

## Lucrarea 11 – ÎNCERCAREA IZOLAȚIEI TRANSFORMATOARELOR. METODE NEDISTRUCTIVE

### 1. Noțiuni teoretice

Încercările nedistructive ale izolației echipamentelor de înaltă tensiune se execută folosind tensiune continuă sau alternativă, a cărei mărime este inferioară tensiunii de funcționare (tensiunea cea mai ridicată pentru echipament), astfel încât starea izolației să nu fie afectată negativ ca urmare a efectuării încercărilor.

Majoritatea transformatoarelor de forță existente în exploatare au izolația internă de tipul hârtie-ulei, fiind formată din straturi de hârtie și carton rigid impregnate cu ulei electroizolant între care există spații pentru circulația uleiului, care asigură răcirea miezului și a înfășurărilor.

Starea izolației transformatorului este o rezultată a stării acestor materiale, supuse solicitărilor electrice, termice și chimice timp îndelungat. Ca urmare a acestor solicitări, izolația se degradează treptat. Calitatea izolației interne a transformatoarelor poate fi apreciată prin rezultatele unor încercări nedistructive electrice și neelectrice. Numărul acestora este destul de mare, dar numai câteva sunt suficient de simple și rapide pentru a putea fi folosite în exploatarea curentă a transformatoarelor, implicând și echipamente accesibile ca preț și complexitate.

Încercările folosite în mod curent sunt:

- încercarea uleiului din transformator;
- măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție, prin încercarea cu tensiune continuă;
- măsurarea factorului de pierderi dielectrice ( $\text{tg}\delta$ ), prin încercare cu tensiune alternativă de frecvență industrială;

Există și alte tipuri de încercări nedistructive, dar pentru realizarea acestora este necesară aparatură mai complexă și mai scumpă, iar rezultatele furnizate se pretează mai ales unei interpretări calitative, neputând fi precis cuantificate în vederea luării unei decizii privind necesitatea remedierii sau continuarea funcționării. Câteva exemple de astfel de încercări sunt cele de mai jos:

- măsurarea nivelului descărcărilor parțiale;
- spectroscopia în domeniul timpului sau a frecvenței;
- termografia.

În lucrarea de față se vor lua în considerare numai metode electrice nedistructive de încercare cu tensiune continuă și de frecvență industrială, folosite în mod curent în instalațiile sistemului electroenergetic, cu aplicație la încercarea transformatoarelor de forță trifazate.

### 1.1. Măsurarea rezistenței de izolație

Rezistența electrică a izolației, numită *rezistență de izolație*, este determinată experimental ca raportul dintre tensiunea continuă aplicată și curentul care trece prin izolația încercată. Considerând tensiunea constantă, curentul absorbit de izolație descrește neliniar în funcție de timp pe măsura avansării proceselor de polarizare din dielectricii componenți. O mare influență asupra desfășurării acestor procese o exercită conținutul de umiditate al izolației; cu cât acesta este mai ridicat, polarizarea se desfășoară mai repede și consumă mai multă energie. Astfel rezistența de izolație ajunge mai rapid la valoarea stabilizată, iar această valoare este corespunzător mai mică.

Datorită acestui fapt metodele practice de încercare constau în:

- măsurarea valorii rezistenței de izolație la un moment precizat de la aplicarea tensiunii, cel mai adesea la 60 s;
- determinarea raportului dintre valorile rezistenței de izolație măsurate la două momente precizate, de regulă la 15 s și la 60 s, raport numit coeficient de absorbție. Cu cât izolația încercată este mai lipsită de umiditate, cu atât valoarea  $R_{60}$  este mai mare, iar coeficientul de absorbție este mai mare decât 1.

Dacă mărimea rezistenței de izolație depinde de volumul de material electroizolant, coeficientul de absorbție, fiind raportul a două valori ale rezistenței aceleiași izolații nu mai depinde de volumul acesteia, putând fi folosit pentru comparația stării izolației unor echipamente diferite, dar care au același sistem de izolație.

Dependența de temperatură a valorii rezistenței de izolație are loc în sens invers decât în cazul rezistenței conductoarelor. Astfel, cu creșterea temperaturii rezistența de izolație scade.

