingere ;

./.

Caracteristicile de  
magnetizare ale  
bobinei de stingere  
Nr. 1. - I.R.E. BACĂU

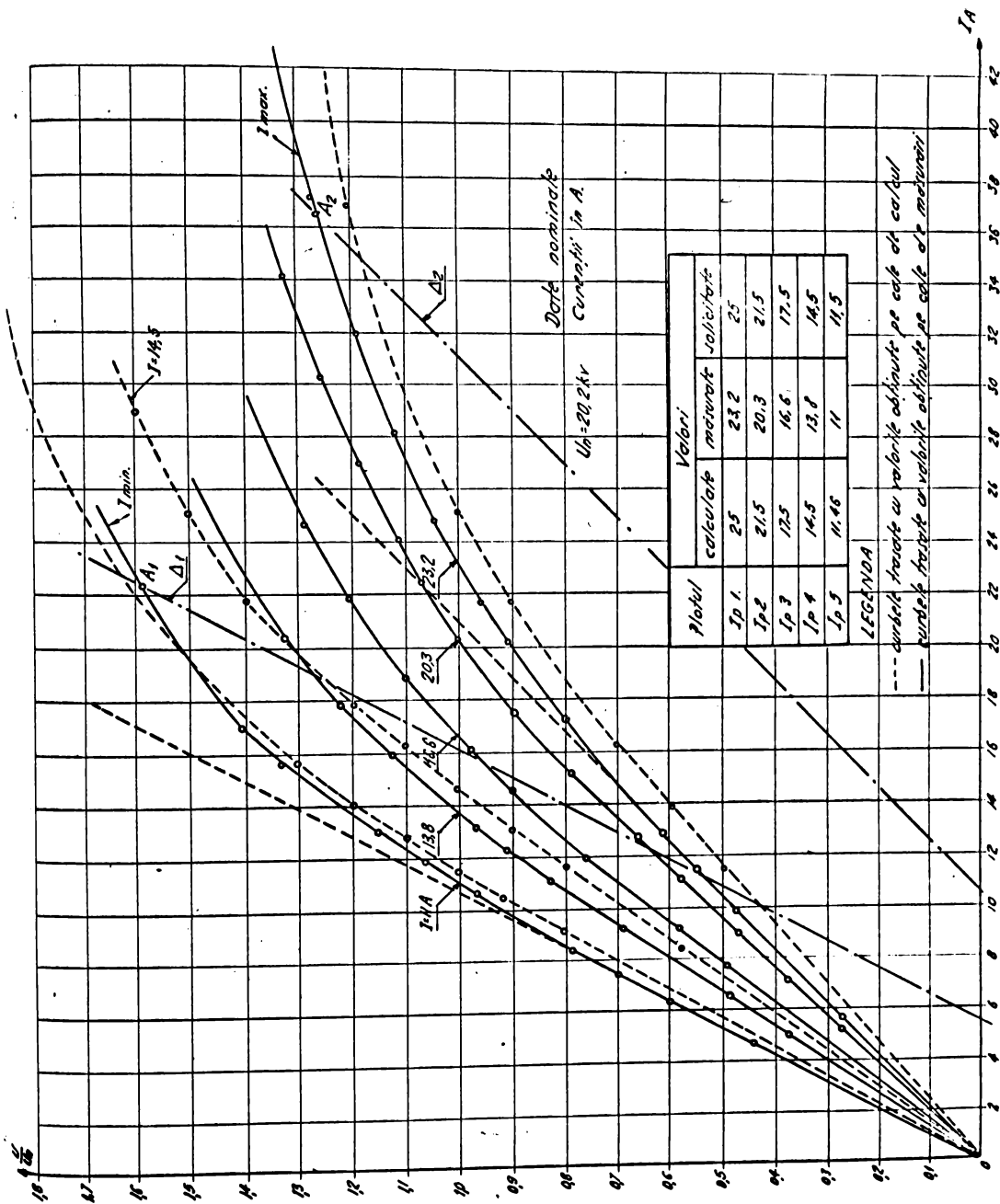


Fig. 43

- la variații ale tensiunii de alimentare cu +10% curentul din bobina de stingere crește cu aproximativ 16,5%, deci mai puțin de 20%, cît se consideră ca o limită admisibilă, așa cum s-a precizat în capitolul 3 al lucrării ;

- deși se asigură o limitare a tensiunii de deplasare a neutrlui prin folosirea fenomenului de saturație magnetică, totuși, în limita tensiunilor nominale, bobina de stingere devine generator de armonici de curent de ordin superior numai pentru doi din curenții nominali, neliniaritatea și pentru aceștia fiind relativ mică.

Bobina de stingere de mai sus este în exploatarea I.R.E. Bacău de mai mulți ani și a avut o comportare corespunzătoare în toate condițiile de funcționare.

#### 8.1.2. Bobina de stingere de 20,2 kV, cu trei ploturi

Bobina are următorii curenți nominali aferenți celor trei ploturi :

$$I_{p1} = 48 \text{ A ;}$$

$$I_{p2} = 37 \text{ A ;}$$

$$I_{p3} = 24 \text{ A.}$$

#### 8.1.2.1. Elemente constructive de bază.

Miezul feromagnetic este realizat dintr-un miez feromagnetic al unui transformator de putere casat.

În fig.44 este dată o secțiune, în plan vertical, printr-una din coloanele miezului feromagnetic. Se observă că sînt două grupe de pachete de tole, o grupă cu înălțimea de 95 mm și cealaltă grupa cu înălțimea de 142 mm. Fiecare coloană are cîte 7 întrefieruri, de 12,4 mm fiecare. Întrefierurile sînt practic repartizate pe întreaga înălțime a coloanei.

Pachetele de tole și jugurile sînt realizate din tablă silicioasă de 0,35 mm grosime, laminată la cald.

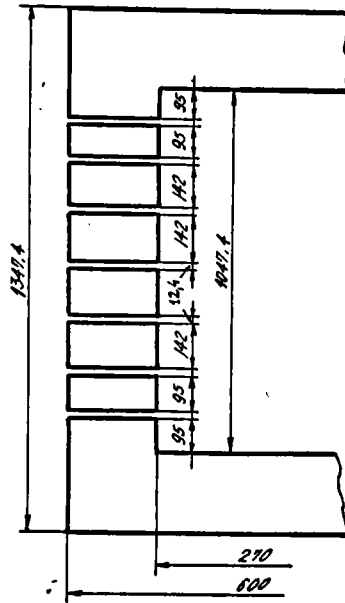


Fig.44 - Secțiunea longitudinală prin coloana bobinei de stingere.

Infășurarea principală a bobinei de stingere este realizată din conductor de aluminiu, profilat, 8x2,8 mmf fără izolație respectiv 8,5x3,4 cu izolație, execuție în galeți.

În fig.45 este dată schema infășurării, inclusiv comutatorul de ploturi. Infășurările de pe cele două coloane se înseriează. Partea de reglaj este dispusă la mijlocul coloanelor. Întrucât spirele de reglaj de pe cele două coloane au potențiale diferite, bobina de stingere este prevăzută cu două comutatoare de ploturi, izolate între ele electric și acționate simultan, printr-un az comun. Cele două jumătăți de infășurare de pe fiecare coloană sunt separate printr-un inel de pertinax de 20 mm grosime.

Bobina de stingere este prevăzută cu o infășurare de tensiune de 100 V. Răcirea este asigurată prin circulație naturală de ulei.

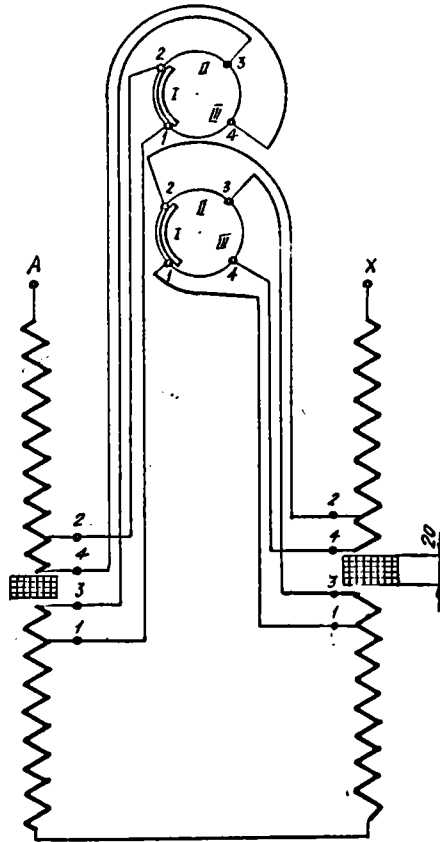


Fig.45 - Schema infăgurării bobinei de stingere.

A - borna de intrare, de racordare la nulul transformatorului ;

X - borna de ieșire, de racordare la priza de pământ.

**8.1.2.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.**

In fig.46 este dată construcția grafică a caracteristicilor de magnetizare pentru cele trei ploturi, respectiv cei trei curenți nominali ai bobinei de stingere.

./.

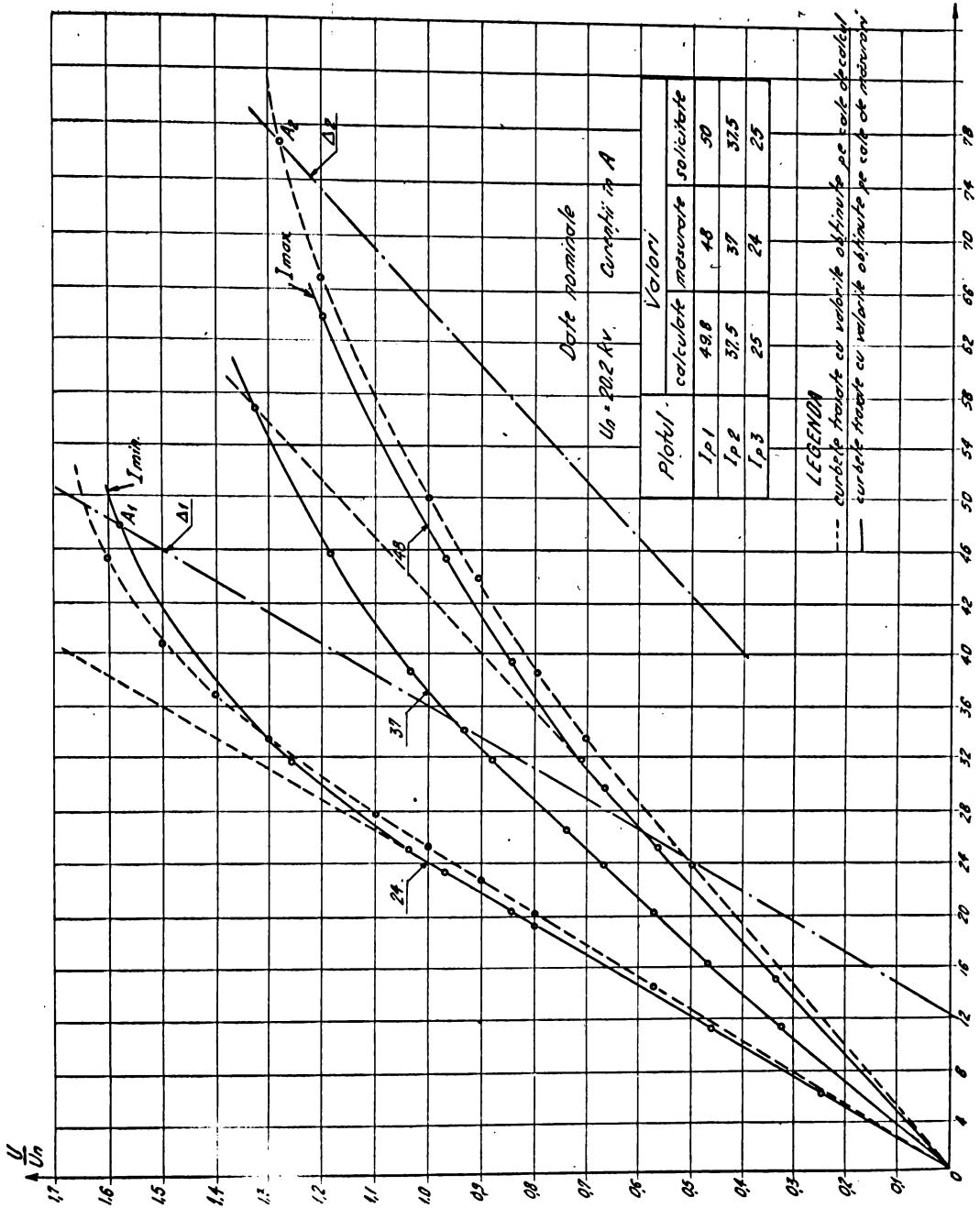
Se observă că deplasările maxime posibile ale neutrului, în regim permanent, depășesc cu puțin  $1,5 U_F$  și corespund caracteristicii de magnetizare aferente curentului minim, punctul  $A_1$ . Punctul  $A_2$ , aferent caracteristicii de magnetizare corespunzătoare curentului maxim, nu conduce la deplasări ale neutrului mai mari de  $(1,27 \sim 1,28) U_F$ .

Creșterea curentului bobinei de stingere, în cazul cel mai dezavantajos de funcționare, deci pe plotul corespunzător curentului maxim, este de cca 6,5 A, la o creștere a tensiunii cu 10% peste cea nominală.

