

## PRODUCEREA ȘI MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE DE IMPULS DE COMUTAȚIE

### 1. Baze teoretice

#### 1.1. Impulsul de tensiune de comutație

Izolația echipamentelor electrice de înaltă tensiune este supusă pe durata exploatării unor solicitări electrice diverse, printre care și supratensiunile generate de procesele de comutație. Potrivit clasificării actuale a solicitărilor electrice, acestea sunt în majoritatea cazurilor supratensiuni cu front lent, deși uneori pot avea și forma supratensiunilor cu front rapid. Verificarea prin încercare a ținerii izolației la supratensiuni de comutație este impusă numai pentru echipamentele din domeniul II de tensiuni ( $U_m > 245$  kV), deoarece pe de o parte în rețelele de acest tip nivelul supratensiunilor poate fi foarte important, iar pe de altă parte comportarea intervalelor de aer lungi, specifice acestor instalații, este negativ influențată de forma supratensiunilor de comutație, în special de durata frontului acestora.

Formele impulsurilor de tensiune de comutație folosite în asemenea încercări sunt:

✓ *Impuls de comutație standardizat* - impuls de tensiune având durata de front ( $t_f$ ) de 250  $\mu$ s, durata de semiamplitudine ( $t_s$ ) de 2500  $\mu$ s (fig. 1), iar intervalul de timp  $t_d$ , în care valoarea tensiunii este mai mare de  $0,9U_{max}$ , este mai mare de 200  $\mu$ s.

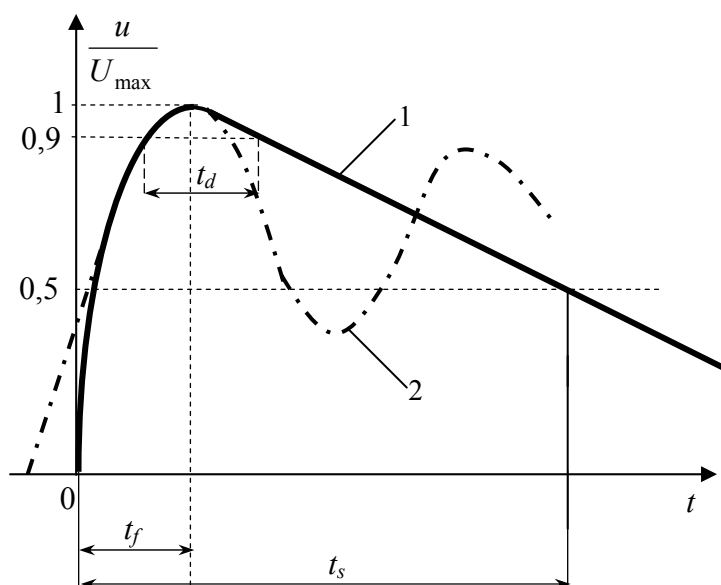


Fig.1 – Impuls de tensiune de comutație standardizat ITC 250/2500:  
1 – impuls de tensiune de comutație; 2 – supratensiune de comutație.

✓ *Impuls de comutație combinat standardizat* - impuls de tensiune format din două compo-

nente cu valori de vârf egale și polarități opuse; componenta pozitivă este un impuls de comutație standardizat, iar componenta negativă este un impuls de comutație ale cărui durate de front și de semiamplitudine trebuie să fie mai mari decât duratele corespunzătoare ale impulsului pozitiv; ambele impulsuri trebuie să atingă valorile de vârf în același moment, astfel încât valoarea maximă a tensiunii combinate devine egală cu suma valorilor de vârf ale componentelor sale.

Pe lângă aceste impulsuri, de tip aperiodic, pot fi utilizate, prin acordul producătorului și beneficiarului echipamentului respectiv și *impulsuri de tensiune de comutație speciale*, de tip oscilant amortizat (fig. 2), având o durată a primei semiperioade cuprinsă între 2000  $\mu$ s și 3000  $\mu$ s și o valoare de vârf a tensiunii, în următoarea semiperioadă, de polaritate opusă, egală cu 80 % din valoarea de vârf a tensiunii din prima semiperioadă.

