

INSTALAȚIE DE ÎNCERCARE CU TENSIUNE ÎNALTĂ 250 kV, 50 Hz

Instalația, de fabricație românească (URTAE Roman, 1978) se compune din două transformatoare monofazate, montate în cascadă. Principalii parametri tehnici ai transformatoarelor sunt :

- tipul transformatorului – monofazat, în carcasă metalică, cu izolație de ulei;
- puterea nominală – 125 kVA;
- raportul de transformare – 0,2/125 kV;
- curentul nominal al înfășurării de înaltă tensiune – 1 A;
- tensiunea de scurtcircuit 10,25 %.

Schema electrică de principiu a cascadei este dată în fig.1. Fiecare transformator are o înfășurare primară **P**, una secundară **S**, iar primul transformator are și o înfășurare de transfer **T**, necesară pentru alimentarea înfășurării primare a treptei următoare a cascadei. Înfășurările primare și de transfer, pe de o parte și cele secundare pe de altă parte, sunt constructiv identice pentru cele două transformatoare.

Cuvele transformatoarelor sunt metalice și, deoarece sfârșitul înfășurării secundare a primei trepte este legat la cuva transformatorului celei de-a doua trepte, aceasta se află la un potențial ridicat față de pământ, motiv pentru care este așezată pe suporturi izolanti. Înfășurările secundare ale celor două transformatoare fiind înseriate, tensiunea între borna de înaltă tensiune a treptei superioare și pământ este dublă în raport cu tensiunea la bornele înfășurărilor secundare ale fiecărei trepte.

Înfășurarea primară a primei trepte este alimentată cu tensiune reglabilă între 0 și 200 V de la un autotransformator reglabil, ATR.

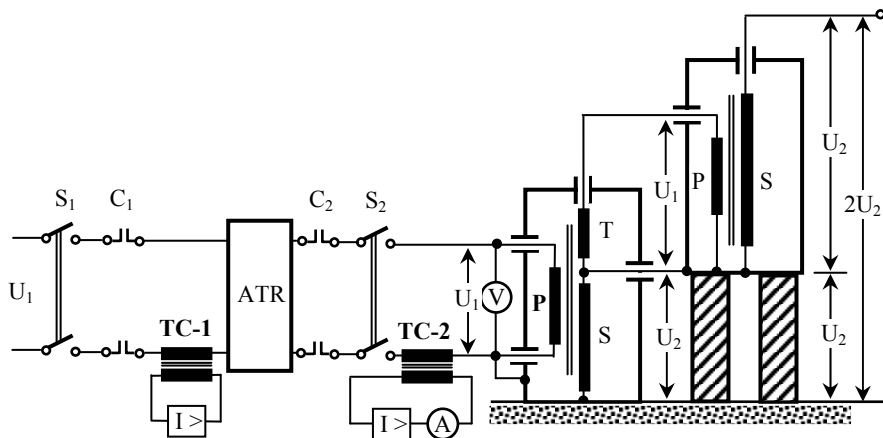


Fig.1. - Schema electrică a cascadei de transformatoare de încercare de 250 kV
ATR-autotransformator reglabil; P-înfășurare primară; S-înfășurare secundară; T-înfășurare de transfer; C₁, C₂-contactoare; S₁, S₂-separatoare; TC-transformator de curent; I >- releu maximal de curent; A-ampermetru; V-voltmetru.

Părțile componente ale instalației sunt amplasate astfel:

- cascada de transformatoare și pupitrul de comandă, în sala de înaltă tensiune;
- dulapul de comutație, în sala surselor de alimentare;
- autotransformatorul, în parcul de autotransformatoare din exteriorul clădirii.

Protecția transformatoarelor împotriva defectelor interne ce generează gaze se realizează cu rele Bucholtz. Protecția la suprasarcini de durată este asigurată de rele termice atașate

contactoarelor C_1 și C_2 , iar protecția la suprasarcini de scurtă durată se realizează cu ajutorul a două relee maximale de curent, precum și cu siguranțe fuzibile rapide.

Pupitrul de comandă este prezentat schematic în fig.2. În afară de elementele de comandă, măsură și semnalizare ale instalației de încercare, pupitrul mai cuprinde comanda acționării eclatorului cu sfere $\Phi 50$ cm, afișarea distanței între sfere, precum și semnalizarea succesiunii fazelor rețelei de alimentare, necesară datorită folosirii unui motor asincron trifazat pentru antrenarea echipajului mobil al autotransformatorului. Dacă succesiunea fazelor este incorectă, cursorul ATR ar fi acționat în sens invers celui cerut prin acționarea butonului de comandă, iar limitatoarele de cursă nu și-ar mai îndeplini funcția, apărând pericol de avarie mecanică.

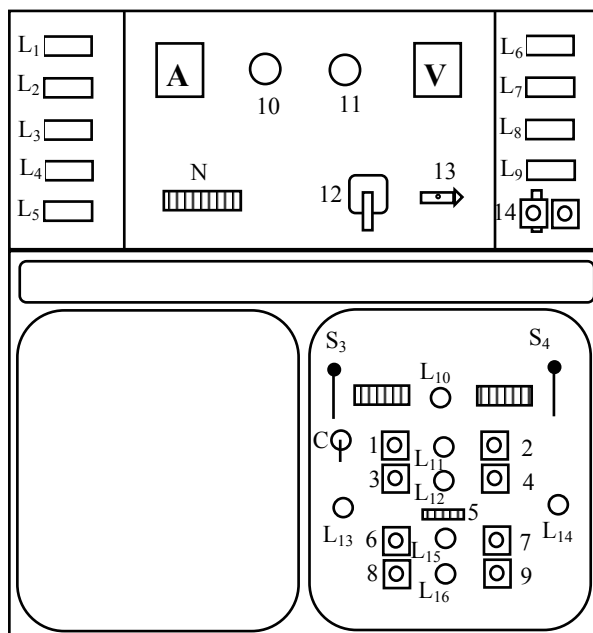


Fig.2. – Pupitrul de comandă al instalației 250 kV, 50 Hz

C-întrerupător cu cheie pentru alimentarea circuitelor de comandă și semnalizare; *A*-măsură curentului absorbit de cascadă; *V*-măsură tensiunii înalte; *N*-indicator al distanței dintre sferele eclatorului $\Phi 50$ cm; *S*₃-separator în circuitul de comandă al contactorului *C*₁; *S*₄-separator în circuitul de comandă al contactorului *C*₂;

Comenzi: 1-conectare contactor *C*₁; 2-deconectare contactor *C*₁; 3-conectare contactor *C*₂; 4-deconectare contactor *C*₂; 5-claviatură pentru alegerea treptei de reglaj fin a tensiunii; 6-creștere tensiune (fin); 7-creștere tensiune (brut); 8-descreștere tensiune (fin); 9-descreștere tensiune (brut); 10-relevu timp; 11-avertizor sonor; 12-comanda reglării distanței la eclatorul cu sfere $\Phi 50$ cm; 13-conectarea controlului succesiunii fazelor; 14-anularea semnalizărilor;