Raportarea (recalcularea) valorii rezistenței de izolație, măsurată la temperatura  $t_1$ , la o temperatură  $t_2$  se face:

- prin înmulțire cu factorul de corecție  $k_1$ , dacă  $t_2 < t_1$ ,
- prin împărțire cu factorul de corecție  $k_1$ , dacă  $t_2 > t_1$ .

Factorul de corecție depinde de diferența de temperatură  $\Delta t = |t_2 - t_1|$ , conform tabelului 1. Valorile  $k_1$  indicate în tabelul 1 sunt informative și se folosesc dacă nu există

rezultate ale măsurării rezistenței de izolație la diferite temperaturi, pentru transformatorul încercat. Asemenea valori pot fi menționate în buletinul de încercare al fabricii. Cu ajutorul acestor perechi de valori ( $R_{iz}, t$ ) se trasează dreapta  $R_{iz}=f(t)$ , care poate fi folosită pentru determinarea valorii medii a factorului  $k_I$  pentru transformatorul încercat.

**Tabelul 1.** Factorul de corecție a rezistenței de izolație în funcție de temperatură

$\Delta t$ (°C)	1	2	3	4	5	10	15	20	25
$k_I$	1,04	1,08	1,13	1,17	1,22	1,5	1,84	2,25	2,75
$\Delta t$ (°C)	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$k_I$	3,4	4,15	5,1	6,2	7,5	9,2	11,2	13,9	17

## 1.2. Măsurarea factorului de pierderi dielectrice ( $tg\delta$ )

Factorul de pierderi dielectrice este definit ca raportul dintre componentele activă și reactivă ale curentului absorbit de o izolație supusă tensiunii de frecvență industrială. Dacă mărimea componentei reactive (capacitivă) este impusă, în principal, de configurația izolației (geometrie și materiale), componenta activă reflectă procesele de conducție și polarizare din dielectric, procese cu atât mai intense cu cât dielectricul este mai îmbătrânit și are un conținut de umiditate mai mare.

Așadar,  $tg\delta$  poate fi folosit pentru caracterizarea pierderilor de putere activă în izolație, de unde și denumirea de factor de pierderi dielectrice. Mărimea  $tg\delta$  nu depinde de volumul izolației, ci numai de componența ei și de gradul de deteriorare (în principal umezire).

Temperatura izolației influențează procesele de conducție și polarizare din dielectric, astfel că și mărimea factorului de pierderi dielectrice este influențată de temperatură în sensul creșterii valorii la creșterea temperaturii.

Raportarea (recalcularea) valorii  $tg\delta$ , măsurată la temperatura  $t_1$ , la o temperatură  $t_2$  se face:

- prin împărțire cu factorul de corecție  $k_2$ , dacă  $t_2 < t_1$ ,
- prin înmulțire cu factorul de corecție  $k_2$ , dacă  $t_2 > t_1$ .

Factorul de corecție depinde de  $\Delta t = |t_2 - t_1|$ , conform tabelului 2. Valorile  $k_2$  indicate în tabelul 2 sunt informative și se folosesc dacă nu există rezultate anterioare ale măsurării  $tg\delta$  la diferite temperaturi, pentru transformatorul încercat. Asemenea valori pot fi menționate în buletinul de încercare al fabricii. Cu ajutorul acestor perechi de valori ( $tg\delta, t$ ) se trasează dreapta  $tg\delta = f(t)$ , care poate fi folosită pentru determinarea valorii medii a factorului  $k_2$  pentru transformatorul încercat.

**Tabelul 2.** Factorul de corecție a  $\text{tg}\delta$  de izolație în funcție de temperatură

$\Delta t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	1	2	3	4	5	10	15	20	25
$k_2$	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,25	1,51	1,75	2
$\Delta t$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	30	35	40	45	50	55	60	65	70
$k_2$	2,3	2,65	3	3,5	4	4,6	5,3	6,1	7

Temperatura izolației este considerată a fi reprezentată de temperatura uleiului din transformator la partea superioară a cuvei.

În cazul transformatoarelor trifazate, încercarea izolației se poate realiza separat pe zone aparținând celor două (sau trei) înfășurări, dar nu și pe zone referitoare la fazele înfășurărilor, datorită conexiunilor electrice dintre bobinaje. Din acest motiv, pe durata încercărilor, bornele de linie ale celor trei faze ale fiecărei înfășurări se leagă galvanic vizibil, acest lucru fiind necesar din motive de electrosecuritate.