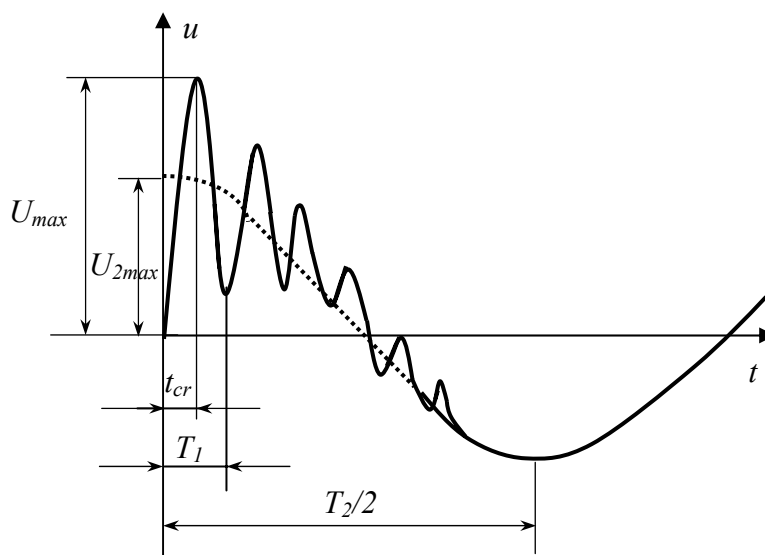


Fig.2 – Impuls de tensiune de comutație oscilant amortizat

În cazul încercărilor izolației unor echipamente, valoarea de vârf a tensiunii trebuie să fie egală cu tensiunea nominală de ținere la impuls de comutație, indiferent de tipul impulsului. Exemple privind nivelul de ținere a izolației pentru domeniul II sunt date în tabelul 1.

**Tabelul 1.** Nivelurile de izolație nominale pentru domeniul II de tensiuni ( $U_{max} > 245$  kV)

Tensiunea cea mai ridicată pentru echipament ( $U_m$ ) kV <sub>ef</sub>	Tensiuni nominale de ținere la impuls de trăsnet ( $U_{ITT}$ ) kV <sub>ef</sub>	Tensiuni nominale de ținere la impuls de comutație ( $U_{ITC}$ )			Tensiunea nominală de ținere la încercarea de scurtă durată cu frecvență industrială <sup>4)</sup> ( $U_{t,50Hz}$ ) kV <sub>ef</sub>
		Fază-pământ	Între faze, pentru stații	Izolație longitudinală <sup>1)</sup>	
		kV <sub>max</sub>	kV <sub>max</sub>	kV <sub>max</sub>	
420	1425; 1550 <sup>2)</sup>	1050	1425; 1550 <sup>3)</sup>	950	630 <sup>5)</sup> ; 680 <sup>6)</sup>
787	2100	1425; 1550 <sup>2)</sup>	2400; 2550 <sup>3)</sup>	1175	-

## 1.2. Producerea și măsurarea impulsurilor de tensiune de comutație

Impulsul de tensiune de comutație standardizat, de tip aperiodic, poate fi produs de către generatoarele de impuls de tensiune construite pe principiul acumulării capacitive a energiei, folosite curent pentru generarea impulsurilor de tensiune de trăsnet, dacă parametrii componentelor de care depinde forma impulsului sunt modificați corespunzător. Cel mai comod este de a modifica valorile rezistoarelor de front și de spate, comparativ cu schimbarea condensatoarelor schemei. Întrucât duratele de front și de semiamplitudine ale impulsului de comutație sunt mai lungi decât ale impulsului de trăsnet, ambele tipuri de rezistențe trebuie mărite. Totodată trebuie mărite și rezistențele de încărcare pentru ca acestea să nu aibă influență asupra formei impulsului de tensiune produs. Astfel, pentru generatorul de 1000 kV, 12,5 kJ, aflat în laboratorul de înaltă tensiune, valorile rezistențelor utilizate pentru generarea celor două tipuri de impulsuri sunt date în tabelul 2.