Semnalizări: *L*₁-alimentare generală a instalației; *L*₂-bariera de acces ridicată; *L*₃-contact de podea deschis, *L*₄-cursorul autotransformatorului nu se află la zero; *L*₅-avertizare releu gaze; *L*₆-avertizare pentru verificarea manuală a prezenței tensiunii; *L*₇-avertizare pentru separarea vizibilă a circuitului de alimentare; *L*₈-funcționarea protecției maximale 1; *L*₉- funcționarea protecției maximale 2; *L*₁₀-prezența tensiunii în circuitele de comandă; *L*₁₁-contactorul *C*₁ închis; *L*₁₂-contactorul *C*₂ închis; *L*₁₃-sistemul trifazat de tensiuni cu succesiune directă; *L*₁₄-sistemul trifazat de tensiuni cu succesiune inversă; *L*₁₅-tensiunea crește; *L*₁₆-tensiunea scade

Ordinea operațiilor de punere și de scoatere din funcțiune a cascadei este:

- se pregătește zona de lucru pentru încercare, după care aceasta va fi evacuată de întregul personal;
- se închide ușa (bariera) de acces în zona de înaltă tensiune;
- se alimentează circuitele din pupitrul de comandă prin cheia *C*;

- se verifică succesiunea corectă a fazelor rețelei de alimentare (arde lampa L_{13} , după acționarea comutatorului 13 (același comutator alimentează și circuitele de acționare a deplasării sferei inferioare a eclatorului);
- se acționează succesiv butoanele 1 și 3 pentru închiderea contactoarelor C_1 și C_2 ; pentru reușita conectării contactorului C_1 trebuie ca bariera de acces în zona de lucru să fie închisă, operatorul să se afle la pupitru (contactul de podea al pupitrului de comandă să fie închis), iar contactorul C_2 se poate închide numai dacă cursorul ATR se află pe poziția de tensiune nulă;
- pentru creșterea tensiunii se apasă continuu pe butonul 7; pentru descreșterea tensiunii se apasă pe butonul 9;
- pentru reglajul fin al tensiunii se alege, din claviatura 5, treapta de reglare dorită (durata impulsului de reglare descrește de la stânga la dreapta), apoi se apasă pe butoanele 6 sau 8, de câte ori este nevoie până se obține tensiunea dorită;
- dacă are loc o descărcare electrică în montajul de înaltă tensiune, protecția de supracurent comandă deschiderea contactorului C_2 și apare semnalizarea „izolație străpunsă” (L_9). Dacă tensiunea aplicată este suficient de ridicată, pot funcționa ambele protecții maxime de curent și se comandă deschiderea ambelor contactoare. Va apare și semnalizarea „protecție maximală 1” (L_8);
- după deschiderea contactorului C_2 prin protecția de supracurent, prin protecția de gaze sau prin acționarea butonului 4, cursorul ATR revine automat către poziția de tensiune nulă (se aprinde semnalizarea „poziție incorectă autotransformator”, lămpile L_4 și L_{16});
- pentru repetarea încercării, se așteaptă revenirea autotransformatorului la poziția de tensiune minimă (se sting lămpile L_4 și L_{16}), se anulează semnalizările funcționării protecțiilor de curent din butonul 14, după care se reiau operațiile de conectare și reglare a tensiunii;
- pentru deconectarea instalației se acționează succesiv butoanele 4 și 2 și cheia de contact;
- iar în caz de urgență sau de defectare a butoanelor de deconectare se procedează la deschiderea separatoarelor S_3 și S_4 înseriate în circuitele de comandă ale contactoarelor.

Pentru folosirea eclatorului cu sfere se acționează comutatorul 13, apoi, cu ajutorul cheii cu revenire 12, se comandă motorul de acționare a sferei inferioare. Se aduce distanța între sfere la zero, se citește indicația numărătorului N (ca zero fals) după care sferele se îndepărtează la distanța dorită.

Atentie: Deoarece motorul de acționare a sferei inferioare a eclatorului are putere mică, este obligatoriu să se aștepte oprirea acestuia înainte de a se da o comandă de inversare a sensului de rotație. Nerespectarea acestei indicații poate conduce la defectarea motorului prin supraîncălzirea (arderea) înfășurării statorice.

MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE CU ECLATORUL CU SFERE.

Principiul de măsurare al tensiunilor înalte cu ajutorul eclatorului cu sfere se bazează pe legea similitudinii descărcărilor conform căreia tensiunea disruptivă în câmp electric slab neuniform este funcție de produsul δs dintre densitatea relativă a gazului și distanța dintre electrozi ca și de raportul s/D între distanța între sfere și diametrul lor. Având o caracteristică tensiune-timp aproape orizontală, indiferent de durata descărcării, tensiunea disruptivă a intervalului nu depinde de durata aplicării tensiunii și de legea de variație a acesteia în timp astfel că eclatorul cu sfere poate fi utilizat ca dispozitiv de măsură a valorilor de vârf a tensiunilor alternative, continue și de impuls.

Măsurarea tensiunii cu eclatorul cu sfere se poate face fie aplicând sferelor, inițial suficient de depărtate, tensiunea de măsurat și apropiindu-le lent până la producerea descărcării, fie fixând mai întâi distanța dintre sfere și crescând tensiunea aplicată până la producerea descărcării. Tensiunea disruptivă depinde de diametrul sferelor și de distanța dintre acestea, fiind indicată, pentru condiții atmosferice normale, în tabelele 1 și 2.

Constructiv, un eclator este format din două sfere cu același diametru, din cupru, montate pe doi suporturi dintre care cel puțin unul este izolant. Axul comun al sferelor poate fi orizontal (pentru diametre până la 15-25 cm) sau vertical (pentru diametre mai mari). În cea mai mare parte a cazurilor, eclatorul se folosește cu una dintre sfere legată la pământ. Această sferă este, de obicei mobilă, manual sau acționată cu un motor, permițând reglarea distanței și, respectiv, a tensiunii de amorsare.

Eclatorul cu sfere se conectează la circuitul de înaltă tensiune prin intermediul unei rezistențe, care are un dublu rol: limitează curentul prin arcul electric între sfere în scopul prevenirii deteriorării suprafețelor acestora și amortizează oscilațiile de înaltă frecvență datorate tăierii buște a tensiunii de către eclator. Rezistența se dimensionează la 0,5-1 Ω/V pentru tensiuni de durată și la valori mai reduse în cazul tensiunii de impuls.

Asigurarea preciziei măsurării cu eclatorul cu sfere (eroare de maximum $\pm 3\%$) se obține atât prin modul de construcție și instalare, cât și prin modul de folosire al acestuia.