## 2. Determinări experimentale

Studiul de caz al lucrării de laborator urmărește testarea, prin metode nedistructive, a izolației unui transformator de medie tensiune. Principalele încercări avute în vedere sunt:

- *determinarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție pentru fiecare înfășurare a transformatorului;*
- *determinarea capacității și a factorului de pierderi dielectrice dintre înfășurări și cuvă, respectiv între cele două înfășurări ale transformatorului;*

### 2.1. Prezentarea echipamentelor utilizate pentru efectuarea studiilor de caz

Montajul experimental necesar în vederea realizării încercărilor menționate mai sus include următoarele echipamente:

- sursa de tensiune – model WPT 4,4/100;
- megohmetru digital – model UNILAP ISO 5 kV;
- punte automată pentru măsurarea  $\text{tg}\delta$  - model HAEFELY 2840;
- transformator de medie tensiune:  $U_n = 15/0,4$  kV,  $S_n = 40$  kVA.

#### a. Sursa de tensiune - WPT 4,4/100

Această instalație este formată dintr-un transformator de încercare și un pupitru de comandă. Valoarea 4,4 din simbolul sursei reprezintă puterea nominală, în kVA.

Transformatorul utilizat are o carcasă metalică, izolator de trecere din porțelan pentru borna de înaltă tensiune și izolație cu ulei a înfășurărilor, așa cum se poate observa din figura 1.

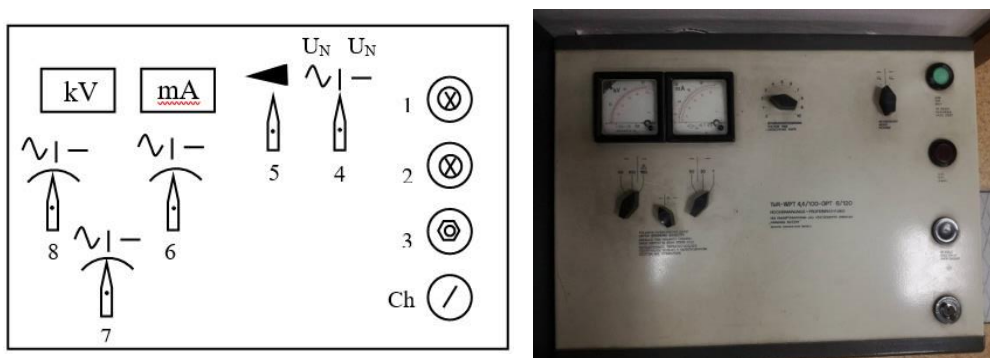
**Fig. 1** – Transformatorul de încercare al sursei WPT 4,4/100



Înfășurarea de înaltă tensiune este realizată fără secțiuni, sfârșitul înfășurării fiind legat la o bornă de măsurare a curentului de încercare. Pentru indicarea tensiunii înalte furnizate înfășurarea de înaltă tensiune a transformatorului sursei WPT 4,4/100 are o înfășurare suplimentară.

Instalația se alimentează cu tensiune monofazată, 230V, 50 Hz. Pentru reglarea tensiunii de încercare s-a prevăzut un autotransformator reglabil între rețeaua de joasă tensiune și înfășurarea primară a transformatorului de încercare.

Pupitrul de comandă al sursei de tensiune cuprinde: autotransformatorul reglabil cu motorul de antrenare, circuitele de comandă, semnalizare, protecție și măsură. Toate elementele de comandă, semnalizare și măsură necesare pentru utilizarea instalației se află pe panoul de comandă, prezentat în figura 2.