**Tabelul 2.** Valorile rezistențelor generatorului de impuls de tensiune 1 MV, 12,5 kJ

Tipul impulsului	Valorile rezistențelor generatorului ( $\Omega$ )		
	$R_{\text{front}}$	$R_{\text{spate}}$	$R_{\text{încărcare}}$
<b>ITT 1,2/50</b>	60	268	7300
<b>ITC 250/2500</b>	9300	16000	40000

Creșterea valorii rezistențelor de front conduce la creșterea căderilor de tensiune pe acestea, respectiv la reducerea coeficientului de utilizare al generatorului. Astfel, pentru o capacitate de sarcină de 608 pF, generatorul de 1 MV, 12,5 kJ, are un coeficient de utilizare de 89 % - la impuls de tensiune de trăsnet și de numai 70 % - la impuls de tensiune de comutație.

Impulsul de tensiune de comutație oscilant amortizat se poate obține folosind o schemă de principiu de tipul celei prezentate în fig. 3.a, în care un condensator de joasă tensiune ( $C_1$ ), încărcat de la o sursă de tensiune continuă, se descarcă pe înfășurarea primară a unui transformator ( $T$ ). În înfășurarea secundară a transformatorului, având drept sarcină un condensator  $C_2$ , se formează impulsul de tensiune oscilant amortizat. Condensatorul  $C_2$  nu este, de obicei un element distinct în schemă ci reprezintă capacitatea proprie a circuitului format din obiectul încercat, transformatorul de încercare și divizorul de tensiune.

În schema echivalentă din fig.3.b, semnificația notațiilor este următoarea:  $C_1$  – capacitatea bateriei de condensatoare de joasă tensiune;  $C_2'$  – capacitatea echivalentă din secundarul transformatorului de încercare, raportată la primarul acestuia;  $L$  – inductanța de dispersie a transformatorului;  $L_m$  – inductanța de magnetizare a acestuia;  $R$  – rezistența corespunzătoare

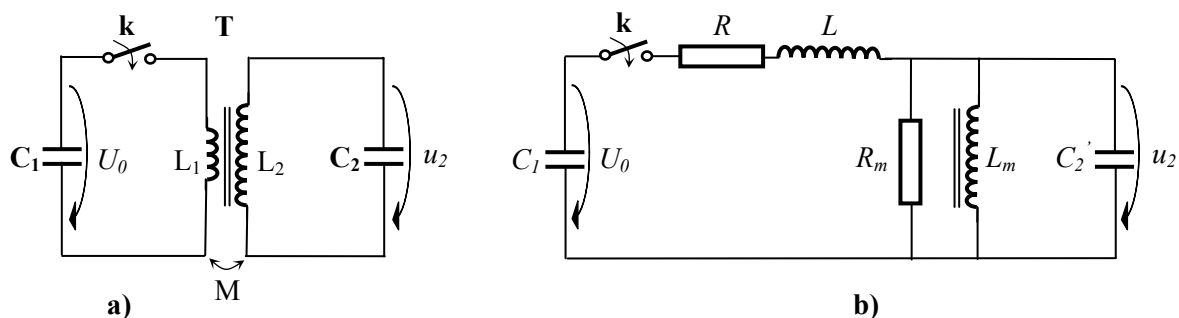


Fig. 3 – Generarea impulsului de tensiune oscilant amortizat:  
a) - schema de principiu; b) – schema electrică echivalentă.

pierderilor în cupru;  $R_m$  - rezistența corespunzătoare pierderilor în fier.

