

SOLICITAREA CU IMPULS DE TENSIUNE A IZOLAȚIEI INTERNE A TRANSFORMATOARELOR

1. Baze teoretice

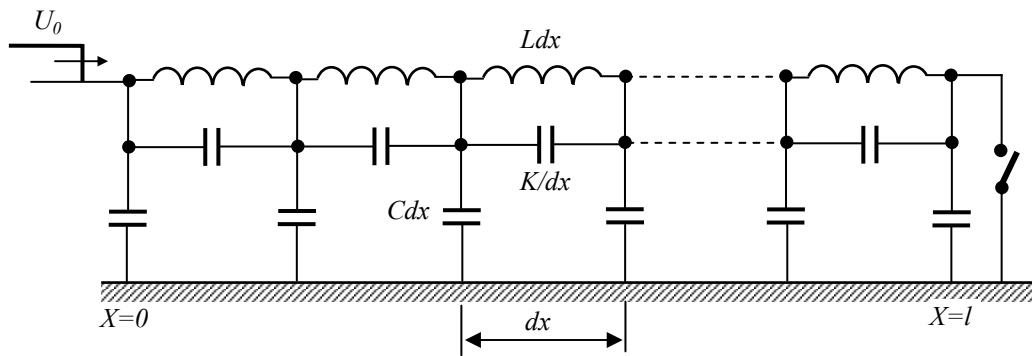
Transformatoarele de putere instalate în stațiile electrice de înaltă tensiune pot fi expuse undelor de supratensiune provenite de pe liniile electrice aeriene în urma loviturilor de trăsnet. Pătrunderea unor astfel de impulsuri rapide în înfășurările transformatorului, are ca urmare un proces tranzitoriu complex, în cadrul căruia apar oscilații de tensiune, care amplitudini pot deveni periculoase pentru izolație. Cunoașterea acestor fenomene are mare importanță pentru proiectarea și construcția transformatoarelor, astfel încât să reziste unor astfel de solicitări.

Evaluarea solicitărilor izolației la impuls de tensiune se poate face prin modelare fizică sau matematică. Studiul teoretic începe cu adoptarea unei scheme echivalente a înfășurării de transformator. O astfel de schemă, simplificată, valabilă teoretic pentru o bobină cilindrică într-un singur strat, infinit de lungă, schemă propusă de K.W.Wagner, este dată în fig.1, unde: L - inductivitatea bobinajului; C - capacitatea transversală, între înfășurare și părțile legate la pământ (miez și cuvă); K - capacitatea longitudinală, între spirele înfășurării. Toate acestea sunt parametri lineici (pe unitate de lungime a bobinajului). Folosind această schemă echivalentă și considerând că la intrarea în înfășurare se aplică un impuls de tensiune treaptă cu amplitudinea U_0 , rezultă, prin rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale care o descrie, relațiile care exprimă tensiunea în punctul aflat la distanța x de la începutul înfășurării și la momentul, relații diferite în funcție de modul de tratare a sfârșitului înfășurării.

Fig.1 Schema echivalentă simplificată a unei bobine de transformator

a) în cazul sfârșitului înfășurării legat la pământ (întrerupătorul I din fig.1 închis):

$$u(x,t) = U_0 \left[1 - \frac{x}{l} - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \sin \frac{n\pi \cdot x}{l} \cdot \cos \omega_n \cdot t \right],$$



unde

$$A_n = \frac{2}{n\pi \left[1 + \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right]}; \quad \omega_n = \frac{n\pi}{l \cdot \sqrt{LC \left[1 + \frac{K}{C} \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \right]}}; \quad n=1,2,3,\dots$$

Prin particularizare pentru momentele inițial ($t=0$) și final (la $t \rightarrow \infty$) ale regimului tranzitoriu rezultă repartițiile inițială și finală ale tensiunii de-a lungul înfășurărilor:

$$u(x,0) = U_0 \frac{\text{sh} \alpha \cdot (l-x)}{\text{sh} \alpha \cdot l}, \quad \text{în care } \alpha = \sqrt{\frac{C}{K}},$$

$$u(x,\infty) = U_0 \left(1 - \frac{x}{l} \right).$$

b) în cazul sfârșitului izolat al înfășurării (întrerupătorul I din fig.1 deschis) :

$$u(x,t) = U_0 \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{2l} \cos \Omega_n t \right],$$

unde

$$B_n = \frac{4}{n\pi \left[1 + \frac{K}{C} \left(\frac{n\pi}{2l} \right)^2 \right]}; \quad \Omega_n = \frac{n\pi}{2l \sqrt{LC \left[1 + \frac{K}{C} \left(\frac{n\pi}{2l} \right)^2 \right]}}, \quad n = 1, 3, 5, \dots$$

