

Lucrarea 1 - PRODUCEREA ȘI MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE ALTERNATIVE

1. Noțiuni teoretice

1.1. Producerea tensiunilor înalte alternative de frecvență industrială

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

- curenul de scurtcircuit pe partea de înaltă tensiune trebuie să fie suficient de mare (cel puțin 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 fie cât mai mică pentru a se asigura valoarea cerută pentru intensitatea curentului de scurtcircuit și pentru reducerea căderilor de tensiune interne, respectiv creșterea 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 conectate 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 (figura 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 ca să preia și funcția de izolator de trecere (figura 1, c). Această soluție este admisibilă numai pentru transformatoarele instalate în spații protejate față de intemperii.

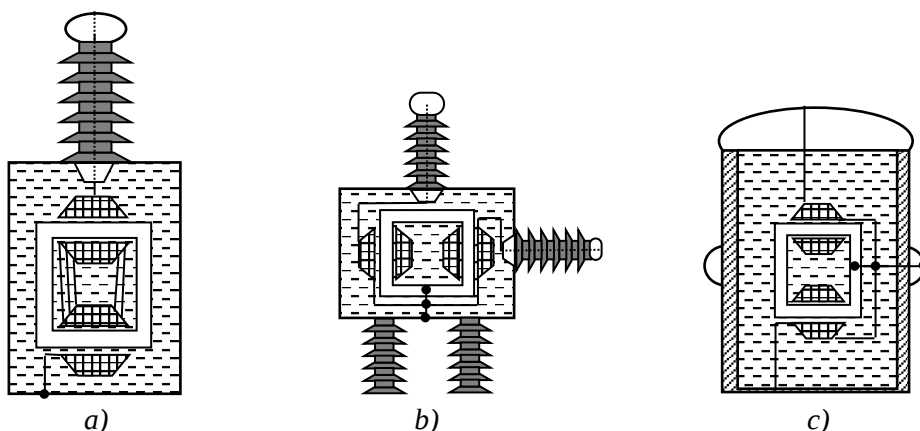


Fig. 1 - Transformatoare de încercare:

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

Conectarea transformatoarelor de încercare în cascadă este un procedeu care permite obținerea unor tensiuni de încercare de până la 2 MV 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 să fie suma tensiunilor secundare a transformatoarelor cascadei. După modul de alimentare a înfășurărilor primare se deosebesc două tipuri de scheme, conform figura 2.

În schema din figura 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 transformatorului 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 figura 2, b) este mai puțin folosită deoarece, pentru a produce aceeași tensiune înaltă este 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 înaltă U_2 .

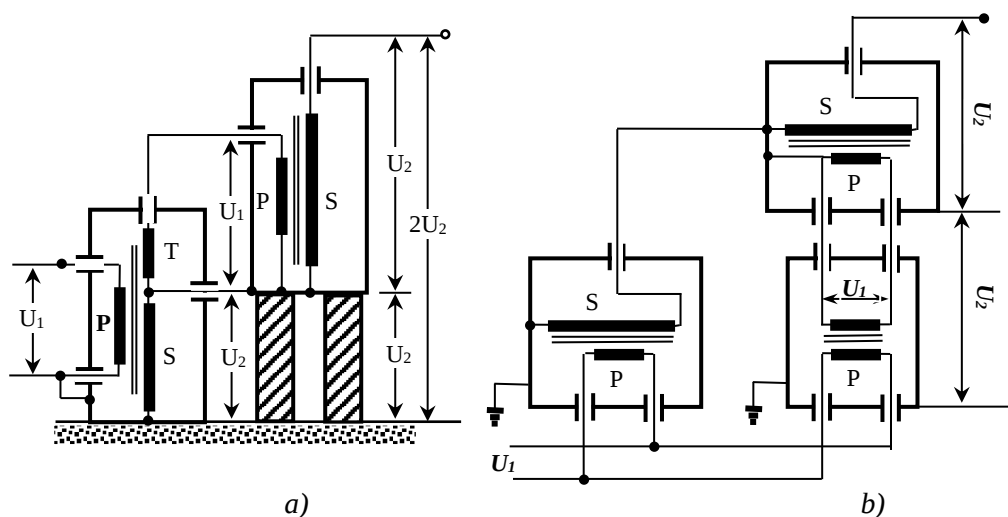


Fig. 2 – Instalații în cascadă cu 2 trepte pentru producerea tensiunilor înalte alternative:
a) cu alimentarea treptelor în serie; b) cu alimentarea treptelor în paralel.