Evoluția în timp a fenomenului tranzitoriu din înfășurarea secundară a transformatorului este descrisă de o relație de forma

$$u_2(t) = k_t U_0 \frac{C_1}{C_1 + C_2'} \left[ \left( \cos \omega t - \frac{\beta}{\omega} \sin \omega t \right) \cdot e^{-\beta t} - \left( \cos \Omega t - \frac{\delta}{\Omega} \sin \Omega t \right) \cdot e^{-\delta t} \right], \quad (1)$$

în care  $k_t$  este raportul de transformare al transformatorului de încercare, iar mărimile dependente de elementele circuitului sunt date de relațiile:

- constantele de atenuare

$$\beta = \frac{1}{2R_m(C_1 + C_2')}; \quad \delta = \frac{R}{2L}; \quad (2)$$

- pulsațiile

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_m(C_1 + C_2')}}; \quad \Omega = \sqrt{\Omega_0^2 - \delta^2}; \quad \Omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \frac{C_1 C_2'}{C_1 + C_2'}}}. \quad (3)$$

Dacă se neglijează pierderile, constantele de atenuare devin nule, între pulsații există relațiile  $\omega_0 = \omega$ ,  $\Omega_0 = \Omega$ , ecuația (1) devenind de forma

$$u_2(t) = \eta U_0 (\cos \omega t - \cos \Omega t). \quad (4)$$

Din relația (4) rezultă, mai evident, că impulsul de tensiune de comutație se obține prin compunerea a două oscilații de frecvențe diferite. Componenta de frecvență mai mare,  $\Omega$ , corespunde, cu aproximație, încărcării capacității  $C_2$  cu sarcină electrică, preluată din condensatorul  $C_1$ , prin intermediul inductanței de dispersie a transformatorului (schema echivalentă din fig. 3.b). Această aproximație este acceptabilă atâta timp cât frecvența acestei oscilații este relativ mare, astfel că reactanța foarte mare de magnetizare permite să se considere că ramura transversală este deschisă. Componenta de frecvență mai mică,  $\omega$ , corespunde descărcării celor două condensatoare pe ramura transversală a schemei echivalente. Această aproximație

nu este inacceptabilă atâta timp cât frecvența acestei oscilații este suficient de mică încât impedanța longitudinală (formată din  $R$  și  $L$ ) să fie mult mai mică decât cea transversală.

În consecință, dacă diferența între pulsațiile celor două oscilații este suficient de mare, acestea pot fi determinate cu relațiile aproximative:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_m(C_1 + C_2')}} \quad \text{și} \quad \Omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot \frac{C_1 C_2'}{C_1 + C_2'}}}, \quad (5)$$

iar durata de creștere până la vârf a impulsului și amplitudinea acestuia cu relațiile:

$$t_{cr} = \frac{\pi}{2\Omega}, \quad \text{respectiv} \quad U_{2\max} = k_t U_0 \frac{L_m C_1 \Omega^2 \omega^2}{\Omega^2 - \omega^2}. \quad (6)$$

Deoarece capacitatea proprie a echipamentelor ce urmează a fi încercate poate varia în limite relativ largi, este necesară modificarea parametrilor circuitului, astfel încât impulsul să aibă atât o durată de creștere până la vârf, cât și o amortizare corespunzătoare. Din relațiile anterioare, rezultă că durata de creștere până la vârf poate fi ajustată prin modificarea inductanței serie a circuitului, realizabilă cu ajutorul unei inductanțe adiționale, reglabilă, de joasă tensiune ( $L_a$ ), a cărei mărime este comparabilă cu inductanța de scăpări a transformatorului. Viteza de atenuare a componentei de frecvență mare poate fi modificată prin intermediul unei rezistențe adiționale serie, iar a componentei de frecvență mică prin intermediul unei rezistențe derivație. Ambele rezistoare sunt conectate în înfășurarea primară a transformatorului de încercare, fiind, astfel, în construcție de joasă tensiune și, deci, simplu de realizat.

