

Lucrarea 6 - PRODUCEREA ȘI MĂSURAREA TENSIUNILOR ÎNALTE DE IMPULS DE COMUTAȚIE

1. Noțiuni 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, supratensiunile de comutație sunt în majoritatea cazurilor impulsuri cu front lent, deși uneori pot avea și forma front rapid sau pot fi oscilant amortizate. 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 μ s, durata de semi-amplitudine (t_s) de 2500 μ s (figura 1), iar intervalul de timp t_d , în care valoarea tensiunii este mai mare de $0,9U_{max}$, este mai mare de 200 μ s.
- *Impuls de comutație combinat standardizat*: impuls de tensiune format din două componente 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 semi-amplitudine 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.

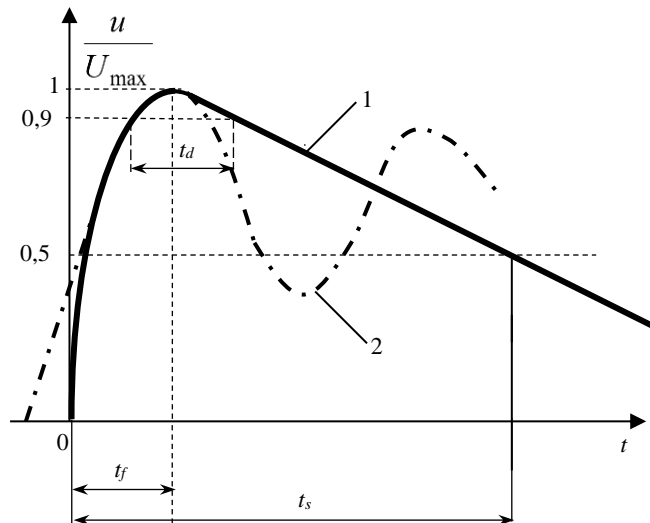


Fig. 1 – Impuls de tensiune de comutație standardizat ITC 250/2500:
 1 – impuls de tensiune de comutație; 2 – supratensiune de comutație.

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, un exemplu al unei astfel de unde fiind prezentat în figura 2.

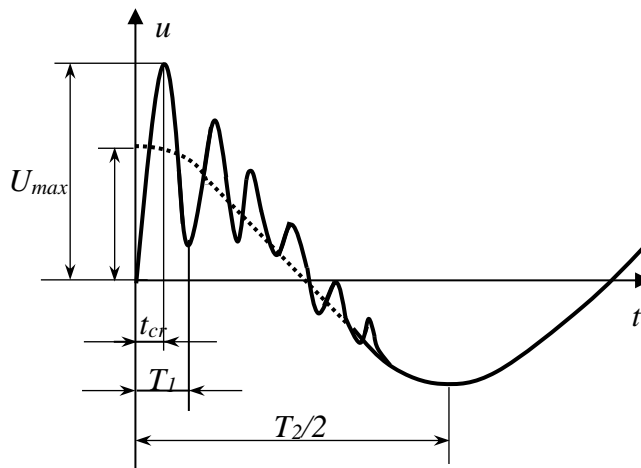


Fig. 2 – Impuls de tensiune de comutație oscilant amortizat

Impulsul oscilant amortizat este caracterizat printr-o durată a primei semiperioade cuprinsă între 2000 μ s și 3000 μ 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.

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 ($U_m > 245$ kV)

U_m	U_{ITT}	U_{ITC}			U_{I50Hz}
		Fază-pământ	Între faze, pentru stații	Izolație longitudinală	
(kV _{ef})	(kV _{ef})	(kV _{max})	(kV _{max})	(kV _{max})	(kV _{ef})
420	1425 1550	1050	1425 1550	950	630 680
787	2100	1425 1550	2400 2550	1175	-

U_m - tensiunea cea mai ridicată pentru echipament;
 U_{ITT} - tensiuni nominale de ținere la impuls de trăsnet;
 U_{ITC} - tensiuni nominale de ținere la impuls de comutație;
 U_{I50Hz} - tensiunea nominală de ținere la încercarea de scurtă durată cu frecvență industrială.

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 semi-amplitudine 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 [Ω]		
	R_{front}	R_{spate}	$R_{încărcare}$
ITT 1,2/50	60	268	7300
ITC 250/2500	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 figura 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 figura 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 pierderilor în cupru; R_m - rezistența corespunzătoare pierderilor în fier.

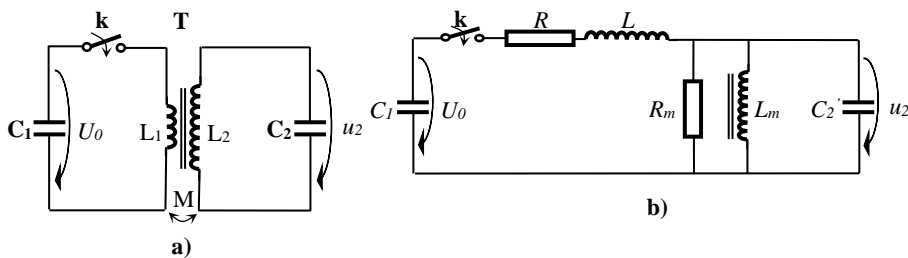


Fig. 3 – Generarea impulsului de tensiune oscilant amortizat:
a) - schema de principiu; b) – schema electrică echivalentă.