Avem :

$$\frac{6,5}{48} \cdot 100 = 13,55 < 20\%, \text{ cît este admisibil.}$$

./.



Caracteristicile de  
 magnetizare ale  
 bobinei de slingere  
 IRE GALATI

TIMISOARA  
 BIRULETEA CENTRALA

Fig. 46



Caracteristica aferentă curentului  $I_{p3}$  este practic liniară pînă la tensiunea nominală, ceea ce asigură valori minime ale armonicilor de curent de ordin superior la funcționarea rețelei cu simplă punere la pămînt. Pentru curenții  $I_{p1}$  și  $I_{p2}$  caracteristicile de magnetizare au o abatere oarecare, pentru  $I_{p1}$  mai mare decît pentru  $I_{p2}$ , de la variația liniară în funcție de tensiune, deci pot conduce la existența unor armonici de curent de ordin superior, în anumite condiții de funcționare, simplă punere la pămînt, ruperi de conductoare fără puneri la pămînt etc.

Din analiza de mai sus se desprind concluzii asemănătoare cu cele de la punctul 8.1.1.2. și nu le mai repetăm.

Bobina de stingere de mai sus este în exploatarea I.R.E. Galați de mai mulți ani și a avut o comportare corespunzătoare în toate condițiile de funcționare.

### 8.1.3. Bobina de stingere de 22,2 kV cu cinci ploturi.

Bobina are următorii curenți nominali aferenți celor cinci ploturi:

$$I_{p1} = 25,1 \text{ A ;}$$

$$I_{p2} = 21,8 \text{ A ;}$$

$$I_{p3} = 18,6 \text{ A ;}$$

$$I_{p4} = 15,3 \text{ A ;}$$

$$I_{p5} = 12,2 \text{ A.}$$

#### 8.1.3.1. Elemente constructive de bază.

Miezul feromagnetic diferă într-o măsură mică de cel aferent bobinei de la punctul 8.12. Are pe coloană un întrefier mai puțin, iar mărimea acestora este de 8,3 mm.

Infășurarea principală a bobinei de stingere, în galeți, este realizată din conductoare de cupru,  $\varnothing 2,3$  mm, deci  $s = 4,15$  mm. Infășurările de pe cele două coloane se leagă în paralel, conform schemei din fig.47, pentru a se asigura secțiunea nece-

sară curentului maxim.

In fig.47 este dată schema înfășurării, inclusiv comutatorul de ploturi.

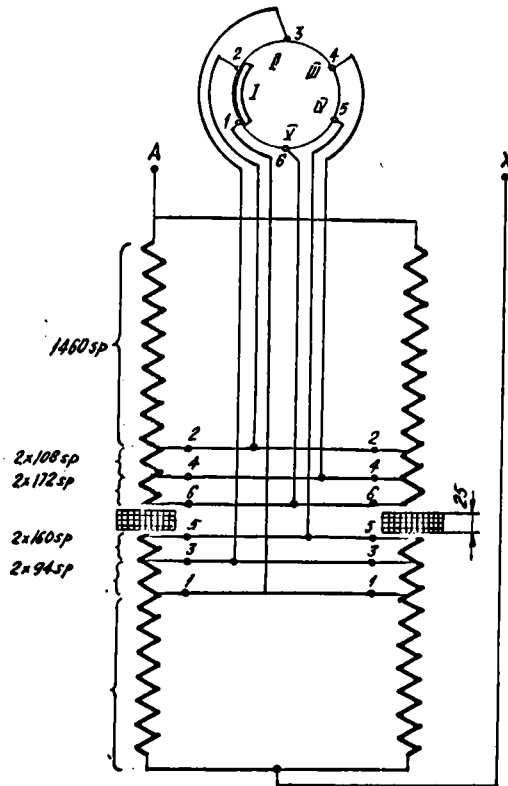


Fig.47 - Schema înfășurării bobinei de stingere.

A - borna de intrare, de racordare la  
nucleul transformatorului ;

X - borna de ieșire, de racordare la  
priza de pământ.

Partea de reglaj este dispusă la mijlocul coloanei, cele două jumătăți de înfășurare, pe fiecare coloană, fiind separate printr-un inel de pertinax în grosime de 25 mm.

Bobina de stingere este prevăzută cu o înfășurare de măsură de 100 V.

Răciria se asigură prin circulația naturală de ulei.

### 8.1.3.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.

În fig.48 este dată construcția grafică a caracteristicilor de magnetizare pentru cele cinci ploturi, respectiv cei cinci curenți nominali ai bobinei de stingere.

Din analiza punctelor  $A_1$  și  $A_2$  de pe caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere, aferente curenților minim și maxim, se trag concluzii asemănătoare cu privire la tensiunea maximă de deplasare a neutrilor în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare. Aceasta depășește cu puțin  $1,5 U_F$  în cazul funcționării pe plotul aferent curentului minim și are valoarea cuprinsă între  $(1,32 - 1,33)U_F$  în cazul funcționării pe plotul corespunzător curentului maxim.

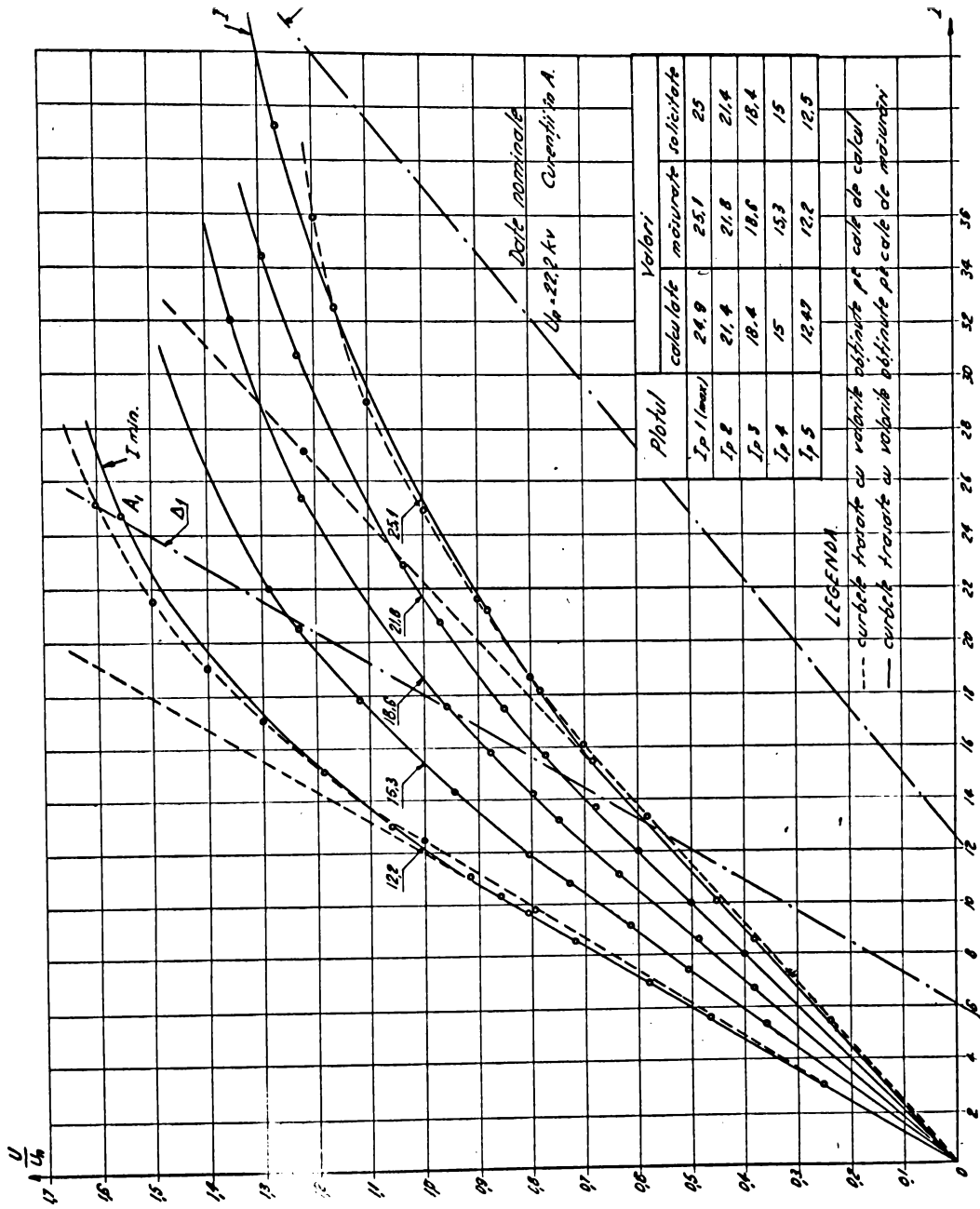
Creșterea curentului bobinei de stingere, în cazul cel mai dezavantajos de funcționare, deci pe plotul aferent curentului maxim, este de cca 4,4 A, la o creștere a tensiunii cu 10% peste cea nominală.

Avem :

$$\frac{4,4}{25,1} \cdot 100 = 17,5 < 20\%, \text{ cît este admisibil.}$$

Prin comparație cu caracteristicile de magnetizare ale bobinelor de stingere analizate la punctele precedente, cele aferente bobinei de mai sus prezintă o variație neliniară, în funcție de tensiune, pentru valori mai mici decît tensiunea nominală. Bobina de stingere analizată poate avea un caracter mai pronunțat de generator de armonici de curent de ordin superior în anumite condiții de funcționare.

./.



Caracteristicile de  
 magnetizare ale  
 bobinei de stingere  
 I.T.C. "Sfava Rosie"  
 cam. FINTINELE

Fig. 48

Intrucît, în principiu, se desprind concluzii asemănătoare cu cele de la punctul 8.1.1.2. nu le mai repetăm.

Bobina de stingere de mai sus este în exploatarea I.T.C " Steaua Roșie " Fintinele de mai mulți ani și a avut o comportare corespunzătoare în toate condițiile de funcționare.

./.

#### 8.1.4. Bobina de stingere de 22,2 kV cu șase ploturi.

Bobina are următorii curenți nominali aferenți celor șase ploturi :

$$I_{p1} = 35,4 \text{ A ;}$$

$$I_{p2} = 32,2 \text{ A ;}$$

$$I_{p3} = 27,9 \text{ A ;}$$

$$I_{p4} = 25 \text{ A ;}$$

$$I_{p5} = 20,8 \text{ A ;}$$

$$I_{p6} = 17,3 \text{ A.}$$

##### 8.1.4.1. Elemente constructive de bază.

Miezul feromagnetic diferă de cel aferent bobinei de stingere analizate la punctul 8.1.1. numai prin mărirea întrefierurilor. La această bobină sînt pe coloană tot 6 întrefieruri, în grosime însă de 12,8 mm fiecare.

Infășurarea principală este realizată din conductor de cupru profilat, 5x2,85 mm., fără izolație. Schema infășurării este la fel cu cea a bobinei analizate la punctul 8.1.1. și nu o mai repetăm. Diferă numărul de spire și construcția galeților.

Bobina de stingere este prevăzută cu o infășurare de măsură de 100 V.

Răcirea se asigură prin circulație naturală de ulei.

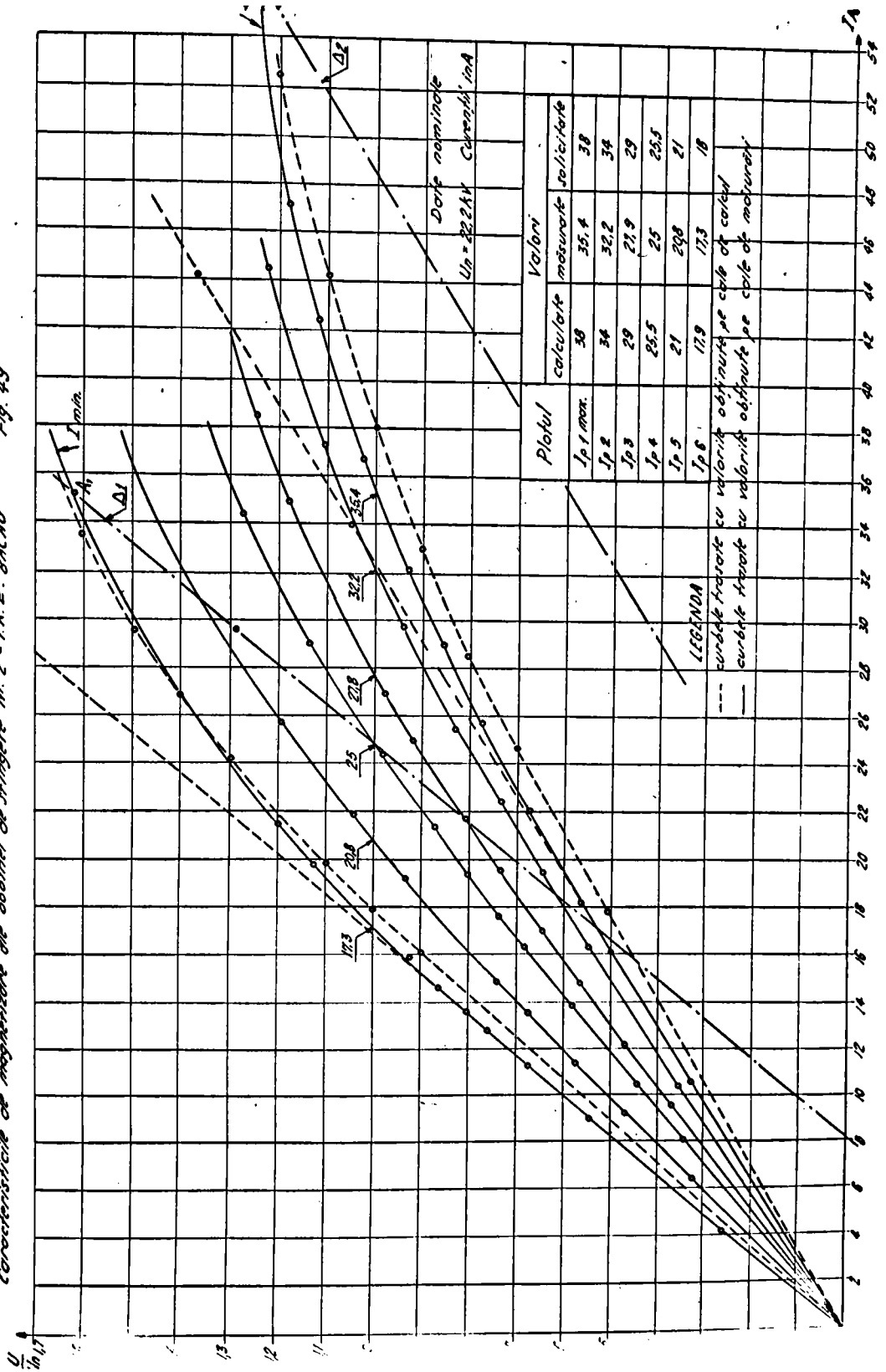
##### 8.1.4.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.

