

## **Lucrarea 2 – PRODUCEREA ȘI MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE CONTINUE**

### **1. Noțiuni teoretice**

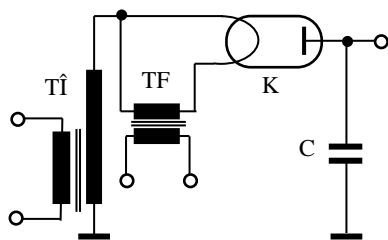
#### **1.1. Producerea tensiunilor înalte continue**

Lucrarea are ca scop cunoașterea modului de producere a tensiunilor înalte continue în laboratoarele de încercare, în ceea ce privește construcția schemelor de redresare a tensiunii înalte alternative, precum și folosirea acestora. De asemenea, se urmărește și însușirea principalele metode de măsurare a tensiunilor înalte continue. Cunoașterea normelor de protecție a muncii specifice lucrului în instalații de înaltă tensiune, precum și a modului de aplicare a acestora este obligatorie.

Procedeul cel mai frecvent utilizat pentru producerea tensiunilor continue în laboratoarele de înaltă tensiune constă în redresarea tensiunii înalte alternative, furnizată de către transformatoarele de încercare. Ca elemente redresoare se pot folosi diode de înaltă tensiune cu vid (kenotroane) sau diode semiconductoare (cu seleniu sau cu siliciu).

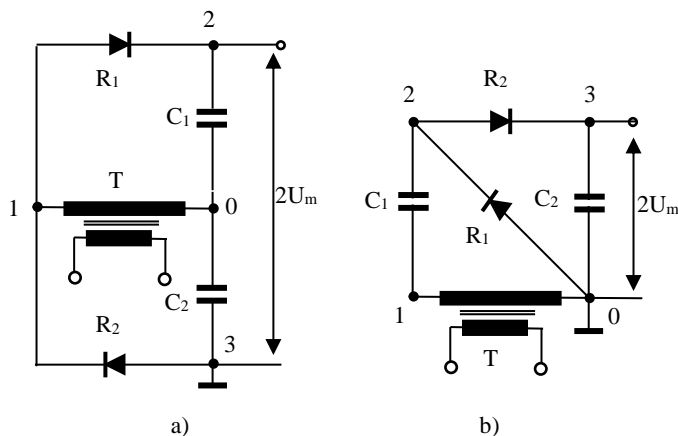
O schemă de redresare monoalternanță este prezentată în figura 1, în care kenotronul este construit dintr-un balon de sticlă cu vid avansat în care se găsesc cei doi electrozi – anod și catod. Catodul are forma unui filament care, alimentat la o tensiune redusă (cel mult zeci de volți), se încălzește până la o temperatură la care apare emisia termoelectronică. Deoarece catodul este conectat galvanic la circuitul de înaltă tensiune, pentru încălzirea lui este necesar un transformator având izolația dintre înfășurări dimensionată corespunzător tensiunii înalte care trebuie redresată. Necesitatea transformatorului de încălzire aduce complicații constructive, mai ales în cazul schemelor cu multiplicare a tensiunii redresate.

Utilizarea diodelor semiconductoare elimină aceste complicații, iar prin înserierea unui număr suficient de joncțiuni se pot obține tensiuni inverse până la 500 kV.



**Fig. 1** – Redresare monoalternanță cu kenotron

Redresarea monoalternanță se folosește pentru obținerea tensiunilor continue de până la circa 100 kV. Pentru tensiuni mai înalte, se recurge la scheme cu multiplicarea tensiunii, care au la bază circuite de redresare cu dublarea tensiunii, precum cele prezentate în figura 2.