Pe baza principiilor anterior prezentate, este realizată instalația de producere a impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat, existentă în laboratorul de înaltă tensiune, având schema electrică simplificată de principiu prezentată în fig. 4.

Instalația de laborator este realizată din două module constructive distincte, **A** și **B**, transformatorul de încercare (**T**) și divizorul de tensiune (**DT**). Modulul **A** conține blocul de alimentare (**BA**) și dispozitivul de sincronizare (**DS**). Blocul de alimentare conține sursa de alimentare a tuturor circuitelor electronice și sursa de alimentare cu tensiune variabilă a condensatorului  $C_1$ . Dispozitivul de sincronizare formează impulsul de comandă care deschide tiristorul **Th**, conectând, astfel, condensatorul  $C_1$  la circuitul format din inductanța adițională  $L_a$  și înfășurarea primară a transformatorului de încercare.

Măsurarea impulsului de tensiune se face cu ajutorul divizorului de tensiune capacitiv amortizat, **DT**, în al cărui braț de joasă tensiune se conectează un osciloscop digital.

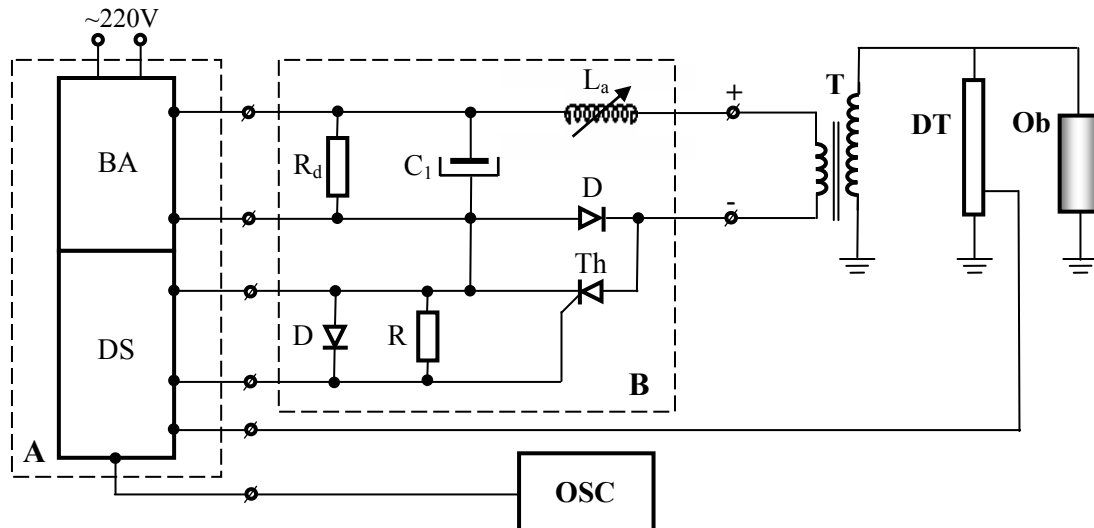


Fig. 4 - Schema bloc a instalației pentru generarea impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat

Specific măsurării tensiunilor de impuls de comutație, ca și în cazul măsurării tensiunilor de impuls de trăsnet, este faptul că impulsul este singular și de scurtă durată, fiind, astfel, necesară memorarea acestuia un timp suficient de mare pentru determinarea parametrilor acestuia. Determinarea, numai prin calcul, a formei impulsului de tensiune nu este satisfăcătoare, deoarece o parte dintre mărimile de calcul sunt evaluate aproximativ.

Utilizarea divizoarelor de tensiune permite determinarea tuturor parametrilor impulsului, dacă aparatul de măsură de joasă tensiune este de tip înregistrator. Astfel, utilizarea unui voltmetru de vârf permite doar măsurarea amplitudinii impulsului, în timp ce un osciloscop cu memorie permite măsurarea amplitudinii și a duratelor ce stabilesc forma impulsului.

