

INSTALAȚII DE ÎNCERCARE CU CIRCUIT REZONANT SERIE

1. Baze teoretice

În mod clasic, încercarea izolației cu tensiune înaltă alternativă, de frecvență industrială, se realizează utilizând transformatoare de încercare. Puterea consumată pentru încercare depinde de capacitatea obiectului încercat și de tensiunea de încercare:

$$S = \omega C U^2 . \quad (1)$$

În cazul instalațiilor capsulate, cu izolație de SF₆ și N₂, precum și a cablurilor de transport a energiei electrice având lungimi și tensiuni din ce în ce mai mari, capacitatea izolației devine atât de mare încât puterea necesară a transformatoarelor de încercare ajunge la sute sau mii de kVA. Dimensiunile unor asemenea transformatoare devin inacceptabile pentru încercări in situ. De asemenea, de cele mai multe ori, rețeaua de distribuție de joasă tensiune, existentă la locul de funcționare a instalației de încercat, nu poate furniza puterea necesară încercării prin metoda clasică. Unificarea metodelor de încercare în laborator și la locul de funcționare a acestor instalații nu se poate face în condițiile metodei clasice de încercare.

Soluția tehnică care elimină aceste dezavantaje este utilizarea circuitului rezonant serie.

Schema electrică de principiu a unei asemenea instalații de încercare este redată în figura 1.

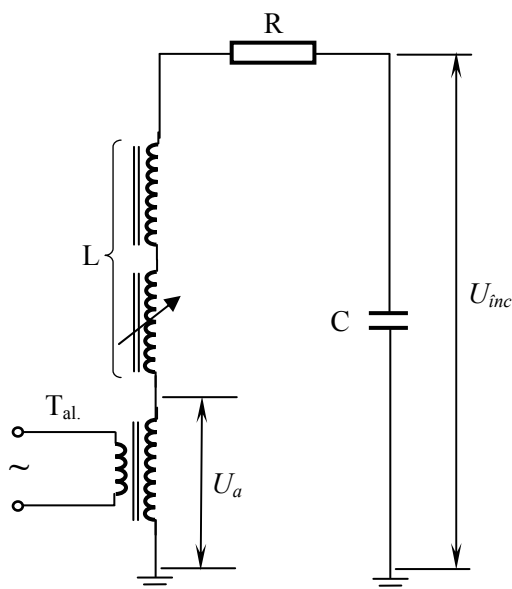


Fig. 1 – Schema electrică de principiu a instalației de încercare cu circuit rezonant serie:
T_{al.} – transformator de alimentare; *L* – inductanță reglabilă; *R* – rezistența totală a circuitului;
C – capacitatea obiectului încercat. *U_a* – tensiunea de alimentare a circuitului rezonant;
U_{inc} – tensiunea la bornele obiectului încercat

Principiul de funcționare a circuitului de încercare este rezonanța de tensiune în circuitul RLC serie. Obținerea stării de rezonanță în circuitul de încercare necesită prezența inductanței

reglabile întrucât capacitatea obiectelor de încercat diferă în funcție de natura și dimensiunile acestora. Starea de acordare la rezonanță poate ar putea fi obținută și prin variația frecvenței tensiunii de alimentare, dar numai în limitele admise pentru încercarea cu tensiune mărită de frecvență industrială (50 – 150 Hz). În situația obținerii rezonanței în circuitul de încercare, tensiunea la bornele obiectului de încercat (capacitatea C) este mult mai mare decât tensiunea de alimentare, U_a , ceea ce permite folosirea unui transformator de încercare cu tensiunea nominală mult mai mică decât în cazul încercării clasice cu tensiune aplicată.

Astfel, dacă factorul de calitate al circuitului este (neglijând pierderile în condensator)

$$Q_{cal} = \frac{\omega L}{R}, \quad (2)$$

la rezonanță

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (3)$$

tensiunea de încercare va fi:

$$U_{inc} = Q_{cal} U_a. \quad (4)$$

Practic se poate obține cu ușurință $Q_{cal} \geq 10$, ceea ce înseamnă, de exemplu, că pentru obținerea unei tensiuni de încercare de 500 kV este necesar un transformator de încercare cu tensiunea secundară de numai 50 kV (fig.2).