**Fig. 2** – Scheme de redresare cu dublarea tensiunii  
a) schema simetrică; b) schema nesimetrică

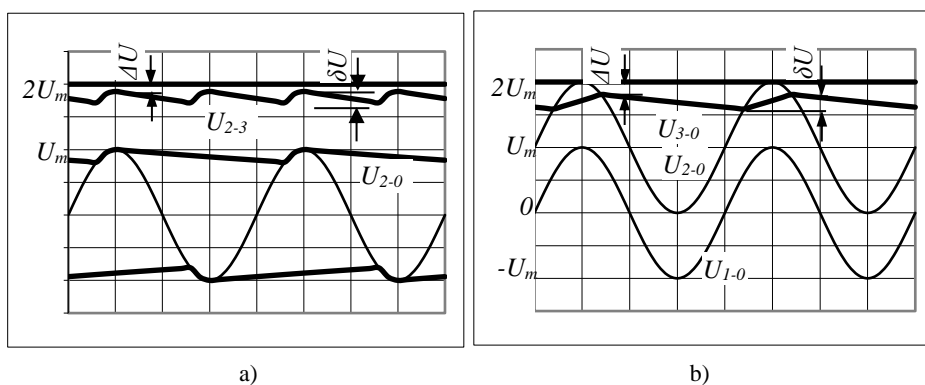
Schema din figura 2, a), numită și *șchemă de dublare simetrică*, permite obținerea unei tensiuni continue egale cu dublul valorii de vârf a tensiunii furnizate de transformatorul  $T$ . Cele două condensatoare se încarcă, prin câte un redresor, separat pe durata alternanțelor pozitivă și negativă, până la valoarea de vârf a tensiunii produse de transformator. Datorită modului de conectare a redresoarelor, tensiunile celor două condensatoare se însumează.

În această șchemă unul dintre condensatoare are o bornă legată la pământ, astfel că înfășurarea de înaltă tensiune a transformatorului trebuie să aibă ambele borne izolate față de pământ. Schema se poate folosi și cu legare la pământ a sfârșitului înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului ridicător, dar, în acest caz, nici o bornă a condensatoarelor nu mai poate fi legată la pământ. Această variantă se utilizează atunci când sunt necesare tensiuni egale, dar cu polarități opuse față de pământ.

Schema din figura 2, b), numită *șchemă de dublare nesimetrică* furnizează, de asemenea, o tensiune continuă egală cu dublul valorii de vârf  $U_m$  a tensiunii din înfășurarea secundară a transformatorului de alimentare. Această înfășurare trebuie să aibă sfârșitul legat la pământ. Dublarea tensiunii redresate se realizează prin alt procedeu

decât în cazul schemei simetrice. Astfel, condensatorul  $C_1$  se încarcă prin redresorul  $R_1$  până la valoarea de vârf a tensiunii furnizate de transformator. Prin însumarea tensiunii constante de pe condensatorul  $C_1$  cu tensiunea sinusoidală a înfășurării transformatorului apare în punctul 2 o tensiune, continuă ca polaritate, dar variabilă ca valoare, între 0 și  $2U_m$ . Prin redresorul  $R_2$  se încarcă condensatorul  $C_2$  până la tensiunea  $2U_m$ , aceasta fiind și tensiunea între bornele 3 și 0, de ieșire ale schemei.

În figura 3, a) și b) sunt date formele tensiunilor în nodurile schemei de dublare simetrică, respectiv în nodurile schemei cu dublare nesimetrică



**Fig. 3** – Tensiunile în nodurile schemelor de redresare cu dublarea tensiunii, la funcționarea în sarcină: a) schema simetrică; b) schema nesimetrică

Tensiunea continuă furnizată de aceste scheme de multiplicare are mărimea  $2U_m$  numai la funcționarea fără sarcină (la gol). La funcționarea în sarcină, în perioada de timp cât redresoarele sunt blocate, consumatorul este alimentat din condensatoare, ceea ce produce descărcarea acestora. În intervalul de conducție a redresoarelor consumatorul este alimentat direct de la transformator, totodată refăcându-se și sarcina pierdută de către condensatoare pe perioada blocării redresoarelor. Ca urmare, în tensiunea de ieșire apare o componentă variabilă periodic, suprapusă peste valoarea medie a tensiunii continue, așa cum se poate observa și din figura 3.

Pentru obținerea unor tensiuni continue mai înalte decât permit schemele de dublare, se poate realiza o conectare în cascadă a acestora, rezultând scheme de multiplicare cu mai multe etaje.