În fig.49 este dată construcția grafică a caracteristicilor de magnetizare pentru cele 6 ploturi, respectiv cei șase curenți nominali ai bobinei de stingere.

Se observă că în cazul acestei bobine de stingere tensiunea maximă de deplasare a neutrilor, în condițiile cele mai grele de funcționare și care corespunde punctului  $A_1$ , aferent caracteristicii de magnetizare de pe plotul 6, curentul minim al bobinei, este de aproximativ  $1,62 U_F$ , deci ceva mai mare decât în cazurile precedente. În cazul funcționării pe plotul aferent curentului maxim, tensiunea maximă de deplasare a neutrilor este cuprinsă între  $(1,25 - 1,28)U_F$ , deci ceva mai mică decât în cazurile precedente. Aceste diferențe față de cazurile precedente se explică prin numărul mare de ploturi, realizate cu același miez feromagnetic, cu întrefieruri constante.

./.

Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de filtrare Nr. 2 - I.R.E. BACĂU Fig. 49





Creșterea curentului bobinei de stingere, în cazul cel mai dezavantajos de funcționare, deci pe plotul corespunzător curentului maxim, este de cca 5,6 A, la o creștere a tensiunii cu 10% peste cea nominală. Avem :

$$\frac{5,6}{35,4} \cdot 100 = 15,8 < 20\%, \text{ cît este admisibil.}$$

Ca și în cazul bobinei analizate la punctul 8.1.3., caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere de față prezintă o variație neliniară, în funcție de tensiune, pentru valori mai mici decît tensiunea nominală. Deci și această bobină poate avea un caracter mai pronunțat de generator de armonici de curent de ordin superior în anumite condiții de funcționare.

Intrucît se desprind concluzii asemănătoare cu cele evidențiate la punctul 8.1.1.2 nu le mai repetăm.

Bobina de stingere de mai sus este în exploatarea I.R.E. Bacău de mai mulți ani și a avut o comportare corespunzătoare în toate condițiile de funcționare.

Celelalte bobine de stingere cu ploturi fixe, proiectate și executate, au condus practic la aceleași concluzii privind influența saturației magnetice, histerezei și a curenților turbionari. În general bobinele de stingere proiectate și executate au avut la baza realizării lor transformatoare cu caracteristici depășite, deci și cu pierderi mai mari prin histerezis și curenții turbionari. De acest lucru s-a ținut cont la dimensionarea cuvei bobinelor de stingere și s-a dat o atenție deosebită verificării încălzirii straturilor superioare de ulei. Temperatura acestora nu a depășit 95°C, așa cum prevăd normativele în vigoare pentru transformatoarele de putere.

Pentru confirmarea valabilității metodei de calcul propuse, în tabela 3 se dau curenții nominali ai ploturilor, calculați și stabiliți prin ridicarea caracteristicilor de magnetizare pe standul de probe, pentru cele șapte tipuri de bobine de stingere cu ploturi fixe. În tabelă este indicată și diferența valorilor măsurate față de cele calculate, în procente.

Tabela 3

V. Tensiunea nominală	Curentul de infășurarea bobinei de stingere, în A																		Beneficiar.			
	Plotul 1.			Plotul 2.			Plotul 3.			Plotul 4.			Plotul 5.			Plotul 6.						
	a	b	%	a	b	%	a	b	%	a	b	%	a	b	%	a	b	%				
14.600	44	42	-4,8	28	27	-3,6													I.R.E. Ploiesti			
20.200	49,8	48	-3,6	37,5	37	-1,33	25	24	-4													I.R.E. Galați
20.200	25	23,2	-7,3	21,5	20,3	-5,6	17,5	16,6	-5,1	13,8	11,5	11	-4,3					I.R.E. Bacău.				
							14,5															
21.000	33,1	31	11,8	31	35	13	23	25	8,7													I.R.E. Ploiesti
21.000	32,1	37	15,6	24,8	23,2	17,7	22,4	25,7	14,7	20	22,6	13	18	20,2	11,3					I.R.E. Ploiesti		
22.200	38	35,4	-6,8	34	32,2	-5,3	29	27,9	-3,8	25,5	25	-2	21	20,8	-0,95	17,9	17,3	-3,35	Bacău			
22.200	24,9	25	0,8	21,4	21,8	1,87	18,4	18,6	1,1	15	15,3	2	12,5	12,2	-2,4					I.C.T Steaua Roșie Fintfinele		

**Legendă:**

- a - valori calculate ;
- b - valori măsurate ;
- c - diferența, în procente.

Din analiza datelor conținute în tabela 3 se desprind câteva idei mai importante și anume :

- la două din bobinele de stingere, poz.4 și 5 , diferența între valorile calculate și cele stabilite pe standul de probe este relativ mare, cuprinsă între 8,7 și 17,7% ;

- la trei din bobinele de stingere, poz 1,3 și 6 , această diferență este mai mică, cuprinsă între trei și 7%, în medie 5%;

- la două din bobinele de stingere, poz.2 și 7, această diferență este și mai mică cuprinsă între 0,8 și 4%, în medie 2%.

Bobinele de stingere la care diferența între valorile calculate și cele efectiv măsurate este mare fac parte din primele realizări, când nu era pusă la punct nici metoda de calcul și nici tehnica de execuție și măsurări, în deosebi în ceea ce privește grosimea întrefierurilor.

Bobinele de stingere la care această diferență este mică fac parte din ultimele realizări, când metoda de calcul a fost pusă la punct. Diferențele între valorile calculate și cele măsurate includ și erorile de măsură, care, chiar în cazul unei aparaturi de clasă de precizie 0,5, pot conduce la diferențe de ordinul a 1%.

Se desprinde deci concluzia că metoda de calcul propusă este confirmată de practică și conduce la rezultate care nu au mai fost obținute de nici una din metodele de calcul date în literatura de specialitate.

./.

## 8.2. Realizări de bobine de stingere cu reglaj continuu sub sarcină.

S-a proiectat de autor și s-a realizat un tip de astfel de bobine, pentru rețelele subterane în cablu, de 6 kV. În continuare se dau detalii constructive și se analizează rezultatele obținute în proiectarea și executarea bobinei de stingere cu reglaj continuu sub sarcină, cu tensiunea nominală de 6 kV.

Bobina de stingere are următoarele caracteristici de bază :

$$U_n = \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3650 \text{ V ;}$$

$$I_n \text{ min.} = 20 \text{ A ;}$$

$$I_n \text{ max} = 50 \text{ A ;}$$

$$P = 182 \text{ KVA ;}$$

Bobina a fost proiectată și verificată pentru o durată de funcționare, la curentul maxim, de 2 ore.

### 8.2.1. Elemente constructive de bază.

Elementele constructive de bază sînt :

- miezul feromagnetic ;
- înfășurarea principală ;
- mecanismul de acționare ;
- sistemul de ghidaj ;
- înfășurarea de măsură ;
- traductorul mecanic.

Toate elementele constructive de mai sus au fost proiectate și executate din materiale corespunzătoare, ca repere noi. O secțiune prin bobină este dată în fig.50.

Miezul feromagnetic este realizat din tole de transformator laminate la cald, de 0,5 mm grosime. Este executat din două părți, cea superioară, mobilă, fig.51 și cea inferioară, fixă, fig.52.

Coloanele sînt executate în patru trepte, iar jugurile au secțiunea dreptunghiulară. Cele două părți ale miezului feromagnetic sînt executate din tole profilate, întregi fără întrefieruri de asamblare, strînse cu buloane izolate.

Din fig.51 se observă că tolele părții mobile sînt prevăzute cu ieșindurile 1, cu care se face prinderea acesteia de mecanismul de acționare. În felul acesta construcția de prindere a părții mobile este în afara zonei de acțiune a fluxului magnetic pe de o parte, iar pe de altă parte, fiind la extremitățile miezului feromagnetic, i se asigură o mare stabilitate în timpul funcționării.

Înfășurarea principală este executată din conductor profilat de aluminiu de 8 x 2,8 mm, cu izolație din hîrtie. Este de tipul înfășurărilor continue și are 320 spire pe fiecare coloană.

Înfășurarea aferentă unei coloane este executată pe tuburi din hîrtie rulată, cu grosimea peretelui de 10 mm.

Mecanismul de acționare a părții mobile a miezului feromagnetic, în vederea reglării mărimii întrefierurilor de la mijlocul celor două coloane, fig.53, este format dintr-un reductor de tipul melc-roată melcată, 1-2, cu un raport de transmisie 1:82, arborele 4, acționat de acest reductor, prevăzut la extremități cu roțile dințate conice 5, care angrenează cu roțile dințate conice 6. Acestea pun în mișcare doi tiranți cu filet patrat 7, unul cu filet stînga, iar celălalt cu filet dreapta. Cei doi tiranți antrenează construcția de susținere 8 a părții mobile a miezului feromagnetic 9, imprimîndu-i acestuia deplasarea necesară, în scopul măririi sau micșorării întrefierurilor. Melcul este antrenat de un electromotor monofazat serie cu colector de 250 W, 220 V, 2500 rot/min. La o rotație a electromotorului partea mobilă a miezului feromagnetic se deplasează cu 0,0366 mm. În felul acesta se asigură nu numai o reglare continuă sub sarcină, ci și o reglare fină a curentului din bobina de stingere.

./.

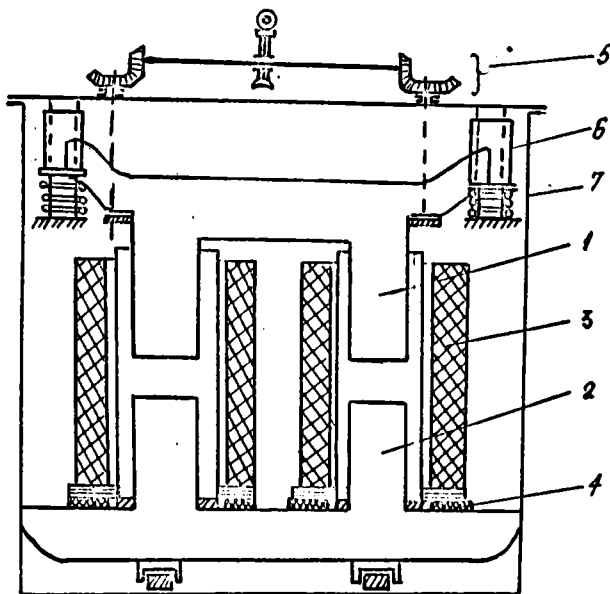


Fig.50 - Bobina de stingere cu reglaj continuu, sub sarcină.

- 1 - partea superioară, mobilă a miezului feromagnetic ;
- 2 - partea inferioară, fixă a miezului feromagnetic ;
- 3 - înfășurarea principală ;
- 4 - înfășurarea de măsură ;
- 5 - mecanismul de acționare ;
- 6 - sistemul de ghidaj ;
- 7 - cuva.

./.