Instalațiile de încercare cu tensiune înaltă alternativă existente în laborator, care au tensiunile nominale de 250 kV și 700 kV sunt realizate conform schemei din figura 1, a).

1.2. Măsurarea tensiunilor înalte de frecvență industrială

Pentru măsurarea tensiunilor înalte alternative se pot folosi mai multe metode, grupate în: directe și indirecte.

Metodele directe presupun conectarea dispozitivului de măsurare, dimensionat corespunzător, direct la înaltă tensiune. Aparatele, din această categorie, cele mai des folosite sunt eclatorul cu sfere și kilovoltmetrul electrostatic.

a. Măsurarea tensiunilor înalte alternative cu ajutorul eclatorului 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.

Așadar tensiunea disruptivă depinde de diametrul sferelor și de distanța dintre acestea, fiind indicată, pentru condiții atmosferice normale, în tabelul 1, valorile indicate fiind valabile pentru: tensiuni alternative, tensiuni de impuls negative pline, standardizate sau cu o durată de semi-amplitudine mai mare și tensiuni continue de ambele polarități.

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)
Condiții atmosferice de referință: 20° 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	

Distanța între sfere (cm)	Diametrul sferelor (cm)							
	2	5	10	15	25	50	75	100
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

Constructiv, un eclator este format din două sfere cu același diametru, din cupru, montate pe doi suportți dintre care cel puțin unul este izolat. 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 bruște 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 problemă este dispersia statistică a rezultatelor datorită multitudinii de factori aleatorii de care depinde formarea descărcării. Obținerea preciziei standard necesită efectuarea unui număr foarte de mare de încercări în condiții identice, ceea ce cere mult timp. Este importantă asigurarea acelorași condiții inițiale la repetarea încercărilor, 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 $k = \delta$, (δ fiind densitatea relativă a aerului), care se poate calcula cu una dintre relațiile:

$$\begin{array}{ll} \blacksquare \text{ dacă } p \text{ se măsoară în mbar} & \delta = 0,289 \frac{p}{273 + t}; \end{array} \quad (2)$$

$$\begin{array}{ll} \blacksquare \text{ dacă } p \text{ se măsoară în mmHg (torr)} & \delta = 0,386 \frac{p}{273 + t}. \end{array} \quad (3)$$

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

b. Măsurarea tensiunilor înalte alternative cu ajutorul kilovoltmetrului electrostatic

Acest dispozitiv 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 este așezată 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 alternative aplicate.

Metodele indirecte folosesc dispozitive intermediare, amplasate între circuitul de înaltă tensiune și un aparat de măsură de joasă tensiune, cu ajutorul cărora se obține reducerea valorii tensiunii înalte până la nivele care pot fi măsurate cu instrumente de joasă tensiune. Printre aceste metode se menționează 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 creșterea tensiunii secundare peste mărimea calculată cu raportul de transformare.

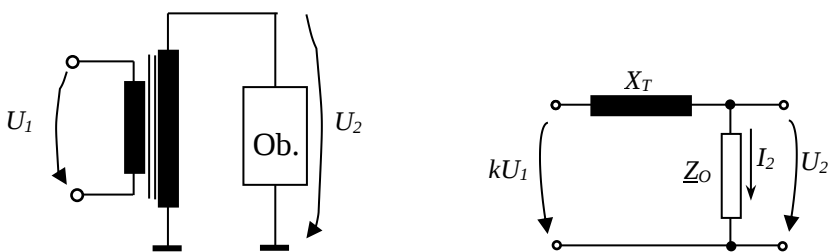


Fig. 3 – Utilizarea raportului de transformare

Conform schemei echivalente din figura 3, se pot scrie relațiile:

$$\begin{cases} \underline{U}_2 = k\underline{U}_1 - jX_T I_2 \\ I_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_O} \end{cases} \quad \underline{U}_2 = \frac{k\underline{U}_1}{1 + \frac{jX_T}{\underline{Z}_O}}. \quad (4)$$