## 1.2. Măsurarea tensiunilor înalte continue

Similar metodelor utilizate pentru măsurarea tensiunilor înalte alternative, și pentru măsurarea tensiunilor înalte continue pot fi utilizate fie metode directe, fie metode indirecte. Astfel, măsurarea directă se poate realiza fie utilizând eclatorul cu sfere, fie un

kV-metru electrostatic, în timp ce măsurarea indirectă presupune utilizarea divizoarelor de tensiune și a unor aparate de joasă tensiune.

a. *Măsurarea tensiunilor înalte continue cu ajutorul eclatorului cu sfere*

*Eclatorul cu sfere* este format din două sfere identice între care se aplică tensiunea de măsurat. Eclatorul cu sfere se poate utiliza pentru orice formă a tensiunii aplicate, descărcarea producându-se la valoarea maximă a tensiunii aplicate. Măsurarea se efectuează prin stabilirea distanței maxime între sfere la care se produce descărcarea electrică datorită 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 standardizate, fiind prezentate în tabelul următor:

**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	
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

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

Densitatea gazului (aerului) influențează direct mărimea tensiunii disruptive, astfel încât dacă măsurătorile nu sunt efectuate în condiții standard de temperatură și presiune atmosferică este necesară corectarea valorilor standard indicate în tabelul 1. Astfel, se va calcula densitatea relativă a aerului din laborator, cunoscând temperatura  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) și presiunea atmosferică  $p$  (mm col Hg) din laborator, utilizând formula:

$$\delta = 0,386 \frac{P}{273+t} \quad (1)$$

și se vor corecta valorile standardizate ale tensiunii disruptive:

$$U_{corectat} = U_{standard} \cdot \delta \quad (2)$$

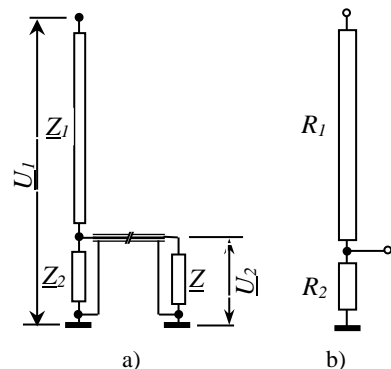
Construcția, principiul de funcționare, precum și modul de utilizare al eclatorului cu sfere au fost prezentate în detaliu în cadrul lucrării de laborator anterioare (*Lucrarea I – Producerea și măsurarea tensiunilor înalte alternative*).

b. Măsurarea tensiunilor înalte continue 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  $Z_1$  și  $Z_2$ , așa cum se poate observa și din figura 4, a).

Impedanța  $Z_1$  reprezintă brațul de înaltă tensiune, iar  $Z_2$  – brațul de joasă tensiune. Pentru ca  $Z_1$  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. Considerând și impedanța instrumentului, raportul de divizare este:

$$k = \frac{U_1}{U_2} = \frac{Z_1 + Z_{2e}}{Z_{2e}} \approx \frac{Z_1}{Z_{2e}}, Z_{2e} = \frac{Z_2 Z_m}{Z_2 + Z_m}. \quad (3)$$



**Fig. 4** – Divizoare de tensiune  
a) schema de principiu;  
b) divizor rezistiv.

Spre deosebire de cazul tensiunilor alternative, pentru măsurarea tensiunilor continue se poate utiliza numai divizorul rezistiv, schema acestuia fiind prezentată în figura 4, b).

Din punct de vedere constructiv, divizorul rezistiv este realizat în mod obișnuit prin bobinarea anti-inductivă, pe un suport electroizolant cilindric, a unui conductor cu rezistivitate mare. În cazul măsurării tensiunilor continue, bobinarea anti-inductivă nu este absolut necesară, deoarece viteza de variație a tensiunii de măsurat este redusă astfel că inductanța bobinajului nu poate produce erori de măsurare importante. Nu se folosesc divizoare conținând elemente capacitive, deoarece în acest caz, tensiunea continuă s-ar repartiza pe elementele divizorului proporțional cu rezistențele de conducție ale izolației condensatoarelor și nu după capacități, iar mărimea acestor rezistențe este greu controlabilă. Pentru menținerea preciziei de măsurare este necesară asigurarea evacuării căldurii degajate în conductor.