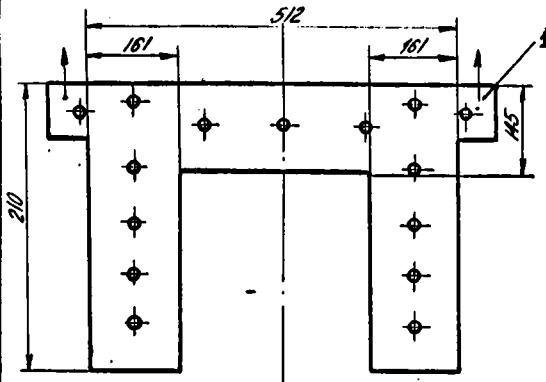


Fig. 51 - Profilul teieilor părții superioare, mobile, a miezului feromagnetic

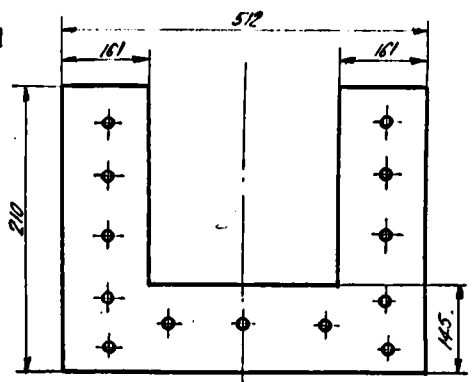


Fig. 52 - Profilul teieilor părții inferioare, fixe, a miezului feromagnetic

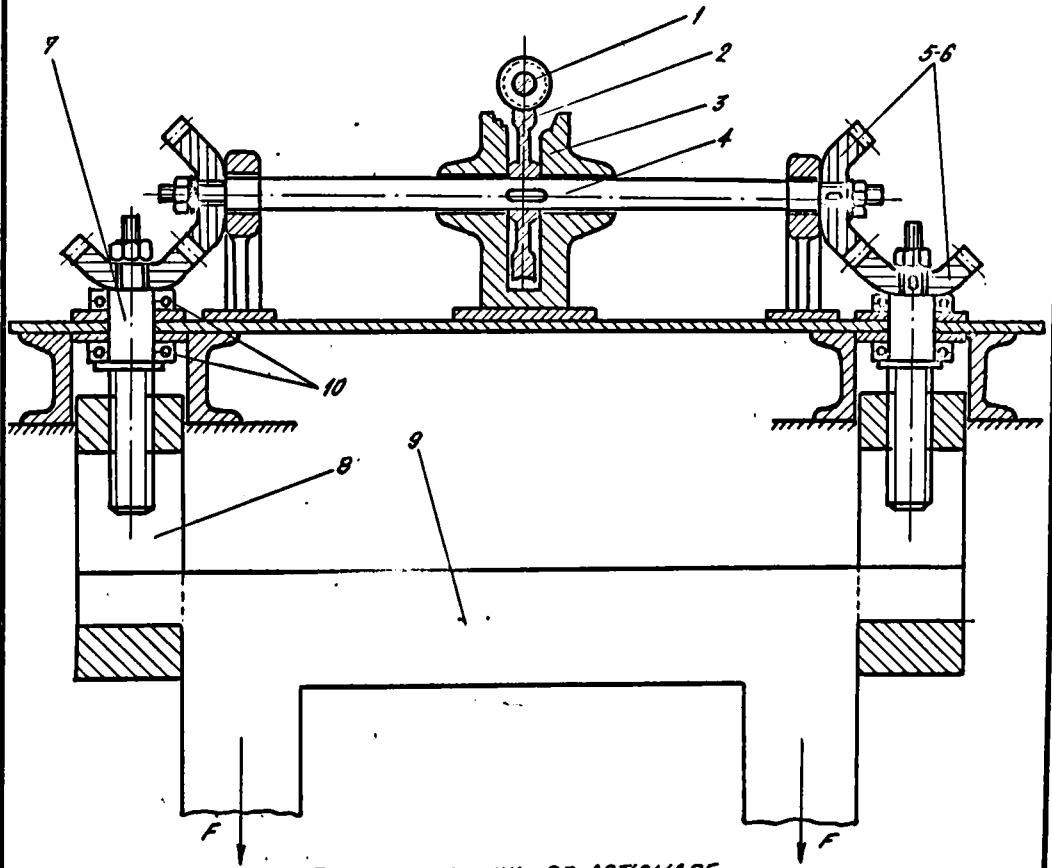


Fig. 53 - MECANISMUL DE ACȚIONARE

- 1. - Melc
- 2. - Roată melcătă
- 3. - Suportul reductorului
- 4. - Arborele mecanismului
- 5-6. - Roți dințate conice
- 7. - Tirați cu filet pătrat
- 8. - Tirați cu filet pătrat
- 9. - Partea mobilă a miezului
- 10. - Rulmenți

Sistemul de ghidaj este indicat în fig.54. Este format din tubul fix 1, pe care glisează tubul 2, rigidizat de partea mobilă a miezului feromagnetic. Tubul 2 reazemă pe resortul spirală 4, care are rolul de a ajuta electromotorul la ridicarea părții mobile a miezului feromagnetic cu bobina în funcțiune și de a amortiza vibrațiile. Jocul între cele două tuburi este de 0,1 mm pe rază, ceea ce asigură o și mai mare reducere a vibrațiilor. Tuburile sînt executate din oțel cu fețele în contact tratate termic.

Acest sistem de ghidaj este caracteristic bobinelor de strîngere executate de autor în cadrul I.R.E. Ploiești și s-a confirmat, cu ocazia probelor, a fi deosebit de eficace.

Traductorul mecanic este redat schematic în fig. 55 și fig.56. Acest traductor permite realizarea următoarelor operații:

- indicarea la distanță a curentului pentru care este reglată bobina de stingere, fără a fi pusă sub tensiune ;
- indicarea locală a valorii curentului ;
- indicarea locală a mărimii întrefierului de pe coloane ;
- întreruperea automată a alimentării electromotorului de antrenare atunci cînd se depășesc valorile limită ale curentului 15 A, respectiv 55 A.

Traductorul este montat la partea superioară a bobinei de stingere și sesizează variația întrefierului prin intermediul tijei de acționare 7, fixată de partea superioară mobilă a miezului feromagnetic.

Limitarea cursei părții mobile a miezului feromagnetic se face întrerupînd alimentarea cu energie electrică a electromotorului de acționare 8, fig.55, prin intermediul limitatorului de cursă 3, fig.55.

Indicarea la distanță a valorii curentului pentru care este reglată bobina de stingere, prin comenzi voite, înainte de avariarea rețelei în care este montată, se face electric, folosindu-se în acest scop potențiometrul 4, fig.55 și fig.56, montat pe traductorul mecanic de mai sus.



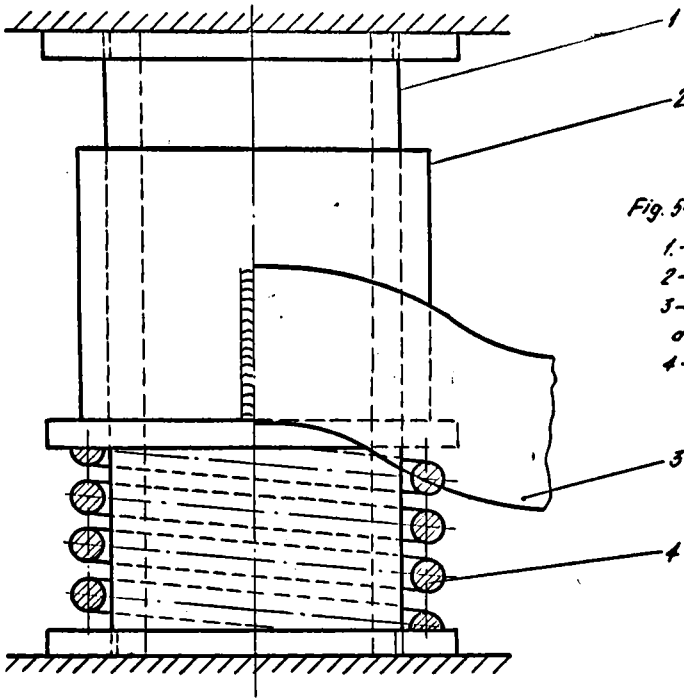


Fig. 54 - SISTEMUL DE GHIDAJ

- 1 - Tub de ghidare fix
- 2 - Tub de ghidare glisant
- 3 - Partea superioară mobilă a miezului feromagnetic
- 4 - Resort spiral

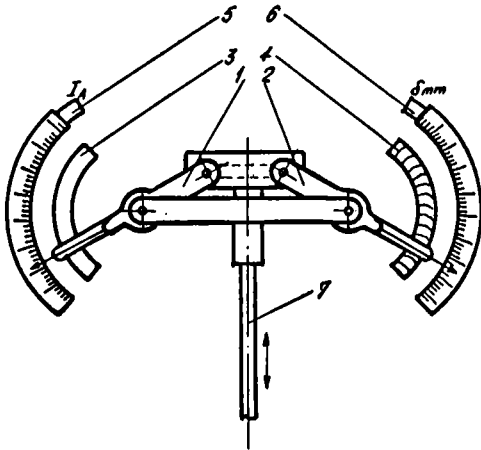


Fig. 55 - TRADUCTORUL MECANIC

- 1-2 - contacte mobile și indicatoarele locale
- 3 - limitator de cursă
- 4 - potențiomtru
- 5 - valvarea curentului din bobină
- 6 - mărirea întrefierului
- 7 - tija de acționare a traductorului mecanic

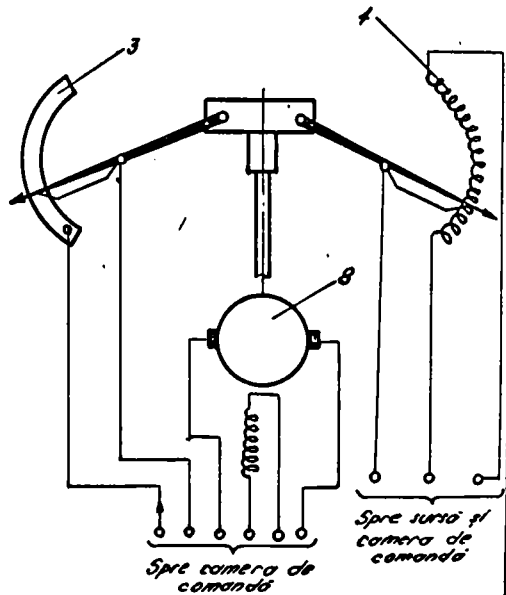


Fig. 56 - SCHEMA ELECTRICALĂ A TRADUCTORULUI MECANIC

- 3 - limitator de cursă
- 4 - potențiomtru
- 8 - electromotor de acționare

Alimentarea schemei de telemăsură a curentului cu acest potențiomtru este indicată în fig.56.

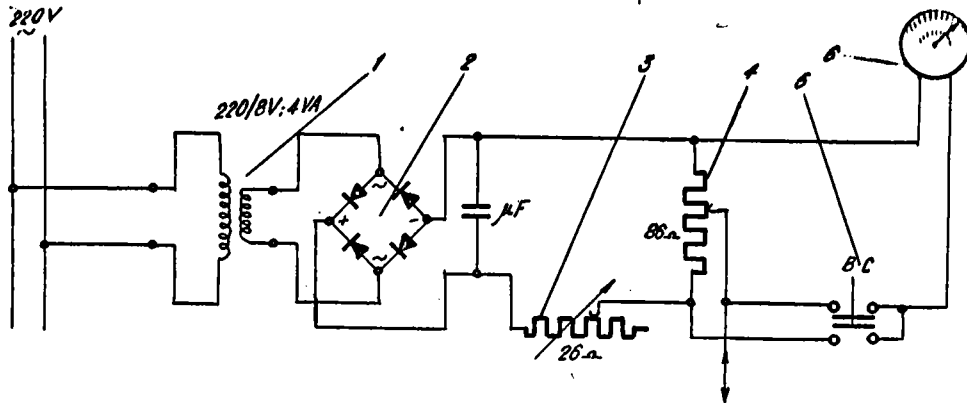


Fig.57 - Schema de telemăsură a curentului.

- 1 - transformator de sonerie ; 2 - punte redresoare ;
- 3 - reostat ;
- 4 - potențiomtru ; 5 - buton de comandă
- 6 - voltmetru magnetoelectric.

Alimentarea potențiometrului 4, fig.57, se face în curent continuu, prin intermediul unui transformator de sonerie 1 și puntea redresoare 2. Potențiometrul este dimensionat pentru un curent continuu de 0,1 A și o tensiune continuă de 7,6 V, corespunzătoare unei tensiuni a sursei de 200 V c.a. Reostatul 3 este dimensionat pentru a asigura la bornele potențiometrului tensiunea de 7,6 V c.c, atunci când tensiunea sursei variază între 200 și 240 V c.a. Instrumentul indicator 6 este un voltmetru magnetoelectric, montat în camera de comandă a stației de transformare sau a centralei electrice și face două operații:

- măsoară tensiunea la bornele potențiometrului;
- indică valoarea curentului din bobina de stingere .

./.

Comutările pentru o operație sau alta se fac cu ajutorul butonului de comandă 5, a cărui poziție normală corespunde celei de măsurare a curentului prin bobina de stingere.

S-a adoptat soluția alimentării de la o sursă de curent alternativ redresat și nu de la bateria stației respective pentru a face independentă schema de telemăsură de tensiunea nominală a bateriei stației în care se montează bobina de stingere.

#### 8.2.2. Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.

În fig.58 este dată construcția grafică a caracteristicilor de magnetizare pentru curentul minim și curentul maxim, cu valorile calculate, respectiv cu valorile măsurate ale curentului din bobina de stingere.

./.