În cazul încercărilor reale, nivelul de tensiune este foarte ridicat (peste 1000 kV), fiind, astfel, necesară utilizarea divizoarelor de tensiune de tip mixt-serie (capacitiv amortizat). Măsurarea se realizează cu obiectul de încercat conectat în circuit, iar încadrarea formei impulsului în limitele abaterilor admisibile se verifică pentru fiecare obiect încercat.

## 2. Indicații metodice, prelucrarea rezultatelor experimentale

Lucrarea de laborator urmărește, în contextul mai larg al încercării izolației echipamentelor electrice de înaltă tensiune, înțelegerea modului de producere a impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat ca și a componentei instalațiilor dedicate.

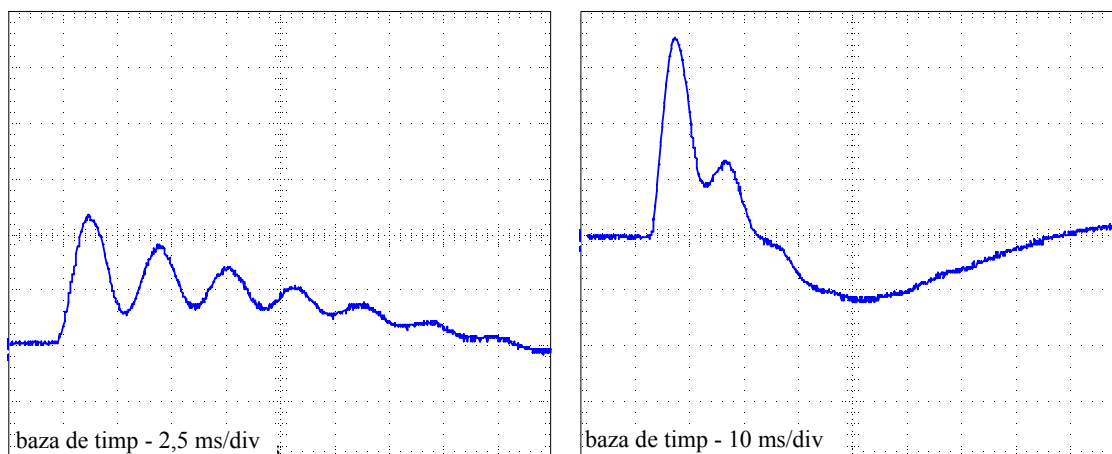
În prima parte a lucrării se determină, prin calcul, parametrii impulsului de tensiune de comutație oscilant. Valorile parametrilor instalației de încercare, existente în laborator, ce

reprezintă date de intrare ale calculului, sunt date în tabelul 3. Calculele vor fi efectuate numai pentru acel transformator care va fi utilizat și în partea experimentală, utilizând relațiile (5) și (6), pentru toate valorile inductanței adiționale specificate în tabelele 3 și 4 și în condițiile în care instalația nu este conectată la un obiect de încercat.

**Tabelul 3.** Parametrii electrici ai instalației de încercare

Parametri independenți de transformatorul de încercare	Parametri ai transformatorului de încercare	
	Tip IMN, de construcție „Le Transformateur”	Tip TMU - prima treaptă a cascadei de 250 kV.
Tensiunea de alimentare $U_0 = 0 \div 200 \text{ V}$ – reglaj continuu	Tensiunea nominală $U_n = 0,2/37,5 \text{ kV}$	$U_n = 0,2/125 \text{ kV}$
Condensatorul de joasă tensiune $C_1 = 1000 \mu\text{F}$	Inductanța de magnetizare $L_m = 35,5 \text{ mH}$	$L_m = 75 \text{ mH}$
Inductanța adițională $L_a = 0; 4,0; 4,7; 5,4; 6,4; 7,8; 9,4 \text{ mH}$ – reglaj în trepte	Inductanța de dispersie $L = 1,6 \text{ mH}$	$L = 0,546 \text{ mH}$
Capacitatea divizorului de tensiune $C_D = 280 \text{ pF}$	Capacitatea proprie $C_t = 2200 \text{ pF}$	$C_t = 2500 \text{ pF}$
Raportul de divizare $k_d = 1000$	Raportul de transformare $k_t = 188$	$k_t = 625$
<i>Observație:</i> Capacitatea $C_2$ din relațiile (5) și (6) este dată prin raportare la primarul transformatorului. Valoarea raportată la primar se obține prin înmulțire cu pătratul raportului de transformare $C_2' = (C_t + C_D)k_t^2$ .		