În privința construcției și instalării, este esențial să se asigure menținerea caracterului slab neuniform al câmpului electric dintre sfere. Pentru aceasta este necesar ca obiectele metalice, aflate sub tensiune sau legate la pământ, să nu se afle prea aproape de axul sistemului de electrozi (minim $9D$ pentru $D = 2$ cm, respectiv minim $3D$ în cazul $D = 1$ m). De asemenea, distanța dintre sfere nu trebuie să depășească mărimea razei acestora. Pe suprafața sferelor nu trebuie să se afle praf sau alte depuneri, care pot crea intensificare locală a câmpului electric, determinând amorsarea prematură a descărcării.

În privința modului de utilizare, principala influență are luarea în considerare a dispersiei statistice a rezultatelor datorită multitudinii de factori aleatori de care depinde formarea descărcării. Obținerea preciziei maxime necesită efectuarea unui număr foarte de mare de încercări în condiții identice, ceea ce cere mult timp. Este importantă asigurarea aceluiași condiții inițiale la repetarea încercării, prin păstrarea unui interval de minimum 1 minut între două încercări astfel ca să se poată produce deionizarea completă a traseului descărcării precedente. Practic se vor executa serii de 3-5 încercări, eliminând dintre rezultatele obținute pe acelea care se abat cel mai mult de celelalte.

Precizia măsurării se poate mări la eclatoarele având $D < 12,5$ cm, pe calea iradierii punctului de scânteiere cu radiații ultraviolete sau radioactive. Prin acest procedeu starea inițială de ionizare a aerului va fi aceeași la toate încercările, iar dispersia valorilor tensiunilor disruptive se reduce.

Densitatea gazului (aerului) influențează direct mărimea tensiunii disruptive. Dacă măsurarea se face în condiții diferite de cele normale ($t = 20^{\circ}\text{C}$, $p = 1013$ mbar = 760 mmHg),

tensiunea disruptivă reală, $U_{d,real}$, se obține cu relația:

$$U_{d,real} = kU_{d,norm} \quad (1)$$

în care $U_{d,norm}$ este valoarea pentru condiții atmosferice normale.

Pentru variații reduse ale densității relative a aerului, $0,95 < \delta < 1,05$, coeficientul de corecție $k = \delta$, densitatea relativă a aerului, care se poate calcula cu una dintre relațiile:

$$\delta = 0,289 \frac{p}{273 + t}, \text{ dacă } p \text{ se măsoară în mbar, respectiv}$$

$$\delta = 0,386 \frac{p}{273 + t}, \text{ dacă } p \text{ se măsoară în mmHg (torr).}$$

Influența umidității atmosferice poate fi neglijată în cazul distanțelor mici între electrozi (sub 1m) așa cum este cazul la încercările efectuate în laborator (nu există surse de tensiune atât de mare).

Pentru măsurarea tensiunilor continue sau alternative chiar de frecvență mare, eclatorul poate fi folosit fie menținând constantă distanța între sfere și crescând tensiunea aplicată fie menținând tensiunea constantă și reducând distanța între sfere până la amorosarea descărcării.

Tensiunile de impuls nu se pot măsura prin aceleași metode deoarece impulsurile au durate prea reduse pentru a putea regla distanța între sfere pe durata aplicării acestora, iar pe de altă parte amplitudinea lor nu poate fi modificată decât de la un impuls la altul. Ca urmare, este necesară o metodă statistică de măsură, cel mai frecvent utilizată fiind metoda celor 50 % amorosări. Aceasta înseamnă obținerea unei distanțe între sfere pentru care, numai 50% dintre impulsurile identice aplicate provoacă amorosarea descărcării. Obținerea acestei distanțe între sferele eclatorului se poate face prin procedee practice care necesită un număr mai redus de încercări decât ar necesita metoda statistică completă.

Una dintre aceste metode, a „*treptelor multiple*”, presupune reglarea distanței dintre sfere în trepte de cel mult 2% din distanța disruptivă prezumată. Pentru fiecare treaptă se vor aplica serii de 6 impulsuri, intervalul de timp între două impulsuri succesive nefiind mai mic de 5 secunde. Distanța care corespunde tensiunii de 50% amorosări disruptive se obține prin interpolare liniară între două trepte consecutive ale distanței, pentru prima amorosările eclatorului fiind majoritare, iar pentru cealaltă amorosările fiind minoritare. Distanța inițială, prezumată, se poate stabili în funcție diametrul sferelor eclatorului folosit și de amplitudinea estimată a impulsului aplicat cunoscând tensiunea de încărcare a generatorului de impuls și mărimea coeficientului de utilizare al acestuia. O tehnică similară se poate folosi modificând amplitudinea impulsurilor și păstrând distanța între sfere constantă.

Altă metodă este cunoscută sub denumirea „*sus-jos*” și se aplică astfel: se pleacă de la estimarea tensiunii de 50% amorosări, U_{50} și se alege o treaptă de variație a acesteia, ΔU de cca. 3% din U_{50} . Se aplică eclatorului impulsul cu amplitudinea U_{50} . Dacă se produce amorosarea, următorul impuls aplicat va avea amplitudinea $U_{50} - \Delta U$. Dacă are loc o nouă amorosare, următorul impuls va avea amplitudinea $U_{50} - 2\Delta U$. Se continuă astfel cu reducerea tensiunii în trepte ΔU până când eclatorul nu mai amorează. Mai departe, tensiunea se va mări cu ΔU , iar în continuare creșterea sau reducerea tensiunii vor fi impuse de răspunsul eclatorului (neamorosare, respectiv amorosare). Se continuă astfel până la un număr de cca. 20 încercări. Tensiunea de 50% amorosări se calculează cu relația

$$U_{50} = \frac{\sum n_x U_x}{\sum n_x}, \quad (2)$$

în care n_x reprezintă numărul de aplicări ale impulsului cu amplitudinea U_x . Se vor lua în considerare numai treptele U_x care s-au aplicat de cel puțin două ori în seria de încercări. Această condiție elimină erorile datorate alegerii prea mari sau prea mici a tensiunii disruptive prezumate. Și această metodă poate fi transpusă în trepte de distanță, păstrând amplitudinea

impulsului neschimbată.

Tabelul 1 - Valorile de vârf ale tensiunilor disruptive ale eclatorului cu sfere ,cu o sferă legată la pământ în kV (valori disruptive de 50% amorsări în cazul tensiunilor de impuls).

Valabile pentru:

-tensiuni alternative,

-tensiuni de impuls negative pline, standardizate sau cu o durată de semiamplitudine mai mare ,

-tensiuni continue de ambele polarități.

Condiții atmosferice de referință: 20⁰ C și 1013 milibari (760 mmHg).