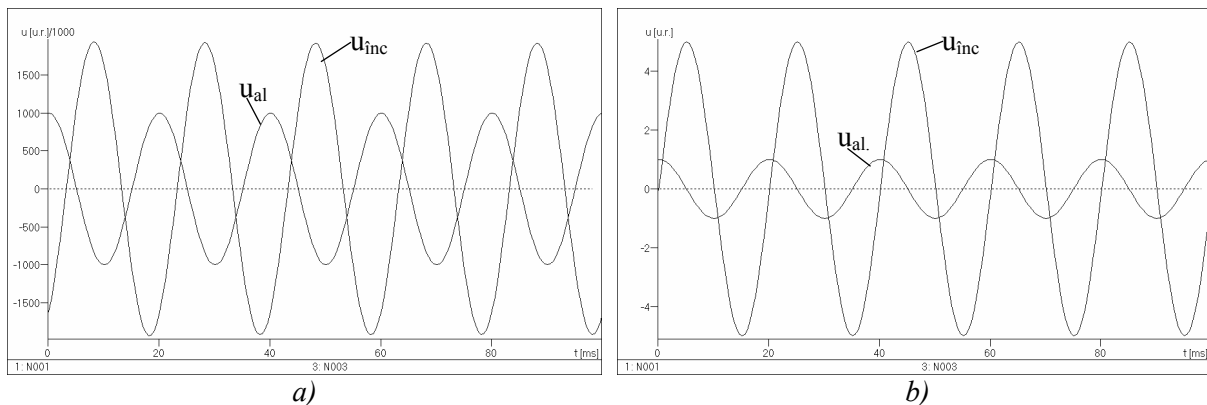


Fig.2 - Tensiunile de alimentare și de încercare: a) în afara rezonanței; b) la rezonanță

La rezonanță, circuitul absoarbe de la rețeaua de alimentare numai putere activă a cărei mărime este dată de relația:

$$P_{inc} = \frac{Q_C}{Q_{cal}} = \frac{U_a^2}{R}, \quad (5)$$

în care Q_C este puterea reactivă a obiectului încercat

$$Q_C = \omega^2 C U_{inc}. \quad (6)$$

Relațiile (4) și (5) pun în evidență două avantaje importante ale utilizării CRS ca instalație de încercare pentru sarcini capacitive și anume:

- multiplicarea de Q_{cal} ori a tensiunii de alimentare la bornele obiectului încercat;
- limitarea puterii active necesare pentru încercare la o valoare numeric egală cu puterea reactivă pe obiectul încercat, diminuată de Q_{cal} ori.

Aceste avantaje sunt cu atât mai pronunțate, cu cât factorul de calitate al circuitului este mai mare.

În realitate, atât inductorul reglabil L cât și obiectul de încercat C au pierderi ce nu pot fi neglijate. Pierderile active în izolația obiectului încercat diminuează factorul de calitate al circuitului de încercare, micșorând avantajele menționate. Practic, circuitul rezonant serie este eficient în cazul încercării echipamentelor având $tg\delta < 2 \dots 3 \%$, ceea ce este suficient pentru majoritatea echipamentelor de înaltă tensiune. În mod obișnuit, factorul de calitate al inductoarelor acestor instalații de încercare este mai mare de $30 \div 40$.

O comparație a parametrilor instalațiilor de încercare cu circuit rezonant serie (CRS) și cu transformatoare, este dată în tabelul 1.

Tabelul 1. Comparație între instalațiile de încercare cu tensiune alternativă

Parametrul	Transformatoare de încercare	CRS acordabil prin modificarea inductanței	CRS acordabil în frecvență
Frecvența tensiunii de încercare	50 Hz / 60 Hz	50 Hz / 60 Hz	20 Hz ... 300 Hz
Factorul de calitate	Nu are semnificație	40 ÷ 100	70 ÷ 200
Raportul greutate/ putere de încercare	> 10 kg / kVA	1 ÷ 10 kg / kVA	≥ 0,6 kg / kVA
Conținut de armonice	necesită precauții	< 1 %	< 1 %
Generare de zgomot similar descărcărilor parțiale	nu	nu	necesită precauții
Caracteristici mecanice	piese în mișcare, în sistemul de reglare al tensiunii de alimentare	piese în mișcare, în autotransformator și în inductor	nu are părți în mișcare

Una dintre cerințele impuse pentru încercarea cu tensiune mărită de frecvență industrială este limitarea conținutului de armonici a tensiunii de încercare la maximum 5%. Din acest punct de vedere CRS este avantajos întrucât fiind acordat la rezonanță pe frecvența fundamentală, eventualele armonici existente în tensiunea de alimentare se regăsesc cu o pondere mult mai redusă în tensiunea de încercare.