Diferența dintre parametrii celor două transformatoare conduce la forme mult diferite ale impulsurilor generate, așa cum se poate observa din figura 5.



*Fig. 5- Formele impulsurilor de tensiune de comutație oscilante produse cu transformatorul de tip IMN (a) și TMU (b) – tabelul 3*

Pentru efectuarea părții experimentale a lucrării de laborator, se realizează montajul prezentat în fig. 6, semnificația notațiilor fiind aceeași ca și în fig. 4. Modulul sursei și al blocului de sincronizare se conectează la rețea. Conexiunea dintre acest modul și cel al condensatorului de încărcare și comutatorului static se realizează printr-un cablu multi-conductor (5), special destinat acestui scop. Conductoarele 7 și 8, din circuitul de măsurare, trebuie să fie în

construcție ecranată, iar conductorul 9 trebuie să fie de tip monofilar și de secțiune suficient de mare încât să nu se deformeze sub propria greutate.

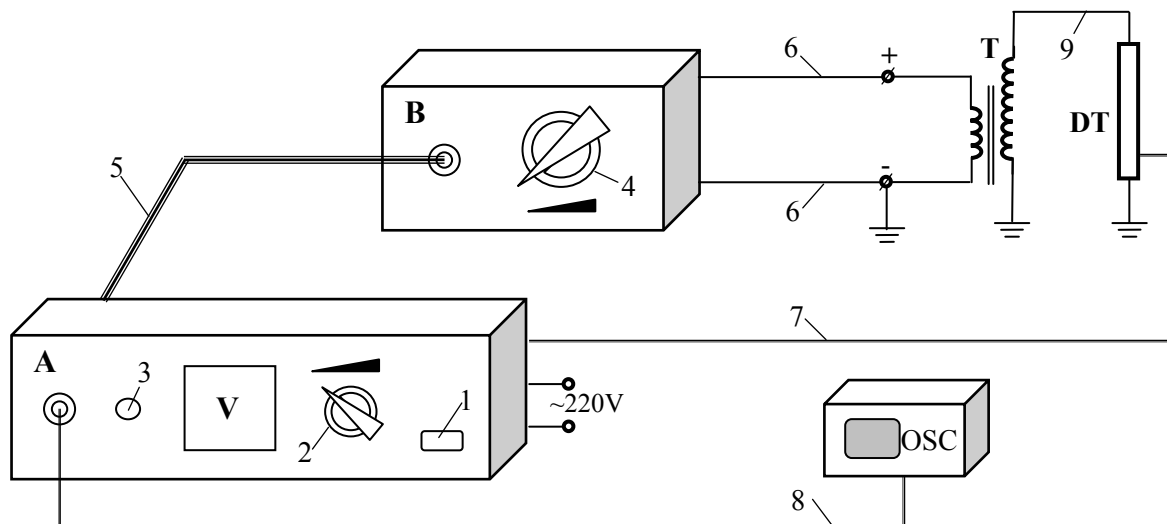


Fig. 6 – Schema montajului experimental: A – modulul sursei și al blocului de sincronizare; B – modulul condensatorului de joasă tensiune și al comutatorului static; T- transformator de încărcare; DT –divizor de tensiune; 1 – buton alimentare; 2 – potențiomtru reglare tensiune de încărcare; 3 – buton de declanșare impuls; 4 – comutator selectare valoare inductanță adițională; 5 ÷ 9 – conductoare de legătură.