**Fig. 2** – Pupitrul de comandă al sursei WPT 4,4/100.

În figura anterioară notațiile au următoarele specificații: Ch- cheia de contact; 1- buton pornire(cu lampă de semnalizare verde) și creștere a tensiunii (BPR); 2- buton

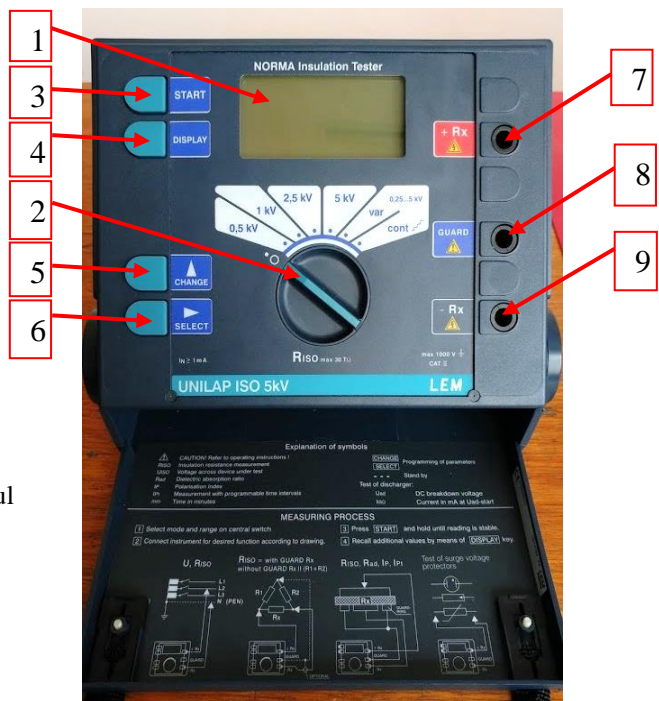
deconectare (cu lampă de semnalizare roșie, BO); 3- buton descreștere tensiune; 4- buton selecție tensiune de încercare (alternativă/continuu); 5- potențiometrul pentru reglarea vitezei de reglare a tensiunii de încercare; 6- comutatorul domeniilor de măsurare a curentului pe partea de înaltă tensiune (alternativ/continuu); 7- comutator de corelare a polarității instrumentului de măsură și a tensiunii de încercare; 8- comutatorul domeniilor de măsură a tensiunii; mA- miliampermetru; kV- kilovoltmetru.

Măsurarea tensiunii se face cu un voltmetru gradat în kV racordat la înfășurarea de măsură a transformatorului de încercare, prin intermediul unui dispozitiv de măsură a tensiunii, DMT. Pentru măsurarea tensiunilor alternative acest dispozitiv conține un voltmetru de vârf de tip WMV 6 cu divizor rezistiv cu rezistență variabilă în vederea modificării domeniilor de măsură. Măsurarea curentului se realizează cu ajutorul unui miliampermetru conectat în circuitul de legare la pământ a înfășurării de înaltă tensiune a transformatorului de încercare prin intermediul dispozitivului DMC (dispozitiv de măsură a curentului).

*b. Megohmetrul digital UNILAP ISO 5 kV*

Acesta este un dispozitiv automat de măsurare a tensiunii și rezistenței de izolație, precum și a coeficientului de absorbție, respectiv a indicelui de polarizare, destinat măsurătorilor efectuate asupra echipamentelor din rețelele de distribuție.

În figura 3 este prezentată o imagine a MΩ - metrul UNILAP ISO 5 kV, în care este detaliată interfața acestuia.



**Fig. 3** – Interfața MΩ - metrul UNILAP ISO 5 kV

Notațiile din figura 3 au următoarele semnificații: 1 - *Display LCD*; 2- *Comutator central ON-OFF și pentru selectarea tensiunii aplicate*; 3 - *Buton de „START” pentru a porni măsurătoarea selectată*; 4 - *Buton pentru a selecta parametri ce se doresc a fi afișați după terminarea măsurătorilor*; 5 - *Buton pentru selecția diferitelor valori prestabilite*; 6 - *Buton pentru a selecta poziția valorii la care se dorește modificarea*; 7 - *Socket de conexiune +Rx, borna pozitivă*; 8 - *Socket de conexiune bornă de ecranare*; 9 - *Socket de conexiune –Rx, borna negativă*.