Prin aplicarea legii lui Ohm în schema din fig.1 se poate scrie:

- pe frecvența fundamentală:

$$\underline{U}_a = \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \underline{I}; \quad (7)$$

- pe armonica de ordin k :

$$\underline{U}_{ak} = \left[R + j \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right) \right] \underline{I}_k; \quad (8)$$

- tensiunea la bornele obiectului încercat, pe armonica de ordin k :

$$U_{inck} = \frac{I_k}{k\omega C} \quad (9)$$

Din relațiile (8) și (9) se obține:

$$\frac{U_{inck}}{U_{ak}} = \frac{Q_{cal}}{\sqrt{k^2 + (k^2 - 1)^2 Q_{cal}^2}}. \quad (10)$$

Pentru $Q > 10$ se poate scrie:

$$\frac{U_{Ck}}{U_k} < \frac{1}{k^2 - 1}. \quad (11)$$

Rezultă astfel că, de exemplu, armonica a 5-a din tensiunea de alimentare se regăsește în tensiunea de încercare cu o pondere redusă de 24 ori, tensiunea de încercare fiind, practic, sinusoidală, chiar în condițiile în care tensiunea de alimentare este deformată, așa cum se poate observa în figura 3.

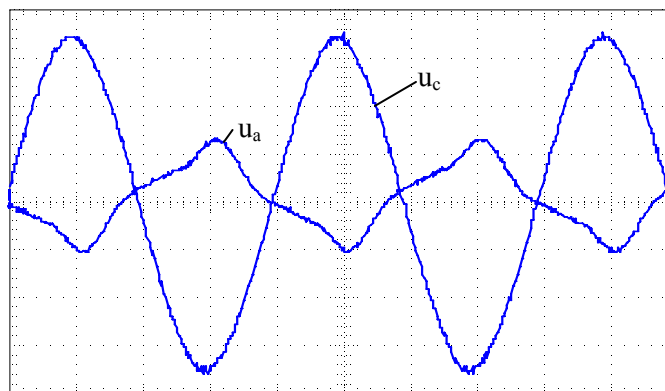


Fig.3 –Tensiune de alimentare deformată și tensiune de încercare la rezonanță

Acest avantaj este important pentru că sursa de alimentare nu mai trebuie să îndeplinească condiții foarte restrictive în ceea ce privește forma tensiunii furnizate.

Schema de încercare cu circuit rezonant serie prezintă și un alt avantaj important referitor la comportarea în cazul străpungerii sau conturnării izolației încercate.

Deoarece gazul SF₆, ca și amestecul SF₆ – N₂, sunt medii izolante și extintoare foarte bune, arcul electric, datorat producerii unui defect al izolației interne, este rapid deionizat și se stinge. Ca urmare, tensiunea la bornele obiectului încercat revine la valoarea anterioară descărcării printr-un regim tranzitoriu, cu posibilitatea producerii unor supratensiuni care pot conduce la deteriorări mai grave ale construcției izolante.

Riscul unei asemenea situații poate fi apreciat examinând legea de variație în timp a tensiunii, în regimul tranzitoriu de restabilire, de după stingerea arcului electric de defect. Analiza circuitului de încercare în regim de restabilire conduce la expresia

$$u_{rest}(t) = U_m \cdot \left[\cos \omega \cdot t - e^{-\delta \cdot t} \left(\cos \omega_1 \cdot t + \frac{\delta}{\omega_1} \cdot \sin \omega_1 \cdot t \right) \right], \quad (12)$$

în care U_m este valoare de vârf a tensiunii alternative de încercare, ω este pulsația tensiunii de alimentare, $\delta = R/2L$ este coeficientul de atenuare al circuitului, iar ω_1 este dată de relația

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (13)$$

ω_0 fiind pulsația proprie a circuitului.

În cazul utilizării transformatoarelor de încercare, este valabilă inegalitatea $\omega_1 \gg \omega$, astfel încât se poate considera că atunci când $\omega t = 0$, $\omega_1 t = \pi$, rezultând

$$U_{rest,max} \cong 2U_m. \quad (14)$$

În practică, la stingerea arcului electric de defect se pot înregistra supratensiuni de aproximativ 1,8 unități relative. Un asemenea nivel al supratensiunii exclude posibilitatea utilizării transformatoarelor de încercare, în cazul instalațiilor capsulate.