Deoarece modulul **B** se află în zona de înaltă tensiune, se stabilește valoarea inductanței adiționale (selectorul 4) înaintea punerii sub tensiune a instalației.

Se alimentează osciloscopul digital, se setează regimul de trigerare pe „impuls singular” și se reglează nivelul de trigerare la o valoare pozitivă suficient de mare încât oscilografiera să nu fie declanșată de semnale parazite. Pentru a evita defectarea osciloscopului, acesta nu va fi instalat decât atunci când toate celelalte instalații de înaltă tensiune sunt deconectate.

Se alimentează modulele instalației (butonul 1) și se stabilește valoarea tensiunii de încărcare a bateriei de condensatoare  $C_1$  (potențiomtrul 2), la valorile cerute în tabelul 4. Deoarece sursa de alimentare este de putere mică, iar bateria de condensatoare are capacitate mare, acționarea potențiomtrului 2 trebuie să fie relativ lentă, pentru a nu depăși tensiunea de încărcare dorită. Atunci când tensiunea s-a stabilizat la valoarea dorită, se apasă, pentru scurt timp, butonul de declanșare a impulsului (3). Se va parcurge setul de încercări, referitor la nivelele de tensiune de încărcare, pentru valoarea reglată a inductanței adiționale, după care se repetă aceleași operații pentru toate celelalte valori ale inductanței adiționale.

De pe ecranul osciloscopului, se citește amplitudinea impulsului ( $U_{2max}$ ) și durata sa de creștere până la vârf ( $t_{cr}$ ). Amplitudinea impulsului de înaltă tensiune se obține prin înmulțirea valorii  $U_{2max}$  cu raportul de divizare al divizorului de tensiune (tabelul 3).



**Important:** Deoarece modulul constructiv al inductanței adiționale este în zona de înaltă tensiune a instalației, se acționează selectorul 4 numai după ce a fost descărcată bateria de condensatoare de joasă tensiune, precum și eventuala sarcină electrică reziduală din echipamentele de înaltă tensiune. Ultima operație se efectuează cu un scurtcircuit mobil.

**Tabelul 4. Rezultate**

$L_a$ (mH)	Calculate			Experimentale					
	$\Omega$ (rad/s)	$t_{cr}$ (ms)	$U_{2max}/k_t U_0$	$U_0 = 50 \text{ V}$		$U_0 = 100 \text{ V}$		$U_0 = 150 \text{ V}$	
				$t_{cr}$ (ms)	$U_{2max}$ (kV)	$t_{cr}$ (ms)	$U_{2max}$ (kV)	$t_{cr}$ (ms)	$U_{2max}$ (kV)
0									
4									
4,7									
5,4									
6,4									
7,8									
9,4									
$\omega = \dots\dots\dots$ (rad/s)									

Pentru scoaterea finală din funcțiune a instalației, se deconectează osciloscopul, se produce un ultim impuls pentru a descărca bateria de condensatoare  $C_I$ , după care potențiometrul 2 se aduce, rapid, la zero. Se deconectează sursa, acționând butonul 1.

Se trasează grafic următoarele funcții:

- ✓  $t_{cr} = f_1(L_a)$  – în același sistem de axe de coordonate, atât pentru rezultatele analitice, cât și pentru acelea obținute prin experiment - pentru acea valoare a tensiunii  $U_0$  pentru care acest parametru a fost măsurat cu cea mai bună precizie;
- ✓  $U_{2max} = f_2(L_a)$  – numai pentru rezultatele obținute experimental, pentru toate valorile tensiunii de încărcare a condensatorului de joasă tensiune.

Se compară rezultatele obținute pe cale analitică cu cele obținute prin experiment.