Principalele caracteristici ale dispozitivului sunt prezentate mai jos:

- tensiunea de măsurare: 500, 100, 2500, 5000 V;
- curentul de scurtcircuit al sursei: max. 2 mA;
- ondulația tensiunii de măsură: maxim 1%;
- domeniile de măsurare: I-  $10^{-5} \div 300 \text{ G}\Omega$  ; II-  $0.3 \div 3 \text{ T}\Omega$ ; III-  $3 \div 10 \text{ T}\Omega$ ; IV-  $10 \div 29 \text{ T}\Omega$ ;
- eroarea de măsurare: max. 3%;
- temperatura de funcționare:  $0 \div +50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### c. *Punte automată – Haefely 2840*

Echipamentul este o punte automată care permite măsurarea inductanțelor, factorului de pierderi în dielectricsi și a capacităților specifice izolației diferitelor echipamente electrice.

În figura 4 este prezentată o imagine a punții automate de măsură, în care este detaliată interfața acesteia.



**Fig. 4** – Punte automată de măsură - Haefely Hipotronics 2840: 1 - *interfața touch screen*; 2 - *interfața USB 1*; 3 - *interfața USB 2*; 4 - *Buton principal de pornire-oprire*.

Principale caracteristici ale acestui dispozitiv sunt următoarele:

- măsoară pierderi în dielectricsi, factor de putere, factor de calitate, capacitate, frecvență, tensiune, curent, puteri, inductanțe;

- punte automată cu calculator integrat, ecran tactil;
- funcții de analizor spectral, osciloscop digital și data logger;
- timp de măsurare: 0,3 s/măsurătoare;
- factor de pierderi dielectrice: 0..100 cu o rezoluție de 10<sup>-6</sup>;
- factor de putere: 0..1, cu o rezoluție de 10<sup>-6</sup>;
- capacitate: > 0,01 pF, rezoluție de 0,001 pF;
- inductanța maximă: 900 kH, rezoluție 0,1 mH;
- domeniul tensiunii de încercare: (5 V.....2 MV);
- curentul de încercare la condensatorul Cn: 20 μA ... 300 mA, rezoluție 0,01 μA;
- curentul de încercare la condensatorul Cx: 20 μA ... 15 A, rezoluție 0,01 μA;
- frecvența de încercare: 15 ... 1000 Hz, rezoluție 0,01 Hz
- putere aparentă: > 1 mVA, rezoluție 0,1 mVA
- putere activă: > 1 mW, rezoluție 0,1 mW
- putere reactivă: > 1 mVAR, rezoluție 0,1 mVAR
- interfețe: USB și ETHERNET
- tensiune de alimentare în c.a.: 230 V, 50 Hz

*d. Obiectul de încercat – transformator de medie tensiune, 15/0,4 kV*

Obiectul de încercat îl constituie transformatorul de medie tensiune,  $U_n = 15/0,4$  kV,  $S_n = 40$  kVA, ce este prezentat în figura 5.



**Fig. 5** – Transformatorul de medie tensiune folosit pentru efectuarea încercărilor

Conexiunea înfășurării de 15 kV a fost modificată din triunghi (așa cum este, pe partea de medie tensiune la transformatoarele aflate în exploatare) în stea cu neutrul accesibil printr-o trecere izolantă, montată pe capacul cuvei. Această modificare a fost necesară pentru a se putea executa și încercarea cu tensiune mărită indusă a izolației, folosind scheme de montaj monofazate.

Înfășurarea de joasă tensiune a fost de asemenea modificată pentru a se putea realiza toate tipurile de conexiuni: stea, triunghi, zig-zag. Înfășurările fazelor au fost divizate în câte două semi-bobine ale căror extremități au fost conectate la o placă de borne adăugată pe capacul cuvei transformatorului. În aceste condiții, se pot simula și încercările cu tensiune mărită specifice transformatoarelor IT/MT.

## 2.2. Modul de lucru

Pentru efectuarea încercărilor experimentale și realizarea determinărilor analitice ulterioare se va proceda conform indicațiilor metodice prezentate în continuare.

### a. Măsurarea rezistenței de izolație și a coeficientului de absorbție

Măsurarea rezistenței de izolație a înfășurărilor transformatorului de medie tensiune se efectuează în mod succesiv, pe fiecare înfășurare în parte, conform indicațiilor din tabelul 3.