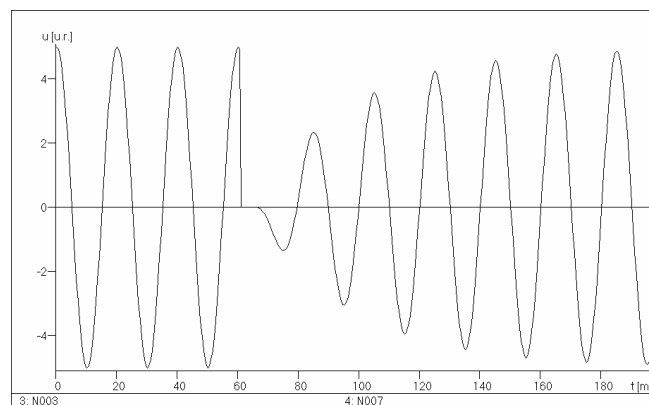


Fig.4 – Restabilirea tensiunii pe obiectul încercat

În cazul utilizării circuitului rezonant serie, la rezonanță $\omega_0 = \omega$, iar dacă factorul de calitate al circuitului este suficient de mare, atunci

$$\omega_1 \cong \omega, \text{ iar } \frac{\delta}{\omega_1} \ll 1,$$

relația (12) devine de forma

$$u_{rest}(t) = U_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{\omega}{2Q_{cal}} t} \right) \cdot \cos \omega \cdot t . \quad (15)$$

Evoluția în timp a tensiunii de restabilire este redată în figura 4. Se observă că tensiunea maximă de restabilire nu depășește amplitudinea tensiunii de încercare, iar revenirea tensiunii este destul de lentă pentru a nu provoca reaprinderea arcului electric în cazul izolației autoregeneratoare.

2. Modul de lucru

Scopul lucrării de laborator este acela al cunoașterii instalațiilor pentru producerea tensiunilor înalte alternative, necesare încercării echipamentelor având o capacitatea proprie mare. Studiul se realizează pe un model fizic de joasă tensiune, urmărindu-se evidențierea principalelor avantaje ale utilizării instalațiilor de încercare cu circuit rezonant serie:

- ✓ raportul dintre tensiunea de încercare și tensiunea de alimentare;
- ✓ forma tensiunii de încercare, la alimentarea circuitului cu tensiune nesinusoidală;
- ✓ comportarea circuitului rezonant la străpungerea izolației obiectului încercat.

Modelul este prevăzut cu surse interne de tensiune alternativă sinusoidală, de 50 Hz, și de tensiune nesinusoidală. Acordarea în frecvență a circuitului rezonant se realizează prin alimentarea acestuia de la o sursă externă, de putere corespunzătoare. Tensiunea surselor interne este de 5 V_{ef}, fiind preferabil ca și tensiunea sursei externe să fie reglată la aceeași valoare. Selectarea tipului sursei de alimentare se realizează de pe panoul modelului (figura 5), evitându-se selectarea simultană a două tipuri de surse.

Obiectul încercat este modelat prin condensatoare de joasă tensiune, având capacități de valori uzuale (C₁=0,1 μF; C₂=0,3 μF; C₃=0,47 μF; C₄=0,75 μF), iar modelul de inductor este o bobină cu miez de ferită și întrefier variabil. Inductivitatea poate fi modificată în trepte, prin alegerea unei anumite prize de lucru (selectorul 3), și continuu, prin modificarea întrefierului miezului magnetic al inductorului (butonul 5).

Străpungerea obiectului încercat este simulată de către contactul unui releu, a cărui bobină este comandată de un bloc electronic ce permite închiderea contactelor doar la trecerea tensiunii prin valoarea de vârf.

- ✓ *Raportul dintre tensiunea de încercare și tensiunea de alimentare*

Acest raport este, practic, egal cu factorul de calitate al inductorului (relația 2). Pentru o

bobină, Q_{cal} depinde de dimensiunea întrefierului, motiv pentru care se va urmări atingerea rezonanței la dimensiunea minimă a întrefierului.