Distanța între sfere (cm)	Diametrul sferelor (cm)							
	2	5	10	15	25	50	75	100
0,05	2,8							
0,1	4,7							
0,15	6,4							
0,2	8,0	8						
0,25	9,6	9,6						
0,3	11,2	11,2						
0,4	14,4	14,3						
0,5	17,4	17,4	16,8	16,8				
0,6	20,4	20,4	19,9	19,9				
0,7	23,2	23,4	23	23				
0,8	25,8	26,3	26	26				
0,9	28,3	29,2	28,9	28,9				
1	30,7	32	31,7	31,7	31,7			
1,2	(35,1)	37,6	37,4	37,4	37,4			
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9			
1,5	(40)	45,5	45,5	45,5	45,5			
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1			
1,8		53	53,5	53,5	53,5			
2		57,5	59	59	59	59	59	
2,20		61,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	
2,40		65,5	69,5	70	70	70	70	
2,60		(69)	74,5	75,5	75,5	75,5	75,5	
2,80		(72,5)	79,5	80,5	81	81	81	
3,0		(75,5)	84	85,5	86	86	86	86
3,50		(82,5)	95	98	99	99	99	99
4,0		(88,5)	105	110	112	112	112	112
4,50			115	122	125	125	125	125
5,0			123	133	137	138	138	138
5,50			(131)	143	149	151	151	151
6,0			(138)	152	161	164	164	164
6,50			(144)	161	173	177	177	177
7,0			(150)	169	184	189	190	190
7,50			(155)	177	195	202	203	203
8,0				(185)	206	214	215	215
9,0				(198)	226	239	240	241
10,0				(209)	244	263	265	266
11,0				(219)	261	286	290	292
12,0				(229)	275	309	315	318
13,0					(289)	331	339	342
14,0					(302)	353	363	366

15,0					(314)	373	387	390
16,0					(326)	392	410	414
17,0					(337)	411	432	438
18,0					(347)	429	453	462
19,0					(357)	445	473	486
20,0					(366)	460	492	510
22,0						489	530	555
24,0						515	565	595
26,0						(540)	600	635
28,0						(565)	635	675
30,0						(585)	665	710
32,0						(605)	695	745
34,0						(625)	725	780
36,0						(640)	750	815
38,0						(655)	(775)	845
40,0						(670)	(800)	875
45,0							(850)	945
50,0							(895)	1010

Tabelul 2 - **Valorile de vârf** ale tensiunilor disruptive ale eclatorului cu sfere ,cu o sferă legată la pământ în kV (valori disruptive de 50% amorsări în cazul tensiunilor de impuls).

Valabile pentru:

- tensiuni de impuls pozitive pline, standardizate sau cu o durată de semiamplitudine mai mare ,
- tensiuni continue de ambele polarități.

Condiții atmosferice de referință: 20⁰ C și 1013 milibari (760 mmHg).

Distanța între sfere (cm)	Diametrul sferelor (cm)							
	2	5	10	15	25	50	75	100
0,3	11,2	11,2						
0,4	14,4	14,3						
0,5	17,4	17,4	16,8	16,8				
0,6	20,4	20,4	19,9	19,9				
0,7	23,2	23,4	23	23				
0,8	25,8	26,3	26	26				
0,9	28,3	29,2	28,9	28,9				
1	30,7	32	31,7	31,7	31,7			
1,2	(35,1)	37,8	37,4	37,4	37,4			
1,4	(38,5)	43,3	42,9	42,9	42,9			
1,5	(40)	46,2	45,5	45,5	45,5			
1,6		49	48,1	48,1	48,1			
1,8		54,5	53,5	53,5	53,5			
2		59,5	59	59	59	59	59	
2,20		64	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	
2,40		69	70	70	70	70	70	
2,60		(73)	75,5	75,5	75,5	75,5	75,5	
2,80		(77)	80,5	80,5	81	81	81	
3,0		(81)	85,5	85,5	86	86	86	86
3,50		(90)	97,5	98,5	99	99	99	99
4,0		(97,5)	109	111	112	112	112	112
4,50			120	124	125	125	125	125
5,0			130	136	138	138	138	138
5,50			(139)	147	151	151	151	151

6,0			(148)	158	163	164	164	164
6,50			(156)	160	175	177	177	177
7,0			(163)	178	187	189	190	190
7,50			(170)	187	199	202	203	203
8,0				(196)	211	214	215	215
9,0				(212)	233	239	240	241
10,0				(226)	254	263	265	266
11,0				(238)	273	287	290	292
12,0				(249)	291	311	315	318
13,0					(308)	334	339	342
14,0					(323)	357	363	366
15,0					(337)	380	387	390
16,0					(350)	402	411	414
17,0					(362)	422	435	438
18,0					(374)	442	458	462
19,0					(385)	461	482	486
20,0					(395)	480	505	510
22,0						510	545	555
24,0						540	585	600
26,0						570	620	645
28,0						(595)	660	685
30,0						(620)	695	725
32,0						(640)	725	760
34,0						(660)	755	795
36,0						(680)	785	830
38,0						(700)	(810)	865
40,0						(715)	(835)	900
45,0							(890)	980
50,0							(940)	1040

PRODUCEREA ȘI MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE ALTERNATIVE

1. Baze teoretice

1.1. Producerea tensiunilor înalte alternative de frecvență industrială

În laboratoarele de încercări, tensiunile înalte alternative de frecvență industrială se obțin, folosind transformatoare ridicătoare monofazate (transformatoare de încercare). Proiectarea și construcția lor sunt similare cu ale transformatoarelor de putere. Utilizarea lor la încercarea izolației echipamentului electric de înaltă tensiune impune însă unele caracteristici deosebite față de transformatoarele de putere, printre care menționăm:

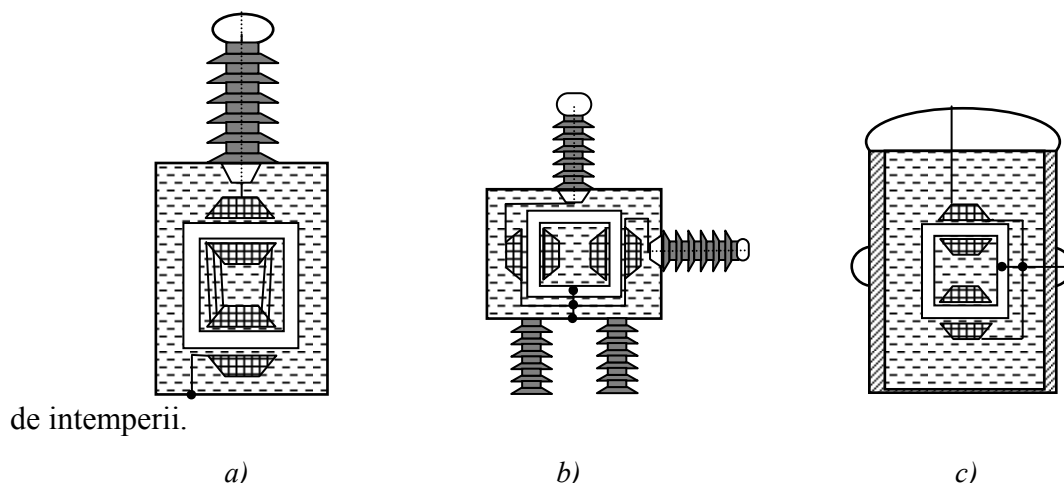
- curentul de scurtcircuit pe partea de înaltă tensiune trebuie să fie suficient de mare (1 A pentru încercarea izolației uscate, 3 A pentru încercarea izolației poluate sau sub ploaie) pentru a produce un defect vizibil în cazul în care izolația încercată nu rezistă solicitării ca și pentru a evita apariția unor supratensiuni importante în cazul arderii intermitente a arcului electric de străpungere sau conturare a izolației încercate;