**Tabelul 3.** Măsurarea rezistenței de izolație

Nr. crt.	Înfășurarea la care se efectuează măsurarea	Se leagă la pământ
1	IT	Cuva, JT
2	JT	Cuva, IT
3	IT+JT	Cuva

Pentru efectuarea propriu-zisă a măsurărilor se vor parcurge următoarele etape:

- cleștele de culoare roșie al  $M\Omega$  - metrului UNILAP ISO 5 kV se conectează la înfășurarea transformatorului la care se dorește efectuarea încercării (conform tabelului 3);
- cleștele de culoare neagră al  $M\Omega$  - metrului UNILAP ISO 5 kV se conectează la conductorul ce leagă la pământ elementele indicate în tabelul 3;
- cu ajutorul comutatorului 2 se alege tensiunea de încercare, furnizată de sursa internă a  $M\Omega$ -metrului, în funcție de tensiunea nominală a izolației încercate, astfel:
  - ✓ 500 V pentru înfășurările de joasă tensiune,

- ✓ 5000 V pentru înfășurările cu tensiunea nominală de peste 10 kV.
- prin apăsarea butonului *Display* (butonul 4 conform figurii 3) se selectează parametrul ce se dorește a fi înregistrat, în cazul de față fiind vorba de  $R_{60}$ ;
- se apasă butonul *Start* pentru a porni efectuarea încercării;
- se va nota valoarea indicată pe display-ul megohmetrului după primele 3 semnale sonore emise de acesta, valoarea respectivă fiind rezistența de izolație măsurată la 15 secunde,  $R_{15}$ ;
- după trecerea celor 60 de secunde pe display va fi afișată valoarea măsurată a rezistenței de izolație,  $R_{60}$ , care, împreună cu valoarea  $R_{15}$  va fi folosită pentru determinarea coeficientului de absorbție, conform expresiei:

$$k_{abs} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1)$$

- comutatorul 2 este readus pe poziția OFF, permițând astfel refacerea montajului pentru încercarea izolației următoarei înfășurări.

La finalul tuturor încercărilor valorile măsurate vor fi trecute într-un tabel centralizator, conform modelului prezentat în tabelul 4. Se va nota, de asemenea, și temperatura ambientală la care au fost realizate măsurătorile.

**Tabelul 4.** Măsurarea rezistenței de izolație

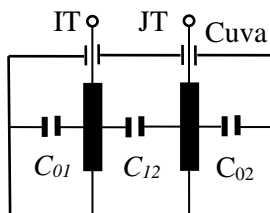
Nr. crt.	Înfășurarea la care se realizează încercarea	Se leagă la pământ	Valori măsurate la $t_1 = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$			Valoarea $R_{60}$ recalculată la $t_2 = 20^\circ\text{C}$		Valori normate în exploatare	
			$R_{15}$ (M $\Omega$ )	$R_{60}$ (M $\Omega$ )	$k_{abs}$	$R_{60}'$ (M $\Omega$ )	$k_{abs}'$	$R_{iz}$ la 20 $^\circ\text{C}$ (M $\Omega$ )	$k_{abs}$
1	IT (15 kV)	JT +cuva						300	>1,2
2	JT (0,4 kV)	IT+ cuva						2	
3	IT+JT	cuva							

Dacă măsurătorile au fost efectuate la o temperatură diferită de cea standard, atunci este necesară recalcularea valorilor pentru temperatura standard de 20  $^\circ\text{C}$ . În acest sens din tabelul 1 se va determina valoarea factorului de corecție, pentru diferența de temperatură  $\Delta t$ . Noile valori ale rezistenței de izolație se obțin prin înmulțirea valorilor determinate experimental cu coeficientul de corecție aferent.

Se vor compara valorile recalculat cu cele normate în exploatare, prezentate în tabelul 4, făcându-se aprecieri referitoare la starea izolației transformatorului.

## b. Măsurarea capacității și a unghiului de pierderi dielectrice

Capacitatea și unghiul de pierderi dielectrice se măsoară între înfășurările transformatorului și cuvă, respectiv între ambele înfășurări, conform figurii 6 și tabelului 5, de mai jos:



**Fig.6** – Schema echivalentă a izolației interne a transformatorului cu două înfășurări

**Tabelul 5.** Măsurarea  $\text{tg}\delta$  la transformatorul cu două înfășurări

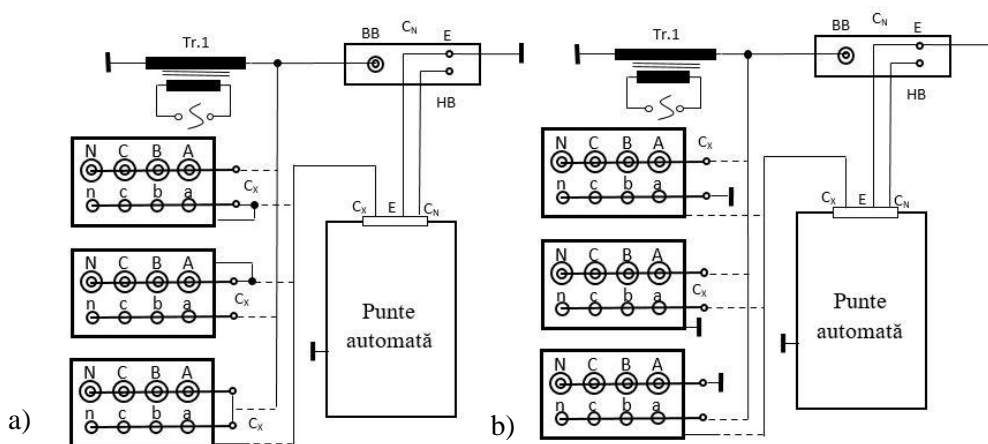
Nr. crt.	Zona măsurată	Mărimile măsurate
1	IT – (JT + cuva)	$C_1, \text{tg}\delta_1$
2	(IT+JT) –cuva	$C_2, \text{tg}\delta_2$
3	JT – (IT+cuva)	$C_3, \text{tg}\delta_3$

Pentru măsurarea capacității și a unghiului de pierderi dielectrice a înfășurărilor transformatorului se va utiliza puntea automată de măsură Haefely Hipotronics 2840, alături de sursa de tensiune WPT 4,4/100, ce au fost descrise anterior.

Măsurarea propriu-zisă se poate realiza prin conectarea transformatorului de încercat în următoarele moduri:

- *în montajul direct (normal) al punții* – este necesară izolarea cuvei transformatorului încercat față de pământ (se folosește de regulă în laboratoarele de încercări);
- *în montajul inversat al punții* – cuva transformatorului poate fi legată la pământ pe durata încercării (acest tip de montaj fiind utilizat mai frecvent în exploatare).

Montajul direct permite atât determinarea directă, cât și indirectă, a parametrilor urmăriți, ce au fost prezentați în figura 6. În acest scop în figura 7 sunt prezentate schemele de montaj pentru fiecare tip de determinare în parte.



**Fig.7** – Scheme de montaj normal pentru măsurarea capacității și a  $tg\delta$ : a) măsurare indirectă; b) măsurare directă

În continuare sunt prezentate instrucțiunile de lucru necesare realizării măsurătorilor folosind montajul direct al punții:

- pentru fiecare zonă a izolației transformatorului se vor realiza, în mod succesiv, conexiunile aferente fiecărui tip de măsurătoare, directă, respectiv indirectă, conform indicațiilor din figura 7 și din tabelul 6, prezentat mai jos:

**Tabelul 6.** Măsurarea capacităților și a  $tg\delta$  în montaj normal al punții automate

Măsurare indirectă – montaj normal I					
Nr.crt.	Mărimile măsurate	Se leagă la sursa de tensiune de încercare	Se leagă la borna $C_x$	Tensiunea de încercare (kV)	
1	$C_1, tg\delta_1$	IT	JT + cuva	10	
2	$C_2, tg\delta_2$	JT	IT + cuva	0,4	
3	$C_3, tg\delta_3$	IT+JT	Cuva	0,4	
Măsurare directă – montaj normal II					
Nr.crt.	Mărimile măsurate	Zona măsurată		Se leagă la pământ	Tensiunea de încercare (kV)
		Se leagă la sursa de tensiune de încercare	Se leagă la borna $C_x$		
1	$C_{01}, tg\delta_{01}$	IT	cuva	JT	10
2	$C_{12}, tg\delta_{12}$	IT	JT	cuva	10
3	$C_{02}, tg\delta_{02}$	JT	cuva	IT	0,4