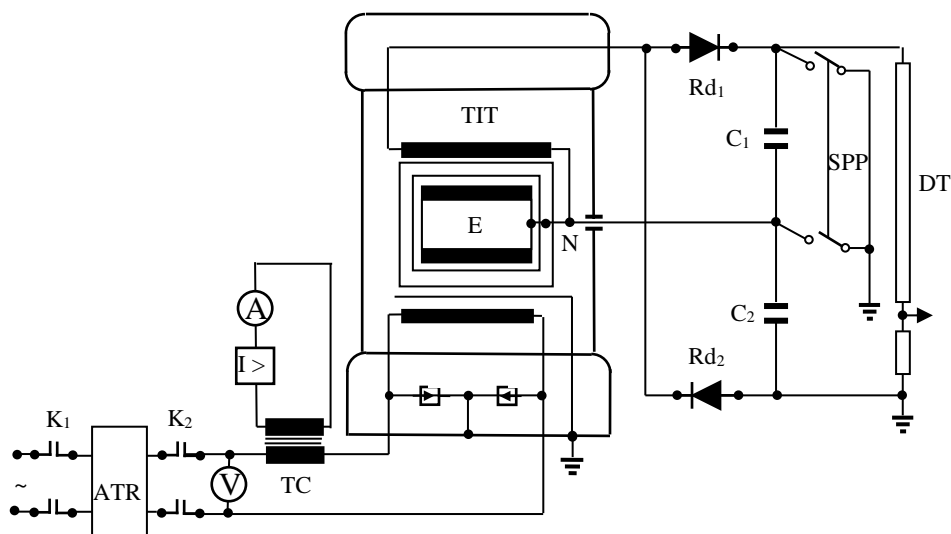
În brațul de joasă tensiune se pot folosi aparate cu impedanță mare de intrare precum voltmetrele numerice și oscilografe. O variantă simplificată de măsurare este

înlocuirea brațului de joasă tensiune cu un mA-metru magnetoelectric. Tensiunea măsurată va fi obținută din produsul curentului cu mărimea rezistenței brațului de înaltă tensiune care devine astfel o rezistență adițională.

## 2. Determinări experimentale

### 2.1. Prezentarea instalației de încercare din laborator

Pentru producerea tensiunilor înalte continue este utilizată o instalație, de fabricație germană (TuR Dresden), ce folosește o schemă de redresare cu dublare de tensiune. Schema electrică de principiu a acesteia este prezentată în figura 5, principalele elemente componente fiind: transformatorul de înaltă tensiune TIT, condensatoarele schemei de dublare  $C_1$  și  $C_2$ , respectiv redresoarele  $R_{d1}$  și  $R_{d2}$ .



**Fig. 5** – Schema electrică de principiu a instalației de încercare cu tensiune înaltă continuă de 300 kV/50 mA: TIT-transformator de înaltă tensiune;  $R_{d1}$ ,  $R_{d2}$ -redresoare cu seleniu;  $C_1$ ,  $C_2$ -condensatoare de filtrare; SPP-separator de punere la pământ; DT-divizor de tensiune rezistiv;  $K_1$ ,  $K_2$ -contactoare; ATR- auto-transformator reglabil; TC-transformator de curent; A-ampermetru; V-voltmetru; I >-releu maximal de curent.

În figura 6 sunt prezentate detalii din laborator cu dispunerea efectivă a echipamentelor din schema instalației de încercare.

Transformatorul de înaltă tensiune are o carcasă cilindrică din material izolant (pentinax), închisă cu două plăci metalice, acoperite cu carcase metalice cu rază mare de curbură pentru evitarea descărcării corona. Ambele borne ale înfășurării de înaltă tensiune sunt izolate față de pământ. Miezul transformatorului se află la potențialul bornei N a înfășurării, scoasă pe carcasă la un inel metalic. Înfășurarea în scurtcircuit E

mărește cuplajul magnetic între cele două coloane ale circuitului magnetic, în scopul reducerii fluxului de dispersie.



