

Lucrarea 4 – INSTALAȚIA DE ÎNCERCARE CU CIRCUIT REZONANT SERIE

1. Noțiuni teoretice

1.1. Domeniul de utilizare și modul de obținere a rezonanței

Obiectivul lucrării constă în înțelegerea modului de producere a tensiunilor înalte alternative cu ajutorul circuitului rezonant serie, scenariu care apare în cazul testării izolației unor echipamente cu capacitate proprie mare.

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:

$$S = \omega CU^2 \quad (1)$$

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 (CRS). Schema electrică de principiu a unei asemenea instalații de încercare este redată în figura 1, semnificația notațiilor fiind următoarea: 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.

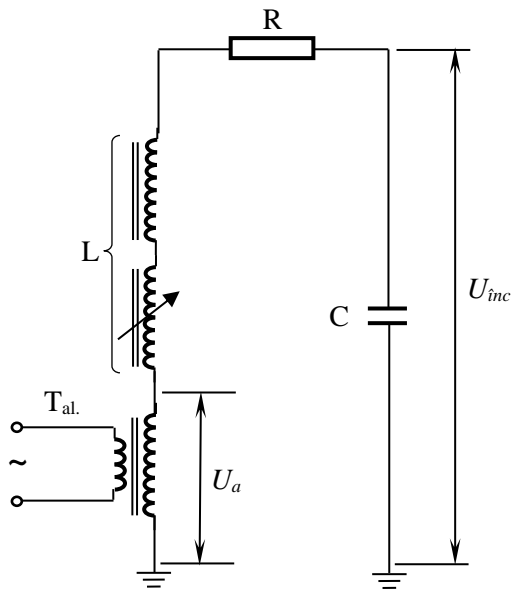


Fig. 1 – Schema electrică de principiu a instalației de încercare cu circuit rezonant serie

Principiul de funcționare a circuitului de încercare este rezonanța de tensiune în circuitul RLC serie. Obținerea stării de rezonanță în circuitul de încercare face ca următoarea egalitate să devină adevărată:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C}, \quad (2)$$

Din analiza expresiei (2) se poate constata atingerea stării de rezonanță este posibilă prin două procedee, și anume:

- ajustarea corespunzătoare a inductanței L a circuitului, caz în care este necesară utilizarea unei inductanțe reglabile, întrucât capacitatea obiectelor de încercat diferă în funcție de natura și dimensiunile acestora;
- variația frecvenței tensiunii de alimentare, ținând cont de limitele admise pentru încercarea cu tensiune mărită de frecvență industrială (50 – 150 Hz).

1.2. Comportarea circuitului rezonant serie în regim permanent

a. Obținerea unei tensiuni de încercare ridicate

În situația producerii rezonanței în circuitul de încercare, prin oricare din cele două procedee menționate anterior, impedanța circuitului devine $Z = R$. Ca urmare, tensiunile la bornele elementelor reactive L și C devin:

$$\underline{U}_L = j\omega L \frac{U_a}{R} = j \frac{U_a}{\omega RC}, \quad (3)$$

$$\underline{U}_C = \frac{1}{j\omega C} \frac{U_a}{R} = -j\omega L \frac{U_a}{L}. \quad (4)$$

Cele două tensiuni, \underline{U}_L și \underline{U}_C sunt egale în modul dar în opoziție de fază. Astfel, se definește factorul de calitate al circuitului rezonant serie:

$$Q_{cal} = \frac{U_L}{U_a} = \frac{U_C}{U_a} = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{\omega RC}. \quad (5)$$

În consecință tensiunea de încercare va fi:

$$U_{inc} = Q_{cal} U_a. \quad (6)$$

În aceste condiții tensiunea la bornele obiectului de încercat (capacitatea C) este mult mai mare decât tensiunea de alimentare, U_a , așa cum reiese și din figura 2.