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, Ω , 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 figura 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, ω , corespunde descărcării celor două condensatoare pe ramura transversală a schemei echivalente. Această aproximație este, de asemenea, acceptabilă 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.

2. Determinări 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, precum și a componentei instalațiilor dedicate.

Astfel, în prima parte a lucrării se vor studia construcția și modul de utilizare a instalației de producere a impulsului de comutație oscilant amortizat, aceasta urmând a fi prezentată în detaliu în paragraful următor.

2.1. Prezentarea instalației din laborator

Pentru producerea și măsurarea de tensiune de comutație oscilant amortizat se vor utiliza un set de instalații și echipamente dispuse conform montajului prezentat în figura 4.

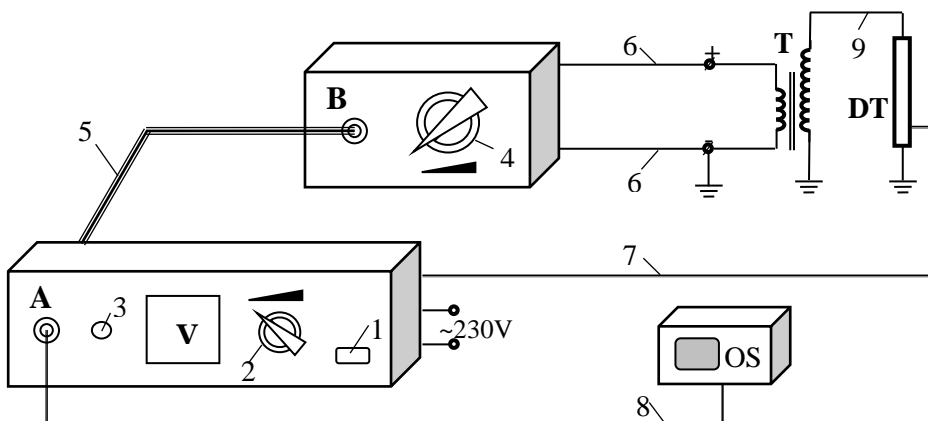


Fig. 4 – Schema montajului experimental utilizat pentru generarea și măsurarea impulsului de tensiune oscilant amortizat

Astfel, montajul experimental este realizat din: *A – modului sursei și al blocului de sincronizare; B – modulul condensatorului de joasă tensiune și al comutatorului static; T- transformator de încercare; 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.*

Montajul experimental al instalației este amplasat în *Laboratorul de Întăă Tensiune* al facultății, elementele componente fiind prezentate grafic în figura 5.



Fig. 5 – Detalii grafice asupra elementelor ce alcătuiesc instalația de producere a impulsului de tensiune de comutație, oscilant amortizat

Schema electrică simplificată a instalației de producere a impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat, existentă în laboratorul de înaltă tensiune este prezentată în figura 6.

Modulele 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.

Conexiunea dintre modulele A și B se realizează printr-un cablu multiconductor (5), special destinat acestui scop. Conductoarele 7 și 8, din circuitul de măsurare, sunt în construcție ecranată, iar conductorul 9 este de tip monofilar, având o secțiune suficient de mare încât să nu se deformeze sub propria greutate.

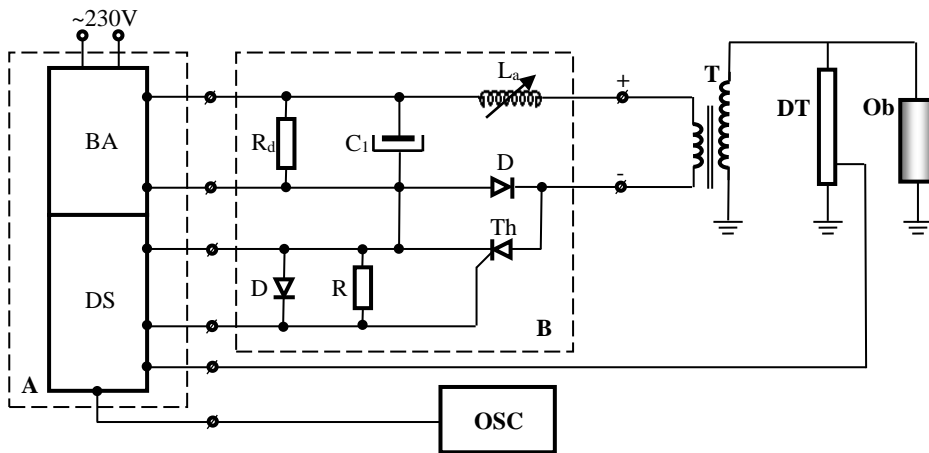


Fig. 6 – Schema bloc a instalației pentru generarea impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat

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, model Tektronix TDS 210, așa cum se poate observa și din detaliile prezentate în figura 7.