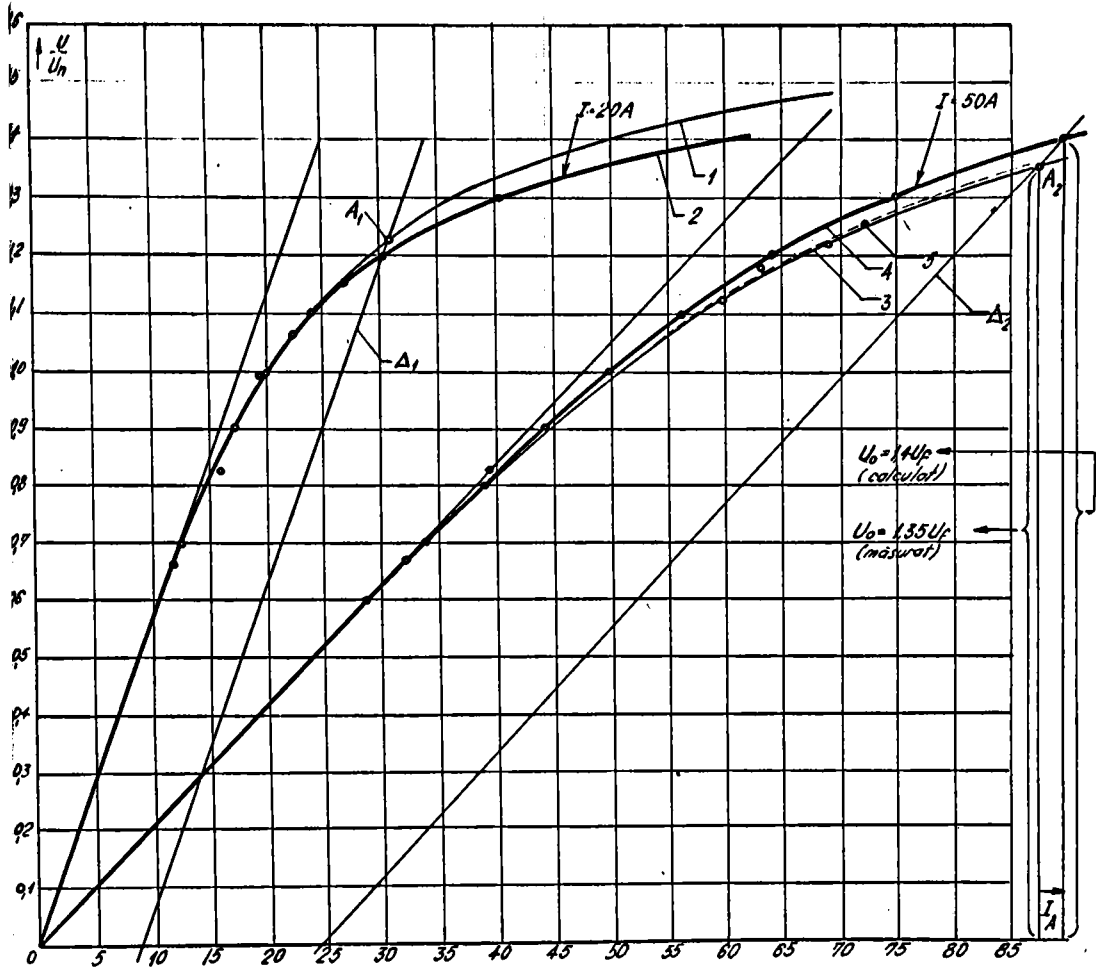


Fig.58 - Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere.

- 1,3 - caracteristicile trasate cu valorile măsurate ale curenților și tensiunilor pentru  $I_{\min} = 20 A$  și  $I_{\max} = 50 A$  ;
- 2,4 - caracteristicile trasate cu valorile calculate ale curenților și tensiunilor pentru  $I_{\min} = 20 A$  și  $I_{\max} = 50 A$  ;
- 5 - caracteristica trasată cu valbrile măsurate ale curenților și tensiunilor pentru  $I_{\max} = 50 A$ , recalculate

Din analiza caracteristicilor de mai sus se observă, pînă la tensiunea nominală, o suprapunere a celor trasate cu valori măsurate cu cele trasate cu valori calculate. Peste tensiunea nominală apar deosebiri între cele două caracteristici. Această bobină face parte din ultimele realizări și se confirmă în mod evident valabilitatea metodei de calcul folosite.

Din analiza poziției punctelor  $A_1$  și  $A_2$ , corespunzătoare celor mai grele condiții de funcționare a bobinei de stingere, ruperea unui conductor la plecarea din stația de alimentare, cînd circuitului oscilant format i se aplică tensiunea  $\frac{U_f}{2}$ , se observă că tensiunea de deplasare maximă a neutrlui este cuprinsă între  $1,22 U_f$  și  $1,35 U_f$ , deci este sensibil mai mică decît  $1,5 U_f$ , cît se recomandă în literatura de specialitate ca valoare admisibilă. Această concluzie se poate considera ca o performanță deosebită.

Creșterea curentului bobinei de stingere, în cazul cel mai dezavantajos de funcționare, deci cu întrefierul aferent curentului maxim, este de cca 7 A, la o creștere a tensiunii cu 10% peste cea nominală :

$$\frac{7}{50} \cdot 100 = 14 < 20\%.$$

Se poate aprecia că și această creștere relativ mică a curentului la o creștere a tensiunii de alimentare cu 10% constituie o realizare deosebită în proiectarea și executarea bobinelor de stingere.

Caracteristicile de magnetizare ale bobinei de stingere prezintă practic o variație liniară, în funcție de tensiune, pentru valori ale acesteia pînă la cea nominală. Peste tensiunea nominală abaterea de la variația liniară începe să crească, iar la o tensiune de alimentare de aproximativ  $1,3 U_n$  această abatere este mare.

Cele de mai sus sînt confirmate de oscilogrammele curentului și tensiunii înfășurării de măsură, tensiune, a bobinei de stingere.

./.

Astfel, din fig.59, se observă că atât variația curentului din bobina de stingere, cât și a tensiunii înfășurării de măsură este practic sinusoidală la alimentarea acesteia cu tensiunea nominală, întrefierul fiind maxim, corespunzător curentului nominal de 50 A.

Aceasta confirmă că tensiunea de alimentare este sinusoidală, iar caracteristica de magnetizare are o variație liniară în limita unei tensiuni de alimentare egală cu cea nominală.

În fig.60 sînt date variațiile acelorăși mări în cazul întrefierului minim, corespunzător curentului nominal de 20 A. Se observă că în timp ce tensiunea bobinei de măsură are o variație, în timp, sinusoidală, variația curentului din bobina de stingere prezintă unele abateri, o trecere la o variație de forma triunghiurilor isoscele, confirmînd existența armonicilor de curent de ordin superior, impare. De altfel, din analiza caracteristicilor de magnetizare, fig.58, se observă o abatere mai mare de la variația liniară a curentului din bobină în funcție de tensiunea de alimentare pentru întrefierul minim, deci curentul nominal minim, 20 A.

În fig.61 sînt date aceleași oscilograme pentru o funcționare a bobinei de stingere cu întrefierul maxim, curentul nominal de 50 A, la o alimentare cu o tensiune de  $1,3 U_n$ . Se observă că în timp ce tensiunea înfășurării de măsură are practic o variație sinusoidală, confirmînd variația sinusoidală a tensiunii de alimentare, curentul din bobina de stingere are o variație pronunțată de triunghiuri isoscele, confirmînd prezența armonicilor de curent de ordin superior, impare, într-o pondere mare.

În oscilogramele din fig.62 și 63 sînt date variațiile tensiunii înfășurării de măsură la alimentarea bobinei de stingere cu tensiunea nominală, pentru cele două poziții extreme ale întrefierului, maximă și minimă. Se confirmă variația sinusoidală a tensiunii de alimentare în ambele cazuri, lucru constatat și în cazul oscilogramelor din fig.59 și fig.60.

./.

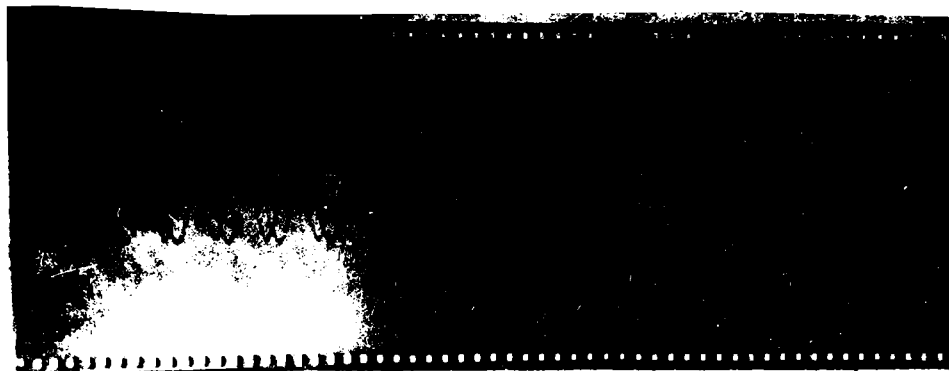


Fig. 59 - Oscilograma tensiunii și curentului bobinei de stingere la funcționarea între  
curentul maxim (curentul maxim) alimentată cu tensiunea nominală.

1. - Curba tensiunii ;
2. - Curba curentului.

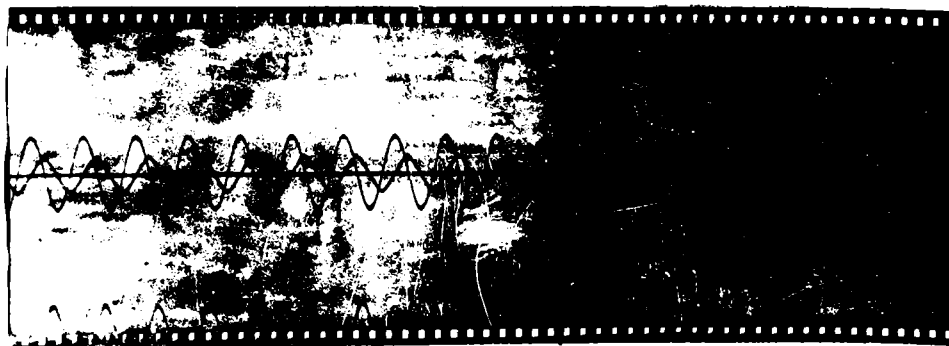


Fig. 60 - Oscilograma tensiunii și curentului bobinei de stingere la funcțio-  
narea cu curentul minim (curentul minim), alimentată cu tensiunea  
nominală.

1. - Curba tensiunii ;
2. - Curba curentului.

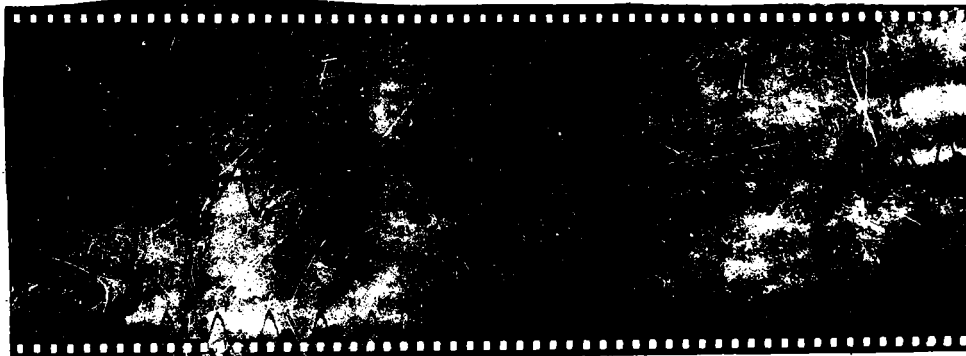


Fig.61 - Oscilograma tensiunii și curentului bobinei de stingere la funcționarea cu întrefierul maxim (curentul maxim), alimentată cu  $1,3 U_n$ .

1. - Curba tensiunii ,
2. - Curba curentului.



Fig.62 - Oscilograma tensiunii înfășurării de măsură la funcționarea bobinei de stingere cu întrefierul maxim (curentul maxim), alimentată cu tensiunea nominală.