Repartițiile inițială și finală sunt date de relațiile:

$$u(x,0) = \frac{ch\alpha \cdot (l-x)}{ch\alpha l}, \quad u(x,\infty) = U_0.$$

În fig.2 sunt redată grafic formele repartițiilor tensiunii de impuls, pentru cele două moduri de tratare a sfârșitului înfășurării. De asemenea, sunt date valorile maxime ale oscilațiilor din timpul regimului tranzitoriu de-alungul înfășurării, $U_{max}(x)$. Din examinarea acestor grafice rezultă concluzii cu privire la solicitarea izolației înfășurărilor.

Solicitarea izolației între spire (longitudinală) este proporțională cu panta repartiției tensiunii de-alungul înfășurării, dU/dx . Dintre toate curbele din fig.2, panta cea mai mare o au repartițiile inițiale, $u(x,0)$, indiferent de tratarea sfârșitului înfășurării. Panta acestor curbe este maximă la intrarea în înfășurare, aceasta fiind deci zona cu solicitare maximă a izolației longitudinale. Reducerea valorii factorului α , respectiv a raportului C/K contribuie la reducerea acestei solicitări.

Solicitarea izolației transversale, între bobinaj și miez sau cuvă, depinde de amplitudinea tensiunii de impuls în înfășurare. Fig.2 arată că valorile cele mai mari ale tensiunii nu apar la momentele inițial și final ale regimului tranzitoriu ci între acestea, fiind datorat oscilațiilor specifice unor circuite LC. Astfel în cazul sfârșitului înfășurării legat la pământ, izolația transversală este maxim solicitată în prima treime a înfășurării, iar în cazul sfârșitului înfășurării izolat, la sfârșitul acesteia. Amplitudinea oscilațiilor rezultă, în general, cu atât mai mare, cu cât diferența între valorile inițială și finală ale tensiunii în înfășurare, este mai mare. Ca urmare reducerea valorii factorului α contribuie și la reducerea solicitării izolației transversale.

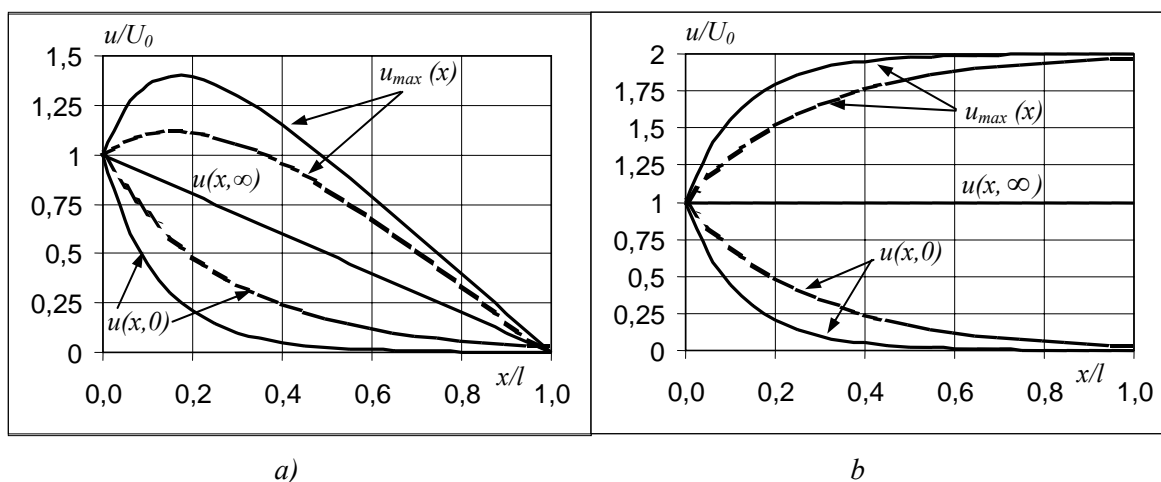


Fig.2. Repartiția tensiunii de impuls pe înfășurarea monofazăată de transformator:
 a) înfășurare cu sfârșitul legat la pământ; b) înfășurare cu sfârșitul izolat;
 cu linie plină – înfășurare normală; cu linie întreruptă – înfășurare întrețesută

Pentru reducerea solicitărilor izolației înfășurării datorate tensiunii de impuls, se pot aplica metode constructive în vederea reducerii valorii factorului α , respectiv de uniformizare

a repartiției tensiunii pe înfășurare, cele mai folosite fiind folosirea inelului de gardă sau a înfășurărilor întretesute.