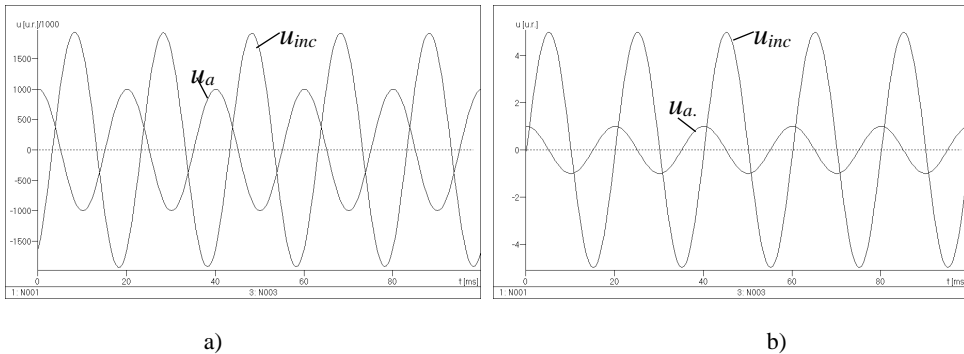


Fig. 2 – Tensiunile de alimentare și de încercare: a) în afara rezonanței; b) la rezonanță

Acest fapt reprezintă un avantaj deosebit de important, pentru că permite folosirea unui transformator de încercare cu tensiunea nominală mult mai mică decât în cazul încercării clasice cu tensiune aplicată. Astfel, într-un circuit rezonant serie caracterizat printr-un factor de calitate, $Q_{cal} \geq 10$, reiese, spre exemplu, că pentru obținerea unei tensiuni de încercare de 500 kV ar fi necesar un transformator de încercare cu tensiunea secundară de numai 50 kV.

b. Limitarea puterii necesare pentru efectuarea încercării

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

$$P_{inc} = \frac{U_a^2}{R} = \frac{U_{inc}^2}{Q_{cal}^2} \cdot \frac{1}{R} = \frac{U_{inc}^2}{Q_{cal}^2} Q_{cal} \omega C = \frac{Q_C}{Q_{cal}}, \quad (7)$$

în care Q_C este puterea reactivă a obiectului încercat:

$$Q_C = \omega C U_{inc}^2. \quad (8)$$

Relația (7) pune în evidență un alt avantaj deosebit de important al utilizării CRS ca instalație de încercare pentru sarcini capacitive și anume, limitarea puterii active necesare pentru încercare la o valoare numeric egală cu puterea reactivă pe obiectul încercat, diminuată de Q_{cal} ori.

Din analiza expresiilor (6) și (7) se poate observa că obținerea unui factor de calitate al circuitului cât mai mare asigură creșterea semnificativă a tensiunii de încercare și în același timp reducerea puterii active absorbite.

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 $30 \div 40$.

c. Limitarea conținutului de armonici din tensiunea de încercare

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, nu se află la rezonanță simultan și pe armonicele existente în tensiunea de alimentare, astfel că în tensiunea de încercare acestea au o pondere mult mai redusă decât în tensiunea de alimentare.

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

- pe frecvența fundamentală:

$$\underline{U}_a = \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] \underline{I}; \tag{9}$$

- pe armonica de ordin k :

$$\underline{U}_{ak} = \left[R + j \left(k\omega L - \frac{1}{k\omega C} \right) \right] \underline{I}_k; \tag{10}$$

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

$$U_{inck} = \frac{I_k}{k\omega C} \tag{11}$$

Din relațiile (9) și (10) se obține:

$$\frac{U_{inck}}{U_{ak}} = \frac{Q_{cal}}{\sqrt{k^2 + (k^2 - 1)^2} Q_{cal}}. \tag{12}$$

Pentru $Q_{cal} > 10$ se poate scrie:

$$\frac{U_{Ck}}{U_k} < \frac{1}{k^2 - 1}. \quad (13)$$

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 și în figura 3.

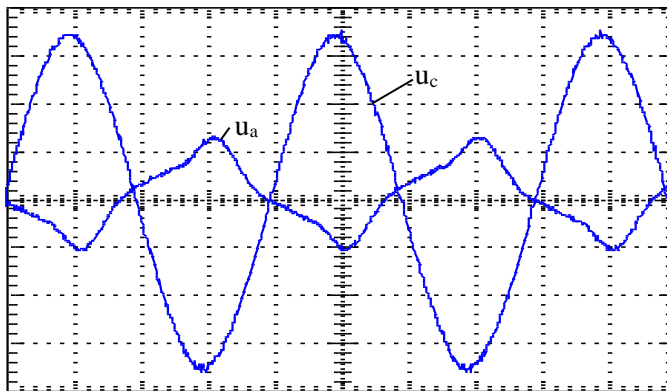


Fig. 3 – Tensiune de alimentare deformată și tensiune de încercare la rezonanță

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

1.3. Comportarea circuitului rezonant serie în regim tranzitoriu

Instalația de încercare cu circuit rezonant serie prezintă și un alt avantaj important referitor la comportarea în cazul străpungerii sau conturnării izolației. Deoarece gazul SF₆, ca și amestecul SF₆ – N₂, sunt medii izolante și extincatoare foarte bune, arc 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:

$$u_{rest}(t) = U_m \cdot \left[\cos \omega \cdot t - e^{-\delta \cdot t} \left(\cos \omega_1 \cdot t + \frac{\delta}{\omega_1} \cdot \sin \omega_1 \cdot t \right) \right], \quad (14)$$

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:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}, \quad (15)$$

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 $\omega_1 t = \pi$ atunci când $\omega t = \theta$, rezultând:

$$U_{rest_{max}} \cong 2U_m. \quad (16)$$

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.

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

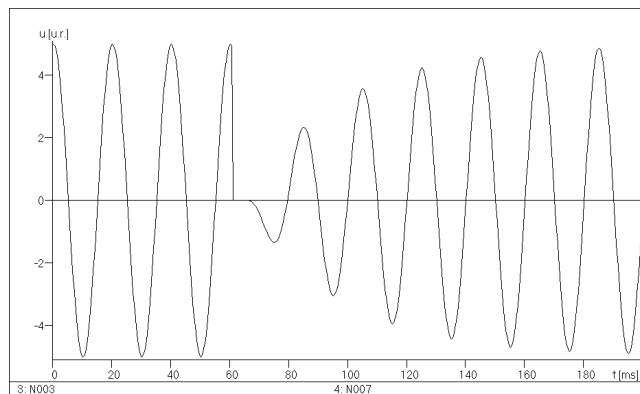
$$\omega_1 \cong \omega, \text{ iar } \frac{\delta}{\omega_1} \ll 1,$$

relația (14) devine de forma:

$$u_{rest}(t) = U_m \cdot \left(1 - e^{-\frac{\omega}{2Q_{cal}} \cdot t} \right) \cdot \cos \omega \cdot t. \quad (17)$$

Evoluția în timp a tensiunii de restabilire este redată în figura 4.

Fig. 4 – Restabilirea tensiunii pe obiectul încercat cu circuit rezonant serie



Din analiza figurii 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 auto-regeneratoare.

Având în vedere toate aspectele prezentate până acum, în tabelul 1 este realizată o sinteză comparativă a parametrilor instalațiilor de încercare cu circuit rezonant serie (CRS), respectiv cu transformatoare.

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

2. Determinări experimentale

2.1. Prezentarea echipamentelor utilizate

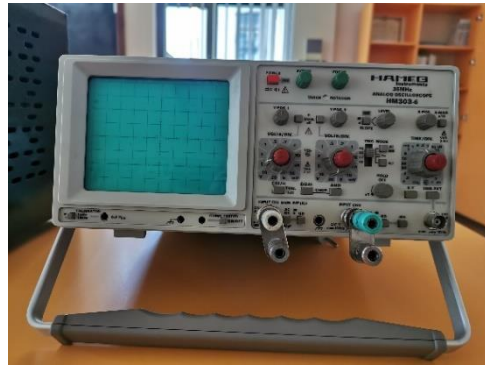
Montajul experimental este compus dintr-un model fizic de joasă tensiune, pentru măsurarea tensiunilor de alimentare și de încercare fiind utilizat un osciloscop analog, model Hameg HMG 303-6. Pentru acordarea în frecvență a circuitului rezonant este necesară alimentarea modelului de la o sursă externă, de putere corespunzătoare. Cele trei echipamente menționate sunt prezentate în figura 5.

Modelul este prevăzut cu surse interne de tensiune alternativă sinusoidală, de 50 Hz, ca și de tensiune nesinusoidală. 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, prezentat în detaliu în figura 6, evitându-se selectarea simultană a două tipuri de surse.