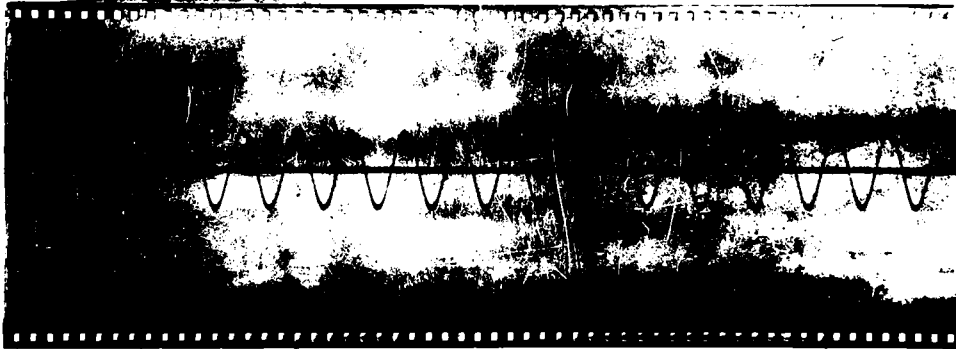
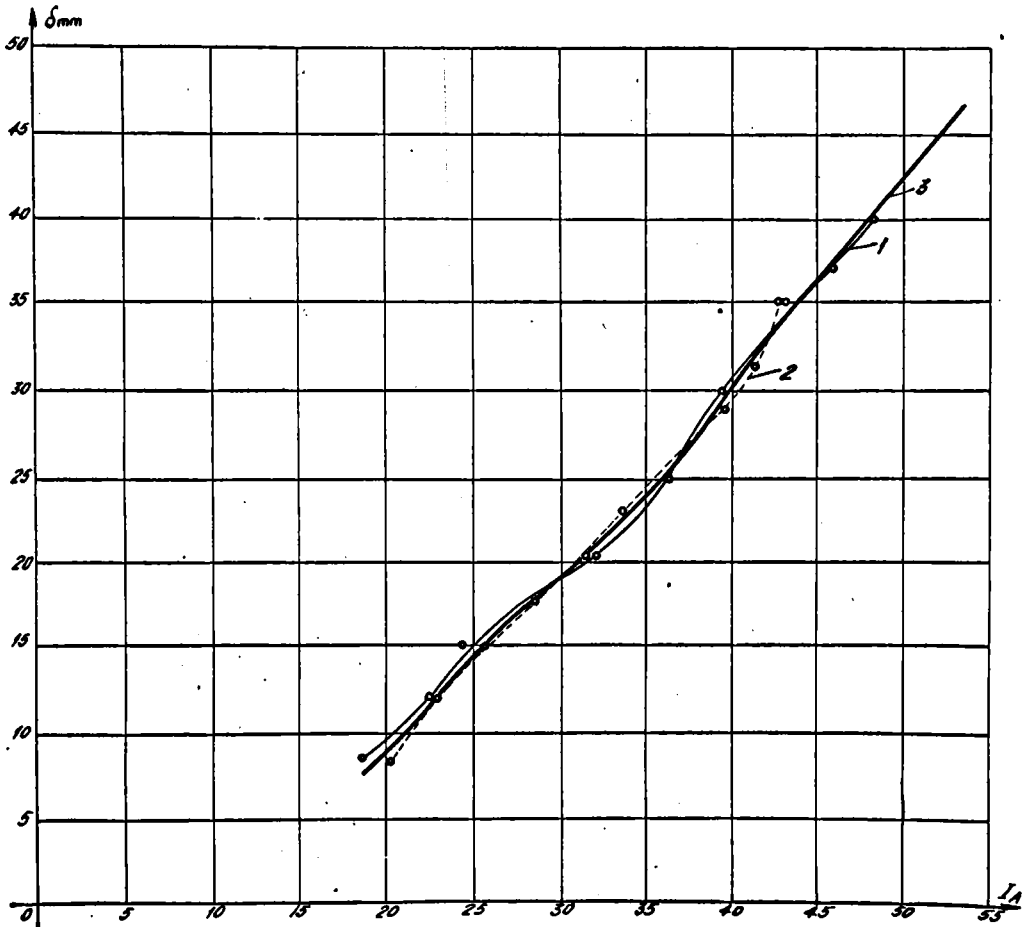


Fig.65 - Oscilograma tensiunii infagurării de măsură la funcționarea bobinei de stingere cu întrefierul minim (curentul așină), alimentată cu tensiunea nominală.

In fig.64 este dată variația curentului din bobina de stingere în funcție de mărimea întrefierului, la creșterea, respectiv descreșterea acestuia. Se observă o variație de proporționalitate, ceea ce nu s-a realizat nici la cele mai reușite tipuri constructive de bobine de stingere cu reglajul continuu al curentului sub sarcină [2,3] .

./.

DIAGRAMA DE VARIATIE A CURENTULUI BOBINEI  
DE STINGERE IN FUNCTIE DE VARIATIA  
INTREFIERULUI



LEGENDA

- 1 — Curba corespunde variației între fierului de la valori maxime la valori minime în sens descrescător
- 2 - - - Curba corespunde variației între fierului de la valori minime la valori maxime în sens creșcător
- 3 — Curba valorilor medii rezultată prin interpolare grafică.

Fig. 64.

Se precizează că la ridicarea, pe standul de probe, a caracteristicilor de magnetizare de mai sus s-au folosit transformatoare de măsură de cl.0,2 și aparate de măsură de cl.0,5.

S-au făcut probe de funcționare de durată, timp de 2 ore, atât la funcționarea cu curentul minim, 20 A, cât și la funcționarea cu curentul maxim, 50 A, la alimentarea cu tensiunea nominală. S-au măsurat temperaturile în următoarele zone:

- la partea superioară a cuvei, cu un termometru cu mercur montat într-un locaș special amenajat pe capacul acesteia;
- pe construcția metalică de susținere a bobinei de stingere, la mijlocul acesteia, în zona cea mai apropiată de înfășurarea de bază, cu o termocuplă ;
- în zona întrefierului, pe una din coloane, la marginea pachetului de tole, cu o termocuplă.

În ambele cazuri temperatura mediului ambiant a fost de 20 - 21°C. La sfârșitul probelor, temperatura maximă indicată de termometrul cu mercur a fost de 32 - 35°C, iar cea indicată de termocupla de pe construcția metalică a fost de 36 - 40°C.

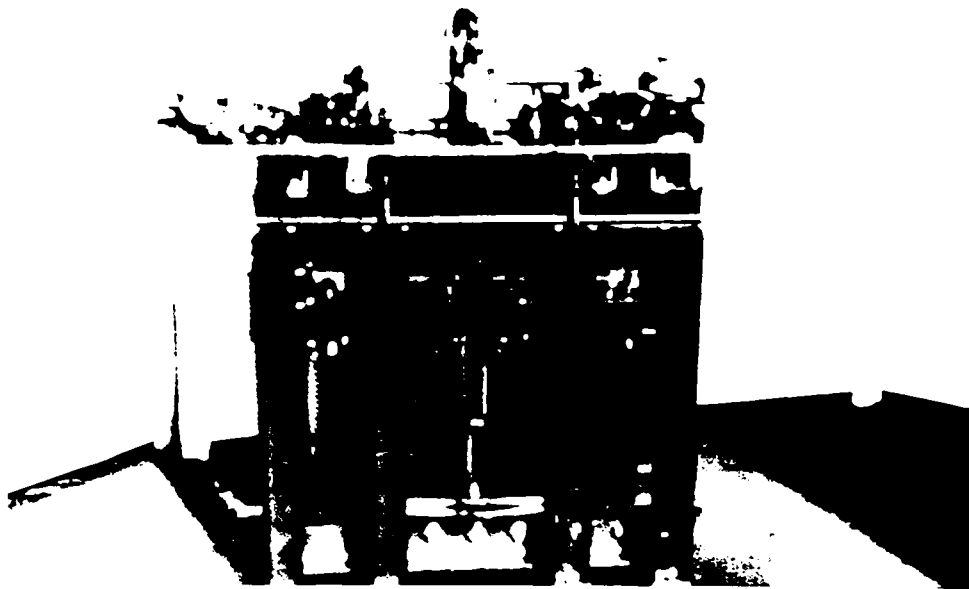
Termocupla din zona întrefierului a prezentat unele anomalii, însoțite de întreruperea circuitului de măsură după cca 15 minute de la începutul probelor.

Față de o temperatură maximă de 95°C, admisibilă pentru stabilirile superioare ale uleiului în cazul transformatoarelor de putere, temperatura de 35°C măsurată în cazul bobinei de stingere confirmă existența unei rezerve mari sub aspectul încălzirii.

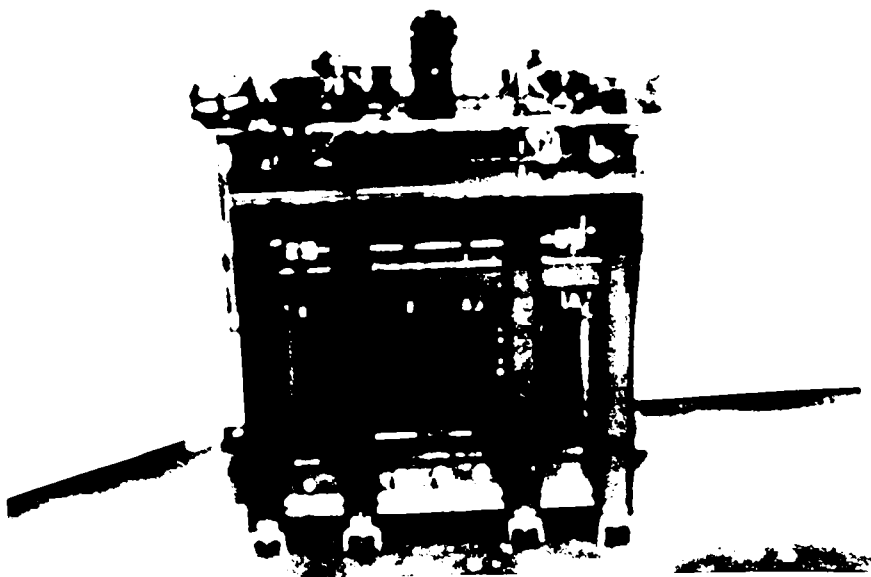
În plangele 1 și 2 anexate sînt prezentate fotografiile din față și spate, ale părții decuvabile a bobinei de stingere cu reglaj continuu de mai sus. Deasupra capacului este mecanismul de acționare aproape în întregime, releul de gaze și izolatoarele aferente bornelor de intrare-ieșire. Sub capac se vede înfășurarea principală, înfășurarea de măsură și construcția metalică de consolidare.

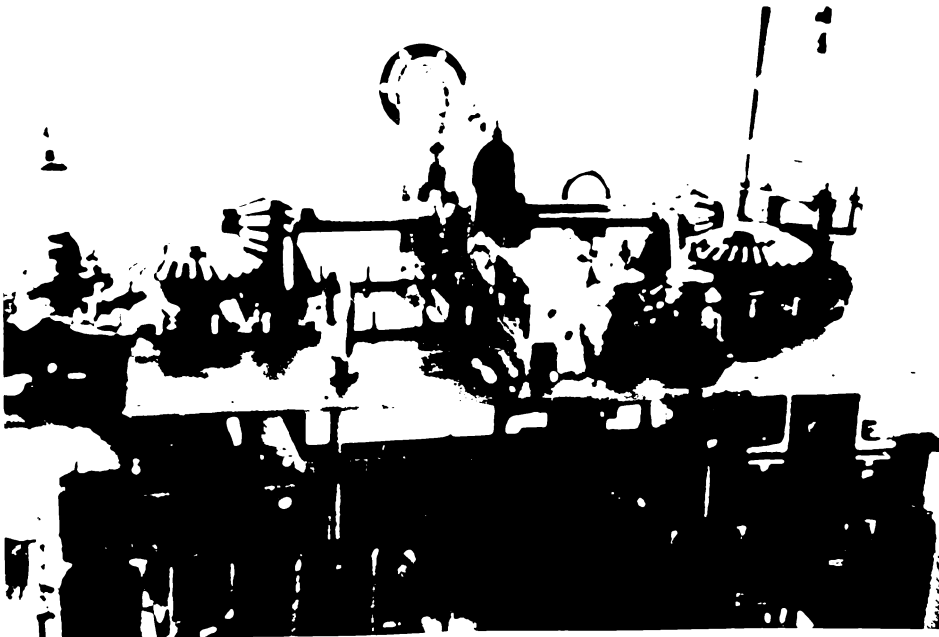
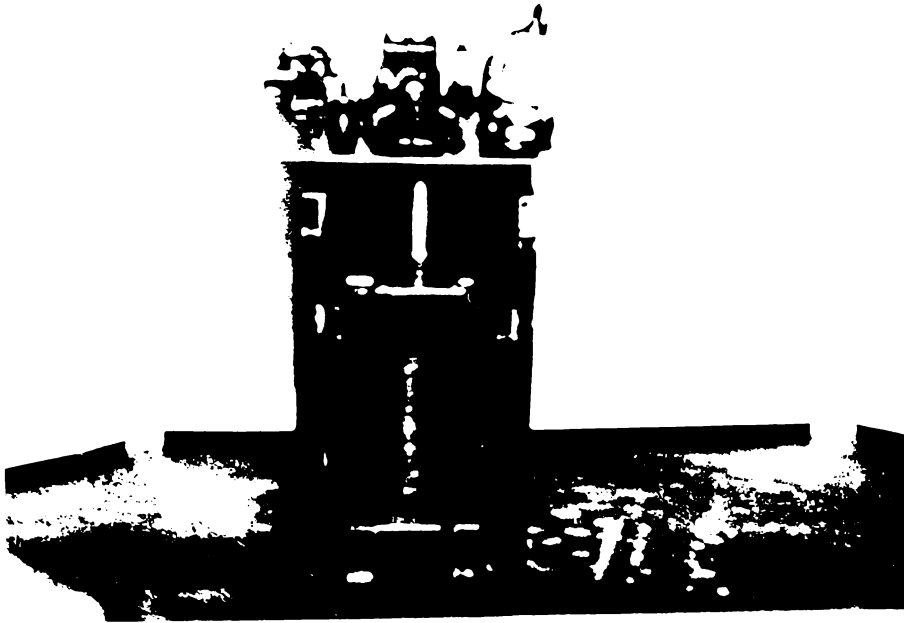
În planga 3 este prezentată o fotografie, vedere a uneia din părțile laterale, care scoate în relief, pe lângă înfășurarea principală, înfășurarea de măsură și izolatorul bornei de intrare. Sistemul de ghidaj, cu cilindrul exterior în partea centrală