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 $\underline{Z}_2$ (figura 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 $\underline{Z}_1 \gg \underline{Z}_2$. Impedanța de intrare a instrumentului de măsură trebuie să fie suficient de mare pentru a nu influența mărimea raportului de divizare. Considerând și impedanța instrumentului, raportul de divizare este:

$$k = \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{2e}}{\underline{Z}_{2e}} \approx \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_{2e}}, \underline{Z}_{2e} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_m}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_m}. \quad (5)$$

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

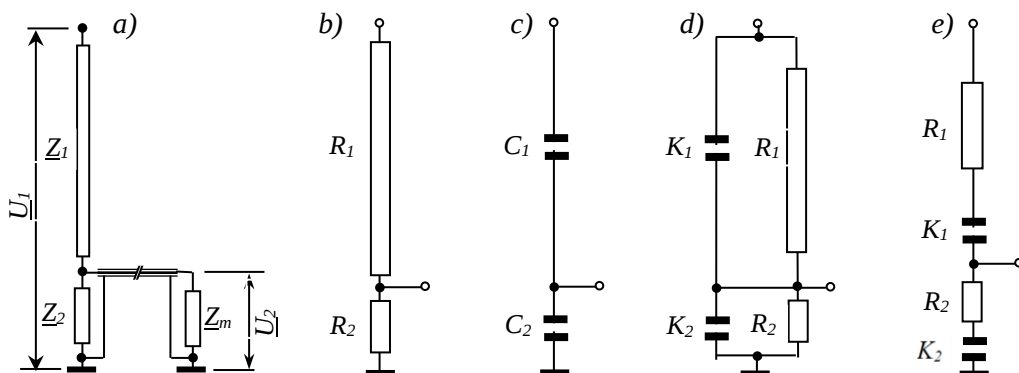


Fig. 4 – Divizoare de tensiune:

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

Divizorul rezistiv, realizat în mod obișnuit prin bobinarea anti-inductivă, 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.

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 poate obține folosind în brațul de înaltă tensiune un singur condensator, de exemplu de tip 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 ($\omega \rightarrow \infty$) se comportă ca un divizor capacitiv, având raportul de divizare $k = (K_1 + K_2)/K_1$. Dacă elementele R și K se aleg astfel încât $R_1 K_1 = R_2 K_2$, respectiv 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, caz în care înălțimea constructivă a divizorului crește, iar 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 $R_1 K_1 = R_2 K_2$. 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, de exemplu un voltmetru electronic sau un osciloscop catodic.

Pentru măsurarea valorii de vârf a tensiunii alternative se folosesc voltmetre electronice având 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 , așa cum reiese și din figura 5.

Mărimea acestuia se alege pentru a se obține 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 $R_M C_M \approx 1s$.

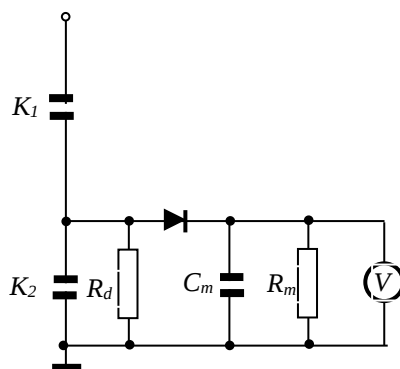


Fig. 5 – Schema de principiu a măsurării valorii de vârf a tensiunii alternative

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 căruia 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 magneto-electric, indică valoarea medie a curentului redresat de către una dintre diode.