- tensiunea de scurtcircuit trebuie să aibă o valoare cât mai mică pentru a se asigura valoarea cerută pentru intensitatea curentului de scurtcircuit și pentru reducerea căderilor de tensiune interne, respectiv reducerea tensiunii disponibile pe obiectul de încercat;

- tensiunea furnizată să fie practic sinusoidală, conținutul de armonici admis fiind de maximum 2-5%.

Pentru tensiuni de până la câteva sute de kV se folosesc transformatoare de încercare într-o singură unitate dar, deoarece o dată cu creșterea tensiunii nominale crește și gabaritul transformatorului, la tensiuni mai înalte este mai avantajos a se folosi transformatoare de încercare în cascadă. Principala dificultate în calea construirii unor transformatoare pentru tensiuni foarte înalte o constituie realizarea izolației atât interne cât și externe (izolatorul de trecere). O soluție frecvent folosită pentru reducerea dimensiunilor izolației este conectarea bornei mediane a înfășurării de înaltă tensiune la miezul magnetic și la carcasa metalică (fig.1, b). Este necesară așezarea carcasei pe izolatoare suport, dar atât acestea cât și izolatoarele de trecere se dimensionează la $\frac{1}{2} U_n$. O altă soluție folosită este construirea carcasei din material izolant (carton presat și impregnat) astfel că preia și funcția de izolator de trecere (fig.1, c).

Această soluție este admisibilă numai pentru transformatoarele instalate în spații protejate față



de intemperii.

Fig.1- Transformatoare de încercare
 a) în carcasă metalică, cu izolație plină; b) în carcasă metalică, cu izolație internă și externă 50%; c) în carcasă din material izolant

Construirea transformatoarelor de încercare în cascadă este un procedeu care permite obținerea tensiunilor de încercare de până la 2MV și chiar mai mari. Principiul de funcționare a acestor scheme constă în conectarea în serie a înfășurărilor de înaltă tensiune a 2-3 transformatoare, astfel încât tensiunea furnizată de cascadă este suma tensiunilor secundare a transformatoarelor cascadei. După modul de alimentare a înfășurărilor primare se deosebesc două tipuri de scheme, conform fig.2, a) și fig.2, b).

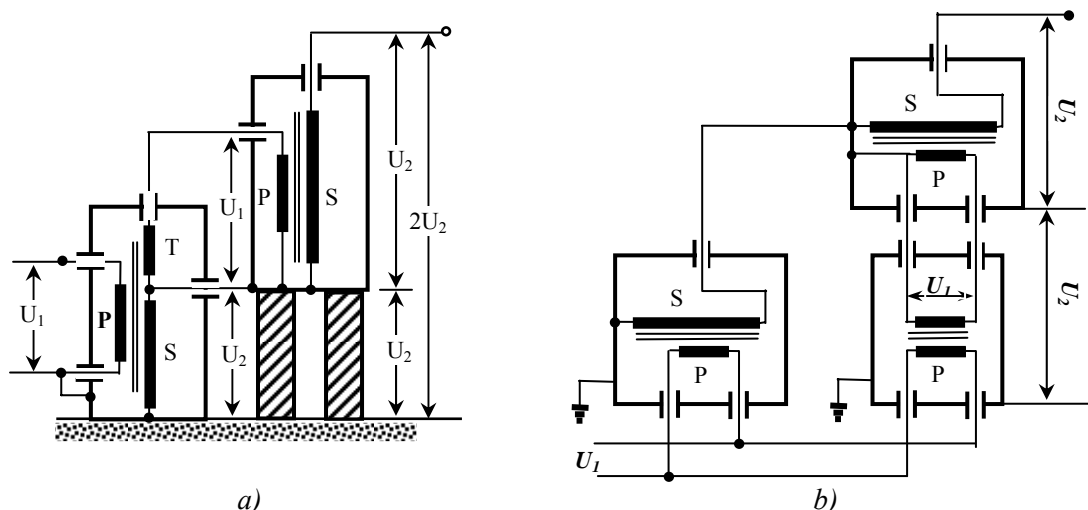


Fig.2 – Instalații în cascadă cu 2 trepte pentru producerea tensiunilor înalte alternative
 a) cu alimentarea treptelor în serie; b) cu alimentarea treptelor în paralel

În schema din fig.2, a), transformatorul de pe prima treaptă a cascadei conține, pe lângă înfășurările primară P și secundară S, o înfășurare de transfer T necesară pentru alimentarea înfășurării primare a treptei a doua. Înfășurarea de transfer are același număr de spire ca și

înfășurarea primară, dar este așezată peste înfășurarea secundară, cu care este conectată în serie. Datorită legăturii electrice dintre borna de înaltă tensiune a treptei I și carcasa transformatorului din treapta a II-a, este necesară montarea acestui transformator pe suporturi izolante. Puterea tranzitată prin transformatorul primei trepte include și puterea necesară treptei a doua.

Schema din Fig.2,b) este mai puțin folosită deoarece, pentru a produce aceeași tensiune înaltă are nevoie de trei transformatoare. Puterile celor trei transformatoare sunt egale. Transformatorul prin care se alimentează treapta a II-a are raportul de transformare 1, servind numai pentru izolarea înfășurării primare a acesteia față de rețeaua de alimentare de joasă tensiune. Ca urmare, izolația înfășurării sale secundare trebuie să suporte tensiunea secundară U_2 .

1.2. Măsurarea tensiunilor înalte de frecvență industrială

Pentru măsurarea tensiunilor înalte alternative se pot folosi mai multe metode: directe și indirecte. În cazul metodelor directe, dispozitivul de măsurare, dimensionat corespunzător, se conectează direct la înaltă tensiune. Aparatele de măsură cel mai des folosite, din această categorie, sunt eclatorul cu sfere și kilovoltmetrul electrostatic.