PLANSA 1



PLANSA 2

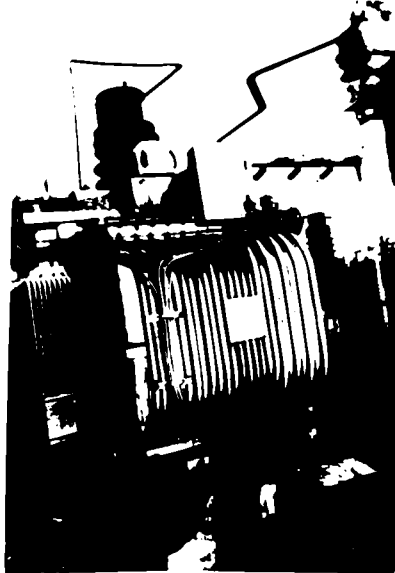
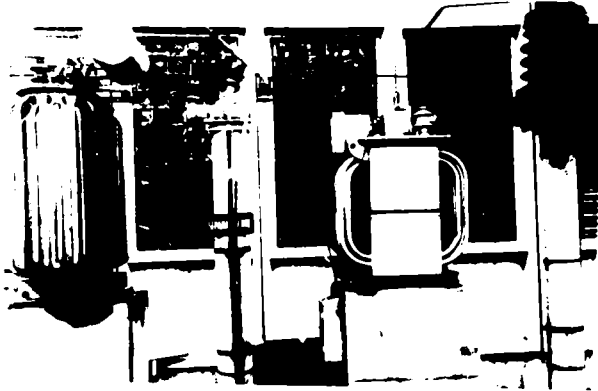




PLANSA 5



PLANS 6



PLANS 6



În planșa 4 este prezentată fotografia părții superioare a bobinei de stingere, în care se vede foarte clar mecanismul de acționare.

În planșa 5 este prezentată partea decuvabilă a bobinei de stingere înconjurată de muncitorii care au participat la executarea ei, cu scopul de a se avea o imagine mai plastică a dimensiunilor acesteia.

În planșa 6 sînt prezentate două fotografii ale bobinei de stingere montată într-o stație de transformare. Se observă modul de racordare, o parte din aparatajul aferent și dimensiunile de gabarit prin comparație cu cele ale restului instalațiilor. În partea stîngă a fotografiei de sus este transformatorul de formare a nului artificial.

S-au construit două asemenea bobine de stingere, identice, pentru compensarea curenților capacitivi în rețelele subterane în cablu din oragul Ploiești. Sînt în exploatare de mai mulți ani și s-au comportat bine pînă în prezent.

### 8.3. Concluzii finale.

Pe parcursul dezvoltării temei, în cadrul capitolelor analizate, s-au enunțat concluziile ce s-au desprins. În continuare se prezintă în sinteză concluziile mai importante, privind influența saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării bobinelor de stingere, în regim normal de exploatare și în regim de avarie, în strînsă corelare cu rezultatele încercărilor practice, prin care s-au confirmat enunțările teoretice făcute.

Influența saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere se poate rezuma astfel :

- limitează tensiunea de deplasare a neutrilor la valori stabilite în mod voit ca urmare a formei impuse caracteristicii de magnetizare a bobinei de stingere. Această limitare are loc în cele mai defavorabile condiții de funcționare, la ruperea unui conductor la plecarea din stația de alimentare, fără punere la pămînt, cînd circuitul oscilant format i se aplică o tensiune  $\frac{U_f}{2}$ .

Ca urmare a acestei influențe a saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere s-a stabilit expresia matematică (121) a caracteristicii de magnetizare ideale a unei bobine de stingere, valabilă pentru toate tipurile constructive de rețele, aeriene sau subterane și pentru toată gama tensiunilor nominale ale acestora ;

- limitează supracurenții și supratensiunile armoniceilor de ordin superior din curentul bobinei de stingere, la valori impuse prin forma caracteristicii de magnetizare, în condițiile cele mai dezavantajoase de funcționare, însoțite de fenomenul de ferorezonanță serie sau paralel ;

- conduce la variații ale curentului bobinei de stingere ce depășesc legea de proporționalitate pentru porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare. Dacă această neliniaritate începe pentru valori ale tensiunii mai mici decât cea nominală, variațiile mari ale valorii curentului dereglează acordul stabilit în prealabil pentru funcționarea bobinei de stingere în cazul unei simple puneri la pământ în rețeaua în care este montată, ceea ce constituie o influență negativă asupra funcționării acesteia ;

- transformă bobina de stingere într-un generator de armonici de curent de ordin superior în cazul funcționării ei pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare, cu toate consecințele negative privind ferorezonanța acestora și mărirea curentului rezidual de punere la pământ ;

- introduce în circuitele ferorezonante serie sau paralel, atât pentru fundamentală, cât și pentru armonicile de ordin superior ale curentului, variații în salturi ale curenților și tensiunilor, prin fenomenul de basculare, cu toate consecințele negative privind variația bruscă a acestora. Aceste variații bruște pot genera supratensiuni periculoase ca formă, cu influență negativă asupra fiabilității instalațiilor electroenergetice în care este montată bobina de stingere ;

- asigură o creștere treptată a curentului în circuitele oscilante cu bobină de stingere la punerea lor sub tensiune, așa cum se întâmplă în cazurile de avarii, ceea ce constituie o influență pozitivă a saturației magnetice asupra funcționării bobinei de stingere. Dacă nu ar fi saturația magnetică, în anumite condiții, în funcție de faza tensiunii de alimentare, punerea sub tensiune a circuitelor cu bobină de stingere ar fi însoțită de supracurenți, de o valoare dublă sau mai mare decât valoarea curentului permanent din circuitul respectiv. Supratensiunile, oricare ar fi faza tensiunii de alimentare, pot atinge valoarea dublă a tensiunii de alimentare,

diat după conectare, sau în prima semiperioadă.

Această creștere treptată a curentului și tensiunii la bornele elementelor circuitului oscilant este însoțită de apariția unor curenți și a unor tensiuni anarmonice, a căror variație în timp decurge în totul altfel decât variația periodică a tensiunii aplicate.

Influența histerezei magnetice asupra funcționării bobinei de stingere se poate rezuma astfel :

- contribuie, prin pierderile pe care le generează, la creșterea coeficientului de amortizare, cu efecte pozitive privind limitarea valorii tensiunii de deplasare a neutrului și deci implicit limitarea supratensiunilor din rețea, în cazul formării de circuite rezonante sau ferorezonante, serie sau paralel ;

- conduce la creșterea dimensiunilor cuvei bobinei de stingere pentru asigurarea evacuării căldurii suplimentare generate de pierderile prin histerezis, ceea ce constituie o influență negativă asupra funcționării bobinei de stingere ;

- contribuie, prin pierderile pe care le generează, la limitarea valorilor supracurenților și supratensiunilor în regim tranzitoriu de funcționare, ceea ce constituie o influență pozitivă asupra funcționării bobinei de stingere ;

- mărește efectul de deformare a curentului din circuitul cu bobina de stingere, prin apariția unei fundamentale în cvadratură cu fundamentală de bază, în regim permanent de funcționare ;

- deformează într-o măsură și mai mare, prin forme ciclului, curbele de variație a curentului și tensiunii la bornele bobinei și la bornele capacității echivalente în regim tranzitoriu de funcționare.

Influența curenților turbionari asupra funcționării bobinei de stingere nu diferă de influența histerezei magnetice decât prin amploare, conținutul ei fiind practic același.

Studiul întocmit și concluziile trase au permis explicarea teoretică a fenomenelor care au loc în bobina de stingere în condiții de exploatare normale sau de avarie, în regim permanent sau tranzitoriu, o analiză științifică a influenței saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării.

rii acesteia, folosind matematica ca instrument de cercetare.

Exemplele prezentate de bobine proiectate și executate în strînsă corelare cu concluziile de mai sus, prin încărcările, verificările, probele și măsurările făcute, confirmă temeinicia și valabilitatea acestora.

Ca o concluzie de ansamblu se poate spune că o bobină de stingere poate fi calculată, în baza unor date inițiale, în condiții de folosire optimă a influenței saturației magnetice, histerezei magnetice și a curenților turbionari asupra funcționării ei.

B I B L I O G R A F I E

a. Cărți

- 1 Rüdtenberg R. Fenomene tranzitorii în sistemele electroenergetice, ediție tradusă în limba română din limba engleză, București, Editura tehnică 1959.
- 2 Willheim R. Das Eedschlußproblem in Hochspannungsnetzen, Berlin, Verlag von Julius Springer, 1936.
- 3 Вильгельм, Р. и Уотерс, М. Заземление нейтрали в высоковольтных системах, traducere în limba română din limba engleză, Moscova, Государственное энергетическое издательство, 1959.
- 4 Mauduit, A. Installations électriques a haute e basse tension-production, transport et distribution de l'énergie électrique, Paris, Dunod, 1964.
- 5 Crigan O. Rețele și sisteme electrice, vol. IV, sisteme electrice-regimuri nesimetrice, Timișoara, Institutul politehnic Timișoara, 1970.
- 6 Dimo, P., Manolescu, G., Iordănescu, I. ș.a. Calculul și proiectarea sistemelor electroenergetice, București, Editura tehnică 1971.
- 7 Лухазев, Ф. А. Выбор, установка и эксплуатации дугогасящих аппаратов, Москва, Государственное энергетическое издательство, 1965
- 8 Koch, W. Erdungen in Wechselstromanlagen über 1 kV, Berlin, Springer, 1961.
- 9 Clarke, E. Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice, traducere din limba engleză, București, Editura tehnică, 1973.
- 10 Ulianov S.A. Regimuri tranzitorii ale sistemelor electrice, traducere din limba rusă, București, Editura tehnică, 1967.

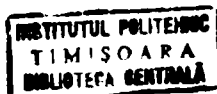
- 11 Andronescu, Pl. Bazele electrotehnicii, vol. I, București, Editura didactică și pedagogică, 1972.
- <sup>11</sup>  
12 Andronescu, Pl. Bazele electrotehnicii, vol. II, București, Editura didactică și pedagogică, 1972.
- 13 Antoniu, S. I. Chestiuni speciale de electrotehnică, București, Editura Academiei R. P. R., 1956.
- <sup>14</sup>  
14 Timotin, A., Hortopan, V. ș. a. Lecții de bazele electrotehnicii, București, Editura didactică și pedagogică, 1970.
- 15 Neiman, L. R. și Kalantarov, P. L. Bazele teoretice ale electrotehnicii, vol. II, teoria circuitelor de curent alternativ, traducere din limba rusă, București, Editura energetică de stat, 1955.
- <sup>6</sup>  
16 Savin, Gh. și Rosman, H. Circuite electrice neliniare și parametrice, București, Editura tehnică, 1973.
- 17 Geyger A. W. Dispozitive magnetice neliniare, traducere din limba engleză, București, Editura tehnică, 1968.
- 18 Teumin, I. I. Indreptar privind regimurile electrice tranzitorii, traducere din limba rusă, București, Editura tehnică, 1956.
- 19 Favraud, J. Fonctionnement et protection des réseaux de distribution, quatrième et cinquième partie, Paris, 1968.
- 20 Pélissier, R. Les réseaux d'énergie électrique, tom 2, Paris, Dunod, 1971.
- <sup>4</sup>  
21 Dimo, P., Arie, E., Manea, F., Ionescu, S. și Nicolae, P. Tratatul neutralității în rețele de înaltă tensiune, București, Ed. Academiei R. P. R. 1960.

./.

- 22 Ghinzburg, S.A.,  
Lehtman, I.I. și  
Malov, V.S. Bazele automatizării și telemecanicii,  
traducere din limba rusă, București, Edi-  
tura tehnică, 1956.
- 23 Nanu, A. Incercarea materialelor electrotehnice,  
București, Editura tehnică, 1960.
- 24 Wiener, U. Măsurări electrice industriale, vol. II,  
măsurarea mărimilor magnetice, București  
Editura tehnică 1969.
- 25 Dordea, T. ✓ Mașini electrice, vol. I, elemente genera-  
le, transformatorul electric, Timișoara,  
Institutul politehnic Timișoara, 1967.
- 26 Richter, R. Mașini electrice, vol. III, transforma-  
torul, traducere din limba germană, Bucu-  
rești, Editura tehnică, 1960.
- 27 Stoicović, Lj. Električne mašine, I knjiga, transforma-  
tori, električne mašine naizmenične  
struje, asinhronne mašine, Beograd,  
Tehnička Knjiga, 1960.
- 28 Stefanovici, T.H. Amplificatoare magnetice pentru automa-  
tizări industriale, traducere din limba  
rusă, București, Editura tehnică 1963.
- 29 Jezerski, E.,  
Gogolevski, Z.g.a. Transformatoare electrice, traducere din  
limba polonă, București, Editura tehnică  
1966.
- 30 Nedelou, V. Mașini electrice, București, Editura  
didactică și pedagogică, 1968.
- 31 Postnikov, I.M. Proiectarea mașinilor electrice, tradu-  
cere din limba rusă, București, Editura  
energetică de stat, 1954.