2. Modelul electromagnetic combinat al transformatorului

O primă posibilitate de modelare a înfășurării de transformator este reducerea la scară a dimensiunilor reale, adică modelarea geometrică. Aceasta prezintă unele dezavantaje: necesită folosirea aceleași scări de modelare și pentru timp, respectiv reducerea duratelor frontului și semiamplitudinii unde de tensiune, micșorarea rezistivității conductorului de bobinaj și altele.

Neajunsurile modelării geometrice sunt înlăturate prin folosirea modelului electromagnetic combinat care este format din două părți:

- un model geometric al înfășurării transformatorului;
- o rețea de capacități care se conectează la modelul înfășurării.

Necesitatea adoptării acestei soluții de modelare rezultă din examinarea relațiilor dintre factorii de similitudine pentru parametrii originalului și modelul electromagnetic combinat, care se deduc din ecuațiile valabile pentru schema echivalentă din fig 1 și care sunt prezentate în tabelul 1. Pentru eliminarea dezavantajelor modelului geometric este potrivit a se adopta $p_t = 1$, iar pentru păstrarea pe model a aceluiași număr de spire de pe original, $p_w = 1$. Ca urmare rezultă relațiile înscrise pe ultima coloană din tabelul 1, în legătură cu care se pot face următoarele observații:

- relația $p_L = p_l$ rezultă din modelarea geometrică a înfășurării;
- relația $p_C = 1/p_l$ arată că dacă $p_l < 1$, datorită modelării geometrice, atunci rezultă $p_C > 1$, ceea ce nu se poate asigura prin modelare geometrică, de unde necesitatea folosirii unei rețele suplimentare de capacități, care se distribuie uniform de-a lungul înfășurării modelului, rezultând un lanț de cuadripoli;

Tabelul 1. Factorii de similitudine ai modelului electromagnetic combinat

Marimea	Simbol	Relații de similitudine	Relații între factorii de similitudine	
			rezultate	adoptate
Lungime	l	$l_m = p_l l_0$	$\frac{p_L p_C}{p_t^2} = 1$ $p_L = p_l p_w^2$ $p_u = \frac{p_w p_l^2}{p_t}$	p_l
Număr de spire	w	$w_m = p_w w_0$		1
Timp	t	$t_m = p_t t_0$		1
Capacitate	$C(K)$	$C_m = p_C C_0$		$1/p_l$
Inductivitate	L	$L_m = p_L L_0$		p_l
Tensiune	u	$u_m = p_u u_0$		p_l^2
Intensitate curent	i	$i_m = p_i i_0$		1
Rezistența	R	$R_m = p_R R_0$	$p_R = \frac{p_l p_w^2}{p_t}$	p_l

- relația $p_u = p_l^2$ ar impune reducerea amplitudinii impulsului de tensiune pe model, ceea ce ar fi necesar pentru reproducerea proceselor neliniare din miezul magnetic al transformatorului. În cazul în care acesta lipsește (așa cum se practică) tensiunea aplicată modelului poate fi de amplitudine oarecare;