Eclatorul cu sfere este format din două sfere identice între care se aplică tensiunea de măsurat. Măsurarea se efectuează prin găsirea distanțe maxime între sfere la care se produce descărcarea electrică datorată tensiunii aplicate. Eclatorul cu sfere se poate utiliza pentru orice formă a tensiunii aplicate, descărcarea producându-se la valoarea maximă a tensiunii aplicate. Între distanța dintre sfere, diametrul sferelor și tensiunea disruptivă există o corelație dată de legea similitudinii descărcărilor. Valorile tensiunilor disruptive în condiții atmosferice normale sunt normalizate.

Kilovoltmetrul electrostatic funcționează pe baza forței care se exercită între doi electrozi între care există o diferență de potențial. Într-unul dintre electrozi este practicat un orificiu în care se așează o foiță metalică suspendată pe un fir metalic. În funcție de mărimea tensiunii aplicate, foița se va roti cu un anumit unghi. Prin devierea unei raze de lumină de către o oglindă solidară cu firul metalic, se obține indicația tensiunii pe o scală gradată. Întrucât forța electrostatică este proporțională cu U^2 , un astfel de aparat măsoară valoarea efectivă a tensiunii aplicate.

Metodele indirecte folosesc dispozitive intermediare, amplasate între borna de înaltă tensiune și aparatul de măsură de joasă tensiune, cu ajutorul cărora se obține reducerea valorii

tensiunii înalte până la valori care pot fi măsurate cu instrumente de joasă tensiune. Printre aceste metode menționăm următoarele:

a) *Măsurarea valorii efective a tensiunii alternative folosind raportul de transformare al transformatorului.*

Dacă raportul de transformare este definit ca raportul tensiunilor secundară și primară la funcționarea la gol, $k = U_{20}/U_{10}$, atunci cunoscându-se acest raport și măsurându-se tensiunea de alimentare, se poate calcula tensiunea înaltă din înfășurarea secundară. Metoda poate fi utilizată, cu erori admisibile numai în cazul funcționării transformatorului la gol și eventual cu sarcină redusă. Acesta este, de fapt, regimul de funcționare al transformatoarelor de încercare deoarece, până la producerea unei descărcări, sarcina este reprezentată de impedanța izolației obiectului încercat, în general foarte mare. Face excepție încercarea unor obiecte cu capacitate mare, când trebuie luată în considerare influența reactanței capacitive a obiectului, care provoacă o creștere a tensiunii secundare peste mărimea calculată cu raportul de transformare.

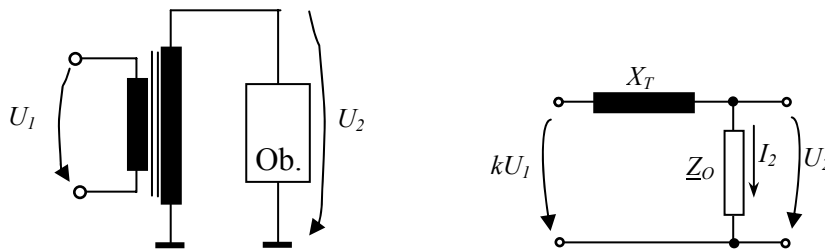


Fig.3 – Utilizarea raportului de transformare

Conform schemei echivalente din fig.3, se pot scrie relațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = k\underline{U}_1 - jX_T \underline{I}_2 \\ \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_O} \end{cases} \quad \underline{U}_2 = \frac{k\underline{U}_1}{1 + \frac{jX_T}{\underline{Z}_O}}$$

Dacă $\underline{Z}_O = jX_O$ (sarcină inductivă) atunci $U_2 < kU_1$, iar dacă $\underline{Z}_O = -jX_O$ (sarcină capacitivă) atunci $U_2 > kU_1$.

b) *Măsurarea tensiunilor alternative înalte cu ajutorul divizoarelor de tensiune și voltmetrelor de joasă tensiune.*

Divizorul de tensiune este un dispozitiv pasiv care reduce valoarea tensiunii înalte, fără a-i afecta forma, până la o mărime posibil de măsurat cu un instrument de joasă tensiune.

În principiu, divizorul de tensiune se poate prezenta ca fiind format din două impedanțe înseriate \underline{Z}_1 și \underline{Z}_2 (fig.4, a). Impedanța \underline{Z}_1 reprezintă brațul de înaltă tensiune, iar \underline{Z}_2 – brațul de joasă tensiune. Pentru ca \underline{Z}_1 să preia cea mai mare parte a tensiunii de măsurat, este necesar ca

$Z_1 \gg Z_2$. Impedanța de intrare a instrumentului de măsură trebuie să fie suficient de mare pentru a nu modifica raportul de divizare care se definește :

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1 + Z_{2e}}{Z_{2e}} \approx \frac{Z_1}{Z_{2e}}, Z_{2e} = \frac{Z_2 Z_m}{Z_2 + Z_m}.$$

În funcție de elementele de circuit folosite la realizarea constructivă a divizoarelor se deosebesc următoarele tipuri: rezistiv (fig.4,b), capacitiv (fig.4,c), mixt paralel (fig.4,d) și mixt serie (fig.4,e).

Divizorul rezistiv, realizat în mod obișnuit prin bobinarea antiinductivă, pe un suport electroizolant cilindric, a unui conductor cu rezistivitate mare, nu este indicat a fi folosit la măsurarea tensiunilor alternative din cauza erorilor, atât în amplitudine, cât și în fază, datorate prezenței capacităților parazite între componentele divizorului și pământ, respectiv electrodul de înaltă tensiune.

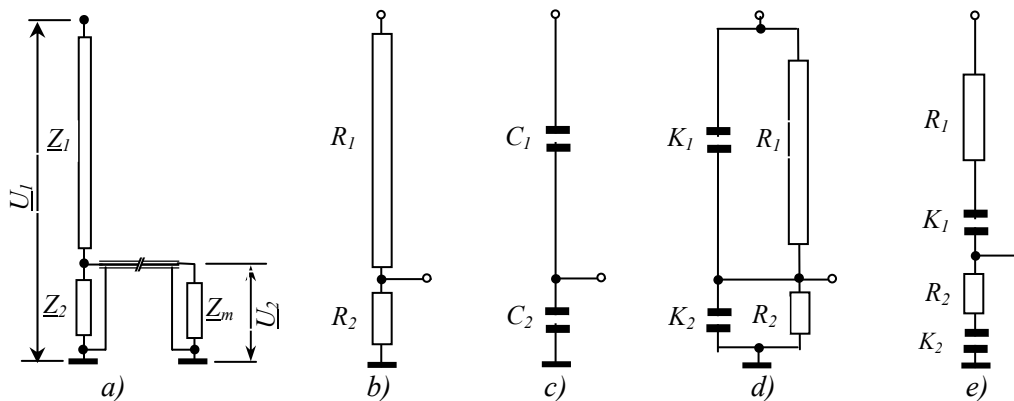


Fig.4 – Divizoare de tensiune

a) schema de principiu ; b) divizor rezistiv ; c) divizor capacitiv ; d) divizor mixt-paralel ; e) divizor mixt-serie

Divizorul capacitiv dă cele mai bune rezultate la măsurarea tensiunilor alternative. Constructiv, acesta este cel mai simplu de realizat. Erorile în amplitudine (nu și în fază) datorate prezenței capacităților parazite față de pământ sunt mai mici și pot fi micșorate și mai mult dacă mărimea capacității proprii depășește substanțial mărimea capacităților parazite sau dacă se folosesc electrozi pentru uniformizarea repartiției tensiunii de-a lungul divizorului. Eliminarea aproape completă a influenței capacităților parazite se obține folosind în brațul de înaltă tensiune un singur condensator cilindric coaxial cu izolație de gaz sub presiune.