**Fig. 6** – Montajul de încercare pentru efectuarea lucrărilor experimentale

Redresoarele sunt realizate prin înserierea numărului necesar de elemente semi-conductoare cu seleniu, luând în considerare tensiunea inversă aplicată redresoarelor în stare de blocare și tensiunea inversă admisă pentru un element (placă) de seleniu. Terminalele redresoarelor au forme diferite pentru a împiedeca montarea incorectă. Pentru schimbarea polarității tensiunii continue furnizate de instalație, cele două redresoare se montează unul în locul celuilalt, ceea ce obligă și la rotirea lor cu  $180^{\circ}$ .

Condensatoarele  $C_1$  și  $C_2$  se află într-o unică coloană cilindrică din material electroizolant, având drept borne carcusele metalice de la extremități protejate cu învelișuri anti-corona și piesa metalică scoasă la jumătatea înălțimii coloanei.

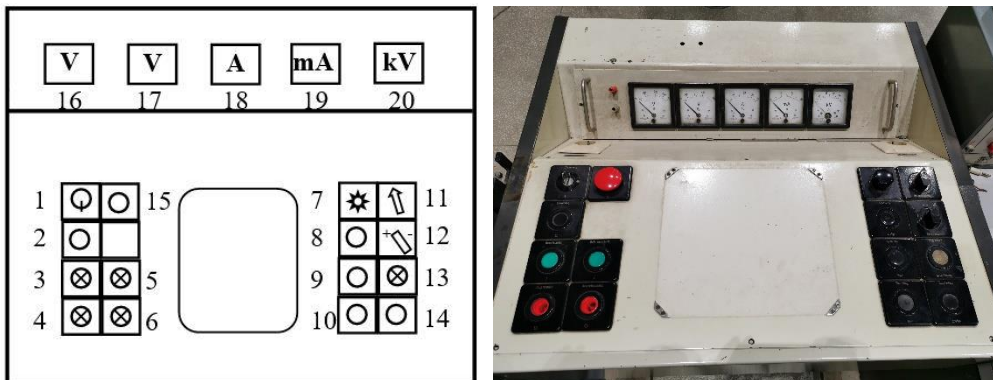
Având în vedere că, după deconectarea alimentării instalației de la rețea, condensatoarele pot să rămână încărcate mult timp, s-a prevăzut separatorul de punere la pământ, SPP, cu acționare electrohidraulică, care se închide automat după deschiderea contactorului  $K_2$  și se deschide simultan cu închiderea aceluiași contactor (la punerea sub tensiune a transformatorului TIT). Tot din motive de electrosecuritate, atât timp cât instalație nu este pusă sub tensiune, scurtcircuitul mobil al instalației este poziționat în permanență pe tija metalică a eclatorului cu sfere, așa cum se poate observa și din detaliile prezentate în figura 6.

Pentru a se obține o tensiune redresată variabilă, înfășurarea primară a transformatorului TIT este alimentată printr-un autotransformator reglabil ATR, care se află amplasat, împreună cu dulapul de comutație, care conține contactoarele  $K_1$  și  $K_2$ , în sala surselor de alimentare.



Protecția la supracurenți de scurtă durată este asigurată de un releu maximal de curent montat în circuitul de alimentare a TIT și prin siguranțe fuzibile. Protecția la suprasarcini de durată se realizează cu relee termice atașate contactoarelor  $K_1$  și  $K_2$ .

Comanda instalației se face de la un pupitru de comandă, aflat în sala de înaltă tensiune, a cărui diagramă schematică este prezentată în figura 7, alături de imaginea propriu-zisă a acestuia.