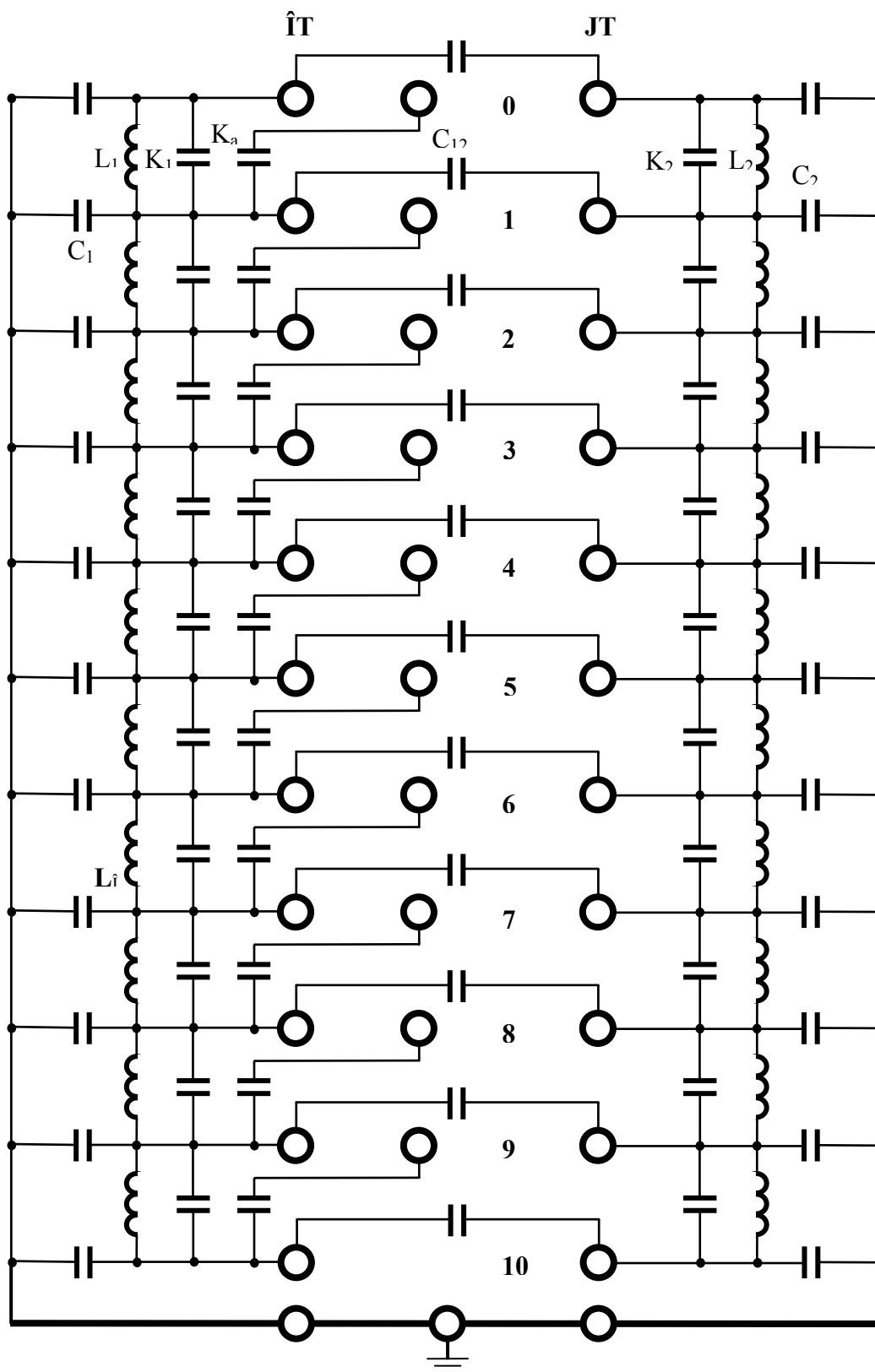


Fig.3 – Schema electrică a modelului electromagnetic combinat pentru o fază a transformatorului cu două înfășurări

- relația $p_R = p_L$ arată necesitatea reducerii pe model a rezistenței înfășurărilor, ceea ce practic este deosebit de dificil. Nerespectarea acestei relații face ca pe model amortizarea

să fie mai puternică decât pe original. Aceasta nu are însă importanță deosebită, pentru că solicitarea maximă este dată aproape totdeauna de prima oscilație, când amortizarea încă nu a intervenit semnificativ.

În fig.3 este prezentată schema electrică a transformatorului, așa cum apare și pe placa frontală a modelului din laborator.

Fiecare dintre cele două înfășurări este divizată în câte 10 secțiuni egale ca număr de spire, cărora le sunt atașate capacitățile transversale C_1 , respectiv C_2 ca și capacitatea dintre înfășurări C_{12} și capacitățile longitudinale K_1 , respectiv K_2 . Pentru simularea comportării unei înfășurări întregi, sunt prevăzute capacitățile adiționale K_a , care vor putea fi conectate în paralel cu capacitățile longitudinale K_1 ale înfășurării de înaltă tensiune.

3. Modul de lucru

Experimentul din laborator constă în determinarea repartiției tensiunii de impuls pe o înfășurare de transformator, folosind modelul electromagnetic combinat al unei faze de transformator cu două înfășurări prezentat în fig.3.