Divizorul mixt paralel este de asemenea potrivit pentru măsurarea tensiunilor alternative de orice frecvență. La frecvențe joase ($\omega \rightarrow 0$) el se comportă ca un divizor rezistiv, raportul de divizare fiind $k = (R_1 + R_2) / R_2$, iar la frecvențe înalte ca un divizor capacitiv, având raportul de divizare $k = (K_1 + K_2) / K_2$. Dacă elementele R și K se aleg astfel încât $R_1 K_1 = R_2 K_2$, adică

constantele de timp ale celor două brațe ale divizorului să fie egale, se obține un divizor compensat, cu performanțe foarte bune la măsurarea fenomenelor rapid variabile. Divizorul mixt paralel este mai puțin utilizat din cauza dificultăților de realizare constructivă a brațului de înaltă tensiune.

Divizorul mixt serie, denumit și capacitiv amortizat, este recomandat pentru măsurarea tensiunilor foarte înalte, în care caz înălțimea constructivă a divizorului crește și, din cauza lungimii mai mari a conductoarelor de legătură, intervine influența inductivității acestora, în prezența căreia pot apare fenomene oscilatorii. Pentru amortizarea lor se folosesc rezistoare înseriate cu condensatoarele. Răspunsul divizorului este optim, de asemenea când el este compensat, adică se realizează condiția $R_1K_1 = R_2K_2$.

Ca instrument de măsură în brațul de joasă tensiune, se poate folosi orice aparat cu impedanță de intrare suficient de mare, capabil a măsura valoarea efectivă sau de vârf a tensiunii sau un osciloscop catodic.

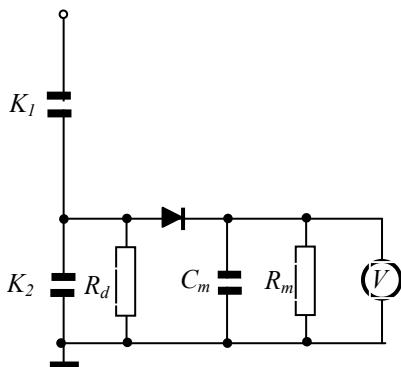


Fig.5 – Schema de principiu a măsurării valorii de vârf a tensiunii alternative

Pentru măsurarea valorilor de vârf a tensiunilor alternative se folosesc voltmetre electronice, care cuprind în blocul de intrare un condensator C_m , care se încarcă la valoarea de vârf a tensiunii de măsurat, în prealabil redresată. În paralel cu acest condensator se află o rezistență de descărcare, R_m , fig.5. Mărimea acesteia se alege ca un compromis între viteza de urmărire a variației tensiunii de măsurat și eroarea de măsurare datorată descărcării condensatorului între două perioade ale tensiunii. Orientativ, optimul este atins pentru $R_M C_M \approx 1s$.

c) Determinarea valorii de vârf a tensiunii prin măsurarea curentului capacitiv redresat

Metoda constă în măsurarea, cu ajutorul unui miliampermetru, a curentului absorbit de un condensator cărui i se aplică tensiunea de măsurat. Schema de principiu din fig.6, a) cuprinde un condensator de măsură, ecranat și un circuit de redresare bi-alternanță, pe una dintre ramuri fiind intercalat un mA-metru de curent continuu. Aparatul de măsură, de tip magnetoelectric, indică valoarea medie a curentului redresat prin una dintre diode.

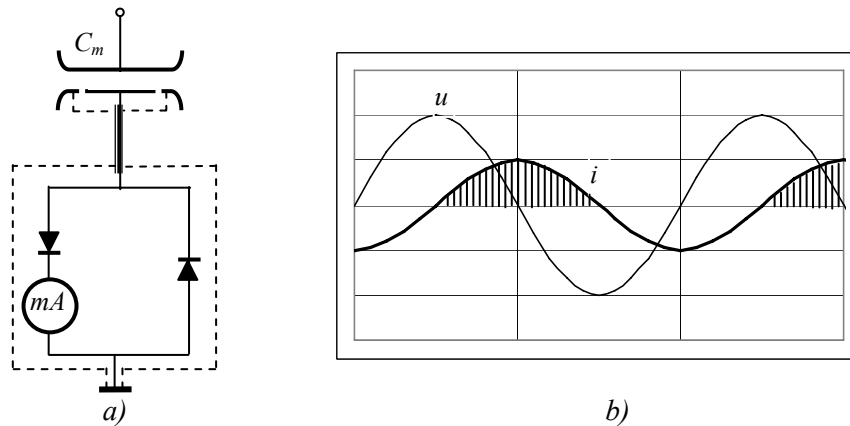


Fig. 6 – Măsurarea curentului capacitiv redresat
 a) schema de principiu; b) tensiunea aplicată și curentul măsurat

Mărimea acestui curent este

$$I_{med} = \frac{1}{T} \int_{-U_m}^{U_m} C_m \frac{dU}{dt} dt = fC_m [U_m - (-U_m)] = 2fC_m U_m.$$

Valoarea de vârf a tensiunii aplicate, U_m , se obține prin calcul cu relația:

$$U_m = \frac{I_{med}}{2fC}.$$

Pentru a se asigura o precizie ridicată este necesară cunoașterea exactă a frecvenței și utilizarea unui condensator special de măsură, cu dielectric gazos, în construcție ecranată. Dacă forma tensiunii este afectată de armonici, până la apariția unor vârfuri suplimentare, apar erori de măsurare proporționale cu amplitudinea acestora. Impedanța circuitului de măsură, înseriat cu condensatorul de măsură poate fi neglijată, deoarece este foarte redusă în raport cu reactanța capacitivă a condensatorului, a cărui capacitate este de cel mult 100 pF.