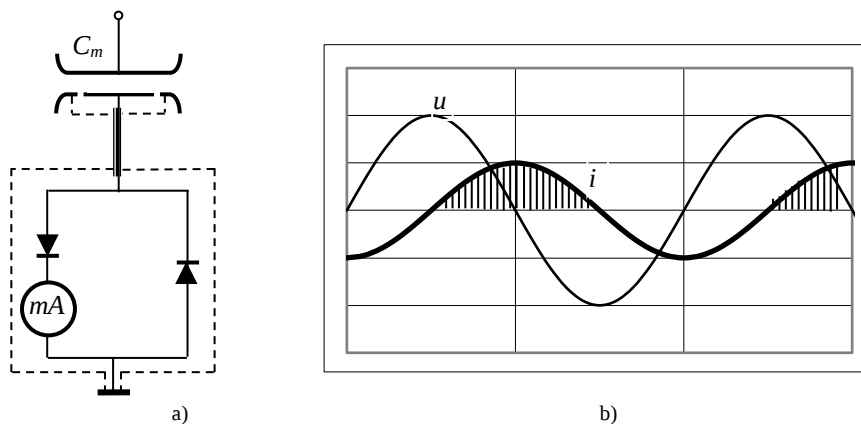


Fig. 6 – Măsurarea curentului capacitiv redresat
a) schema de principiu; b) tensiunea aplicată și curentul măsurat.

Mărimea acestui curent este:

$$I_{med} = \frac{1}{T} \int_{-U_m}^{U_m} C_m \frac{dU}{dt} dt = f C_m [U_m - (-U_m)] = 2 f C_m U_m. \quad (6)$$

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

$$U_m = \frac{I_{med}}{2 f C}. \quad (7)$$

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 poate fi neglijată, deoarece este foarte redusă în raport cu reactanța capacitivă a condensatorului, a cărei capacitate este de cel mult 100 pF.

2. Determinări experimentale

2.1. Prezentarea instalațiilor din laborator

Pentru producerea și măsurarea tensiunilor înalte alternative se vor utiliza un set de instalații și echipamente dispuse conform montajului prezentat în figura 7, în timp ce în figura 8 sunt prezentate detalii cu dispunerea efectivă a instalațiilor în laborator.

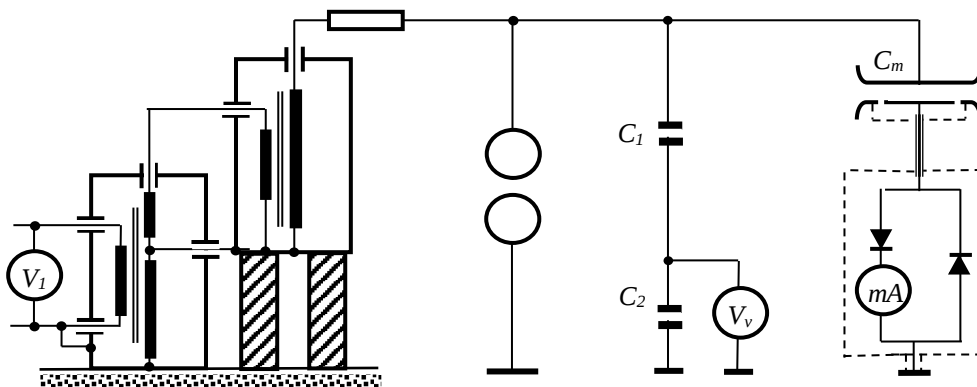


Fig. 7 – Schema de principiu a montajului experimental

Din detaliile prezentate în figura 8 se pot observa: instalația cu două transformatoare montate în cascadă (cuva acestora fiind de culoare albastră), eclatorul cu sfere de diametrul de 50 cm, dispuse în plan vertical, precum și divizorul capacitiv de tensiune (cel cu carcasa de culoare roșie). Aparatele de măsură, și anume voltmetrul și

ampermetru, nu apar în aceste detalii, ele fiind amplasate în zona pupitrului de comandă, acesta regăsindu-se în interiorul zonei de siguranță delimitate prin gardul de culoare galbenă.



Fig. 8 – Montajul de încercare pentru efectuarea lucrărilor experimentale

Așadar, pentru producerea tensiunilor înalte alternative se utilizează o instalație ce include două transformatoare monofazate (de fabricație românească, URTAE Roman, 1978), 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 – 1A;
- tensiunea de scurtcircuit 10,25 %.

Schema electrică de principiu a cascadei este dată în figura 9. Fiecare transformator conține câte o înfășurare primară P și 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.