Fig. 7 – Conectarea osciloscopului digital pentru măsurarea 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 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.

2.2. Modul de lucru

Partea practică a lucrării vizează determinarea parametrilor impulsului de tensiune de comutație oscilant, și anume: *timpul de creștere*, respectiv *amplitudinea impulsului*. De asemenea, este studiată și influența conectării unei inductanțe adiționale asupra timpului de creștere a impulsului. Ambele obiective pot fi realizate atât prin *calcul analitic*, cât și prin *determinări experimentale*.

a. Determinarea analitică a parametrilor impulsului de tensiune de comutație

Parametrii impulsului de tensiune oscilant amortizat pot fi calculați cu ajutorul relațiilor (5) și (6), prezentate anterior în lucrare, considerând valorile parametrilor instalației de încercare din laborator prezentate în tabelul 3.

Transformatorul de încercare utilizat pentru realizarea montajului experimental, și prezentat anterior și în figura 5, este de tip IMN, parametrii acestuia urmând a fi folosiți în calculele analitice privind determinarea parametrilor impulsului de tensiune de comutație.

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: $U_n = 0,2/37,5 \text{ kV}$	Tensiunea nominală: $U_n = 0,2/125 \text{ kV}$
Condensatorul de joasă tensiune: $C_1 = 1000 \mu\text{F}$	Inductanța de magnetizare: $L_m = 35,5 \text{ mH}$	Inductanța de magnetizare: $L_m = 75 \text{ mH}$
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: $L = 1,6 \text{ mH}$	Inductanța de dispersie: $L = 0,546 \text{ mH}$
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: $k_t = 188$	$k_t = 625$

Astfel, pentru determinarea analitică este necesară parcurgerea următoarelor etape:

- se va determina mai întâi valoarea capacității echivalente, C_2' , conform expresiei:

$$C_2' = (C_t + C_D) \cdot k_t^2 \quad (7)$$

- se calculează pulsațiile celor două oscilații, ω și Ω , cu ajutorul relațiilor (5), cu mențiunea că în timp ce pulsația ω are o singură valoare, pulsația Ω se calculează inițial doar pentru inductanța de dispersie a transformatorului considerat, după care va fi recalculată considerând și valorile inductanței adiționale, L_a , prezentate în tabelul 3, care se adaugă inductanței de dispersie L ;
- cu relațiile (6) vor fi calculate valorile timpului de creștere, respectiv ale tensiunii maxime, considerând valorile pulsației Ω rezultate prin adăugarea succesivă a unei inductanțe adiționale din ce în ce mai mari;
- rezultatele obținute se completează în tabelul 4, prezentat în continuare;
- se fac aprecieri asupra modului în care modificarea inductanței adiționale influențează valoarea timpului de creștere a impulsului de tensiune de comutație oscilant amortizat.

Tabelul 4. Rezultatele determinărilor analitice și experimentale

L_a (mH)	Valori calculate			Valori obținute prin experiment					
	Ω (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)									

b. Determinarea experimentală a parametrilor impulsului de tensiune de comutație

Partea experimentală a lucrării vizează determinarea aceluiași parametri, și anume timpul de creștere a impulsului, respectiv amplitudinea acestuia, în condițiile modificării valorii inductanței adiționale, considerând valori diferite ale tensiunii de încărcare, U_0 , a condensatorului C_1 , și anume 50 V, 100 V, respectiv 150 V.

Pentru prelevarea datelor experimentale se va proceda conform indicațiilor de mai jos:

- se realizează montajul prezentat în figura 4, conectând modulul sursei blocului de sincronizare la rețea.
- se stabilește valoarea inductanței adiționale (selectorul 4) înaintea punerii sub tensiune a instalației, întrucât modulul B se află în zona de înaltă tensiune;
- se alimentează osciloscopul digital, se setează regimul de triggerare pe „impuls singular” și se reglează nivelul de triggerare la o valoare pozitivă suficient de mare încât oscilografierea 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 (potențiometrul 2), la valorile cerute în tabelul 4. Deoarece sursa de alimentare este de putere mică, iar bateria de condensatoare are capacitate mare, acționarea potențiometrului 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), iar prin apăsarea imediată a butonului *Start/Stop* de pe osciloscop se va memora pe ecranul acestuia forma de undă a impulsului generat; 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, valoarea acestuia fiind de 1000, așa cum rezultă din tabelul 3;
- se va parcurge setul de încercări, referitor la valorile tensiunii de încărcare, pentru valoarea reglată a inductanței adiționale, după care se repetă aceleași operații pentru toate celelalte valori ale inductanței adiționale. Valorile măsurate ale timpului de creștere și tensiunii maxime se trec în tabelul 4;
- toate modificările ulterioare ale valorii inductanței adiționale se vor realiza acționând 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;
- pentru scoaterea finală din funcțiune a instalației se deconectează osciloscopul, se produce un ultim impuls pentru a descărca bateria de condensatoare C_1 , după care potențiometrul 2 se aduce, rapid, la zero. Se deconectează sursa, acționând butonul 1.

Pentru interpretarea corectă a rezultatelor se vor trasa 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.