2. Modul de lucru

Lucrarea are ca scop cunoașterea modului de producere a tensiunilor înalte de frecvență industrială în laboratoarele de încercare, în ceea ce privește construcția transformatoarelor de încercare și a instalațiilor în cascadă, precum și folosirea acestora. De asemenea, se vor utiliza principalele metode de măsurare a tensiunilor înalte alternative. Însușirea și folosirea practică a normelor de protecție a muncii specifice lucrului în instalații de înaltă tensiune este obligatorie.

În acest scop se va studia construcția și modul de utilizare a instalației în cascadă de 250 kV. În continuare se vor executa măsurări ale tensiunii produse cu această instalație folosind:

- eclatorul cu sfere,

- divizorul de tensiune capacitiv și voltmetrul de vârf,
- metoda curentului capacitiv redresat
- coeficientul de transformare al cascadei.

Montajul de încercare este dat în fig.7. Modul de efectuare al măsurătorilor este dat în continuare.

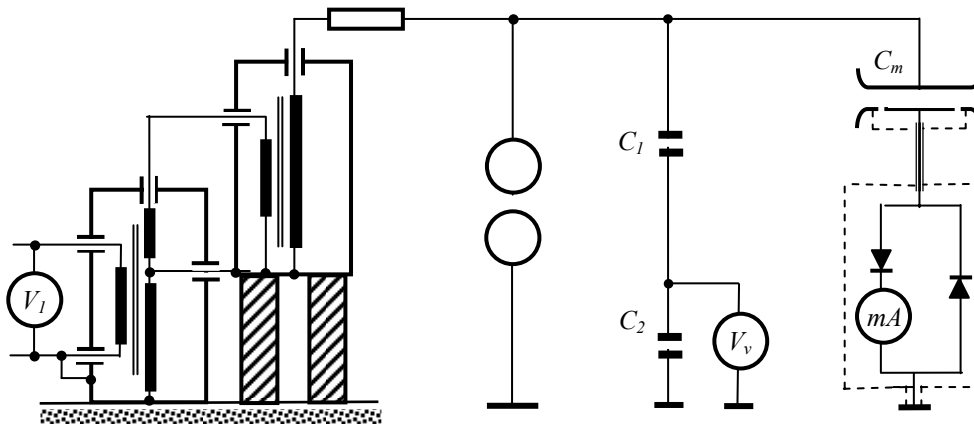


Fig.6 – Schema de principiu a montajului experimental

Eclatorul cu sfere.

Se folosește eclatorul vertical, cu sfere având diametrul de 50 cm, prin procedeul distanței fixe între sfere și creșterea tensiunii aplicate până la producerea descărcării. Ordinea operațiilor este:

- Se aleg câteva valori ale distanței dintre sferele eclatorului, la care se vor face încercările, ținând seama de tensiunea nominală a sursei și de tensiunile disruptive ale eclatorului (&....). Se va ține seama că tensiunile disruptive sunt exprimate în valori de vârf, iar tensiunea nominală a sursei în valori eficace.
- După reglarea cât mai exactă a distanței dintre sfere, se pune în funcțiune sursa și se comandă creșterea continuă, neîntreruptă, a tensiunii până la producerea descărcării. În momentul producerii descărcării se citește valoarea tensiunii de alimentare a cascadei la voltmetrul de pe pupitrul de comandă.
- Se execută de trei ori operația anterioară pentru fiecare dintre distanțele dintre sfere alese și se notează toate rezultatele obținute în tabel. Dacă una dintre încercări produce un rezultat mult diferit de celelalte, acesta va exclude și se va executa o încercare suplimentară. Abaterile mari au alte cauze decât caracterul statistic al descărcărilor, de exemplu prezența prafului sau a unui corp străin pe suprafața sferelor.

- Se va calcula factorul de corecție a valorilor standard ale tensiunii disruptive, corespunzător temperaturii și presiunii aerului în momentul măsurării (§) și se va folosi pentru calculul tensiunii disruptive în condițiile măsurării.

Divizorul capacitiv și voltmetrul de vârf

Divizorul capacitiv folosit are partea de înaltă tensiune formată dintr-un condensator de măsură, în construcție cilindrică coaxială, având dielectricul format dintr-un amestec de CO₂ și freon și tensiunea nominală de 350 kV. Brațul de joasă tensiune se află în apropierea voltmetrului de vârf, fiind racordat, printr-un cablu coaxial, cu condensatorul de înaltă tensiune. Voltmetrul de vârf, de tip MUT 7, indică valoarea tensiunii măsurate divizată prin $\sqrt{2}$.

După realizarea montajului, se va aplica tensiunea în mod crescător și se va regla cu cât mai mare precizie la valorile medii ale tensiunii obținute la folosirea eclatorului cu sfere, pentru fiecare dintre distanțele alese. Se va folosi facilitatea de reglare fină a tensiunii produse de sursă. Se va citi indicația voltmetrului de vârf și se va trece în tabelul de rezultate înmulțită cu $\sqrt{2}$.

Metoda curentului capacitiv redresat

Montajul folosește același condensator de măsură ca mai sus, la care se racordează, printr-un cablu coaxial, circuitul de redresare bialternanță în care este inclus și aparatul de măsură.

Se procedează la reglarea tensiunii aplicate montajului, ca la procedeul precedent și se citește indicația mA- metrului magnetoelectric la fiecare valoare reglată a tensiunii de alimentare. Datorită momentului de inerție mare al echipajului mobil al mA-metrului, este necesar a se aștepta cel puțin 1 minut după reglarea tensiunii până la citirea curentului. Se calculează mărimea tensiunii măsurate, folosind relația ().

Raportul de transformare

Pentru fiecare dintre metodele de măsurare și măsurările efectuate se va calcula raportul de transformare al cascadei. Deoarece rezultatele măsurărilor sunt afectate de erori, se va aplica metoda de calcul statistic a erorilor asupra acestor valori.

Astfel se va calcula:

- Valoarea medie a raportului de transformare $x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$;
- Eroarea medie $\varepsilon_m = \frac{\sum / \Delta x_i /}{n}$,

unde $|\Delta x_i| = |x_m - x_i|$ - valoarea absolută a abaterii măsurătorii x_i în raport cu valoarea medie x_m a ansamblului de n măsurători .

- Eroarea medie pătratică $\varepsilon_i = \sqrt{\frac{\Delta x_i^2}{n}}$.
- Dispersia rezultatelor în cazul unei distribuții normale (Gauss): $\sigma = \varepsilon_i^2$

Se vor trasa grafic curbele tensiunii înalte măsurate în funcție de distanța dintre sferele eclatorului $U=f(d)$, pentru cele trei metode folosite.

d (cm)	Eclatorul cu sfere							Divizorul de tensiune		Curentul capacitiv redresat		
	U ₁ (V)				U _{ES} stand. (kV _v)	δ*U _{ES} (kV _v)	k _{tr}	U ₂ (kV _v)	k _{tr}	I _{med} (mA)	U ₂ (kV _v)	k _{tr}
	1	2	3	Media								