Se realizează montajul din fig.4, în care:

- GIR este un generator de impulsuri repetate, de joasă tensiune, care poate furniza impulsuri dreptunghiulare cu frecvență de repetiție reglabilă.
- OC este un osciloscop catodic.
- MEC este modelul electromagnetic combinat al transformatorului.

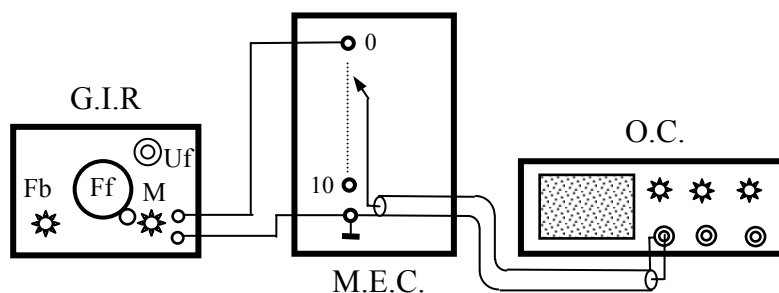


Fig.4 – Montajul experimental

Comenzile GIR: Fb-reglarea frecvenței în trepte; Ff-reglarea continuă a frecvenței; Uf- reglarea continuă a tensiunii de ieșire; M – forma tensiunii la ieșire.

Se alege forma dreptunghiulară a impulsurilor furnizate de GIR, iar frecvența de repetiție se alege astfel încât regimul tranzitoriu oscilant din înfășurare să se încheie pe durata unui impuls, iar acesta să ocupe mai mult de jumătate din lățimea ecranului.

Pentru fiecare bornă a înfășurării primare a modelului se măsoară, folosind caroiajul de pe ecranul osciloscopului, valorile tensiunii în momentele inițial și final ale regimului tranzitoriu $u(0)$, respectiv $u(\infty)$ ca și U_{max} , amplitudinea oscilației maxime a tensiunii, conform cu fig.5.

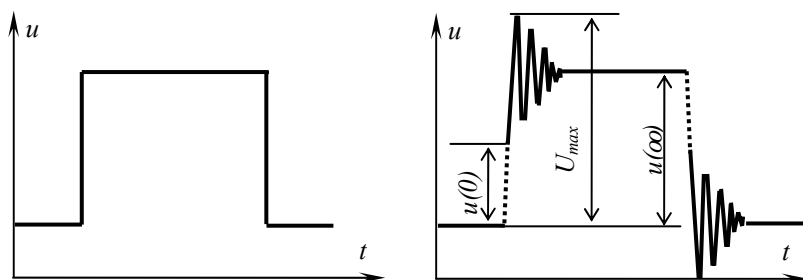


Fig.5-Formele impulsului de tensiune la începutul înfășurării și la după prima secțiune

Aceste operații se vor efectua cu sfârșitul înfășurării izolat și respectiv legat la pământ. În ambele situații, se va urmări efectul creșterii capacității longitudinale asupra repartiției tensiunii, repetând măsurătorile după conectarea condensatoarelor K_a în paralel cu K .

Pentru fiecare schemă a montajului, rezultatele se vor trece într-un tabel de date după următorul model.

Tabelul 2. – Rezultatele măsurătorilor pentru cazul

Borna		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x/l		0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
u(0)	(V)											
	$u(0)/U_0$											
u(∞)	(V)											
	$u(\infty)/U_0$											
U_{\max}	(V)											
	U_{\max}/U_0											

4. Prelucrarea rezultatelor

Se vor reprezenta grafic, în unități relative, repartițiile tensiunii pe înfășurare pentru toate cazurile studiate, conform cu fig.2.

Folosind mărimile capacităților longitudinale și transversale ale modelului de înfășurare ($C = pF$, $K = pF$, $K_a = pF$) și relațiile de calcul adecvate, se vor determina repartițiile inițială și finală ale tensiunii și se vor reprezenta grafic, pentru comparație, în sistemele de coordonate folosite pentru rezultatele experimentelor.

5. Bibliografie

1. Gavrițaș N., Olah R., Gușă M., Dudici M.,- Tehnica tensiunilor înalte. I.P. Iași, 1975, pag 325-336.
2. Hortopan G., Tehnica impulsului în laboratorul de înaltă tensiune. Editura tehnică, București, 1965, pag. 149-160.