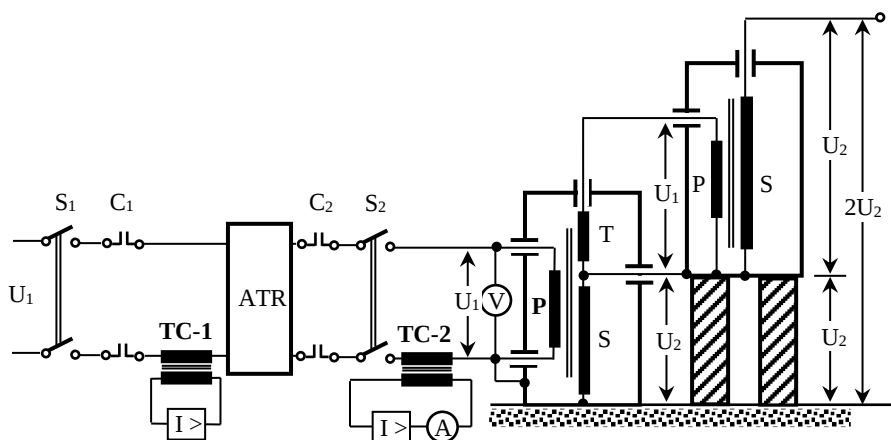


Fig. 9 – Schema electrică a cascadei de transformatoare de încercare de 250 kV
 ATR-autotransformator reglabil; P-înfășurare primară; S-înfășurare secundară; T-înfășurare de transfer; C_1 , C_2 -contactoare; S_1 , S_2 -separatoare; TC-transformator de curent; I >- releu maximal de curent; A-ampermetru; V-voltmetru.

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 suporti izolanți. 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. 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 relee Bucholtz. Protecția la suprasarcini de durată este asigurată de relee termice atașate contactoarelor C_1 și C_2 , iar protecția la suprasarcini de scurtă durată se realizează cu ajutorul a două relee maxime de curent, precum și cu siguranțe fuzibile rapide.

Schema pupitrului de comandă este prezentată în figura 10, alături de un detaliu grafic al pupitrului propriu-zis.

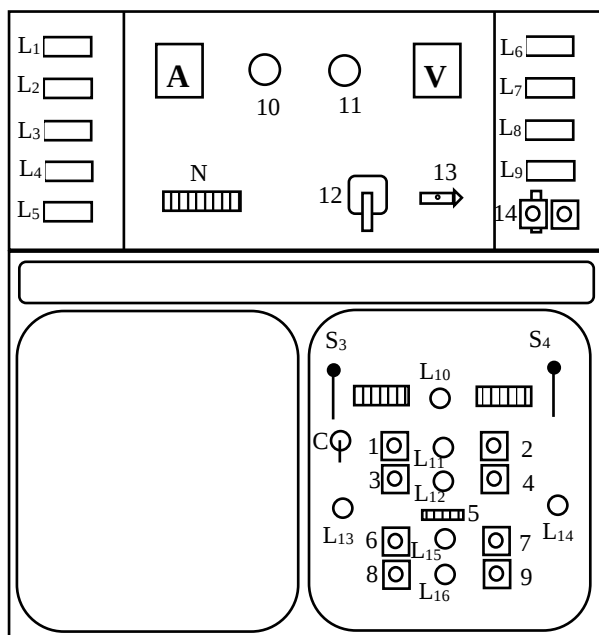


Fig. 10 – Pupitrul de comandă al instalației 250 kV, 50 Hz

Semnificația elementelor de pe pupitrul de comandă, în conformitate cu reprezentarea schematică din figura 10, și rolul acestora este prezentat mai jos:

- C-întrerupător cu cheie pentru alimentarea circuitelor de comandă și semnalizare; A-măsura curentului absorbit de cascadă; V-măsura tensiunii înalte; N-indicator al distanței dintre sferele eclatorului Φ 50 cm; S₃-separator în circuitul de comandă al contactorului C₁; S₄-separator în circuitul de comandă al contactorului C₂;
- **Comenzi:** 1-conectare contactor C₁; 2-deconectare contactor C₁; 3-conectare contactor C₂; 4-deconectare contactor C₂; 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 Φ 50 cm; 13-conectarea controlului succesiunii fazelor; 14-anularea semnalizărilor;
- **Semnalizări:** L₁-alimentare generală a instalației; L₂-bariera de acces ridicată; L₃-contact de podea deschis, L₄-cursorul autotransformatorului nu se află la zero; L₅-avertizare relevu gaze; L₆-avertizare pentru verificarea manuală a prezenței tensiunii; L₇-avertizare pentru separarea vizibilă a circuitului de alimentare; L₈-funcționarea protecției maximele 1; L₉- funcționarea protecției maximele 2; L₁₀-prezența tensiunii în circuitele de comandă; L₁₁-contactorul C₁ închis; L₁₂-contactorul C₂ închis; L₁₃-sistemul trifazat de tensiuni cu succesiune directă; L₁₄-

sistemul trifazat de tensiuni cu succesiune inversă; L_{15} -tensiunea crește; L_{16} -tensiunea scade.

În afară de elementele de comandă, măsură și semnalizare ale instalației de încercare, pupitrul mai cuprinde comanda acționării eclatorului cu sfere Φ 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 butoanelor de comandă, iar limitatoarele de cursă nu și-ar mai îndeplini funcția, apărând pericol de avarie mecanică.

Pentru utilizarea în deplină siguranță a instalației de transformatoare în cascadă trebuie parcurse următoarele operații:

- se pregătește zona de lucru, 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 (aceiași 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 pupitrul (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.

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.

2.2. Modul de lucru

Pentru determinarea experimentală a tensiunilor înalte alternative se vor utiliza cele trei metode de măsurare ce au fost prezentate în detaliu în paragraful 1.2 al lucrării, și anume: eclatorul cu sfere, divizorul de tensiune capacitiv și voltmetrul de vârf, respectiv metoda curentului capacitiv redresat. Valorile măsurate vor permite apoi determinarea raportului de transformare al cascadei.

a. Determinarea tensiunilor înalte cu ajutorul eclatorului cu sfere

Această primă etapă are un dublu scop, pe lângă determinarea tensiunilor înalte, notate cu U_2 , urmărindu-se și măsurarea tensiunii de alimentare a cascadei, notate cu U_1 .

Se folosește astfel eclatorul vertical, cu sfere având diametrul de 50 cm, prin procedeul distanței fixe între sfere și creșterea tensiunii aplicate până la producerea descărcării. În acest sens se aleg câteva valori ale distanței dintre sferele eclatorului (ex: 2, 4, 6, 8 cm), pentru care se vor face încercările, reglarea acestora realizându-se prin dispunerea unor distanțiere de lungimile respective între sfere eclatorului și apropierea sferelor până la realizarea contactului cu distanțierele înserate. Înainte de aplicarea tensiunii înalte distanțierele utilizate vor fi extrase.

Pentru măsurarea tensiunii de alimentare se au în vedere următoarele etape:

- 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;

Pentru măsurarea tensiunii înalte se procedează în felul următor:

- pentru fiecare dintre distanțele considerate se va nota în tabelul cu rezultate valoarea tensiunii disruptive, în conformitate cu valorile prezentate în tabelul 1, din paragraful 1.2 al lucrării;
- având în vedere faptul că valorile tensiunii disruptive prezentate în tabelul 1 sunt valabile doar pentru condiții atmosferice standard, iar condițiile din laborator la momentul efectuării măsurărilor sunt, cu cea mai mare probabilitate, diferite, atunci este necesară corectarea valorilor standard indicate în tabelul 1, în conformitate cu condițiile reale din laborator;
- astfel, folosind relația (3), prezentată anterior, se va calcula densitatea relativă a aerului, corespunzătoare temperaturii și presiunii din laborator în momentul măsurării și se va folosi pentru corectarea tensiunii disruptive în condițiile măsurării, conform expresiei (1).