Obiectul încercat este modelat prin condensatoare de joasă tensiune, având capacități de valori uzuale ($C_1=1,5 \mu\text{F}$; $C_2=2 \mu\text{F}$; $C_3=2,5 \mu\text{F}$; $C_4=3 \mu\text{F}$), iar modelul de inductor este o bobină cu miez de ferită și întrefier variabil. Inductivitatea poate fi variată continuu, prin modificarea întrefierului miezului magnetic al inductorului.



a



b



c

Fig. 5 – Echipamentele utilizate pentru realizarea modelului experimental: a - Modelul fizic al instalației de încercare cu circuit rezonant serie; b - osciloscop analog; c – sursă de tensiune cu frecvență variabilă

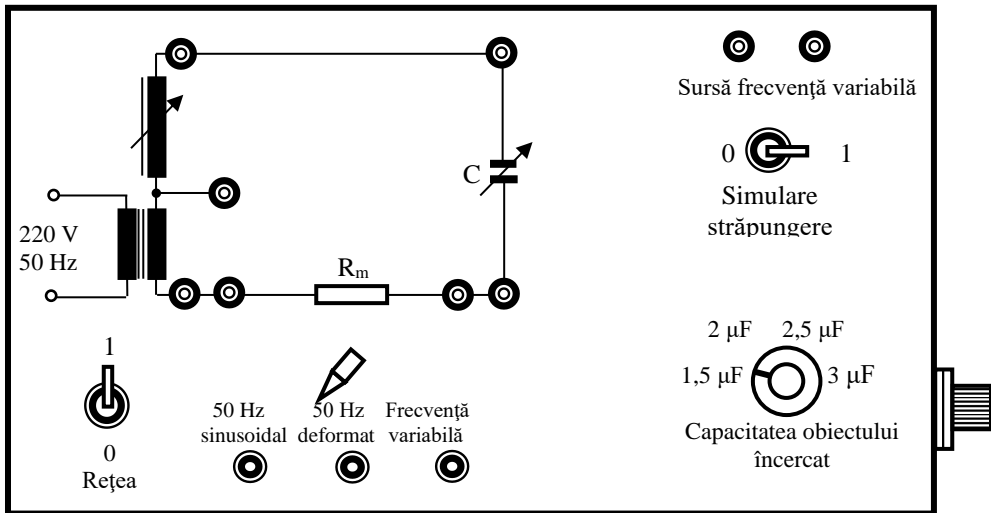


Fig. 6 – Panoul frontal al modelului fizic de instalație de încercare cu circuit rezonant serie

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

2.2. Modul de lucru

Determinările experimentale ce urmează a fi făcute au ca scop evidențierea principalelor avantaje ale utilizării instalațiilor de încercare cu circuit rezonant serie, și anume:

- factorul de calitate, dat de 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.

a. Determinarea factorului de calitate al modelului instalației cu circuit rezonant serie

Așa cum am văzut, factorul de calitate este dat de raportul dintre tensiunea de încercare și tensiunea de alimentare. Acest raport este, practic, egal cu factorul de calitate al inductorului, exprimat prin relația (5). Pentru o bobină, Q_{cal} depinde de dimensiunea întrefierului datorită pierderilor active în miezul magnetic: cu cât fluxul prin miez este mai mare, pierderile în miez sunt mai mari, iar rezistența echivalentă a bobinei crește.

Pentru obținerea stării de rezonanță se vor utiliza cele două procedee descrise anterior, și anume reglarea inductanței bobinei, respectiv acordarea în frecvență. În consecință, se va realiza montajul experimental prezentat în figura 7.

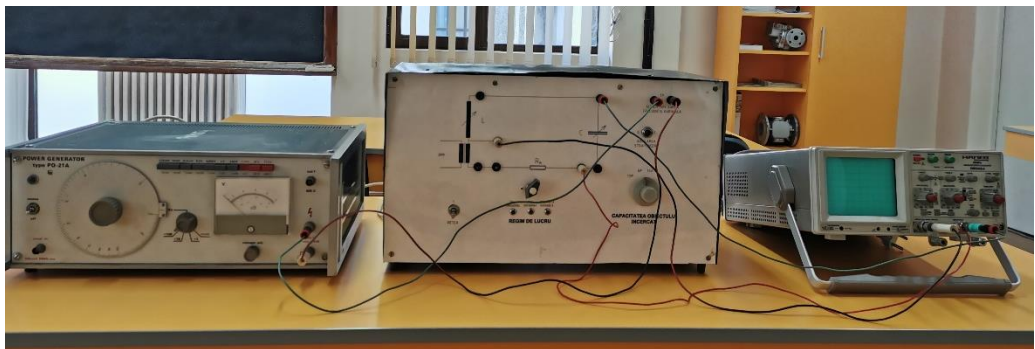


Fig.7 – Realizarea montajului experimental

Pentru obținerea stării de rezonanță la frecvență industrială se vor parcurge următoarele etape:

- din panoul frontal al modelului fizic, prezentat în figura 6, se va selecta regimul *50 Hz sinusoidal*;

- pentru fiecare dintre cele patru condensatoare se va aduce circuitul la rezonanță, modificând corespunzător inductanța reglabilă, până la obținerea valorii maxime a tensiunii de încercare, fapt observabil pe ecranul osciloscopului analog;
- după obținerea rezonanței se vor măsura valorile de vârf ale tensiunii de alimentare și a tensiunii de încercare, ținând cont de modul în care au fost reglate domeniile de măsurare pe cele două canale ale osciloscopului;
- mărimea inductanței pentru care este atinsă starea de rezonanță se calculează pornind cu ajutorul expresiei:

$$L = \frac{1}{\omega^2 C} . \quad (18)$$

- rezultatele măsurate ale tensiunilor de alimentare și încercare, precum și valorile inductanței pentru care s-a obținut starea de rezonanță, vor fi trecute în tabelul 2;
- se va calcula factorul de calitate al circuitului, prin raportarea tensiunii de încercare la cea de alimentare;

Tabelul 2. Rezultate experimentale

C (μF)	Acordarea circuitului la frecvență industrială				Acordarea circuitului rezonant în frecvență			
	L (H)	U _{alim.} (V)	U _{încerc.} (V)	Q _{cal}	f _{rezonanță} (Hz)	U _{alim.} (V)	U _{încerc.} (V)	Q _{cal}
1,5								
2								
2,5								
3								

Pentru obținerea stării de rezonanță prin acordarea în frecvență se vor avea în vedere următorii pași:

- din panoul frontal al modelului fizic, prezentat în figura 6, se va selecta regimul *Frecvență variabilă*;
- din panoul sursei externe se va selecta nivelul tensiunii furnizate, în concordanță cu indicațiile de pe panoul frontal al modelului circuitului CRS;
- pentru fiecare dintre cele patru condensatoare se va aduce circuitul la rezonanță, modificând corespunzător frecvența tensiunii de alimentare, până la obținerea valorii maxime a tensiunii de încercare, fapt observabil pe ecranul osciloscopului analog;

- măsurarea tensiunilor de alimentare și încercare se face similar modului descris anterior la acordarea circuitului prin modificarea inductanței, valorile astfel rezultate urmând a fi trecute în tabelul 2;
- se va calcula factorul de calitate al circuitului, prin raportarea tensiunii de încercare la cea de alimentare;

Se vor face comentarii referitor la valorile factorului de calitate al circuitului, rezultate prin cele două procedee de obținere a rezonanței.

b. Comportarea circuitului rezonant la alimentare cu tensiune nesinusoidală

Pentru analiza comportării CRS în cazul alimentării cu tensiune nesinusoidală se au în vedere următorii pași:

- din panoul frontal al modelului fizic se va selecta regimul *50 Hz deformat*;
- se alege acea valoare a capacității pentru care s-a obținut valoarea maximă a factorului de calitate, se aduce circuitul la rezonanță, pe frecvență industrială;
- se vor analiza comparativ, pe ecranul osciloscopului, formele de undă ale tensiunii de alimentare și încercare în situația producerii rezonanței, dar și în afara acesteia;
- 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.

c. Comportarea circuitului rezonant la străpungerea izolației obiectului încercat

Pentru analiza comportării CRS în cazul străpungerii izolației obiectului testat se au în vedere următorii pași:

- din panoul frontal al modelului fizic se va selecta regimul *50 Hz sinusoidal*;
- se alege 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, se oscilografiază și se observă 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, de asemenea, și forma tensiunii de restabilire în afara rezonanței.