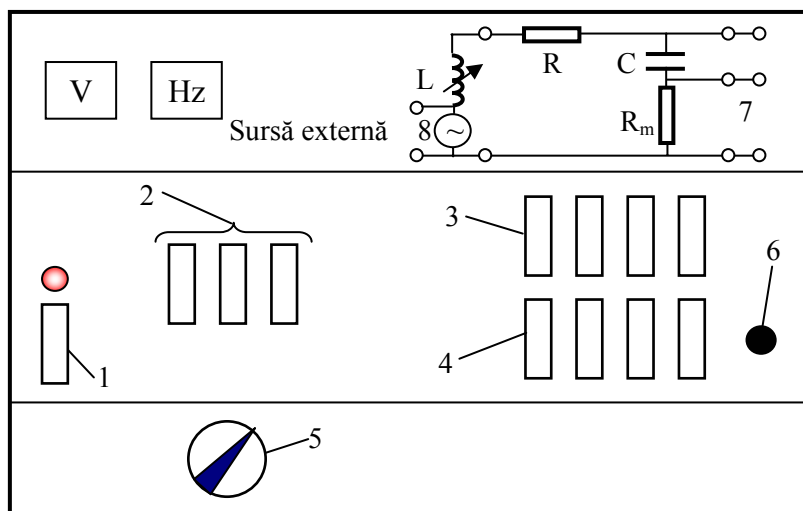


Fig.5. – Panoul frontal al modelului fizic de instalație de încercare cu circuit rezonant serie:
 1- întrerupător general; 2 – selector tensiune de alimentare: a) sinusoidală de frecvență industrială, b) sinusoidală de frecvență variabilă de la o sursă externă, c) nesinusoidală de frecvență industrială; 3 – selector „gamă inductivitate”; 4 – selector „valoare capacitate”; 5 – buton modificare întrefier; 6 –buton alimentare modul simulare defect de izolație; 7 - borne de măsură a tensiunii de încercare; 8 – borne de măsură a tensiunii de alimentare.

În prima etapă, se acordează circuitul rezonant la frecvență industrială. Atingerea acordării la rezonanță a circuitului se observă cu ajutorul unui osciloscop conectat cu un canal la bornele de măsură a tensiunii de încercare (7) și cu celălalt la bornele de măsură a tensiunii de alimentare (8).

Se selectează regimul “alimentare cu tensiune alternativă sinusoidală de frecvență industrială”. Pentru fiecare dintre cele patru condensatoare (selectorul 4) , se aduce circuitul la rezonanță, pornind de la poziția limită stânga a butonului 5. Dacă nu este atinsă rezonanța în maximum 10 rotații ale acestui buton, se schimbă priza de lucru a inductorului (selectorul 3). La rezonanță se măsoară valorile de vârf ale tensiunii de alimentare și a tensiunii de încercare.

Mărimea inductanței pentru care este atinsă starea de rezonanță se determină pornind de la relația (3)

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}. \quad (16)$$

Rezultatele se trec în tabelul 2

În cea de a doua etapă, se acordează circuitul în frecvență. Pentru aceasta, se alimen-

tează circuitul de la o sursă externă (bornele 8), se selectează regimul “alimentare cu tensiune alternativă de frecvență variabilă” (selectorul 2), se aduce butonul „reglare întrefier” în poziția limită stânga (întrefier minim) și se ajustează tensiunea de alimentare la o valoare convenabilă oscilografierii celor două tensiuni. Rezultatele corespunzătoare regimului de rezonanță se trec în coloanele aferente ale tabelului 2.

Tabelul 2. Rezultate experimentale

C (μF)	Acordarea circuitului la frecvență industrială				Acordarea circuitului rezonant în frecvență			
	L (H)	$U_{\text{alimentare}}$ (V)	$U_{\text{încercare}}$ (V)	Q_{cal} (u.r.)	$f_{\text{rezonanță}}$ (Hz)	$U_{\text{alimentare}}$ (V)	$U_{\text{încercare}}$ (V)	Q_{cal} (u.r.)
0,1								
0,3								
0,47								
0,75								

✓ *Comportarea circuitului rezonant la alimentare cu tensiune nesinusoidală*

Pentru acea valoare a capacității pentru care s-a obținut valoarea maximă a factorului de calitate, se aduce circuitul la rezonanță, pe frecvență industrială. Se selectează regimul de lucru “alimentare cu tensiune alternativă deformată” și se trasează grafic forma tensiunii de alimentare și a tensiunii de încercare, în același sistem de axe de coordonate. Se dezacordează circuitul, acționând asupra butonului de modificare a întrefierului, și se trasează noua formă a tensiunii de încercare.

Important: Acest regim de lucru nu se menține mai mult de 3 minute, datorită supraîncălzirii unor componente. Între două utilizări succesive, este necesară deconectarea sursei, pentru un interval de timp de cel puțin 5 minute.

✓ *Comportarea circuitului rezonant la străpungerea izolației obiectului încercat*

Pentru acea valoare a capacității pentru care s-a obținut valoarea maximă a factorului de calitate, se aduce circuitul la rezonanță, pe frecvență industrială. Se acționează butonul de simulare a producerii unui defect de izolație (butonul 6) se oscilografiază și se trasează grafic forma tensiunii de restabilire, precum și variația curentului prin circuit (măsurat ca și cădere de tensiune pe rezistorul de măsură R_m). Se observă forma tensiunii de restabilire în afara rezonanței.