**Fig. 7** – Dispunerea elementelor de comandă, măsură și semnalizare pe pupitrul de comandă.

Semnificația elementelor de pe pupitrul de comandă este următoarea: 1-cheie de contact; 2-buton de întrerupere a alimentării circuitelor de comandă; 3-buton conectare contactor  $K_1$ ; 4-buton deconectare contactor  $K_1$ ; 5-buton conectare contactor  $K_2$ ; 6-buton deconectare contactor  $K_2$ ; 7- reostatul pentru reglarea iluminării instrumentelor de măsură de pe pupitru; 8-buton comandă creștere tensiune; 9-buton comandă oprire a descreșterii tensiunii; 10-buton comandă descreștere tensiune; 11-comutator domeniu măsură a tensiunii înalte; 12-comutator de corelare a polarității tensiunii de măsurat cu cea a instrumentului din pupitru; 13-lampa de semnalizare a continuității circuitelor de securitate; 14-buton de verificare a continuității circuitelor de securitate; 15-buton ciupercă deconectare de avarie; 16-voltmetru tensiune rețea; 17-voltmetru tensiune primară; 18-ampermetru curent primar; 19-măsură curentului de sarcină ; 20-voltmetru conectat.

Pentru punerea sub tensiune și efectuarea unei încercări trebuie parcurse următoarele etape:

- scurtcircuitorul mobil al instalației este preluat de pe tija eclatorului și poziționat pe gardul de protecție, după care se evacuează zona de lucru și se închide ușa (bariera) de acces;
- se conectează cheia de contact;
- se aduce comutatorul 12 în poziția corespunzătoare polarității tensiunii înalte;

- se verifică continuitatea circuitului de electrosecuritate prin apăsarea butonului 14; lampa 13 trebuie să se aprindă;
- se acționează butoanele 3 și 5 care comandă închiderea contactoarelor  $K_1$ , respectiv  $K_2$ . Dacă cursorul ATR nu se află pe poziția de tensiune nulă, atunci, la închiderea contactorului  $K_1$ , se pornește automat acțiunea de a-l aduce în această poziție;
- se apasă butonul 8 (fără auto-reținere) pentru comanda creșterii tensiunii;
- pentru descreșterea tensiunii se acționează butonul 10 (cu auto-reținere) ; oprirea descreșterii tensiunii se realizează prin acționarea butonului 9;
- dacă se produce străpungerea izolației încercate, va funcționa protecția maximală de curent și este deconectat contactorul  $K_2$ ;  $K_1$  rămâne conectat, iar cursorul ATR revine automat pe poziția de tensiune nulă;
- deconectarea instalației se face prin acționarea butoanelor 6, 4 și 2, apoi deschizând cheia de contact 1;
- pentru deconectarea de urgență a instalației se acționează butonul roșu, 15;
- în cazul care se dorește modificarea montajului experimental, accesul în zona instalației se face doar verificând, în prealabil, prezența sau absența tensiunii remanente pe carcasa transformatorului de înaltă tensiune; pentru aceasta se va prelua scurtcircuitorul mobil de pe gardul de protecție, fiind manipulat cu mâinile poziționate după inelul de gardă. După verificare acesta va fi poziționat pe tija metalică a eclatorului cu sfere, din acest moment fiind permise și intervențiile asupra montajului experimental;
- scurtcircuitorul mobil va fi folosit în aceeași manieră, ca la punctul anterior, și după încheierea determinărilor experimentale și deconectarea instalației, el rămânând poziționat pe tija metalică a eclatorului cu sfere, așa cum este prezentat și în figura 6.

## 2.2. Modul de lucru

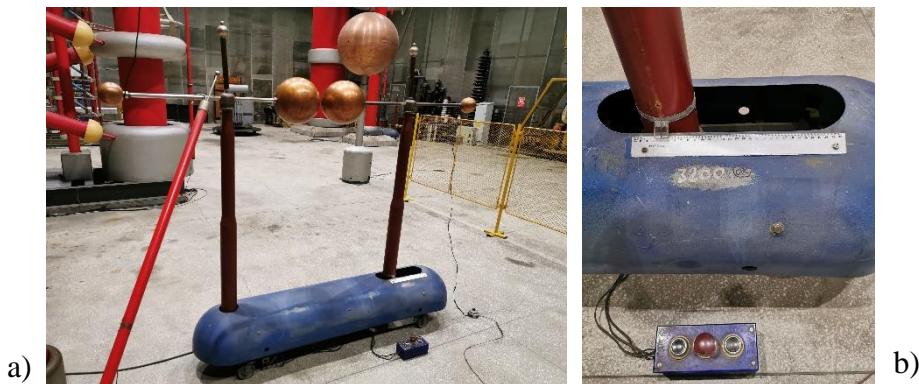
Pentru determinarea experimentală a tensiunilor înalte continue se vor utiliza cele două metode de măsurare, ce au fost prezentate în detaliu în paragraful 1.2 al lucrării, și anume: eclatorul cu sfere, respectiv divizorul de tensiune rezistiv.