- 32 Cedighian, S. Materiale magnetice, București, Editura tehnică, 1967.
- 33 Vazaca, Ch. Incălzirea prin inducție de joasă și înaltă frecvență, București, Editura Academiei R.P.R., 1956.
- 34 Badea, I., Broșteanu, Gh., Chenzbraun, I. și Columbeanu, P. Protecția prin relee și automatizarea sistemelor electrice, București, Editura tehnică, 1973.
- 35 Massey, H. Noua eră în fizică, traducere din limba engleză, București, Editura științifică, 1966.
- 36 Sirotinski, L.I. Tehnica tensiunilor înalte, vol. I, traducere din limba rusă, București, Editura energetică de stat, 1954.
- 37 Sirotinski, L.I. Tehnica tensiunilor înalte vol. II, traducere din limba rusă, București, Editura tehnică, 1956.
- 38 Mark, D. și Bălan, Gh. Coordonarea izolației în sistemele electrice, București, Editura tehnică, 1968.
- 39 Mark, D. și Popa, B. Protecția instalațiilor electrice împotriva supratensiunilor atmosferice, București, Editura tehnică, 1967.
- 40 Kostenko, M.P. Magini electrice speciale, vol. III, traducere din limba rusă, București, Editura energetică de stat, 1955.
- 41 Radu, N. Recomandări pentru alegerea, instalarea și montarea bobinelor de stingere, vol. 14, București, IRME, 1964.

./.





- 42 Tiron, M. Teoria erorilor de măsurare și metoda celor mai mici pătrate, București, Editura tehnică, 1972.
- 43 Kontorovici, M.I. Calculul operațional și fenomenele tranzitorii în circuitele electrice, traducere din limba rusă, București, Editura energetică de stat, 1955.
- 44 Veniko, V.A. Aplicarea teoriei similitudinii și modelării în electroenergetică, traducere din limba rusă, București, Editura tehnică, 1972.
- 45 Займовский, А.С. и Чугновская, Л.А. *Магнитные материалы, Москва, Госгорембенное энергетическое издательство, 1957*
- 46 Grzybowski, S.g.a. Condensatoare în electroenergetică, traducere din limba polonă, București, Editura tehnică, 1966.
- 47 Siemens Memoratorul inginerului electrician, traducere din limba germană, București, Editura tehnică, 1971.
- 48 ASIT-Filiala Banat. Materiale electrotehnice, Timișoara, ASIT-Filiala regională Banat, 1960.

b. Articole din reviste și lucrări.

- 3  
49 Groza, L. Alegerea caracteristicilor și funcționarea bobinelor de stingere, București, Energetica, nr.2, 1956 pag.76-87.
- 2  
50 Penescu, C.et. Martac, D. L'influence des regulateurs de tension et du phénomène de saturation sur les surtensions prolongées, București, Buletinul Institutului politehnic București, 1958.

- 51 Рухтер, У. *Компенсация емкостных токов замыкания на землю в сетях высокого напряжения в ЧССР. Электричество, п.11, Тосенергиздат, 1961*
- 52 Лихагев, Ф.А. *Влияние параметров силовых трансформаторов на напряжения фаз относительно земли при пофазных коммутациях, электрические станции, п.6, Тосенергиздат, 1963.*
- 53 Салиов, В.А., Шутъ, В.В., с.а. *Регулирование индуктивности дугогасящей катушки трансформатора с подмагничиванием и дросселем насыщения, электрические станции, п.11, Издательство «Энергия» 1964*
- 54 Хлебников, С.Д. *Моделирование ферромагнитных нестационарных характеристик на электронных машинах-аналогах с помощью семитранзисторных контуров, электричество, п.9, Издательство «Энергетика», 1964*
- 55 Radu, N. *Introducerea reglajului automat la rezonanță al compensării curentului capacitiv în rețelele de medie tensiune, București, A II-a sesiune tehnico-științifică IRME, 1964.*
- 56 Lawrenz, R. *Beitrag zur Approximation von Magnetisierungskennlinien, Berlin, Elektrik, nr.7, 1967.*
- 57 Mierdel, G. *Fenomagnetismus, Berlin, Elektrik, nr.7, 1967.*
- 58 Truhan, A.P. *O nouă metodă de acordare a bobinelor de stingere, Moscova, Energhetika i elektrotehnika promijlenost, nr.3, 1962.*

59 Dordea, T.

Asupra ecuațiilor mașinilor electrice de curent alternativ, București, Studii și cercetări de energetică și electrotehnică, tomul 16, nr. 1, pag. 18-31, 1966.

60 Săndulescu, L.

Analiza eficacității schemelor de protecție a stațiilor de 6-110 kV împotriva supratensiunilor atmosferice, București, A II-a sesiune tehnico-stiințifică IRME, 1964.

61 Лутигзе, И. И.  
Бликов, Е. А.

Векет цепи с grossемем настижения (ДН), работающими на индуктивную нагрузку, электроэнергетика, п. 4, Удэстелество Академии наук С. С. С. Р., 1961.

62 E.D.B.

Ideální zařizení pro el. síť vysokého napětí-znašeci tlumivka s plynulo-regulací, české Budějovice, 1957.

63 Ionescu, Al.

Combaterea avariilor echipamentului din rețelele electrice, cauzate de supratensiunile de rezonanță armonică, București, IDT, 1968.

64 Pruniéras, J.

Onde de foudre se propageant le long d'une ligne mise à la terre, Paris, Revue générale de l'électricité, nr. 3, 1972.

65 Koettnitz, H.

Neue grundsätze für die Isolationskoordination von Betriebsmitteln für Wechselstrom-Elektroenergieanlagen über 1 kV, Berlin, Elektrik, nr. 3, 1972.

66 Панасенков, М. А.

Уравнения гонимых петелех системы резика, Москва, электричество, nr. 3, 1972.

67 Feydt M., Freytag H

Fortschritte der Erdungs- und Schutzmaßnahmentechnik, Berlin, Elektrik, nr. 1, 1972

- 68 Казим-Зогэ З. У.  
Белопольский, У. У.,  
Аббасов, А. Т. Аналитическая зависимость для при-  
ближенного определения удельных по-  
терь в стали при перемагничивании, э-  
лектротехника, №3, 1972.
- 69 Теллерин, Ф. Б.,  
Мизель, А. У. Аппроксимация процессов намагничи-  
вания при перемагничивании, электротех-  
ника, №8, 1972.
- 70 Koch, S. Pierderi prin curenți turbionari în înfășu-  
rarea miezurilor cu întrefier, Nochrichten-  
technische Zeitschrift, nr.5, 1968.
- 71 Nemes, M. Metodă de analiză și calcul supra\_tensiuni-  
lor datorite comutației la linii electrice  
de înaltă tensiune cu elemente terminale de  
tip transformator, București, Studii și cerce-  
tări de energetică și electrotehnică, nr.3, 1972.
- 72 Dimo, P. Cauza supratensiunilor prelungite, Energetica  
no.11, 1953.
- 73 Dimo, P. Cauza supratensiunilor prelungite în rețele-  
le cu neutrul izolat, București, Studii și  
cercetări de energetică, tom III, 1953.
- 74 Mozières, Ch. și  
Forquet, M. Simulation d'une bobine à noyau de fer par  
représentation mathématique du cycle  
d'hystérésis, Paris, Revue générale de  
l'électricité, nr.5, 1968.
- 75 Gleb, D. Contribuții la determinarea supratensiunii  
în cazul căderii trăsnetului pe o linie  
aeriană de înaltă tensiune prevăzută cu  
conductoare de protecție ținând cont de e-  
fectul corone de impuls, București, Studii și  
cercetări de energetică, tom I, 1959.

- 76 Marinescu, M. Rezonanța dinamică în circuite electrice cu inductanță variabilă și condensator, București, Studii și cercetări de energetică, tom. III, 1959.
- 77 Dimo, P. Posibilitatea inversiunii fazelor în rețelele de înaltă tensiune în cazul tăierii pe o fază a întrerupătorilor, București, Studii și cercetări de energetică, nr. 3-4, 1951.
- 78 Bello, S.B., ș.a. Experiența de exploatare a dispozitivului de compensare automată, Moscova, Elektriceskie stanții, nr. 8, 1971, publicat tradus în limba română în "exploatarea, întreținerea și repararea instalațiilor energetice", București, caiet selectiv nr. 8-1972.
- 79 Bladiko, V.M și Mazurenko, A.A. Calculul circuitelor electrice cu oțel, cu considerarea histerezei și curenților turbionari, Moskva, Izvestia vișșih ucebnîh zavedenii energhetika, nr. 2, 1968.
- 80 Nancev, N. Legarea la pământ a neutrilor sistemelor energetice de medie tensiune, Sofia, Energhetika, nr. 3, 1972.
- 81 Smith, W.J.G. Metode de legare la pământ în Marea Britanie și SUA, Electrical Times, nr. 12, 1972.
- 82 Hochhausler, P. Compensarea energiei reactive în rețelele cu armonici superioare, Elektrotechnische Zeitschrift A, nr. 9, 1971.
- 83 Brauner, G. Calculul numeric al supratensiunilor atomosferice și de comutare, Elektrotechnische Zeitschrift A, nr. 9, 1972.

- 84 Ilin, V.M. și  
Kuvarzin, Iu.A. Despre aproximația unitară a curbei histeretice, Moskva, Izvestia vîșih ucebniî zavedenii energhetike, nr.3, 1973.
- 85 Beatz, H. Praxis der Sternpunktbehandlung in den verschiedenen Ländern für Netze mit Betriebsspannungen von 110 kV und darunter, Elektrotechnische Zeitschrift A, nr.21, 1961.
- 86 Erich, M. și  
Heinzer, H. Löschung von Erdschlusslichtbögen in Mittelspannungsnetzen, Elektrotechnische Zeitschrift A, nr.3, 1963.
- 87 Costin, E. Nesimetria liniilor electrice în regim normal, Buletinul informații-documentare MEE-DEE, nr.1, 1963.
- 88 Stein, M. și  
Penescu, M. Determinarea parametrilor unei rețele funcționând cu neutrul izolat sau tratat prin bobină de stingere în cazul unui defect monofazat la pământ, Energetica nr.10, 1961.
- 89 Lazăr, M. și  
Buhug, P. Metodă de calcul pentru determinarea deplasării neutrului în rețelele prevăzute cu bobină de stingere, Energetica, nr.6, 1963.
- 90 Zimmerl, L. Das Erdschlussproblem in Mittelspannungsnetzen, OZE, nr.5, 1969.
- 91 Timotei, A. O schemă echivalentă pentru rețeaua trifazată cu bobină de stingere, Electrotehnica, nr.7, 1957.

- 92 Rothman, A.                    Tratatrea neutrului in rețelele electrice  
București, Studii documentare de electro-  
energetică, MEE - ODE, 1970.
- 93 MEE                                Normativ privind protecția instalațiilor  
electroenergetice împotriva supratensiunilor  
atmosferice, București, Oficiul de  
documentare și publicații tehnice, 1969.
- 94 Colectivul de e-                    Legarea neutrului la pământ in rețelele  
nergetică din ca-                    de înaltă tensiune, București, Studii și  
drul Institutului                    cercetări de energetică, tom. I, nr. 3-4,  
de energetică al                    1951.  
Academiei RPR (RSR)
- 95 I.D.T.                               Realizări noi in instalarea și exploatarea  
bobinelor de stingere, București,  
I.D.T. 1963.
- 96 M.E.E.                               Normativ de încercări și măsurări la e-  
chipamente și instalații electrice, la  
punerea in funcțiune și in exploatare,  
3 El-67, București, Oficiul de documenta-  
re și publicații tehnice, 1967.
- 97 M.E.E.                               Normativ de încercări și măsurări la e-  
chipamente și instalații electrice, PE-  
116/1973, București, ODE, 1973.
- 98 I.R.E. Sibiu.                       Proiectarea și construcția bobinei cu  
reglaj continuu pentru rețelele de  
 $20/\sqrt{3}$  kV, 600 KVA, Sibiu, I.R.E. Sibiu, 1971
- 99 Igfanu T.                            Construcție, calculul și proiectarea  
bobinelor de stingere, Cimpina, Consfătuire  
tehnică-stiințifică privind supratensiunile,  
1964.

- 100 Igfanu T.                      Experiența I.R.E.Ploiești în proiectarea, construcția și probarea bobinelor de stingere cu reglaj continuu sub sarcină, Cîmpina, Consfătuirea tehnicoștiințifică privind supratensiunile, 1966.
- 101 Igfanu T.                      Influența saturației asupra funcționării bobinelor de stingere, București, A VII-a sesiune de comunicări tehnicoștiințifice ICPE, 1970.
- 102, STAS 1703-60                  Transformatoare de putere trifazate în ulei. Condiții generale.
- 103 STAS 3035-65                  Transformatoare trifazate în ulei. Metode de încercare.
- 104 STAS 7334-70                  Instalații de legare la pământ de protecție, Prescripții.
- 105 STAS 6489-67                  Rețele electrice peste 1 kV. Coordonarea izolației. Nivele de izolație și de protecție.
- 106 STAS 950-65                  Rețele electrice. Tensiuni nominale și sisteme de curent.