- din pupitrul de comandă al sursei de alimentare WPT 4,4 se va crește tensiunea aplicată înfășurării la care se efectuează măsurătorile, valoarea tensiunii de încercare ce trebuie folosită fiind precizată în tabelul 6 pentru fiecare caz în parte;
- de pe display-ul punții automate se vor citi valorile capacității și unghiului de pierderi dielectrice indicate;
- pentru refacerea montajului este necesară reducerea la zero a tensiunii aplicate și verificarea prezenței tensiunii remanente cu scurtcircuitul mobil la nivelul transformatorului testat, precum și a transformatorului de încercare;
- la finalul determinărilor valorile obținute se trec într-un tabel centralizator de tipul celui prezentat în tabelul 7, pentru cazul măsurătorilor indirecte, respectiv în similar tabelului 8, pentru cazul măsurătorilor directe. Se va nota, de asemenea, și temperatura ambientală din laborator de la momentul respectiv;

**Tabelul 7.** Rezultatele încercărilor în montaj normal al punții automate (I)

Nr. crt.	Valori măsurate			Valori calculate			$t_{m\grave{a}s.}$ ( $^{\circ}C$ )	Valori recalculat la $t=20^{\circ}C$
	IT- (JT+cuva)	$C_1$ (pF)	$tg\delta_1$	IT - cuva	$C_{01}$ (pF)	$tg\delta_{01}$		
1								
2	(IT+JT)- cuva	$C_2$ (pF)	$tg\delta_2$	IT-JT	$C_{12}$ (pF)	$tg\delta_{12}$		
3	JT- (IT+cuva)	$C_3$ (pF)	$tg\delta_3$	JT- cuva	$C_{02}$ (pF)	$tg\delta_{02}$		

- pentru cazul măsurătorilor indirecte, rezultatele obținute și prezentate în tabelul 7 pot fi utilizate pentru a determina pe cale analitică valorile capacității și a unghiului de pierderi dielectrice dintre înfășurările transformatorului, în acest sens putând fii utilizate expresiile:

$$C_{01} = \frac{C_1 + C_2 - C_3}{2}, \quad C_{02} = \frac{C_2 + C_3 - C_1}{2}, \quad C_{12} = \frac{C_3 + C_1 - C_2}{2}; \quad (2)$$

$$tg\delta_{01} = \frac{C_1 tg\delta_1 + C_2 tg\delta_2 - C_3 tg\delta_3}{C_1 + C_2 - C_3}, \quad tg\delta_{02} = \frac{C_2 tg\delta_2 + C_3 tg\delta_3 - C_1 tg\delta_1}{C_2 + C_3 - C_1},$$

$$tg\delta_{12} = \frac{C_3 tg\delta_3 + C_1 tg\delta_1 - C_2 tg\delta_2}{C_3 + C_1 - C_2}. \quad (3)$$

- valorile obținute prin calcul vor fi comparate cu cele determinate în mod direct, prezentate în tabelul 8;

**Tabelul 8.** Rezultatele încercărilor în montaj normal al punții automate (II)

Nr.crt.	Valori măsurate			$t_{m\grave{a}s.}$ ( $^{\circ}C$ )	Valori recalculat la $t=20^{\circ}C$
1	IT – cuvă	$C_{01}$ (pF)			
		$tg\delta_{01}$			
2	IT-JT	$C_{02}$ (pF)			
		$tg\delta_{02}$			
3	JT-cuvă	$C_{12}$ (pF)			
		$tg\delta_{12}$			

- dacă temperatura la care s-au realizat măsurătorile diferă de cea standard, atunci se va efectua o recalculare a valorilor pentru temperatura de  $20^{\circ}C$ . În acest sens din tabelul 2 se va determina valoarea factorului de corecție, pentru diferența de temperatură  $\Delta t$ , noile valori obținându-se prin împărțirea celor determinate experimental cu coeficientul de corecție. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele următoare se trec de asemenea în tabelele centralizatoare;
- se vor compara valorile obținute ale  $tg\delta$  cu cele maxime admise pentru transformatoarele aflate în exploatare, acestea fiind:
  - ✓ dacă  $U_n < 10$  kV: 4% la  $20^{\circ}C$ , respectiv 11% la  $50^{\circ}C$ ;
  - ✓ dacă  $10 < U_n < 60$  kV: 2,5% la  $20^{\circ}C$ , respectiv 7% la  $50^{\circ}C$