### *a. Determinarea tensiunilor înalte cu ajutorul eclatorului cu sfere*

Pentru măsurarea directă a tensiunii înalte continue se folosește un eclator cu sfere cu diametrul de 25 cm, ce sunt dispuse în plan orizontal, așa cum se poate observa și din detaliul grafic prezentat în figura 8, a).

Se va utiliza procedeul distanței fixe între sfere și creșterea tensiunii aplicate până la producerea descărcării. În acest sens se aleg câteva valori ale distanței dintre sferile

eclatorului, de exemplu: 2, 4, 6, 8 și 10 cm, pentru care se vor face încercările, stabilirea acestora realizându-se prin acționarea unui motor de curent continuu, ce poate apropia sau depărta sferele, urmărind indicația gradată de pe rigla de măsură prezentată în figura 8, b).



**Fig. 8** – Dispunerea elementelor de comandă, măsură și semnalizare pe pupitrul de comandă.

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 măsurătorilor 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 (1), 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 (2);
- valorile standard și cele corectate ale tensiunii înalte se vor într-un tabel întocmit în conformitate cu modelul prezentat în tabelul 2.

#### *b. Determinarea tensiunilor înalte continue cu ajutorul divizorului rezistiv de tensiune*

Măsurarea indirectă presupune utilizarea divizorului de tensiune rezistiv, care este realizat prin înscrierea unui număr mare de rezistențe de tip pelicular imersate în ulei într-un cilindru electroizolant din pertinax. Brațul de joasă tensiune este prevăzut cu un comutator al domeniilor de măsurare cu patru poziții. Sunt de asemenea prevăzute

instrumente de măsurare a tensiunilor din circuitele primar și secundar ale ATR, a curentului din circuitul primar al TIT și a curentului furnizat prin borna de înaltă tensiune.

Pentru măsurarea tensiunii înalte continue 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 indicația kV-metrului din pupitrul de comandă;
- se execută de trei ori operația anterioară pentru fiecare dintre distanțele dintre sfere alese și se notează toate valorile obținute în tabel cu rezultate. Dacă una dintre încercări produce un rezultat mult diferit de celelalte, acesta va exclude și se va executa o încercare suplimentară.

**Tabelul 2.** Rezultatele determinărilor experimentale

<i>d</i> (cm)	Eclatorul cu sfere		Divizorul rezistiv (kV)			
	<i>U<sub>standard</sub></i> (kV)	<i>U<sub>corectat</sub></i> (kV)	1	2	3	<i>U<sub>med</sub></i>
2						
4						
6						
8						
10						

*c. Calculul erorilor de măsurare*

Pentru una dintre distanțele dintre sferile eclatorului, se va efectua un număr mai mare de încercări (în jur de 10), urmând a prelucra statistic rezultatele, conform relațiilor:

▪ Valoarea medie a tensiunii măsurate 
$$U_m = \frac{\sum_1^n U_i}{n}; \tag{4}$$

▪ Eroarea medie 
$$\varepsilon_m = \frac{\sum |U_i - U_m|}{n}, \tag{5}$$

▪ Eroarea medie pătratică 
$$\varepsilon_i = \sqrt{\frac{(U_i - U_m)^2}{n}}. \tag{6}$$

▪ Dispersia rezultatelor în cazul unei distribuții normale (Gauss): 
$$\sigma = \varepsilon_i^2 \tag{7}$$