Valorile măsurate ale tensiunii de alimentare, respectiv ale tensiunii înalte, se vor nota într-un tabel întocmit în conformitate cu modelul prezentat în tabelul 2, prezentat mai jos:

Tabelul 2. Rezultatele determinărilor experimentale

d (cm)	Tensiunea de alimentare				Eclatorul cu sfere			Divizorul de tensiune		Curentul capacitiv redresat		
	U_1 (V)				U_2 stand.	U_2 corect.	k_{tr}	U_2	k_{tr}	I_{med}	U_2	k_{tr}
	1	2	3	Media	(kV _v)	(kV _v)		(kV _v)		(mA)	(kV _v)	
2												
4												
6												
8												

b. Determinarea tensiunilor înalte folosind divizorul capacitiv și voltmetrul de vârf

A doua metodă folosită în cadrul determinărilor experimentale constă în utilizarea divizorului capacitiv și a unui voltmetru, echipamentele fiind prezentate în detaliile din figura 11.



Fig. 11 – Divizorul capacitiv și voltmetrul de vârf utilizate

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.

Pentru măsurarea tensiunii înalte se au în vedere următoarele etape:

- se realizează conectarea voltmetrului de vârf la brațul de joasă tensiune a divizorului, printr-un cablu coaxial;
- după realizarea montajului, se va aplica tensiunea în mod crescător și se va regla cu cât mai mare precizie la valorile medii ale tensiunii de alimentare măsurate anterior la folosirea eclatorului cu sfere, pentru fiecare dintre distanțele alese. Se va folosi facilitatea de reglare fină a tensiunii produse de sursă;
- după reglarea tensiunii de alimentare se va citi indicația voltmetrului de vârf și se va trece în tabelul de rezultate înmulțită cu $\sqrt{2}$, deoarece voltmetrul utilizat indică de fapt valoarea efectivă a tensiunii măsurate.

c. Determinarea tensiunilor înalte prin măsurarea curentului capacitiv redresat

Montajul folosește din nou condensatorul de măsură din brațul de înaltă tensiune a divizorului de tensiune, la care se racordează, printr-un cablu coaxial, circuitul de redresare bi-alternanță în care este inclus și aparatul de măsură, acesta din urmă fiind amplasat pe pupitrul de comandă al instalației, așa cum se poate observa și din figura 12.

Fig. 12 – Miliampermetru utilizat pentru măsurarea curentului capacitiv redresat.



Pentru măsurarea tensiunii înalte se vor parcurge următorii pași:

- după realizarea montajului, se va aplica tensiunea în mod crescător și se va regla cu cât mai mare precizie la valorile medii ale tensiunii de alimentare măsurate anterior la folosirea eclatorului cu sfere, pentru fiecare dintre distanțele alese. Se va folosi facilitatea de reglare fină a tensiunii produse de sursă;
- se citește indicația mA-metrului magnetoelectric la fiecare valoare stabilită pentru tensiunea 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. Valorile măsurate ale curentului se trec în tabelul cu rezultate;
- se va calcula mărimea tensiunii măsurate folosind relația (7), valoarea capacității C fiind cea a condensatorului C_1 al divizorului, aceasta fiind de 59,915 pF, așa cum apare indicat pe plăcuța divizorului capacitiv;
- rezultate obținute din calcul se trec în tabelul 2.

d. Calculul raportului de transformare al cascadei

Pentru fiecare dintre metodele de măsurare și măsurările efectuate se va calcula raportul de transformare al cascadei ca raport a tensiunii înalte măsurate sau calculate, U_2 , și valoarea medie a tensiunii de alimentare a cascadei, U_1 . Se va ține seama că tensiunile disruptive sunt exprimate în valori de vârf, iar tensiunea nominală a sursei în valori eficace. Valorile calculate ale raportului de transformare se completează în tabelul cu rezultate.

e. Calculul erorilor de măsurare

Deoarece rezultatele măsurărilor sunt afectate de erori, se va aplica o metodă de calcul statistic a erorilor asupra valorilor raportului de transformare a cascadei.

Astfel se va calcula:

- Valoarea medie a raportului de transformare $x_m = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n};$ (8)

- Eroarea medie $\varepsilon_m = \frac{\sum |\Delta x_i|}{n},$ (9)

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

- Eroarea medie pătratică $\varepsilon_i = \sqrt{\frac{\Delta x_i^2}{n}}.$ (10)

- Dispersia rezultatelor în cazul unei distribuții normale (Gauss): $\sigma = \varepsilon_i^2$ (11)